Numerical Optimizer

SIMPLE マニュアル V23

株式会社NTTデータ数理システム

2021年1月

MATHEMATICAL SYSTEMS INCARNATION

目　次

第 1 章 Introduction

本マニュアルは最適化パッケージソフト Numerical Optimizer の利用経験者に対して，より強力な Numerical Optimizer の機能を説明するためのものです．

Numerical Optimizer には用途に応じて以下のマニュアルが準備されております．

（ア）Numerical Optimizer/SIMPLE マニュアル

（イ）Numerical Optimizer/SIMPLE チュートリアル

（ウ）Numerical Optimizer/Excel アドインマニュアル

（エ）Numerical Optimizer/SIMPLE 外部接続マニュアル

（オ）Numerical Optimizer/SIMPLE 例題集

（カ）Numerical Optimizer/PySIMPLE マニュアル

（キ）Nuorium スタートガイド

本マニュアル（ア）は，Numerical Optimizer の機能を詳細に説明するためのものです．読者にはある程度 Numerical Optimizer に馴染みがあることを想定しております．

初めて Numerical Optimizer をご利用の方は（イ）Numerical Optimizer/SIMPLE チュートリアルをご覧ください．

Numerical Optimizer と Microsoft Excel との連係機能をご利用の方は（ウ）Numerical Optimizer/Excel アドインマニュアルをご覧ください．

外部のプログラムから Numerical Optimizer を呼び出して利用されたい方は（エ）Numerical Optimizer/SIMPLE 外部接続マニュアルをご覧ください．

典型的な数理計画問題に対する Numerical Optimizer/SIMPLE の記述例を知りたい方は（オ）Numerical Optimizer/SIMPLE 例題集をご参照ください．

python 版のモデリング言語 PySIMPLE をご利用の方は（カ）Numerical Optimizer/PySIMPLE マニュアルをご覧ください．

Windows 版で GUI をご利用の方は（キ）Nuorium スタートガイドをご覧ください．

なお，一部マニュアルに関してはオンラインマニュアルを提供しております．オンラインマニュアルは https://www.msi.co.jp/nuopt/docs/index.html からご覧ください．

本マニュアル（ア）は Numerical Optimizer を実際に応用するにあたり必要十分な内容を含んでおりますが，Numerical Optimizer の機能全てを記載するものではありません．より細部の機能に関するご要望は nuopt-support@msi.co.jp までお寄せください．

本マニュアルは以下のような内容から構成されています．

2:Numerical Optimizer の基本事項の解説

3〜11:モデリング言語 SIMPLE の解説
12〜17:求解ソルバ Numerical Optimizer の解説
18〜19:特殊な数理計画問題と FAQ
付録:エラーメッセージ・アルゴリズムの解説，参考文献の紹介

第2章 Numerical Optimizerの基本事項

Numerical Optimizer を扱う上で必ず知っておくべき事項を，以下に列挙します．

2.1 Numerical Optimizer の構成

最適化パッケージソフト Numerical Optimizer は次の二つから構成されています．

- SIMPLE（数理計画問題を記述するためのモデリング言語）
- Numerical Optimizer（数理計画問題を解くための求解ソルバ）

本マニュアルで Numerical Optimizer と呼ぶ場合，上記二つをまとめたソフト全体を指すケースと，後者の求解ソルバのみを指すケースがありますのでご注意ください．

2.2 Numerical Optimizer の利用法

Numerical Optimizer を利用するには，GUI を用いる方法とコマンドラインから起動させる方法との二種類があります．Windows 版ではいずれの方法も提供されていますが，UNIX/Linux 版には GUI は無く，コマンドラインから起動させる方法のみが提供されています．

2.3 Numerical Optimizer の処理の流れ

2.2 で取り上げた通り Numerical Optimizer には二種類の利用方法がありますが，GUI を用いる方法に関しては「Nuorium スタートガイド」をご覧ください．以下ではコマンドラインでの処理の流れを説明します．

1. SIMPLE で数理計画問題（モデル）を記述
2. 1 で記述されたモデルを実行形式に変換する（コンパイル）
3. 実行形式を（必要ならばデータファイルを引数として与えて）起動させる

数理計画問題（モデル）の記述はテキストエディタをご利用ください．

Windows では `mknuopt.bat` により実行形式 `[モデルファイル名].exe` を作成します．一方，UNIX/Linux では `mknuopt` により実行形式 `[モデルファイル名]` を作成します．また，実行形式を起動させる際に UNIX/Linux では `./[モデルファイル名]` と指定します．なお，モデルファイル名に使える文字は，半角英数字および半角アンダースコア（_）のみです．

以下は Windows 版での手順です．

```
prompt% mknuopt.bat [モデルファイル名].smp
```

```
prompt% [モデルファイル名].exe [データファイル]
```

以下は UNIX/Linux 版における手順です.

```
prompt% mknuopt [モデルファイル名].smp
```

```
prompt% ./[モデルファイル名] [文字コード指定オプション] [データファイル]
```

同じ数理計画問題に対してデータだけ異なる問題を解く場合には，再度 2 の手順を踏む必要は無く 3 だけの手順で事足ります.

Numerical Optimizer V22 以降の UNIX/Linux 版では，従来の ufun という名前の void 型関数を含んだ.cc ファイルはモデルファイルとして使用できなくなりました．UNIX/Linux 版でも，Windows 版と同一の.smp 形式のモデルファイルをご利用ください.

2.3.1 UNIX/Linux 版におけるデータファイルの文字コード指定について

UNIX/Linux 版では，データファイルの文字コードを明示的に指定する必要があります．実行時に次のように指定してください.

- データファイルの文字コードが EUC-JP の場合

```
prompt% ./[モデルファイル名] -e [データファイル]
```

- データファイルの文字コードが Shift_JIS の場合

```
prompt% ./[モデルファイル名] -s [データファイル]
```

- データファイルの文字コードが UTF-8 の場合

```
prompt% ./[モデルファイル名] -w [データファイル]
```

なお，文字コードを指定しない場合，データファイルの文字コードは UTF-8 であるとみなされます.

```
prompt% ./[モデルファイル名] [データファイル 1] [データファイル 2]
```

上の場合，2 つのデータファイルの文字コードは，ともに UTF-8 であるとみなされます.

異なる文字コードのデータファイルを同時に読み込むことも可能です.

```
prompt% ./[モデルファイル名] -e [データファイル 1] -s [データファイル 2] -w [データファイル 3]
```

上の場合，データファイル 1 の文字コードは EUC-JP，データファイル 2 の文字コードは Shift_JIS，データファイル 3 の文字コードは UTF-8 とみなされます.

```
prompt% ./[モデルファイル名] [データファイル 1] [データファイル 2] -s [データファイル 3]
```

上の場合，データファイル 1 とデータファイル 2 の文字コードは UTF-8，データファイル 3 の文字コードは Shift_JIS とみなされます．

同じ文字コードのデータファイルが続く場合，2 つ目以降は文字コード指定を省略できます．

```
prompt% ./[モデルファイル名] -e [データファイル 1] [データファイル 2] [データファイル 3]
```

上の例の場合，3 つのデータファイルの文字コードは，全て EUC-JP であるとみなされます．

第3章 モデリング言語SIMPLEとは

SIMPLE はシステムの記述をなるべく人間に馴染みのある数学的な記述方法で簡単に行ない，実際のシミュレータやソルバなどが認識できるような表現に翻訳して所要の解析を行うことを目的とします．

本マニュアルでは SIMPLE で数理計画問題を記述したファイルを**モデルファイル**と呼びます．

SIMPLE はプログラミング言語 C++を用いて実装されています．SIMPLE を用いるに際して C++の知識を特別必要とすることはありませんが，一部 C++を理解していないと利用が難しい機能もあります．

以下の説明は，C++に関する知識をお持ちの方向けです．

SIMPLE の実体は C++のクラスライブラリです．式を特定のパーザプログラムによって解釈するのではなく，記述をコンパイル，実行して，ユーザのモデル記述内容の情報を取得します．その際に利用する仕組みは C++の演算オーバーロード機能です．具体的には SIMPLE 特有のクラスのオブジェクト間の演算を各クラス間の演算に対応して定義し，対応する特定の実装を適宜コールさせることによって，式の解釈を行います．

SIMPLE の式の記述の規則は，クラスオブジェクトの間の演算規則として記述され，コンパイラによって厳格にチェックを受けます．そのために，定義された範囲外の演算を記述すると，まずコンパイル時にエラーとなります．

第4章 SIMPLE一般事項

4.1 基本的な内容

4.1.1 行末のセミコロン;

SIMPLE ではモデルファイルの行末に半角セミコロン; を付ける必要があります．全角セミコロン；を用いてはいけません．

正しい

```
x + y <= 1;
```

誤り

```
x + y <= 1；
```

4.1.2 半角空白文字と改行

半角空白文字（半角スペース）と改行はモデル中では任意に用いる事ができます．全角空白文字（全角スペース）を用いる事はできません．例えば，次の二つは同じ意味です．

```
x+y<=3;
```

```
x + y <= 3;
```

次の二つも同じ意味です．

```
Variable x;
Parameter a;
```

```
Variable x;


Parameter a;
```

意味のかたまりを区切ってしまう場合は，半角空白文字や改行を入れてはいけません．以下の例は誤りです．

```
Vari able x;
```

```
x + y < = 3;
```

```
Vari
able x;
```

4.1.3 構成要素の順序

SIMPLE では，変数，定数や目的関数の定義順序に関する規則はありません．好きなタイミングで定義を行うことができます．例えば，以下の二つの記述は同じ意味です．

```
Variable x;
Parameter a;
```

```
Parameter a;
Variable x;
```

但し，定義していないものを先に使用する事は禁止されています．次の例は未定義の変数 x を用いて目的関数を定義しているので，誤りです．

```
Objective f;
f = x;
Variable x;
```

4.1.4 モデルファイル内で利用できない文字

SIMPLE 内で既に予約されている文字列（Variable, Parameter 等のクラス名）や，C++で既に使われている文字列（class, enum など）を定義することはできません（このように，使用が禁止されている文字列を予約語と呼びます）．以下の例はいずれも誤りです．

```
IntegerVariable enum;
```

```
Parameter Variable;
```

また，全角空白文字（全角スペース）や丸数字などの機種依存文字も使用することはできません．

4.1.5 name 引数に利用できない文字

name 引数として次の文字は利用できません．

- 二重引用符（"）
- 半角コンマ（,）
- 制御文字（\r，\n，\t など）

- 機種依存文字（丸数字，波ダッシュ「〜」など）

また，以下のような重複がある場合にはエラーとなります．

- name 引数の重複

  以下はその例です．

```
Variable x(name = "a"), y(name = "a");
```

- name 引数とインスタンス名の重複

  以下はその例です．

```
Variable x(name = "y");
Variable y;
```

4.1.6 データファイル内で利用できない文字

データファイル内で機種依存文字（丸数字，波ダッシュ「〜」など）は使用することができません．

4.2 高度な内容

4.2.1 外部接続における C++オブジェクトの宣言と代入

外部接続を用いて，C++プログラム内にモデリング言語 SIMPLE を記述する場合は，SIMPLE オブジェクト宣言時に代入文を書くと意図通りに動作しません．例えば以下のように書くことはできません．

```
Parameter a = sum(x[i], i);
```

上記のように書きたい場合は，宣言と代入を別にして書く必要があります．

```
Parameter a;
a = sum(x[i], i);
```

第5章 数理計画モデルの構成要素

以下は SIMPLE を用いて数理計画モデル（モデルファイル）を記述する際の構成要素の一覧です．ここでは全ての構成要素を列挙してはいませんが，大半の数理計画モデルは以下の構成要素の組合せで記述することができます．

構成要素名	SIMPLE 内の名称	機能
変数	Variable	変数を表す
目的関数	Objective	目的関数を表す
制約式	Constraint	制約式を表す
定数	Parameter	定数を表す
整数変数	IntegerVariable	整数変数を表す
範囲演算関数	sum, prod	$\sum$ や $\prod$ に相当する
式	Expression	頻出する数式に対して，簡単な別の表現を与える
対称行列	SymmetricMatrix	対称行列を表す
添字	Element	添字を表す
集合	Set	添字の動く範囲を表す
順序集合	OrderedSet	要素間に順序を持つ集合を表す
数列集合	Sequence	等差数列からなる集合を表す
条件式		制約式や代入文を制限する
条件分岐関数	ifelse	区間によって定義が異なる関数を定める際に用いる
数学関数	exp, sin, cos, log ...	数学関数を表す

以下の構成要素はアルゴリズム wcsp を用いる場合にのみ使用が可能です（ソフト制約関数，ブール関数は rcpsp でも用いる事ができます）．

構成要素名	SIMPLE 内の名称	機能
離散変数	DiscreteVariable	離散変数を表す
重複不能関数	alldiff	重複不能を表す
選択関数	selection	限定選択を表す
ハード制約関数	hardConstraint	ハード制約を表す
セミハード制約関数	semiHardConstraint	セミハード制約を表す
ソフト制約関数	softConstraint	ソフト制約を表す
ブール関数	Boolean	制約式を引数として，0-1 を返す

以下の構成要素はアルゴリズム rcpsp を用いる場合にのみ使用が可能です.

構成要素名	SIMPLE 内の名称	機能
アクティビティ	Activity	アクティビティを表す
要求資源	ResourceRequire	要求資源を表す
資源供給量	ResourceCapacity	資源供給量を表す
同一モード順序選択関数	modeOrder	同一モードを選択する
アクティビティ固定関数	fixActivity	アクティビティを固定する
アクティビティ固定解除関数	unfixActivity	アクティビティの固定を解除する

5.1 変数クラス Variable

変数は Variable というクラスで表現されます．具体的に x という変数を定義するには以下のように記述します.

```
Variable x;
```

複数の変数を一度に定義するには，集合クラス Set と添字クラス Element を用います．以下の例では，3 個の変数 y[1], y[2], y[3] を一度に定義しています.

```
Set S;
S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Variable y(index = i);
```

変数の初期値は=で設定できます．以下の例では x に初期値 3 を設定しています.

```
x = 3;
```

以下の例では y[1], y[2], y[3] に初期値 5 をまとめて設定しています.

```
y[i] = 5;
```

明示的な指定が無い場合，変数の初期値はアルゴリズムに応じて自動的に決定されます．アルゴリズムによっては初期値の設定を無視します.

5.2 目的関数クラス Objective

目的関数は Objective というクラスで表現されます．目的関数自身の定義と，目的関数の構造の定義は別々に行う必要があります．例えば $2x + 3y$ という目的関数（最小化）を定義したい場合，次のように記述します.

```
Objective f(type = minimize);
f = 2 * x + 3 * y;
```

以下の記述はいずれも誤りです.

```
Objective 2 * x + 3 * y (type = minimize);
```

```
Objective f = 2 * x + 3 * y (type = minimize);
```

目的関数を定義する際，扱う問題が最小化問題である場合は引数に type = minimize を指定するか，type =を省略します．一方，最大化問題である場合は引数に type = maximize を指定します.

```
Objective f(type = minimize); // 最小化問題
Objective f; // 最小化問題
Objective f(type = maximize); // 最大化問題
```

目的関数に添字をつける事はできません．例えば，以下の記述は誤りです.

```
Objective f(index = i, type = minimize);
f[i] = 2 * x[i] + 3 * y[i];
```

Minimize, Maximize という糖衣構文もあります.

```
Minimize f; // Objective f(type = minimize); と同じ
Maximize f; // Objective f(type = maximize); と同じ
```

5.3 制約式クラス Constraint

制約式は Constraint というクラスで表現されます．SIMPLE で表現可能な制約式は，等式制約（==を使用）及び等号付不等式制約（<=, >=を使用）の二種類です．**等式制約に用いる演算子は=ではなく，==であることに注意してください**．具体的に $x+y=1$ という制約式を定義するには次のように記述します.

```
x + y == 1;
```

$x-2y \leq 0$ という制約式を定義するには次のように記述します.

```
x - 2 * y <= 0;
```

制約式自身の定義は必ずしも必要ではありませんが，以下の記述は上記と同じ意味です．解ファイルにおいて，制約式に対する双対変数等を取得したい場合には，制約式自身の定義を行うと，検索が容易です.

```
Constraint co;
co = x - 2 * y <= 0;
```

等号の付かない不等式を取り扱う事はできません．次の記述は誤りです．

```
x - 2 * y < 0;
```

複数の制約式を一度に定義するには，集合クラス Set と添字クラス Element を用います．以下の例では，3 個の制約式 $x_1 - 2y_1 \leq 0, x_2 - 2y_2 \leq 0, x_3 - 2y_3 \leq 0$ を一度に定義しています．

```
Set S;
S = "1 2 3";
Element i(set = S);
x[i] - 2 * y[i] <= 0;
```

制約式自身の定義を行う場合には，以下のようになります．

```
Set S;
S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Constraint co(index = i);
co[i] = x[i] - 2 * y[i] <= 0;
```

不一致制約を表す演算子!=を用いることはできません．以下の記述は誤りです．

```
x + y != -1;
```

ただし，アルゴリズム wcsp を使用する際には不一致制約を用いることができます．

バージョン 10 より導入された SDP ソルバ（lsdp, trsdp）では，対称行列の半正定値制約を取り扱う事ができます．次の例では対称行列 X の半正定値制約を記述しています．

```
SymmetricMatrix X((i, j));
X >= 0;
```

対称行列>= 0 を記述する事で，半正定値制約を表現できます．右辺には 0 以外のスカラー値を用いることもできます．この場合，右辺値は左辺行列の最小固有値を意味します．例えば，次の例は行列 X の最小固有値が 2 つまり，$X - 2E \geq 0$ であることを意味します．

```
X >= 2;
```

不等号>=を逆向きに書く事はできません．例えば，次の記述は誤りです．

```
X <= 0;
```

右辺値に行列を記述することはできません．例えば次の記述は誤りです．

```
SymmetricMatrix X((i, j));
SymmetricMatrix Y((i, j));
X >= Y;
```

複数の半正定値制約を，一括して設定する事は可能です．

```
SymmetricMatrix X(index = n, (i, j));
X[n] >= 0;
```

半正定値制約からは，solve() 後に双対行列の値を取得することができます．下記の通り制約が定められているとします．

```
SymmetricMatrix X((i, j));
Constraint c;
c = X >= 0;
```

このとき，solve() 後に下記の通り setDualMatrix 関数を呼ぶことで，双対行列の値を得ることができます．

```
Parameter dM(index = (i, j));
dM.setDualMatrix(c);              //dM に双対行列の値が格納される
```

ただし，Parameter の添字が属する集合と SymmetricMatrix の添字が属する集合が一致していない場合や，添字付きの半正定値制約を用いている場合，双対行列の取得機能は利用できません．例えば，下記の用法はいずれも誤りです．

```
Parameter dM(index = (i, k)); // 添字 k の属する集合が異なる
dM.setDualMatrix(c); // 添字の集合が一致しないので不可
```

```
SymmetricMatrix X(index = k, (i, j));
Constraint c(index = k);
c[k] = X[k] >= 0;


Parameter dM(index = (i, j));
dM.setDualMatrix(c[0]);// 添字付きの半正定値制約は不可
```

```
Parameter dMs(index = (k, i, j));
dMs.setDualMatrix(c); // 添字の次元が一致しないので不可
```

5.4 定数クラス Parameter

定数は Parameter というクラスで表現されます．具体的に a という定数を定義するには以下のように記述します．

```
Parameter a;
```

複数の定数を一度に定義するには，集合クラス Set と添字クラス Element を用います．以下の例では，3 個の定数 b[1], b[2], b[3] を一度に定義しています．

```
Set S;
S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Parameter b(index = i);
```

以下の例では，6 個の定数 c[1，p, c[1，q], c[2，p], c[2，q], c[3，p], c[3，q] を一度に定義しています．

```
Set S;
Set T;
S = "1 2 3";
T = "p，q";
Element i(set = S);
Element j(set = T);
Parameter c(index = (i，j));
```

定数の値は=で設定します．定数の値を明示的に指定しない場合は，自動的に 0 が設定されます．

以下の例では，定数 a に 3 を設定しています．

```
a = 3;
```

以下の例では定数 b[1], b[2], b[3] に 5 をまとめて設定しています．

```
b[i] = 5;
```

個別に設定する場合は，以下のように記述します．

```
b[1] = 5;
b[2] = 5;
b[3] = 5;
```

添字が複数の場合は，まとめて設定する場合と個別に設定する場合の記述が異なります．以下の例では定数 c[1，p], c[1，q], c[2，p], c[2，q], c[3，p], c[3，q] に 6 をまとめて設定しています．

```
c[i，j] = 6;
```

個別に設定する場合は，添字をダブルクォート"で囲む必要があります．具体的には以下のように記述します．

```
c["1，p"] = 6;
c["1，q"] = 6;
```

```
c["2, p"] = 6;
c["2, q"] = 6;
c["3, p"] = 6;
c["3, q"] = 6;
```

定数の値は，モデルファイル内で設定する以外に，データファイルから設定する方法もあります．データファイルから設定する場合は，Parameter の引数に name を付ける必要があります．以下は，定数 a に 3 をデータファイル foo.dat から設定する場合の例です．

モデルファイル内

```
Parameter a(name = "cost");
```

foo.dat 内

```
cost = 3;
```

name で設定する名前はダブルクォート"で囲む必要があります．名前に空白や機種依存文字を用いる事はできません．name を省略した場合，モデルファイル内で定義された名前であるとみなされます．即ち，以下の二つは同等です．

```
Parameter a;
```

```
Parameter a(name = "a");
```

以下は，定数 b[1], b[2], b[3] に 5 をデータファイル foo.dat から設定する場合の例です．データファイルから値を設定する場合，まとめて設定する方法は無く，個別に設定する方法のみが存在します．

モデルファイル内

```
Parameter b(name = "b");
```

foo.dat 内

```
b = [1] 5 [2] 5 [3] 5;
```

以下は，定数 c[1, p], c[1, q], c[2, p], c[2, q], c[3, p], c[3, q] に 6 をデータファイル foo.dat から設定する場合の例です．モデルファイルから設定する場合と異なり，添字をダブルクォートで囲む必要はありません．

モデルファイル内

```
Parameter c(name = "c");
```

foo.dat 内

```
c = [1, p] 6 [1, q] 6
    [2, p] 6 [2, q] 6
    [3, p] 6 [3, q] 6;
```

データファイルの種類や書式に関するより詳細な説明は「8 データファイル」を参照ください.

5.4.1　Parameter に対する漸化式による値定義

Parameter に対して漸化式により値を定義する事ができます. Parameter 以外に対しては, 漸化式による定義はできません. 下記は漸化式による Parameter の値定義記述の一例です.

モデルファイルに記述する方法

```
Set I(name = "I"); Element i(set = I);
I = "1 .. 10";
Parameter P(name = "P", index = I);

// 漸化式記述
startRecurrenceRelation();
P[1] = 1; P[2] = 1;
P[i + 2] = P[i] + P[i + 1], i + 2 < I;
endRecurrenceRelation();
```

上記の例のように漸化式部分は漸化式開始指示関数 startRecurrenceRelation() と漸化式終了指示関数 endRecurrenceRelation() とで囲む必要があります. 上記の例の i + 2 < I のように Parameter の定義中の添字が添字集合を超えないように, 条件式で添字範囲を指定するのを忘れないでください. 単一の Parameter に対してだけではなく, 下記のように複数の Parameter が複合した複雑な漸化式も定義する事もできます.

複雑な漸化式記述

```
Set I(name = "I");
Element i(set = I);
I = "1 .. 10";
Parameter P(name = "P", index = I);
Parameter Q(name = "Q", index = I);

// 漸化式記述
startRecurrenceRelation();
P[1] = 1; Q[1] = 2;
P[i + 1] = 2 * P[i] - 5 * Q[i], P[i] >= 0, i + 1 < I;
P[i + 1] = -3 * P[i] + Q[i], P[i] < 0, i + 1 < I;
Q[i + 1] = -P[i] - 2 * Q[i], Q[i] >= 0, i + 1 < I;
```

```
Q[i + 1] = P[i] - 3 * Q[i], Q[i] < 0, i + 1 < I;
endRecurrenceRelation();
```

漸化式で定義した Parameter は endRecurrenceRelation() 以降普通の Parameter と同様に扱うことができます．なお漸化式定義中で下記に挙げる記述を行うことはできませんのでご注意ください．

- 定義が循環する記述（a[i] = a[i] のような記述や a[i] = b[i] かつ b[i] = a[i] のような記述）
- 漸化式定義対象のパラメータの値取得が必要な記述 (例えば，パラメータ a が漸化式で定義されている最中の a.val.print() など)
- setOf 関数の使用
- 制約式の記述
- 目的関数の記述
- 漸化式の評価時に添字が添字集合を超えてしまうような記述（例えば a[i]=a[i + 1] では評価時に i の値が上昇し続け i の添字集合の範囲を超えてしまいます）

上記に該当するような記述を行った場合実行時エラーとなります．

5.4.2 double 型への変換

定数 Parameter は値を double 型に変換できます．変換の際は val メソッドを通じて asDouble 関数を使います．

```
double d;
Parameter a;
d = a.val.asDouble(); // a の値を double 型にする．
```

これにより，例えば Parameter の値で求解オプションを設定できます．

```
Parameter maxtim(name = "最大計算時間");
options.maxtim = maxtim.val.asDouble();
```

5.4.3 char*型への変換

定数 Parameter は値を char*型に変換できます．変換の際は val メソッドを通じて asChar 関数を使います．なお，asChar 関数は 1024 バイトまでの文字列に対応しています．

```
Parameter OutFileName(name = "OutFileName");
char *filename;
OutFileName.val.asChar(filename); // パラメータから文字列値の取り出し
 ...
delete [] filename; // 文字列値の取り出しのために確保した filename の領域を解放する
```

5.5 整数変数クラス IntegerVariable

整数変数は IntegerVariable というクラスで表現されます．具体的に x という整数変数を定義するには以下のように記述します．

```
IntegerVariable x;
```

複数の整数変数を一度に定義するには，集合クラス Set と添字クラス Element を用います．以下の例では，3 個の整数変数 y[1], y[2], y[3] を一度に定義しています．

```
Set S;
S = "1 2 3";
Element i(set = S);
IntegerVariable y(index = i);
```

特に 0-1 のみの値を取る整数変数は，type = binary を引数に持たせる事で定義されます．以下では z という 0-1 変数を定義しています．

```
IntegerVariable z(type = binary);
```

複数の引数を持たせる場合，順序は任意です．以下の二表現は同様の意味を持ちます．

```
IntegerVariable z(type = binary, index = i);
```

```
IntegerVariable z(index = i, type = binary);
```

5.6 範囲演算関数 sum, prod

数式における $\sum$ や $\prod$ に類する機能として，SIMPLE では範囲演算関数として，sum 関数と prod 関数が提供されています．次の例では，制約式 $\sum_{i=1}^{3} x_i = 10$ を記述しています．

```
Set S;
S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Variable x(index = i);
sum(x[i], i) == 10;
```

上の記述を sum 関数を使わずに書くと次のようになります．

```
Set S;
S = "1 2 3";
Element i(set = S);
```

```
Variable x(index = i);
x[1] + x[2] + x[3] == 10;
```

次の例では，制約式 $\prod_{i=1}^{3} x_i = 20$ を記述しています．

```
Set S;
S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Variable x(index = i);
prod(x[i], i) == 20;
```

上の記述を prod 関数を使わずに書くと次のようになります．

```
Set S;
S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Variable x(index = i);
x[1] * x[2] * x[3] == 20;
```

sum 関数は複数の添字に対して適用する事もできます．次の例では，制約式 $\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{2} a_i b_j y_{ij} = 10$ を記述しています．

```
Set S = "1 2 3";
Set T = "1 2";
Element i(set = S);
Element j(set = T);
Variable y(index = (i, j));
Parameter a(index = i);
Parameter b(index = j);
sum(a[i] * b[j] * y[i, j], (i, j)) == 10;
```

次のように記述することも可能です．

```
Set S = "1 2 3";
Set T = "1 2";
Element i(set = S);
Element j(set = T);
Variable y(index = (i, j));
Parameter a(index = i);
Parameter b(index = j);
sum(sum(a[i] * b[j] * y[i, j], j), i) == 10;
```

条件式を用いて，和や積を取る範囲を制限する事もできます．次の例では，制約式 $\sum_{i=3}^{5} x_i = 10$ を記述しています．

```
Set S;
S = "1 2 3 4 5";
Element i(set = S);
Variable x(index = i);
sum(x[i], (i, i >= 3)) == 10;
```

次の例では，制約式 $\sum_{i \in T} x_i = 10$，$\sum_{i \notin T} x_i = 20$ を記述しています．

```
Set S = "p q r s";
Set T(superSet = S);
T = "p r";
Element i(set = S);
Variable x(index = i);
sum(x[i], (i, i < T)) == 10;
sum(x[i], (i, i > T)) == 20;
```

5.7 対称行列クラス SymmetricMatrix

対称行列は SymmetricMatrix というクラスで表現されます．対称行列自体の定義と，対称行列の構造の定義は別々に行う必要があります．例えば，次のような二次正方対称行列を定義したいとします．

$$X = \begin{pmatrix} x+3 & 4y+1.5z \\ 4y+1.5z & 2x+10y \end{pmatrix}$$

この場合，以下のように記述します．

```
Set S = "1 2";
Element i(set = S), j(set = S);
Variable x, y, z;
SymmetricMatrix X((i, j));
X["1, 1"] = x + 3;
X["1, 2"] = 4 * y + 1.5 * z;
X["2, 2"] = 2 * x + 10 * y;
```

対角要素以外の成分の定義は上下三角部分いずれか一方に関してのみ定義してください．上記の例では [1,2] 成分が定義されているので，[2,1] 成分を定義する必要はありません．

対称成分が重複して定義された場合は，先に定義された方は無視されます．例えば，

```
X["1, 1"] = x + 3;
X["1, 2"] = 1.5 * y + 4 * z; // 次の [2,1] 要素の定義で打ち消される
X["2, 1"] = 4 * y + 1.5 * z;
X["2, 2"] = 2 * x + y;
```

は，次の行列を定義している事になります．

$$X = \begin{pmatrix} x+3 & 4y+1.5z \\ 4y+1.5z & 2x+y \end{pmatrix}$$

Variable x,y,z に添字を付けて，係数に対しても Parameter を導入すれば，行列の定義を一括して行う事もできます．以下の例をご覧ください．

```
Set S = "1 2";
Set T = "1 2 3";
Element i(set = S), j(set = S);
Element k(set = T);
Variable x(index = k);
Parameter a(index = (k, i, j));
Parameter b(index = (i, j));
SymmetricMatrix X((i, j));
// 上三角部分を定義
a["1, 1, 1"] = 1;
a["1, 2, 2"] = 2;
a["2, 1, 2"] = 4;
a["2, 2, 2"] = 1.5;
a["3, 1, 2"] = 10;
b["1, 1"] = 3;
X[i, j] = sum(a[k, i, j] * x[k], k) + b[i, j], i <= j;
```

この例では，行列 $X = \begin{pmatrix} x_1+3 & 4x_2+10x_3 \\ 4x_2+10x_3 & 2x_1+1.5x_2 \end{pmatrix}$ を定義している事になります．

対称行列に対しては，制約として半正定値制約を課す事ができます．半正定値制約を課す場合，右辺に>= 0 を記述する必要があります．次の例では対称行列 X の半正定値制約を記述しています．

```
SymmetricMatrix X((i, j));
X >= 0;
```

右辺には 0 以外のスカラー値を用いることもできます．この場合，右辺値は左辺行列の最小固有値を意味します．例えば，次の例は行列 X の最小固有値が 2 つまり，$X - 2E \geq 0$ であることを意味します．

```
X >= 2;
```

次の記述は誤りです．

```
SymmetricMatrix X((i, j));
SymmetricMatrix Y((i, j));
X >= Y;
```

複数の対称行列を一括して定義する事もできます．例えば，次の例では対称行列 $X_1, .., X_{10}$ を一括して定義しています．

```
Set S = "1 2";
Element i(set = S), j(set = S);
Set N = "1 .. 10";
Element n(set = N);
SymmetricMatrix X(index = n, (i, j));
```

対称行列自体の添字 n には index =を付ける必要があります．個別の対称行列内部の添字 (i,j) には index =を付与してはいけません．

複数の対称行列に対して一気に半正定値制約を設定するには，次のように記述します．

```
SymmetricMatrix X(index = n, (i, j));
X[n] >= 0;
```

大規模な行列を考える場合，定数並びに行列成分を疎形式で定義することで高速な求解が可能です．次の例は少し難解ですが，Parameter a, b が出現する添字に絞って行列成分を定義しています．

```
Set S, T;
Element i(set = S), j(set = S);
Element k(set = T);
Variable x(index = k);
Set A(dim = 3, superSet = (T, S, S));
Set B(dim = 2, superSet = (S, S));
Parameter a(name = "a", index = A);
Parameter b(name = "b", index = B);
A = A | "1" * B;
B = A.slice(2, 3);
S = A.slice(1);
T = A.slice(2) | A.slice(3);
SymmetricMatrix X((i, j));
X[i, j] = sum(a[k, i, j] * x[k], (k, (k, i, j) < A)) + b[i, j], (i, j) < B;
```

上記の例では Parameter a, b の値を外部ファイルから与えるケースを想定しています．外部ファイルから自動代入によって定まる a, b の添字の範囲がそれぞれ集合 A, B であると定められています．行列内部での疎形式定義の為に，集合 A, B をそれぞれ加工します．また，変数の範囲を示す集合 T, 行列内の添字の範囲を示す集合 S は，いずれも集合 A から作成されています．

具体的に以下のようなデータファイルが与えられたとします.

```
a =
[1, 1, 1] 1
[1, 2, 3] 3
[2, 2, 2] 2
[3, 2, 2] 0.5
[3, 3, 3] 5
;
b =
[1, 1] 10
[1, 2] 4
;
```

これは，次の対称行列を定義している事に相当します.

$$X = \begin{pmatrix} x_1 + 10 & 4 & \\ 4 & 2x_2 + 0.5x_3 & 3x_1 \\ & 3x_1 & 5x_3 \end{pmatrix}$$

自動代入の段階では，集合 A の要素は

$$\{(1,1,1),(1,2,3),(2,2,2),(3,2,2),(3,3,3)\}$$

集合 B の要素は

$$\{(1,1),(1,2)\}$$

です．これに対して以下の加工を施す事により，

```
A = A | "1" * B;
B = A.slice(2, 3);
```

集合 A の要素は

$$\{(1,1,1),(1,1,2),(1,2,3),(2,2,2),(3,2,2),(3,3,3)\}$$

集合 B の要素は

$$\{(1,1),(1,2),(2,2),(2,3),(3,3)\}$$

となります．なお，`"1" * B` では，1 個の要素（1）からなる集合と集合 B の直積を求めています．また，`A | "1" * B` により集合 A と（直積）集合`"1" * B` の和集合を求めています.

関数 `slice()` は，集合の一部を射影して切り出す機能を有しています．なお，関数 `slice()` については引数を最大 5 個とることができます.

上記の例では，集合 A の第二第三成分を切り出して，集合 B に渡しています．この結果 |A| = 6, |B| = 5 となりましたが，特に何の工夫もしない場合 |A| = 27, |B| = 9 となり，内部で余分な領域を必要とします．特に行列の次元が大きい場合には，パフォーマンスにかなりの違いが生じます.

5.8 行列クラス Matrix

一般の行列は Matrix というクラスで表現されます．対称行列と同様に，一般行列自体の定義と，一般行列の構造の定義は別々に行う必要があります．例えば，次のような 2×3 の行列を定義したいとします．

$$X = \begin{pmatrix} x+y & 0 & 1 \\ -1 & 2 & z \end{pmatrix}$$

この場合，以下のように記述します．

```
Set S = "1 2";
Set T = "1 2 3";
Element i(set = S), j(set = T);
Matrix X((i, j));
Variable x, y, z;
X["1, 1"] = x + y;
X["1, 2"] = 0;
X["1, 3"] = 1;
X["2, 1"] = -1;
X["2, 2"] = 2;
X["2, 3"] = z;
```

i は行列の行の添字，j は行列の列の添字です．Matrix X((i, j)) に表れる二重括弧を省略して Matrix X(i, j) と記述することはできません．

行列クラスを用いて，正方行列を定義することも可能です．ただし，対称行列とは異なり，上下三角部分いずれか一方に関して定義しても対称化されませんので，非対称な行列を定義することができます．

複数の行列を一括して定義することもできます．例えば，次の例では一般行列 $X_1,\ldots,X_{10}$ を一括して定義しています．

```
Set S = "1 2";
Set T = "1 2 3";
Element i(set = S), j(set = T);
Set N = "1 .. 10";
Element n(set = N);
Matrix X(index = n, (i, j));
```

行列自体の添字 n には index =を付ける必要があります．個別の行列内部の添字 (i, j) には index =を付与してはいけません．

ここでは添字付けられた行列を行列族とよぶことにします．行列族の各々は行列ですが，行列族から行列を参照するには，丸括弧 () か.at() 関数を使います．

```
Matrix X(index = n, (i, j));
Matrix Z((i, j));
Z = X(1) + X(2);
Z = X.at(1) + X.at(2);
// Z = X[1] + X[2]; 違法
```

さらに行列の成分を参照する場合には，丸括弧や.at() の後に続けて角括弧 [] を使って参照します．対称行列の場合と同様に，行列族の添字と行列の成分の添字を連結して角括弧 [] だけで参照することもできます．

```
Matrix X(index = n, (i, j));
Matrix Z((i, j));
Z["1, 1"] = X(1)["1, 1"] + X(2)["1, 1"];
Z["1, 1"] = X.at(1)["1, 1"] + X.at(2)["1, 1"];
Z["1, 1"] = X["1, 1, 1"] + X["2, 1, 1"];
```

上の三つの代入文はどれも同じ意味に解釈されます．

行列クラスには行列演算が定義されています．二つの行列の型が整合すれば加算，減算，乗算を行うことができます．行列同士の加減乗にはそれぞれ，+, -, *演算子が対応します．また，行列やベクトルやそれらの演算で表現された制約式も定義することができます．通常の制約式と同様に，等式制約には==を使い，不等式制約には，>=や<=を使います．行列クラスは添字を 2 つ内包した Expression クラスとみることができます．添字を 2 つ持った Expression を用いて行列の加減乗に相当する演算を定義すれば，行列クラスを使わなくても行列演算は可能ですが，行列クラスを使えば記述が容易に済みます．

```
Set S = "1 2 3";
Set T = "1 2 3";
Element i(set = S), j(set = T);
Matrix X((i, j)), Y((i, j)), Z((i, j));
Z = X + Y;          // 行列の足し算
Z = X - Y;          // 行列の引き算
Z = X * Y;          // 行列の掛け算
Z = 2 * X;          // 行列の定数倍
Z = X / 2.0;        // 行列の全成分を 2.0 で割る
```

行列の足し算や引き算では行列のサイズは変わりませんが，掛け算ではサイズが変わることがあります．行列の掛け算の結果を行列に代入する際には行列の宣言時に与えた行列のサイズに注意します．

行列クラスには，加減乗の他に行列固有の演算が関数として用意されています．行列のトレース（対角和）には tr() 関数，行列の転置には trans() 関数，行列同士の内積には inprod() 関数が対応しま

す．関数の戻り値はそれぞれ，Expression, Matrix, Expression になります．

次は，これらの関数の使用例です．行列の演算では添字を陽に書かないことに注意します．

```
Set S = "1 2 3";
Set T = "1 2 3";
Element i(set = S), j(set = T);
Matrix X((i, j)), Y((i, j)), Z((i, j));
Expression e, d;
e = tr(X);          // 行列のトレース
Z = trans(X);       // 行列の転置
d = inprod(X, Y);   // 行列の内積
```

行列クラスには次のような操作関数が用意されています．

- .nrow()　　行数を int で返す
- .ncol()　　列数を int で返す
- .row(const Element& i)　　i 行目を Vector で取得する
- .col(const Element& j)　　j 列目を Vector で取得する
- .subRect(const Set&, const Set&)　　行列の一部分を Matrix で取得する
- .val.print()　　現在の値を表示する
- .printDim()　　行列のサイズを表示する

また，零行列や単位行列を表現したい場合には，Matrix クラスのサブクラスである，ZeroMatrix クラスや UnitMatrix を使います．ZeroMatrix クラスと UnitMatrix クラスは Matrix クラスとは違い，値を設定することなく零行列や単位行列として使うことができます．また，オブジェクトを宣言することなく zeros(const Set& S, const Set& T) や unit(const Set& S, const Set& T) といった関数で零行列や単位行列を表すこともできます．

```
Set S="1 2 3";
Element i(set = S), j(set = S);
Matrix X((i, j));
ZeroMatrix O(i);   // 零行列
UnitMatrix I(i);   // 単位行列
X - I >= 0;        // 半正定値の意味
```

$n \times n$ の正方行列>= 0 という記述をすると，行列のすべての成分が零以上であるという意味ではなく，行列の半正定値制約という意味に解釈されます．このとき，行列の対称性はチェックされませんので，かならず，対称になるように値を設定しておく必要があります．（$n \times n$ の正方行列<= 0 という記述をすると，-1 倍した行列の半正定値制約という意味に解釈されます．）

$n \times 1$ の行列>= 0 という記述をすると，行列のすべての成分が零以上であるという意味に解釈されます．この場合，右辺に 0 以外の値を持ってくることはできません．（$n \times 1$ の行列<= 0 という記述をすると，行列のすべての成分が零以下であるという意味に解釈されます．）

Matrix には外部ファイルから値を設定することができます．SIMPLE データ形式でデータを与えることができ，添字なしの Matrix であれば，添字を 2 つ持った SIMPLE のデータ形式で与え，添字付けられた Matrix であれば，行列族の添字の次元に 2 を加えた次元の SIMPLE のデータ形式で与えます．

5.9 ベクトルクラス Vector

ベクトルは Vector というクラスで表現されます．ベクトルは行列の特殊なかたち，すなわち，$n \times 1$ の行列と同等なものとして扱います．$n \times 1$ の行列に対して合法な行列演算は n 次元ベクトルに対しても有効です．対称行列や一般行列と同様に，ベクトル自体の定義と，ベクトルの構造の定義は別々に行う必要があります．例えば，次のような三次元のベクトルを定義したいとします．

$$v = \begin{pmatrix} x \\ 2+y \\ z \end{pmatrix}$$

この場合，以下のように記述します．

```
Set S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Vector v(i);
Variable x, y, z;
v["1"] = x;
v["2"] = 2 + y;
v["3"] = z;
```

i はベクトルの添字です．Matrix とは異なり，二重括弧は不要で Vector v(i) のように記述します．

複数のベクトルを一括して定義することもできます．例えば，次の例ではベクトル $v_1, \ldots, v_{10}$ を一括して定義しています．

```
Set S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Set N = "1 .. 10";
Element n(set = N);
Vector v(index = n, i);
```

ベクトル自体の添字 n には index =を付ける必要があります．個別のベクトル内部の添字 i には index =を付与してはいけません．

ここでは添字付けられたベクトルをベクトル族とよぶことにします．Matrix クラスと同様に，ベクトル族の添字を指定してベクトルを参照する場合には丸括弧 () や.at() 関数を使い，ベクトルの成分を参照する場合には角括弧 [] を使います．

SIMPLE では n 次元ベクトルと $n \times 1$ の行列を同等に扱います．また，1 次元ベクトルと 1×1 の行列とスカラーを同等に扱います．行列やベクトルの型が整合すれば，行列同士の演算，ベクトル同士

の演算，行列とベクトルの演算が可能です．

零ベクトルや全ての要素が 1 のベクトルを表現したい場合には，zeros() 関数や ones() 関数を使います．

```
Set S = "1 2 3";
Element j(set = S);
Vector v(j);
v <= ones(S);        // 全ての要素が 1 のベクトル
v >= zeros(S);       // 零ベクトル
```

diag(const Vector&) 関数を使えば Vector を行列の対角に並べた正方行列（対角行列）を作ることができます．

```
Set S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Element j(set = S);
Vector v(j);
Matrix X((i, j));
X = diag(v);
```

1 次元の Vector や 1 × 1 の Matrix をスカラーに変換したい場合には，scalar(const Matrix&) 関数を使います．

```
Set S = "1";
Element i(set = S);
Element j(set = S);
Vector v(j);
Matrix X((i, j));
Expression e, d;
e = scalar(v);  // ベクトルをスカラーに変換
d = scalar(X);  // 行列をスカラーに変換
```

次は Matrix クラスと Vector クラスを用いて二次計画問題を記述した例です．

```
Set S;
Set T;
Element i(set = S);
Element j(set = T);
Element k(set = T);
```

```
Vector x(j);            // 変数
Variable v(index = j);
x[j] = v[j];
Matrix V((j, k));        // 定数
Matrix A((i, j));        // 定数
Vector b(i);            // 定数
Vector c(j);            // 定数

Objective f(type = minimize);
f = 0.5 * inprod(x, V * x) + inprod(c, x);
A * x == b;
x >= 0;
```

次は上のモデルに対するデータファイルの具体例です.

```
S = 1 .. 2;
T = 1 .. 4;
V =
[1, 1] 1.0 [1, 2] 0.5 [1, 3] 0.0 [1, 4] 0.0
[2, 1] 0.5 [2, 2] 1.0 [2, 3] 0.0 [2, 4] 0.0
[3, 1] 0.0 [3, 2] 0.0 [3, 3] 0.0 [3, 4] 0.0;
A =
[1, 1]  1 [1, 2]  2 [1, 3]  1 [1, 4]  0
[2, 1]  1 [2, 2]  1 [2, 3]  0 [2, 3]  1;
b = [1] 7 [2] 5;
c = [1] -10 [2] -11 [3]  0 [4]  0;
```

行列クラスやベクトルクラスを用いて記述したモデルに対して showSystem() 関数を呼ぶと行列の成分ごとに展開された制約式が表示されますので，記述したモデルが正しく記述できているか確認することができます.

5.10 式クラス Expression

Variable や Parameter を含んだ式は Expression というクラスで表現することができます．例えば，Variable である x,y に対して 2x + 3y という式を定義したい場合，次のように記述します.

```
Expression g;
g = 2 * x + 3 * y;
```

以下のように記述をすることも可能です.

```
Expression g = 2 * x + 3 * y;
```

複数の式を一度に定義するには，集合クラス Set と添字クラス Element を用います．以下の例では，3 個の式 g[1], g[2], g[3] を一度に定義しています.

```
Set S;
S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Expression g(index = i);
g[i] = 2 * x[i] + 3 * y[i];
```

Expression を使う事によりモデルの記述を簡略化することができます．同じ式が何度も出現するモデルにおいて特に有効です．Expression はあくまで記述の簡略化を目的としたもので，Expression の導入の有無により最適化計算結果が異なる事はありません.

5.11 添字クラス Element

添字は Element というクラスで表現されます．添字とは数式 x_i の i に相当するものを意味します．添字と集合を対応させるには，引数 set を用います．頭文字の s は小文字である事に注意してください．集合クラス Set と併用することで，変数 Variable を集合の要素ごとに設定できます（制約式 Constraint，定数 Parameter，整数変数 IntegerVariable，式 Expression についても同様です）．以下の例では，3 個の変数 y[1], y[2], y[3]，3 個の定数 b[1], b[2], b[3] を定義しています.

```
Set S;
S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Variable y(index = i);
Parameter b(index = i);
```

添字の引数 index には Element を指定するかわりに，その Element が含まれる Set を指定することもできます．次の例は，上の記述と同じ意味です.

```
Set S;
S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Variable y(index = S);
Parameter b(index = S);
```

添字は複数導入することも可能です．次の例では 6 個の変数 x["1，p"], x["1，q"], x["2，p"], x["2，q"], x["3，p"], x["3，q"] を定義しています.

```
Set S;
Set T;
S = "1 2 3";
T = "p q";
Element i(set = S);
Element j(set = T);
Variable x(index = (i, j));
```

一つの集合に対して複数の添字を定める事もできます．次の例では 12 個の定数 a["1，p，p"], a["1，p，q"], a["1，q，p"], a["1，q，q"], a["2，p，p"], a["2，p，q"], a["2，q，p"], a["2，q，q"], a["3，p，p"], a["3，p，q"], a["3，q，p"], a["3，q，q"] を定義しています．集合 T に対して 2 つの添字 j, k が定められています．

```
Set S;
Set T;
S = "1 2 3";
T = "p q";
Element i(set = S);
Element j(set = T);
Element k(set = T);
Parameter a(index = (i, j, k));
```

複数の添字を持つ対象を個別に記述する場合は，添字部分をダブルクォート"で囲む必要があります．

```
y["1, p"] >= b["1, p"] + 3;
```

また以下のようにダブルクォートで囲まないと添字は自動展開され，制約式が一括して複数定義されます．（**添字の自動展開機能**）

```
y[i, j] >= b[i, j] + 3;
```

添字は，属する集合が整数値を取る場合には次のような演算子を用いることができます．

```
, （順序対） + （和） - （差） / （商） * （積）
% （余り） ceil （切り上げ） floor （切り下げ）
```

次の例では，定数 a[1], a[2], a[3] に初期値 2, 4, 6 を設定しています．

```
Set S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Parameter a(index = i);
a[i] = 2 * i;
```

次の例では，制約式 $x_2 + x_4 + x_6 \leq 5$ を記述しています．制約式の左辺を定義するために偶数番目の

項のみの和を取得しています.

```
Set S;
S = "1 2 3 4 5 6";
Element i(set = S);
Variable x(index = i);
sum(x[i], (i, i % 2 == 0)) <= 5;
```

次の例では，漸化不等式 $x_i \leq x_{i+1}$ を定義しています.

```
Set S = "1 2 3 4";
Element i(set = S);
Variable x(index = i);
x[i] <= x[i + 1], i != 4;
```

5.12 集合クラス Set

集合は Set というクラスで表現されます．以下の例では，自然数 1, 2, 3 を要素とする集合 S を定義しています.

```
Set S;
S = "1 2 3";
```

集合の要素間は，半角スペースで区切る必要があります．また，集合自体の定義と，構成要素の定義を同時に行う事ができます．以下の記述は上の記述と同じ意味です.

```
Set S = "1 2 3";
```

添字クラス Element と併用することで，変数 Variable を集合の要素ごとに設定できます（制約式 Constraint，定数 Parameter，整数変数 IntegerVariable，式 Expression についても同様です）．以下の例では 3 個の変数 y[1], y[2], y[3], 3 個の定数 b[1], b[2], b[3] を定義しています.

```
Set S;
S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Variable y(index = i);
Parameter b(index = i);
```

集合の要素には自然数だけでなく，文字列も使用することができます．以下の例では 2 個の整数変数 z[p], z[q]，2 個の式 g[p], g[q] を定義しています.

```
Set T;
T = "p q";
Element j(set = T);
```

```
IntegerVariable z(index = j);
Expression g(index = j);
g[j] = 2 * x[j] + 3 * y[j];
```

要素の文字列は必ずしも一文字である必要はありません.

```
Set T = "before after";
```

要素の文字列には半角英数字，半角記号_-と全角文字を使用できます.

```
Set T = "前_before 後_after";
```

集合の要素に文字列を使用した場合は，対象を個別に記述する際に，添字部分にダブルクォート"を用いる必要があります.

```
-1 <= z["p"] <= 2;
```

一括して記述する場合にはダブルクォートで囲んではいけません.

```
-1 <= z[j] <= 2;
```

集合の要素に自然数を用いる場合は，.. を用いる事で途中の要素を自動的に補間することが可能です．以下の二つの例はいずれも自然数 1 から 10 で構成される集合 S を定義しています.

```
Set S = "1 .. 10";
```

```
Set S = "1 2 3 4 5 6 7 8 9 10";
```

要素に文字列を用いる場合は，上記の自動補間機能を用いることはできません．次の記述は誤りです.

```
Set T = "a .. k";
```

集合の要素は，モデルファイル内で定義する以外に，データファイルから与える方法もあります．以下は自然数 1, 2, 3 を要素とする集合 S の定義を，データファイル foo.dat から与える例です.

