

工事手配業務に対する 数理最適化の活用 と意思決定の支援

NTTデータ数理システム 学術奨励賞 2020

2020年3月9日

名古屋大学/西日本電信電話株式会社 高須賀 将秀

名古屋大学 柳浦 睦憲

目次

1. はじめに
2.
 - 2-1. 工事手配問題
 - 2-2. 数理モデル化
3. 工事手配問題解決に向けた進め方
4. モデルの構築
 - 4-1. モデル1の構築と評価
 - 4-2. モデル2の構築と評価
 - 4-3. モデル3の構築と評価
 - 4-4. モデル4の構築と評価
 - 4-5. 結果まとめ
5.
 - 5-1. モデル4'
 - 5-2. 数値実験
6.
 - 6-1. 提案モデルにおける解の評価
 - 6-2. 解の類似度行列の提案
 - 6-3. 実データへの適用結果
7. 結論及び今後の展望

1. はじめに 社会問題(インフラ老朽化)について

近年、道路等の**インフラの老朽化が深刻な社会問題**となっている。このため、インフラを点検する工事、**インフラを補修する工事等の件数が増加**している。これらの工事は、当該工事現場の周辺に位置する情報通信設備、送電線、ガス管、水道管等のライフライン関連設備その他設備に影響を及ぼすことがある。

■建設後50年以上経過する社会資本の割合

	2018年3月	2023年3月	2033年3月
道路橋 [約73万橋]	約25%	約39%	約63%
トンネル [約1万1千本]	約20%	約27%	約42%
河川管理施設(水門等) [約1万施設]	約32%	約42%	約62%
下水道管渠 [総延長約47万km]	約4%	約8%	約21%
港湾岸壁 [約5千施設]	約17%	約32%	約58%

■国土交通省：インフラ長寿命化とデータ利活用に向けた取組

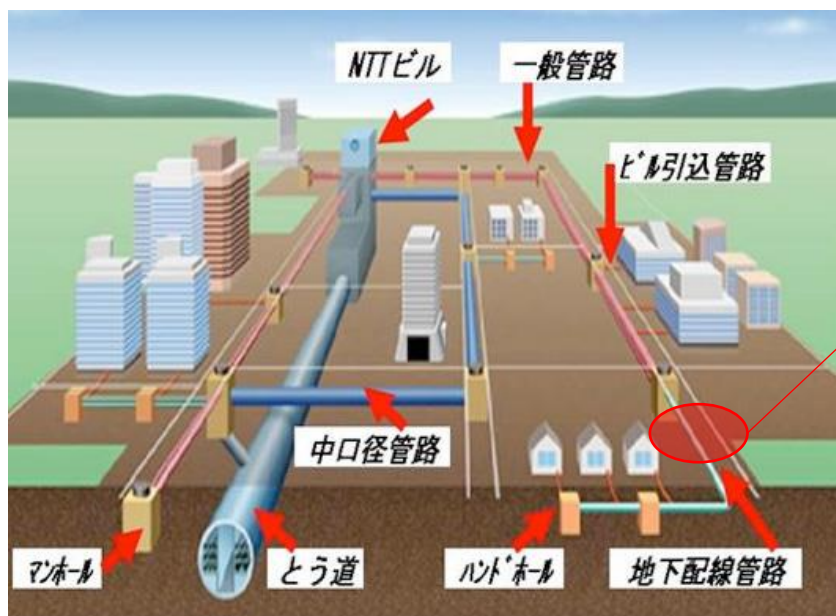
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshikaigi/sankankyougikai/infrastructure/dai1/siryou2.pdf>

1. はじめに インフラの補修工事について

インフラの補修工事が実施される場合、ライフライン関連設備その他設備に影響を及ぼす可能性があるため、**各設備に関する知識を有する監督者を工事に立ち会わせる必要がある。**

日本電信電話株式会社(以下NTT)では、電話やインターネット等の通信を行う設備を保有しており、地下等に設備がある。インフラの補修工事が実施される場合、設備への影響を防ぐために、NTTのグループ会社であるNTTインフラネットの社員が工事の立会を行っている。