モデルファイル内

```
Set S;
```

foo.dat 内

```
S = "1 2 3";
```

集合クラスの構成要素は，明示的に定義しなくとも，モデルファイルやデータファイルの情報から自動的に定義されます．これを SIMPLE の**自動代入機能**と呼びます．以下の例では，自動代入機能により，集合 S の要素は 1, 2, 3 であると判断されます.

```
Set S;
Element i(set = S);
Parameter a(index = i);
```

```
a[1] = -1;
a[2] = -1;
a[3] = 1;
```

以下のように，データファイル（foo.dat）内で a の値を定めた場合も同様です．

モデルファイル内

```
Set S;
Element i(set = S);
Parameter a(index = i);
```

foo.dat 内

```
a = [1] -1 [2] -1 [3] 1
```

部分集合を定義したい場合は，引数 superSet を用います．以下の例では集合 T が集合 S の部分集合であることを記述しています．

```
Set S;
Set T(superSet = S)
```

ある集合に対して定義された添字は，その部分集合に対しても自動的に定義されます．

添字を部分集合のみ（あるいは部分集合以外）で走らせたい場合は，集合と添字の包含関係を表す演算子<, >を利用します．以下の例では，定数 a[1], a[2] に-1 を，a[3] に 1 を設定しています．

```
Set S;
S = "1 2 3";
Set T(superSet = S);
T = "1 2";
Element i(set = S);
Parameter a(index = i);
a[i] = -1, i < T; // i が T に含まれる場合
a[i] = 1, i > T; // i が T に含まれない場合
```

多次元集合（要素の組の集合）を定義する場合には，引数 dim で次元を指定します．以下の例では，I の要素と J の要素の組を要素とする集合 IJ を定義し，二次元の添字をもつ変数 x を定義しています．I の要素と J の要素のすべての組み合わせについて変数を定義したいわけではない場合などに，多次元集合を使用します．

```
Set I;
Element i(set = I);
Set J;
Element j(set = J);
Set IJ(dim = 2, superSet = (I, J));
```

```
IJ = "a 1 b 2";                  // 集合の要素を"a, 1"と"b, 2"とする
Variable x(index = IJ);          // x["a, 1"] と x["b, 2"] が定義される
x[i, j] >= 0, (i, j) < IJ;       // x["a, 1"] と x["b, 2"] に下限を設定する
```

条件式から部分集合を取得するには，関数 setOf を使用します．setOf 関数の第一引数は添字，第二引数は条件式である必要があります．関数の返り値は集合です．なお，得られた集合について，通常の集合と異なり自動代入機能を利用することは出来ません．以下の例では，集合 S の中で条件 a[i] > 0 を満たす要素のみから，集合 T を取得しています．

```
Set S = "1 2 3";
Set T;
Element i(set = S);
Parameter a(index = i);
a[1] = -1;
a[2] = -1;
a[3] = 1;
T = setOf(i, a[i] > 0); // 要素 3 のみからなる集合 T が作成される．
```

集合の要素数を取得するには，card 関数を使用します．card 関数の返り値は int 型です．以下の例では，整数 n に集合 S の要素数を格納しています．

```
int n = S.card();
```

集合には他にも様々な演算がありますが，使用頻度の低い用法は本マニュアルでは除外しています．詳細はお問い合わせください．

5.12.1 追加操作 add

```
add(追加される要素オブジェクト [, 条件式]);
```

- 集合 Set の操作 add() は集合に要素を追加します．
- add() の引数は，単一の要素を入れることも，添字を与えることも可能です．
- 引数に添字が与えられた場合，添字展開された要素が追加されます．
- 第 2 引数の条件式は省略可能です．

条件式を 2 番目の引数として与えると，引数である要素オブジェクトの展開される範囲が限定されます．

以下に add() を用いた例を示します．

```
Set S = "1 2 3";
Set T = "4 5 6";
Element i(set = S);
```

```
S.add(7); // S には 7 が追加される
T.add(i); // T には {1 2 3 7} が追加される
```

条件式を 2 番目の引数として与えると，引数である要素オブジェクトの展開される範囲が限定されます.

例えば以下の例では集合 U に追加する添字 i の範囲を i < 3 という条件で限定しています.

```
Set S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Set U;
U.add(i, i < 3); // U には "1 2" が追加される
```

5.12.2　自動代入の禁止 lock()/unlock()

```
lock();
unlock();
```

集合の自動代入は集合のデータを明示的に与える必要が省かれ効率的に記述ができますが，一方で誤ったデータを与えた際，集合に予期せぬ変更が加わる場合があります.

例えば以下のように，モデルにとって悪影響を与える場合があります.

```
Set S = "1 2 3";
Parameter c(index = S);
Element i(set = V);
c = "[1] 7.2 [2] 8.2 [5] 1.2"; // 誤って添字 5 を与える
// これにより S の内容は "1 2 3 5" となってしまう

Variable x(index = i);

sum(x[i], i) >= 5; // 和の取られる範囲は "1 2 3" ではなく "1 2 5" となる.
```

そのような場合に有効なのが集合に対する lock() という操作です．集合に対して lock() を呼び出すと，以降の自動代入による要素の追加を禁じます.

例えば上記の例で lock() を記述すると lock() 以降で集合に要素が追加されるとエラーとなります.

```
Set S = "1 2 3";
S.lock(); // 集合をロック
Parameter c(index = S);
Element i(set = V);
c = "[1] 7.2 [2] 8.2 [5] 1.2"; // 誤って添字 5 を与える
// ここで S は "1 2 3 5" となってしまうのでエラーとなる
```

上記の様にデータのチェックが容易となるため特にモデル開発時に役立ちます.

操作 lock() の逆操作（自動代入を許す）として unlock() という操作があります．以下利用例です.

```
Set S = "1 2 3";
S.lock(); // 集合をロック
Parameter c(index = S);
Element i(set = V);
S.unlock();
c = "[1] 7.2 [2] 8.2 [5] 1.2"; // 誤って添字 5 を与える
// ここで S は "1 2 3 5" となってしまうが unlock() により許容される.
```

5.12.3 切断操作 slice

```
slice(次元 [, ..., 次元])
```

- Set の操作 slice() は，多次元集合を指定の次元で切り出し，新しい集合を構成します.
- 引数は 1 からはじまる整数で，Set の次元以下である必要があります.

集合の要素を構成する直積のメンバを左から数えた順番を表します．以下に slice() を用いた例を示します.

```
Set a(dim = 3);          // 次元が 3 となる集合 a を設定する
a = "1,1,1 1,3,1 b,2,1 1,3,1 1,4,a 1,1,1 1,5,1";
Set a1;                  // 次元が 1 となる集合 a1 を設定する
a1 = a.slice(1);         // 集合 a1 は a の要素の 1 番目のメンバで構成される
a1.val.print()           // 結果: a1=(1 b)
Set a12(dim = 2);        // 次元が 1 となる集合 a1 を設定する
a12 = a.slice(1, 2);     // 集合 a12 は a の要素の 1, 2 番目のメンバで構成される
a12.val.print()          // 結果: a12=(1 1 1 3 b 2 1 4 1 5)
Set a121(dim = 3);
a121 = a.slice(1, 2, 1); // 要素の 1,2,1 番目のメンバで構成される集合
a121.val.print();        // 結果: a121=(1 1 1 1 3 1 b 2 b 1 4 1 1 5 1)
Set a13(dim = 2);
a13 = a.slice(1, 3);     // 要素の 1,3 番目のメンバで構成される集合
a13.val.print();         // a13=(1 1 b 1 1 a)
```

5.13 順序集合クラス OrderedSet

集合内の要素に順序が定められた順序集合は OrderedSet クラスで表現されます．集合の要素にわたるループを表現する場合には，この OrderedSet クラスが有用です．OrderedSet クラスは Set クラ

スの機能を全て有しており，加えて次の関数が使用できます.

- first 関数　順序集合の最初の要素を返す
- last 関数　順序集合の最後の要素を返す
- next 関数　次の要素を返す
- prev 関数　前の要素を返す
- position 関数　要素の位置（何番目かを意味する整数）を返す
- elementAt 関数　位置（何番目かを意味する整数）にある要素を返す

C++の関数としてのフォーマットは以下のようになります.

```
// OrderedSet のメンバ関数
Element first();    // 最初の要素を返す
Element last();     // 最後の要素を返す
Element next(const Element& i); // 要素 i の次の要素を返す
Element prev(const Element& i); // 要素 i の前の要素を返す
int position(const Element& i); // 要素 i の位置を返す
Element elementAt(int p); // 場所 p にある要素を返す
```

OrderedSet クラスを利用する事で，漸化式や漸化不等式を取り扱うことが可能です.

次の例では漸化不等式 $x_p \leq x_q, x_q \leq x_r, x_r \leq x_s$ を OrderedSet を利用して記述しています.

```
OrderedSet S = "p q r s";
Element i(set = S);
Variable x(index = i);
x[i] <= x[S.next(i)], i != S.last();
```

最後の条件式 i != S.last() は i == s の場合を除外するためです．上記の例では next 関数と last 関数を利用しましたが，以下のように prev 関数と first 関数を利用することもできます.

```
OrderedSet S = "p q r s";
Element i(set = S);
Variable x(index = i);
x[S.prev(i)] <= x[i], i != S.first();
```

集合の要素が整数ではない場合，上記のように OrderedSet を用いる必要があります．しかし集合の要素が整数の場合は，次のように OrderedSet を用いない記述も可能です.

```
Set S = "1 2 3 4";
Element i(set = S);
Variable x(index = i);
x[i] <= x[i + 1], i != 4;
```

同様に次の記述も可能です.

```
Set S = "1 2 3 4";
Element i(set = S);
Variable x(index = i);
x[i - 1] <= x[i], i != 1;
```

整数以外の要素からなる集合を利用する場合，条件式において i + 1, i - 1 等の要素間の演算が使用できない事が，OrderedSet に頼らざるを得ない主な理由です．

次の例では，定数 a[p], a[q], a[r] にそれぞれ 2, 4, 6（2 ずつ増加）を設定します．

```
OrderedSet S = "p q r";
Element i(set = S);
Element j;
Parameter a(index = i);
for(j = S.first(); j < S; j = S.next(j)){
       a[j] = 2 * S.position(j);
}
```

以下のように記述しても同じ意味です．

```
OrderedSet S = "p q r";
Element i(set = S);
Element j;
Parameter a(index = i);
for(int p = 1; p < S.card() + 1; p++){
       j = S.elementAt(p);
       a[j] = 2 * p;
}
```

集合の要素が整数である場合は，次のように OrderedSet を用いない記述も可能です．以下の例では，定数 a[1], a[2], a[3] にそれぞれ 2, 4, 6（2 ずつ増加）を設定します．

```
Set S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Parameter a(index = i);
a[i] = 2 * i;
```

Set の操作の一部は OrderedSet でも利用できます．例えば add は OrderedSet に対して適用可能です．Set から OrderedSet を構成する場合は操作 add を用いるのが簡便です．

```
Set S;
Element i(set = S);
S = "1 2 3";
OrderedSet T;
```

```
// i を T に追加する．これにより S と T は同じ要素で構成される．
T.add(i);
```

5.14 数列集合 Sequence

数列集合 Sequence は，等差数列が成す集合を表現するためのものです．引数に from, to, by を指定することで，from から to までの間に by 刻みの要素が作成されます．次の例では，1 から 9 までの 2 刻みの要素を作成しています．

```
Sequence S(from = 1, to = 9, by = 2);
// Set S = "1 3 5 7 9"; と同等
```

刻み幅が 1 でない大規模な集合を扱う際に有用です．ただし，数式集合 Sequence については集合 Set と異なり自動代入機能は利用できません．

数列集合 Sequence は順序集合 OrderedSet で利用可能な関数

```
// Sequence のメンバ関数
Element first();     // 最初の要素を返す
Element last();      // 最後の要素を返す
Element next(const Element& i); // 要素 i の次の要素を返す
Element prev(const Element& i); // 要素 i の前の要素を返す
int position(const Element& i); // 要素 i の位置を返す
Element elementAt(int p); // 場所 p にある要素を返す
```

を利用することができます．

5.15 条件式

条件式は，**添字を含む**制約式および代入文において，その添字の動く範囲を制限する機能です．

条件式は制約式や代入文の右側に記述します．この際，「,（半角コンマ）」で繋げます．書式は以下の通りです．

```
制約式, 条件式
代入文, 条件式
```

次の例では，定数 a[1],a[2] に-1 を，a[3] に 1 を設定しています．

```
Set S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Parameter a(index = i);
```

```
a[i] = -1, i <= 2;
a[i] = 1, i >= 3;
```

条件式に使用することができる演算子は以下です.

- 等号 ==
- 等号付不等号 <=，>=
- 不等号 <，>
- 不一致 !=

次の例では，定数 asum の値を，定数 a[i] の中で 0 より大きいものの和 $\sum_{a_i>0} a_i$ で定めています.

```
Set S;
Element i(set = S);
Parameter a(index = i);
Parameter asum;
asum = sum(a[i], (i, a[i] > 0));
```

不等号<，>は添字に対する集合の所属有無を表現する演算子としても使用されます.

以下の例では，定数 a[1], a[2] に-1 を，a[3] に 1 を設定しています.

```
Set S;
S = "1 2 3";
Set T(superSet = S);
T = "1 2";
Element i(set = S);
Parameter a(index = i);
a[i] = -1, i < T; // i が T に含まれる場合
a[i] = 1, i > T; // i が T に含まれない場合
```

条件式は setOf 関数を使って部分集合を構成する際にも使用されます．以下の例では，集合 S の中で条件 a[i] > 0 を満たす要素のみから，集合 T を取得しています.

```
Set S = "1 2 3";
Set T;
Element i(set = S);
Parameter a(index = i);
a[1] = -1;
a[2] = -1;
a[3] = 1;
T = setOf(i, a[i] > 0); // 要素 3 のみからなる集合 T が作成される.
```

条件式同士を次のような演算子「!」,「&&」,「,（半角コンマ)」,「||」で連結することができます．それぞれ，not, and, and, or を意味します．次の例では，定数 b[1], b[4] に-1 を，b[2], b[3] に 1

を設定しています.

```
Set S = "1 2 3 4";
Element i(set = S);
Parameter b(index = i);
b[i] = -1, (i <= 1 || i >= 4);
b[i] = 1, (i >= 2 && i <= 3);
```

最後の一行は，以下の各例のように記述する事もできます.

```
b[i] = 1, !(i <= 1 || i >= 4);
```

```
b[i] = 1, i >= 2, i <= 3;
```

条件式に変数や整数変数を用いることはできません．次の記述は誤りです.

```
Variable x;
Variable y;
3 * x + 2 * y == 0, x >= 0;
3 * x + 2 * y <= 0, x < 0;
```

条件式は「添字を含んだ」制約式や代入に対する機能です．添字を含んでいない場合は記述することができません．例えば以下のような記述は誤りです.

```
Parameter a;
Variable x;

// a が 2 以上であれば制約式 x >= 1 を成立させる
// 不正な書き方
x >= 1, a >= 2;
```

上のような記述を実現したい場合は if 文を使います.

```
Parameter a;
Variable x;

// a が 2 以上であれば制約式 x >= 1 を成立させる
if(a >= 2){
    x >= 1;
}
```

ここからは SIMPLE 上級者向けの説明です.

条件式同士を演算子「&&」や「,（半角コンマ）」で連結する場合，左から順に解釈される点に注意してください.

例として，以下のように記述された Parameter d に関して d[i + 1] == d[i] となっている箇所のみ出力することを考えます．

```
Set S = "1 2 3 4 5 6";
Element i(set = S);
Parameter d(index = i);
d[1] = 5;
d[2] = 4;
d[3] = 2;
d[4] = 2;
d[5] = 2;
d[6] = 3;
```

以下の記述は d[i + 1] == d[i] が i + 1 < S より先に解釈されるため，範囲外である d[7] を参照してしまうことからエラーとなります．

```
simple_printf("d[%d] = d[%d] = %f\n", i + 1, i, d[i], d[i + 1] == d[i], i + 1 < S);
```

以下のように解釈の順番を逆にすることにより，正しく表示ができます．

```
simple_printf("d[%d] = d[%d] = %f\n", i + 1, i, d[i], i + 1 < S, d[i + 1] == d[i]);
```

5.16 条件分岐関数 ifelse

条件分岐関数は，区間によって定義が異なる目的関数 Objective や式 Expression を定義するためのものです．

なお，macOS 版 Numerical Optimizer では条件分岐関数には対応していません．

次の例では，目的関数 $f = \begin{cases} x^2, x \geq 0 \\ 0, x \leq 0 \end{cases}$ を ifelse 関数を使用して定義しています．

```
Variable x;
Objective f(type = minimize);
f = ifelse(x >= 0, x * x, 0);
```

条件分岐関数を用いる場合，**対象の関数は領域全体で連続かつ微分可能である必要があります**．折れ線関数は連続ですが微分可能でないため，条件分岐関数を用いて記述することはできません．以下の例は誤りです．

```
Variable x;
Objective f(type = minimize);
f = ifelse(x >= 0, x, -x);
```

なお，折れ線関数を記述する方法に関しては 18.1 折れ線関数の表現をご覧ください．

5.17 最小（大）値取得関数 min，max

最小値取得関数 min 及び最大値取得関数 max は，添字付けされた定数式の中から最小（大）のものを返す関数です．

```
// 添字の範囲にわたる最小値
Parameter    min(定数式，範囲指定並び)   // 戻り値は定数式
// 添字の範囲にわたる最大値
Parameter    max(定数式，範囲指定並び)   // 戻り値は定数式
```

上のように記述した場合には，Numerical Optimizer で最適化計算を行う前に値の取得を行います．このため全てのアルゴリズムで使用することが可能です．

5.18 数学関数

SIMPLE では次の演算と数学関数が定義されています[1]．それぞれの意味はプログラミング言語 C/C++におけるものと同じです．

```
+      -      /      *
sin    cos    tan    asin    acos    atan
sec    csc    cot    asec    acsc    acot
sinh   cosh   tanh   sech    coth    csch
atan2  hypot  erf
exp    log    log10  pow     sqrt
ceil   floor  fabs   fmod
```

次の例では，制約式 $4x^3 \leq 11$ を記述しています．

```
4 * pow(x, 3) <= 11;
```

累乗関数 pow を用いると，例え次数が 2 であっても二次計画問題とはみなされず，一般の非線形計画問題と認識されます．二次計画問題専用のアルゴリズム asqp を利用する場合は累乗関数 pow を用いないでください．

バージョン 9 よりガウスの誤差関数 erf が追加されました．誤差関数は次のように定義される関数です．

$$\mathrm{erf}(x) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt, \qquad x \in [-\infty, \infty]$$

[1]使用するアルゴリズムによっては利用できない関数がございます．

第6章 制約充足問題ソルバwcsp

6.1 wcspを用いる場合の注意点

アルゴリズムとして制約充足問題ソルバwcspを用いる際には，wcspは近似解法であり必ずしも厳密解が求まるわけではない点に注意してください．

また，他のアルゴリズムと異なり幾つかの制限があります．1つは**実数変数Variableを用いることができない**こと．もう1つは**制約式や目的関数において小数点以下が切り捨てられる**ことです．以下で詳しく説明します．

wcspは変数として0-1整数変数（type = binaryとしたIntegerVariable）と離散変数（DiscreteVariable）を用いて定式化します．連続変数や，0-1整数変数でない整数変数は用いることが出来ません．以下，wcspで用いることができる構成要素を説明します．

構成要素名	SIMPLE内の名称	機能
目的関数	Objective	目的関数を表す
制約式	Constraint	制約式を表す
定数	Parameter	定数を表す
整数変数	IntegerVariable	整数変数を表す
範囲演算関数	sum	$\sum$に相当する
式	Expression	頻出する数式に対して，簡単な別の表現を与える
添字	Element	添字を表す
集合	Set	添字の動く範囲を表す
順序集合	OrderedSet	要素間に順序を持つ集合を表す
数列集合	Sequence	等差数列からなる集合を表す
条件式		制約式や代入文を制限する
条件分岐関数	ifelse	区間によって定義が異なる関数を定める際に用いる
数学関数	exp, sin, cos, log ...	数学関数を表す
離散変数	DiscreteVariable	離散変数を表す
重複不能関数	alldiff	重複不能を表す
選択関数	selection	限定選択を表す
ハード制約関数	hardConstraint	ハード制約を表す
セミハード制約関数	semiHardConstraint	セミハード制約を表す
ソフト制約関数	softConstraint	ソフト制約を表す
ブール関数	Boolean	制約式を引数として，0-1を返す

冒頭で述べた小数点以下が切り捨てられる点について説明します．wcsp は制約式や目的関数をペナルティとして認識し，ペナルティが小さくなる答えを探すアルゴリズムです．Numerical Optimizer の内部でこのペナルティを評価する際に小数点以下を切り捨て，整数として評価を行います．よって，「0 >= 1」のような制約式は制約違反（ペナルティ 1）となりますが，「0 >= 0.99」というような制約式は制約を満たしている（ペナルティ 0）となります．定式化の段階で小数点以下も考慮する必要がある目的関数や制約式に関しては，該当する式（制約式ならば両辺）に大きな値（1000 ならば小数第三桁まで有効になる）をかけておく必要があります[2]．

6.2 目的関数クラス Objective

wcsp 利用時にも目的関数クラス Objective を用いますが，引数 target で終了条件を指定する必要があります．目的関数が target で指定された値を下回った場合（最大化問題の場合は上回った場合），wcsp は求解動作を終了します．次の例では，target に 10 を設定しています．

```
Objective f(type = minimize, target = 10);
```

target の初期設定は 0 で，明示的に target を指定しない場合は target は 0 であると解釈されます．すなわち，次の二つは同じ意味です．

```
Objective f(type = minimize, target = 0);
```

```
Objective f(type = minimize);
```

target の値は，定数 Parameter から設定する事もできます．

```
Parameter p;
p = 10;
Objective f(type = minimize, target = p);
```

target の値は，求解オプション defaultObjectiveTarget で指定することもできます．

```
options.defaultObjectiveTarget = 5;
```

Objective の引数での target 値と，求解オプション defaultObjectiveTarget の値が競合した場合は，Objective の引数の値の方が優先されます．

目的関数の重みは求解オプション defaultObjectiveWeight で指定します．次の例では，目的関数の重みに 5 を指定しています．

```
options.defaultObjectiveWeight = 5;
```

求解オプション defaultObjectiveWeight の初期値は 1 です．

[2] ただし値が極端に大きくならないよう注意してください．

6.3 制約式クラス Constraint

wcsp 利用時には，全ての制約式は次の 3 つの種類に分類されます．

- ハード制約式
- セミハード制約式
- ソフト制約式

ハード制約式とは，最も優先して満たすべき制約式（必ず満たさなければならない制約式）のことです．

セミハード制約式とは，ハード制約式の次に優先して満たすべき制約式のことです．通常，必ず満たさなければならない制約式の一部をセミハード制約式とし，実行不可能性の原因をセミハード制約に押し付けるという使い方をします．

ソフト制約式は，優先度がもっとも低く，必ずしも満たす必要はないが，できるだけ満たして欲しい制約式のことです．その際，ソフト制約式は，各制約式の違反量からペナルティ量を計算し，その総ペナルティ量が最も小さくなることをもってできるだけ制約式を満たしたと解釈します[3]．

初期設定では，全ての制約式はハード制約式として扱われます．

6.3.1 ハード制約関数 hardConstraint

hardConstraint 関数を使用すると，その行以降に出現した制約式は全てハード制約として扱われます．

```
hardConstraint();
sum(a[i] * x[i], i) == 3; // ハード制約となる
```

hardConstraint 関数，semiHardConstraint 関数，softConstraint 関数が混在する場合は，後の行に記述されたものが優先されます．

6.3.2 セミハード制約関数 semiHardConstraint

semiHardConstraint 関数を使用すると，その行以降に出現した制約式は全てセミハード制約として扱われます．

```
semiHardConstraint();
sum(a[i] * x[i], i) == 3; // セミハード制約となる
```

hardConstraint 関数，semiHardConstraint 関数，softConstraint 関数が混在する場合は，後の行に記述されたものが優先されます．

[3] 制約式の違反量からのペナルティ量の計算方法は後述します．

6.3.3　ソフト制約関数 softConstraint

softConstraint 関数を使用すると，その行以降に出現した制約式をソフト制約として扱います．さらに，softConstraint 関数へ与えた引数（求解オプション）により制約式の違反量の扱いの設定もできます．

一般的なソフト制約への求解オプションの設定は，次のように 3 つの引数の値により行われます．

```
softConstraint(int weight, double a, double b);
```

ただし，引数は全て非負で設定します．この時，ソフト制約の違反量を x とすると，そのソフト制約のペナルティ量 p は，

```
p = (a * x * x + b * x) * weight;
```

という式により定義します．

また，softConstraint 関数の第 2 引数と第 3 引数は省略することができ，次のような規則により解釈されます．

- 第 2, 3 引数の省略

  softConstraint(weight) ==> softConstraint(weight, 0, 1)[p = x * weight と等価]
- 第 3 引数の省略

  softConstraint(weight, a) ==> softConstraint(weight, a, 0)[p = a * x * x * weight と等価]

即ち，

```
softConstraint(1); // softConstraint(1, 0, 1) と等価
softConstraint(1, 2); // softConstraint(1, 2, 0) と等価
```

となります．

softConstraint 関数は，第 2, 3 引数を省略する時のみ引数に-1, -2 を設定できます．それぞれハード制約，セミハード制約と解釈されます．

```
softConstraint(-1);
sum(a[i] * x[i], i) == 3; // ハード制約となる
```

```
softConstraint(-2);
sum(a[i] * x[i], i) == 3; // セミハード制約となる
```

hardConstraint 関数，semiHardConstraint 関数，softConstraint 関数が混在する場合は，後の行に記述されたものが優先されます．

バージョン 8, 9 の softConstraint 関数は，softConstraint(int weight) という書き方のみ可能でした．バージョン 10 から，上記のような形式になっています．なお，バージョン 8, 9 で作成した wcsp モデルにおいて，softConstraint(weight) のような記述は，バージョン 10 の省略規則により同一なものとして計算されます．そのため，バージョン 8, 9 で作成したモデルの softConstraint 関数

はバージョン 10 以降でも変更する必要はありません.

6.3.4 求解オプション defaultConstraintWeight

求解オプション defaultConstraintWeight を用いると，モデルファイルで出現する制約式全てに一律に重みを設定できます．次の例では，一律に重み 12 のソフト制約を指定しています.

```
sum(a[i]*x[i], i) == 3;    // 重み 12 のソフト制約となる
options.defaultConstraintWeight = 12;
sum(b[i] * x[i], i) <= 20;   // 重み 12 のソフト制約となる
sum(c[i] * x[i], i) <= 100;  // 重み 12 のソフト制約となる
sum(d[i] * x[i], i) >= 15;   // 重み 12 のソフト制約となる
```

defaultConstraintWeight に 0 を設定すると，ハード制約として扱われます．defaultConstraintWeight の初期設定値は 0 です.

求解オプション defaultConstraintWeight と Constraint 関数（hardConstraint 関数，semiHardConstraint 関数，softConstraint 関数）が競合した場合，後者が優先されます.

```
sum(a[i] * x[i], i) == 3;   // 重み 12 のソフト制約となる
options.defaultObjectiveWeight = 12;
sum(b[i] * x[i], i) <= 20;  // 重み 12 のソフト制約となる
hardConstraint();
sum(c[i] * x[i], i) <= 100; // ハード制約となる
semiHardConstraint();
sum(d[i] * x[i], i) <= 100; // セミハード制約となる
softConstraint(5);
sum(e[i] * x[i], i) >= 15;  // 重み 5 のソフト制約となる
```

6.4 整数変数クラス IntegerVariable

wcsp 使用時には，0-1 整数変数のみ利用が可能です．即ち IntegerVariable を利用する際には，必ず引数に type=binary を付ける必要があります．通常の整数変数を用いることはできません．通常の整数変数を利用したい場合は，離散変数 DiscreteVariable を用いて記述する必要があります．例えば，$1 \leq x \leq 10$ を満たす整数変数を定めたい場合，通常の数理計画モデルでは次のように記述します.

```
IntegerVariable x;
1 <= x <= 10;
```

一方，離散変数を用いた場合，以下のような記述になります.

```
Set S = "1 .. 10";
DiscreteVariable x(dom = S);
```

6.5 離散変数クラス DiscreteVariable

離散変数クラス DiscreteVariable は，wcsp でのみ利用可能な構成要素です．必ず引数に定義域 dom を持つ必要があります．引数 dom が集合 Set，順序集合 OrderedSet，数列集合 Sequence を指すことにより，その離散変数が取り得る値の範囲を定めます．

次の例では，1 から 3 までの値を取る離散変数 x を定義しています．

```
Set S = "1 2 3";
DiscreteVariable x(dom = S);
```

離散変数 DiscreteVariable の定義域は，必ずしも整数である必要はありません．次の例では，open あるいは closed のいずれかを取る離散変数 y を定義しています．

```
Set S = "open closed";
DiscreteVariable y(dom = S);
```

離散変数 DiscreteVariable は添字を取る事もできます．次の例では open 又は closed を取る離散変数 y[1], y[2], y[3] を定義しています．

```
Set S = "open closed";
Set T = "1 2 3";
Element i(set = T);
DiscreteVariable y(dom = S, index = i);
```

6.6 重複不能関数 alldiff

重複不能関数 alldiff は，添字つきの離散変数 DiscreteVariable を引数に取り，「それぞれの値が全て異なる」という制約を与えることができます．

次の例では，添字と定義域が同じ集合を対象とする，離散変数 y を考えます．alldiff 関数により，y[1]，...，y[10] は全て異なる値（1, ..., 10 のどれか）を取ります．

```
Set S = "1 .. 10";
Element i(set = S);
DiscreteVariable y(dom = S, index = i);
alldiff(y[i], i);
```

第二引数の添字は，省略することもできます．

```
alldiff(y[i]);
```

alldiff 関数の引数には，条件式を与えることもできます．これにより，alldiff 関数が作用する範囲を制限することができます．次の例では，y[1]，...，y[5] までは，全て異なる値を取るように定めています．

```
Set S = "1 .. 10";
Element i(set = S);
DiscreteVariable y(dom = S, index = i);
alldiff(y[i], (i, i <= 5));
```

条件式を付与した場合は，第二引数の添字を省略することはできません．例えば，次の例は誤りです．

```
alldiff(y[i], i <= 5);
```

次の例では，y[1], y[2], y[3] が重複せずに a, b, c のいずれかを取るように定めています．

```
Set S = "1 .. 10";
Set T = "a b c";
Element i(set = S);
DiscreteVariable y(dom = T, index = i);
alldiff(y[i], (i, i <= 3));
```

6.7 選択関数 selection

選択関数 selection は，添字つき 0-1 整数変数の中で一つだけを 1 に固定したい場合に用います．同様の記述は sum 関数を用いる事でも可能ですが，wcsp を利用する際には selection 関数を用いた方が効率的です[4]．

次の例では，3 つの 0-1 整数変数 z[1], z[2], z[3] のうち一つだけを 1 にするよう指定しています．

```
Set S = "1 2 3";
Element i(set = S);
IntegerVariable z(type = binary, index = i);
selection(z[i], i);
```

第二引数の添字は省略することもできます．

```
selection(z[i]);
```

sum 関数を利用した場合，次のようになります．

```
sum(z[i], i) == 1;
```

selection 関数の引数には，条件式を指定することもできます．次の例では，z[1], z[2] のうち一つだけを 1 にするよう指定しています．

[4] selection 関数を用いた場合，内部的には複数の 0-1 整数変数を用意する替わりに一つの離散変数を用意するため，内部処理が高速化されます．また，実行時に標準出力に出力される NUMBER_OF_VARIABLES の値は，内部的な変数の数になります．

```
Set S = "1 2 3";
Element i(set = S);
IntegerVariable z(type = binary, index = i);
selection(z[i], (i, i <= 2));
```

引数に条件式を指定する場合には，第二引数の添字を省略することはできません．例えば，次の例は誤りです．

```
selection(z[i], i <= 2);
```

6.8 ブール関数 Boolean

ブール関数 Boolean は，引数に与えた制約式に対して，その真偽を判定し 0（偽の場合）か 1（真の場合）を返す関数です．

なお，macOS 版 Numerical Optimizer ではブール関数には対応していません．

```
Boolean(制約式); //  0 か 1 を返す
```

次の例では，定義域が 1 から 4 の離散変数 x[1]，...，x[10] を考えます．以下の式は，x[1]，...，x[10] の中で，3 より大きい値を取る事ができるのは，最大でも一つであることを示しています．

```
Set S = "1 .. 10";
Set T = "1 2 3 4";
Element i(set = S);
DiscreteVariable x(dom = T, index = i);
sum(Boolean(x[i] >= 3), i) <= 1;
```

次の例では，3 人の工員 ryu, ken, guy に割り振られる仕事 a, b, c, d（離散変数 x[a], x[b], x[c], x[d]）を定義し，ken に割り振られる仕事の数は 2 つであると定めています．

```
Set Workers = "ryu ken guy";
Set Tasks = "a b c d";
Element j(set = Tasks);
DiscreteVariable x(dom = Workers, index = j);
sum(Boolean(x[j] == "ken"), j) == 2;
```

集合の要素が文字列である場合は，ダブルクォート"で囲む必要があります．

6.9 最小（大）値取得関数 min，max

wcsp 使用時には，最小値取得関数 min 及び最大値取得関数 max は，第一引数を定数式ではなく式にすることもできます．

```
// 添字の範囲にわたる最小値
Expression   min(式，範囲指定並び)        // 戻り値は一般の式
// 添字の範囲にわたる最大値
Expression   max(式，範囲指定並び)        // 戻り値は一般の式
```

第一引数が式の場合には，内部で wcsp 専用の特別な処理を行うため良好なパフォーマンスが期待されます.

次の例では施設配置問題の「最寄りの施設に収容される」という制約を min 関数を用いて表現しています.

```
Set Mesh;// メッシュ集合
Element i(set = Mesh);
Set Facility;// 施設集合
Element j(set = Facility);

// メッシュ i が施設 j に収容されるならば 1 そうでないならば 0
IntegerVariable x(type = binary, index = (i, j));
// 施設 j が建設されるならば 1 されないならば 0
IntegerVariable y(type = binary, index = j);
// メッシュ i から施設 j までの距離
Parameter dist(index = (i, j));

// 制約，各メッシュは 1 つの施設に対応される
selection(x[i, j], j);

// メッシュ i から収容される施設までの距離
Expression res_dist(index = i);
res_dist[i] = sum(x[i, j] * dist[i, j], j);

// メッシュから収容される施設は，建設された施設の中では
// 最寄のものとする
Parameter M;// 十分大きい数
M = 1000000;
res_dist[i] <= min((1 - y[j]) * M + dist[i, j], j);

// 以下は min 関数を用いないで定式化する場合の記述方法
// res_dist[i] <= (1 - y[j]) * M + dist[i, j];
```

wcsp 以外のアルゴリズム選択時で，式に対し min 関数や max 関数を用いるような定式化を行いたい

場合には，上記の例題記述においてコメントで示されているように非線形な記述を用いない等価な書き換えが存在します．min/max 関数の定式化や求解について，より詳細には nuopt-support@msi.co.jp までお問い合わせください．

6.10 カウント関数 count

条件を満たす式の数を取得するカウント関数 count は，添字付けられた式及び定数項の中で与えられた条件（線形の不等式）を満たす個数を返す関数です．以下の仕様になっています．

```
// 添字の範囲にわたる最小値
Expression   count(条件式, 範囲指定並び)        // 戻り値は一般の式
```

count 関数によって，中間変数を用いることなく個数を数え上げることができるので問題規模の増加を防ぐことができます．目的関数や softConstraint で用いる場合にはメタヒューリスティクスの性質によりノイズを加えることによって速度を向上させることが可能です．以下簡単に説明します．

```
IntegerVariable x(index = I, type = binary);


Objective obj(type = minimize);
obj = count(x[i] == 1, i);
```

上記のような問題の場合にノイズの導入は有効です．以下のように目的関数を書き換えます．

```
IntegerVariable x(index = I, type = binary);
Parameter rand(index = I);
Parameter M;
Objective obj(type = minimize);
obj = count(x[i] == 1, i) * M + sum(x[i] * rand[i], i);
```

上記パラメータ rand は適当な乱数を想定しています．M は目的関数の第二項が第一項に影響を及ぼさないようにするためのスケーリング値です．このようにすると大幅に速度向上する場合がありますのでお試しください．

第7章 資源制約付きスケジューリング問題ソルバ rcpsp

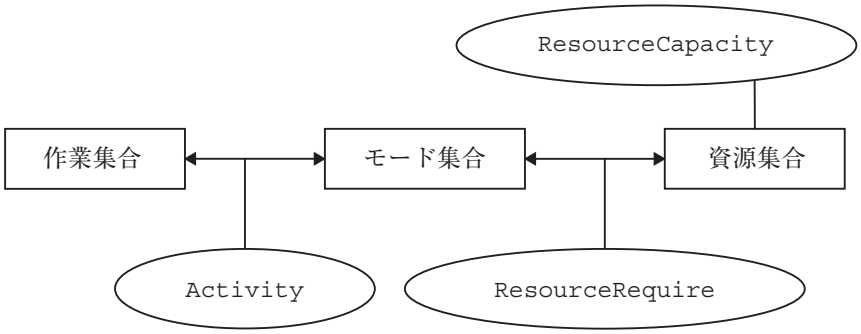
資源制約付きスケジューリング問題とは

- 幾つかの作業が存在し，一定の資源下でそれらの最後の作業の完了時刻を最小化する問題
- 納期のある幾つかの作業が存在し，一定の資源下でそれらの納期遅れを最小化する問題

のことを指します．Numerical Optimizer では資源制約付きスケジューリング問題ソルバ rcpsp を用いてこれらの問題を解く事ができます．

7.1 rcpsp の構成要素

資源制約付きスケジューリング問題ソルバ rcpsp を利用する際には，必ず次の 3 つの構成要素 `Activity`, `ResourceRequire`, `ResourceCapacity` を定義しなければなりません．この 3 つの構成要素の関係を表すと，以下のような図になります．



作業集合は，「必ず実施しなければならない作業」から構成される集合です．作業集合の要素には，実施する必要の無い作業が含まれてはいけません．モード集合は，「作業に対する対処方法」から構成される集合です．「作業に対する対処方法」の事を，rcpsp ではモードと呼びます．資源集合は，「モードの利用に必要な資源」から構成される集合です．rcpsp を利用する際には，まずこの 3 種類の集合を定義する必要があります．

次に，「どの作業をどのモードで処理するか」に相当する変数 `Activity` を定義します．rcpsp が決定するのは，この `Activity` の値です．さらに，「各モードはどの資源をどの程度必要とするか」に相当する定数 `ResourceRequire` を定めます．最後に，「資源はどれだけ利用できるか」に相当する定数 `ResourceCapacity` を定めます．

なお，rcpsp では完了時刻最小化問題と，納期遅れ最小化問題を扱うことができます．どちらを扱うかは，目的関数で指定します．

rcpsp で利用することのできる構成要素は以下の通りです．

構成要素名	SIMPLE 内の名称	機能
目的関数	Objective	目的関数を表す
制約式	Constraint	制約式を表す
定数	Parameter	定数を表す
範囲演算関数	sum	$\sum$ に相当する
式	Expression	頻出する数式に対して，簡単な別の表現を与える
添字	Element	添字を表す
集合	Set	添字の動く範囲を表す
順序集合	OrderedSet	要素間に順序を持つ集合を表す
数列集合	Sequence	等差数列からなる集合を表す
条件式		制約式や代入文を制限する
ソフト制約関数	softConstraint	ソフト制約を表す
ブール関数	Boolean	制約式を引数として，0-1 を返す
アクティビティ	Activity	必要な作業がどのモードを用いるかという変数
必要資源	ResourceRequire	モードの利用に必要な資源を表す
資源供給量	ResourceCapacity	利用可能な資源の限界値を表す
モード順序関数	modeOrder	モード順序を同一に設定する
アクティビティ固定関数	fixActivity	アクティビティを固定する
アクティビティ固定解除関数	unfixActivity	アクティビティの固定を解除する

以降，rcpsp でのみ利用可能な構成要素，あるいは rcpsp で用いる場合に注意を要する構成要素に関してのみ説明します．

7.2 目的関数クラス Objective

rcpsp では，最後の作業の完了時刻，納期遅れの 2 種類が目的関数 Objective に設定出来ます．自動的に最小化問題として扱われ，最大化問題として記述する事はできません．

最後の作業の完了時刻最小化問題を扱うには，次のように定めます

```
Objective f;
f = completionTime;
```

納期遅れ最小化問題を扱うには，次のように定めます．

```
Objective = f;
f = tardiness;
```

最後の作業の完了時刻最小化問題を扱う場合は，目的関数に重みを設定することができます．目的

関数の重みは求解オプション defaultObjectiveWeight で指定します．次の例では，目的関数の重みに 5 を指定しています．

```
options.defaultObjectiveWeight = 5;
```

求解オプション defaultObjectiveWeight の初期値は 1 です．

納期遅れ最小化問題を扱う場合は，目的関数に重みを設定する事はできません．

7.3 制約式クラス Constraint

rcpsp を利用する際には，以下のようなものが制約式として扱われます．

- 先行制約
- 直前先行制約
- Activity の要素による制約
- 同一モード順序選択関数による制約
- 固定関数による制約

取り扱う問題が最後の作業の完了時刻最小化問題（完了時刻最小化問題）の場合，制約式に重みを設定することができます．ハード制約，セミハード制約を設定することはできません．制約式に対してソフト制約を設定するには，softConstraint 関数あるいは求解オプション defaultConstraintWeight を利用します．

納期遅れ最小化問題を扱う場合には，制約式に重みを設定することはできず，全ての制約がハード制約として扱われます．

7.4 アクティビティクラス Activity

どの作業をどのモードで行うかを定めるアクティビティは，Activity で表現されます．Activity は rcpsp 利用時の変数に相当します．モード集合は，引数 mode で与えられます．

次の例では 4 つの作業 a, b, c, d に対するアクティビティ x[a], x[b], x[c], x[d] を定めています．それぞれの作業にはモード 1, 2, 3 のいずれかが割り当てられます．

```
Set A = "a b c d";
Set M = "1 2 3";
Element i(set = A);
Activity x(index = i, mode = M);
```

納期遅れ最小化問題を扱う場合には，各 Activity に対する納期（定数 Parameter で表現されます）を引数 duedate で指定する必要があります．次の例では，4 つの作業 a, b, c, d に対して，納期 3, 5, 10, 7 を設定しています．

```
Set A = "a b c d";
Set M = "1 2 3";
```

```
Element i(set = A);
Parameter due(index = i); // 納期を示す定数
Activity x(index = i, mode = M, duedate = due[i]);
due["a"] = 3;
due["b"] = 5;
due["c"] = 10;
due["d"] = 7;
```

各作業に対して割り当て可能なモード集合が異なる場合は，引数 mode にモード集合族を与えます．次の例では，作業 a はモード 1, 2 作業 b はモード 1, 3 作業 c はモード 2 作業 d はモード 3 を取ることができます．

```
Set A = "a b c d";
Set M = "1 2 3";
Set M2(index = i); // モード集合族
M2["a"] = "1, 2";
M2["b"] = "1, 3";
M2["c"] = "2";
M2["d"] = "3";
Activity x(index = i, mode = M2[i]);
```

7.4.1 先行制約，直前先行制約

先行制約とは，ある作業が必ず別の作業より先に実施されていなければならない，という制約のことです．先行制約は，アクティビティ Activity 間の不等式<で表現されます．次の例では，作業 a は作業 b に優先することを記述しています．

```
Set A = "a b c d";
Activity x(index = i, mode = M);
x["a"] < x["b"];
```

先行制約の後ろには，条件式を付ける事もできます．次の例では，作業 a, b, c は作業 d に優先することを記述しています．

```
Set A = "a b c d";
Activity x(index = i, mode = M);
x[i] < x["d"], i != "d";
```

先行制約の後ろには，先行する期間を定数 Parameter で指定できます．以下の例では，作業 a は作業 b に 2 期間先行することを記述しています．

```
Set A = "a b c d";
Activity x(index = i, mode = M);
Parameter p = 2;
x["a"] < x["b"], p;
```

簡略して，次のように書くこともできます．

```
x["a"] < x["b"], 2;
```

直前先行制約は，特定の資源を消費する状況ではある作業が別の作業の直後に来る，という制約を表現します．直前先行制約は，アクティビティ Activity 間の不等式<<で表現されます．直前先行制約は，完了時刻最小化問題でのみ使用することができます．

次の例では，作業 a, b いずれも資源 X を用いる場合（どちらも資源 X が必要なモードを取得した場合）には作業 a は作業 b に優先することを記述しています．

```
x["a"] << x["b"], "X";
```

7.4.2 Activity の要素

以下の要素の定数倍を足し合わせて一般の制約式を記述することができます．

```
Activity.startTime // 作業の開始時刻
Activity.endTime // 作業の終了時刻
Activity.processTime // 作業の所要期間
Boolean(Activity == 文字列)　と　Activity.startTime との積
Boolean(Activity == 文字列)　と　Activity.endTime との積
```

次の例では，作業 a の所用期間を 2 以下と定めています．

```
Set A = "a b c d";
Activity x(index = i, mode = M);
x["a"].processTime <= 2;
```

また Activity には，全てのアクティビティに対して先行するアクティビティ sourceActivity，全てのアクティビティに対して後続するアクティビティ sinkActivity が，各々自動的に定義されます．

7.4.3 初期値の設定

探索における Activity の初期値を明示的に与える事が出来ます．rcpsp の初期値として与える事の出来るものは，以下の 2 つです．

```
// 処理モード：
Activity = 文字列 [, 条件式]
Activity = Parameter[, 条件式]
// 作業リスト：
Activity.order = 整数値
Activity.order = Parameter
```

上記 2 つは，solve () がコールされる前に記述します．

作業リストとは，全作業の順列であり，スケジュールが生成される際の基になるものです．rcpsp では，この順序に従って，開始時刻が順に決定されています．ただし，以下の点にご注意ください．

1. 初期値として与えているものは，作業リスト内の順番であり，初期化は全てのアクティビティに対して行わなければならない
2. 先行制約「作業 i <作業 j」が存在する場合には，作業リストの中で，i は j よりも先に位置しなければならない
3. 直前先行制約で関連づけられた作業の集合は，作業リストの中で連続して現れなければならない

7.5 必要資源クラス ResourceRequire

各モードに対する必要資源の量は ResourceRequire クラスで設定します．ResourceRequire は rcpsp 利用時に必要な定数の一つです．モード集合が引数 mode で，資源集合が引数 resource で与えられます．また，モード開始時からの経過時間を表す経過時間集合が引数 duration で与えられます．これら 3 つの引数は全て指定する必要があります．

次の例では，モード集合 M，資源集合 R，経過時間集合 D に対する必要資源 req を定義しています．

```
Set M; // モード集合
Set R; // 資源集合
Set D; // 経過時間集合
ResourceRequire req(mode = M, resource = R, duration = D);
```

次の例では，モード aonly, bonly, both それぞれに対して必要な資源 a, b を定めています．モードは全て期間 1 で終わり，モード aonly は資源 a が 1 期間，モード bonly は資源 b が 1 期間，モード both は資源 a, b の両方が 1 期間必要であることを示しています．

```
Set M = "aonly bonly both";
Set R = "a b";
Set D = "1"
ResourceRequire req(mode = M, resource = R, duration = D);
req["aonly, a, 1"] = 1;
req["aonly, b, 1"] = 0; // 記述しなくても良い
req["bonly, a, 1"] = 0; // 記述しなくても良い
```

```
req["bonly, b, 1"] = 1;
req["both, a, 1"] = 1;
req["both, b, 1"] = 1;
```

必要資源 ResourceRequire の値は，何も設定しない場合 0 が設定されます．上記の例では，特に設定する必要の無い行が二行あります．

初期設定値を 0 以外の値にするには，引数 defaultval を用います．次の例では，初期設定値を 1 にしているため，上記の例で 0 を設定していた箇所のみ設定する必要があります．

```
Set M = "aonly bonly both";
Set R = "a b";
Set D = "1"
ResourceRequire req(mode = M, resource = R,
  duration = D, defaultval = 1); // 初期値を 1 にした
req["aonly, b, 1"] = 0;
req["bonly, a, 1"] = 0;
```

次の例では，モード aonly は資源 a が 3 期間，モード bonly は資源 b が 3 期間，モード both は資源 a, b の両方が 1 期間必要であることを示しています．

```
Set M = "aonly bonly both";
Set R = "a b";
Set D = "1 2 3" // 期間を表す
Element i(set = D);
ResourceRequire req(mode = M, resource = R, duration = D);
req["aonly, a", i] = 1, 1 <= i <= 3;
req["bonly, b", i] = 1, 1 <= i <= 3;
req["both, a, 1"] = 1;
req["both, b, 1"] = 1;
```

7.6 資源供給量クラス ResourceCapacity

各資源の利用可能限界値を意味する資源供給量クラスは，ResourceCapacity で表現されます．資源集合が引数 resource で，スケジューリング全体の期間を表す期間集合が引数 timeStep で表現されます．どちらの引数も必要です．

次の例では，資源集合 R，期間集合 T に対する資源供給量 cap を定義しています．

```
Set R; // 資源集合
Set T; // 期間集合
ResourceCapacity cap(resource = R, timeStep = T);
```

次の例では，期間 0 から 10 に対して，資源 a, b はいずれも毎日 1 だけ利用可能であることを記述しています．期間集合は 0 始まりの集合でなければなりません．

```
Set R = "a b"; // 資源集合
Set T = "0 .. 10"; // 期間集合
Element j(set = T);
ResourceCapacity cap(resource = R, timeStep = T);
cap["a", j] = 1, 1 <= j <= 10;
cap["b", j] = 1, 1 <= j <= 10;
```

資源供給量の初期設定値は 0 です．

資源供給量には重みを設定する事ができます．重みは引数 weight で与えます．次の例では，一律に重み 10 を設定しています．

```
Set R; // 資源集合
Set T; // 期間集合
ResourceCapacity cap(resource = R, timeStep = T, weight = 10);
```

引数 weight には定数 Parameter を与える事もできます．次の例では，資源 a に対する資源供給量には重み 10 を，資源 b に対する資源供給量には重み 20 を与えています．

```
Set R = "a b"; // 資源集合
Set T = "0 .. 10"; // 期間集合
Element i(set = R);
Element j(set = T);
Parameter w(index = i);
w["a"] = 10;
w["b"] = 20;
ResourceCapacity cap(resource = R, timeStep = T, weight = w[i]);
```

7.7 モード順序関数 modeOrder

モード順序関数 modeOrder は Activity を引数に取り，Activity のモード順序が同一である，という制約を表現します．

次の例は，作業 a がモード 1 を取った場合には作業 b はモード 2 を取る事．また，作業 a がモード 3 を取った場合は，作業 b はモード 1 を取ることを記述しています．

```
Set A = "a b";
Element i(set = A);
Set M(index = i);
M["a"] = "1 3";
```

```
M["b"] = "2 1";
Activity x(index = i, mode = M[i]);
modeOrder(x["a"]) == modeOrder(x["b"]);
```

次の例は，作業 a と作業 b のモードが同じであることを記述しています．但し，この記述は作業 a, b に対するモード集合が同一でなければできません．

```
Set A = "a b c d";
Element i(set = A);
Activity x(index = i, mode = M);
modeOrder(x["a"]) == modeOrder(x["b"]);
```

Activity の添字には，条件式を付与することもできます．次の例は，作業 b 以外の全ての作業のモードが作業 a のモードと同じであることを記述しています．

```
Set A = "a b c d";
Element i(set = A);
Activity x(index = i, mode = M);
modeOrder(x[i, i != "b", i != "a"]) == modeOrder(x["a"]);
```