■NTT管路系設備



<http://www.anstl.ntt.co.jp/history/infra/in01.html>

■道路の工事(掘削)の様子

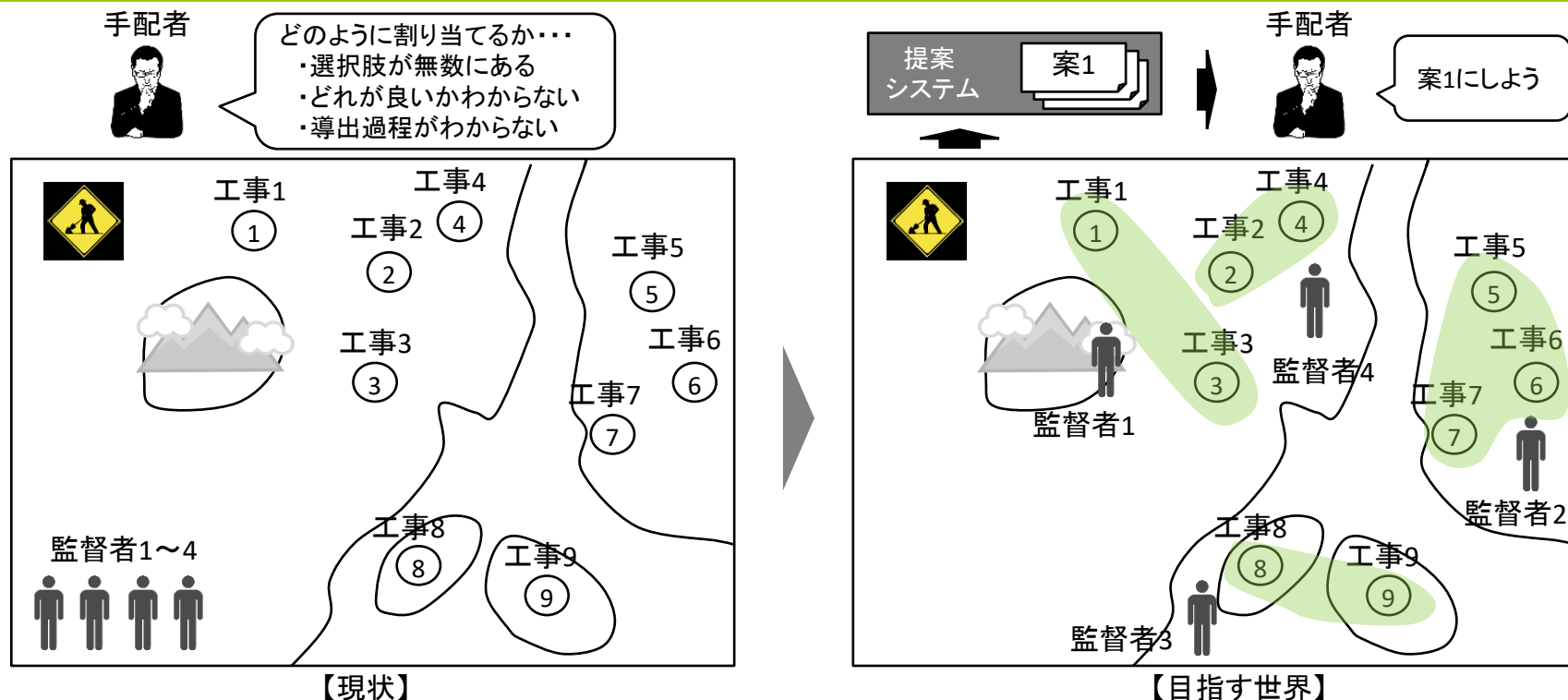


<https://www.ntt-east.co.jp/kanagawa/contents/excavation.html>

1. はじめに 立会工事割当の現状と目指す世界

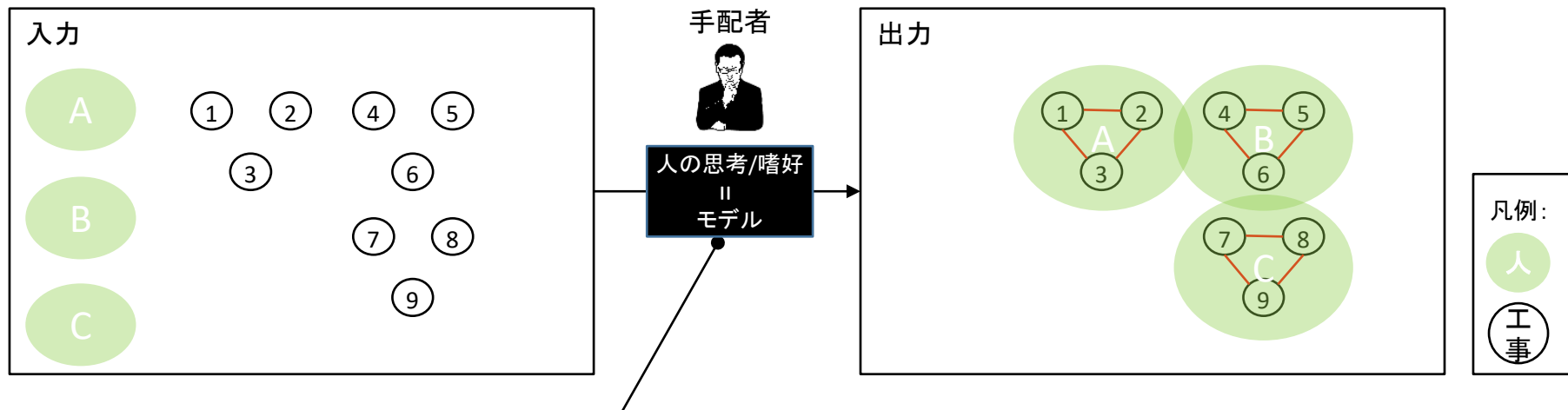
立会工事の割当は、複数の工事現場に複数の監督者を割当てる作業からなり、**様々な要素を考慮して実行される**必要がある。これらの作業を実施する人は“手配者”と呼ばれ、割当に関する高度なスキルやノウハウを有している。割当作業の結果は、割当作業の担当者の知識、経験、感覚等に左右される。また、割当作業は、**様々な要素を考慮して実施される**作業であるため、その結果が好適であるか否かの判断は簡単ではなく、判断基準も不明確であることが多い。以上から、手配業務は毎日(3時間×2回(昼/夜))あり、**稼働時間が膨大**、手配には**高度なスキルが必要**、手配者の**育成が困難**などの課題があがっている。

本研究では、これらの課題を解決し、**複数の要素を考慮した上で好適な意思決定を行うことを支援する**。



2-1. 工事手配問題とは

工事の集合と人の集合が与えられた時、**各人にどの工事を割り当てるかを決定する問題**である。実社会の問題では、この割り当を決定する際に、移動距離や品質等の**様々な条件を考慮して割り当を決定**している。この考慮すべき条件には、万人共通の条件もあれば、人の思考や嗜好によって異なるものもある。これらの人の思考や嗜好に沿う結果を出力する、**良質なモデルを構築**することが、本研究の目的である。



■ 考慮するパラメータの例

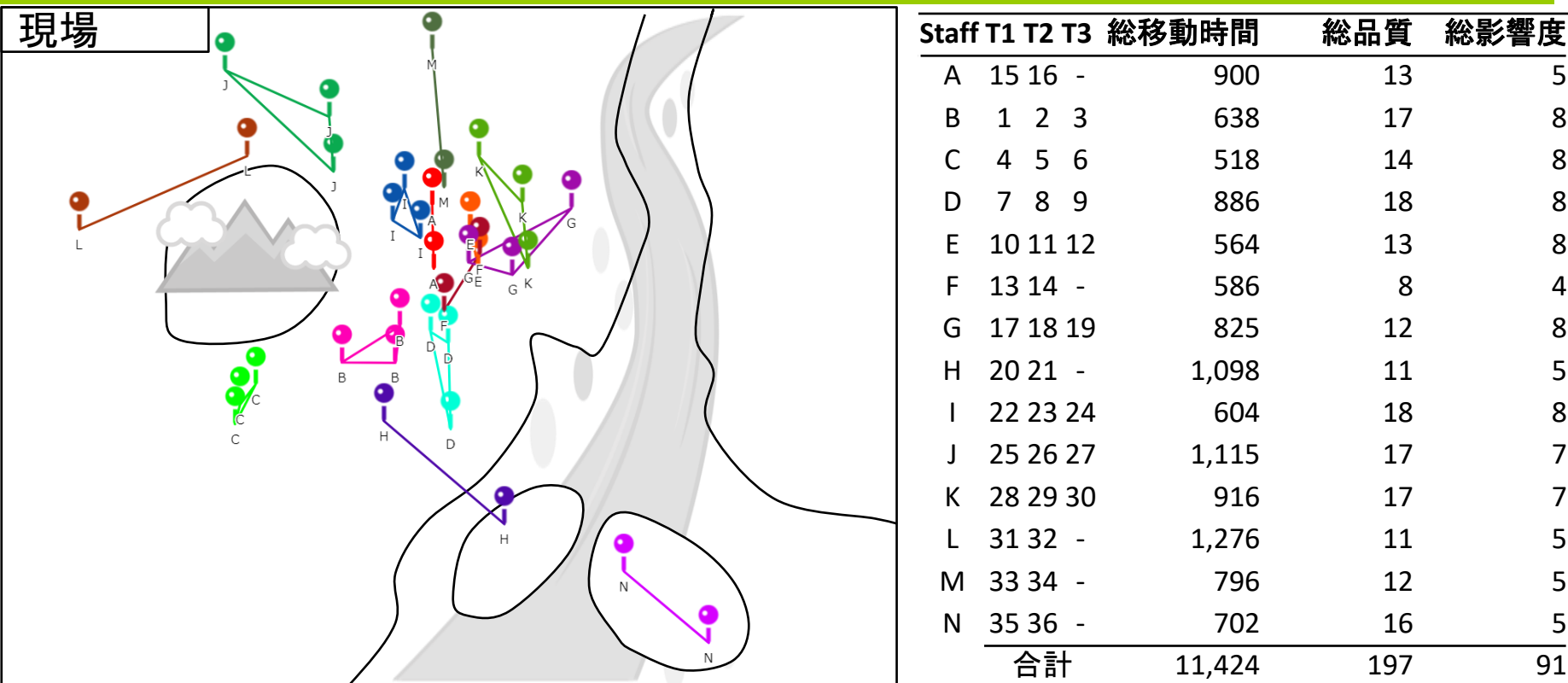
パラメータ	説明
稼働量	1日に担当する工事数
移動時間	担当工事間の移動時間
工事の重要度	工事の種別や規模から決まる値
工事立会者のスキル	工事立会者が所持しているスキル 通常立会工事ごとに異なる値
工事の開始時刻	立会工事に要請される開始時刻

2-2. 現場の手配者の実際の割当

過去の現場の手配者が実際に割当てた結果を下に示す。

前頁でも述べたが、**明確な目的関数や制約条件が決まっておらず**、その結果、**手配者によって割当結果が異なる**。しかしながら、手配スキルの高い手配者の結果と低い手配者の結果は、ベテランの手配者には判定可能である。そのため、まず、**スキルの高い手配者の思考を再現可能なモデルを構築すること**を本研究の目的とする。

なお、下図は実データを用いた結果であるが、住所の特定ができないように背景の地図には模式図を用いる。



3. 工事手配問題解決に向けた進め方(1/2)

工事手配問題解決に向けた進め方を下に示す。XY平面は人の意図を表すベクトル(別紙), Z軸はそのベクトルにおける解の良さを表している。人の意図を表すベクトルは, 現場の意思決定者(手配者)の思考や嗜好による違い及び問題の前提となる条件の違いにより異なるモデルを表現している。