7.8 アクティビティ固定関数 fixActivity

rcpsp における変数である，Activity, Activity.startTime, Activity.endTime の値は，アクティビティ固定関数 fixActivity を用いる事で，直前に代入されている値で固定する事が出来ます．

次の例では，作業 a の開始時刻を 5 に固定しています．

```
Set A = "a b c d";
Activity x(index = i, mode = M);
x["a"].startTime = 5;
fixActivity(x["a"].startTime);
```

次の例では，作業 b 以外の全ての作業の終了時刻を 10 に固定しています．

```
Set A = "a b c d";
Activity x(index = i, mode = M);
x[i].endTime = 10, i != "b";
fixActivity(x[i].endTime, i != "b");
```

fixActivity 関数の第二引数で，重みを設定する事ができます．次の例では，作業 a の開始時刻を 5 に固定し，その重みを 100 に設定しています．

```
Set A = "a b c d";
Activity x(index = i, mode = M);
```

```
x["a"].startTime = 5;
fixActivity(x["a"].startTime, 100);
```

7.9 アクティビティ固定解除関数 unfixActivity

アクティビティ固定解除関数 unfixActivity を用いることで，アクティビティ固定関数 fixActivity で固定された内容を解除することができます．

次の例では，固定した作業 a の開始時刻を解除しています．

```
Set A = "a b c d";
Activity x(index = i, mode = M);
x["a"].startTime = 5;
fixActivity(x["a"].startTime);
unfixActivity(x["a"].startTime);
```

次の例では，固定した作業 b 以外の終了時刻を解除しています．

```
Set A = "a b c d";
Activity x(index = i, mode = M);
x[i].endTime = 10, i != "b";
fixActivity(x[i].endTime, i != "b");
unfixActivity(x[i].endTime, i != "b");
```

7.10 資源制約付きスケジューリング問題の重みの設定

rcpsp の利用時には以下に対して重みを設定する事が可能です．

- 目的関数
- 資源の利用可能量
- 制約式

重みの値は，正の整数値を設定する必要があります．具体的な設定方法に関しては，それぞれの節を参照してください．

最後の作業の完了時刻最小化問題を扱う際にはソフト制約のみ，納期遅れ最小化問題を扱う際にはハード制約のみ扱うことができます．

7.11 資源制約付きスケジューリング問題記述例

ここでは，資源制約付きスケジューリング問題の一種である人員スケジューリング問題を，SIMPLE を用いて記述する方法を紹介します．

具体的には，次のような人員スケジューリング問題を考えます．

■■例題 1 全体の作業完了時刻最小化

6 つの仕事（1,…,6）を A, B, C の 3 人に割り振ろうとしている．各人は同時に 2 つ以上の仕事はできず，A, B, C の習熟度により，各人が仕事の完成に必要な日数は異なっている．6 つの仕事それぞれは均質であるので，すべての仕事について各人の所要時間は以下のようになると考えてよい．

仕事 1-6 の所要時間

	所要時間
A	6 日
B	8 日
C	11 日

この時，すべての仕事が完成するまで最短で何日程度所要するか，また，その際の A, B, C への仕事の割り当てはどのようにすればよいか．なお，すべての仕事を終えるまでの所要時間は最大で 40 日までとする．

この問題に対する SIMPLE の定式化は以下のようになります．

```
//
//  例題 1（全体の作業完了時刻最小化）
//
Set M = "A_does B_does C_does"; // モード
Element m(set = M);
Set R = "A B C";   // 資源
Element r(set = R);
Set D = "1 .. 11"; // 各モードの作業時間（日単位で最大が 11 日である）
Element d(set = D);
// モードと資源消費の連関
ResourceRequire  req(mode = M, resource = R, duration = D);
req["A_does, A", d] = 1, 1 <= d <= 6;
req["B_does, B", d] = 1, 1 <= d <= 8;
req["C_does, C", d] = 1, 1 <= d <= 11;
// アクティビティ
Set J = "1 .. 6";
Element j(set = J);
Activity act(name = "act", index = j, mode = M); // 作業（j = 1, …, 6）
// 利用可能な資源の定義
Set T = "0 .. 40"; // スケジューリング全体の時間（日単位で最大 40 日とする）
Element t(set = T);
ResourceCapacity cap(resource = R, timeStep = T);
```

```
cap[r, t] = 1;
Objective f(type = minimize);
f = completionTime; // 最後の作業の完了時刻最小化
options.maxtim = 2;
// 求解
solve();
// 解の表示
simple_printf("job = %d %s %2d %2d %2d\n", j, act[j], act[j].startTime, act[j].endTime,
  act[j].processTime);
```

それでは，このモデルに対する定式化の手順を見ていきましょう．

例題において実施しなければならない作業は 6 つの仕事です．そこでこれらを作業集合 J として定義します．

```
Set J = "1 .. 6";
```

それぞれの作業には，{A に任せる，B に任せる，C に任せる} の三種類のモード（対処方法）が存在します．そこでこれらをモード集合 M として定義します．

```
Set M = "A_does B_does C_does";
```

モードが利用する資源は，A, B, C の 3 人のみですから，これらを資源集合 R として定義します．

```
Set R = "A B C";
```

上記を整理すると次のようになります．

■■例題 1 の rcpsp による表現のための整理

1. 作業
   各仕事 j（j=1,…,6）に対応してアクティビティが存在し，各仕事の作業モードと開始時刻，終了時刻を決定したい．
2. モード
   各仕事 j には以下の 3 つのモードが対応付けられる．

仕事 1-6 に対応するモード

モード種別	所要時間	消費資源
A_does	6 日	A を各日について 1
B_does	8 日	B を各日について 1
C_does	11 日	C を各日について 1

3. 資源
   各人に対応する A, B, C があり，次の量が利用可能である．

資源	利用可能量
A	全時間ステップで 1
B	全時間ステップで 1
C	全時間ステップで 1

次に，これら 3 つの集合の関連付けを行います．

全ての作業は，モード集合のいずれかのモードで行われる事を示します．そのため，Activity の引数には作業集合 J の添字と，モード集合 M を与えます．

```
Set J = "1 .. 6";
Element j(set = J);
Set M = "A_does B_does C_does";
Activity act(index = j, mode = M);
```

モードに対応する資源を与える定数 ResourceRequire は次のように定義されます．引数には，モード集合 M と資源集合 R 以外に，新たに作業時間集合 D を定義する必要があります．今回の例では資源を用いる最大期間が 11 日なので，D = "1 .. 11"と定めています．

```
Set M = "A_does B_does C_does";
Set R = "A B C";
Set D = "1 .. 11";
Element d(set = D);
ResourceRequire req(mode = M, resource = R, duration = D);
```

モード A_does は資源 A を 6 日間，モード B_does は資源 B を 8 日間，モード C_does は資源 C を 11 日間用いるので，各々の ResourceRequire の値は，次のように設定します．

```
ResourceRequire req(mode = M, resource = R, duration = D);
req["A_does, A", d] = 1, 1 <= d <= 6;
req["B_does, B", d] = 1, 1 <= d <= 8;
req["C_does, C", d] = 1, 1 <= d <= 11;
```

次は資源供給量 ResourceCapacity の設定です．各人は同時に 2 つ以上の仕事をすることはできないので，資源の上限値は，最後の期間まで全て 1 です．スケジューリングの期間は全体で 40 日なので，期間集合 T は T = "0 .. 40"で定めます．なお，期間集合は 0 はじまりでなければなりません．これらをまとめると，次のように設定されます．

```
Set R = "A B C";
Element r(set = R);
Set T = "0 .. 40";
Element t(set = T);
```

```
ResourceCapacity cap(resource = R, timeStep = T);
cap[r, t] = 1; // 資源の上限値
```

次に問題の種類を指定します．rcpsp で扱う事の出来る問題は，

- 幾つかの作業が存在し，一定の資源下で最後の作業の完了時刻を最小化する問題
- 納期のある幾つかの作業が存在し，一定の資源下でそれらの納期遅れを最小化する問題

の二種類ですが，ここで扱う問題は前者です．これは目的関数で以下のように指定します．

```
Objective f(type = minimize);
f = completiontime; // 完了時刻最小化を示す
```

最後に，終了条件を指定します．今回は終了条件として，計算時間 2 秒を設定します．

```
options.maxtim = 2;
```

以上をまとめると，本例題の定式化が完了します．

SIMPLE モデルを実行させると，次のような実行結果が得られます．

```
job = 1 "A_does"  6 12  6
job = 2 "B_does"  8 16  8
job = 3 "A_does" 12 18  6
job = 4 "C_does"  0 11 11
job = 5 "A_does"  0  6  6
job = 6 "B_does"  0  8  8
```

この出力は，最適化の実行（直前の `solve ()` 呼び出し）が終わった後の

```
// 解の表示
simple_printf("job = %d %s %2d %2d %2d\n", j, act[j], act[j].startTime, act[j].endTime,
  act[j].processTime[j]);
```

に対応するもので，rcpsp が求めた各仕事についてのモード，作業開始時刻，終了時刻，作業所要時間が表示されています．この表示から，例えば仕事 1 は A に実施させ（`A_does` というモードを適用），作業開始は 6 日目，終了は 12 日目で，作業所要時間は 6 という解となっていることがわかります．細かな点ですが，仕事 1 の場合，作業開始は 6 日目のスタートで，作業終了は 12 日目が始まる直前（すなわち 11 日目一杯まで）と解釈してください．このように解釈すると，作業所要時間は作業終了時刻から作業開始時刻を引いたものになります．

なお，この例題は作業完了時刻最小化問題ですので，制約に重みを設定することが可能です．いま，各モードで仕事を行った際にコストが発生するとします．そのもとで，コストが 0 を超過した分に制約の重みをかけたペナルティと完了時刻の値を足した全体を最小化することを考えます．

先程のモデルの `solve()` 以前に，

```
Parameter cost(index = m);
cost["A_does"] =  5; cost["B_does"] =  2; cost["C_does"] =  1;
Expression costTotal;
costTotal = sum(Boolean(act[j] == m) * cost[m], (j, m)); // 全コスト
softConstraint(1); // 制約式の重み
costTotal <= 0; // コストの最小化に対応する制約式
```

を追加します．A_does，B_does，C_does 各々のモードを選択したときにコストは各々 5，2，1 かかるものとし，コスト全体を costTotal で表現しています．

この実行結果は次のようになります．

```
job = 1 "C_does"  0 11 11
job = 2 "C_does" 11 22 11
job = 3 "B_does"  8 16  8
job = 4 "A_does"  0  6  6
job = 5 "B_does"  0  8  8
job = 6 "B_does" 16 24  8
```

先程の問題は作業完了時刻が 18 であったのに対し，今回の問題の完了時刻は 24 となり，完了するまでに時間を要するようになりました．その分，コストの小さいモード C_does で行う仕事が増加し，コストの大きいモード A_does で行う仕事が減少しております．

次に，納期遅れ最小化問題を考えます．実際のプロジェクトスケジューリングにおいては，「各仕事に納期が設定されており，納期遅れを最小化したい」という問題も多く存在します．

■■例題 2　納期遅れ最小化

例題 1 の状況において，各仕事について次のような納期が設定されているとき，納期遅れを最小化するようなスケジュールを出力せよ．

仕事	納期
1	10 日
2	10 日
3	10 日
4	17 日
5	17 日
6	6 日

これは Activity の定義に納期情報を設定し，目的関数に納期遅れ最小化を定義することによって可能です．

```
Set J = "1 .. 6";
Element j(set = J);
Parameter due(index = j);
Activity act(index = j, mode = M, duedate = due[j]);
```

目的関数には次のようにして納期遅れを設定します.

```
// 納期遅れ最小化
Objective f(type = minimize);
f = tardiness;
```

これらを反映した例題 2 の SIMPLE モデルは次のようになります.

```
//
//  例題 2（納期遅れ最小化）
//
Set M = "A_does B_does C_does"; // モード
Element m(set = M);
Set R = "A B C";   // 資源
Element r(set = R);
Set D = "1 .. 11"; // 各モードの作業時間の最大
Element d(set = D);
ResourceRequire  req(mode = M, resource = R, duration = D);
req["A_does, A", d] = 1, 1 <= d <= 6;
req["B_does, B", d] = 1, 1 <= d <= 8;
req["C_does, C", d] = 1, 1 <= d <= 11;
Set J = "1 .. 6";
Element j(set = J);
Parameter due(index = j);
due[j] = 10, 1 <= j <= 3;
due[j] = 17, 4 <= j <= 5;
due[j] = 6, j == 6;
Activity act(name = "act", index = j, mode = M, duedate = due[j]);
Set T = "0 .. 40"; // スケジューリング全体の時間（日単位）
Element t(set = T);
ResourceCapacity cap(resource = R, timeStep = T);
cap[r, t] = 1;
Objective f(type = minimize);
f = tardiness; // 納期遅れ最小化
options.maxtim = 2;
```

```
solve();
// 解の表示
simple_printf("job = %d %s %2d %2d %2d\n", j, act[j], act[j].startTime, act[j].endTime,
  act[j].processTime);
```

実行結果は，以下のようになります．

```
job = 1 "A_does"  6 12  6
job = 2 "C_does"  0 11 11
job = 3 "B_does"  0  8  8
job = 4 "B_does"  8 16  8
job = 5 "A_does" 12 18  6
job = 6 "A_does"  0  6  6
```

第8章 データファイル

8.1 データファイルの機能

SIMPLE では，定数 Parameter の値，集合 S の要素，変数 Variable の初期値をデータファイルと呼ばれる外部ファイルから与える事ができます．データファイルには dat 形式データファイル（拡張子.dat），csv 形式データファイル（拡張子.csv）の二種類が存在し，それぞれ利用方法が異なります．

データファイルを用いることで，数値のみが異なる数理計画問題を簡便に扱う事ができます．

一つのモデルファイルは，複数のデータファイルを利用する事ができます．複数のデータファイルを利用する場合，それらの形式を統一する必要はありません（dat 形式と csv 形式が混在していても問題ありません）．以下は，モデルファイル model.smp とデータファイル data1.dat, data2.csv をコマンドラインから使用する例です（Windows 版）．

```
prompt% mknuopt model.smp
```

```
prompt% model.exe data1.dat data2.csv
```

データファイルを引数に与える順番は任意です．すなわち，次のコマンドは上記と等価です．

```
prompt% model.exe data2.csv data1.dat
```

同じ対象に対して複数のデータファイルから値を設定した場合，エラーとなります．

8.2 dat 形式データファイル

dat 形式データファイルでは，定数 Parameter の値，集合 S の要素，変数 Variable の初期値が設定できます．拡張子が.dat であるデータファイルは dat 形式データファイルと解釈されます．

定数の値や変数の初期値を設定する場合は，name 引数によって定数や変数の名前を定めることができます．特に name 引数を付けない場合には，モデルファイルで定義された名称そのものが name だと認識されます．つまり，以下の二つの例は同等です．

```
Parameter a;
```

```
Parameter a(name = "a");
```

dat 形式データファイルの行末には半角セミコロン; を付ける必要があります．

次の例では，dat 形式データファイルに定数 a(name = "aa") の値 10 を設定しています．

モデルファイル内

```
Parameter a(name = "aa");
```

データファイル内（dat 形式）

```
aa = 10;
```

次の例では，dat 形式データファイルに変数 x(name = "xx") の初期値 4 を設定しています．

モデルファイル内

```
Variable x(name = "xx");
```

データファイル内（dat 形式）

```
xx = 4;
```

次の例では，dat 形式データファイルで集合 S の要素 1 2 3 を設定しています．データファイル内で定義する場合は，モデルファイル内で定義する場合と異なり，ダブルクォート"で囲ってはいけません．

モデルファイル内

```
Set S;
```

データファイル内（dat 形式）

```
S = 1 2 3;
```

一つの dat 形式データファイルには，まとめて複数の設定を記述することができます．以下の例では，定数 a(name = aa) の値 10，変数 x(name = xx) の初期値 4，集合 S の要素 1 2 3 を全て設定しています．

モデルファイル内

```
Parameter a(name = "aa");
Variable x(name = "xx");
Set S;
```

データファイル内（dat 形式）

```
aa = 10;
xx = 4;
S = 1 2 3;
```

dat 形式データファイル内では，任意に改行を挟むことができます．

```
aa = 10;
xx = 4;


S = 1 2 3;
```

//はじまりのコメント文を付与することもできます．

```
// 定数の設定
aa = 10;

// 初期値設定
xx = 4;

// 集合の定義
S = 1 2 3;
```

添字を持つ定数 Parameter の値や，変数 Variable の初期値を設定するには，以下のように [] を用います．次の例では，定数 a[1], a[2], a[3] に対して，初期値 1, 0.5, -1 を与えています．

モデルファイル内

```
Set S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Parameter a(name = "aa", index = i);
```

データファイル内（dat 形式）

```
aa = [1] 1 [2] 0.5 [3] -1;
```

行末の半角セミコロン; は，一つの設定データの最後に記述します．改行は自由なので，データファイル部分は，以下のように記述する事もできます．

```
aa = [1] 1
     [2] 0.5
     [3] -1;
```

これは，モデルファイル内で以下のように記述する場合と同じ意味です．

```
a[1] = 1;
a[2] = 0.5;
a[3] = -1;
```

データファイル内で値を設定する場合は，添字部分にダブルクォート"は付けません．

次は，変数 x["1，p"], x["1，q"], x["2，p"], x["2，q"] に初期値 1, 3, 5, 7 を与える例です．

モデルファイル内

```
Set S = "1 2";
Set T = "p q";
Element i(set = S);
Element j(set = T);
Variable x(name = "xx", index = (i, j));
```

データファイル内（dat 形式）

```
xx = [1, p] 1 [1, q] 3
     [2, p] 5 [2, q] 7;
```

これは，モデルファイル内で以下のように記述する場合と同じ意味です．

```
xx["1, p"] = 1;
xx["1, q"] = 3;
xx["2, p"] = 5;
xx["2, q"] = 7;
```

集合クラスの構成要素は，明示的に定義しなくとも，モデルファイルやデータファイルの情報から自動的に定義されます．これを SIMPLE の**自動代入機能**と呼びます．以下の例では，自動代入機能により，集合 S の要素は 1, 2, 3 であると判断されます．

モデルファイル内

```
Set S;
Element i(set = S);
Parameter a(index = i);
```

データファイル内（dat 形式）

```
a = [1] -1 [2] -1 [3] 1;
```

以下のように，csv 形式データファイルで a[1], a[2], a[3] の値を定めた場合も同様です．

```
i, a
1, -1
2, -1
3, 1
```

以下のように，モデルファイル内で a[1], a[2], a[3] の値を定めた場合も同様です．

```
Set S;
Element i(set = S);
Parameter a(index = i);
a[1] = -1;
a[2] = -1;
a[3] = 1;
```

8.3 csv 形式データファイル

csv 形式データファイルでは，定数 Parameter の値，変数 Variable の初期値が設定できます．dat 形式データファイルと異なり，集合 Set の要素を設定することはできません．csv 形式データファイル

の拡張子は.csv でなければなりません.

定数の値や変数の初期値を設定する場合は，name 引数によって定数や変数の名前を定める必要があります．Windows 版では，特に name 引数を付けない場合には，モデルファイルで定義された名称そのものが name だと認識されます．つまり，以下の二つの例は同等です.

```
Parameter a;
```

```
Parameter a(name = "a");
```

csv 形式のデータファイルは半角コンマ, で区切られた行から構成されています.

次の例では，csv 形式データファイルに定数 a(name = "aa") の値 10 を設定しています.

モデルファイル内

```
Parameter a(name = "aa");
```

データファイル内（csv 形式）

```
aa
10
```

なお，csv 形式データファイルではヘッダー行のみの場合は読み込まれません．以下の例では定数 a には値が設定されませんのでご注意ください.

データファイル内（csv 形式）

```
aa, 10
```

次の例では，csv 形式データファイルに変数 x(name = "xx") の初期値 4 を設定しています.

モデルファイル内

```
Variable x(name = "xx");
```

データファイル内（csv 形式）

```
xx
4
```

一つの csv 形式データファイルには，まとめて複数の設定を記述することができます．以下の例では，定数 a(name = "aa") の値 10，変数 x(name = "xx") の初期値 4 を両方設定しています.

モデルファイル内

```
Parameter a(name = "aa");
Variable x(name = "xx");
```

データファイル内（csv 形式）

```
aa, xx
10, 4
```

//はじまりのコメント文を付与することもできます.

```
// 定数と初期値の設定
aa, xx
10, 4
```

改行を挟む事はできません.

添字のある定数 Parameter の値や，変数 Variable の初期値を設定する際には，以下のようにします．次の例では，定数 a[1], a[2], a[3] に対して，初期値 1, 0.5, -1 を与えています.

モデルファイル内

```
Set S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Parameter a(name = "aa", index = i);
```

データファイル内（csv 形式）

```
i, aa
1, 1
2, 0.5
3, -1
```

これは，モデルファイル内で以下のように記述する場合と同じ意味です.

```
a[1] = 1;
a[2] = 0.5;
a[3] = -1;
```

csv 形式データファイルではまとめて複数の設定を記述できますが，添字を持つ定数や変数をまとめて設定する場合は，それらが属する添字が同一でなければなりません．次の例では，定数 a[1], a[2], a[3] に対して，初期値 1, 0.5, -1 を，定数 b[1], b[2], b[3] に対して初期値 3, 5, 7.1 を与えています.

モデルファイル内

```
Set S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Parameter a(name = "aa", index = i);
Parameter b(name = "bb", index = i);
```

データファイル内（csv 形式）

```
i, aa, bb
1, 1, 3
2, 0.5, 5
3, -1, 7.1
```

次のように，定数 a と b の添字が異なる場合は，一つの csv 形式データファイルで a, b 両方の値を設定することはできません.

モデルファイル内

```
Set S = "1 2 3";
Set T = "p q";
Element i(set = S);
Element j(set = T);
Parameter a(name = "aa", index = i);
Parameter b(name = "bb", index = j);
```

csv 形式データファイルで 2 次元の添字を持つ定数 Parameter や変数 Variable の初期値を設定するには，二通りの方法があります．一つは添字を全て縦に左に記述する方法で，**1D 書式**と呼ばれます．もう一つは，最後の添字を横一行目に記述する方法です．これは **2D 書式**と呼ばれます．

以下の例では，変数 x["1，p"], x["1，q"], x["2，p"], x["2，q"] に初期値 1, 3, 5, 7 を 1D 書式で与える場合と，2D 書式で与える場合両方を記述しています．

モデルファイル内

```
Set S = "1 2";
Set T = "p q";
Element i(set = S);
Element j(set = T);
Variable x(name = "xx", index = (i, j));
```

データファイル内（csv 形式 1D 書式）

```
i，j，xx
1，p，1
1，q，3
2，p，5
2，q，7
```

データファイル内（csv 形式 2D 書式）

```
xx，p，q
1，1，3
2，5，7
```

これは，モデルファイル内で以下のように記述する場合と同じ意味です．

```
xx["1，p"] = 1;
xx["1，q"] = 3;
xx["2，p"] = 5;
xx["2，q"] = 7;
```

1D 書式の場合，定数や変数の添字が同じであれば，同時に複数の設定を行うことが可能です．しか

し，2D 書式の場合は一つの csv 形式データファイルに対して一つの定数あるいは変数しか設定する事ができません.

以下の例では，変数 x["1，p"], x["1，q"], x["2，p"], x["2，q"] に初期値 1, 3, 5, 7 を，定数 a["1，p"], a["1，q"], a["2，p"], a["2，q"] に値 2, 4, 6, 8 を 1D 書式で与えています.

モデルファイル内

```
Set S = "1 2";
Set T = "p q";
Element i(set = S);
Element j(set = T);
Variable x(name = "xx", index = (i, j));
Parameter a(name = "aa", index = (i, j));
```

データファイル内（csv 形式 1D 書式）

```
i，j，xx，aa
1，p，1，2
1，q，3，4
2，p，5，6
2，q，7，8
```

集合クラスの構成要素は，明示的に定義しなくとも，モデルファイルやデータファイルの情報から自動的に定義されます．これを SIMPLE の**自動代入機能**と呼びます．以下の例では，自動代入機能により，集合 S の要素は 1, 2, 3 であると判断されます.

モデルファイル内

```
Set S;
Element i(set = S);
Parameter a(index = i);
```

データファイル内（csv 形式）

```
i，a
1，-1
2，-1
3，1
```

以下のように，dat 形式データファイルで a[1], a[2], a[3] の値を定めた場合も同様です.

```
a = [1] -1 [2] -1 [3] 1;
```

以下のように，モデルファイル内で a[1], a[2], a[3] の値を定めた場合も同様です.

```
Set S;
Element i(set = S);
```

```
Parameter a(index = i);
a[1] = -1;
a[2] = -1;
a[3] = 1;
```

パラメータ定義時の添字の順序と csv 形式の添字の順序は一致している必要があります．例を使って説明します．

モデルファイル内

```
Set S;
Set T;
Element i(set = S);
Element j(set = T);
Parameter a(name = "aa", index = (i, j));
```

このモデルに対し以下のように設定したいとします．

```
aa["1, p"] = 1;
aa["1, q"] = 3;
aa["2, p"] = 5;
aa["2, q"] = 7;
```

以下はモデルファイル内の aa と添字の順序が異なるため無効となります．

データファイル内（csv 形式）

```
j, i, aa
p, 1, 1
q, 1, 3
p, 2, 5
q, 2, 7
```

以下のように設定してください．

データファイル内（csv 形式）

```
i, j, aa
1, p, 1
1, q, 3
2, p, 5
2, q, 7
```

第9章 最適化計算制御

9.1 solve 関数

solve 関数は Numerical Optimizer に最適化計算の実行を命令する関数です．以下の書式で記述されます．

```
solve();
```

モデルファイルに明示的に記述しない場合は，モデルファイルの最後に solve 関数が書かれた場合と同じ意味になります．従って，通常の場合はモデルファイルに solve 関数を明示的に記述する必要はありません．

しかし，以下のような場合は，どこで最適化計算を行っているかを明示的に指示する必要があります．

- 解いた後の構成要素の内容を表示させる．
- 複数の目的関数について連続して最適化を行う．
- モデルの定義を変更しながら複数回の最適化を行う．

以下は，解いた後の構成要素を表示させるモデルファイルの記述例です．

モデルファイル

```
Variable x;
Objective f(type = minimize);
f = 2 * x;
x >= 5; //制約
x = 10; //初期値設定
solve();
x.val.print();
```

出力

```
x=5
```

明示的に solve 関数を記述しないと，次のように解く前の値が出力されてしまいます．

モデルファイル

```
Variable x;
Objective f(type = minimize);
f = 2 * x;
x >= 5; //制約
```

```
x = 10; //初期値設定
x.val.print();
```

出力

```
x=10
```

次のモデルでは複数の目的関数を定義しています.

```
Variable x(name = "x"), y(name = "y");
Objective f(name = "f", type = maximize);
Objective g(name = "g", type = maximize);
f = x + y;   // 目的関数 f の定義
g = x - y;   // 目的関数 g の定義
pow(x - 1, 2) + pow(y - 1, 2) <= pow(0.5, 2);
solve();  // 最後に代入された g に関する最大化を行う
solve(f); // 目的関数 f に関する最大化を行う
solve(g); // 目的関数 g に関する最大化を行う
```

最初の solve () は目的関数の指定を省略した最適化の実行で，この場合には最後に代入された目的関数について最適化が行われます．その後，明示的に目的関数を指定した最適化が実行されます．solve(f) で，目的関数 f に関する最適化が，solve(g) で目的関数 g に関する最適化がそれぞれ行われます．solve() の呼び出しによって最適化が行われるのは，その時点以前に定義されたモデルの内容に対してです．このことを利用して，モデルを逐次変更しながら最適化を行うことができます.

次の例では，制約式 $x - y \geq 0.5$ を 1 つ加える前と後で最適化を行っています.

```
Variable x(name = "x"), y(name = "y");
Objective f(name = "f", type = maximize);
f = x + y; // 目的関数 f の定義
pow(x - 1, 2) + pow(y - 1, 2) <= pow(0.5, 2);
solve();   // 上記までのモデルを解く
x - y >= 0.5;
solve();   // 上の制約式も加えたモデルを解く
```

9.2 最適化計算結果 result

最適化計算の結果は result というオブジェクトが保持しています．以下は，result が保有する情報の一覧です.

名称	型	意味
nvars	int	変数の数
nfunc	int	関数の数

名称	型	意味
iters	int	内点法の反復回数
fevals	int	関数評価回数
optValue	double	目的関数値
tolerance	double	内点法の収束判定値
residual	double	解における最適性条件の残差
elapseTime	double	所要計算時間
hardPenalty	double	制約充足問題ソルバ WCSP によるハードペナルティ
semiHardPenalty	double	制約充足問題ソルバ WCSP によるセミハードペナルティ
softPenalty	double	制約充足問題ソルバ WCSP によるソフトペナルティ
errorCode	int	終了時ステータス （成功時：0，失敗時：エラー番号） エラー番号は付録 A.2.1 のものに従います
simpleErrorCode	int	終了時ステータス （成功時：0，失敗時：エラー番号） エラー番号は付録 A.1 のものに従います

以下は最適化計算結果を出力するモデルファイルの記述例です．

```
Variable x, y;
Objective f(type = minimize);
f = 2 * x + 3 * y;
x + 2 * y == 15;
x >= 0;
y >= 0;
solve();

simple_printf("関数の数          %d\n", result.nfunc);
simple_printf("内点法の反復回数 %d\n", result.iters);
simple_printf("関数評価回数      %d\n", result.fevals);
simple_printf("目的関数値        %e\n", result.optValue);
simple_printf("収束判定条件      %e\n", result.tolerance);
simple_printf("最適性条件残差    %e\n", result.residual);
simple_printf("所要計算時間      %d\n", result.elapseTime);
simple_printf("終了時ステータス %d\n", result.errorCode);
```

以下出力例です．

```
関数の数          2
内点法の反復回数 5
```

関数評価回数	8
目的関数値	2.250000e+001
収束判定条件	1.000000e-008
最適性条件残差	3.978422e-008
所要計算時間	0
終了時ステータス	0

result オブジェクトには，アルゴリズム毎に有効なメソッドもあります．

最適化計算を行った場合，実行可能解が得られたかどうかを表す isFeasible() 関数を使用できます．返り値は bool 型です．

以下記述例です．

```
Variable x;
Variable y;
Variable z;
Variable s1;
Variable s2;
Variable s3;
IntegerVariable delta1(type = binary);
IntegerVariable delta2(type = binary);
IntegerVariable delta3(type = binary);
Parameter M = 10000;
Objective cost(type = minimize);
cost = delta1 + delta2 + delta3;
x + y + z == 12 + s1;
5 * x + 5 * y + 5 * z == 60 + s2;
0 <= s1 <= 1.0e-3;
0 <= s2 <= 1.0e-3;
-M * delta1 <= x <= M * delta1;
-M * delta2 <= y <= M * delta2;
-M * delta3 <= z <= M * delta3;
options.plevel = 0;
options.maxnod = 1;
options.method = "simplex";
solve();
simple_printf("feasible = %d\n", result.isFeasible());
```

以下は，上記例の simple_printf 関数における出力例です．

```
feasible = 1
```

制約充足問題ソルバ WCSP で最適化計算を行った場合，ハード制約・セミハード制約・ソフト制約のペナルティを hardPenalty，semiHardPenalty，softPenalty に保持します．

以下記述例です．

```
IntegerVariable x(type = binary);
x - 2 >= 0;
options.maxtim = 0.1;
options.method = "wcsp";
solve();
simple_printf("hard penalty = %f\n", result.hardPenalty);
```

以下は，上記例の simple_printf 関数における出力例です．

```
hard penalty = 1.000000
```

9.3 可変定数

モデル中の定数 Parameter は，モデルを展開する段階で固定され，展開後には変更不可能となります．しかし，パラメトリック最適化等の場合には変更可能な定数を含めてモデルを定義して，後で変更しながら解析を行う場合が生じます．そのために SIMPLE は VariableParameter という名称で可変定数を提供しています．

次は簡単な可変定数の使用例です．線形な目的関数の係数を変更しながら，円の内部が実行可能領域である二次計画問題を逐次的に解きます．この問題に対するモデル定義とシステム制御は次のようになります．

```
Variable x, y;
VariableParameter a; // 可変定数
Objective f(type = maximize);
f = -a * x + y;
pow(x - 1, 2) + pow(y + 0.5, 2) <= 0.25;
options.outputMode = "silent"; // 出力抑制
for(int i = -5; i < 5; i++){
        a = i;
        solve();
        simple_printf("a = %d, x = %f, y = %f, f = %f\n",
        a, x, y, f);
}
```

上記のように VariableParameter は通常の Parameter と全く同様にモデル定義に使用することができます．

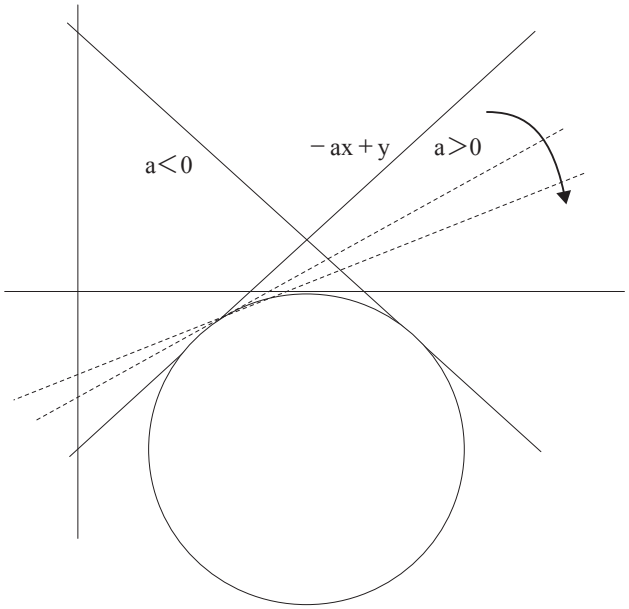
最適値は定円の接線（傾き a）の y 切片となりますので，目的関数として各 a に対応する y 切片の値

が得られます.

以下は，上記のモデルに対する出力結果です.

```
a = -5, x = 1.490290, y = -0.401942, f = 7.049510
a = -4, x = 1.485071, y = -0.378732, f = 5.561553
a = -3, x = 1.474342, y = -0.341886, f = 4.081139
a = -2, x = 1.447214, y = -0.276393, f = 2.618034
a = -1, x = 1.353553, y = -0.146447, f = 1.207107
a = 0, x = 1.000000, y = -0.000000, f = -0.000000
a = 1, x = 0.646447, y = -0.146447, f = -0.792893
a = 2, x = 0.552786, y = -0.276393, f = -1.381966
a = 3, x = 0.525658, y = -0.341886, f = -1.918861
a = 4, x = 0.514929, y = -0.378732, f = -2.438447
```

VariableParameter は通常の Parameter と比べて，メモリを多く所要します．モデルを定義するときに，必要以上の Parameter を VariableParameter とすることは避けてください．またアルゴリズムの自動選択機能に影響を及ぼす可能性がありますので注意してください.



VariableParameter には以下の注意点があります.

- VariableParameter は通常の Parameter と比べて，メモリを多く所要します．モデルを定義するときに，必要以上の Parameter を VariableParameter とすることは避けてください.
- アルゴリズムの自動選択機能に影響を及ぼす可能性がありますので注意してください.
- 制約充足問題ソルバ WCSP では VariableParameter を用いることはできません.

9.4 変数の初期値

変数の初期値の設定は，内点法，分枝限定法，wcsp，wls 及び rcpsp において有効です.

内点法では設定された初期値を探索の出発点として採用します．特に非線形計画問題においては，以下のようなケースで有効である可能性があります．

- 局所解が大域最適解とは保証されないケース
- 実行可能領域が連結でないケース
- 探索点によっては関数評価で浮動小数点エラーが発生する可能性があるケース

分枝限定法では設定された初期値が制約を満たす場合は，実行可能解として与えられます．与えられた実行可能解は枝刈りや実行可能化の更新等に用いられ，実行可能解が見つかりづらいが別のロジックでは見つけやすい場合や多段階求解の場合などに有効です．一方初期値が制約を満たさない場合は，初期値の設定は無視されます．この場合，微小な違反により初期値の設定が有効にならないケースがあります．そのような場合は求解オプション branchRepairSolution による「初期解の修復機能」を用いると初期値から実行可能解を構成できる可能性があります．

求解アルゴリズム wcsp では設定された初期値を探索の出発点として採用します．以下は利用にあたっての注意点です．

- 求解オプション wcspInitialValueActivation のデフォルト値が"off"のため，ユーザ指定による初期値から探索をスタートする場合は本オプションを"on"に設定する必要があります．
- 求解オプション tryCount で計算回数を 2 以上に設定した場合，全ての試行回においてユーザ指定による初期値から探索を出発します．
- 以下のケースなどでは初期値の設定は無視されます．
  - 初期値が整数性を満たさない
  - 初期値が変数の固定条件を違反している
  - 初期値が selection 制約を違反している

求解アルゴリズム wls では設定された初期値を探索の出発点として採用します．ただし試行回数（tryCount）が 2 以上で設定された場合は 2 回目以降の試行では設定された初期値ではなくランダムに構成された初期値が採用されます．

複数求解を行う場合，最適化計算結果をそのまま初期値として利用したい場合があります．その様な場合は関数 SimpleSetInitialValues() が便利です．本関数を用いると最適化計算結果を初期値として利用できます．以下記述例です．

```
solve();
SimpleSetInitialValues();  // 最適化計算結果が初期値に設定される
solve();                   // 最適化計算結果を初期値として計算が行われる
```

第 10 章 出力制御

SIMPLE で記述された数理計画モデルは，Numerical Optimizer で求解されます．その際には求解情報が標準出力に，より細かい解情報が解ファイル（モデル名.sol）に出力されます．

この章では，出力情報の追加に用いられる SIMPLE の関数 print, simple_printf, simple_fprintf ならびに，出力情報を抑制する記述方法について説明します．

10.1 出力対象

後述する print 関数，simple_printf 関数，simple_fprintf 関数では，以下の構成要素に対する情報を適宜取得することができます．

構成要素	情報	意味
Variable	val	現在値
	init	初期値
	dual	双対変数値
	ub	上限値
	lb	下限値
Objective	val	現在値
	init	初期値
Constraint	val	現在値
	init	初期値
	dual	双対変数値
	ub	上限値
	lb	下限値
Parameter	val	現在値
IntegerVariable	val	現在値
	init	初期値
	dual	双対変数値
	ub	上限値
	lb	下限値
Expression	val	現在値
	init	初期値
SymmetricMatrix	val	現在値
	init	初期値

構成要素	情報	意味
Set	val	現在値
OrderedSet	val	現在値

現在値 val は solve 関数が呼ばれる前であれば初期値，呼ばれた後には最適化計算結果が入っています．

例えば以下のモデルファイルでは x.val.print(); は初期値 10 を出力します（print 関数については次節を参照してください）．

```
Variable x;
Objective f(type = minimize);
f = 2 * x;
x >= 5; //制約
x = 10; //初期値設定
x.val.print(); // 初期値 10
```

一方，以下では x.val.print(); は最適化計算結果 5 を出力します．

```
Variable x;
Objective f(type = minimize);
f = 2 * x;
x >= 5; //制約
x = 10; //初期値設定
solve();
x.val.print(); // 最適化計算結果 5
```

また，val は simple_printf 関数および simple_fprintf 関数では省略可能です．

10.2 print 関数

print 関数は，変数 Variable，目的関数 Objective，制約式 Constraint，定数 Parameter，整数変数 IntegerVariable，式 Expression，対称行列 SymmetricMatrix，集合 Set，順序集合 OrderedSet に関する情報を，決まったフォーマットで出力させる機能を有しています．

print 関数の書式は，以下のように定められています．

```
構成要素. 情報.print();
```

変数の現在値を出力するには，次のように記述する必要があります．

```
Variable x;
x.val.print();
```

目的関数の初期値を出力するには，次のように記述する必要があります．

```
Objective f;
f.init.print();
```

制約式の双対変数値を出力するには，次のように記述する必要があります．

```
Constraint Co;
Co.dual.print();
```

定数の現在値を出力するには，次のように記述する必要があります．

```
Parameter a;
a.val.print();
```

整数変数の下限値を出力するには，次のように記述する必要があります．

```
IntegerVariable z;
z.lb.print();
```

対称行列の現在値を出力するには，次のように記述する必要があります．

```
SymmetricMatrix X((i, j));
X.val.print();
```

式の初期値を出力するには，次のように記述する必要があります．

```
Expression g;
g.init.print();
```

集合の現在値を出力するには，次のように記述する必要があります．

```
Set S;
S.val.print();
```

順序集合の現在値を出力するには，次のように記述する必要があります．

```
OrderedSet O;
O.val.print();
```

求解関数 solve の前に print 関数を記述すると，求解前の初期状態の情報が記述されます．求解関数 solve は，明示的に記述されない場合，モデルの最後尾にあるものと認識されます．例えば，次のモデルに対する出力は以下のようになります．

モデルファイル

```
Variable x;
Objective f(type = minimize);
f = 2 * x;
x >= 5; //制約
```

```
x = 10; //初期値設定
x.val.print();
```

出力

```
x=10
```

solve 関数の後に print 関数を用意した場合，出力は以下のようになります．

モデルファイル

```
Variable x;
Objective f(type = minimize);
f = 2 * x;
x >= 5; //制約
x = 10; //初期値設定
solve();
x.val.print();
```

出力

```
x=5
```

solve 関数の前後に print 関数を用意した場合，出力は以下のようになります．

モデルファイル

```
Variable x;
Objective f(type = minimize);
f = 2 * x;
x >= 5; //制約
x = 10; //初期値設定
x.val.print();
solve();
x.val.print();
```

出力

```
x=10
x=5
```

添字が付いている場合は，全体を出力します．例えば，次のモデルに対する出力は，以下のようになります．変数 x[1], x[2], x[3] の現在値が全て出力されます．

モデルファイル

```
Set S = "1 2 3";
Element i(set = S);
```

```
Variable x(index = i);
Objective f(type = minimize);
f = 2 * sum(x[i], i);
x[i] >= 5; //制約
x[i] = 10; //初期値設定
solve();
x.val.print();
```

出力

```
x[1]=5
x[2]=5
x[3]=5
```

出力範囲を，条件式で制限する事も可能です．以下のようにした場合，変数 x[1], x[2] の現在値のみが出力されます．

```
(x[i].val, i < 3).print();
```

出力

```
x[1]=5
x[2]=5
```

次の例では，添字付きの対称行列を出力させています．

モデルファイル

```
Set S = "1 2";
Element i(set = S), j(set = S);
Set N = "1 2 3";
Element n(set = N);
Variable x, y;
x = 10;
y = 2;
SymmetricMatrix X(index = n, (i, j));
X[n, i, j] = 100 * n + x * i + y * j, i <= j; // 上三角部分のみ定義
X.val.print();
```

出力

```
X[1,1,1]=112
X[1,1,2]=114
X[1,2,2]=124
X[2,1,1]=212
```

```
X[2,1,2]=214
X[2,2,2]=224
X[3,1,1]=312
X[3,1,2]=314
X[3,2,2]=324
```

10.3 simple_printf 関数

simple_printf 関数は，以下のような特徴を持っています．

- simple_printf 関数は，SIMPLE オブジェクトの情報をユーザ指定のフォーマットで出力することができます．
- フォーマットの形式はプログラミング言語 C/C++の標準関数 printf に従います．
- 条件式を記述して，出力する添字範囲を指定することができます．
- 対象となる SIMPLE オブジェクトは以下です．
  - 変数 Variable
  - 目的関数 Objective
  - 制約式 Constraint
  - 定数 Parameter
  - 整数変数 IntegerVariable
  - 式 Expression
  - 対称行列 SymmetricMatrix
  - ベクトル Vector
  - 行列 Matrix
- 集合 Set や順序集合 OrderedSet に関する情報を取得することはできません．
- 引数の数は 34 個までです．

simple_printf 関数の書式は以下のように定められています．

```
simple_printf(出力指定書式，出力対象 1，出力対象 2，..);
```

条件式を引数の最後に記述することが可能です．

```
simple_printf(出力指定書式，出力対象 1，出力対象 2，..，条件式);
```

条件式を複数記述することも可能です．

```
simple_printf(出力指定書式，出力対象 1，出力対象 2，..，条件式 1，条件式 2，..);
```

次の例では，変数の現在値を整数形式で出力させています．整数形式で出力させるには%d を用います．

```
Variable x;
x = 3;
simple_printf("%d\n", x.val);
```

これに対する出力は以下のようになります.

```
3
```

次のように記述すると，出力は以下のようになります.

```
simple_printf("x の値 = %d\n", x.val);
```

出力

```
x の値 = 3
```

simple_printf 関数の引数では，.val を省略する事ができます．従って，次のように記述しても出力は同じです.

```
simple_printf("x の値 = %d\n", x);
```

simple_printf 関数では，整数以外にも小数や，指数形式で値を出力させる事ができます．以下は小数を出力する例です．小数を出力するには%f を用います.

```
simple_printf("x の値 = %f\n", x.val);
```

出力

```
x の値 = 3.000000
```

以下は指数形式で出力する例です．指数形式で出力するには%e を用います.

```
simple_printf("x の値 = %e\n", x.val);
```

出力

```
x の値 = 3.000000e+000
```

表示させる桁数を指定することもできます．以下の例では，小数点以下二桁のみが出力されるよう記述しています.

```
simple_printf("x の値 = %.2f\n", x.val);
simple_printf("x の値 = %.2e\n", x.val);
```

出力

```
x の値 = 3.00
x の値 = 3.00e+000
```

出力の幅を指定することもできます．以下の例では，半角 15 文字に出力が収まるように記述しています．

```
simple_printf("x の値 = %15f\n", x.val);
simple_printf("x の値 = %15e\n", x.val);
```

出力

```
x の値 =        3.000000
x の値 =   3.000000e+000
```

桁数と出力幅の両方をまとめて記述することもできます．

```
simple_printf("x の値 = %15.2f\n", x.val);
simple_printf("x の値 = %15.2e\n", x.val);
```

出力

```
x の値 =            3.00
x の値 =       3.00e+000
```

求解関数 solve の前に SIMPLE オブジェクトを出力すると，求解前の初期状態の情報が記述されます．求解関数 solve は，明示的に記述されない場合，モデルの最後尾にあるものと認識されます．例えば，次のモデルに対する出力は以下のようになります．

モデルファイル

```
Variable x;
Objective f(type = minimize);
f = 2 * x;
x >= 5; //制約
x = 10; //初期値設定
simple_printf("x の値 = %f\n", x.val);
```

出力

```
x の値 = 10.00000
```

solve 関数の後に simple_printf 関数を記述すると次のようになります．

モデルファイル

```
Variable x;
Objective f(type = minimize);
f = 2 * x;
x >= 5; //制約
x = 10; //初期値設定
```

```
solve();
simple_printf("x の値 = %f\n", x.val);
```

出力

```
x の値 = 5.000000
```

添字を持つ対象も出力させる事ができます．次の例では，添字を持つ変数の現在値を整数形式で出力させています．

```
Set S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Variable x(index = i);
x[i] = 3;
simple_printf("%d\n", x.val);
```

これに対する出力は以下のようになります．

```
3
3
3
```

次のように記述すると，以下のように出力されます．

```
simple_printf("x[%d] の値 = %d\n", i, x[i].val);
```

出力

```
x[1] の値 = 3
x[2] の値 = 3
x[3] の値 = 3
```

引数の最後に条件式を指定することで，添字の範囲を制限させる事ができます．次の例では，x[1], x[2] の値のみを表示させています．

```
simple_printf("x[%d] の値 = %d\n", i, x[i].val, i < 3);
```

出力

```
x[1] の値 = 3
x[2] の値 = 3
```

同じ添字の対象であれば，同時に複数出力することができます．次の例では，変数 x[1], x[2], x[3] 定数 a[1], a[2], a[3] の値を同時に出力させています（メソッド.val は省略しています）．

```
Set S = "1 2 3";
Element i(set = S);
```

```
Variable x(index = i);
Parameter a(index = i);
x[i] = 3;
a[i] = 5;
simple_printf("x[%d] = %f, a[%d] = %f\n", i, x[i], i, a[i]);
```

出力

```
x[1] = 3.000000, a[1] = 5.000000
x[2] = 3.000000, a[2] = 5.000000
x[3] = 3.000000, a[3] = 5.000000
```

次の例では 3 つの対称行列（SymmetricMatrix）X_1, X_2, X_3 の値を表示させています.

```
Set S = "1 2";
Element i(set = S), j(set = S);
Set N = "1 2 3";
Element n(set = N);
SymmetricMatrix X(index=n, (i, j));
X[n, i, j] = 100 * n + 10 * i + j, i <= j; // 上三角部分のみ定義
simple_printf("X%d[%d, %d] = %f\n", n, i, j, X[n, i, j]);
```

出力

```
X1[1, 1] = 111.000000
X1[1, 2] = 112.000000
X1[2, 1] = 112.000000
X1[2, 2] = 122.000000
X2[1, 1] = 211.000000
X2[1, 2] = 212.000000
X2[2, 1] = 212.000000
X2[2, 2] = 222.000000
X3[1, 1] = 311.000000
X3[1, 2] = 312.000000
X3[2, 1] = 312.000000
X3[2, 2] = 322.000000
```

simple_printf 関数は，最適化計算結果 result の情報も出力させる事ができます．以下は最適化計算結果を出力するモデルファイルの記述例です.

```
Variable x,y;
Objective f(type = minimize);
f = 2 * x + 3 * y;
```

```
x + 2 * y == 15;
x >= 0;
y >= 0;
solve();

simple_printf("関数の数          %d\n", result.nfunc);
simple_printf("内点法の反復回数 %d\n", result.iters);
simple_printf("関数評価回数      %d\n", result.fevals);
simple_printf("目的関数値        %e\n", result.optValue);
simple_printf("収束判定条件      %e\n", result.tolerance);
simple_printf("最適性条件残差    %e\n", result.residual);
simple_printf("所要計算時間      %d\n", result.elapseTime);
simple_printf("終了時ステータス %d\n", result.errorCode);
```

以下出力例です.

```
関数の数          2
内点法の反復回数 5
関数評価回数      8
目的関数値        2.250000e+001
収束判定条件      1.000000e-008
最適性条件残差    3.978422e-008
所要計算時間      0
終了時ステータス 0
```

10.4 simple_fprintf 関数

simple_fprintf 関数は，関数は以下のような特徴を持っています.

- 標準出力ではなくファイルに対して出力をするための関数です.
- 出力先が違うという点以外は，simple_printf 関数と同等の機能を有しています.
- simple_printf 関数と同様引数の数は 34 個までです.

simple_printf 関数の書式は以下のように定められています．出力先ファイルを指定するための第 1 引数以外は，simple_printf 関数と同様の書式です.

```
simple_fprintf(ファイルポインタ，出力指定書式，出力対象 1，..);
```

出力対象は「構成要素. 情報」の形式である必要があります.

次の例では，変数の現在値を整数形式で出力させています．出力ファイルとして，output.txt を指定しています.

```
Variable x;
FILE* fp; // ファイルポインタの設定
fp = fopen("output.txt", "w"); // ファイルを開く
x = 3;
simple_fprintf(fp, "%d\n", x.val);
fclose(fp); // ファイルを閉じる
```

これに対する出力ファイル output.txt への出力は以下のようになります.

```
3
```

次の例では，添字つきの変数の現在値を出力させています．出力先ファイルは result ディレクトリ（フォルダ）以下の data.txt です.

```
Set S = "1 2 3";
Element i(set = S);
Variable x(index = i);
FILE* fp; // ファイルポインタの設定
fp = fopen("result/data.txt", "w"); // ファイルを開く
x[i] = 3;
simple_fprintf(fp, "x[%d] = %f\n", i, x[i].val);
fclose(fp); // ファイルを閉じる
```

これに対する出力ファイル result/data.txt への出力は以下のようになります.

```
x[1] = 3.000000
x[2] = 3.000000
x[3] = 3.000000
```

ファイルに上書きではなく，追加をしたい場合はファイルを開く際の引数を"a"とする必要があります.

```
fp = fopen("result/data.txt", "a");
```

10.5 モデルの内容の表示（showSystem 関数）

モデルファイルとデータファイルを分離して記述した場合，目的関数や制約式の具体的な情報が記述されないため，記述の誤りをそのまま見過ごしてしまう事があります．showSystem 関数は，分離されたモデルファイルとデータファイルから最終的に構成される目的関数 Objective，制約式 Constraint，対称行列 SymmetricMatrix の具体的情報を出力します．showSystem 関数は以下の書式で記述されます.

```
showSystem();
```

次のようなモデルを考えます.

```
Set S;
Element i(set = S);
Parameter c(index = i);
Parameter a(index = i);
Variable x(index = i);
Objective f(type = maximize);
f = sum(c[i] * x[i], i);
x[i] <= a[i];
showSystem();
```

データファイルは dat 形式で次のように与えられています.

```
c = [1] 13 [2] 7 [3] 201 [4] 14 [5] 23;
a = [1] 23 [2] 5 [3] 4 [4] 12 [5] 1;
```

この場合，次のような出力がなされます.

```
1-1 (a.smp:8): x[1] <= 23
1-2 (a.smp:8): x[2] <= 5
1-3 (a.smp:8): x[3] <= 4
1-4 (a.smp:8): x[4] <= 12
1-5 (a.smp:8): x[5] <= 1
objective (a.smp:7 name="f"): 13*x[1]+7*x[2]+201*x[3]+14*x[4]+23*x[5] (maximize)
```

オブジェクトに name =で名前を与えてから showSystem でモデル情報を出力すると，表示に指定した名前が使われますのでわかりやすくなります．上記の例に name を付与した次のモデルに対しては，以下のように出力されます.

```
Set S(name = "S");
Element i(set = S);
Parameter c(name = "c", index = i);
Parameter a(name = "a", index = i);
Variable x(name = "valx", index = i);
Objective f(name = "obj",type = maximize);
f = sum(c[i] * x[i], i);
Constraint co(name = "co", index = i);
co[i] = x[i] <= a[i];
showSystem();
```

出力

```
1-1 (a.smp:9 name="co[1]"): valx[1] <= 23
1-2 (a.smp:9 name="co[2]"): valx[2] <= 5
1-3 (a.smp:9 name="co[3]"): valx[3] <= 4
1-4 (a.smp:9 name="co[4]"): valx[4] <= 12
1-5 (a.smp:9 name="co[5]"): valx[5] <= 1
objective (a.smp:7 name="obj"): 13*valx[1]+7*valx[2]+201*valx[3]+14*valx[4]+23*valx[5]
(maximize)
```

showSystem 関数は，引数に制約式を与えることで，その制約式のみを出力できます．name を付与したモデルに関して，次のように showSystem 関数の引数を変更した場合，以下が出力されます．

```
showSystem(co[1]);
```

出力

```
1-1 (a.smp:9 name="co[1]"): valx[1] <= 23
```

引数に条件式を与える事で，出力させる制約式の範囲を制限させることもできます．次の例では，co[1], co[2] の情報のみを出力させています．

```
showSystem(co[i], i < 3);
```

出力

```
1-1 (a.smp:9 name="co[1]"): valx[1] <= 23
1-2 (a.smp:9 name="co[2]"): valx[2] <= 5
```

半正定値制約に対して showSystem 関数を用いた場合，以下が出力されます．

```
SymmetricMatrix X((i, j));
X["1, 1"] = 2 * x[1];
X["1, 2"] = 1;
X["2, 2"] = x[2];
X >= 0;
showSystem();
```

出力

```
1-1 (a.smp:8): 2*(x[1]) (sdpconselem)
1-2 (a.smp:8): 1 (sdpconselem)
1-3 (a.smp:8): x[2] (sdpconselem)
```

第 11 章 その他の機能

11.1 Intel Math Kernel Library のリンク

Intel Math Kernel Library (以下，MKL) は，Intel Corporation が開発している，BLAS, LAPACK, FFT を含む数値計算ライブラリです[5]．MKL は以下の URL からダウンロードして利用することができます．

https://software.intel.com/en-us/mkl

MKL がインストールされている 64bit コンパイラ環境では，mknuopt で MKL をリンクした実行可能ファイルをビルドすることで，計算速度を高速化することができる場合があります．mknuopt で MKL をリンクする場合，環境変数 NUOPT_MKL_LIBPATH に MKL ライブラリへのパスを設定してください．

以下に MKL をデフォルトのパスにインストールした場合の設定例を示しますが，インストール時の設定を変更した場合，適宜読み替えてください．

- Windows 環境で MKL がデフォルトのパスにインストールされている場合，次のように設定してください．

  ```
  C:\Program Files (x86)\IntelSWTools\compilers_and_libraries\windows\mkl\lib\intel64
  ```

- Linux 環境で MKL がデフォルトのパスにインストールされている場合，次のように設定してください．

  ```
  /opt/intel/mkl/lib/intel64
  ```

[5] Intel はアメリカ合衆国およびその他の国における Intel Corporation の商標です．

第12章 最適化ソルバ Numerical Optimizerとは

最適化ソルバ Numerical Optimizer はモデリング言語 SIMPLE や MPS ファイル形式で記述された数理計画問題を解くための装置です．Numerical Optimizer は豊富なアルゴリズムを有しており，幅広い数理計画問題を扱うことができます．

次章以降では，最適化ソルバ Numerical Optimizer が出力する情報や，最適化ソルバ Numerical Optimizer の動作を制御する各種機能を紹介します．

第 13 章 標準出力

数理計画問題が Numerical Optimizer で解かれた場合，最終的な解情報の一部が標準出力に出力されます．以下はその一例です．

```
[Problem and Algorithm]
PROBLEM_NAME                                        a
NUMBER_OF_VARIABLES                                 5
NUMBER_OF_FUNCTIONS                                 2
PROBLEM_TYPE                                MAXIMIZATION
METHOD                                      HIGHER_ORDER

[Progress]
<preprocess begin>.........<preprocess end>
<iteration begin>
    res=7.3e+001 .... 4.1e-003 .. 6.4e-010
<iteration end>

[Result]
STATUS                                           OPTIMAL
VALUE_OF_OBJECTIVE                                  1049
ITERATION_COUNT                                        8
FUNC_EVAL_COUNT                                       11
FACTORIZATION_COUNT                                    9
RESIDUAL                                 6.352800465e-010
ELAPSED_TIME(sec.)                                  0.01
SOLUTION_FILE                                      a.sol
```

13.1 アルゴリズム共通の出力

[Problem and Algorithm] で始まるセクションでは，以下のように問題の概要が出力されます．

```
PROBLEM_NAME                                        a
NUMBER_OF_VARIABLES                                 5
NUMBER_OF_FUNCTIONS                                 2
```

PROBLEM_TYPE	MAXIMIZATION
METHOD	HIGHER_ORDER

PROBLEM_NAME は「扱うモデルのファイル名」です．この例では a というモデルを解いています．

NUMBER_OF_VARIABLES は「変数 Variable の数」です．この例では変数が 5 個あります．

NUMBER_OF_FUNCTIONS は「関数の数」です．ここで言う関数とは，目的関数 Objective と制約式 Constraint を合わせたものになります．この例では，関数が 2 個（目的関数 1 個，制約式 1 個）あります．

PROBLEM_TYPE は問題が最小化問題（MINIMIZATION）なのか最大化問題（MAXIMIZATION）なのかを表示します．

METHOD は「最適化計算に用いたアルゴリズムの種類」です．この例では線形計画専用内点法（HIGHER_ORDER）を用いています．

[Result] で始まるセクションでは，以下のように最適化計算結果の要約が出力されます．

STATUS	OPTIMAL
VALUE_OF_OBJECTIVE	1049
ITERATION_COUNT	8
FUNC_EVAL_COUNT	11
FACTORIZATION_COUNT	9
RESIDUAL	6.352800465e-010
ELAPSED_TIME(sec.)	0.01
SOLUTION_FILE	a.sol

最適化計算結果の要約の詳細については 13.9 をご参考ください．

13.2 内点法における出力

内点法を用いたアルゴリズムでは，[Progress] で始まるセクションに以下のような実行経過が出力されます．

```
<preprocess begin>.........<preprocess end>
<iteration begin>
    res=7.3e+001 .... 4.1e-003 .. 6.4e-010
<iteration end>
```

<preprocess begin>と<preprocess end>の間は収束計算に入る前の処理の進行を，<iteration begin>と<iteration end>の間は収束計算の進行を示しています．計算の進行中に表示される数字（7.3e+001, 4.1e-003 など）は最適性条件の残差で，この表示はそれが計算の進行とともに減少していく様子を示しています．

13.3 単体法，有効制約法，クロスオーバーにおける出力

単体法，有効制約法，クロスオーバーを用いた場合には，[Progress] で始まるセクションに以下のような実行経過が出力されます．

```
<preprocess begin>.........<preprocess end>
<iteration begin>
      ...1...................2
<iteration end>
```

<preprocess begin>と<preprocess end>の間は単体法の反復に入る前の処理の進行を示しています．

<iteration begin>と<iteration end>の間にあるドットは単体法の反復の進行を示しています（1 つのドットにつき，数回の反復を示しています）．また，文字 1 は実行可能解を探索するフェーズに遷移したことを示し，文字 2 は最適解を探索するフェーズへの遷移を示しています．

線形計画法，二次計画法に対して内点法からのクロスオーバー（options.crossover="on"）を指定した場合には

```
<preprocess begin>.........<preprocess end>
<iteration begin>
    res=2.4e+001 .... 2.7e-005  1.4e-008
<iteration end>
<iteration begin>
        1222
<iteration end>
```

のように，内点法の経過表示の後に単体法の経過表示が現れます．

13.4 制約充足問題ソルバ（wcsp）における出力

制約充足問題ソルバ（wcsp）を用いた場合には，[Progress] で始まるセクションに進捗が表示されます．

まず，<preprocess begin>から<preprocess end>では wcsp 実行前の準備がおこなわれます．非常に大規模な問題でない限り，ここに要する時間は僅かです．

```
<preprocess begin>..........<preprocess end>
preprocessing time: 0.000465(s)
```

次に，<iteration begin>から<iteration end>では wcsp 実行の進捗が表示されます．ここでは，最良解におけるハード制約のペナルティ，セミハード制約のペナルティ，ソフト制約のペナルティと最良解を見つけたときの時間及び反復回数が逐次表示されます．問題にセミハード制約が存在しない場合，セミハード制約のペナルティは表示されません．また，最良解を更新していない場合は表示が更新されませんが，計算は行われています．試行回数 (TryCount) が 2 以上の場合は試行回数分の進捗

表示が行われます．また，wcsp で並列化オプションを有効にした場合はメインスレッドの進捗のみ表示されます．以下は進捗表示の一例です．

```
<iteration begin>
--- TryCount = 1 ---
# random seed = 1
(hard/semihard/soft) penalty= 45/12/4807, time= 0.00(s)
<greedyupdate begin>.....<greedyupdate end>
greedyupdate time= 0.00066(s)
(hard/semihard/soft) penalty= 0/8/3157, time= 0.00(s), iteration= 1
(hard/semihard/soft) penalty= 0/6/2905, time= 0.00(s), iteration= 2
(hard/semihard/soft) penalty= 0/6/2831, time= 0.00(s), iteration= 3
(hard/semihard/soft) penalty= 0/6/2783, time= 0.00(s), iteration= 4
(hard/semihard/soft) penalty= 0/6/2746, time= 0.00(s), iteration= 5
(hard/semihard/soft) penalty= 0/4/2775, time= 0.00(s), iteration= 8
(hard/semihard/soft) penalty= 0/2/3320, time= 0.00(s), iteration= 14
(hard/semihard/soft) penalty= 0/2/3283, time= 0.00(s), iteration= 15
(hard/semihard/soft) penalty= 0/0/4746, time= 0.00(s), iteration= 254
--- End Phase-I iteration ---
(hard/semihard/soft) penalty= 0/0/4094, time= 0.01(s), iteration= 368
# (hard/semihard/soft) penalty= 0/0/4094
# time = 0.01/0.02(s)
# iteration = 368/1000
<iteration end>
```

各項目の意味は次の通りです．

項目	意味
TryCount	現在の試行回数
random seed	使用した乱数の種
greedyupdate time	貪欲法によって初期解を更新するのにかかった時間
(hard/semihard/soft) penalty	ハード，セミハード，ソフト制約のペナルティ量
time	経過した時間
iteration	反復回数
End Phase-I iteration	ハード制約とセミハード制約が 0 になったことを意味する
time = X/Y(s)	最良解の発見に X 秒，wcsp の計算開始から終了までに Y 秒かかったことを意味する

項目	意味
iteration = X/Y	最良解の発見に X 回，wcsp の計算開始から終了までに Y 回反復したことを意味する

TryCount が 2 以上の場合は乱数の種を変えて複数回計算が行われます．全試行が終了した後にサマリが表示されます．以下はサマリの一例です．

```
<summary>
 trycount         hard     semihard         soft    iteration  time(s)
        1            0            0         2284         9796     0.49
        2            0            0         2160         5969     0.32
        3            0            0         2370         9760     0.50
        4            0            0         2298         4029     0.21
        5            0            0         2420         9326     0.46
        6            0            0         2422         3382     0.18
        7            0            0         2297         9574     0.47
*       8            0            0         2119         7698     0.39
```

サマリの内容は各試行における最良解のハード，セミハード，ソフト制約のペナルティ量と最良解を見つけるのにかかった時間及び反復回数です．"*"は全試行の中で最も良い解を表します．この例の場合，8 回目の試行で得られた解が最も良いことを意味します．

計算終了後，[Result] セクションに求解結果が出力されます．wcsp 特有の項目は次の通りです．

項目	意味
STATUS	求解ステータス．正常終了した場合は NORMAL，異常終了した場合は ERROR が出力されます．
TERMINATE_REASON	wcsp の計算が終了した理由
PENALTY	総ペナルティ量．ハード，セミハード，ソフト制約のペナルティ量の総和が出力されます．
RANDOM_SEED	最良解を見つけた乱数の種

13.5 分枝限定法における出力

混合整数計画問題を解く場合は，通常，自動的に分枝限定法が起動されます．その場合 [Progress] で始まるセクションでの実行経過の出力は次のようになり，求解の進行状況を確認できます．

```
#sol         upper         lower   gap(%)  time(s)  list  mem(MiB)
              +inf       84121.2     +inf      2.4     1        68  cut: 44
              +inf       85090.4     +inf      2.7     1        71  cut: 12
```

```
              +inf       85570.3     +inf      3.0     1       74  cut: 6
#1          139000       88862.7   22.003      5.1   190       98  sol: rens
#2          135125       88862.7   20.654      5.2   190       98  sol: rens
#3          134125         89294   20.066      5.4   194       99  sol: rens
#4          134025         89294   20.030      5.5   195       99  sol: rens
#5          133850         89294   19.967      5.7   196       99  sol: rins
#6          129350         89294   18.320      5.9   197       99  sol: relax
```

分枝限定法の進捗は,

- 新しい暫定解が得られた
- 所要メモリが 50MiB 以上変動した
- 15 秒経過した
- (並列化機能が無効のときに) 切除平面を追加した

のいずれかの条件を満たせば出力されます.

各項目の意味は次の通りです.

表示	意味
#sol	発見した実行可能解の個数
upper	目的関数の上界値
lower	目的関数の下界値
gap(%)	上下界の相対ギャップ (パーセンテージ)
time(s)	経過時間 (秒)
list	探索していない分枝木の葉の数
mem(MiB)	使用メモリ (メビバイト)
cut	追加した切除平面の数 (並列化機能が無効であり, 切除平面を追加したときに表示)
sol	解を発見した手法 (解を発見したときに表示)
#worker	求解中の worker の数 (並列化機能が有効のときに表示)

初期解の修復機能を有効にした場合, 分枝限定法の計算開始前に以下のような進捗が表示されます.

```
     time(s)  iteration  total_slack  objective
F  0.0612888          0           55          0
F  0.0680869          1           55          0
O  0.0782578          2           45          0
F   0.110716          3      12.9609       1552
F   0.133956          4            2       2387
F   0.163788          5            0       2660
```

これは初期解の修復における各反復 (iteration) で, 制約式の総違反量 (total_slack) と目的関数 (objective) がどのように遷移しているかを表示しています. 行頭の F と O はその反復でどのような計算がおこなわれているかを表しています. F は総違反量の最小化をおこない, O は目的関数の最小化 (あるいは

最大化）をおこなっています．実行可能解が見つかるか，ある程度の反復がおこなわれると初期解の修復を終了し，分枝限定法に移行します．

13.6 重み付き局所探索法（wls）における出力

重み付き局所探索法（wls）を用いた場合には，[Progress] で始まるセクションに探索の情報が以下の順に表示されます．

開始時

```
<problem statistics>
# 0-1 Vars    / Total     = 400 / 625
# 0-1 Constrs / Total     = 150 / 540
#   - Set Multi-Cover     = 50
#   - Set Multi-Packing   = 100
#   - Set Multi-Partition = 0
# Int Range Max           = 12

<iteration begin>
# Initial Sol         = given
# Obj                 = 240.00
# (Hard/Soft) Penalty = 54.00 / 430.00
```

<problem statistics>では，読み込まれた最適化問題について WLS の性能に大きく影響する情報が表示されます．具体的には，変数や制約式の中に 0-1 変数や 0-1 制約式が多く含まれるほど WLS は高い性能を発揮します．ここで 0-1 制約式とはすべての係数が 0 か 1 である制約式です．0-1 制約式は，集合被覆型（例：$x_1 + x_2 \geq 2$），集合充填型（例：$x_1 + x_2 \leq 1$），集合分割型（例：$x_1 + x_2 = 2$）に分類されます．

<iteration begin>以降では初期解の情報が表示されます．上の例の場合，ユーザが指定した初期解は目的関数値が 240 であり，ハード制約違反量は 54，ソフト制約違反量は 430 であると読み取れます．

それぞれの項目の意味は次のとおりです．

表示	意味
# 0-1 Vars / Total	0-1 変数の個数 / 変数の個数
# 0-1 Constrs / Total	0-1 制約式の本数 / 制約式の本数
# - Set Multi-Cover	集合被覆型制約式の本数
# - Set Multi-Packing	集合充填型制約式の本数
# - Set Multi-Partition	集合分割型制約式の本数
# Int Range Max	整数変数の「上限 - 下限」の最大値

表示	意味
# Initial Sol	初期解の設定方法 "given": ユーザ指定, "random": ランダム, "zero": ゼロ初期化
# Obj	初期解の目的関数値
# (Hard/Soft) Penalty	初期解のハード制約違反量 / ソフト制約違反量

途中経過

```
-------------------------------------------------------------------------------
      Resources          |          Current Sol         |          Best Sol
 #Itrs  Time(s)  Mem(MiB) |    Obj      Hard       Soft  |    Obj      Hard       Soft
-------------------------------------------------------------------------------
     1     0.67    250.23 | 688.23     11.00     123.00  | 688.23     11.00     123.00
     5     0.75    403.34 | 347.43      3.00      23.00  |    400      0.00      43.00
...
-------------------------------------------------------------------------------
```

初期解の情報に続き，探索の途中経過が表形式で逐次的に表示されます．現在の実行時間や，現在どういった解を探索しているのか，現在までに見つけた解の中で最も良い解は何なのか，といった情報が読み取れます．

上の表は，反復が一定回数行われたり最良解が更新されたりする度に行が追加されていきます．解が更新されないと表示の更新も鈍くなりますが，計算は行われています．局所探索法による探索の一般的な性質として，計算の後半には解の更新は鈍くなります．

それぞれの項目の意味は次のとおりです．

表示	意味
#Itrs	反復回数
Time(s)	実行時間（秒）
Mem(MiB)	メモリ使用量（メビバイト）
Current Sol	現在探索中の解
Best Sol	最良解
Obj	目的関数値
Hard	ハード制約違反量
Soft	ソフト制約違反量

終了時

```
========================================
#  Obj                  = 230.00
#  (Hard/Soft) Penalty = 0.00 / 4.00
#  Elapsed Time (s)     = 43.54 / 100.00
#  Iterations           = 81708 / 191770
========================================
<iteration end>
```

アルゴリズムが終了すると実行時間や最良解などの情報が表示されます．上の例の場合，目的関数値 230，ハード制約違反量 0，ソフト制約違反量 4 である解が最良解として得られており，アルゴリズムの実行時間は 100 秒間であったことが読み取れます．

それぞれの項目の意味は次のとおりです．

表示	意味
# Obj	最良解の目的関数値
# (Hard/Soft) Penalty	最良解のハード制約違反量 / ソフト制約違反量
# Elapsed Time (s)	最良解発見時の実行時間 / 総実行時間
# Iterations	最良解発見時の反復回数 / 総反復回数

13.7　資源制約付きスケジューリング問題ソルバ（rcpsp）における出力

資源制約付きスケジューリング問題ソルバ（rcpsp）を用いた場合，[Progress] で始まるセクションでの実行経過の出力は以下のようになります，目的関数の設定によって 2 種類の出力があります．

13.7.1　完了時刻最小化

```
<preprocess begin>.............................<preprocess end>
<iteration begin>
(soft) penalty= 18, time= 0.00(s),iteration= 0
(soft) penalty= 17, time= 0.00(s),iteration= 2
(soft) penalty= 16, time= 0.00(s),iteration= 3
(soft) penalty= 15, time= 0.00(s),iteration= 4
(soft) penalty= 14, time= 0.03(s),iteration= 6
(soft) penalty= 13, time= 0.05(s),iteration= 8
 ...
<iteration end>
```

項目の意味は次の通りです．

表示	意味
(soft)	発見された解に関する
penalty=値 1	値 1：ソフト制約違反量
time=値 2，iteration=値 3	値 2：経過時間，値 3：反復回数

目的関数は内部では，ソフト制約として扱われていますので，目的関数の値もソフト制約違反量にふくまれています.

13.7.2 納期遅れ最小化

```
<preprocess begin>.............................<preprocess end>
<interation begin>
(objective value) value= 18, time= 0.00(s),iteration= 0
(objective value) value= 10, time= 0.03(s),iteration= 1
(objective value) value= 4, time= 0.05(s),iteration= 8
 ...
<iteration end>
```

項目の意味は次の通りです.

表示	意味
(objective value)	発見された解に関する
value=値 1	値 1：目的関数値（総納期遅れ）
time=値 2，iteration=値 3	値 2：経過時間，値 3：反復回数

上記 2 つの表示は，制約充足ソルバの時と同様，最良解が更新される度に現れます．その為，解が更新されないと表示が停止する点においても制約充足ソルバの時と同様です.

13.8 実行不可能性要因検出機能（iisDetect）の出力

デフォルトの指定では，実行不可能性を検出する iisDetect と呼ばれる仕組みが自動的に起動され，実行不可能性の原因の探索を行い，その結果を解ファイルの出力に反映させます（制約充足問題ソルバ/資源制約付きスケジューリング問題ソルバ使用時以外）．ここでは，iisDetect 機能が起動した場合の出力結果を説明します.

以下のモデル記述（モデルファイル名 lp.smp とします）に書かれた線形計画問題は，実行不可能（制約を満たす解なし）です.

```
Variable x, y, z;
Objective f(type = minimize);
```

```
f = x + y + z;
x >= 2 * y;       // IIS
1 + 2 * z >= x;   // IIS
y >= 2 + z;       // IIS
x >= z;
y >= 0;
z >= 0;
```

よく見るとモデルで“IIS”のマークが付いた制約式群のどの一つを除去しても実行不可能性は解消しますが，すべてを満たす x, y, z は存在しません．また，マークされていない最後の制約式は実行不可能性とは無関係で，除去する，しないにかかわらず，問題は実行不可能であることもわかります．

iisDetect 機能はこのように，実行不可能性の原因となっている行の組（Irreducible Infeasible Set：IIS と呼ばれます）を特定して出力します．一般に実行不可能な問題について IIS は複数存在しますが，このアルゴリズムは可能な限り小さなもの（含まれている行が少ない）ものを求めるようなヒューリスティクスが導入されています．

この問題を解かせたとき，[Result] で始まるセクションに以下のような出力がなされます．

```
ERROR_TYPE                          (NUOPT 11) infeasible.
DETECTED_IIS_SIZE                                        3
(#IIS_RELATED_VAR)                                       3
INFEASIBILITY_OF_IIS                                   1.5
```

それぞれの出力の意味は，以下のようになります．

タイトル	解説	備考
DETECTED_IIS_SIZE	検出された IIS に含まれる行の数	成功時のみ
(#IIS_RELATED_VAR)	IIS に含まれている行に含まれる変数の数	成功時のみ
INFEASIBILITY_OF_IIS	IIS 全体での実行不可能性	成功時のみ
NO_IIS_FOUND_BY	IIS 検出失敗の原因	失敗時のみ
(#NONLINEAR_CONSTR.)	IIS 検出失敗の原因の可能性がある非線形制約の数	失敗時のみ

モデルに非線形の式が含まれていた場合，IIS の正確な検出はできません．その場合には，ヘッダー部には IIS の検出が非線形性のために失敗したというメッセージが現れ，非線形な制約がいくつあるかを示します．例えば，次のモデルに対する出力は以下のようになります．

```
Variable x, y, z;
Objective f(type = minimize);
f = x + y + z;


x * x >= 2 * y * y;
1 + z >= x;
```

```
y >= 2 + z;
x + y + z >= 0;
```

出力

```
ERROR_TYPE                          (NUOPT 11) infeasible.
NO_IIS_FOUND_BY                             NON_LINEARLITY
(#NONLINEAR_CONSTR.)                                     1
```

13.9 最適化計算結果標準出力内容

以下は，標準出力に出力される内容の一覧です．

タイトル	解説	備考
STATUS	最適化計算終了時の状態	NORMAL/OPTIMAL/NON_OPTIMAL/ERROR のいずれかを取る
(#IIS_RELATED_VAR)	IIS に含まれている行に含まれる変数の数	IIS 特定成功時のみ
(#INTEGER/DISCRETE)	整数変数の総数	
(#NONLINEAR_CONSTR.)	IIS 検出失敗の原因の可能性がある非線形制約の数	IIS 特定失敗時のみ
BOUND_INFEASIBILITY	変数の上下限制約違反量の最大値	値が小さい場合は出力が省略される
CONSTRAINT_INFEASIBILITY	制約式違反量の最大値	値が小さい場合は出力が省略される
DETECTED_IIS_SIZE	検出された IIS に含まれる行の数	IIS 特定成功時のみ
ELAPSED_TIME(sec.)	計算時間	SIMPLE の展開時間を含みません
ERROR_TYPE	エラー番号とエラーメッセージ	STATUS が NON_OPTIMAL や ERROR のときに出力される
FACTORIZATION_COUNT	行列の分解回数	内点法のみ
FUNC_EVAL_COUNT	関数の評価回数	内点法のみ
GAP	上界値と下界値の差	分枝限定法のみ
INFEASIBILITY_OF_IIS	IIS 全体での実行不可能性	IIS 特定成功時のみ
ITERATION_COUNT	アルゴリズム内の反復回数	内点法/wcsp/rcpsp/wls のみ
METHOD	適用した最適化手法	

タイトル	解説	備考
NO_IIS_FOUND_BY	IIS 検出失敗の原因	IIS 特定失敗時のみ
NUMBER_OF_ACTIVITIES	アクティビティの総数	rcpsp のみ
NUMBER_OF_FUNCTIONS	関数（目的関数を含む）の総数	
NUMBER_OF_GENERAL_CONSTRAINT	一般の考慮制約の総数	rcpsp のみ
NUMBER_OF_IMPRECEDENCE	直前先行制約の総数	rcpsp のみ
NUMBER_OF_MODES	モードの総数	rcpsp のみ
NUMBER_OF_PRECEDENCE	先行制約の総数	rcpsp のみ
NUMBER_OF_RESOURCES	資源の総数	rcpsp のみ
NUMBER_OF_VARIABLES	変数の総数	
PARTIAL_PROBLEM_COUNT	部分問題数	分枝限定法のみ
PENALTY	重みつき制約違反量	wcsp/rcpsp 適用時のみ
PROBLEM_NAME	問題名	SIMPLE 版:モデル名 MPS 版:TITLE の内容
PROBLEM_TYPE	MINIMIZATION（最小化） MAXIMIZATION（最大化）	
RANDOM_SEED	乱数の種	wcsp のみ
RESIDUAL	最適性条件の充足度合	分枝限定法/wcsp/rcpsp/wls 以外
SIMPLEX_PIVOT_COUNT	単体法の反復回数	単体法のみ
SOLUTION_FILE	解ファイルのパス名	出力される解ファイルの名前は，環境や設定により異なる
TERMINATE_REASON	計算終了理由	wcsp/rcpsp 適用時のみ
THREADS	並列化実行において使用したスレッド数	分枝限定法/制約充足問題ソルバ wcsp など並列化実行可能なアルゴリズムにおいて出力される
VALUE_OF_OBJECTIVE	目的関数値	実行不可能（infeasible）の場合，出力される目的関数の値は不定となる

STATUS は「最適化計算終了時の状態」です.

- OPTIMAL は局所最適解が得られたことを意味します.
- NON_OPTIMAL は何かしらの理由で局所最適解が得られなかったことを意味します．詳細は ERROR_TYPE を参照します.
- NORMAL は wcsp,rcpsp,wls が正常終了したことを意味します.

• ERROR は wcsp,rcpsp,wls が異常終了したことを意味します.

13.10 標準出力の抑制

以下の設定を行う事で，標準出力に出力される情報を出力しないように設定できます．設定方法は 2 つあります.

一つは，求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法です．nuopt.prm 内に以下のように記述します.

```
output:mode = silent
```

もう一つは，SIMPLE モデルファイル内に記述する方法です．モデルファイル内に以下のように記述します.

```
options.outputMode = "silent";
```

第14章 解ファイル

Numerical Optimizer は最適化計算の詳細情報を解ファイルというファイルに出力します．コマンドラインで Numerical Optimizer を起動した場合，モデル名.sol という解ファイルが作成されます．

具体例として，次の例題に対する解ファイルを見ていくことにします．

$$
\begin{aligned}
\text{最小化} \quad & -3x_1 - 2x_2 - 4x_3 \\
\text{条件} \quad & x_1 + x_2 + 2x_3 \leq 4 \\
& 2x_1 + 2x_3 \leq 5 \\
& 2x_1 + x_2 + 3x_3 \leq 7 \\
& x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0
\end{aligned}
$$

14.1 冒頭部分

解ファイルの冒頭部分には

```
%%
%%
%%
%% RESULT OF NUOPT #1
%%
%%
%%
%%
```

と表示されます．これは 1 回目の求解結果であることを示しています．`solve()` を複数回記述した場合，1 回目の求解結果の後に 2 回目以降の求解結果が順に表示されます．

各求解結果では，標準出力の [Problem and Algorithm] および [Result] で始まるセクションに出力される内容と，同等の情報が出力されます．

例えば，上記の例題を線形計画専用内点法 higher で解いた際の，解ファイルの冒頭部分は，次のようになります．

```
PROBLEM_NAME                                        sample
NUMBER_OF_VARIABLES                                      3
NUMBER_OF_FUNCTIONS                                      4
```

```
PROBLEM_TYPE                                MINIMIZATION
METHOD                                      HIGHER_ORDER
STATUS                                           OPTIMAL
VALUE_OF_OBJECTIVE                                -10.5
ITERATION_COUNT                                       7
FUNC_EVAL_COUNT                                      10
FACTORIZATION_COUNT                                   8
RESIDUAL                              3.903545017e-009
ELAPSED_TIME(sec.)                                 0.02
```

上記例題を，単体法 simplex で解いた際，解ファイルの冒頭部分は次のようになります．ITERATION_COUNT，FUNC_EVAL_COUNT，FACTORIZATION_COUNT という行が表示されないかわりに SIMPLEX_PIVOT_COUNT という行に単体法の反復回数が表示されます．

```
PROBLEM_NAME                                   sample
NUMBER_OF_VARIABLES                                 3
NUMBER_OF_FUNCTIONS                                 4
PROBLEM_TYPE                                MINIMIZATION
METHOD                                          SIMPLEX
STATUS                                           OPTIMAL
VALUE_OF_OBJECTIVE                                -10.5
SIMPLEX_PIVOT_COUNT                                 3
RESIDUAL                              2.340507908e-016
ELAPSED_TIME(sec.)                                 0.02
```

上記例題において変数をすべて整数変数に直した問題を，分枝限定法 + 単体法 simplex を用いて解いた場合，分枝限定法の部分問題の数 PARTIAL_PROBLEM_COUNT が出力されます．分枝限定法を行った場合に RESIDUAL が表示されないのは，整数解においては最適性条件（連続変数を仮定）が充足しているとはいえないので，RESIDUAL の値が目的関数値の正しさを示す尺度とはならないためです．

```
PROBLEM_NAME                                   sample
NUMBER_OF_VARIABLES                                 3
(#INTEGER/DISCRETE)                                 3
NUMBER_OF_FUNCTIONS                                 4
PROBLEM_TYPE                                MINIMIZATION
METHOD                                          SIMPLEX
STATUS                                           OPTIMAL
VALUE_OF_OBJECTIVE                                  -10
SIMPLEX_PIVOT_COUNT                                 4
```

```
PARTIAL_PROBLEM_COUNT                                    1
ELAPSED_TIME(sec.)                                    0.01
```

14.2 解ファイルの変数値表示部

```
%%
%% VARIABLES
%%
```

で始まる部分には最適化アルゴリズム停止時における変数の値，及びその上下限が記述されています．

```
%%
%% VARIABLES
%%
     NAME     VALUE     STATUS      SLACK       [      BOUND TYPE   ]
V# 1 x1             2.5  FREE  2.50000000e+000 [ 0 <=    x[1]      ]
V# 2 x2             1.5  FREE  1.50000000e+000 [ 0 <=    x[2]      ]
V# 3 x3    3.51218e-010  LOWER 3.51217955e-010 [ 0 <=    x[3]      ]
```

VALUE は「変数の値」，STATUS は「変数値が上下限のいずれに付着しているかの状態」，SLACK が「上下限値からの余裕量」，BOUND TYPE は「変数の上下限」を示しています．

例えば，`V# 1` から始まる行は x1 という名前の変数の値（2.5）と，それが下限にも上限にも等しくなっていないこと（"FREE"），続いて x1 に課された制約の種類（[] 内）が示されています．

変数の状態を示す STATUS の意味を以下に示します．

状態を示す文字列	状態
LOWER	下限制約に付着（下限制約が active）
UPPER	上限制約に付着（上限制約が active）
FREE	上下限，いずれにも付着していない
REMVD	前処理によって削除された
INFS	上下限を違反している

INFS は数値的な性質の悪い問題や最適化が途中で失敗した際に出力されます．これが含まれる場合には，エラーが出力されます．問題は正常に解けていません．

また，資源制約付きスケジューリング問題ソルバ（rcpsp）を用いた場合には，変数の部分は，以下に相当します．

```
%%
%% ACTIVITIES
%%
```

例えば,

```
%%
%% ACTIVITIES
%%
        NAME       MODE    STATUS SLACK [       BOUND TYPE       ]
V#  1 sourceActivity     "DummyMode"   ACT        [  0 <=  sourceActivity  <= 0  ]
V#  2 act[1]    "A_does"     ACT        [  6 <=  act[1]  <= 12 ]
V#  3 act[2]    "C_does"     ACT        [  0 <=  act[2]  <= 11 ]
V#  4 act[3]    "B_does"     ACT        [  0 <=  act[3]  <= 8  ]
```

のような出力があった場合には，MODE がアクティビティが処理されるモード，BOUND TYPE が（アクティビティの開始時刻）<=（アクティビティ）<=（アクティビティの終了時刻）を表します.

14.3 解ファイルの関数値表示部

```
%%
%% FUNCTIONS
%%
```

で始まる部分には最適化アルゴリズム停止時における関数[6]の値が記述されています.

```
%%
%% FUNCTIONS
%%
          NAME     VALUE STATUS      SLACK      [     BOUND TYPE       ]
F# 1 obj          -10.5  FREE                   [    OBJECTIVE (MINIMIZE)       ]
F# 2 g1               4  UPPER 1.75611081e-010 [             g1 <= 4 ]
F# 3 g2               5  UPPER 7.02441660e-010 [             g2 <= 5 ]
F# 4 g3             6.5  FREE  5.00000001e-001 [             g3 <= 7 ]
```

VALUE が「関数の値」，STATUS が「関数値が上下限のいずれに付着しているかの状態」，SLACK が「上下限値からの余裕量」，BOUND TYPE が「関数の上下限」を示しています.

F# 1 から始まる行には F という名前の関数（目的関数）の値（-10.5）と，それが最小化された（"MINIMIZE"）目的関数である旨が示されています．F# 2 から始まる行は g1 という名前の制約式の値が 4 であり，それが上限に等しくなっていること（"UPPER"），続いて g1 に課された制約の種類

[6] 目的関数と制約式を総称してこう呼んでいます.

（[] 内）が示されています.

関数（制約式）の状態を示す STATUS の意味を以下に示します.

状態を示す文字列	状態
LOWER	下限制約に付着（下限制約が active）
UPPER	上限制約に付着（上限制約が active）
FREE	上下限，いずれにも付着していない
INFS	上下限を違反している
TGIN	ソフト制約が制約を違反していない
TGOUT	ソフト制約が制約を違反し，ペナルティが発生している.

INFS は数値的な性質の悪い問題や最適化が途中で失敗した際に出力されます.

また，半正定値制約を課した対称行列の各要素の値に関しては以下のような出力がされます.

```
      NAME   VALUE  STATUS SLACK [   BOUND TYPE   ]
F# 1 X[1,1] 25.6995              [   MATRIXELEM   ]
F# 2 X[2,1]       1              [   MATRIXELEM   ]
F# 3 X[2,2] 25.6995              [   MATRIXELEM   ]
```

14.4 解ファイルの上下限，制約と対応する双対変数表示部

解ファイルの

```
%%
%% BOUNDS
%%
```

から続く部分には変数の上下限と双対変数，また

```
%%
%% CONSTRAINTS
%%
```

から続く部分には制約式の上下限と双対変数がそれぞれ表示されます.

```
%%
%% BOUNDS
%%
     [            BOUND TYPE            ]     DUAL VALUE
B# 1 [     0      <=  x1                ]   4.891837406e-010
B# 2 [     0      <=  x2                ]   8.151927281e-010
B# 3 [     0      <=  x3                ]         1.000000001
```

```
%%
%% CONSTRAINTS
%%
     [    CONSTRAINT/OBJECTIVE TYPE     ]     DUAL/WGT
C# 1 [       OBJECTIVE (MINIMIZE)       ]                   0
C# 2 [                 g1  <=     4      ]       -1.999999998
C# 3 [                 g2  <=     5      ]      -0.4999999986
C# 4 [                 g3  <=     7      ]  -2.443858094e-009
```

BOUND TYPE 及び CONSTRAINT/OBJECTIVE TYPE が「上下限の種類」，DUAL VALUE 及び DUAL/WGT が「双対変数の値」を示しています．

B# 1 の行では，x1 に対する制約が下限制約 0 <= x1 であること，またその双対変数がほぼ 0 である旨が示されています．

双対変数は制約式や変数の上下限を単位あたり変化させたときの目的関数の変動を示しています．双対変数は別名，シャドウプライス，または reduced cost とも呼ばれ，その正負や大きさから上下限のいずれが active かを次のように判断することができます．

解ファイルの双対変数値	状態
正	下限制約に付着（下限制約が active）
負	上限制約に付着（上限制約が active）
零/零に近い値	上下限，いずれにも付着していない

目的関数の双対変数値に対応する部分には零が出力されます．

14.5 解ファイルの実行不可能性要因出力部

解ファイルには，実行不可能性検出機能によって判定された「実行不可能な制約式の組」が出力されます．次のモデルに対しては，以下の出力が解ファイルになされます．

```
Variable x, y, z;
Objective f(type = minimize);
f = x + y + z;
x >= 2 * y;       // IIS
1 + 2 * z >= x;   // IIS
y >= 2 + z;       // IIS
x >= z;
y >= 0;
z >= 0;
```

解ファイル出力

```
%%
%% IIS
%%
--------------------------------------------------------------------------------
#2      sample.smp:4      :   -1*x+2*y
                                          <=          0   (-1.11e-016)
--------------------------------------------------------------------------------
#3      sample.smp:5      :   -1+1*x-2*z
                                          <=          0   (         0)
--------------------------------------------------------------------------------
#4      sample.smp:6 INFS :   2-1*y+1*z
                                          <=          0   (       1.5)
--------------------------------------------------------------------------------
```

上記のように，IIS に含まれる行の制約式の名前が出力されます．内部表現に従って移項されていますので，x, y, z の順番はモデル記述とは異なります．() 内は現在の変数値の設定（以降に出力されます）における制約式の値です．INFS とマークがある行は現在の変数値の設定において，上下限を破っている行です．これを解消しようとすると，IIS の定義から，ここに現れている行のほかのいずれかに波及します．IIS 検出に成功した場合の変数の設定は IIS に含まれる行の違反の合計が最も小さくなるように行われます．その際の IIS に含まれる行の違反の合計が，標準出力に現れる

INFEASIBILITY_OF_IIS

という値です．

実行不可能性が検出された場合は，実行不可能性の要因と関連する変数，関数のみが解ファイルに出力されます．

14.6 解ファイルのハード制約，セミハード制約およびソフト制約表示部

アルゴリズムとして制約充足問題ソルバ wcsp を用いている場合，解ファイルには，最終的に満たすことのできていないハード制約，ソフト制約が出力されます．次が出力サンプルです．

解ファイル出力

```
%%
%% WCSP_PENALTY
%%
           NAME                 TYPE    VALUE   BOUND    AMOUNT WEIGHT PENALTY
F#   246   model.smp:83[6]       HARD    0    >=    1        1
F#   432   model.smp:91[13]      S.HARD  0    >=    1        1
F#   946   model.smp:119[17,E]   S.HARD  7    <=    6        1
F#  7080   model.smp:152[1](u)   SOFT    3    <=    2        1      100    100
```

```
F#  7586   model.smp:156[7,3]   SOFT    5    <=    2       3       10      30
F#  7675   model.smp:156[21,6]  SOFT    3    <=    2       1       10      10
F#  7756   model.smp:156[2,10]  SOFT    4    <=    2       2       10      20
F#  7780   model.smp:156[1,11]  SOFT    3    <=    2       1       10      10
F#  8293   model.smp:162[19,25] SOFT    0    ==    5       5        1       5
                                . . .
```

上記のように，ハード制約，ソフト制約で満たされていないもののみがハード制約，セミハード制約，ソフト制約の順に表示されます．各行は，制約式の名前，タイプ（ハード：HARD，セミハード：S.HARD，ソフト：SOFT），現在の値と制約，違反量，ウエイト（ソフト制約のみ），ペナルティ量（ソフト制約のみ）を示しています．

この出力例ではハード制約である 246 番目の制約（model.smp:83[6]）が 0 ですが，本来 1 以上とならねばならないので，ハード制約違反の違反量が 1 であることなどがわかります．

上記で上から 4 つめの制約（model.smp:152[1]）の名前の後に (u) とあるのは，この制約が上下限制約であり，違反しているのは制約の上限であることを示しています（2 という上限に対して 3 という値を取っています）．上下限制約の下限に違反しているのであれば制約の名前の後に (l) と表示されます．ソフト制約については，違反量に設定されたウエイトを掛けた値である「ペナルティ」があわせて表示されます．制約充足問題ソルバ wcsp は，ハード制約，セミハード制約の違反量，ソフトペナルティのペナルティの合計値を最小化します．

第15章 Numerical Optimizerの適用範囲とアルゴリズム

本章では，Numerical Optimizer で扱う事のできる数理計画問題の範囲，Numerical Optimizer が備えているアルゴリズムを列挙し，それらの対応関係を与えます．また，アルゴリズムの設定方法も示します．

15.1 数理計画問題一覧

Numerical Optimizer では，以下のような数理計画問題を取り扱うことができます．

- LP (Linear Programming：線形計画問題)
  目的関数と制約式がすべて線形である問題で，整数変数を含まないものです．
- MILP (Mixed Integer Linear Programming：混合整数計画問題)
  目的関数と制約式がすべて線形で，整数変数を含むものです．MIP（Mixed Integer Programming）と呼ばれることも多いです．
- MIQP (Mixed Integer Quadratic Programming：混合整数二次計画問題)
  制約式がすべて線形，目的関数が二次関数で，整数変数を含むものです．
- MINLP (Mixed Integer Nonlinear Programming：混合整数非線形計画問題)
  制約式および目的関数が非線形で整数変数を含むものです．
- CQP (Convex Quadratic Programming：凸二次計画問題)
  目的関数が凸な二次関数，制約式がすべて線形であるもの（ただし，目的関数の符号の変更で下に凸な目的関数の最小化に帰着できるもの）です．
- CP (Convex Programming：凸計画問題)
  目的関数，制約式に非線形なものが含まれていますが，実行可能領域が凸で，目的関数の符号の変更で下に凸な目的関数の最小化に帰着できる問題です．ここでは整数変数は含まないものを言います．
  半正定値計画問題も凸計画問題の一部ですが，ここには含めません．
- NLP (Nonlinear Programming：非線形計画問題)
  上記以外で，整数変数を含まない一般の非線形計画問題です．
- SDP (SemiDefinite Programing：半正定値計画問題)
  行列の半正定値制約を含む線形計画問題です．
- NLSDP (NonLinear SemiDefinite Programing：非線形半正定値計画問題)
  行列の半正定値制約を含み，なおかつ目的関数・制約式に非線形項が含まれる問題です．
- WCSP (Weighted Constraint Satisfaction Problem：重み付き制約充足問題)
  各々重みの付いた制約条件をなるべく満足するためには値をどのように割り当てると良いかを決

定する問題です．制約充足問題ソルバ wcsp により高速に解を得ることができます．

- RCPSP (Resource Constrained Project Scheduling Problem：資源制約付きスケジューリング問題)
  一定の資源制約の下で，決められた作業の開始・終了時刻を決定する問題です．一般の整数計画問題（MILP）として記述することも可能ですが，特殊な記法を行うと資源制約付きスケジューリング問題ソルバ rcpsp により高速に実行可能解を得ることができます．

15.2 アルゴリズム一覧

Numerical Optimizer は以下のようなアルゴリズムを備えています．見出しの解法名は，アルゴリズムを指定する際に用います．カッコ内の解法名は，標準出力に METHOD として出力されるものです．

- simplex：単体法（SIMPLEX）
  線形計画法の解法として古くから知られている方法です．大規模問題では内点法に速度的に劣りますが，可能基底解が求まり原理的に内点法/外点法よりも高精度です．
  整数変数を含む問題に対して指定すると，単体法を分枝限定法（Branch and bound method）という枠組のなかで繰り返し行って，最適性の保証のある整数解を求めます．大規模問題において基底解が必要な場合には，"cross:on"と指定して内点法からのクロスオーバーを用いるのが有利です．
- dual_simplex：双対単体法（DUAL_SIMPLEX）
  （主）単体法が主実行可能な基底解をたどりながら最適解にたどり着くのに対し，双対単体法は双対実行可能な基底解をたどりながら最適解にたどり着きます．
  大規模な線形計画問題に対して，（主）単体法と比較して有利であることがあります．
- hsimplex：単体法
  PySIMPLE から呼び出して使える simplex よりも高性能な単体法です．
- asqp：有効制約法（ACTIVE_SET_QP）
  単体法と同様，古典的な凸二次計画問題の厳密解法です．1 万変数以上の大規模問題では，一般に内点法（直線探索法（Line Search Method））に劣りますが，
  - 変数に比べて制約式の数が非常に少ない（1/10 以下）場合
  - 目的関数のヘッセ行列が密行列である場合

  には内点法よりも高速かつ高精度です．また，整数計画法に対応しているので，整数変数が含まれている凸二次計画問題を解くことができます．`"cross:on"`と指定することで内点法からのクロスオーバーを用いることができるので，大規模問題に対して高精度な解を求めることができます．
- higher：線形計画問題専用内点法（HIGHER_ORDER）
  線形計画法に特化した内点法で，大規模な線形計画問題の解法としては最も高速です．単体法と違い，可能基底解は求まりません．
- lipm：直線探索法（LINE_SEARCH_IPM）
  一般の凸計画問題に適用可能な内点法です．問題が凸であることがわかっている場合には信頼領域法よりも高速です．幅広い範囲の問題に対して有効です．
- bfgs：準ニュートン法（BFGS_LINE_SEARCH）
  準ニュートン法を用いた直線探索に基づく内点法です．ヘッセ行列の近似行列を密行列として保

持します．小規模（50〜500 変数以下）かつ非線形性の強い問題に対して tipm よりも有効な場合があります．

- tipm：信頼領域内点法（TRUST_REGION_IPM）
  大規模なものを含む一般の非線形計画問題に適用可能な内点法です．幅広い範囲の問題に対して有効です．
- lsqp：直線探索法に基づく逐次二次計画法（LINE_SEARCH_SQP）
  準ニュートン法によって二階微係数を求める逐次二次計画法です．小規模（50〜100 変数以下）な非線形計画問題に適しています．
  問題によっては直線探索内点法（lipm）よりも安定的により精度の良い解を導くことができます．
- tsqp：信頼領域法に基づく逐次二次計画法（TRUST_REGION_SQP）
  二階微係数をそのまま用いる逐次二次計画法です．大規模なものを含む一般の非線形計画問題に適用可能な方法です．一般に内点法よりも低速ですが，問題によっては内点法よりも安定的に，より精度の良い解を導くことができます．変数の数よりも制約式数が多い場合には内点法（tipm）よりも高速な場合があります．
  変数の数よりも制約式数が多い場合には内点法（tipm）よりも高速な場合があります．
- lsdp：線形半正定値計画問題に対する主双対内点法
  線形の半正定値計画問題に対する主双対内点法です．目的関数・制約式に出現する項は線形である必要があります．内部でメリット関数の計算を行いません．
- trsdp：信頼領域法を用いた非線形半正定値計画問題に対する主双対内点法
  目的関数・制約式に非線形項が出現する半正定値計画問題に対する主双対内点法です．メリット関数の降下を保証するために，信頼領域法を利用しています．
- wcsp：制約充足問題ソルバ（WCSP）
  京都大学「問題解決エンジン」グループの開発による制約充足問題に対するアルゴリズムです．必ずしも厳密解が求まるわけではありませんが，大規模な整数計画問題に対し，非常に高速に実行可能解（近似解）を求めることができます．
  整数変数のみを含み，かつすべての変数に上限と下限がある問題に対してのみ有効です．目的関数，制約式に重みを設定することができます．制約の重みには，ハード制約，セミハード制約，ソフト制約の三種類があります．
- wls：重み付き局所探索法
  PySIMPLE から呼び出して使える近似解法です．0-1 係数のみを含む制約式に対して特別な処理をおこなっています．そのため，集合被覆や集合分割といった特定の問題を得意としています．wcsp とは異なり，扱える制約式は線形な制約式のみ，目的関数は二次まで，変数は整数変数のみを扱うことができます．
- rcpsp：資源制約付きスケジューリング問題ソルバ（RCPSP）
  京都大学「問題解決エンジン」グループの開発による資源制約付きスケジューリング問題に対するアルゴリズムです．資源制約の下，決められた作業の開始・終了時刻を決定する問題の実行可能解を高速に求めることができます．rcpsp の記述にあたっては問題を SIMPLE の特殊なクラスを用いて記述する必要があります．完了時刻の最小化問題と，納期遅れ最小化問題を扱うことができます．前者を扱う際にはソフト制約，後者を扱う際にはハード制約のみが使用できます．

Numerical Optimizer のアルゴリズムは，SIMPLE で記述される目的関数，制約で四則演算および以下の関数を用いて記述されたものをサポートします[7].

```
+     -     /     *
sin   cos   tan   asin   acos   atan
sec   csc   cot   asec   acsc   acot
sinh  cosh  tanh  sech   coth   csch
atan2 hypot erf
exp   log   log10 pow    sqrt
ceil  floor fabs  fmod
```

erf 関数はバージョン 9 から導入された，ガウスの誤差関数です.

$$\mathrm{erf}(x) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt, \quad x \in [-\infty, \infty]$$

- iisDetect：実行不可能性要因行の特定アルゴリズム
  上記のアルゴリズムと異なり，本アルゴリズムは数理計画問題を解くためのものではありません．本アルゴリズムは Numerical Optimizer に与えられた問題が実行不可能と判定されたら，自動的に起動し，実行不可能性の原因となっている制約式の組（できるだけ式の少ないもの）を特定します．内部では単体法を繰り返し呼び出しています．iis は初期設定では on になっています.