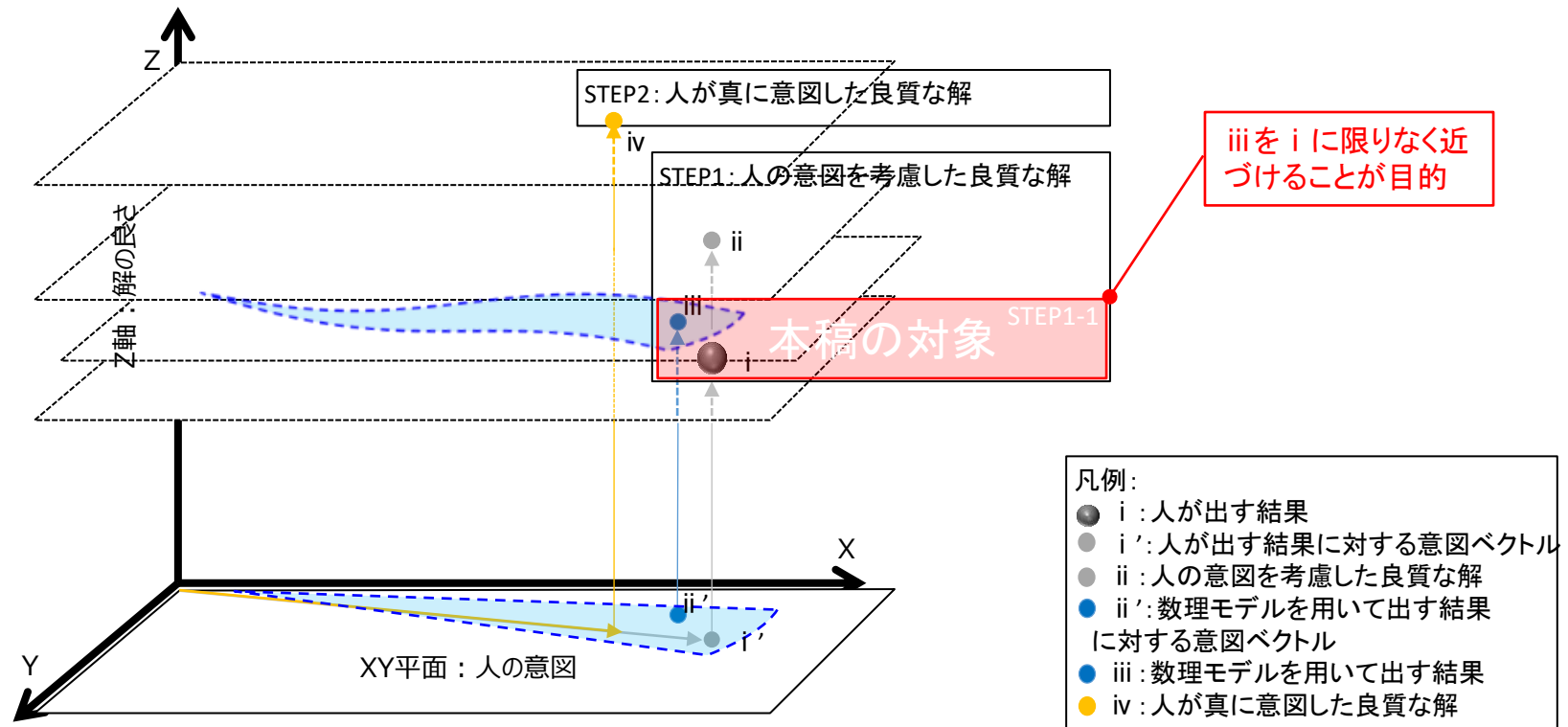
まずは, スキルの高い手配者の思考を再現可能なモデルを構築するためにSTEP1の工程を考える。

■STEP1: 手配者の意図を考慮した良質な解を算出する。

(STEP1-1: 手配者により作成される結果に等しいまたは近い解を算出する。【本研究】)