15.3 数理計画問題とアルゴリズムの対応

以下は，Numerical Optimizer で取り扱い可能な数理計画問題と，Numerical Optimizer が備えているアルゴリズムの対応一覧です.

表の内容は

◎ 最も適している
○ 適している
R 整数性を緩和した問題を解く

を示します.

なお，MINLP・CQP・CP・NLP・SDP・NLSDP について，LP/IP モジュールで扱うことは出来ません.

[7]使用するアルゴリズムによっては利用できない関数がございます.

	LP	MILP	MIQP	WCSP※5	RCPSP	MINLP	CQP	CP	NLP	SDP	NLSDP
simplex	◎	◎									
dual_simplex	◎										
hsimplex	◎	R									
asqp	○	○	◎				◎				
higher	◎	R									
lipm	○	R	R			R	◎	◎	○		
bfgs	○	R	R			R	○	○	◎		
tipm	○	R	R			R	○	○	◎		
lsqp	○	R	R			R	○	◎	○		
tsqp	○	R	R			R	○	○	◎		
lsdp	○	R※4	R※4							◎	○
trsdp	○	R※4	R※4							○	◎
wcsp		◎※1	◎※1	◎		○※1					
wls		◎※2	◎※2	◎※3							
rcpsp					◎						

- ※ 1 について，0-1 整数変数と離散変数（DiscreteVariable）のみを含む問題のみ扱うことができます．
- ※ 2 について，整数変数を含む問題のみ扱うことができます．PySIMPLE から呼び出すことができます．
- ※ 3 について，wls が扱える問題は線形な制約式，目的関数は二次までです．また，ハード制約とソフト制約のみ扱うことができます．
- ※ 4 について，SymmetricMatrix を用いて定式化した場合に扱うことができます．
- ※ 5 について，本表では WCSP は「ソフト制約・セミハード制約・ハード制約が定義された連続変数を含まない問題」を指します．

15.4 アルゴリズムの設定方法

アルゴリズムを設定する方法には，

- モデルファイル内で指定する方法
- 求解オプションファイル nuopt.prm 内で指定する方法

の二通りがあります．

詳細については 16.2.1 アルゴリズムの選択を参照してください．

15.5 アルゴリズムの自動選択

アルゴリズムの指定を明示的に行わない場合には．Numerical Optimizer は入力された問題の内容から自動的にアルゴリズムを選択します．（**アルゴリズムの自動選択**）

適用アルゴリズム	判定基準
simplex	関数がすべて線形で整数変数を含む
asqp	目的関数が非線形で整数変数を含む
higher	関数がすべて線形で整数変数を含まない
wcsp	DiscreteVariable, selection を含む
rcpsp	Activity, ResourceRequire, ResourceCapacity を含む
lsdp	関数が全て線形で半正定値制約を含む
trsdp	上記以外の半正定値制約を含む
tipm	上記以外

次のような場合，個別に設定するとよりよい結果が得られる可能性があります.

15.5.1 整数変数が含まれている非線形計画問題

混合整数二次計画問題（MIQP）であれば asqp が利用可能です．混合整数非線形計画問題（MINLP）の場合，アルゴリズムを明示的に指定していない場合はエラーを返します．以下をお試しください.

- 非線形項を線形化して混合整数線形計画問題（MIP）として解く.
- 変数がすべて 0-1 整数変数であれば wcsp で解く.
- 整数性を無視した問題を tipm や tsqp で解く.

15.5.2 整数変数が含まれない非線形計画問題

整数変数が含まれない非線形計画問題の場合，デフォルトでは内点法による信頼領域法（tipm）となりますが，問題が二次計画問題（目的関数のみ二次関数）の場合，特に変数に比べて一般の制約式の数が少ない問題には有効制約法 asqp が有利な場合もあります.

逐次二次計画法 tsqp は若干時間を所要するケースもございますが，最も精度良く非線形最適化を行う方法です.

bfgs は小規模（50〜500 変数以下）かつ非線形性の強い問題に対して tipm よりも有効な場合があります.

15.5.3 凸計画問題

凸計画問題に対しては直線探索法を用いた方が一般に高速ですので，非線形ながら問題が凸であるとわかっている場合には（SIMPLE は凸であるかを自動判定できません）としていずれかの直線探索法を指定してください．通常お勧めできるのが lipm です.

15.6 クロスオーバー

線形計画問題（LP）あるいは二次計画問題（QP）に対しては，内点法（higher/lipm/bfgs/tipm）によって得られた解の情報をもとにして単体法を起動する，クロスオーバーと呼ばれる手法を用いることができます．大規模問題に関して精度の良い解を得るにはこの方法が最も有効です．

V15 より，混合整数計画問題（MIP）に対しても，起動可能です．

クロスオーバーを行うためには内点法の手法を設定した後に，以下のように指定します．

モデルファイルに記述する方法

```
options.crossover = "on";
```

求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
cross:on
```

第16章 求解オプション設定

求解オプションは，Numerical Optimizer の求解動作をより細かく制御するためのものです．求解オプションを利用することにより，アルゴリズムの選択や，標準出力の制御，終了条件の調整などを行う事ができます．求解オプションを設定する方法には次の二通りの方法があります．

1. モデルファイル中に記述する
2. 求解オプションファイル nuopt.prm に記述する

求解オプションの中には，2 の方法でしか利用できない種類のものも存在します．

求解オプション指定が競合した場合，求解オプションファイル nuopt.prm から指定する方法もしくはパラメータアイコンを利用した指定の方が優先されます（パラメータアイコンは SIMPLE モデルに出現する定数クラス Parameter とは無関係です）．

16.1 求解オプションファイル nuopt.prm

求解オプションファイルは nuopt.prm という名前でなければなりません．

求解オプションファイルの冒頭の行は begin，最後の行は end である必要があります．end の後は必ず改行しなければなりません．次の例は，特に何も指定がなされていない，最も簡単な求解オプションファイルです．

```
begin
end
```

begin と end の間に各種求解オプションの設定を行うことができます．次の例ではアルゴリズムとして単体法 simplex を指定しています．

```
begin
method:simplex
end
```

求解オプションは:ではなく，=で指定する場合もあります．次の例では，停止条件を 10^{-12} に設定しています．

```
begin
crit:eps=1.0e-12
end
```

求解オプションファイル中には半角スペースを適宜入れる事ができます．次の例は，上記の例と同じ意味です．

```
begin
crit : eps = 1.0e-12
end
```

求解オプションファイルは，複数の求解オプションを指定する事もできます．以下の例では，停止条件を 10^{-4} に設定し，アルゴリズムに線形計画専用内点法 higher を設定しています．

```
begin
crit:eps = 1.0e-4
method:higher
end
```

行頭の半角アスタリスク*は，その行がコメント文であることを意味します．例えば次の例では 3 行目の method:higher が読み込まれません．

```
begin
crit:eps = 1.0e-4
*method:higher
end
```

求解オプションファイルで設定する値には整数や小数のほか，

```
9.836d-5   1.347D-4   3.4e-3   4.562384E-2
```

のような浮動小数点表記が許されています．

求解オプションファイルが読み込まれた場合，標準出力には求解オプションファイルを読み込んだことを示すメッセージと内容が表示されます．求解オプションファイル中の空白，コメントは無視されます．以下は，求解オプションファイルが読み込まれた場合の出力例です．

求解オプションファイル

```
begin
maximize
method:tipm
scaling:on
crit:eps = 1.0e-8
end
```

標準出力

```
<reading solver option file: nuopt.prm>
nuopt.prm:1:     begin
nuopt.prm:2:     maximize
nuopt.prm:3:     method:tipm
nuopt.prm:4:     scaling:on
```

```
nuopt.prm:5:     crit:eps = 1.0e-8
nuopt.prm:6:     end


        ...
```

16.2 共通求解オプション

本節では，求解アルゴリズムに依存しない求解オプションについて解説します.

16.2.1 アルゴリズムの選択

求解オプションを用いてアルゴリズムを設定する事ができます.

アルゴリズム名	日本語名
simplex	単体法（+分枝限定法）
dual_simplex	双対単体法
hsimplex	単体法（PySIMPLE からのみ使用可能）
asqp	有効制約法
higher	線形計画専用内点法
lipm	直線探索内点法
bfgs	準ニュートン法
tipm	信頼領域内点法
lsqp	直線探索を利用した逐次二次計画法
tsqp	信頼領域を利用した逐次二次計画法
lsdp	線形半正定値計画問題に対する主双対内点法
trsdp	信頼領域法を用いた非線形半正定値計画問題に対する主双対内点法
wcsp	制約充足問題ソルバ
wls	重み付き局所探索法（PySIMPLE からのみ使用可能）
rcpsp	資源制約付きスケジューリング問題ソルバ

モデルファイル内で指定する方法

```
options.method = "アルゴリズム名";
```

求解オプションファイル nuopt.prm 内で指定する方法

```
method:アルゴリズム名
```

以下の例では，アルゴリズム simplex（単体法）をそれぞれモデルファイルから，あるいは求解オプションファイルから設定しています.

モデルファイル内で指定する方法

```
options.method = "simplex";
```

求解オプションファイル nuopt.prm 内で指定する方法

```
method:simplex
```

実行不可能性検出アルゴリズム iisDetect の設定解除には，別の設定方法が用意されています．

モデルファイル内で指定する方法

```
options.iisDetect = "off";
```

求解オプションファイル nuopt.prm 内で指定する方法

```
param:iis = off
```

16.2.2 標準出力制御

デフォルト設定の Numerical Optimizer は，標準出力に求解情報を表示し，解ファイル（モデル名.sol）を作成します．求解オプションを用いる事で，これらを抑制できます．

標準出力による求解情報の表示を抑制するには，次のように記述します．

モデルファイルに記述する方法

```
options.outputMode = "silent";
```

求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
output:mode = silent
```

16.2.3 解ファイル出力制御

求解オプションを用いて解ファイルの出力を抑制するには，次のように記述します．

モデルファイルに記述する方法

```
options.outfilename = "_NULL_";
```

求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
output:name = _NULL_
```

求解オプションを用いて，出力される解ファイルのファイル名を変更することもできます．

モデルファイルに記述する方法

```
options.outfilename = "ファイル名";
```

求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
output:name = ファイル名
```

以上の指定により，ファイル名.sol という名前の解ファイルが作成されます．

モデル内で解ファイルを作成するタイミングを制御することもできます．このためにはまず以下の記述を行います．

モデルファイルに記述する方法

```
options.noDefaultSolout = 1;
```

この記述により，求解関数 solve を実行した段階では解ファイルの生成を行わなくなります．さらに，解ファイルを生成したい箇所に次の関数を記述することにより，タイミングを制御できます．

```
solout(); // この関数の実行時に解ファイルを生成する
```

16.2.4 Nuorium/Excel アドインへの出力制御

求解オプションを用いて Nuorium/Excel アドインへの出力を制御することができます．

以下のように記述をすると出力を全て抑制することができます．

モデルファイルに記述する方法

```
options.noDefaultSolout = 1;
```

関数 solout を用いると，Nuorium/Excel アドインへの出力を関数呼び出し時に行うことができます．

```
solout(); // この関数の実行時に Nuorium/Excel アドインへの出力を行う
```

Parameter/Expression は出力の制御が可能です．

Parameter の出力を抑制するには，以下のように記述します．

モデルファイルに記述する方法

```
options.outputParameter = 0;
```

Expression の出力を抑制するには，以下のように記述します．

モデルファイルに記述する方法

```
options.outputExpression = 0;
```

Parameter/Expression の出力に時間を要する場合などに有効です．

16.3 アルゴリズム固有の求解オプション

本節では特定のアルゴリズムを選んだ際にのみ有効な求解オプションと，その設定について解説します．

16.3.1 線形計画問題専用内点法（higher）/信頼領域内点法（tipm）/直線探索法（lipm）/逐次二次計画法（lsqp/tsqp）/半正定値計画専用内点法（lsdp/trsdp）に有効な求解オプション

以下，線形計画問題専用内点法のみ有効な求解オプションと，その設定について解説します．

- スケーリング

  アルゴリズムを効率よく安定に動作させるため，目的関数，制約式，変数に定数値を乗じる処置がスケーリングです．この求解オプションはスケーリングを行うか否かと，スケーリングの種類を指定するものです．指定できる値は“off”，“minmax”，“cr”，“on”の 4 つです．“off”ではスケーリング処理を行いません．“minmax”では，係数行列の各行と列について，非零要素の絶対値の最大値と最小値との幾何平均が 1 になるようにスケーリングを施します．“cr”では係数行列全体について，非零要素の絶対値の対数の 2 乗和を最小化します．“on”は Numerical Optimizer V15 以前との互換性のために用意されており，“minmax”と等価です．

  モデルファイルに記述する方法

  ```
  options.scaling = "cr";
  ```

  求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

  ```
  scaling:cr
  ```

- 単体法へのクロスオーバー（線形計画専用内点法 higher のみ）

  この指定を行うと，内点法によって得られた解の情報をもとにして単体法を起動することができます．大規模問題に関して可能基底解を得るにはこの方法が最も有効です．

  モデルファイルに記述する方法

  ```
  options.crossover = "on";
  ```

  求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

  ```
  cross:on
  ```

- 停止条件

  停止条件として用いる最適性条件の残差です．最適性条件の残差がこの値以下になったときに，計算が収束したとみなして反復計算を終了します．ただし，higher では最適性条件の残差と双対ギャップの内大きい方の値が設定した値以下になったときに反復計算を終了します．

  モデルファイルに記述する方法

  ```
  options.eps = 1.0e-8;
  ```

  求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

  ```
  crit:eps = 1.0e-8
  ```

- 反復回数上限

  停止条件として用いる反復計算の回数の上限です．反復回数のデフォルト値は 150 回となってい

ます．反復回数がこの回数を越えた場合には解が得られなかったとみなしてエラー（(NUOPT 10) IPM iteration limit exceeded.）を出力します．逐次二次計画法（lsqp/tsqp）を用いた場合にはエラー（(NUOPT 40) SQP iteration limit exceeded.）を出力します．
モデルファイルに記述する方法

```
options.maxitn = 150;
```

求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
crit:maxitn = 150
```

- 内点法内に現れる連立一次方程式を反復法で解く設定（higher のみ）
この方法（mtxfree）を指定すると，探索方向を求めるために解く連立一次方程式を反復法（クリロフ部分空間法）を用いて解きます．デフォルトの求解法よりもメモリの使用量を減らすことができます．mtxfree には下記の制限が伴います．
  - 単体法へのクロスオーバーと併用することができない
  - 上界も下界も設定されていない変数がある場合は使用できない
  - 実行不可能性要因検知機能（iisDetect）と併用することができない

モデルファイルに記述する方法

```
options.mtxfree = "on";
```

求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
linear:mtxfree = on
```

16.3.2 単体法（simplex/dual_simplex/hsimplex)/有効制約法（asqp）に有効な求解オプション

- スケーリング
アルゴリズムを効率よく安定に動作させるため，目的関数，制約式，変数に定数値を乗じる処置がスケーリングです．この求解オプションはスケーリングを行うか否かと，スケーリングの種類を指定するものです．指定できる値は“off”，“minmax”，“cr”，“on”の 4 つです．“off”ではスケーリング処理を行いません．“minmax”では，係数行列の各行と列について，非零要素の絶対値の最大値と最小値との幾何平均が 1 になるようにスケーリングを施します．“cr”では係数行列全体について，非零要素の絶対値の対数の 2 乗和を最小化します．“on”は Numerical Optimizer V15 以前との互換性のために用意されており，“minmax”と等価です．
スケーリングは hsimplex に対しては有効ではありません．
モデルファイルに記述する方法

```
options.scaling = "cr";
```

求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
scaling:cr
```

- 主変数の実行可能性判定閾値

  主変数の上下限違反判定に関する閾値です．この値以下の変数値に関する上下限違反は許容されます．初期値は 1.0e-8 です．

  モデルファイルに記述する方法

```
options.tolx = 1.0e-8;
```

  求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
simplex:tolx = 1.0e-8
```

  この判定値はスケーリングの適用後の問題に対して適用されます．したがって，スケーリング適用前の問題においては，判定値に対して上下限違反を起こす可能性があります．

- 双対変数の双対実行可能性判定閾値

  双対変数（シャドウプライス）の双対実行可能性の判定値です．この値以下の解の改善可能性を無視します．初期値は 1.0e-8 です．

  モデルファイルに記述する方法

```
options.told = 1.0e-6;
```

  求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
simplex:told = 1.0e-6
```

  主変数の実行可能性判定閾値と同様，スケーリング適用後の問題に対して適用されます．

16.3.3 制約充足アルゴリズム（wcsp/rcpsp）に有効な求解オプション

タブー・サーチによる制約充足アルゴリズム（wcsp/rcpsp）は制約をできるだけ充足する解をいずれか一つ求めるという手法で，厳密な最適解を求めるものではありません．

- 反復回数上限

  停止条件の一つである，反復回数上限を設定します．初期設定値-1 は，無制限を意味します．

  モデルファイルに記述する方法

```
options.maxitn = -1;
```

  求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
crit:maxitn = -1
```

- 計算時間上限

  停止条件の一つである，計算時間上限を設定します．初期設定値-1 は，無制限を意味します．

  モデルファイルに記述する方法

```
options.maxtim = -1;
```

求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
crit:maxtim = -1
```

- 制約式の重み設定

  求解オプション defaultConstraintWeight を用いると，モデルファイルで出現する制約式全てに一律に重みを設定できます．次の例では，一律に重み 12 のソフト制約を指定しています．defaultConstraintWeight の値は，モデルファイル内でのみ設定できます．

  モデルファイル内

```
options.defaultConstraintWeight = 12;
```

  defaultConstraintWeight に 0 を設定すると，ハード制約として扱われます．defaultConstraintWeight の初期設定値は 0 です．

  defaultConstraintWeight と Constraint 関数（hardConstraint 関数，semiHardConstraint 関数，softConstraint 関数）が競合した場合，後者が優先されます．

- 目的関数の重み設定

  目的関数の重みは求解オプション defaultObjectiveWeight で指定します．defaultObjectiveWeight の値は，モデルファイル内でのみ設定できます．次の例では，目的関数の重みに 5 を指定しています．

  モデルファイル内

```
options.defaultObjectiveWeight = 5;
```

  求解オプション defaultObjectiveWeight の初期設定値は 1 です．

- 目的関数の目標値設定（**wcsp のみ**）

  目標値 target の値は，求解オプション defaultObjectiveTarget で指定することができます．

```
options.defaultObjectiveTarget = 5; // wcsp のみ有効
```

  Objective の引数での target 値と，求解オプション defaultObjectiveTarget の値が競合した場合は，Objective の引数の値の方が優先されます．目標値 target の初期設定値は 0 です．この求解オプションは rcpsp には無効です．

- 初期解生成時に使用する乱数発生の種

  初期解生成時に使用する乱数を発生するための値（種）を指定することができます．メタヒューリスティクス解法では初期解が最終的に得られる解の精度に影響することが知られており，初期解を変更することによって，より良い解が得られる場合があります．乱数を発生するための値は wcspRandomSeed で指定することができます．

```
options.wcspRandomSeed = 3;
```

  初期解生成時に使用する乱数発生の種の初期設定値は 1 です．

- 計算回数

  上記 wcspRandomSeed で述べた通り，初期解を変更することによって最終的に得られる解が変化することがあります．初期解生成時に使用する乱数を変更し何回か解くことによって解の精度向上が期待されます．計算回数は wcspTryCount で指定することができます．

```
options.wcspTryCount = 5;
```

  計算回数を複数回に設定した場合には，初期解生成時に用いる乱数を変更し，指定した回数求解を行い，その中で最もよい結果を自動的に残します．計算回数の初期設定は 1 です．

- スレッド数の上限（**wcsp のみ**）

  WCSP はマルチコア環境において並列処理を行うことにより，異なる初期値からの解の探索を効率的に行うことができます．スレッド数の上限は wcspthreads で指定することができます．

```
options.wcspthreads = 8;
```

  本求解オプションは「計算回数」と合わせることにより有効です．例えば，計算回数を 8 回，スレッド数上限を 2 に設定する場合は以下のように記述します．

```
options.wcspTryCount=8;
options.wcspthreads = 2;
```

  上記のように設定をすることにより，各スレッドで計算回数を 4 (8/2) 回とする実行が行われます．実行 PC に指定スレッド数以上の CPU（コア）が搭載されている必要があります．本求解オプションのデフォルト値は 1 ですので，並列化を有効にする場合は 2 以上の値を設定してください．

- 制約充足フェーズにおける計算時間上限

  制約充足フェーズ（ハードペナルティ及びセミハードペナルティが残っているフェーズ）における計算時間上限は wcspPhaseOneMaxtime で指定することができます．

```
options.wcspPhaseOneMaxtime = 60;
```

  -1 を設定した場合，無制限と解釈されます．wcspPhaseOneMaxtime の初期設定は-1 です．

  wcspPhaseOneMaxtime に値を設定した場合，ハード・セミハードペナルティが 0 になるか設定した時間が経過した時点で経過時間をリセットし，そのあとで maxtim で設定した時間解の探索を行います．経過時間をリセットした後の探索は，ハード・セミハードペナルティのそれ以上の改善よりも，ソフトペナルティの改善を目指して行われます．

  ある一定の時間が経過した後にハード・セミハードペナルティが改善することはないとわかっている問題に対して wcspPhaseOneMaxtime を使用することで，よりソフトペナルティの小さい解が得られる可能性があります．

- 解更新間隔計算時間上限

  解が更新されてから指定した時間が経過すると計算を終了します．大規模問題では計算時間の設定は非常に難しいのですが，この機能を用いると簡単に有用な求解を行うことができます．解更新間隔計算時間上限は wcspPhaseTwoMaxInterval で指定することができます．

```
options.wcspPhaseTwoMaxInterval = 5;
```

-1 を設定した場合，無制限と解釈されます．解更新間隔計算時間上限の初期設定は-1 です．

- 指定した初期値からの探索（**wcsp のみ**）

  ユーザ指定による初期値から wcsp の探索をスタートするか否かを指定ことができます．

```
options.wcspInitialValueActivation = "on";
```

本求解オプションのデフォルト値は"off"ですので，ユーザ指定による初期値から探索をスタートする場合は"on"を設定してください．なお，tryCount で計算回数を 2 以上に設定した場合，全ての回においてユーザ指定による初期値から探索を出発します．

16.3.4 重み付き局所探索法（wls）に有効な求解オプション

重み付き局所探索法（wls/rcpsp）は内部で重みを自動調整しながら解を求める手法で，厳密な最適解を求めるものではありません．

- 反復回数上限

  停止条件の一つである，反復回数上限を設定します．初期設定値-1 は，無制限を意味します．反復回数上限と計算時間上限が無制限に設定されている場合，自動的に反復回数上限が設定されます．

  求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
crit:maxitn = -1
```

- 計算時間上限

  停止条件の一つである，計算時間上限を設定します．初期設定値-1 は，無制限を意味します．反復回数上限と計算時間上限が無制限に設定されている場合，自動的に反復回数上限が設定されます．

  求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
crit:maxtim = -1
```

- メモリ利用量上限

  Numerical Optimizer プロセスが使用することのできる最大メモリ量を制限するためのパラメータで，MiB 単位で指定します．例えば 1024 とすると 1GiB を上限とすることを意味し，1GiB を超えた場合に実行を停止します．初期設定値-1 は，無制限を意味します．

  求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
wls:maxmem = 1000
```

- 目的関数の目標値設定

  目的関数の目標値を設定します．設定した場合，探索中に実行可能解でかつ目的関数値が目標値より良い（最小化問題であれば目標値以下）解が得られたら探索を終了します．

  求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
wls:objectiveTarget = 10
```

- 計算回数

  wls では初期解を変更することによって最終的に得られる解が変化することがあります．初期解生成時に使用する乱数を変更し何回か解くことによって解の精度を向上することが期待されます．初期値は 1 です．

  求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
wls:tryCount = 5
```

16.3.5 整数計画法（simplex/asqp）に有効な求解オプション

以下の求解オプションは単体法（simplex)/有効制約法（asqp）を，整数変数を含む問題について適用した場合にのみ有効です．

これらのアルゴリズムは，整数変数の整数条件を一部緩和した問題を繰り返し解きながら，分枝限定法というスキームによって，整数条件を満たす実行可能解の発見と，実行可能解の最適性の保証を行うものです．本質的に難しいクラスに属する問題であるため，連続変数のみからなる同程度の規模の問題に比べて，ときとして数倍程度の時間がかかることはよくあります．

また，この分枝限定法というスキームの好ましからざる特徴として，最適解を発見して最適性を証明するまでの時間が問題の規模のみならず，問題の性質に大きく左右されるということがあります．具体的には，数万変数の問題が数秒で解けてしまったり，一方では数百変数の問題を解くのに一時間以上を所要したりということがございます．

Numerical Optimizer は現在得られる最新の技法を組み込み，できるだけ多様な問題が安定にとけるようにチューニングしておりますが，あらゆる性質の問題に対して常に良い設定を見出すことはできておりません．そのため，以下にご紹介する求解オプションを適宜設定することによって，デフォルトの状態ではかなり時間を所要した問題をより効率よく解くことができることも十分にあり得ます．以下では効果的と思われる順にチューニングのための求解オプションをご紹介します．

以下説明の便宜のため，解いている問題が最小化問題だと仮定します．最大化問題は目的関数の符号を逆にして最小化を行っていることと等価なので，意味は同じですが以下に出てくる下界値と上界値という言葉を逆転させて解釈する必要があります．

- 切除平面法の求解オプション（simplex のみ有効）

  分枝限定法は整数性あるいは非凸性の条件を緩和した部分問題を解き，その解を，現在求められている実行可能解の下界値（これ以上小さくなることはあり得ないと理論的に保証された値）を参照しながら探索を行います．現在求められている実行可能解と下界値の差が零に近いとみなされたときに，現在得られている実行可能解の最適性が証明されたと判断し，アルゴリズムは停止します．

  切除平面法は，整数解が満たすであろう線形な制約式（妥当不等式と呼びます）を生成し，下界値を押し上げて，分枝限定法の収束を早める手法です．切除平面を加えるほど下界値は上がり，分枝限定法は早期に停止することが期待されますが，加えすぎると扱う問題の規模が増大するため，緩和解の計算コストがかさみ，結局実行時間の増大につながる可能性もあります．この求解オプションは切除平面を加える個数を調整するものです．値としては 0, 1, 2 のいずれかを取ることが

でき，デフォルト値は 1（標準的な量）です．2 を設定すると，切除平面を多めに加えるようになり，0 を設定すると全く加えなくなります．
実行可能解は発見されるが，最適性がなかなか証明されずに停止しない状況ではこの求解オプションを 2 に設定するのが効果的な可能性がございます．一方で最適解が問題なく得られている場合には，切除平面の追加が計算のオーバーヘッドになっている可能性がありますので，0 に設定するのが有効な場合もあります．Numerical Optimizer は V12 から追加される切除平面の種別を増やしたため，切除平面を比較的多めに加えるようになっています．結果として難しい（性質の悪い）問題のパフォーマンスは向上しましたが，以前の状態で高速にとけていた問題のパフォーマンスは低下している可能性はあります．切除平面の追加数が多すぎると感じる場合は，clevel を 0 に設定して試してみることをお勧めします．
モデルファイルに記述する方法

```
options.clevel = 1;
```

求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
branch:clevel = 1
```

- ヒューリスティックサーチを調整する求解オプション（simplex/asqp のみ有効）
良質な実行可能解を早期に得ることは分枝限定法の収束を加速するうえで大きく貢献します．緩和問題の変数を一つずつ整数値に固定していった結果として実行可能解を得るのが通常の分枝限定法ですが，問題の対称性が強い場合などには実行可能解の発見が非常に遅くなることはあり得ます．ヒューリスティックサーチとは緩和解を様々な方法で変形して，良質な実行可能解を早期に得るためのテクニックです．この手法がうまく機能すれば，分枝限定法の収束が加速する，あるいはより良質な実行可能解が早く得られる可能性があります．
各求解オプションは組み込まれているヒューリスティックサーチの手法（rounding, feasibility Pump, neighbour search, rins, rens）にそれぞれ対応しています．0 は行わない，1 は行うという意味となっています．また，rounding に関しては 2, 3 を設定することができ，値が大きいほど行う頻度が高くなります．feasibility Pump と neighbour search は大規模問題で実行可能解が得られにくい場合に効果的です．数千〜数万変数規模の実行可能解がなかなか現れない問題を解いている場合には，適用を試みるとよい結果が得られる可能性があります．
一方で規模の小さな問題（数百変数），あるいは実行可能解が既に多数出力される問題に対しては，ヒューリスティックサーチは効果がないばかりか時間を余計に所要する可能性があります．その際にはこれらの求解オプションをすべて 0 として，ヒューリスティクスサーチをやめてみてください．デフォルトでは，rins と rens は実行する（1），その他のヒューリスティックサーチは Numerical Optimizer が実行有無を適当に判断する（負の値）です．
モデルファイルに記述する方法

```
options.rounding = -1; // -1, 0, 1, 2, 3 を選択できます
options.feasPump = -1; // -1, 0, 1 を選択できます
options.neighbourSearch = -1; // -1, 0, 1 を選択できます
```

```
options.rins = 1 // 0, 1 を選択できます
options.rens = 1 // 0, 1 を選択できます
```

求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
branch:round = -1     *  -1, 0, 1, 2, 3 を選択できます
branch:feas = -1      *  -1, 0, 1 を選択できます
branch:neigh = -1     *  -1, 0, 1 を選択できます
branch:rins = 1       *  0, 1 を選択できます
branch:rens = 1       *  0, 1 を選択できます
```

- 探索深さ

探索の深さを設定します．1 とすると深さ優先探索を行います．大きい値であるほど，発見的探索に近くなります．

p を大きめに設定すると実行可能解が見つかりにくく，所要メモリが大きくなりがちです．そのような場合には p=1（深さ優先探索）という設定が有効な場合があります．

モデルファイルに記述する方法

```
options.p = 10;
```

求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
branch:p = 10
```

- wcsp ヒューリスティクスに関する求解オプション（simplex/asqp のみ有効）

制約が線形である問題に限り，分枝限定法内で wcsp タブーサーチ法を用いる「wcsp ヒューリスティクス」を使用することができます．問題の変数が全て 0-1 変数の場合，デフォルトで有効になっています．

wcsp ヒューリスティクスは通常の wcsp タブーサーチ法と以下が異なります．

1. 0-1 変数以外の変数は適当な刻み幅の DiscreteVariable として扱われる
2. wcsp の target 値は，変数の上下限を考慮した目的関数の下限あるいは上限が使用される
3. 内部で収束判定が行われ，自動的に終了する

wcsp ヒューリスティクスの計算時間消費が多すぎる場合，探索の反復回数上限や求解時間を制限することで求解時間の増加を抑えられる可能性があります．

求解オプションの設定方法は下記の通りです．

- モデルファイルに記述する方法

```
options.useWcsp = 1;             // 0(使用しない), 1(使用する)
options.branchWcspMaxitn = -1;   // -1 または正の整数
options.branchWcspMaxtim = 180; // 正の整数
```

- 求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
branch:useWcsp = 1        * 0(使用しない), 1(使用する)
branch:wcspMaxitn = -1    * -1 または正の整数
branch:wcspMaxtim = 180   * 正の整数
```

- 足切り点

  分枝限定法による探索時の足切り点です．設定した場合，足切り点（cutoff）より悪い解しか与えないことが解った問題は探索の対象から外します．従って，適切に設定すると計算の無駄を省くことができます．この値を最小化問題の場合は小さく（最大化問題の場合は大きく）設定するほど，足切り条件は厳しく，探索の対象は狭くなり，計算の手間は減ります．厳しく設定しすぎると実行可能解がない（(NUOPT16) Infeasible MIP.）というエラーになりますので，注意が必要です．初期設定では何も設定されていません．

  モデルファイルに記述する方法

```
options.cutoff = 1.0e-2;
```

  求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
branch:cutoff = 1.0e-2
```

- 分枝変数のスコアの算出方法

  Numerical Optimizer の分枝限定法では分枝時に改善される単位あたりの目的関数値の予測値（擬コスト）を算出しています．この擬コストから変数のスコアを算出し，分枝する変数を決定しています．スコアの算出方法は，分枝時に生成される二つの子問題における目的関数値の改善量を擬コストから算出し，それらを組み合わせます．この組み合わせ方として auto（デフォルト）, sum, product を用意しています．

  スコアの算出方法は次のように設定します．

  モデルファイルに記述する方法

```
options.branchVariableSelectScore = "product";
```

  求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
branch:variableSelectScore = product
```

- 計算時間上限

  計算時間の上限です．計算開始から秒単位の計算時間が計算時間上限 maxtim を越えると，下記のエラーメッセージとともに現在までの最適解を出力して実行を終了します．(0 以下の値は設定していないのと同じ意味になります.）計算時間には，前処理や最初の緩和解を求める時間が含まれます．初期設定では計算時間上限なしを意味する-1 が設定されています．

```
(NUOPT 21) B&B itr. timeout (with feasible.sol).
```

```
(NUOPT 22) B&B itr. timeout (no feasible.sol).
```

  モデルファイルに記述する方法

```
options.maxtim = -1;
```

求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
crit:maxtim = -1
```

- 整数解個数上限

実行可能解の個数の上限です．0 以下は設定していない（無制限）と同じと見なされます．1 とすれば，実行可能解を 1 つだけ求めて終了する，ということが可能になります．計算開始から見つかった実行可能解の数が maxintsol を越えると，以下のエラーメッセージとともに，現在までの実行可能解を出力して実行を終了します．

```
(NUOPT 37) B&B terminated with given # of feasible.sol.
```

モデルファイルに記述する方法

```
options.maxintsol = -1;
```

求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
branch:maxintsol = -1
```

- 最大メモリ量制限

Numerical Optimizer プロセスが使用することのできる最大メモリ量を制限するための求解オプションで，MiB 単位で指定します．例えば 1024 とすると 1GiB を上限とすることを意味し，1GiB を超えた場合に実行を停止します．なお，メモリ使用量は物理メモリだけでなく，仮想メモリを含んだ量です．

負の値を設定すると，システムで利用可能なメモリ量が残り -maxmem 以下になったときに実行を停止します．メモリ上限によって実行が停止した場合には NUOPT43 エラーが，実行可能解が見つかっていない場合には NUOPT44 エラーが出力されます．この場合，現在までの最適解を出力して実行を終了します．

```
(NUOPT 43) B&B memory error (with feasible.sol.).
```

```
(NUOPT 44) B&B memory error (no feasible.sol.).
```

モデルファイルに記述する方法

```
options.maxmem = -10;
```

求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
branch:maxmem = -10
```

- 上下界値のギャップによる停止

上下界値のギャップが，指定した値を下回る場合に解の探索を停止します．停止した際は，以下のエラーが出力されます．

```
(NUOPT 45) B&B gap reaches under the limit.
```

実行可能解が求まってはじめて上下界値のギャップは意味を持ちますので，このエラーで停止した場合には必ず実行可能解の出力が成されます．初期状態では，設定されていません．

ギャップ閾値の設定方法として，絶対値で指定する方法と相対値で指定する方法の二つがあります．

- 絶対値で設定する

  絶対値で設定する場合は，(上界値 - 下界値) に対する閾値を設定します．

  モデルファイルに記述する方法

  ```
  options.gaptol = 10;
  ```

  求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

  ```
  branch:gaptol = 10
  ```

- 相対値で設定する

  相対値で設定する場合は，上界値を Z_p 下界値を Z_d とした時の以下の式で定義される相対ギャップに対する閾値を設定します．

$$relgap := \begin{cases} 0, & Z_p = Z_d = 0 \\ \frac{|Z_p - Z_d|}{\max(|Z_p|, |Z_d|)}, & Z_p \cdot Z_d \geq 0 \\ 1, & Z_p \cdot Z_d < 0 \end{cases}$$

  モデルファイルに記述する方法

  ```
  options.relgaptol = 1.0e-2;
  ```

  求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

  ```
  branch:relgaptol = 1.0e-2
  ```

- 目的関数値による停止

  最小化（最大化）問題において目的関数値が設定値以下（以上）になった場合に解の探索を停止します．停止した際には以下のメッセージが出力されます．

  ```
  (NUOPT 23) B&B objective reaches under the limit.
  ```

  停止する値は次のように設定します．

  モデルファイルに記述する方法

  ```
  options.branchObjTarget = 100;
  ```

  求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

  ```
  branch:objTarget = 100
  ```

- スレッド数の上限

  マルチコア環境において並列分枝限定法を用いることができます．ユーザは並列分枝限定法が使

用するスレッド数の上限を指定することができます.
-1 を指定すると，Numerical Optimizer が内部で適切なスレッド数を設定します（設定の結果シングルスレッドの分枝限定法と並列分枝限定法のいずれになるかは環境により異なります）.
0 あるいは 1 と設定した場合は，シングルスレッドの分枝限定法が動作します.
モデルファイルに記述する方法

```
options.bbthreads = 1;
```

求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
branch:threads = 1
```

- 並列分枝限定法の手法

Numerical Optimizer V22 から並列分枝限定法の手法を racing（デフォルト）, deterministicRacing, subtree の 3 つから選択できるようになりました．それぞれの手法の特徴については付録の B2.4 並列分枝限定法をご覧ください.
並列分枝限定法の手法は次のように設定します.
モデルファイルに記述する方法

```
options.branchParallelMethod = "deterministicRacing";
```

求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
branch:parallelMethod = deterministicRacing
```

- 初期解の修復

Numerical Optimizer の分枝限定法にはユーザが与えた解を実行可能解として用いる機能があります．使い方は求解前に変数に初期値を設定します．設定された値を初期解として認識し，初期解が全ての制約を満たしていれば上界値を算出してから分枝限定法を開始します．この機能によって計算開始直後でも限定操作が働き，計算時間の短縮に繋がります.
以下は初期値設定方法の具体例です.

```
IntegerVariable x;
Variable y;
0 <= x <= 6;
1.5 <= y <= 6;
x + y >= 4;
x = 3;    // 変数 x に初期値を設定
y = 1.5;  // 変数 y に初期値を設定
solve();
```

一方，与えた初期解が制約を満たさない場合は実行可能解として認識されません．連続変数の値を正確に設定するのが面倒な場合や，数値的な理由で制約違反と見なされる場合に不都合です．このようなケースにおいて初期解の修復機能を有効にすると，与えた初期解から実行可能解が得られる

可能性があります．具体的には整数変数のみに値を設定して連続変数の値は Numerical Optimizer に任せたいケース，多段階の求解をおこなう際に前回の結果を用いたいケースにおいて非常に有効です．

初期解の修復機能の実行に必要な条件は次の二つです．

- 求解オプション branchRepairSolution が有効になっている
- 整数変数に与えた初期値が上下限制約を満たしている

branchRepairSolution の有効化は次の通りです．

モデルファイルに記述する方法

```
options.branchRepairSolution = "on";
```

求解オプションファイル nuopt.prm に記述する方法

```
branch:repairSolution=on
```

なお，分枝限定法のスレッド数のオプション（bbthreads）は初期解の修復機能にも有効であり，スレッド数を増やすと初期解の修復機能によって実行可能解が得られる可能性も高まります．

16.4 MPS ファイルに関する設定

この節では MPS ファイルから問題を入力する際の付加情報の指定方法を解説します．MPS ファイルに対する付加情報に関しては，求解オプションファイル nuopt.prm を用いて指定する方法のみが提供されています．

- 最小化，最大化の指定

  MPS ファイルから読み込んだ問題を目的関数の最小化問題/最大化問題のいずれとして解くかを指定します．初期設定は最小化です．

  ```
  maximize
  ```

- 各種ラベル名

  これらは MPS ファイル中に複数の RHS/BOUNDS/RANGE/目的関数行があるとき，実際の計算で用いるものを指定します．

  デフォルトでは最初に現れたものとなります．

  ```
  mpsfile:rhs = 文字列   (RHS ラベル名)
  mpsfile:bou = 文字列   (BOUNDS ラベル名)
  mpsfile:ran = 文字列   (RANGE ラベル名)
  mpsfile:obj = 文字列   (目的関数行ラベル名)
  ```

  上記に関して該当するラベルを持つものが存在しない場合には，以下のようなエラーが出力されます．

```
(MPS FILE 13) Specified rhs: RHS データラベル not found
(MPS FILE 11) Specified bound: BOUND データラベル  not found
(MPS FILE 15) Specified range data: RANGE データラベル not found.
(MPS FILE 12) Specified objective: 目的関数行名 not found
```

16.5 求解オプション一覧

Numerical Optimizer で設定可能な求解オプションの一覧です.

名称	選択	デフォルト値	意味
bbthreads [branch:threads = 1]	int	1	並列分枝限定法のスレッド数の上限
branchObjTarget [branch:objTarget = 100]	double	未定義	目的関数値による停止条件
branchParallelMethod [branch:parallelMethod=racing]	"racing" "deterministicRacing" "subtree"	"racing"	並列分枝限定法の手法
branchRepairSolution [branch:repairSolution=off]	"on" "off"	"off"	初期解の修復機能
branchVariableSelectScore [branch:variableSelectScore=auto]	"auto" "sum" "product"	"auto"	分枝変数のスコアの算出方法
branchWcspMaxitn [branch:wcspMaxitn = -1]	int	-1	分枝限定法内の wcsp ヒューリスティクスでの最大反復回数

名称	選択	デフォルト値	意味
branchWcspMaxtim [branch:wcspMaxtim = -1]	int	-1	分枝限定法内の wcsp ヒューリスティクスでの最大求解時間
clevel [branch:clevel = 1]	0/1/2	1	導入される切除平面の数の目安（0 は導入しない）（分枝限定法専用，asqp には無効）
crossover [cross:off]	"off" "on"	"off"	単体法へのクロスオーバー（higher 専用）
cutoff [branch:cutoff = 1.8]	double	未定義	足切り点（分枝限定法専用）
defaultConstraintWeight	double	-1	指定のない制約式の重み（デフォルトはハード制約）

名称	選択	デフォルト値	意味
defaultObjectiveTarget	double	0	目的関数の目標値（デフォルトは 0）（wcsp のみ）
defaultObjectiveWeight	double	1	目的関数を変形した制約式の重み（デフォルトは重み 1 のソフト制約）
eps [crit:eps = 1.0e-8]	double	自動設定	停止条件
feasPump [branch:feas = 0]	-1/0/1	-1	Feasibility Pump によるヒューリスティックサーチの頻度（-1 はシステムが適当に設定する）（分枝限定法専用）

名称	選択	デフォルト値	意味
gaptol	double	-1（指定なし）	上下界値のギャップの閾値（絶対値で設定）
iisDetect	"off" "on"	"on"（行う）	実行不可能な行集合（IIS）探索を行う/行わない
maxintsol [branch:maxintsol = 3]	int	-1（無制限）	整数解取得個数上限（個）
maxitn [crit:maxitn = 150]	int	内点法： 150 wcsp/wls/rcpsp： -1（無制限）	反復回数の最大（内点法と wcsp/wls/rcpsp）
maxmem [branch:maxmem = 500]	int	-10（残り 10MiB）	分枝限定法のメモリ利用量上限（MiB），残り利用可能メモリによる制限（負値の場合，MiB）

名称	選択	デフォルト値	意味
maxnod [branch:maxnod = 100000]	int	-1（無制限）	探索問題数上限（分枝限定法専用）
maxtim [crit:maxtim = 3600]	int	-1（無制限）	計算時間上限(秒)（分枝限定法と wcsp/wls/rcpsp）
method [method:auto]	"auto" "lipm" "higher" "tipm" "bfgs" "simplex" "dual_simplex" "hsimplex" "asqp" "lsqp" "tsqp" "lsdp" "trsdp" "wcsp" "wls" "rcpsp"	"auto"	求解アルゴリズム
mtxfree [linear:mtxfree = on]	"on" "off"	"off"	クリロフ部分空間法を使用して連立一次方程式を解くか否か

名称	選択	デフォルト値	意味
multDataPolicy	int	0（許さない）	同一のデータについてデータを重複して与えることを許すかどうか（1 に設定すると警告扱いとなる）
neighbourSearch [branch:neigh = 1]	-1/0/1	-1	Neighbour search によるヒューリスティックサーチの頻度（-1 はシステムが適当に設定する）（分枝限定法専用）
noDefaultSolout	int	0	solout() を陽に呼ばないと解の出力を行わない

名称	選択	デフォルト値	意味
noDefaultSolve	int	0	solve() を陽に呼ばないと求解を行わない
outfilename [output:name = myout]	char*	0 （未定義の場合「モデル名.sol」）	Numerical Optimizer の解ファイル名（"_NULL_"とすると出力を行わない）
outputExpression	int	1	Expression の CSV ファイル出力を行うかどうか
outputMode [output:mode = normal]	"silent" "normal"	"normal"	標準出力モード
outputParameter	int	1	Parameter の CSV ファイル出力を行うかどうか
p [branch:p = 10]	int	10	探索深さ（分枝限定法専用）

名称	選択	デフォルト値	意味
relgaptol	double	-1（指定なし）	上下界値のギャップの閾値（相対値で設定）
rens [branch:rens = 1]	0/1	1	rens によるヒューリスティックサーチの頻度（分枝限定法専用）
rins [branch:rins = 1]	0/1	1	rins によるヒューリスティックサーチの頻度（分枝限定法専用）
rounding [branch:round = 1]	-1/0/1/2/3	-1	rouding によるヒューリスティックサーチの頻度（-1 はシステムが適当に設定する）（分枝限定法専用）

名称	選択	デフォルト値	意味
scaling [scaling:cr]	"off" "minmax" "cr" "on"	"cr"	スケーリングの種類
told [simplex:told = 1.0e-6]	double	1.0e-6	双対変数の双対実行可能性判定閾値（単体法のみ）
tolx [simplex:tolx = 1.0e-8]	double	1.0e-8	主変数の実行可能性判定閾値（単体法のみ）
useWcsp [branch:useWcsp = 1]	0/1	1	分枝限定法で wcsp ヒューリスティクスを使用する
wcspInitialValueActivation	"off" "on"	"off"（行わない）	指定した初期値からの探索を行う/行わない（wcsp のみ）
wcspPhaseOneMaxtime	int	-1（無制限）	制約充足フェーズにおける計算時間上限（wcsp のみ）

名称	選択	デフォルト値	意味
wcspPhaseTwoMaxInterval	int	-1（無制限）	解更新間隔計算時間上限（wcspのみ）
wcspRandomSeed	int	1	乱数発生の種（wcspのみ）
wcspthreads	int	1	wcspの並列化時のスレッド数上限（wcspのみ）
wcspTryCount	int	1	乱数を変更しての計算回数（wcspのみ）
[wls:maxmem = 500]	int	-1（無制限）	wlsのメモリ利用量上限（MiB）（wlsのみ）
[wls:objectiveTarget = 10]	double	未定義	目的関数の目標値（wlsのみ）
[wls:tryCount = 5]	int	1	乱数を変更しての計算回数（wlsのみ）

第17章 MPSファイル・LPファイル

Numerical Optimizer は MPS ファイル形式で記述された数理計画問題を解くことができます．コマンドラインでの使用法は，以下の通りです．

```
prompt% nuopt ファイル名
```

なお，大規模な問題を記述したファイルを与えた場合，メモリ使用量に関するエラーが発生する可能性があります．この場合，以下のように求解コマンド nuopt64 を実行してください[8]．ただし，32bit マシンをご利用の場合は nuopt64 は実行できません．

```
prompt% nuopt64 ファイル名
```

上記各例の場合，拡張子が.lp であるファイルを LP ファイル形式として，それ以外を Free-MPS ファイル形式として読み込みます．

コマンドラインで使用する場合、ファイル形式をオプションとして指定することが可能です．この場合ファイル拡張子は無視されます．

Fix-MPS ファイル形式で読み込む場合には以下のようにします．

```
prompt% nuopt -fix-mps ファイル名
```

Free-MPS ファイル形式で読み込む場合には以下のようにします．

```
prompt% nuopt -free-mps ファイル名
```

LP ファイル形式で読み込む場合には以下のようにします．

```
prompt% nuopt -lp ファイル名
```

17.1 MPS ファイルに対する標準出力

MPS ファイルに対する求解コマンド nuopt を実行すると標準出力に計算の進行が表示されます．

```
prompt% nuopt ex1.mps
[About Numerical Optimizer]
MSI Numerical Optimizer x.x.x  (NLP/LP/IP/SDP module)
```

[8]本章では求解コマンド nuopt に関して説明しておりますが，nuopt64 でも nuopt と同様の機能（オプション等）をご利用いただけます．

```
         <with META-HEURISTICS engine "wcsp"/"rcpsp">
         <with Netlib BLAS>
        , Copyright (C) 1991 NTT DATA Mathematical Systems Inc.

[Reading MPS file: ex1.mps]
MPS_FILE_NAME                                        ex1.mps
PROBLEM_NAME(TITLE)                                 example1
ROWS                                                       4
COLUMNS                                                    3
NONZEROS                                                  11
OBJECTIVE                                                  f
RHS                                                        b

[Problem and Algorithm]
NUMBER_OF_VARIABLES                                        3
NUMBER_OF_FUNCTIONS                                        4
PROBLEM_TYPE                                    MINIMIZATION
METHOD                                          HIGHER_ORDER

[Progress]
<preprocess begin>.........<preprocess end>
<iteration begin>
    res=2.6e+001 .... 1.6e-004 . 3.9e-009
<iteration end>

[Result]
STATUS                                               OPTIMAL
VALUE_OF_OBJECTIVE                                     -10.5
ITERATION_COUNT                                            7
FUNC_EVAL_COUNT                                           10
FACTORIZATION_COUNT                                        8
RESIDUAL                                    3.903545017e-009
ELAPSED_TIME(sec.)                                      0.00
SOLUTION_FILE                                        ex1.sol
```

この出力中以下の部分：

```
[Reading MPS file: ex1.mps]
PROBLEM_NAME(TITLE)                                 example1
```

```
ROWS                                                    4
COLUMNS                                                 3
NONZEROS                                               11
OBJECTIVE                                               f
RHS                                                     b
```

は MPS ファイルを読み込むインタフェース部分からのメッセージで，MPS ファイルの NAME セクションにあるタイトル example1，ROWS セクションで指定された行の数（4），COLUMNS セクションで指定された変数の数（3）と総非零要素数（11），目的関数の行の名前（F）と右辺ラベル（B）を示しています．

以降の標準出力は SIMPLE モデルに対して Numerical Optimizer を適用した場合と同じです．詳しくは 13 標準出力をご覧ください．

17.2 MPS ファイル及び LP ファイルに対する解ファイル

nuopt は計算終了と共に，解ファイル出力します．これらには最適化アルゴリズム停止時における，変数や関数（目的関数及び制約式），双対変数（シャドウプライス）の値が記されています．解ファイルは入力ファイルの拡張子を.sol に変えたものが作成されますが，特殊な場合は次のルールに則って解ファイルの名前が決定されます．

入力ファイル名	解ファイル名	備考
ex1	ex1.sol	
ex1.mps, ex1.lp	ex1.sol	. 以降が.sol に
ex1.4.mps, ex1.3.lp	ex1.4.sol	最後の. 以降のみが.sol に
/nuopt/samples/ex1.mps	ex1.sol	パス名は反映されない

17.3 MPS ファイルに対する求解オプション設定

MPS ファイルに対しても，求解オプションを用いて各種設定をすることができます．MPS ファイルに対する情報を求解オプションで指定するには，求解オプションファイル nuopt.prm を用いる方法のみが提供されています．MPS ファイルに特有の求解オプションとして，以下が提供されています．

- 最小化，最大化の指定

  MPS ファイルから読み込んだ問題を目的関数の最小化問題/最大化問題のいずれとして解くかを指定します．MPS ファイルの初期設定は最小化ですので，最大化問題として解くには，明示的に指定する必要があります．

  ```
  maximize
  ```

- 各種ラベル名

  これらは MPS ファイル中に複数の RHS/BOUNDS/RANGE/目的関数行があるとき，実際の計算で

用いるものを指定します.

デフォルトでは最初に現れたものとなります.

```
mpsfile:rhs = 文字列   (RHS ラベル名)
mpsfile:bou = 文字列   (BOUNDS ラベル名)
mpsfile:ran = 文字列   (RANGE ラベル名)
mpsfile:obj = 文字列   (目的関数行ラベル名)
```

上記に関して該当するラベルを持つものが存在しない場合には，以下のようなエラーが出力されます.

```
(MPS FILE 13) Specified rhs: RHS データラベル not found
(MPS FILE 11) Specified bound: BOUND データラベル  not found
(MPS FILE 15) Specified range data: RANGE データラベル not found.
(MPS FILE 12) Specified objective: 目的関数行名 not found
```

17.4 MPS ファイルの具体例

MPS ファイルは次のような一般形の線形/二次計画問題を記述するためのものです.

$$
\begin{array}{ll}
\text{最小／最大化} & f(x) \\
\text{条　件} & c_{L_i} \le g_i(x) \le c_{U_i}, \quad i = 1, \cdots, m \\
 & b_{L_j} \le x_j \le b_{U_j}, \quad j = 1, \cdots, n \\
\text{初期値} & x_j = x_j^0 \quad j = 1, \cdots, n
\end{array}
$$

ここで $f(x)$, $g_i(x)$ は二次関数で

$$f(x) = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \cdots + c_n x_n + \frac{1}{2} x^t H_0 x$$

$$g_i(x) = a_{i1} x_1 + a_{i2} x_2 + \cdots + a_{in} x_n + \frac{1}{2} x^t H_i x$$

と表されます.

MPS ファイルは MPS フォーマットと呼ばれる形式で，次の情報を記述したものです.

目的関数，制約式の線形部分の係数	c_j, a_{ij}
制約式の上下限	c_{L_i}, c_{U_i}
目的関数，制約式の Hessian の要素	H_0, H_i
変数の上下限	b_{L_j}, b_{U_j}
変数の初期値	x_j^0

本マニュアルでは MPS ファイルのフォーマットに対する定義は述べず，具体的な問題に対する MPS ファイルの対応を記述するに留めます．MPS ファイルフォーマットの詳細をご所望の方は nuopt-support@msi.co.jp までご連絡ください.

$$
\begin{aligned}
&\text{最小化} && 4x_1 - x_3 + {x_2}^2 \\
&\text{条件} && x_1 + x_4 = 4 \\
& && x_1 + 2x_2 - x_3 + x_1x_2 \leq 10 \\
& && x_2 + x_3 \geq 2 \\
& && x_1 \geq 3 \\
& && 4 \geq x_2 \geq 1 \\
& && x_3, x_4 \geq 0 \\
&\text{初期値} && {x_1}^0 = 4, {x_2}^0 = 2 \\
& && {x_3}^0, {x_4}^0 = 0
\end{aligned}
$$

次は上記の二次計画問題を記述した MPS ファイルの例です.

```
NAME          SAMPLE
ROWS
 E   R1
 L   R2
 G   R3
 N   C
COLUMNS
    X1        R1                  1.    R2                  1.
    X1        C                   4.
    X2        R2                  2.    R3                  1.
    X3        R2                 -1.    R3                  1.
    X3        C                  -1.
    X4        R1                  1.
RHS
    B         R1                  4.    R2                 10.
    B         R3                  2.
BOUNDS
 LO BND1      X1                  3.
 LO BND1      X2                  1.
 UP BND1      X2                  4.
HESSIAN
    X2        X2                  2.
    R2
    X1        X2                  1.
INITIAL
    X1                            4.
```

```
    X2                                2.
ENDATA
```

17.5 LP ファイルの具体例とファイルフォーマット

LP ファイルとは，下記のようなフォーマットで数理計画問題を記述したものです.

```
MIN
 2x1 + 3x2
SUBJECTTO
  x1 + x4           =  4
 -x1 + x2 - 0.5x3 <= 10
  x2 + 0.25x3     >=  2
BOUND
 x1 < -2
GEN
 x2
END
```

ここでは Numerical Optimizer が対応している LP ファイルフォーマットについて簡単に説明します.

17.5.1 命名規則

変数，目的関数，制約式の名前に用いることができる文字は以下通りです.

- アルファベット：a-z A-Z
- 数字：0-9
- 記号：!"#$%&/,.;?@_‘´{}()|~’

```
4x2
```

のような記述は x2 の部分を名前とみて 4 × x2 と解釈します.

17.5.2 コメントと空行

\から行末までをコメントとします．また，空行は読み飛ばします.

17.5.3 半角スペースおよび式中の改行

"数 変数"および"変数 変数"という記述は，積と解釈します．式中の改行は，半角スペースと同様に扱われます.

17.5.4 lp ファイルの節

数理計画問題を構成する節の記述順は以下の通りです.

1. 問題名（省略可）
2. 目的関数
3. 制約式
4. 境界条件（省略可）
5. 変数型（省略可）
6. 初期値（省略可）

各節の内容は，対応する指示語を行頭から記述した次の行から記述します．指示語は大文字・小文字を問いません．問題記述が終わった後に

```
END
```

と記述する必要があります．次節以降の lp ファイルの節についての説明では，下記の通りの書式を用います.

- `[ ]`：`[]` 内は省略可能
- `(a,b,..)`：`a b ..` のいずれか
- `{ }**`：{}内の繰り返し
- `number`：数値
- `name`：名前
- `term`：(number, [number] name [([*] name, ^2)])
- `expression`：[(+,-)] term { [(+,-) term] }**
  目的関数における定数項は 1 つまで可

17.5.5 問題名節

指示語：`prob`, `problem`

17.5.6 目的関数節

指示語：`minimize`, `maximize`, `min`, `max`, `mininum`, `maximum`

書式：

```
[name:] expression
```

name 前後の半角スペースは読み飛ばします．name が省略された場合`"Objective"`が目的関数名となります．二次式を記述する場合には

```
0.5 x1^2 + 6 x1 x2 + 2x2^2
```

もしくは

```
+ [ x1^2 + 3x1 * x2 + 2x2 ^2 ] / 2
```

と記述します.

17.5.7 制約式節

指示語：subject to, subject to:, such that, st, s.t., st., subjectto, suchthat, such

書式：

```
[name:] expression (<,<=,=<,>,>=,=>,=) number
```

name 前後の半角スペースは読み飛ばします．Name が省略された場合"co(開始行数)"が制約式名となります．不等号・等号と右辺値の間に改行を挟んではいけません.

17.5.8 境界条件節

指示語：bounds, bound

書式：

```
number (<,<=,=<,>,>=.=>,=) name
name (<,<=,=<,>,>=.=>,=) number
number (<,<=,=<,>,>=.=>,=) name (<,<=,=<,>,>=.=>,=) number
name free
(-inf, -infinite) (<,<=,=<) name
name (>,>=.=>) (-inf, -infinite)
(inf, infinite) (>,>=.=>) name
name (<,<=,=<) (inf, infinite)
```

<, >はそれぞれ<=, =>と解釈します．境界条件において，重複した定義はエラーとなります．上界値は，未設定の場合には+inf と設定されます．下界値が未設定の場合は

1. 上界値が 0 未満であれば-inf
2. そうでない場合 0

と設定されます.

17.5.9 変数型節

書式：

```
{name}**
```

指示語：generals, general, gens, gen

指示語に続く名前の変数を一般整数変数とします．境界条件を与えていない変数に対しては，境界

条件を [0, +inf) とします.

指示語：integers, integer, ints, int
指示語に続く名前の変数を整数変数とします．境界条件が与えられていない場合は，境界条件を [0, 1] とします.

指示語：binaries, binary, bins, bin
指示語に続く名前の変数を 0-1 整数変数とします.

17.5.10 初期値節

指示語：init, initial
書式：

```
name = number
```

17.6 変数の境界条件について

MPS ファイルにおいて 'INTORG' マーカーで指定した整数変数に対して，境界条件が与えられない場合は 0-1 整数変数と推定し，計算を実行します．また，MPS ファイルおよび LP ファイルのいずれについても，下記のルールが適用されます.

- 下界値のみが指定された場合，上界値+inf とする.
- 上界値のみが指定された場合，これが 0 未満であれば下界値を-inf とする.
- 上界値のみが指定された場合，これが 0 以上であれば下界値を 0 とする.

17.7 MPS ファイルおよび LP ファイルへの変換

17.7.1 変換方法

モデリング言語 SIMPLE を用いてモデルファイルを記述した後，mpsout, mpsout_e または lpout という関数を呼び出すことによって，システムの内容を MPS ファイル形式にて出力することができます．mpsout の場合は Fix-MPS ファイルとして，mpsout_e の場合は Free-MPS ファイルとして，lpout の場合は LP ファイルとして出力します．モデルファイルは，線形（整数）計画問題あるいは二次（整数）計画問題である必要があります.

```
mpsout();   // Fix-MPS ファイルの出力
mpsout_e(); // Free-MPS ファイルの出力
lpout();    // LP ファイルの出力
```

作成される MPS ファイルの名称はモデルファイル名（.smp を除いたもの）.mps となります．出力

される MPS ファイル名を指定したい場合には次のように.mps を除いた部分を引数として与えます.

```
mpsout("filename"); // filename.mps という MPS ファイルを出力
```

17.7.2 MPS ファイルへの変換機能使用時の注意

前節で述べた MPS ファイルへの変換機能を用いる場合には，以下の点に注意をする必要があります.

- 変数名，関数名

  MPS ファイルの変数名は文字数の制限がありますので，変数名は一律 X1,X2,...，関数名は F1,F2,... という名前に変更されます．これらの名前と SIMPLE 内部で付けた名前との対応は出力される MPS ファイルの先頭部分に，次のように MPS ファイル書式のコメントの形式で記述されます.

```
VARIABLE NAME (MPSFILE - original)

X1          -   var[1]
X2          -   var[2]
                    ...

FUNCTION NAME TABLE (MPSFILE - original)

F1          -   obj
F2          -   NONAME
       ...
```

- 最大化/最小化

  最大化問題は**最小化問題に変換**されます（目的関数の符号が反対になります）.

- 問題規模の制限

  変数，関数のいずれかが 9999999 個以上の問題は出力できません.

第18章 0-1変数の高度な利用法

本章では，記述する際の難度が高い，特殊な数理計画問題の定式化を扱います．

0-1 変数をうまく利用する事で，そのままでは記述することが難しい目的関数や制約式を表現できます．ここで紹介する例は

- 折れ線関数の表現
- 整数変数の同符号条件の表現

の二通りですが，その他にも様々な応用があります．このような用途で用いられる 0-1 変数を indicator 変数と呼びます．

18.1 折れ線関数の表現

折れ線関数 $y = \begin{cases} -x, x \le 0 \\ x, x \ge 0 \end{cases}$ を表現する事を考えます．`ifelse` 関数を用いて折れ線関数を表現することはできませんが，0-1 変数 d を次のように導入する事で，折れ線関数を表現できます．

```
Variable x, y;
IntegerVariable d(type = binary);
Parameter M;
M = 10000; // 非常に大きな数
-M * (1 - d) <= x <= M * d;
x - M * (1 - d) <= y <= x + M * (1 - d);
-x - M * d <= y <= -x + M * d;
```

x に関する上下限制約は $d = 0 \Rightarrow -M \le x \le 0$，$d = 1 \Rightarrow 0 \le x \le M$ であることを意味しています．M として十分大きな数を取ると $d = 0 \Rightarrow x \le 0$，$d = 1 \Rightarrow 0 \le x$ と等価です．

y に関する一つ目の上下限制約は $d = 0 \Rightarrow x - M \le y \le x + M$，$d = 1 \Rightarrow x \le y \le x$ を意味します．つまり，M として十分大きな数を取ると $d = 1 \Rightarrow y = x$ という意味になります．同様に考えると，二番目の上下限制約は $d = 0 \Rightarrow y = -x$ という意味になります．

18.2 整数変数の同符号条件の表現

二つの整数変数 x, y が同符号であるという条件は，$xy \ge 0$ という条件と同値ですが，整数変数の積を記述すると，式が線形ではなくなってしまいます．ここでは線形の範囲内で，この条件を取り扱う方法を示します．

```
IntegerVariable x, y;
IntegerVariable d(type = binary);
Parameter M;
M = 10000; // 非常に大きな数
- M * d <= x <= M * (1 - d);
- M * d <= y <= M * (1 - d);
```

M として十分大きな数を取ると $d = 0 \Rightarrow 0 \leq x$, $d = 1 \Rightarrow x \leq 0$ そして $d = 0 \Rightarrow 0 \leq y$, $d = 1 \Rightarrow y \leq 0$ となるので，二つの整数変数 x, y は同符号となります.

第 19 章 Numerical Optimizer/SIMPLE FAQ

本章では，ある程度 Numerical Optimizer に慣れた方が陥りやすい誤りをまとめました．より初歩的な FAQ に関しては，「Numerical Optimizer/SIMPLE チュートリアル」をご参照ください．

19.1 浮動小数点エラー

モデルの中に変数の割り算などが入っていないでしょうか．変数は初期値を与えないと初期値 0 と解釈されますので変数の割り算は浮動小数点エラーの原因となります．

```
Variable x;
1 / x >= 5; // 浮動小数点エラーの原因
```

log 関数に 0 を与えてしまった場合も，浮動小数点エラーとなってしまいます．

```
Variable x;
log(x) >= 3; // 浮動小数点エラーの原因
```

なお，変数に初期値を与える方法に関しては 5.1 変数クラス Variable や 8 データファイルを参照してください．

19.2 整数の割り算

SIMPLE は C++を用いて実装されているため，「整数/整数」は切り捨てられた整数と解釈されてしまいます．例えば，次の例では定数 a に 1/6 を設定しようとしていますが，実際には 0 が与えられてしまいます．

```
Parameter a;
a = 1 / 6; // 0 が設定される
```

1/6 を与えるには，小数で記述する必要があります．

```
Parameter a;
a = 1.0 / 6.0;
```

19.3 添字付けに関するエラー

19.3.1 一次元の場合

文字列が集合の要素である場合は，個別に代入する際ダブルクォート"で囲む必要があります．

```
Set S = "p q"; // 文字列が要素
Element i(set = S);
Parameter a(index = i);
a["p"] = 2;
```

19.3.2 二次元の場合

二次元の添字を持つ場合，個別に代入する際には対象の集合の要素が文字列であるかないかにかかわらず，全体をダブルクォート"で囲む必要があります．

一部に Element が直接付随している場合は全体をダブルクォート"で囲む必要はありません．

```
Set S = "p q";
Set T = "1 2 3";
Element i(set = S), j(set = T);
Parameter a(index = (i, j));
a["p, 1"] = 2; // "で囲む
a["p", j] = 3; // p のみ"で囲む
a[i, j] = 4;   // "で囲まなくて良い
```

19.3.3 三次元以上の場合

三次元以上の添字を持つ場合，一部に Element が直接付随している場合であっても，残りの部分に二次元以上の箇所が残る場合は，ダブルクォート"で囲む必要があります．

```
Set S = "p q";
Set T = "1 2 3";
Set U = "r s"
Element i(set = S), j(set = T), k(set = U);
Parameter a(index = (i, j, k));
a["p, 1, r"] = 2;   // 全体を"で囲む
a["p, 1", k] = 3;   // 一部"で囲む
a["p", j, "r"] = 4; // 文字のみ"で囲む
a[i, "1, r"] = 5;   // 一部"で囲む
```

```
a[i, j, "r"] = 6;   // 文字のみ"で囲む
a[i, 1, k] = 7;     // "で囲まなくて良い
a["p", j, k] = 8;   // 文字のみ"で囲む
a[i, j, k] = 9;     // "で囲まなくて良い
```

付録 A Numerical Optimizer/SIMPLE/mknuoptのエラー/警告メッセージ

A.1 SIMPLEのエラー/警告メッセージ

次表はSIMPLEの実行時のエラー/警告メッセージ一覧です．メッセージは英語（UNIX版）あるいは日本語（Windows版）で，下の表では両方が並べて記述されています．

エラー番号	エラーメッセージ 説明
1	(SIMPLE 1) Infeasible bound for variable XX(YY) (SIMPLE 1) 変数 XX について矛盾した上下限が与えられました (YY)
	変数 XX に与えられた上下限が矛盾しています（モデル全体を通して上下限が結合された結果についてこのチェックが行われます）.
3	(SIMPLE 3) Infeasible bound for constraint XX (YY) (SIMPLE 3) 制約 XX について矛盾した上下限が与えられました．: (YY)
	制約式 XX に与えられた上下限が矛盾しています（モデル全体を通して上下限が結合された結果についてこのチェックが行われます）.
5	(SIMPLE 5) In datafile, Around c's definition: Expected element instead of d. (SIMPLE 5) データファイルの c の定義の付近において d とあるところには添字がなくてはなりません.
	使われたオブジェクトの添字の数が一致していません．（モデル中のオブジェクトの定義の際の添字の次元（index = ?）とそれが使われた時点（[i, j] 等）での添字の次元が一致しているかどうかを確認してください.）
6	(SIMPLE 6) In datafile, Around c's definition: Expected element instead of d. (SIMPLE 6) データファイルの c の定義の付近において d とあるところには添字がなくてはなりません.
	添字の現われるべき所に無効な文字（"[", "]", "..."など）が使われました.
10	(SIMPLE 10) In datafile, Around c's definition: Expected element instead of d. (SIMPLE 10) データファイルの c の定義の付近において d とあるところには添字がなくてはなりません.
	データファイルにおいて，添字付きオブジェクトに代入される内容（等号の右側）に"[ ]"が現れていません.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
11	(SIMPLE 11) In datafile, Around c's definition: Expected data instead of d. (SIMPLE 11) データファイルの c の定義の付近において d とあるところにはデータがなくてはなりません.
	データファイルにおいて，添字付きオブジェクトに代入される内容（等号の右側）に値が現れていません.
15	(SIMPLE 15) Internal problem in SIMPLE. (SIMPLE 15) システム内部の問題が起きました.
	SIMPLE の内部エラーが起きました.（nuopt-support@msi.co.jp へお知らせください.）
18	(SIMPLE 18) Internal problem in SIMPLE. (SIMPLE 18) システム内部の問題が起きました.
	SIMPLE の内部エラーが起きました.（nuopt-support@msi.co.jp へお知らせください.）
19	(SIMPLE 19) No auto-assignment performed for constant set. (SIMPLE 19) 自動代入によって定義されない集合があります.
	（警告）通常なら自動追加が行われる場合ですが，自動追加先が定数集合であるので行われません.（`Set` を定義する時，`superSet` に定数集合等を指定するとこの警告メッセージが現れます.）
20	(SIMPLE 20) In datafile, Around c's definition: Can't match the pattern "from ... to". (SIMPLE 20) データファイルの c の定義の付近において "from ... to" 形式の文法が正しくありません.
	データファイルに `from/to` の省略記号"..."が現れましたが，`from/to` がペアーになっていません.
22	(SIMPLE 22) In datafile, Around c's definition: Number of values not matched with the index dimension of set. (SIMPLE 22) データファイルの c の定義の付近において添字の数とモデル中の集合の次元が合致しません.
	データファイル中で，あるオブジェクトに代入される内容の"[]"の中に現れる `Element` の数がそのオブジェクトの定義時の index の数と合っていません.
23	(SIMPLE 23) In datafile, Around c's definition "..." or ".." appeared in the head or the tail. (SIMPLE 23) データファイルの c の定義の付近において "..." または ".." が定義の先頭か末尾に現われました.
	データを表す文字列の先頭または末尾に `from/to` の省略記号"..."/".."が現われました.
24	(SIMPLE 24) Attempt to find the maximum of an empty set. (SIMPLE 24) 空集合から最大要素を求めようとしました.
	空集合から最大要素を求めようとしています.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
36	(SIMPLE 36) Sequence is empty. (SIMPLE 36) Sequence が空となっています. 列 Sequence が空です.
37	(SIMPLE 37) Only one-dimensional data can be specified as Sequence. (SIMPLE 37) Sequence の指定は 1 次元のデータに限って有効です. 列 Sequence の定義（宣言）時に dim = 1 以外を与えました.
39	(SIMPLE 39) Sequence data not matched with the format: "first .. last, step". (SIMPLE 39) Sequence の入力データ形式は "開始要素 .. 終了要素 , 増分"でなければなりません. 列 Sequence の定義（宣言）で，最初の値，列の最後の値，増分（default = 1）のいずれかが抜けています.
40	(SIMPLE 40) Inappropriate operation on Sequence. (SIMPLE 40) Sequence に対する正しくない演算が行なわれました. 列 Sequence に対して無効な演算を行おうとしました.
41	(SIMPLE 41) Only one-dimensional data can be specified as Sequence. (SIMPLE 41) Sequence の指定は 1 次元のデータに限って有効です.
46	(SIMPLE 46) Attempt to find the maximum of an empty sequence. (SIMPLE 46) 空の Sequence から最大要素を求めようとしました. 空列から最大要素を求めようとしました.
47	(SIMPLE 47) Note: No auto-assignment performed for Sequence. (SIMPLE 47) Sequence に対する自動代入は行なわれません. 通常なら自動追加が行われる場合ですが，自動追加先が Sequence なので行われません.
49	(SIMPLE 49) A call has been made to an inappropriate function. (SIMPLE 49) 正しくない関数呼び出しが行なわれました. 無効な関数呼び出しが行われました.
53	(SIMPLE 53) Operation between elements of different dimension. (SIMPLE 53) 要素が異なる次元を持つ集合同士で演算が行なわれました. 属している集合の次元が異なる Element の間に演算が行われました.
54	(SIMPLE 54) Invalid operation on multi-dimensional elements. (SIMPLE 54) 多次元の要素に対して，不正な演算がされました. 次元が 2 以上の要素に対して加算・乗算などの演算は禁止されています.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
55	(SIMPLE 55) The operation prev/next is only valid for elements in OrderedSet. (SIMPLE 55) 順序集合 (OrderedSet) に含まれない要素に対して prev/next 演算は使用できません.
	OrderedSet クラスのメンバ関数である prev 関数や next 関数は引数として Element を取りますが，この際 OrderedSet に含まれない Element を指定しています.
58	(SIMPLE 58) In operation s1-s2, s1 doesn't include s2. (SIMPLE 58) 集合の引算 s1-s2 で，s2 は s1 に含まれていませんでした.
	集合の差分（s1 - s2）演算において，s2 は s1 の部分集合になっていません.
59	(SIMPLE 59) Fixed value (b) out of defined range of (a). (SIMPLE 59) 要素 (a) に対して定義域外の値 (b) を代入しようとしました.
	Element がその定義範囲外の値に固定されようとしています.
60	(SIMPLE 60) Inappropriate character[s] included in subscript. (SIMPLE 60) 添字に正しくない文字が含まれています.
	添字として使うことができない文字が含まれています.
62	(SIMPLE 62) Comparison between elements of different dimension. (SIMPLE 62) 異なる次元を持つ要素の間に比較が行なわれました.
	属している集合の次元が異なる Element 同士間で比較が行われました.
64	(SIMPLE 64) Constraint: subscript not matched. (SIMPLE 64) 制約式 (Constraint) の添字が合致しません.
	制約式の添字エラーです.
65	(SIMPLE 65) Internal problem in SIMPLE. (SIMPLE 65) システム内部の問題が起きました.
	SIMPLE の内部エラーが起きました.（nuopt-support@msi.co.jp へお知らせください.）

エラー番号	エラーメッセージ 説明
67	(SIMPLE 67) Index error in reference of "XX" with index of dimension YY but should be with index of dimension ZZ. (SIMPLE 67) 参照オブジェクト "XX" の添字付けに誤りがあります．次元 ZZ の添字を付けるべきですが，次元 YY の添字が付けられています.
	代入の右辺や計算式の中にあるオブジェクト XX に正しい添字が与えられていません. XX が添字なしなのに添字付けられている XX に添字をつけるべきなのに添字付けられていない XX の添字の次元が違う というケースが該当します. 例えば付けられた添字の次元が誤っている場合に出力されます． 例を挙げると `Variable x(index = (i, j));` と 2 次元で宣言されているにも関わらず，`x[1] == 1;` というように 1 次元の添字が付けられていると本エラーが出力されます． ただし，一見 2 次元の添字を付けているように見える場合にも本エラーが出力されることがあります．例えば先の例ですと，`x[1, 1] == 1;` と記述すると出力されます． このような int 型の値の並びは，SIMPLE の仕様で 2 次元の添字とはみなされません．この場合は `x["1, 1"] == 1;` と記述します.
70	(SIMPLE 70) XX used inappropriate manner. (SIMPLE 70) XX の使い方に誤りがあります.
	以下の例のように添字の扱いに問題がある場合生じます. 代入の左辺と右辺で現れる添字が違う場合 `sum(x[i], i) == p[i];` のように記述した場合（左辺で和をとるために使った添字 i は右辺で使えない） `x[i] >= 0, j > 3;` のように記述した場合（制約の条件式 `j > 3` に制約式 `x[i] >= 0` に現れない添字 `j` が含まれており不適切）
72	(SIMPLE 72) Index of LHS causes ambi：guity (index value should be unique). (SIMPLE 72) 代入の左辺の添字の値に重複があるので意味が曖昧です.
	a[i % 2] = 1 というように代入時において添字の値に重複がある場合生じます.
74	(SIMPLE 74) Dependent subscript used inappropriate manner. (SIMPLE 74) 式や宣言において他の添字に依存している添字は，その依存している添字と一緒に現れねばなりません.
	添字が他の添字に依存しているにも関わらず，単独でしかも固定されないまま使われました．（例えば Element j(set = S[i]); として宣言された `Element` が i を伴わず，固定されずに使われた場合に生じます.）

エラー番号	エラーメッセージ 説明
75	(SIMPLE 75) XX cannot be indexed. (SIMPLE 75) "XX" に添字は付けられません.
	代入の左辺にあるオブジェクト XX は添字なしで宣言されていますが添字を付けて値の設定や代入が成されました.
76	(SIMPLE 76) In assignment, dimension of object "XX" conflict. (SIMPLE 76) 代入されている "XX" の添字の次元に矛盾があります.
	代入の左辺にあるオブジェクト XX が宣言された集合の次元と違う次元の添字を付けて値の設定や代入が成されました.
77	(SIMPLE 77) Index required in assignment to "XX" (SIMPLE 77) "XX" の代入には添字が必要です.
	XX は N 個の添字を付けて定義されていますが，スカラーのように添字付けせずに値を設定しようとしています.
78	(SIMPLE 78) Unindexed assignment to "a" or unindexed constraint "a" is done ignoring condition. Use "if" to condition. (SIMPLE 78) 式 "a" の代入あるいは制約式 "a" は添字付けられていないので，条件式の成立にかかわらず行われます．条件付けするには if 文を使ってください.
	（警告）条件式が，添字付けられていない `Expression` の代入や制約式に現れています．条件付けをするには `if` 文を使う必要があります.
79	(SIMPLE 79) Condition never satisfied because dimention of element mismatch. (SIMPLE 79) 添字の次元が違うので決して充足されない条件式が現れました.
	次元の違う集合と要素に関する条件式が検出されました.
80	(SIMPLE 80) Undefined Element in Condition. (SIMPLE 80) 条件式に値が未定義の添字が使われました.
81	(SIMPLE 81) # of subscript mismatch. (SIMPLE 81) 添字の数が合致しません.
	添字に関するエラーが検出されました.
82	(SIMPLE 82) Subscript "XX" of "YY" out of range. (SIMPLE 82) YY の添字が定義域外である "XX" となりました.
	オブジェクトに付けられた添字の値が，その定義の際に（`index = ?`）設定された添字の値の範囲をはみ出ました.
91	(SIMPLE 91) Operation between sets of different dimension. (SIMPLE 91) 異なる次元の要素を持つ集合の間に演算が行なわれました.
	要素の次元（`dim`）が異なる集合間で演算が行なわれた.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
92	(SIMPLE 92) No auto assignment performed for result of operation of Sets. (SIMPLE 92) 演算結果から生成された集合に対する自動代入は行なわれません.
	（警告）通常なら自動追加が行われる場合ですが，自動追加先が集合演算の結果（和集合）であるので行われません.
93	(SIMPLE 93) Internal problem in SIMPLE. (SIMPLE 93) システム内部の問題が起きました.
	SIMPLE の内部エラーが起きました.（nuopt-support@msi.co.jp へお知らせください.）
97	(SIMPLE 97) No auto-assignment performed for sets made by "setOf". (SIMPLE 97) "setOf" で作った集合に対する自動代入は行なわれません.
	通常なら自動追加が行われる場合ですが，自動追加先が `setOf` の結果であるので行われません.
98	(SIMPLE 98) "from ... to" has been defined before data file reading. (SIMPLE 98) "from ... to" がデータファイルを読み込む前に，定義されました.
102	(SIMPLE 102) Set assignment: dimension conflict. (SIMPLE 102) 集合に対する代入で等号の右辺と左辺の集合の要素の次元が合致しません.
	集合同士の代入（またはデータファイルからの読み込み）の場合，右辺の集合の要素の次元と左辺の集合の要素の次元が合っていません.
103	(SIMPLE 103) Set and superSet should have same dimention. (SIMPLE 103) 異なる次元を持つ集合が "superSet" として使用されました.
	要素の次元の違う集合同士に包含関係を定義しようとしました. （`Set T(dim = 2); Set S(dim = 1, superSet = T);` とした場合等.）
104	(SIMPLE 104) XX cannot be a superset of YY. (SIMPLE 104) XX は YY の superSet として使用することができません.
	集合 XX は YY の superSet になることができません．例えば XX が数列集合 Sequence の時 YY の superSet として設定することはできません.
105	(SIMPLE 105) Argument error: a of b and c . (SIMPLE 105) 引数の問題 a の b と c
	オブジェクト定義時の引数エラーです.
110	(SIMPLE 110) Argument: inappropriate use of "index". (SIMPLE 110) "index=" が誤った場所に使用されています.
	オブジェクト定義時に属性引数 `index` が無効な場所に現れました.
111	(SIMPLE 111) Assignment: rhs includes free subscript. (SIMPLE 111) 代入の右辺に決定できない添字がありました.
	代入の右側に不定になる添字（`Element`）が現れました.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
113	(SIMPLE 113) Inappropriate assignment. (SIMPLE 113) 正しくない代入が行なわれました.
	その他の代入に関するエラーが検出されました.
114	(SIMPLE 114) Argument: Inappropriate use of "set". (SIMPLE 114) "set=" が誤った場所に使用されています.
	オブジェクト定義時に属性引数 set が無効に使われました.
119	(SIMPLE 119) Assignment: "[" or "]" occured both in lhs and rhs of = when assigning a set by a string. (SIMPLE 119) オブジェクト [添字] = 文字列という代入文で，文字列の中に "[" または "]" が現れました
	文字列を集合へと代入する際，文字列の中身である集合の値と代入の左辺両方が添字付けされていました.（文字列による集合への代入を行う際には，等号の両側に同時に"["または"]"が現われることを禁止しています．例えば，Set S; S[1] = "[1] a 1 2 [1] 3"; はエラーになります.）
120	(SIMPLE 120) Operators "+=", "-=", "*=", "/=", "++", and "--" are not allowed here. (SIMPLE 120) 演算子 "+=", "-=", "*=", "/=", "++", と "--" は使用することができません.
	演算子+= -= = /= ++ --を不適切なオブジェクトに適用しました.
121	(SIMPLE 121) Inappropriate constraint specification: ("parameter <= expr => parameter" is not allowed). (SIMPLE 121) 有効でない制約式 ("parameter <= expr => parameter") が使用されました.
	SIMPLE が解釈できない制約式の形（定数式<= 式>= 定数式，定数式>= 式<= 定数式）が現れました.
123	(SIMPLE 123) In datafile, Around c's definition: Syntax error(around "d"). (SIMPLE 123) データファイルの c の定義の付近において文法的な誤りがあります (問題のありそうな文字列 "d").
	データファイルの文法エラーです．データファイルを定義するときにデータの区切の";"を忘れている，またはデータファイルの文字コードに問題がある可能性があります．Numerical Optimizer Windows 版で利用可能なデータファイルの文字コードは Shift_JIS (SJIS) のみです．異なる文字コードの場合は事前に SJIS に変換してください．Nuorium のファイルメニューにある「文字コードを指定して保存」から SJIS と指定して変換することも可能です.
127	(SIMPLE 127) String uncompleted (missing a '"' mark) . (SIMPLE 127) 不完全な String (" が足りません) .
	値としての文字列の"がペアーになっていません.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
128	(SIMPLE 128) String is empty. (SIMPLE 128) データ文字列が空です. 値としての文字列が空です.
129	(SIMPLE 129) String contains space(s). (SIMPLE 129) データ文字列に空白が含まれています. 値としての文字列の名前に空が含まれています.
130	(SIMPLE 130) Inappropriate cast from character to int. (SIMPLE 130) 文字から数字へのキャストが行なわれました. 演算等で，文字を数字 `int` へキャストする必要が生じましたが，失敗しました.
131	(SIMPLE 131) Inappropriate cast from character to double. (SIMPLE 131) 文字から double へのキャストが行なわれました. 演算等で，文字を数字 `double` へキャストする必要が生じましたが，失敗しました.
132	(SIMPLE 132) In datafile, Around c's definition: Syntax error(around "d"). (SIMPLE 132) データファイルの c の定義の付近において文法的な誤りがあります (問題のありそうな文字列 "d").
133	(SIMPLE 133) In datafile, Around c's definition<> and following data unmatch. (SIMPLE 133) データファイルの c の定義の付近において<> と 引き続くデータが整合していません.
135	(SIMPLE 135) Syntax error occured within [...] . (SIMPLE 135) データファイルの c の定義の付近においてデータ書式の [...] の中に文法の問題が発生しました. データファイルにおける"[ ]"の中の定義が文法エラーとなっています.
136	(SIMPLE 136) Syntax error occured within <...> . (SIMPLE 136) データファイルの c の定義の付近においてデータ書式の<...> の中に文法の問題が発生しました. データファイルにおける"< >"の中の定義が文法エラーとなっています.
137	(SIMPLE 137) In datafile, Around c's definition: Wild card in [] and following data mismatch. (SIMPLE 137) データファイルの c の定義の付近において [] の中のワイルドカードとその後にあるデータが不整合です.
138	(SIMPLE 138) In datafile, Around c's definition: Wild card in [] and following data mismatch. (SIMPLE 138) データファイルの c の定義の付近において [] の中のワイルドカードとその後にあるデータが不整合です.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
139	(SIMPLE 139) The result dimension of parameter must be 1. (SIMPLE 139) Parameter の演算結果は次元 1 でなければなりません.
148	(SIMPLE 148) Argument: inappropriate use of "superSet". (SIMPLE 148) "superSet=" が誤った場所に使用されています.
	オブジェクト定義の属性引数 `superSet` が無効に使われました.
151	(SIMPLE 151) Set auto-assignment failed. (SIMPLE 151) 集合に対する自動代入はできません.
	集合に対する自動追加が失敗しました.（ある集合の自動追加を行わねば集合の包含関係が矛盾となることがわかりましたが，その集合は定数集合等である等の理由で自動追加ができない場合に生じます.）
159	(SIMPLE 159) No dual value: the model has not being solved or has been changed since last solving. (SIMPLE 159) dual 値が存在しません．モデルを解いていないか前回解を求めた後，モデル定義が変わりました.
160	(SIMPLE 160) Empty data can't be casted to double. (SIMPLE 160) 空データから double へのキャストが行なわれました.
	オブジェクトの参照可能な値を評価した結果空であるので，`double` へキャストすることができません.
163	(SIMPLE 163) No current value for empty constraint. (SIMPLE 163) 制約式が空なので制約式の値 (.val) が存在しません.
	宣言したのみで定義されていない制約式に対して現状値を調べようとしました.
164	(SIMPLE 164) Constraint "a" is empty and related value set to zero. (SIMPLE 164) 空の制約式"a"に関連する値は 0 として出力されます
	（警告）宣言したのみで定義されていない制約式に対して初期値を調べようとしました.
165	(SIMPLE 165) Dual value of Constraint "a" is assumed to be zero (Constraint is empty or model is not solved). (SIMPLE 165) 制約式 "a" の双対変数は 0 として出力されます (一度も求解を行っていません).
	（警告）求解していない状態では，`Constraint` の双対変数値は 0 として出力されます.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
167	(SIMPLE 167) Leftmost part of Constraint "XX" is used for output. contains more than two constraints. (SIMPLE 167) 制約式 "XX" については最も左の部分が出力されます (二つ以上の制約式を含んでいます).
	(警告) 制約式 XX が複数回代入された場合や二つ以上に分解される様な定義 (`co = x[i] <= y[i] <= z[i]` 等) を行った場合, その参照値の出力をすると最初の代入の内容かもっとも左の式に対する参照値が出力されます.
168	(SIMPLE 168) Objective can only be assigned once. (SIMPLE 168) 目的関数 (Objective) に対する代入は一度のみ可能です.
	目的関数への代入を複数回行おうとした. (`Objective` には 1 回の代入のみが許されています)
169	(SIMPLE 169) Argument: "type" Error! (SIMPLE 169) "type=" が誤って使われました.
	オブジェクト定義時の属性引数 `type` の指定が無効である.
171	(SIMPLE 171) Inappropriate assignment to Objective: only "Objective=Expression" is allowed. (SIMPLE 171) 目的関数 (Objective) に対する正しくない代入が行われました. "Objective = Expression" のみ有効です.
	目的関数に対して変数を含まない式が代入された.
172	(SIMPLE 172) Objective has not been assigned. (SIMPLE 172) 目的関数 (Objective) に対する代入が行なわれていません.
	モデルを解く (`solve()` 関数) に未定義の (代入が行われていない) 目的関数を渡しました.
173	(SIMPLE 173) Dual member only exists in Constraints and Variables. (SIMPLE 173) 双対変数値を制約式と変数以外について参照しようとしました.
	制約式と変数以外のオブジェクトの dual 値を照会しました.
174	(SIMPLE 174) Set data cannot be transformed to Parameter by .val . (SIMPLE 174) 集合の値 (.val) をパラメータ (Parameter) に変換しようとしました.
	集合の現状値 val を定数 `Parameter` に変換しようとしました. (例外として集合の現状値のみは `Parameter` と等価に扱うことはできません. 表示したりダンプしたりするのみです.)
177	(SIMPLE 177) No lower bound for empty constraint. (SIMPLE 177) 制約式の下限は存在しません. 制約式が空です.
	宣言したのみで定義されていない制約式に対して下限値を調べようとしました.
178	(SIMPLE 178) No upper bound for empty constraint. (SIMPLE 178) 制約式の上限は存在しません. 制約式が空です.
	宣言したのみで定義されていない制約式に対して上限値を調べようとしました.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
180	(SIMPLE 180) Argument: "from", "to" and "by" must be an integer type. (SIMPLE 180) 引数 "from", "to" および "by" は，int 型でなければなりません.
	列 Sequence の定義の際に引数 from,to,by はいずれも整数値を設定する必要があります.
181	(SIMPLE 181) Argument: "from" is required in defining a Sequence. (SIMPLE 181) Sequence を定義する時には，"from=" 指定が必須です.
	列 Sequence の定義に属性引数 from が現れていません.
182	(SIMPLE 182) Argument: "to" is required in defining a Sequence. (SIMPLE 182) Sequence を定義する時には，"to=" 指定が必須です.
	列 Sequence の定義に属性引数 to が現れていません.
186	(SIMPLE 186) Argument: "index" is ignored in the Interval/Sequence definition. (SIMPLE 186) Interval/Sequence を定義する時に，"index=" は指定できません.
	（警告）範囲 Interval または列 Sequence の定義に属性引数 index が現れました.
187	(SIMPLE 187) Argument: "dim" is ignored in the Interval/Sequence definition. (SIMPLE 187) Interval/Sequence を定義する時に，"dim=" は指定できません.
	（警告）範囲 Interval または列 Sequence の定義に属性引数 dim が現れました.
188	(SIMPLE 188) Argument: "left, right, oleft, oright" are ignored in the Sequence definition. (SIMPLE 188) Sequence を定義する時には，"left=, right=, oleft=, oright="は指定できません.
	（警告）列 Sequence を定義するとき，属性引数 left などは無視されます.
191	(SIMPLE 191) No assignment is allowed to Sets having both index and superSet. (SIMPLE 191) 添字と superSet を同時に持つような集合に対する直接の代入はできません. (データファイル経由のみが許されます)
	添字付きで親集合を持つ集合に対する代入を行おうとしました.（実装の都合上，このケースでの直接の代入は禁止されており，自動追加のみが許されます）
192	(SIMPLE 192) Problem in solve() before solution process (no result) (SIMPLE 192) アルゴリズム実行時の問題 (結果がでません)
	Numerical Optimizer が前処理でエラーを起こしました.
193	(SIMPLE 193) Problem in solve(): XX (SIMPLE 193) アルゴリズム実行時の問題 XX
	Numerical Optimizer が計算途中にエラーを起こしました. [解出力あり]
194	(SIMPLE 194) Problem in solve() (no result) XX (SIMPLE 194) アルゴリズム実行時の問題 (結果がでません) XX
	Numerical Optimizer が計算途中にエラーを起こしました. [解出力なし]
195	(SIMPLE 195) Index with SuperSet error. (SIMPLE 195) Index と SuperSet の定義の問題.
	Superset と添字つき集合の添え字付けに矛盾があります.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
196	(SIMPLE 196) Objective function is constant. (SIMPLE 196) 目的関数がコンスタントとなっています.

	（警告）目的関数が定数であることがモデルの解釈によって明らかになりました.
	目的関数が変数を含まない場合，このような警告が出力されます．例えば，以下のような記述をした場合です.
	`Objective obj;`
	`obj = 1;`
	このような警告が出たときは，データがモデルに適切に渡っていないことが多いです．データが適切に渡っているか確認することをお勧めします.

197	(SIMPLE 197) Set of fixed element cannot be a superset. (SIMPLE 197) メンバーが固定している集合を superSet として使用することはできません.
	代入によって固定した要素を `superSet` として使おうとしました.
198	(SIMPLE 198) The specified dimension in the .slice function is out of range. (SIMPLE 198) slice 関数で指定された次元は範囲外です.
	関数 `slice` の引数は `slice` しようとしている集合の次元数以下である必要がありますが，それを超えています.
199	(SIMPLE 199) Character-value("XX") appeared in constraint/objective definition. (SIMPLE 199) 文字列値 ("XX") が制約式や目的関数の定義に現れています.
	文字列 XX に対する演算が制約式や目的関数の定義中に現れました．`Parameter` の値で不適切な個所に文字列が現れている可能性があります.
200	(SIMPLE 200) simple_[f]printf() ignored Set object in the arglist. (SIMPLE 200) simple_[f]printf() は引数並び中の Set オブジェクトを無視しました
	（警告）`simple_[f]printf` は `Set` の出力を行いません.
201	(SIMPLE 201) You cannot write constraint in simple_[f]printf()'s arglist. (SIMPLE 201) simple_[f]printf() の引数並び中に変数を含む式の定義は記述できません.
	制約式を `simple_[f]printf()` の引数並びに記述しました.
202	(SIMPLE 202) {...} appears inappropriate position. (SIMPLE 202) {...} が正しくない場所に現れています.
	データファイルや文字列中で自然数の連続を示す... の現れる場所が不正です.
203	(SIMPLE 203) Insufficient # of Data after {...}..{...} expected XX but found YY. (SIMPLE 203) {...}..{...} にひきつづくデータ個数が不正です (XX 個必要ですが YY 個あります).
	データファイルの省略形“{...}”において，期待されるデータの個数が異なります.
204	(SIMPLE 204) Try to unlock Set with noname. (SIMPLE 204) 名前なしの集合を unlock() しようとしました.
	集合演算の結果など，陽に宣言されていない集合に対して `unlock()` を呼びました.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
205	(SIMPLE 205) Any Set without name is already locked. (SIMPLE 205) 名前なしの集合は常に lock() された状態ですので lock() のコールは不要です.
	（警告）集合演算の結果など，陽に宣言されていない集合に対して `lock()` を呼びました．もともと `lock()` されているという仕様なので `lock()` のコールは不要です.
206	(SIMPLE 206) Locked Set "XX" cannot be assigned. (SIMPLE 206) lock() された集合 "XX" に代入が行われました.
	集合 XX を `lock()` によってロックしているのに，代入が行われようとしました.
207	(SIMPLE 207) Auto-assignment mechanism try to add some element[s] to locked Set "XX" In setting object "YY". (SIMPLE 207) データ "YY" の設定の際に，自動代入で lock されている集合 "XX" に要素が追加されようとしました.
	集合 XX を `lock()` によってロックしている際に、自動代入によって新しい要素が追加されようとしています．YY へのデータ設定の添字に問題があります.
208	(SIMPLE 208) Note: Skip auto-assignment to locked base Set in assignment to XX (SIMPLE 208) XX の添字集合 (lock 済) への自動代入は抑制されました.
	（警告）集合 XX を `lock()` によってロックしている際に，自動代入によって新しい要素が追加されようとしています（設定によって自動代入がチェックのみのモードになっている場合の出力）.
209	(SIMPLE 209) Note: Skip assignment to locked superSet XX (SIMPLE 209) XX の superSet(lock 済) への代入は抑制されました.
	（警告）集合 XX を `lock()` によってロックしているのに，代入が行われようとしました（設定によって自動代入がチェックのみのモードになっている場合の出力）.
212	(SIMPLE 212) User Termination(at Model Expansion) (SIMPLE 212) ユーザによる中断 (モデル展開)
	式の展開の途中にユーザによる中止が命令されました.
213	(SIMPLE 213) Warning from solve(): XX (SIMPLE 213) モデル実行時警告
	（警告）Numerical Optimizer より警告 XX が出ました.
214	(SIMPLE 214) Warning constraint#XX reduce to "YY" (always satisfied). (SIMPLE 214) 制約式 XX は以下の式に等価です "YY" (常に満たされる).
	（警告）式 XX の展開の結果，YY という形の常に満たされる制約式が現れました.
215	(SIMPLE 215) constraint#XX reduce to "YY" (never satisfied). (SIMPLE 215) 制約式 XX は以下の式に等価です "YY" (常に満たされない).
	制約式（番号：XX）は「YY」に等価で，決して満たされないことがわかりました．216 と同時に現れます.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
216	(SIMPLE 216) Trivial and Infeasible constraint appeared. (SIMPLE 216) 常に Infeasible な制約式が現れました.
	式 XX の展開の結果，YY という形の明らかに満たすことのできない制約式が現れました（式の解釈の結果，問題が実行不可能であることがわかりました）．215 と同時に現れます.
217	(SIMPLE 217) Internal problem XX in SIMPLE. (SIMPLE 217) システム内部の問題 XX が起きました.
	SIMPLE の内部エラー XX が起きました．（nuopt-support@msi.co.jp へお知らせください.）
218	(SIMPLE 218) The header column have XX fields, but row#YY has ZZ fields. (SIMPLE 218) (ヘッダー行には XX 個のフィールドがありますが，YY 番目の行は ZZ 個のフィールドがあります).
	データファイルとして与えられた CSV ファイルのフィールド数エラーです. CSV ファイルのフィールド数はすべての行で同一でなければなりません.
219	(SIMPLE 219) Only the header row and no data row exist. (SIMPLE 219) 与えられた CSV ファイルにはヘッダー行しかありません.
	データファイルとして与えられた CSV ファイルにはヘッダー行しかありません.
220	(SIMPLE 220) No data row exist. (SIMPLE 220) 与えられた CSV ファイルには有効行がありません.
	データファイルとして与えられた CSV ファイルにはデータとして解釈できる部分がまったくありません.
221	(SIMPLE 221) Duplicate name "XX" (field# YY and ZZ) in the header row. (SIMPLE 221) 名前 "XX" がヘッダー行で重複しています (フィールド番号 YY と ZZ に現れています).
	データファイルとして与えられた CSV ファイルのヘッダーが示す行名前は重複してはいけません.
222	(SIMPLE 222) Inappropriate field string "XX" at row# YY (SIMPLE 222) フィールドデータとして不適切な文字 "XX" が現れています.
	データファイルとして与えられた CSV ファイルに違法な文字が混ざっています.
223	(SIMPLE 223) Empty field at row#XX, field# YY. (SIMPLE 223) XX 行目の YY 番目のフィールドが空です.
	データファイルとして与えられた CSV ファイルに空のフィールドが混ざっています.
224	(SIMPLE 224) In reading scalar "YY" from CSV file "XX", found too many (ZZ) lines for scalar. (SIMPLE 224) CSV ファイル "XX" からスカラデータ "YY" を読もうとしましたが，このファイルには合計 ZZ 行の無駄な行があります.
	（警告）データファイルとして与えられた CSV ファイルからスカラーを与えようとしている場合には，行はヘッダ行以外は一行でなければなりませんが，それ以上の行があります.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
225	(SIMPLE 225) Try to read data "XX" (with M index) from CSV file "YY" but it has too few(N) preceding column(s). (SIMPLE 225) データ "XX" (添字の数 M) を CSV ファイル "YY"から読もうとしていますが，該当列の前に添字となるはずの列が N 列しかありません.
	データファイルとして与えられた CSV ファイルの添え字の数が足りません（添え字の数は読み込もうとしているオブジェクトの定義から判定されますが，それから考えて足りません）.
227	(SIMPLE 227) Multiple data entry "XX" found in YY and ZZ (SIMPLE 227) データ "XX" についての記述が YY と ZZ に複数みつかりました.
	XX というオブジェクトの内容をデータファイル YY と ZZ において二回以上定義しました．二回以上定義されているオブジェクトを発見するたびに現れます．231 番のメッセージとともに現れます.
228	(SIMPLE 228) Field#N of the first row (index) is empty. In reading data "XX" (with M index , 2D format) from CSV file "YY" . (SIMPLE 228) データ "XX" (添字の数 M, 2D 書式) を CSV file "YY" から読み込もうとしましたが，最初の行のフィールド N (添字として使われる) が空です.
	XX というオブジェクトを 2D 書式で呼んでいるときに，最初の行には添え字の並びが来なければいけませんが，フィールド N が空になっています.
229	(SIMPLE 229) Error from XX, this object YY is not scalar. (SIMPLE 229) XX のコールを行ったオブジェクト YY はスカラではありません.
	スカラーでないオブジェクトに `asDouble()`（double 値への変換）のコールを行いました.
230	(SIMPLE 230) In datafile, Around XX's definition: dimension of element [YY] should be same as others. (SIMPLE 230) データファイルの XX の定義の付近において添字 [YY] の次元が他と異なっています.
	添字付きオブジェクト XX に対するデータの並びで，YY という添字記述のみ次元が異なっています. `a = [1] 3.0 [2 3] 4.0 [5] 5.0;` （モデル内の定義文字列に発見された場合にもこのエラーが出力されます）.
231	(SIMPLE 231) Multiple data definition found. This may cause performance deterioration. See the message window duplicate items. (SIMPLE 231) 同一のデータ定義が二つ以上あり，パフォーマンス下落を招く可能性があります．重複した品目についてはメッセージを参照してください.
	データの二重定義が一つでもあると現れます. `options.multDataPolicy` を 0（デフォルト）ならばエラーになります．0 以外に設定すると警告の意味となり，実行は停止しません.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
232	(SIMPLE 232) Proxy object is used before set.Can be used only after declaration. (SIMPLE 232) オブジェクトが宣言前に使われています．オブジェクトは宣言した後に利用しなければなりません.
	宣言する前のオブジェクト（Parameter, Variable など）を式の定義に利用しました.
233	(SIMPLE 233) Floating point arithmetic error. (SIMPLE 233) 浮動小数点例外が発生しました.

	ゼロ除算等の理由により浮動小数点演算において例外が発生しました.
	モデルの中に変数の割り算または log などが入っていないでしょうか．変数は初期値を与えないと初期値 0 と解釈されますので変数の割り算や log は浮動小数点エラーの原因となります.
	`Variable x(index = i);`
	`1 / x[i] >= 5; // 0 割りによるエラー`
	`sum(log(x[i]), i) == 1; // log(0) によるエラー`
	このような場合には変数に `x[i] = 1;` のようにして初期値を与えます．`solve` 関数を呼ぶ場合は，初期値は `solve();` より前に与えてください.

234	(SIMPLE 234) XX is inappropriate as element in domain of DiscreteVariable. (SIMPLE 234) XX は DiscreteVariable の値として不適切です.
	`DiscreteVariable` とその `domain` に含まれない値の間の条件式を定義した場合に出力されます. 例えば x の `domain` が $\{a, b, c\}$ のとき, `Boolean(x == "d") ..` のように書いた場合.
235	(SIMPLE 235) Problem in domain of DiscreteVariable XX (should contain only positive integer or string). (SIMPLE 235) DiscreteVariable XX の domain が不適切です.
	`DiscreteVariable` の `domain` の値は非負の整数か文字列である必要があります.
236	(SIMPLE 236) DiscreteVariable XX 's domain has no element. (SIMPLE 236) DiscreteVariable XX の domain が空集合です.
237	(SIMPLE 237) = is inappropriately used.== instead of = should be used to define equality constraint. (SIMPLE 237) = が不適切に使われています．おそらく == の誤りです．(等式制約を定義するには = (代入) ではなく == を用います).
	`x + y = z;` のように等式制約の定義に=を誤って用いた場合に出力されます.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
238	(SIMPLE 238) = is inappropriately used in definition of Set. (SIMPLE 238) 集合演算において = が不適切に使われています.
239	(SIMPLE 239) DiscreteVariable XX has no "dom" argument. (SIMPLE 239) DiscreteVariable XX の dom 引数が設定されていません.
240	(SIMPLE 240) DiscreteVariable XX 's domain should not be indexed. (SIMPLE 240) DiscreteVariable XX の domain が添字付けられています.
241	(SIMPLE 241) Table/Parameter a is indexed by more than 3 DiscreteVariables. (SIMPLE 241) Table/Parameter a が 4 つ以上の DiscreteVariable で添字付けられています.
242	(SIMPLE 242) ResourceRequire "XX"'s argument "duration" have to be Set of integer (SIMPLE 242) ResourceRequire "XX" の引数 "duration" は整数の集合でなければなりません.
243	(SIMPLE 243) Constraint XX can't apply to rcpsp. (SIMPLE 243) 制約 XX は rcpsp では扱う事は出来ません.
	rcpsp では扱えない制約 `alldiff`, `valgroup` 等が定義された場合に出力されます.
244	(SIMPLE 244) ResourceRequire is not defined for rcpsp. (SIMPLE 244) rcpsp を適用するのに必要な ResourceRequire が定義されていません.
245	(SIMPLE 245) ResourceCapacity is not defined for rcpsp. (SIMPLE 245) rcpsp を適用するのに必要な ResourceCapacity が定義されていません.
246	(SIMPLE 246) All ResourceCapacity's arguments "timeStep" are not same. (SIMPLE 246) 異なる ResourceCapacity の引数 "timeStep" に与えられている集合が同一ではありません.
247	(SIMPLE 247) resourceXXdefined at ResourceRequire is not defined at ResourceCapacity. (SIMPLE 247) ResourceRequire で定義されている資源 XX が ResourceCapacity に定義されていません.
248	(SIMPLE 248) Activity is not defined for rcpsp. (SIMPLE 248) rcpsp を適用するのに必要な Activity が定義されていません.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
249	(SIMPLE 249) Immediate precedence use undefined resource "XX" . (SIMPLE 249) 定義されていない資源 "XX" が直前先行制約で使われています.
250	(SIMPLE 250) mode "XX" used at Boolean is not defined. (SIMPLE 250) Boolean で指定しているモード "XX" は定義されていません.
251	(SIMPLE 251) Boolean times Boolean can't use for rcpsp (SIMPLE 251) rcpsp では一般の制約式において Boolean 同士の積は記述できません.
252	(SIMPLE 252) Activity is not different to startTime, endtime, processTime in Boolean (SIMPLE 252) 一般の制約式の Boolean と startTime, endtime, processTime の積の Activity が異なります
253	(SIMPLE 253) Activities are same in precedence (SIMPLE 253) 先行制約において同じ Activity に対し先行関係が与えられています.
255	(SIMPLE 255) can't use Activity for general constraints. (SIMPLE 255) 一般の制約式に Activity は用いられません. startTime, endTime, processTime に対して記述してください
258	(SIMPLE 258) modeXXnot defined at ResourceRequire set to Activity (SIMPLE 258) ResourceRequire で設定されていないモード XX が Activity に与えられています.
259	(SIMPLE 259) sourceActivity can use only defined Activity. (SIMPLE 259) sourceActivity は Activity を定義した時のみ使用出来ます.
260	(SIMPLE 260) sinkActivity can use only defined Activity. (SIMPLE 260) sinkActivity は Activity を定義した時のみ使用出来ます.
261	(SIMPLE 261) Activity has index "XX" but mode has index "YY". (should be the same) . (SIMPLE 261) Activity "XX" の index と引数 mode "YY" の index とが異なります.
262	(SIMPLE 262) Activity has index "XX" but mode is not defined. (SIMPLE 262) Activity "XX" の 引数に mode が設定されていません.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
263	(SIMPLE 263) Activity"XX"'s argument duedate "YY"'s index is inappropriate . (SIMPLE 263) Activity "XX" の引数 duedate "YY" の index が異なります.
264	(SIMPLE 264) two Activities' index are inappropriate in precedence. (SIMPLE 264) 先行制約の 2 つの Activity 間で index が異なります.
265	(SIMPLE 265) Can't set weight for precedence. convert to hard constraint (SIMPLE 265) 先行制約に重みを設定する事は出来ません．常に hard 制約として扱われます
	(警告)
266	(SIMPLE 266) Can't set weight for immediate precedence. convert to hard constraint (SIMPLE 266) 直前先行制約に重みを設定する事は出来ません．常に hard 制約として扱われます
	(警告)
267	(SIMPLE 267) can't use character for precedence's time (SIMPLE 267) 先行制約の時間指定に文字列が使われています
268	(SIMPLE 268) index error between imprecedene and precedence. (SIMPLE 268) 直前先行制約の index と指定された資源の index が異なります.
269	(SIMPLE 269) define resource for immediate precedence. (SIMPLE 269) 直前先行制約に資源が指定されていません
270	(SIMPLE 270) index error between precedence and precedece's time. (SIMPLE 270) 先行制約の index と時間指定の index が異なります
271	(SIMPLE 271) index error between precedence . (SIMPLE 271) 先行制約の添字に他の添字に依存するものがありますが他の添字と同時に使われていません.
272	(SIMPLE 272) defined multi resources for one immediate precedence (SIMPLE 272) 1 つの直前先行制約に複数の資源が指定されています
273	(SIMPLE 273) resource is not defined at ResourceCapacity "XX"'s argument. (SIMPLE 273) ResourceCapacity "XX" の引数に resource が与えられていません

エラー番号	エラーメッセージ 説明
274	(SIMPLE 274) timeStep is not defined at ResourceCapacity "XX"'s argument. (SIMPLE 274) ResourceCapacity "XX" の引数に timeStep が与えられていません
275	(SIMPLE 275) ResourceCapacity "XX" 's index is not same as argument weight "YY"'s index (SIMPLE 275) ResourceCapacity "XX" の index と 引数 weight "YY" の index が異なります
276	(SIMPLE 276) mode is not defined at ResourceRequrie "XX"'s argument. (SIMPLE 276) ResourceRequire "XX" の引数に mode が与えられていません
277	(SIMPLE 277) resource is not defined at ResourceRequrie "XX"'s argument. (SIMPLE 277) ResourceRequire "XX" の引数に resource が与えられていません
278	(SIMPLE 278) duration is not defined at ResourceRequrie "XX"'s argument. (SIMPLE 278) ResourceRequire "XX" の引数に duration が与えられていません
279	(SIMPLE 279) duration is negative at ResourceRequrie "XX"'s argument. (SIMPLE 279) ResourceRequire の引数 duration に負の値が用いられています
280	(SIMPLE 280) ResourceRequire has no data. (SIMPLE 280) ResourceRequire にデータが設定されていません
281	(SIMPLE 281) mode XX is not defined at ResourceRequire. (SIMPLE 281) モード XX が ResourceRequire に設定されていません
	（警告）予期せぬ動作の原因になります.
282	(SIMPLE 282) mode XX defined at ResourceRequire is not used. (SIMPLE 282) モード XX が ResourceRequire に定義されていますが使われていません.
	（警告）予期せぬ動作の原因になります.
283	(SIMPLE 283) resource XX 's ResourceCapacity value is 0 at through TimeStep. (SIMPLE 283) 資源 XX が全スケジュール期間において ResourceCapacity の値が 0 となっています.
	（警告）初期解の失敗の原因になります.
284	(SIMPLE 284) can't use hard Constraint for rcpsp. (SIMPLE 284) rcpsp は一般の制約式を hard 制約として扱えません (十分大きな重みを与える必要があります).

エラー番号	エラーメッセージ 説明
285	(SIMPLE 285) general constraint has negative weight for rcpsp. (SIMPLE 285) 一般の制約式に負の重みが与えられています.
286	(SIMPLE 286) can't set weight for general constraint when use tardiness. (SIMPLE 286) 納期遅れ最小化では一般の制約式に重みを与える事は出来ません (全て hard 制約として扱われます).
	(警告)
288	(SIMPLE 288) Objective completionTime has negative weight. (SIMPLE 288) 目的関数 (最後の作業の完了時刻最小化) の重みに負の値が与えられています
289	(SIMPLE 289) can't treat as hardConstraint for Objective completionTime. (SIMPLE 289) 目的関数 (最後の作業の完了時刻最小化) は hard 制約として扱う事は出来ません
290	(SIMPLE 290) can't set weight to tardiness. (SIMPLE 290) 納期遅れ最小化に対して重みを設定する事は出来ません
	(警告)
291	(SIMPLE 291) ResourceCapacity's weight have to be positive value. (SIMPLE 291) 再生資源制約の重みは 0 より大きい値のみ与えられます (-1 は hard 制約とみなされます)
292	(SIMPLE 292) can't set weight to ResourceCapacity when use tardiness. (SIMPLE 292) 納期遅れ最小化時は資源制約に重みを設定する事は出来ません. 全て hard 制約として扱われます
	(警告)
293	(SIMPLE 293) use constraint which constructed by different Activitie's precedence or only Boolean when use tardiness. (SIMPLE 293) 納期遅れ最小化時の一般の制約式は異なる 2 つの Activity の先行関係か Boolean のみからなる制約以外の制約は扱えません
294	(SIMPLE 294) can't use equality contraint. use two in equality constraint. (SIMPLE 294) 納期遅れ最小化時は等式制約を扱う事は出来ません. 不等式制約を連立させます
	(警告)

エラー番号	エラーメッセージ 説明
295	(SIMPLE 295) can't define immediate precedence when use tardiness (SIMPLE 295) 納期遅れ最小化時は直前先行制約は定義出来ません
296	(SIMPLE 296) can't use constarint constructed by Boolean and Activity when use tardiness. (SIMPLE 296) 納期遅れ最小化時は一般の制約式で Boolean と Activity を混合する事は出来ません.
298	(SIMPLE 298) exist not indexing in rcpsp 's Object(Activity, ResourceRequire, ResourceCapacity). (SIMPLE 298) rcpsp のオブジェクト (Activity, ResourceRequire, ResourceCapacity) に添字が与えられていないものがあります.
299	(SIMPLE 299) resource XX defined at ResourceCapacity is not used at ResourceRequire. (SIMPLE 299) ResourceCapacity で定義されている資源 XX が ResourceRequire で使われていません.
	(警告)
300	(SIMPLE 300) ResourceRequire "XX"'s argument "timeStep" 's dim have to be one. (SIMPLE 300) ResourceRequire "XX" の引数 "timeStep" に与える集合は 1 次元でなければなりません.
301	(SIMPLE 301) ResourceRequire "XX"'s argument "timeStep" 's val have to be integer. (SIMPLE 301) ResourceRequire "XX" の引数 "timeStep" に与える集合の要素は整数でなければなりません
302	(SIMPLE 302) ResourceRequire "XX"'s argument "timeStep" 's val have to start 0. (SIMPLE 302) ResourceCapacity の引数 "timeStep" に与える集合の要素は 0 始まりでなければなりません
303	(SIMPLE 303) ResourceRequire "XX"'s argument "timeStep" 's val step is one. (SIMPLE 303) ResourceCapacity の引数 "timeStep" に与える集合の要素は 1 刻みでなければなりません.
304	(SIMPLE 304) ResourceCapacity "XX"'s val is real. (SIMPLE 304) ResourceCapacity "XX" の値が実数です. 整数に切り捨てます.
	(警告)

エラー番号	エラーメッセージ 説明
305	(SIMPLE 305) ResourceCapacity "XX"'s weights are real. (SIMPLE 305) ResourceCapacity "XX" に与えられた重みに実数のものがあります．整数に切り捨てます.
	(警告)
306	(SIMPLE 306) ResourceRequire "XX"'s weights are real. (SIMPLE 306) ResourceRequire "XX" に与えられた重みに実数のものがあります．整数に切り捨てます.
	(警告)
307	(SIMPLE 307) General Constraint "XX"'s weights are real. (SIMPLE 307) 一般の制約式 "XX" に与えられた重みに実数のものがあります．整数に切り捨てます.
	(警告)
308	(SIMPLE 308) CompletionTime's weights are real. (SIMPLE 308) 目的関数 (最後の作業の完了時刻最小化) に与えられた重みに実数のものがあります．整数に切り捨てます.
	(警告)
310	(SIMPLE 310) multi Objectives are defined for rcpsp. (SIMPLE 310) rcpsp において目的関数が複数定義されています.
311	(SIMPLE 311) Objecive type is minimize for rcpsp. (SIMPLE 311) rcpsp において Objective に type=maximize が与えられています.
	目的関数は最小化のみ扱えます.
312	(SIMPLE 312) waring: Objective function and general constraint are not defined. (SIMPLE 312) rcpsp において目的関数も一般の制約式も定義されていません.
	(警告)
313	(SIMPLE 313) Activity "XX" 's argument mode is empty. (SIMPLE 313) Activity "XX" の引数 mode に与えられた集合に空のものがあります.
314	(SIMPLE 314) can't define resource before condition in imprecedence constraint. (SIMPLE 314) 直前先行制約において条件式の前に資源を指定する事は出来ません
315	(SIMPLE 315) tardiness only can use when define Activity. (SIMPLE 315) tardiness は Activity を定義した時のみ使用出来ます.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
316	(SIMPLE 316) ResourceRequire "XX" 's argument default is negative. (SIMPLE 316) ResourceRequire "XX" の引数 default に負の値が与えられています
317	(SIMPLE 317) only completionTime and tardiness are set to Objective for rcpsp. (SIMPLE 317) completionTime, tardiness 以外は Objective に設定する事は出来ません.
	rcpsp を用いる場合のみ
318	(SIMPLE 318) ResourceRequrie "XX"'s val have to be non-negative (SIMPLE 318) ResourceRequrie "XX" に負の値が与えられています.
319	(SIMPLE 319) ResourceCapacity "XX"'s val have to be non-negative (SIMPLE 319) ResourceCapacity "XX" に負の値が与えられています.
320	(SIMPLE 320) ResourceCapacity "XX"'s weight have to be non-negative. (SIMPLE 320) ResourceCapacity "XX" の重みに負の値が与えられています.
	ただし，-1 は hard な資源制約の意味になります.
321	(SIMPLE 321) ResourceCapacity "XX"'s mode "YY"is uninitialized. (SIMPLE 321) ResourceCapacity "XX" のモード YY の処理時間が明確ではありません．(初期化してください)
322	(SIMPLE 322) Tardiness is set to Objective but Activity isn't set duedate. tardiness is canceled. (SIMPLE 322) 目的関数に tardiness が設定されていますが，Activity に duedate が与えられていません．納期遅れ最小化は行われません.
	(警告)
323	(SIMPLE 323) (immediate)precedence contradicts. (SIMPLE 323) (直前) 先行制約の先行関係に矛盾があります.
324	(SIMPLE 324) multiple resource are given to immediate precedence. (SIMPLE 324) 直前先行制約に複数の資源が与えられています.
325	(SIMPLE 325) cannot use sourceActivity when use tardiness. (SIMPLE 325) 納期遅れ最小化時には sourceActivity は用いる事は出来ません.
326	(SIMPLE 326) cannot use sinkActivity when use tardiness. (SIMPLE 326) 納期遅れ最小化時には sinkActivity は用いる事は出来ません.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
327	(SIMPLE 327) cannot use DummyMode when use tardiness. (SIMPLE 327) 納期遅れ最小化時には DummyMode は用いる事は出来ません.
328	(SIMPLE 328) Activity times Activity can't use for rcpsp (SIMPLE 328) rcpsp では一般の制約式において Activity 同士の積は記述できません.
329	(SIMPLE 329) Activity times Activity.startTime can't use for rcpsp (SIMPLE 329) rcpsp では一般の制約式において Activity と Activity.startTime の積は記述できません.
330	(SIMPLE 330) Activity.startTime times Activity.endTime can't use for rcpsp (SIMPLE 330) rcpsp では一般の制約式において Activity.startTime と Activity.endTime の積は記述できません.
331	(SIMPLE 331) Activity.startTime times Activity.startTime can't use for rcpsp (SIMPLE 331) rcpsp では一般の制約式において Activity.startTime と Activity.startTime の積は記述できません.
332	(SIMPLE 332) Activity.endTime times Activity.endTime can't use for rcpsp (SIMPLE 332) rcpsp では一般の制約式において Activity.endTime と Activity.endTime の積は記述できません.
333	(SIMPLE 333) Activity times Activity.endTime can't use for rcpsp (SIMPLE 333) rcpsp では一般の制約式において Activity と Activity.endTime の積は記述できません.
334	(SIMPLE 334) completionTime only can use when define Activity. (SIMPLE 334) completionTime は Activity を定義した時のみ使用できます.
335	(SIMPLE 335) undefined Value XX at ResourceRequire is given to Activitiy. (SIMPLE 335) ResourceRequire で定義されていない XX が Activity の初期値に与えられました

エラー番号	エラーメッセージ 説明
336	(SIMPLE 336) undefined Value XX at ResourceRequire is given to Activitiy. (SIMPLE 336) ResourceRequire で定義されていない XX が Activity の初期値に与えられました
337	(SIMPLE 337) can't fix mode for undefined Activity "XX" (SIMPLE 337) 初期化されていない "XX" に対してモードの固定を行なおうとしました.
338	(SIMPLE 338) can't give weight to fixActivity when set duedate (SIMPLE 338) 納期遅れ最小化時は fixActivity に重みを与える事は出来ません
339	(SIMPLE 339) can't fix endTime when give weight to fixActivity (SIMPLE 339) fixActivity に重みを与えた場合は終了時刻の固定は出来ません
340	(SIMPLE 340) Mode YYwritten in Boolean is not in the Activity XX's domain. (SIMPLE 340) Boolean で指定された XX はモード YY を取る事が出来ません
341	(SIMPLE 341) can't give to modeOrder. convert to hardConstraint. (SIMPLE 341) modeOrder 制約に重みを設定する事は出来ません．常に hard 制約として扱われます
	(警告)
343	(SIMPLE 343) two Activities' index are inappropriate in modeOrder. (SIMPLE 343) modeOrder 制約の 2 つの Activity 間で index が異なります.
344	(SIMPLE 344) index error between modeOrder . (SIMPLE 344) modeOrder 制約の添字に他の添字に依存するものがありますが他の添字と同時に使われていません.
345	(SIMPLE 345) can't define modeOrder when use tardiness (SIMPLE 345) 納期遅れ最小化時は modeOrder 制約を定義出来ません
346	(SIMPLE 346) two Activitie's mode num given to moderOrder is different (SIMPLE 346) modeOrder 制約に与えられた 2 つの Activity XX, YY の取り得るモードの数が異なります
	`modeOrder` 制約に与えられた `Activity` の取りうるモードの数は等しい必要があります.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
347	(SIMPLE 347) can't give same Activity to moderOrder (SIMPLE 347) 同一の Activity を modeOrder 制約に与える事は出来ません.
348	(SIMPLE 348) can't fix XX's endTime zero (SIMPLE 348) 終了時刻を 0 に固定する事は出来ません (XX).
349	(SIMPLE 349) can't fix endTime negative value (XX). (SIMPLE 349) 開始時刻を負の値で固定する事は出来ません (XX).
350	(SIMPLE 350) can't fix endTime negative value (XX). (SIMPLE 350) 終了時刻を負の値で固定する事は出来ません (XX).
351	(SIMPLE 351) can't fix both startTime and endTime (XX). (SIMPLE 351) 開始時刻と終了時刻の両方を固定する事は出来ません (XX).
352	(SIMPLE 352) can't fix startTime over timeStep (XX). (SIMPLE 352) timeStep を越える時刻の固定は行なう事が出来ません (XX).
353	(SIMPLE 353) Activity list is not initialized. (SIMPLE 353) 作業リストが与えられていない Activity があります. 自動で初期値設定は行われません.
	(警告)
354	(SIMPLE 354) initialized Activity XX can't be YY (SIMPLE 354) 初期値に与えられた YY を XX は取り得ません
355	(SIMPLE 355) can't give negative weight for fixActivity (SIMPLE 355) fixActivity に負の重みが与えられています
357	(SIMPLE 357) XX's time is fixed to a real number. omit to integer number. (SIMPLE 357) XX の時刻が実数の値で固定されています. 整数に丸められます.
	(警告)
358	(SIMPLE 358) can't set initial value to "XX". (SIMPLE 358) XX に初期値を代入する事は出来ません.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
359	(SIMPLE 359) Inappropriate order's are given to initial value. give order's which start from "1" to all Activity. (SIMPLE 359) 初期値に与えられた順番が不正です (順番は 1 始まりで全ての Activity に対し与えて下さい.
361	(SIMPLE 361) can't set defaultval for ResourceCapacity "XX . (SIMPLE 361) ResourceCapacity "XX"に defaultval を設定する事は出来ません.
	`defaultval` は `ResourceRequire` クラスにのみ有効です.
362	(SIMPLE 362) can't decide timeStep.given empty set to timeStep (SIMPLE 362) スケジュール期間が定まりません． timeStep に与えられた集合が空集合です.
370	(SIMPLE 370) The index dim of the Matrix "XX" should be 2. (SIMPLE 370) 行列 "XX" の宣言に与えた要素の添字が 2 次元ではありません.
371	(SIMPLE 371) Inappropriate index dim of the Matrix "XX" or its Element. Now its index is dim YY, but should be ZZ (as Matrix) or MM (as Element). (SIMPLE 371) 行列 "XX" (添字の次元 ZZ) に，次元 YY の添字は不適合です．行列全体を指すのなら，添字の次元は ZZ に，要素を指すのなら，添字の次元は MM でなければなりません.
372	(SIMPLE 372) The Matrix "XX" is null. The SDP constraint on this matrix is ignored. (SIMPLE 372) 行列 "XX" は空です．この行列に対する正定値制約は無視されます.
	(警告)
373	(SIMPLE 373) Weight coefficients of the constraint "a" is inappropriate. (a: Quadratic b: Linear) = (XX YY). a and b both should be non-negative. (SIMPLE 373) 制約式 "a" のウエイト係数が不正です．(a 二次 b 一次) = (XX YY)． a,b ともに零または正でなければなりません.
375	(SIMPLE 375) count/max/min/argmax/argmin contains DiscreteVariable. (SIMPLE 375) count/max/min/argmax/argmin が DiscreteVariable を含んでいます.
	`count/max/min/argmax/argmin` が `DiscreteVariable` を含む表現を制約式/目的関数の定義に使うことはできません．0-1 の `IntegerVariable` (type = binary) のみ可能です.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
376	(SIMPLE 376) 1st argument of count is inappropriate type. (SIMPLE 376) count の最初の引数が，[定数 <=] 式 [<= 定数] あるいは [定数 >=] 式 [>= 定数] 以外の形をしています.
	count の最初の引数の式の形が想定しているものと異なります. 定数 <= 式 <= 定数 定数 >= 式 >= 定数 のみが可能です（上，下限に相当する定数のいずれか一つは省略可）.
377	(SIMPLE 377) Format string of simple_[f]printf running out. (SIMPLE 377) simple_[f]printf の書式指定に対して引数が足りなくなりました.
	simple_[f]printf の引数に対してフォーマット文字列が足りません. このメッセージにひきつづいてフォーマット文字列と足りなくなった箇所が表示されます.
378	(SIMPLE 378) Uninitialized object passed to simple_[f]printf. (SIMPLE 378) simple_[f]printf に初期化されていないオブジェクトが渡されました.
	宣言前のオブジェクト，あるいは実行されない if 文の中で宣言されたオブジェクトが simple_[f]print の引数として渡されました.
379	(SIMPLE 379) Try to convert uninitialized object to Parameter. (SIMPLE 379) 初期化されていないオブジェクトを Parameter に変換しようとしました.
	宣言前のオブジェクト，あるいは，実行されない if 文の中で宣言されたオブジェクトが，式の中で定数値として使われました.
380	(SIMPLE 380) Try to display uninitialized object. (SIMPLE 380) 初期化されていないオブジェクトを表示しようとしました.
	宣言前のオブジェクト，あるいは，実行されない if 文の中で宣言されたオブジェクトを .val.print() などで表示しようとしました.
381	(SIMPLE 381) The specified dimension in the .at function is out of range. (SIMPLE 381) at 関数で指定された次元は範囲外です.
382	(SIMPLE 382) simple_[f]printf with no indexed argument for output is done ignoring condition. Use "if" to condition. (SIMPLE 382) simple_[f]printf にある条件式は添字付きの出力引数がないので無視されます．条件付けするには if 文を使ってください.
	（警告）添字のない Parameter a を用いて simple_printf("1\n", a > 0); のように simple_[f]printf の条件式を記述した場合条件式は無視されます．if(a > 0){simple_printf("1\n");}のように記述してください.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
400	(SIMPLE 400) the dimension of reference object XX and reference object YY are not suitable. (SIMPLE 400) 参照オブジェクト XX と参照オブジェクト YY の次元が整合しません.
401	(SIMPLE 401) reference object XX cannot be converted into vector. (SIMPLE 401) 参照オブジェクト XX はベクトルに変換できません.
402	(SIMPLE 402) reference object XX cannot be converted into scalar. (SIMPLE 402) 参照オブジェクト XX はスカラーに変換できません.
403	(SIMPLE 403) because the dimension of reference object XX and reference object YY are not suitable, inner product is not computable. (SIMPLE 403) 参照オブジェクト XX と参照オブジェクト YY の次元が整合しないため，内積は計算できません.
404	(SIMPLE 404) because the dimension of reference object XX and reference object YY are not suitable, addition and subtraction are not computable. (SIMPLE 404) 参照オブジェクト XX と参照オブジェクト YY の次元が整合しないため，加減演算はできません.
405	(SIMPLE 405) because the dimension of reference object XX and reference object YY are not suitable, multiplication is not computable. (SIMPLE 405) 参照オブジェクト XX と参照オブジェクト YY の次元が整合しないため，乗算は計算できません.
406	(SIMPLE 406) reference object XX and scalar YY are not compareable. (SIMPLE 406) 参照オブジェクト XX とスカラー YY は比較できません.
407	(SIMPLE 407) because reference object XX is not square matrix, the trace of it is not computable. (SIMPLE 407) 正方行列でないため，参照オブジェクト XX のトレースは計算できません.
410	(SIMPLE 410) function sum of reference object XX is not computable. (SIMPLE 410) 参照オブジェクト XX の sum は計算できません.
411	(SIMPLE 411) the multiplication of reference object XX and indexed parameter is not computable. (SIMPLE 411) 参照オブジェクト XX と添字付き Parameter の乗算は計算できません.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
413	(SIMPLE 413) substitution for indexed reference object XX is prohibited. (SIMPLE 413) 添字付きの参照オブジェクト XX に対する代入は禁止されています.
449	(SIMPLE 449) error occurred by matrix or vector "XX" arithmetic operation. Please try to write by using Expression. (SIMPLE 449) 行列またはベクトル "XX" の演算で問題が発生しました. Expression を用いて記述してください.
450	(SIMPLE 450) Try to operate "YY" on empty set "XX" (SIMPLE 450) 空の集合 "XX" に対して 操作 "YY" を行いました.
	(警告)
451	(SIMPLE 451) Try to evaluate null-element. (SIMPLE 451) 空の集合の要素の値が式の評価の際に参照されました.
452	(SIMPLE 452) Element "a" binded to Set, so cannot be fixed (new feature since V20). (SIMPLE 452) 要素 "a" は定義集合を持っているので固定できません (V20 からの新しい仕様).
453	(SIMPLE 453) Element "a" passed to OrderedSet::position unfixed. (SIMPLE 453) 要素 "a" が OrderedSet::position に固定されないで渡されました.
454	(SIMPLE 454) Null valued element passed to OrderedSet::position. (SIMPLE 454) 空の要素が OrderedSet::position に渡されました.
455	(SIMPLE 455) The specified index in the .elementAt function is out of range. (SIMPLE 455) elementAt 関数で指定された要素番号は範囲外です.
456	(SIMPLE 456) Argument: "dim" 's val have to be an integer greater than or equal to 1. (SIMPLE 456) 引数 "dim" の値は 1 以上でなければなりません.
502	(SIMPLE 502) Inappropriate class type in "[]" function. (SIMPLE 502) 関数 "[ ]" の引数のタイプが正しくありません.
511	(SIMPLE 511) Internal problem in SIMPLE. (SIMPLE 511) システム内部の問題が起きました.
	SIMPLE の内部エラーが起きました. (nuopt-support@msi.co.jp へお知らせください.)

エラー番号	エラーメッセージ 説明
514	(SIMPLE 514) No such file: "XX". (SIMPLE 514) 次のファイルは存在しません． "XX".
515	(SIMPLE 515) Must be Minimize/Maximize Objective. (SIMPLE 515) ここは Minimize/Maximize (目的関数) でなければなりません.
516	(SIMPLE 516) No Minimize/Maximize Objective exists. (SIMPLE 516) Minimize/Maximize (目的関数) が存在しません.
517	(SIMPLE 517) Only Expanded Variable's current value can be changed. (SIMPLE 517) 変数の current 値を展開前に求めようとしました.
520	(SIMPLE 520) Max operation was applied to empty set. (SIMPLE 520) max 操作が空集合に対して適用されました.
	（警告）max 関数を使用した際，範囲指定並びが空集合のため最大値の取得ができない場合に表示されます.
521	(SIMPLE 521) Min operation was applied to empty set. (SIMPLE 521) min 操作が空集合に対して適用されました.
	（警告）min 関数を使用した際，範囲指定並びが空集合のため最小値の取得ができない場合に表示されます.
522	(SIMPLE 522) Empty selection appeared. (SIMPLE 522) 空の selection が現れました.
	（警告）selection 関数を使用した際，選択候補となる 0-1 整数変数が存在しない場合に表示されます.
523	(SIMPLE 523) Empty alldiff appeared. (SIMPLE 523) 空の alldiff が現れました.
	（警告）alldiff 関数を使用した際，制約を与える離散変数が存在しない場合に表示されます.
524	(SIMPLE 524) The argument of selection should be indexed Variable. (SIMPLE 524) selection の引数となる変数は添字付きであることが必要です.
525	(SIMPLE 525) The argument of alldiff should be indexed Variable. (SIMPLE 525) alldiff の引数となる変数は添字付きであることが必要です.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
550	(SIMPLE 550) Elements of a empty Set are expanded. (SIMPLE 550) 空集合に対して添字の展開をしようとしました.
	(警告)
551	(SIMPLE 551) Inappropriate semidefinite constraint on "XX". RHS must not have movable index. (SIMPLE 551) 行列 "XX" についての半正定値制約の右辺が一意に定まりません.
	半正定値制約の右辺に a[i] など，動ける index を伴ったパラメータが表れると出るエラーです．a[4] などの場合には出ません.
552	(SIMPLE 552) SymmetricMatrix "XX" has index "YY" out of its dimSet. (SIMPLE 552) 対称行列 "XX" のインデクス "YY" が dim で与えられた範囲の外です.
	半正定値制約の定義の添字が dim で与えられた範囲をはみだしています．行列要素の代入については自動代入が適用されません.
553	(SIMPLE 553) In a recurrence relation, evaluation of "XX" is circular. (SIMPLE 553) 漸化式において，オブジェクト "XX" の評価が循環しました.
	漸化式で定義されたオブジェクトの値評価の途中で定義漸化式が循環を含んでいることが判明しました．漸化式として不整合です.
554	(SIMPLE 554) Inappropriate evaluation in a recurrence relation. (SIMPLE 554) 漸化式定義中に正しくないオブジェクトの評価が行われました.
	漸化式によるオブジェクトの値の定義途中で，そのオブジェクト自身の評価が要請されました．漸化式で定義されるオブジェクトの値評価は，漸化式定義最中には行えません.
555	(SIMPLE 555) In a recurrence relation, to use "setOf" is forbidden. (SIMPLE 555) 漸化式定義中に "setOf" を使うことはできません.
	漸化式によるオブジェクトの値の定義途中で setOf 関数が使用されました．漸化式定義中では setOf 関数を使用できません.
556	(SIMPLE 556) In a recurrence relation, to define constraints or an objective is forbidden. (SIMPLE 556) 漸化式定義中に制約式や目的関数の定義はできません.
	漸化式によるオブジェクトの値の定義途中で、制約式や目的関数の定義がなされました．漸化式定義中では制約関数や目的関数の定義はできません.
557	(SIMPLE 557) No data in dat file. (SIMPLE 557) 与えられた dat ファイルに有効なデータがありません.
	(警告)
558	(SIMPLE 558) It is not possible to specify the "type=maximize" in Minimize. (SIMPLE 558) Minimize では "type=maximize" を指定することはできません.
559	(SIMPLE 559) It is not possible to specify the "type=minimize" in Maximize. (SIMPLE 559) Maximize では "type=minimize" を指定することはできません.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
560	(SIMPLE 560) The weight of the constraint XX is overwritten. (SIMPLE 557) 制約式 XX の重みが上書きされました.
	制約式オブジェクトには重みを一つのみ設定できます.

A.2 Numerical Optimizer のエラー/警告メッセージ

Numerical Optimizer 本体の出力するエラー/警告メッセージは,

- Numerical Optimizer 本体部の計算で検出されたエラー/警告

```
(NUOPT 番号)　　エラー/警告メッセージ
```

- 求解オプションに関するエラー/警告

```
(SOLVER OPTION 番号)　エラーメッセージ
```

- MPS ファイル解釈時に検出されたエラー/警告

```
(MPS FILE 番号)　　エラーメッセージ
```

- LP ファイル解釈時に検出されたエラー/警告

```
(LP FILE 番号)　　エラーメッセージ
```

の 4 種類です．エラーメッセージは，標準出力に出力されます．SIMPLE ロードモジュールの場合には

```
ex2.smp:10:error: (SIMPLE 193) アルゴリズム実行時の問題
ex2.smp:10:error: (NUOPT 10) IPM iteration limit exceeded.
```

などのように，SIMPLE のエラーメッセージの一部として表示されますが，これはモデリング言語 SIMPLE が Numerical Optimizer を起動している形を取っているためです.

A.2.1 Numerical Optimizer のエラー/警告メッセージ

エラーに関する解説の最後に [解出力なし] とあるエラーの場合には，解ファイルへの変数値や関数値に関する出力は行われません．[解出力あり] とあるエラーの場合には最適性の保証がない解を一応は出力します.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
1	(NUOPT 1) memory error in preprocessing.
	前処理部で所要メモリが，使用可能な量をオーバーしました．[解出力なし]

エラー番号	エラーメッセージ 説明
2	(NUOPT 2) infeasible (linear constraints and variable bounds). 線形制約や変数の上下限制約のために問題が infeasible となっていることが前処理部で検出されました．[解出力なし]
3	(NUOPT 3) neither valid objective nor constraint in this model. モデル（問題）に目的関数および制約式がありません．[解出力なし]
5	(NUOPT 5) infeasible variable bounds. (NUOPT 5) infeasible integer variable bounds. 連続変数もしくは整数変数の上下限制約のために問題が infeasible となっていることが前処理部で検出されました．（整数変数が整数性に違反する様な上下限を課されている場合等に発生します．）[解出力なし]
6	(NUOPT 6) unbounded (linear constraints and variable bounds). 線形制約と変数の上下限から問題の最適解は有界とはならないことが前処理部で判定されました．[解出力なし]
7	(NUOPT 7) internal error. [内部ルーチン名] 内部エラーが発生しました． （nuopt-support@msi.co.jp にご連絡ください）．[解出力なし]
8	(NUOPT 8) memory error in optimization phase. 計算部において所要メモリが使用可能な量をオーバーしました．[解出力なし]
9	(NUOPT 9) step reduction limit exceeded. 直線探索アルゴリズムにおいて step reduction の失敗が起き，最適化実行が止まってしまいました（凸でない問題に直線探索アルゴリズムを適用した場合や，問題が infeasible である場合に起きます）．[解出力あり]
10	(NUOPT 10) IPM iteration limit exceeded. 内点法の反復回数が上限を越えました（上限は特に指定しない場合には 150 回です．求解オプションファイルからは criteria:maxitn = 300 として設定することができます）．[解出力あり] 内点法の収束状況が悪化しており，反復回数が上限を越えた場合に本エラーメッセージが出力されます． このような現象は，問題のスケールの悪さなど，数値的な問題に起因することが多いことが経験上知られています． この問題に対して万能な解決策を挙げることは難しいのですが，以下の方策により回避できることがあります． 初期点を変更する 自動スケーリング機能を off にする options.scaling = "off"; 反復回数上限を上げる（例えば，デフォルトで 150 であれば 300 にする） options.maxitn = 300;
11	(NUOPT 11) infeasible. 問題が実行不可能であると判定されました．[解出力あり]

エラー番号	エラーメッセージ 説明
12	(NUOPT 12) heap memory for NUOPT process exhausted.
13	(NUOPT 13) unbounded.
	問題の最適解が有界でないことが判定されました．[解出力あり]
14	(NUOPT 14) integrality is violated.
	整数変数を含む問題に単体法以外を適用したため，整数変数が整数となっていない解が出力されています．[解出力あり]
15	(NUOPT 15) 手法名 misapplied to 問題種類.
	非線形計画問題に単体法が適用されようとしています．[解出力なし]
16	(NUOPT 16) Infeasible MIP.
	混合整数計画問題に整数解が存在しないことがわかりました．[解出力あり]
17	(NUOPT 17) B&B node limit reached (with feas.sol.).
	分枝限定法において生成する部分問題数が上限を越えました．最適解である保証はありませんが，整数解は得られています．（branch:maxnod を設定した場合）．[解出力あり]
19	(NUOPT 19) B&B node limit reached (no feas.sol.).
	17 番と同じですが，整数解が得られていません．[解出力あり]
20	(NUOPT 20) Some subproblems remain unsolved in B&B (no feas.sol.).
	分枝限定法で数値的理由によりいくつかの部分問題が解かれずに残りました．実行可能解の出力はありません．スケーリングオプションを変更してもう一度お試しください．[解出力あり]
21	(NUOPT 21) B&B itr. timeout (with feas.sol.).
	整数計画法を解いている場合の Numerical Optimizer の起動時間が上限を越えました．最適である保証はありませんが，整数解は得られています（crit:maxtim を設定した場合）．[解出力あり]
22	(NUOPT 22) B&B itr. timeout (no feas.sol.).
	21 番と同じですが，整数解が得られていません．[解出力あり]
23	(NUOPT 23) B&B objective reaches under the limit.
	分枝限定法において目的関数値が設定値に達しました．[解出力あり]
25	(NUOPT 25) Can’t open file in current directory [no ファイル種類 made]
	（警告）解ファイル（.sol ファイル等）のオープンに失敗したので解ファイルが出力されていません（計算は行われます）．[解出力なし]
26	(NUOPT 26) LP/IP module cannot handle NLP.
	LP/IP モジュールで非線形計画問題を解こうとしました．[解出力なし] 上記メッセージは，非線形計画問題を扱えない環境（例えば Numerical Optimizer LP/IP モジュールを使用している場合）で非線形の制約式もしくは目的関数を含むモデルを実行した場合に出ます．

エラー番号	エラーメッセージ 説明
27	(NUOPT 27) SIMPLEX iteration limit exceeded. 単体法の反復回数の上限をオーバーしました．[解出力あり]
28	(NUOPT 28) higher-order method is only for LP. 非線形計画問題に線形計画法専用の内点法が適用されようとしています．[解出力なし]
29	(NUOPT 29) iteration diverged. 内点法が発散しました．ペナルティパラメータが増大しており，以下の可能性が考えられます． 実行不可能 実行不可能に近い状態 実行可能領域になかなか近づけない 制約想定が満たされていない [解出力あり]
30	(NUOPT 30) terminated by user. ユーザの指示により計算の中断を行いました．[解出力あり]
31	(NUOPT 31) B&B terminated by user (with feas.sol.). 分枝限定法の演算中ユーザの指示により計算の中断を行いました．最適解である保証はありませんが，整数解は得られています．[解出力あり]
32	(NUOPT 32) B&B terminated by user (no feas.sol.). 31 番と同じですが，整数解が得られていません．[解出力あり]
33	(NUOPT 33) Bound violated. 変数の上下限を有意に違反している解が出力されています．違反している個所は，解ファイル（*.sol）で"INFS"と表示されています．スケールの悪い（制約式や変数の値のオーダーの差が激しい）問題と思われます．内点法で解いている場合には停止条件を小さくして実行する必要があります．[解出力あり]
34	(NUOPT 34) Bound and Constraint violated. 変数および制約式の上下限を有意に違反している解が出力されています．違反している個所は，解ファイル（*.sol）で"INFS"と表示されています．スケールの悪い（制約式や変数の値のオーダーの差が激しい）問題と思われます．内点法で解いている場合には停止条件を小さくして実行する必要があります．[解出力あり]
35,36	(NUOPT 35) Constraint violated. (NUOPT 36) Equality constraint violated. 制約式の上下限を有意に違反している解が出力されています．違反している個所は，解ファイル（*.sol）で"INFS"と表示されています．スケールの悪い（制約式や変数の値のオーダーの差が激しい）問題と思われます．内点法で解いている場合には停止条件を小さくして実行する必要があります．[解出力あり]

エラー番号	エラーメッセージ 説明
37	(NUOPT 37) B&B terminated with given # of feas.sol. options.maxintsol で指定した数だけの整数解が発見されたので分枝限定法を停止しました. [解出力あり]
38	(NUOPT 38) dual infeasible. リスタート時に起動される双対単体法のプロセスで実行不可能性が検出されました. [解出力あり]
39	(NUOPT 39) IPM iteration timeout. options.maxtim で設定した時間に対して，内点法の反復がタイムアウトしました. [解出力あり]
40	(NUOPT 40) SQP iteration limit exceeded. SQP（lsqp,tsqp）の反復が上限を超えました. 他のアルゴリズムをお試しください. [解出力あり]
41	(NUOPT 41) SQP internal error. SQP（lsqp,tsqp）の実行中に内部的なエラーが発生しました. 他のアルゴリズムをお試しください. [解出力なし]
42	(NUOPT 42) You cannot apply crossover for MIP
43	(NUOPT 43) B&B memory error (with feas.sol.). 分枝限定法の実行中に，options.maxmem で設定したメモリオーバーが起こり，実行を停止しましたが，実行可能解は得られています. [解出力あり]
44	(NUOPT 44) B&B memory error (no feas.sol.). 分枝限定法の実行中に，options.maxmem で設定したメモリオーバーが起こり，実行を停止しました. 実行可能解は得られていません [解出なし]
45	(NUOPT 45) B&B gap reaches under the limit. 上下界の差が options.gaptol または options.relgaptol で与えられたよりも小さくなりましたので，分枝限定法を停止します. [解出力あり]
47	(NUOPT 47) IntegerVariable 変数名 should be declared as "binary". 0-1 整数変数以外の整数変数が表れています. wcsp は一般の整数変数を扱うことができません. [解出力なし]
48	(NUOPT 48) Variable 変数名 appear in two selection (). 二つ以上の selection にまたがって現れている 0-1 整数変数が表れました. [解出力なし]
49	(NUOPT 49) Variable 変数名 is fixed to infeasible value. 0-1 整数変数が 0，1 以外の値に固定されました. [解出力なし]
50	(NUOPT 50) Both of two variables 変数名 1 and 変数名 2 cannot be 1. 変数名 1 と変数名 2 の両方は（単一の `selection` に現れているので）両方 1 になることができません. [解出力なし]

エラー番号	エラーメッセージ 説明
51	(NUOPT 51) 手法名 is currently not available without SIMPLE.
	wcsp は SIMPLE によって定義された問題に対してのみ有効です．[解出力なし]
52	(NUOPT 52) All variables in selection statement#数字 fixed to 0.
	対応する変数がすべて 0 に固定されているような `selection()` 文が「数字」番目に現れました．[解出力なし]
53	(NUOPT 53) Constraint 制約式名's weight is 値 should be -1 or non-negative value.
	重みとしては-1 もしくは非負の数を与えねばなりません．[解出力なし]
54	(NUOPT 54) Constraint 制約式名's weight is 値 should be -1 or non-negative value.
	重みとしては-1 もしくは非負の数を与えねばなりません．[解出力なし]
57	(NUOPT 57) You cannot use any method but "rcpsp" for model with Activity.
	Activity の定義があるにも関わらず，rcpsp 以外のメソッドを適用しようとしました．[解出力なし]
58	(NUOPT 58) You cannot use any method but "rcpsp" for model with ResourceRequire.
	ResourceRequire の定義があるにも関わらず，rcpsp 以外のメソッドを適用しようとしました．[解出力なし]
59	(NUOPT 59) You cannot use any method but "rcpsp" for model with ResourceCapacity.
	ResourceCapacity の定義があるにも関わらず，rcpsp 以外のメソッドを適用しようとしました．[解出力なし]
60	(NUOPT 60) You cannot use any method but "rcpsp" for model with tardiness and completionTime.
	目的関数が tardiness/completionTime に設定されているのにも関わらず，rcpsp 以外のメソッドを適用しようとしました．[解出力なし]
63	(NUOPT 63) You cannot use Variable for "rcpsp" .
	rcpsp は `Variable` は用いる事が出来ません．[解出力なし]
64	(NUOPT 64) You cannot use IntegerVariable for "rcpsp" .
	rcpsp は `IntegerVariable` は用いる事が出来ません．[解出力なし]
65	(NUOPT 65) failed to generate any initial solution
	rcpsp において初期解生成に失敗しました．[解出力なし]
66	(NUOPT 66) can't find feasible solution.
	rcpsp において実行可能解を得る事が出来ませんでした.[解出力なし]
67	(NUOPT 67) DiscreteVariable （変数名）'s bound: [a,b] and domain: {..} conflicts. (Regard Bound as a definition).
	`DiscreteVariable` の定義された範囲では満たすことのできない上下限があたえられました．[解出力なし]

エラー番号	エラーメッセージ 説明
70	(NUOPT 70) initial order is invalid between XX and YY . activities related imprecedene have to continue.
	rcpsp において初期解として不正な順番が与えられました. 直前先行制約に関係する Activity の順番は連続していなければなりません. [解出力なし]
71	(NUOPT 71) initial order is invalid. XX's order have to be previous to YY by way of precedence.
	rcpsp において初期解として不正な順番が与えられました. 先行関係がある Activity はその順番が守られなければなりません. [解出力なし]
72	(NUOPT 72) infeasible MIP (preprocess).
	前処理において実行可能解が無いと判定しました.
73	(NUOPT 73) Continuous Variable 変数名 cannot be included in model for wcsp.
	連続変数を含む問題を wcsp で解こうとしました. wcsp は連続変数を扱うことができません. [解出力なし]
81	(NUOPT 81) You cannot use any method but "wcsp" for model with DiscreteVariable.
	DiscreteVariable を含む問題に wcsp 以外の方法は適用できません. [解出力なし]
82	(NUOPT 82) Trust region too small
	関数の二次近似に失敗しつづけて信頼領域が小さくなりすぎましたので実行を停止します. [解出力あり]
83	(NUOPT 83) Some subproblems remain unsolved in B&B (with feas.sol.).
	分枝限定法で数値的理由によりいくつかの部分問題が解かれずに残りました. 実行可能解が出力されます. [解出力あり]
100	(NUOPT 100) Cannot open NUOPT License file: "XX".
	UNIX/Linux 版のライセンスファイルを開くことができません.
101	(NUOPT 101) Invalid License file: "XX".
	UNIX/Linux 版のライセンスファイルの内容に問題があります.
102	(NUOPT 102) Machine key(YY) not consistent to License file: "XX".
	UNIX/Linux 版のライセンスファイルがご利用のマシンと整合していません.
103	(NUOPT 103) License expired on XX days ago
	試用版の有効期間が終了しています.
104	(NUOPT 104) Invalid License limit
105	(NUOPT 105) Cannot get license information check machine configuration.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
110	(NUOPT 110) Internal error (dpotrf failed). 正定値で無い行列が与えられ，コレスキー分解に失敗しました．[解出力なし]
111	(NUOPT 111) Internal error (dpotrf failed). メリット関数計算時において，正定値でない行列が与えられ，コレスキー分解に失敗しました．[解出力なし]
112	(NUOPT 112) Internal error (dpotrs failed). 逆行列を求める計算に失敗しました．[解出力なし]
113	(NUOPT 113) Internal error (dsygst failed). 一般化固有値問題を標準固有値問題に変換する事ができませんでした．[解出力なし]
114	(NUOPT 114) Internal error (dsytrd failed). 三重対角化に失敗しました．[解出力なし]
115	(NUOPT 115) Internal error (dstebz failed). 最小固有値の導出に失敗しました．[解出力なし]
120	(NUOPT 120) Primal-dual gap is too large. 主双対ギャップが十分小さくならない内に，エラーが発生し計算を終了致しました．主問題・双対問題の実行可能解は満たされています．[解出力あり]
121	(NUOPT 121) Primal-dual gap is too large. 主双対ギャップが十分小さくならない内に，エラーが発生し計算を終了致しました．主問題の実行可能解は満たされています．[解出力あり]
122	(NUOPT 122) minus stepsize detected 正であるべきステップサイズに負の値が検出されました．解法を tipm に変更してお試しください．[解出力なし]
123	(NUOPT 123) The SDP constraint cannot be treated by specified algorithm. 半正定値制約が存在しますが，半正定値制約を解釈できるアルゴリズムが選択されていません．[解出力なし]
124	(NUOPT 124) No SDP constraint is detected. 半正定値計画法用のアルゴリズムが起動されましたが，半正定値制約が存在しません．[解出力なし]
132	(NUOPT 132) overflow wcsp の target や hard penalty の概算値，soft penalty の概算値が INT_MAX を超えてしまったことを表します．また変数の上下限が INT_MAX を超えていた際もこのエラーが出力されます．
133	(NUOPT 133) no feasible solution found wcsp が求解を行ったが制約を満たす解が得られなかったことを表します．

エラー番号	エラーメッセージ 説明
134	(NUOPT 134) hard penalty overflow
	wcsp 求解後の hard penalty が overflow していることを表します．正しく求解が行われている保証はありません.
135	(NUOPT 135) soft penalty overflow
	wcsp 求解後の soft penalty が overflow していることを表します．正しく求解が行われている保証はありません.
141	(NUOPT 141) mtxfree parameter error
	mtxfree のための求解オプションの設定に誤りがあります．nuopt.prm をご確認ください.
142	(NUOPT 142) mtxfree option is valid only for higher-order method
	mtxfree は higher order でのみ使うことができます.
143	(NUOPT 143) mtxfree failed to solve linear equations
	反復法で連立一次方程式が解けませんでした．メモリが十分にある場合は mtxfree を使用せずに求解してください．いくつかの求解オプションを調整することで解けるようになるかもしれません．詳細は nuopt-support@msi.co.jp にお問い合わせください.
144	(NUOPT 144) mtxfree cannot deal with free variables
	`mtxfree` では上限も下限も存在しない変数に対応していません．モデルを調整するか, `mtxfree` を使用せずに求解してください.
150	(NUOPT 150) asqp misapplied to nonconvex QP
	非凸二次計画問題に有効制約法が適用されようとしています.
151-165	（例）(NUOPT 156) irowA[0] = 9 should be in [1,3]
	`solveLP` や `solveQP` 実行時に与えた引数に問題があります．詳しくは「Numerical Optimizer/SIMPLE 外部接続マニュアル」をご覧ください.
166	(NUOPT 166) Access error in calling "XX(YY)". Argument should be in [0,ZZ] (index for variable)
167	(NUOPT 167) Access error in calling "XX(YY)". Argument should be in [0,ZZ] (index for constraint)
168	(NUOPT 168) Invalid [int/double/string] value 求解オプション値 for nuoptPrm options. 求解オプション名 .
	options. 求解オプション名 に誤った値が設定されています.
171	(NUOPT 171) upper or lower bound of integer variable is too large.
	整数変数の上限値もしくは下限値の絶対値が INT_MAX（int 型の最大値）を超えています.
172	(NUOPT 172) 手法名 is currently not available with SIMPLE.
	[手法名] は SIMPLE では利用することができません．[解出力なし]

エラー番号	エラーメッセージ / 説明
180	(NUOPT 180) Continuous Variable 変数名 cannot be included in model for wls.
	wls による求解時に連続変数が含まれている時に出力されます．[解出力なし]
181	(NUOPT 181) Unbounded Variable 変数名 cannot be included in model for wls.
	wls による求解時に上下限制約がない変数が含まれている時に出力されます．[解出力なし]
182	(NUOPT 182) no feasible solution found
	wls による求解時に制約を満たす解が得られなかったことを表します．[解出力なし]

A.2.2 求解オプションのエラー/警告メッセージ

nuopt.prm または options を用いた Numerical Optimizer の求解オプション設定のエラーです．

エラー番号	エラーメッセージ / 説明
1	(SOLVER OPTION 1) Syntax error in solver option file.
	求解オプションファイルの記述にエラーが検出されました．
2	(SOLVER OPTION 2) Solver option file is empty.
	求解オプションファイルが全く空になっています．
4	(SOLVER OPTION 4) Internal error [内部ルーチン名]
	求解オプションの解釈を行うルーチンにて内部エラーが発生しました（nuopt-support@msi.co.jp にご連絡ください）．

求解オプションファイルの記述にエラーが発生した場合（エラー番号 1）には求解オプションファイル読み込み部から標準出力に補助的なメッセージが表示されますので，併せて参考にしてください．

エラーのある求解オプションファイル：

```
begin
maximize
method:tipm
criteria:eps = 1.0e-8
```

標準出力：

```
<reading solver option file: nuopt.prm >
nuopt.prm:1:     begin
nuopt.prm:2:     maximize
nuopt.prm:3:     method:tipm
nuopt.prm:4:error: Unknown category     criteria:eps = 1.0e-8（行名が違う）
```

```
nuopt.prm:5:error: end command is needed.                    (end で終わっていない)
(SOLVER OPTION 1) Syntax error in solver option file.
```

A.2.3 MPS ファイルのエラー/警告メッセージ

エラー番号	エラーメッセージ 説明
1	(MPS FILE 1) Failed to open mps file: ファイル名. MPS ファイルのオープンに失敗しました.
2	(MPS FILE 2) Undefined row name: 行名. COLUMNS/RHS/RANGES セクションに未定義の行が現れました.
3	(MPS FILE 3) Internal error. 内部エラーが発生しました. （nuopt-support@msi.co.jp にご連絡ください.）
4	(MPS FILE 4) Syntax error in セクション名 section. 「セクション名」の示すセクションで文法エラーが発生しました.
5	(MPS FILE 5) Too many 'INTORG' markers. 'INTORG' マーカー行と'INTEND' マーカー行の対応が取れていません.（'INTORG' マーカー行が多すぎます.）
6	(MPS FILE 6) Too many 'INTEND' markers. 'INTORG' マーカー行と'INTEND' マーカー行の対応が取れていません.（'INTEND' マーカー行が多すぎます.）
7	(MPS FILE 7) Unknown marker: フィールド 3 の内容 'INTORG','INTEND' 以外のマーカー行が現れました. （Numerical Optimizer の MPS ファイル解釈部は'INTORG','INTEND' 以外のマーカー行を解釈しません.）
8	(MPS FILE 8) Undefined row: 行名 in HESSIAN section. HESSIAN セクションの二次の項を付加する行名として，定義されていないものが現れました.
9	(MPS FILE 9) Undefined column: 変数名 in HESSIAN section. HESSIAN セクションの非零要素の場所を示す際の変数名として，定義されていないものが現れました.
10	(MPS FILE 10) row: 行名 appeared more than once. ROWS セクションに同一の行名が二度以上現れました.
11	(MPS FILE 11) Specified bound: BOUND データラベル not found. 求解オプションファイルで指定された（mpsfile: bound = BOUND データラベル）ラベルを持つ BOUNDS データが MPS ファイルには存在しません.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
12	(MPS FILE 12) Specified objective: 目的関数行名 not found. 求解オプションファイルで指定された（mpsfile: objective = 目的関数行名）名前を持つ目的関数行が MPS ファイルには存在しません.
13	(MPS FILE 13) Specified rhs: RHS データラベル not found. 求解オプションファイルで指定された（mpsfile: rhs = RHS データラベル）ラベルを持つ RHS データが MPS ファイルには存在しません.
14	(MPS FILE 14) Range data: RANGE データラベル contains unsuitable row. 「RANGE データラベル」を持つ RANGE データが目的関数行に対しての指定を行っています.
15	(MPS FILE 15) Specified range data: RANGE データラベル not found. 求解オプションファイルで指定された（mpsfile: range = RANGE データラベル）ラベルを持つ RANGE データが MPS ファイルには存在しません.
17	(MPS FILE 17) Undefined column name: 変数名 in INITIAL section. INITIAL セクションに定義されていない変数名が現れました.
18	(MPS FILE 18) Bound spec. on column : 変数名 should appear earlier. （警告）「変数名」に関する上下限設定の現れるのはより前でなければなりません.（最初に発見されたものに対してのみこのメッセージが出力されます.）
19	(MPS FILE 19) 数字 column(s) appeared disorderly in BOUNDS section （警告）BOUNDS section において「数字」個の変数の現れる順番が違法です.（エラー 18 と組になって出力されます.）
20	(MPS FILE 20) Memory allocation error. ファイルの読み込み時にメモリエラーが発生しました.
21	(MPS FILE 21) Undefined column name: 変数名 in BOUNDS section. BOUNDS section において定義されていない変数名が現れました.
22	(MPS FILE 22) Hessian is implicitly bound for hlinexistent objective. HESSIAN セクションでは暗黙のうちに（行名を指定せず）目的関数に対して二次の項が設定されていますが，MPS ファイルには全く目的関数が存在しません.
23	(MPS FILE 23) Same bound spec. on column: 変数名 appeared more than once. BOUNDS section で「変数名」に関して同一の制約指定が二度以上行われました.
24	(MPS FILE 24) Column : 変数名 has bound specification FX and other. BOUNDS section で「変数名」に関して FX 制約と他の制約指定が同時に行われました.
25	(MPS FILE 25) Column : 変数名 has bound specification FR and other. BOUNDS section で「変数名」に関して FR 制約と他の制約指定が同時に行われました.
26	(MPS FILE 26) Column : 変数名 has bound specification LO and MI. BOUNDS section で「変数名」に関して LO 制約と MI 制約指定が同時に行われました.

エラー番号	エラーメッセージ / 説明
27	(MPS FILE 27) Column : 変数名 has bound specification UP and PL.
	BOUNDS section で「変数名」に関して UP 制約と PL 制約指定が同時に行われました.
28	(MPS FILE 28) Unknown bound specification フィールド 1 の内容
	BOUNDS セクションに LO, LI, UP, UI, BV, PL, MI, FR, FX 以外のラベルが現れました.
29	(MPS FILE 29) row : 行名 appreaed more than once in セクション名 section.
	RHS セクションおよび RANGE セクションにおいて同一の行名が二度以上現れました.
30	(MPS FILE 30) Unsupported section. フィールド 1 の内容
	未対応のセクション名が現れました.
31	(MPS FILE 31) Bound of column 列名 infeasible.
	列名に対する境界条件が実行不可能です.
32	(MPS FILE 32) Invalid mps file.
	その他の理由で読み込むことができないファイルです.

A.2.4 LP ファイルのエラー/警告メッセージ

エラー番号	エラーメッセージ / 説明
1	(LP FILE 1) Failted to open lp file : ファイル名.
	ファイルのオープンに失敗しました.
2	(LP FILE 2) Memory allocation error.
	ファイルの読み込み時にメモリエラーが発生しました.
3	(LP FILE 3) Internal error.
	内部エラーが発生しました.（nuopt-support@msi.co.jp にご連絡ください.）
4	(LP FILE 4) Syntax error.
	構文エラーが見つかりました.
5	(LP FILE 5) Non-ascii char appeared.
	非 ASCII 文字が現れました.
6	(LP FILE 6) The order of sections is wrong.
	セクションの記述順が間違っています.
7	(LP FILE 7) Variable 変数名 appeared more than once in 式名.
	同一の変数が一つの式に二度以上現れました.
8	(LP FILE 8) Term 変数名 * 変数名 appeared more than once in 式名.
	同一の項が一つの式に二度以上現れました.
9	(LP FILE 9) Undefined variable name : 変数名.
	未定義の変数名が現れました.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
10	(LP FILE 10) Lower/Upper bound of variable 変数名 appeared more than once. 同一の変数に対する境界条件が二度以上現れました.
11	(LP FILE 11) Bound of variable 変数名 is infeasible. 変数について矛盾した境界条件が与えられました.
12	(LP FILE 12) Length of name 名前... is too longer. 変数や式の名前が長すぎます.（255 文字までです.）
13	(LP FILE 13) セクション名 section unsupported. 未対応のセクション名が現れました.
14	(LP FILE 14) general/integer/binary section appeared more than once. 同一のセクションが二度以上現れました.
15	(LP FILE 15) Invalid lp-format. 対応できないファイルです.

A.3 mknuopt のエラー/警告メッセージ

次の表はモデルファイルのビルド時のエラー/警告メッセージ一覧です.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
1	(MKNUOPT 1) モデルファイルが空です. 与えられたモデルファイルにモデル記述がありません.
2	(MKNUOPT 2) 文法エラーがありました. 与えられたモデルファイルに文法エラーがありました.
3	(MKNUOPT 3) 〜 の宣言で 〜 が重複しています. SIMPLE オブジェクトの宣言時に name などが 2 回以上指定されました.
4	(MKNUOPT 4) 予期しないトークン "〜" です. 文法上正しくないトークンが現れました.
5	(MKNUOPT 5) 〜 に対応する閉括弧がありません. 開括弧に対応する閉括弧がありません.
6	(MKNUOPT 6) モデルファイルに利用できない文字を含んでいます. モデルファイル名に使用できない文字を含んでいます.
7	(MKNUOPT 7) 〜 と同じ名前の SIMPLE 型変数が複数回宣言されています. 同じ名前の SIMPLE オブジェクトが複数回宣言されました.
8	(MKNUOPT 8) Variable 〜 の宣言で type=binary となっています. 連続変数 Variable の宣言で type = binary と指定されました.
9	(MKNUOPT 9) 〜 と同じ name の SIMPLE 型変数が複数回宣言されています. 同じ name の SIMPLE オブジェクトが複数宣言されました.

エラー番号	エラーメッセージ 説明
10	(MKNUOPT 10) 〜 の宣言で name に不正な文字が含まれています :
	SIMPLE オブジェクトの name に不正な文字が含まれています．name には，「¥」「"」「,」を使うことはできません.
11	(MKNUOPT 11) 〜 の宣言で 〜 が不定です.
	SIMPLE オブジェクトの宣言時に name などが = 指定されずに現れました.
12	(MKNUOPT 12) SIMPLE 型のポインタを宣言しています.
	SIMPLE 型オブジェクトのポインタを宣言しています.
13	(MKNUOPT 13) 〜 の宣言で name がリテラルではありません.
	SIMPLE オブジェクトの宣言時に指定された name が文字列リテラルではありません.

付録 B Numerical Optimizer アルゴリズム概説

B.1 内点法

B.1.1 問題

次の最適化問題

$$\begin{aligned} &\text{最小化} \quad f(x), && x \in R^n, \\ &\text{条　件} \quad g(x) = 0, && x \geq 0 \end{aligned}$$

を考えます[9]．ここで，変数 $x = (x_1, \cdots, x_n)^t$ は n 次元ベクトルで，関数 f は目的関数です．また，$g : R^n \to R^m$ は m 次元のベクトル値関数です．この問題のラグランジュ関数を

$$L(x, y, z) = f(x) - y^t g(x) - z^t x$$

としたとき，Karush-Kuhn-Tucker（KKT）条件（最適性の一次の必要条件）は次式で与えられます：

$$\begin{aligned} \nabla_x L(x, y, z) &= 0, \\ g(x) &= 0, \\ XZe &= 0, \quad x \geq 0, z \geq 0. \end{aligned}$$

ただし，$X = diag(x_1, \cdots, x_n) \in R^n, Z = diag(z_1, \cdots, z_n) \in R^n, e = (1, \cdots, 1)^t \in R^n$ です．ここで，相補性条件 $XZe = 0$ を $XZe = \mu e$（$\mu > 0$）で置き換えたものを修正 KKT 条件と呼びます．

Numerical Optimizer ではバリヤペナルティ関数：

$$F(x, z) = f(x) - \mu \sum_{i=1}^{n} \log(x_i) + \rho \sum_{i=1}^{m} |g_i(x)| + \upsilon \left(x^T z - \mu \sum_{i=1}^{n} \log(x_i z_i) \right)$$

をメリット関数として採用します．ここで，$\mu > 0$ はバリヤパラメータ，$\rho > 0$ はペナルティパラメータ，$\upsilon > 0$ は主双対項の考慮度合いを表すパラメータです．

非線形最適化問題に対する内点法では，「修正 KKT 条件を満たす点を求めて，修正 KKT 条件を更新する」という作業を逐次行います．この際に，メリット関数 $F(x, z)$ の一次近似 $F_l(x, z)$ あるいは二次近似 $F_q(x, z)$ の変化量が重要な手がかりとなります[10]．次項以降で示すように，修正 KKT 条件を求める方法は複数存在します（直線探索を利用する方法・信頼領域を利用する方法）．

この作業を通して，最終的に元来の KKT 条件を満たす点を求めます．

---

[9] ここでは，説明の便宜上このような形式を考えますが，Numerical Optimizer では制約関数に上下限が存在する場合，等式条件，変数に上下限が存在する場合などの一般形を扱うことができます．また，制約条件が存在しない問題も扱うことができます．

[10] 詳細は論文 [13][14][15] を参照

B.1.2 直線探索を利用する方法

修正 KKT 条件に対するニュートン法は次のようになります.

$$\begin{bmatrix} G + X^{-1}Z & -A^t \\ -A & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_N \\ \Delta y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_L - X^{-1}r_C \\ r_E \end{bmatrix},$$

$$\Delta z_N = -X^{-1}Z\Delta x_N - X^{-1}r_C.$$

ここで, $(\Delta x_N, \Delta y_N, \Delta z_N)$ は各変数に対する探索方向ベクトルで, G はラグランジュ関数のヘッセ行列あるいはその近似行列です. このとき,「ρ が十分大きく, G が半正定値行列である場合 $\Delta F_l(x, z, \Delta x_N, \Delta z_N) < 0$ である」という性質が成り立ちます.

この性質を利用して, 直線探索を利用して大域的に収束するアルゴリズムを構築することができます. 主双対変数に対するステップ幅 α は以下のように計算されます. まず, 次の三式から α の上限値 $\alpha_{\max}$ を求めます.

$$\alpha^x{}_{\max} = \min_i \left\{ \frac{-x_i}{(\Delta x_N)_i} \mid (\Delta x_N)_i < 0 \right\},$$

$$\alpha^z{}_{\max} = \min_i \left\{ \frac{-z_i}{(\Delta z_N)_i} \mid (\Delta z_N)_i < 0 \right\},$$

$$\alpha_{\max} = \min\{\alpha^x{}_{\max}, \alpha^z{}_{\max}\}$$

次に,

$$\alpha = \bar{\alpha}\beta^l, \quad \bar{\alpha} = \min\{\gamma\alpha_{\max}, 1\}$$

と定義します. ここで, $\gamma \in (0,1), \beta \in (0,1)$ です. そして, l は

$$F(x + \bar{\alpha}\beta^l\Delta x_N, z + \bar{\alpha}\beta^l\Delta z_N) - F(x,z) \le \varepsilon_0\bar{\alpha}\beta^l\Delta F_l(x, z, \bar{\alpha}\beta^l\Delta x_N, \bar{\alpha}\beta^l\Delta z_N)$$

をみたす最小の正整数として定義されます[11]. $\varepsilon_0 \in (0,1)$ です.

このように, 各種パラメータを適切に設定すれば, メリット関数 $F(x,z)$ が確実に減少するような探索方向ベクトル $(\Delta x_N, \Delta y_N, \Delta z_N)$ 及びステップ幅 α を定める事ができます. ここからアルゴリズムの大域的収束性が保証されます.

ラグランジュ関数のヘッセ行列が非負定値となるのは

- 線形計画問題（ヘッセ行列は 0）
- 一般の凸計画問題

です. また, 一般の非線形計画問題ではヘッセ行列を準ニュートン法で近似することによって行列 G を常に正定値に保つことができます. 従って, このような場合に直線探索を利用した手法を使用することができます.

B.1.3 信頼領域を利用する方法

行列 G が非負定値でないとき直線探索法を利用することは困難です. そこで, G が不定であるとき

[11] この一連のステップ幅の設定ルールを Armijo's Rule と呼びます.

も利用できる方法として主双対変数に対する信頼領域法を採用します．このとき，探索方向ベクトル w，サイズ $\delta > 0$，ステップ幅 α は次のような関係を満たします．

$$\|w\| \le \delta,$$
$$\alpha \le \min\left\{\frac{\delta}{\|w\|}, \gamma\alpha_{\max}\right\}$$

$\alpha_{\max}$ の導出方法は「直線探索を利用する方法」同様です．信頼領域のサイズ調整は通常の方法で行います．

大域的収束性を得るために基準となる最急降下方向ベクトル $(\Delta x_{SD}, \Delta y_{SD}, \Delta z_{SD})$ を

$$\begin{bmatrix} D + X^{-1}Z & -A^t \\ -A & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \Delta x_{SD} \\ \Delta y_{SD} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_L - X^{-1}r_C \\ r_E \end{bmatrix},$$
$$\Delta z_{SD} = -X^{-1}Z\Delta x_{SD} - X^{-1}r_C,$$

によって定義します．ここで $D > 0$ は対角行列です．α^* を方向 Δ_{SD} に沿って信頼領域で与えられる区間内で，メリット関数変化量の二次近似 $\Delta F_q(x, z, \Delta x, \Delta z)$ を最小化するステップ幅として定義します．

$$\alpha^* = \arg\min\{\Delta F_q(x, z, \alpha\Delta x_{SD}, \alpha\Delta z_{SD}) \mid \|\alpha(\Delta x_{SD} + \Delta z_{SD})\| \le \delta, \alpha \in [0, \bar{\alpha}]\}$$
$$\bar{\alpha} = \min\{1, \gamma\alpha_{\max}\}, \gamma \in (0, 1),$$

信頼領域のステップ幅 α は以下の条件をみたすように設定します．

$$\Delta F_q(x, z, \alpha\Delta x, \alpha\Delta z) \le \frac{1}{2}\Delta F_q(x, z, \alpha^*\Delta x, \alpha^*\Delta z) < 0,$$
$$\|\Delta x_{Nk}\| \le M\|\Delta x_{SDk}\|,$$
$$\|\Delta z_{Nk}\| \le M\|\Delta z_{SDk}\|$$

「信頼領域を利用する方法」では探索方向ベクトル $(\Delta x, \Delta z)$ は

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta z \end{pmatrix} = \nu\begin{pmatrix} \Delta x_{SD} \\ \Delta z_{SD} \end{pmatrix} + (1 - \nu)\begin{pmatrix} \Delta x_N \\ \Delta z_N \end{pmatrix},$$

として計算されます．ここで，パラメータ $\nu \in [0, 1]$ は $\nu = 0, 0.1, 0.2, \cdots, 0.9, 1.0$ の中で条件：

$$\Delta F_q(x, z, \alpha\Delta x, \alpha\Delta z) \le \frac{1}{2}\Delta F_q(x, z, \alpha^*\Delta x, \alpha^*\Delta z) < 0$$

をみたす最小の数です．このように，「信頼領域を利用する方法」では探索方向ベクトルの設定に異なる二方向 $(\Delta x_{SD}, \Delta z_{SD})$，$(\Delta x_N, \Delta z_N)$ を利用します．この結果，大域的収束性が保証されます．

B.1.4 線形計画問題専用内点法

問題が線形の場合，KKT 条件

$$\nabla_x L(x, y, z) = 0,$$

$$g(x) = 0,$$
$$XZe = 0 \tag{1}$$

の第 1 式，第 2 式は線形であり，非線形なのは第 3 式のみとなります．この方程式系に関するステップ幅 1 のニュートン法を適用すると線形な式の残差は原理的に零になり，非線形な第 3 式のみに

$$\Delta X_N \cdot \Delta Z_N e$$

なる形の残差が現れます（ΔX_N，ΔZ_N はニュートン法のステップ方向を対角に並べた行列）．この式にこの残差が発生することを見越してニュートン法のステップ方向を修正する（高次方向（Higher Order）の修正を加える）ことによって，より良いステップ方向を得ることができます．ニュートン法のステップ方向修正分を計算するためにはニュートン法のステップ方向の計算時に得られる副産物を有効に利用できるため，少ない計算コストでニュートン方向を改善することができ，計算を効率化することができます．

Numerical Optimizer にはこのことを利用し，さらに問題が線形であることに特化したチューニングを加えた手法が組み込まれています．

B.1.5 半正定値計画問題専用内点法

次の最適化問題

$$\begin{array}{lll} \text{最小化} & f(x) & x \in R^n, X \in S^p \\ \text{条件} & g(x) = 0, X_0(x) = X, & x \geq 0, X \geq 0 \end{array}$$

を考えます．ここで, 変数 $x = (x_1, \cdots, x_n)^t$ は n 次元ベクトルで, 関数 f は目的関数です．また, $g : R^n \to R^m$ は m 次元のベクトル値関数です．変数 X は p 次元対称正方行列で，$X \geq 0$ は行列 X の半正定値制約を意味するものとします．$X_0 : R^n \to S^p$ は n 次元ベクトルを対称正方行列空間に写す写像です．問題が線形の場合，X_0 は $X_0(x) = \sum_{i=1}^{n} A_i x_i - B$ と表現しても構いません．

この問題のラグランジュ関数を $w = (y, Y, Z)$ として

$$L(w) = f(x) - y^T g(x) - \langle X_0(x) - X, Y \rangle - \langle X, Z \rangle$$

としたとき，Karush-Kuhn-Tucker(KKT) 条件（最適性の一次の必要条件）は次式で与えられます：

$$\nabla_x L(w) = \nabla f(x) - \nabla g(x)^T \Delta y - A^*(x) Z = 0$$
$$\nabla_X L(w) = Y - Z = 0$$
$$g(x) = 0$$
$$X_0(x) - X = 0$$
$$X \circ Z = 0, X \geq 0, Z \geq 0$$

ここでは，$A_i(x) = \dfrac{\partial X_0(x)}{\partial x_i}$，$A^*(x)Z = \begin{pmatrix} \langle A_1, Z \rangle \\ \cdots \\ \langle A_n, Z \rangle \end{pmatrix}$，$X \circ Z = \dfrac{1}{2}(XZ + ZX)$ であるものとします．

Numerical Optimizer では，この KKT 条件を満たす点を，Newton 法を利用して反復解法で求めます．

線形な半正定値計画問題の場合，大域的収束性は保証されますが，そうでない問題を扱う場合，大域的収束を保証するには，メリット関数を定義する必要があります．

非線形半正定値計画問題を扱う場合，バリヤペナルティ関数：

$$F(x,X,Z) = F_{BP}(x,X) + \nu F_{PD}(x,X,Z)$$

$$F_{BP}(x,X) = f(x) - \mu \log(\det X) + \rho\|g(x)\|_1 + \rho'\|X_0(x) - X\|_1$$

$$F_{PD}(X,Z) = \langle X,Z\rangle - \mu \log(\det X \det Z)$$

をメリット関数として採用します．ここで，$\mu > 0$ はバリヤパラメータ，$\rho, \rho' > 0$ はペナルティパラメータ，$\nu > 0$ は主双対項の度合いを表すパラメータです．

探索方向を求める Newton 方程式は以下のように記述されます．

$$\begin{pmatrix} G+H & -\nabla g(x) \\ -\nabla g(x)^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \nabla f(x) - \nabla g(x)^T y - \mu A^*(x) X^{-1} + A^*(x)(ZX_0X^{-1} - Z) \\ g(x) \end{pmatrix}$$

$$\Delta X = X_0(x + \Delta x) - X$$

$$\Delta Z = \mu X^{-1} - Z - \frac{1}{2}(Z\Delta X X^{-1} + X^{-1}\Delta X Z)$$

ここでは，$H_{ij} = \langle A_i, X^{-1}A_j Z\rangle$ であるものとします．A_i, A_j の構造に応じて H_{ij} を計算する方法は異なります．

修正 KKT 条件を満たす点を逐次求め反復するという枠組み自体は，一般の非線形用内点法と同等です．Newton 方程式を解く際には，探索方向を対称化するため，KSH 方向へのスケーリングを行っています．

問題が非凸な場合，大域的収束性を確保するための工夫が必要になります．Numerical Optimizer では信頼領域法に基づく方法を利用する場合，大域的収束を保証する方向と，局所的収束に有利な方向を混ぜ合わせて探索方向を決定します．

B.2 単体法・有効制約法

単体法は線形最適化問題

$$\begin{aligned} &\text{最小化} \quad c^t x && x \in R^n \\ &\text{条　件} \quad b_U \geq Ax \geq b_L \end{aligned}$$

に対して，有効制約法は二次計画問題

$$\begin{aligned} &\text{最小化} \quad \frac{1}{2}x^t Q x + c^t x && x \in R^n \\ &\text{条　件} \quad b_U \geq Ax \geq b_L \end{aligned}$$

に対して，それぞれ有効な方法です．一度可能基底解が得られれば，問題に対して小さな変更を行った際の解を比較的高速に求めることができるなど，内点法にはない特徴を備えています．

B.2.1 改訂単体法

Numerical Optimizer に実装されている単体法は大規模問題用の改訂単体法と呼ばれる手法です．単

体法自身に関する解説は例えば [3] を参照してください.

B.2.2 有効制約法

Numerical Optimizer に実装されている有効制約法は改訂単体法に基づいています．有効制約法に関する解説は例えば [12] を参照してください．この手法は 5 千変数以上の大規模問題では，一般に内点法（直線探索法（Line Search Method））に劣りますが,

- 変数に比べて制約式の数が非常に少ない（1/10 以下）場合
- 目的関数のヘッセ行列が密行列である場合

には内点法よりも高速かつ高精度です.

B.2.3 分枝限定法

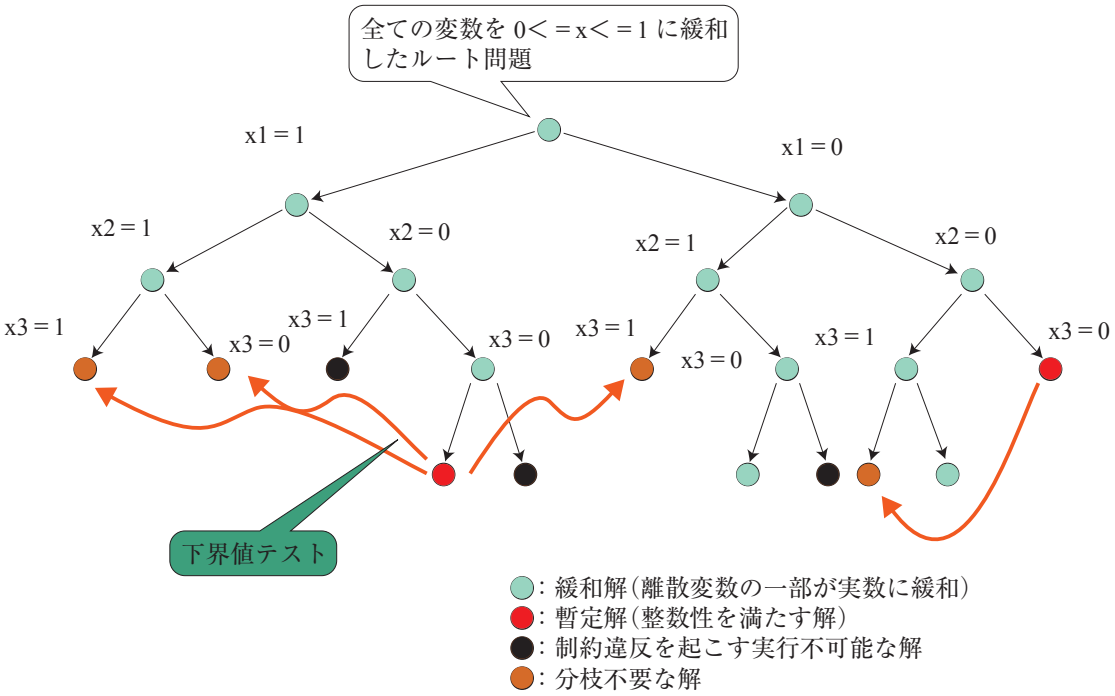
Numerical Optimizer は，整数変数を含む線形/二次計画問題に対して以下のアルゴリズムが指定された場合，分枝限定法と呼ばれるアルゴリズムを用います.

- 単体法 （options.method = "simplex"）
- 有効制約法（options.method = "asqp"）

分枝限定法とは一般に元の問題の制約を一部緩和した問題（緩和問題）を繰り返し解くことにより厳密解を求めるアルゴリズムです．特に整数計画問題に適用される場合，緩和問題は整数変数を連続変数に緩和した問題（連続緩和問題）を考えます.

ここでは 0-1 整数変数を含む線形計画問題（目的関数を最小化する）の例を説明します．0-1 整数変数は連続緩和すると上限値が 1，下限値が 0 となる連続変数になることにご注意ください.

分枝限定法では緩和問題の解から整数になっていない変数を一つ選択し，0 または 1 に固定する，という操作（分枝操作）を行います．この過程は次の図のような木（分枝木）の形に表すことができ，整数制約を満たす解はこの木の「葉」の部分（図の下側の先端部分）に現れます.



しかしながら，分枝操作だけでは「葉」が整数変数の数に対して指数的に増える可能性があり，現実的な規模の問題に対して効率の良い解法となりません．このため分枝限定法は，分枝木の「分枝するごとに緩和問題の目的関数値が同じあるいは増大する」という性質を用いて枝の削減を行います（限定操作）．具体的には，分枝時に緩和解がその時点で知られている暫定解（整数性を満たす解）よりも目的関数値が大きければ，それ以上分枝する必要がありません．例えば緩和解の目的関数値が 11 で，暫定解として 10 が得られていればそれ以上分枝して探索する必要がありません（上の図の橙色の解に相当）．分枝限定法はこのような分枝操作と限定操作を繰り返し最適解を得るアルゴリズムです．

Numerical Optimizer は更なる工夫により分枝限定法を高速化しています．

ヒューリスティクス

通常の分枝限定法では緩和解が整数性を満たす時のみ暫定解が得られます．Numerical Optimizer ではそれに加え，実行可能解探索を別のロジックで行うことにより効率よく暫定解を求めます．例えばヒューリスティクス RINS では，緩和解と暫定解を比較し，共通して整数となっている変数は固定し，解が非共通の変数を非固定にした状態で分枝限定法を新たに解くことで，実行可能解を得ようとします．

切除平面

整数計画問題では，整数性を考慮することにより「切除平面」と呼ばれる制約式を生成できます．この制約式を元の制約式に付与すると緩和解が改善するため，分枝木を小さくできます．ただし緩和問題のサイズは大きくなるため，トレードオフの調整が必要です．

前処理

整数計画問題は，最初の緩和問題を解く前に「前処理」により問題変換あるいは問題削減を行います．例えば「検針（ probing ）」と呼ばれる操作は 0-1 変数を 0 あるいは 1 に固定しそこから実行不可能性が導かれるのであればどちらかに固定します．

これらの手法の具体的な求解オプションの設定方法については「整数計画法（simplex/asqp）に有効

な求解オプション」の項に解説があります.

B.2.4 並列分枝限定法

並列分枝限定法では「Supervisor」および「Worker」と呼ばれる役割が協調して処理を行います [17]. Supervisor は並列化動作を統制し，Worker は与えられたタスクを処理します.

Numerical Optimizer は次の 3 つの並列分枝限定法を提供しています.

1. Racing（デフォルト）
2. Deterministic Racing
3. Subtree

Racing と Subtree は [18] を参考にしています.

Racing

Racing は複数の Worker が同一の整数計画問題を並行して解く手法です．各 Worker では異なる求解オプションが設定されています．同一の問題を解くため，冗長な計算を多く含みますが，デフォルトの求解オプションでは発見することが容易でない解を得ることができます．短時間で優良な解を得ることが重視される場合に有効な手法です．非決定性並列処理のため，同じ計算環境かつ同じ入力データであっても，異なる計算プロセスを経る可能性があります.

Deterministic Racing

Deterministic Racing は Racing に決定性を持たせた手法です．ここで言う決定性とは，同じ計算環境かつ同じ入力データであれば同じ結果が得られる（同じ計算プロセスを経る）ことを意味します.

デバッグやテストがしやすく，システムの計算エンジンとして利用するなど，より安定的に利用したい場合に有効です．注意点として決定性を持たせている分計算性能が犠牲になっているため，問題によっては通常の分枝限定法よりも遅くなるケースがあります．また，計算性能はスレッド数を多くするほど悪化する可能性があるため，適切なスレッド数を事前に調べておくことが重要です.

Subtree

Subtree は並列に分枝木を探索する手法です．Racing と比べると探索の効率が良く，小から中規模の問題で最適解が必要となる場合に有効です．注意点として大規模な問題（特に分枝限定法の前処理や単体法に時間がかかる問題）を本手法で解かせると，他の Worker に探索させる分枝木のルート問題の生成に時間がかかるため，通常の分枝限定法よりも遅くなる可能性があります．このような問題の場合は Subtree よりも Racing が推奨されます.

並列分枝限定法を実行する際の求解オプションについては「整数計画法（simplex/asqp）に有効な求解オプション」の項に解説があります.

B.3 逐次二次計画（SQP）法

逐次二次計画法では，次のような等式・不等式制約つきの非線形最適化問題の解を求めることがで

きます[12].

$$\begin{aligned} \text{目的関数} \quad & f(x) \quad \rightarrow \quad \text{最小化} \\ \text{制約条件} \quad & g_j(x) = 0, j \in J_E \\ & g_j(x) \geq 0, j \in J_I \end{aligned}$$

SQP 法とは，元の問題を現在の反復点において二次計画問題で近似し，その二次計画問題の解を探索方向としながら解を求める手法です．Numerical Optimizer では三通りの SQP 法を用いることができます．以下，それらについて説明します．なお，説明で用いる k は反復の回数を表します．

B.3.1 準ニュートン法を用いる方法

本手法では，元の問題を次のような二次計画問題で近似します．

$$\begin{aligned} \text{目的関数} \quad & \frac{1}{2}\Delta x^T B_k \Delta x + \nabla f(x_k)^T \Delta x \quad \rightarrow \quad \text{最小化} \\ \text{制約条件} \quad & g_j(x_k) + \nabla g_j(x_k)^T \Delta x = 0, j \in J_E \\ & g_j(x_k) + \nabla g_j(x_k)^T \Delta x \geq 0, j \in J_I \end{aligned}$$

ここで B_k は元の問題のラグランジュ関数のヘッセ行列を準ニュートン法によって近似した行列です．この問題の解 Δx を探索方向とし，直線探索を行って，次の反復点を定める方法となります．

B.3.2 信頼領域法を用いる方法

本手法では，二つの二次計画問題を解くことで点列を生成していきます．まず，一つ目の二次計画問題は次の通りです．

$$\begin{aligned} \text{目的関数} \quad & \frac{1}{2}(\Delta x_k^{SD})^T D_k \Delta x_k^{SD} + \nabla f(x_k)^T \Delta x_k^{SD} \quad \rightarrow \quad \text{最小化} \\ \text{制約条件} \quad & g_j(x_k) + \nabla g_j(x_k)^T \Delta x_k^{SD} = 0, j \in J_E \\ & g_j(x_k) + \nabla g_j(x_k)^T \Delta x_k^{SD} \geq 0, j \in J_I \end{aligned}$$

ここで D_k とは，要素が正の値であるような対角行列とします．この問題の解 Δx_k^{SD} は，本手法に大域的収束性を与える上で大きな役割を果たします．

この問題の解を求めたとき，効いている制約の集合を J_A^k とします．すなわち

$$J_A^k = \{j \in J_E \cup J_I \mid g_j(x_k) + \nabla g_j(x_k)^T \Delta x_k^{SD} = 0\}$$

となります．このとき，もう一つの二次計画問題は次のように定められます．

$$\begin{aligned} \text{目的関数} \quad & \frac{1}{2}(\Delta x_k^N)^T G_k \Delta x_k^N + \nabla f(x_k)^T \Delta x_k^N \quad \rightarrow \quad \text{最小化} \\ \text{制約条件} \quad & g_j(x_k) + \nabla g_j(x_k)^T \Delta x_k^N = 0, j \in J_A^k \end{aligned}$$

ここで G_k は元の問題のラグランジュ関数のヘッセ行列です．この問題の解 Δx_N は，反復点が元の問題の解に近づいたときに速い収束をするための方向になっています．また，この問題の KKT 条件は，

[12]内点法の説明の箇所でも説明しましたが，ここに挙げた数理計画問題の定式化はアルゴリズム説明のために挙げた一例であり，Numerical Optimizer は変数の上下限制約などを含んだより一般的な問題を扱うことができます．

次のように線形方程式系として表すことができます.

$$\begin{pmatrix} G_k & -\nabla g_{J_A^k}(x_k) \\ \nabla g_{J_A^k}(x_k)^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_k^N \\ y_{k+1,J_A^k}^N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\nabla f(x_k) \\ -g_{J_A^k}(x_k) \end{pmatrix}$$

ここで，$y_{k+1,J_A^k}^N$ はこの問題の制約条件に対するラグランジュ乗数とします．一般に，問題規模が同程度であれば，線形方程式系は二次計画問題に比べ速く解くことができるので，この問題に対する計算コストは，先程の Δx_{SD} を求める問題と比べて小さいものと考えることができます.

本手法では，Δx_{SD} と Δx_N の凸結合

$$\Delta x_k(\nu_k) = \nu_k \Delta x_k^{SD} + (1-\nu_k)\Delta x_k^N$$

を探索方向とし，定められた信頼領域の中を探索し，次の反復点を生成します.

B.4 制約充足問題ソルバ wcsp

このアルゴリズムは離散変数，0-1 整数変数を変数とした制約充足問題：

$$\begin{aligned} &\text{変数} \quad x_j \in X_j, && j = 1, \cdots, n \\ &\text{条件} \quad c_i^U \geq g_i(x_1, \cdots, x_j, \cdots, x_n) \geq c_i^L, && i = 1, \cdots, m \end{aligned}$$

をメタヒューリスティクスの解法の一つであるタブー・サーチを用いて解くものです．ここで，X_j は各変数の定義域に対応する有限集合です.

本アルゴリズムは，各制約の違反量の合計を最小化する問題を解きます．近似解法であるため，制約式をすべて満たす解が存在しない場合でもできるだけ制約を満たす解を得ることができます．各制約の違反量の合計を計算する際，各制約の違反量には「重み」と呼ばれる正の定数を掛けて合算します.

この際，重みの大きな制約式は優先的に満たされるように解の探索が行われます.

重要度の高い制約式の重みを大きくすることで，より有用な解が期待できます.

制約には重みを ∞ として設定することもできます．このように設定された制約は，何よりも優先して満たすべき制約として扱われます．重みが ∞ に設定されたものをハード制約，正の有限の値に設定されたものをソフト制約と呼びます.

制約の他に最大化，最小化すべき目的関数 $f(x_1, \cdots, x_j, \cdots, x_n)$ を定義することもできますが，その際には目標値 μ を定めて

- 最小化問題であれば $\mu - f(x) \geq 0$
- 最大化問題であれば $f(x) - \mu \geq 0$

というソフト制約を定義して目的関数を扱います．つまり，目的関数自身も，あくまで満たすべき制約式のひとつとして扱われるため，目的関数に対しても重みを設定する必要があります.

制約充足問題ソルバは，以下のいずれかの条件を満たせば停止します.

1. すべてのハード制約およびソフト制約を満たす解が求まった（目的関数に関しては目標値を満たす解が求まった）
2. 反復回数が指定の上限を超えた
3. 計算時間が指定の上限を超えた

4. ユーザが停止を命じた

本アルゴリズムは，京都大学「問題解決エンジン」グループの開発によるものです．詳細については [9], [10] をご参照ください．

B.5　タブー・サーチによる資源制約スケジューリング問題解法

このアルゴリズムは以下の資源制約付きスケジューリング問題:

- 限られた資源の下，仕事の処理に用いる資源の分配，作業の開始時刻を決定する

をタブー・サーチを用いたリストの探索を用いて解くものです．

アルゴリズムは wcsp と同じ京都大学「問題解決エンジン」グループによるものです．詳細については [16] をご覧ください．

B.6　重み付き局所探索法 WLS

このアルゴリズムは整数変数を変数とした最適化問題を局所探索により近似的に解くものです．目的関数が二次関数や線形関数である整数計画問題を扱うことができます．近似解法のため得られた解の最適性の保証はありません．

本アルゴリズムは各制約式に疑似的に「重み」をもたせ，制約違反量の合計を目的関数と合わせて最小化します．

WLS の対象となる問題を以下のように定義します．

$$
\begin{aligned}
\text{minimize} \quad & c^\top x + \frac{1}{2} x^\top Q x \\
\text{subject to} \quad & \sum_{j \in N} a_{ij} x_j \le b_i, && i \in M_L, \\
& \sum_{j \in N} a_{ij} x_j \ge b_i, && i \in M_G, \\
& \sum_{j \in N} a_{ij} x_j = b_i, && i \in M_E, \\
& l_j \le x_j \le u_j, \quad x_j \in \mathbb{Z}, && j \in N.
\end{aligned}
$$

上の問題に対して重み w^+, w^- を導入し，以下のような緩和問題を考えます．

$$
\begin{aligned}
\text{minimize} \quad & c^\top x + \frac{1}{2} x^\top Q x + \sum_{i \in M_L \cup M_E} w_i^+ y_i^+ + \sum_{i \in M_G \cup M_E} w_i^- y_i^- \\
\text{subject to} \quad & \sum_{j \in N} a_{ij} x_j - y_i^+ \le b_i, && i \in M_L, \\
& \sum_{j \in N} a_{ij} x_j + y_i^- \ge b_i, && i \in M_G, \\
& \sum_{j \in N} a_{ij} x_j - y_i^+ + y_i^- = b_i, && i \in M_E, \\
& l_j \le x_j \le u_j, \ \ x_j \in \mathbb{Z}, && j \in N, \\
& y_i^+ \ge 0, && i \in M_L \cup M_E, \\
& y_i^- \ge 0, && i \in M_G \cup M_E.
\end{aligned}
$$

アルゴリズムの各反復では，重み w^+, w^- を当該制約式の違反量が大きいものほど大きくなるよう内部で自動調整します．探索時は自動調整された重み w^+, w^- に基づき，上記緩和問題において目的関数が減少する方向へ解が遷移します．これにより制約条件に違反している解から違反を解消する方向や目的関数値が減少する方向へ解が遷移し，より良い解が得られます．

本アルゴリズムは緩和問題に対して局所探索を行うため，制約式をすべて満たす解が存在しない場合においてもできるだけ制約を満たす解が得られます．

本アルゴリズムはソフト制約付きの最適化問題を扱えます．ここでソフト制約とは，制約違反に対して所与の重みに比例したペナルティがかかる制約のことです．ソフト制約に違反した解も実行可能解となります．したがってソフト制約は通常の制約に比べ満たすべき優先度が低く，ソフト制約同士であれば所与の重みが大きいほど優先度が高いと解釈できます．本アルゴリズムでは所与の重みを重み w^+, w^- の自動調整の際の上限値として扱うことで，上記の優先度に合わせた制約違反の解消を実現します．

類似アルゴリズムである制約充足問題ソルバ wcsp との関連に触れながら，技術的な詳細を簡単に説明します．WLS と wcsp はいずれも局所探索の性能向上のための工夫をもつ手法です．wcsp はタブー・サーチと呼ばれるアルゴリズムを用いることで得られる局所最適解の質の向上を狙います．一方で WLS は近傍操作の種類を増やすことで同様の効果を狙います．各近傍操作において wcsp は 1 つの離散変数の値しか変化させないのに対し，WLS は最大 4 つの整数変数の値を変化させます．wcsp が複数回の近傍操作をしないと得られないような解も WLS は一回の近傍操作で得られます．

WLS は近傍操作の計算時間の削減を「隣接リスト」というデータ構造を用いて実現します．ここで隣接リストとは，変数同士の関連度の推定値に基づき，強く関連する変数の組を保持するリストです．2 つ以上の整数変数の値を変化させる際にはこの隣接リストを用い，改善解を得る見込みが薄い近傍操作をスキップします．

本アルゴリズムは，係数が 1 である制約式に対する高速化手法を取り入れています．したがってそのような制約式が多い最適化問題，特に大規模な集合被覆問題や集合分割問題に対して高い性能を発揮します．

本アルゴリズムの詳細については [19] をご参照ください．

付録 C 使い方に関するサポート

C.1 ユーザーサポートのページ

ユーザーサポートのページ（https://www.msi.co.jp/nuopt/user/index.html）にお客様からよく寄せられるご質問をまとめました．お問い合わせの前に，是非一度ご確認ください．

C.2 使い方サポートサービス

年間保守にご加入の方は，使い方サポートサービスをご利用いただけます．以下のページの「製品サポート」フォームからお問い合わせください．

https://reg34.smp.ne.jp/regist/is?SMPFORM=mgsb-ldrfmf-42ca1c7610237b14b4c1133097b27515

なお，データおよびプロジェクトファイルをお送りいただく場合には，いったんお送りいただく旨をフォームの通信欄にてお知らせいただければこちらよりセキュアなデータ転送サービスご利用についてご案内をいたします．

「製品サポート」フォームをご利用いただけない場合，下記アドレスに E-Mail でお問い合わせください．

nuopt-support@msi.co.jp

E-Mail でのお問い合わせの際には下記を明記してください．

- ご利用の製品名
- バージョン
- シリアル ID
- ご登録者様のお名前
- ご質問事項

ご質問に関わるデータやプロジェクトファイルなどは，直接メール添付をしないようお願いいたします．（容量により，エラーとなる場合がございます．）

データおよびプロジェクトファイルをお送りいただく場合には，いったんお送りいただく旨を E-Mail にてお知らせいただければこちらよりセキュアなデータ転送サービスご利用についてご案内をいたします．

フォームおよび E-Mail でのお問い合わせについては，回答は一営業日以内に行います．もし回答がない場合，送信いただいた E-Mail がエラーとなっている等の場合があります．お手数ではございます

が，今一度，宛先のメールアドレス等をご確認ください．どうしても原因が分からない場合は，下記までお電話にてご連絡下さい．（使い方のご質問そのものは，お電話ではお受けしておりませんので，ご注意ください．）

（株）NTT データ数理システム　営業部　03-3358-6681

参考文献

[1] J. E. Beasley(ed.), Advances in Linear and Integer Programming, Oxford University Press, 1996.

[2] I. Bongartz, A. Conn, N. Gould and Ph. L. Toint, CUTE: Constrained and Unconstrained Testing Environment, Research Report RC 18860, IBM, T. J. Watson Research Center, Yorktown, U.S.A., 1993.

[3] V・フバータル著/阪田省二朗・藤野和建訳，線形計画法（上/下），啓学出版，1983.

[4] I. S. Duff and J. K. Reid, The Multifrontal solution of indefinite sparse symmetric linear systems, ACM Transaction on Mathematical Software, Vol.9,No.3 ,302-325,1983.

[5] P. E. Gill, W. Murray, M.A.Saunders and M.H.Wright, A practical anti-cycling procedure for linearly constrained optimization, Mathematical Programming, 45:437-474, 1989.

[6] P. E. Gill, W. Murray, M. A. Saunders and M. H. Wright, Inertia-controlling methods for general quadratic programming, SIAM Review, 33:1-36, 1991.

[7] W. Hock and K. Shittkowski, Test examples for nonlinear programming codes, Springer Verlag, 1981.

[8] 田辺隆人，山下浩，主双対外点法とそのパラメトリック最適化への応用，2005 年日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集 50-51.

[9] K. Nonobe and T. Ibaraki, A tabu search approach for the constraint satisfaction problem as a general problem solver, European Journal of Operational Research 106, 599-623, 1998.

[10] K. Nonobe and T. Ibaraki, An improved tabu search method for the weighted constraint satisfaction problem, INFOR 39, 131-151, 2001.

[11] 伊理正夫，今野浩，刀根薫監訳，最適化ハンドブック，朝倉書店，1995.

[12] 矢部博，八巻直一，非線形計画法，朝倉書店，1999.

[13] H. Yamashita, A globally convergent primal-dual interior point method for constrained optimization, Technical Report, Mathematical Systems Inc., Tokyo, Japan, April 1992 (revised May 1992).

[14] H. Yamashita and T. Tanabe, A primal-dual interior point trust region method for large scale constrained optimization, Technical Report, Mathematical Systems Inc., Tokyo, Japan, October 1993.

[15] H. Yamashita and H. Yabe, Superlinear and quadratic convergence of primal-dual interior point methods for constrained optimization, Technical Report, Mathematical Systems Institute Inc., Tokyo, Japan, June 1993.

[16] K. Nonobe and T. Ibaraki, Formulation and tabu search algorithm for the resource constrained project scheduling problem, in: C.C. Ribeiro and P. Hansen (eds.): Essays and Surveys in Metaheuristics, Kluwer Academic Publishers, pp.557-588, 2002.

[17] T. Ralphs, et al., Parallel solvers for mixed integer linear optimization, In Handbook of parallel constraint reasoning, Springer, 2018, pp. 283-336.

[18] Y. Shinano, et al., Solving open MIP instances with ParaSCIP on supercomputers using up to 80,000 cores. In: Parallel and Distributed Processing Symposium, 2016 IEEE International. IEEE. 2016, pp. 770-779.

[19] S. Umetani, Exploiting variable associations to configure efficient local search in large-scale set partitioning problems, Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence, February 2015.

索　引

記号・数字

A

B

C

D

E

F

G

H

I

K

L

M

N

O

P

R

S

T

U

V

W

Z

あ

い

お

か

き

く

け

こ

さ

し

す

せ

そ

た

ち

て

と