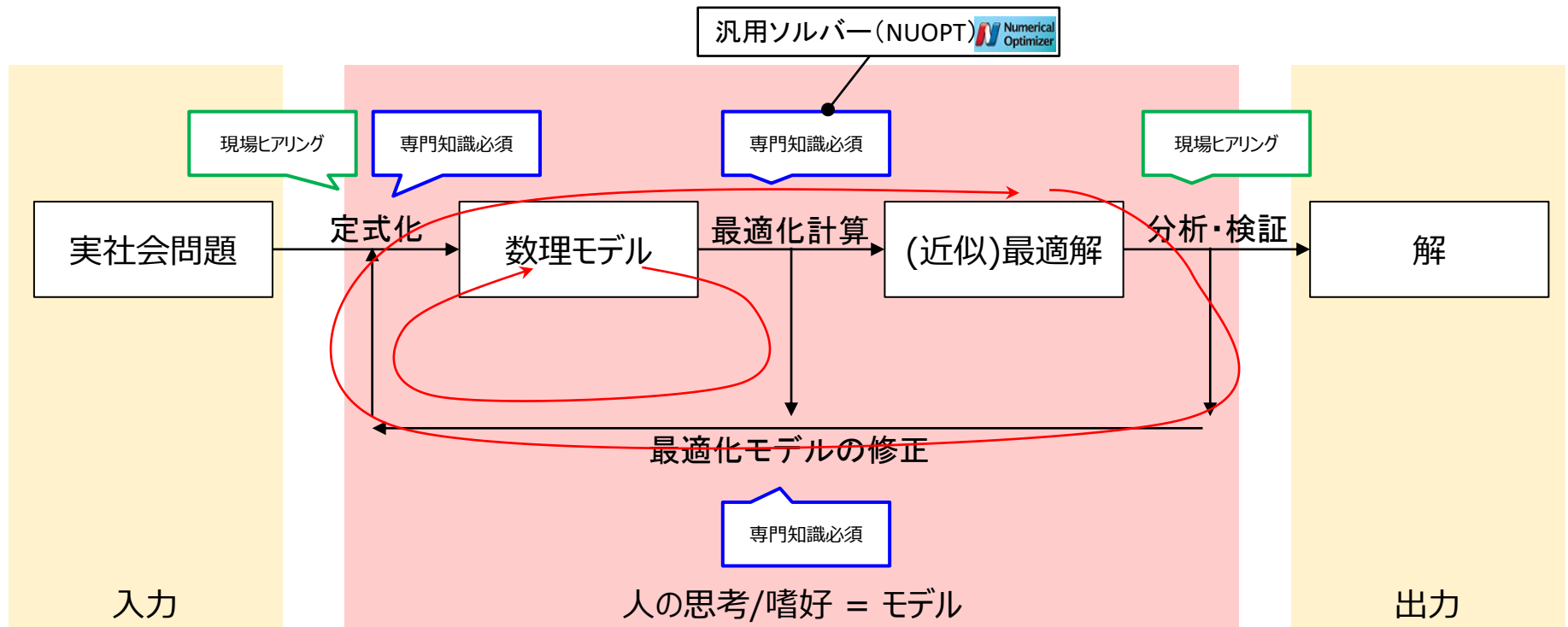
次に, STEP1で求めた人の意図に沿いかつ条件等を正しく補正した本来のあるべき解を算出する。

■STEP2: 手配者の意図に沿うさらに良質な解(人が真に意図した解)を算出する。



3. 工事手配問題解決に向けた進め方(2/2)

手配者により作成される結果に等しいまたは近い解を算出するSTEP1-1の進め方について述べる。実社会問題から解を算出するためには、人の思考/嗜好をモデル化する必要がある。また、モデル化するためには、**現場の意思決定者とモデルを構築可能な専門家の両者の協力が必要となる**。一般的に1回のヒアリングで求められる解に到達することは難しいため、**現場ヒアリングとモデルの修正を繰り返し**求められる解に近づく。数理モデルから(近似)最適解を求める箇所について、汎用ソルバー(NUOPT, Gurobi, CPLEX等)や自作アルゴリズムにより求解できるが、今回は数回のモデルの修正が予測されることから、**多種のアルゴリズム、特に非線形アルゴリズムが備わっている汎用ソルバー NumericalOptimizer(NUOPT:数理システム)を用いる**。

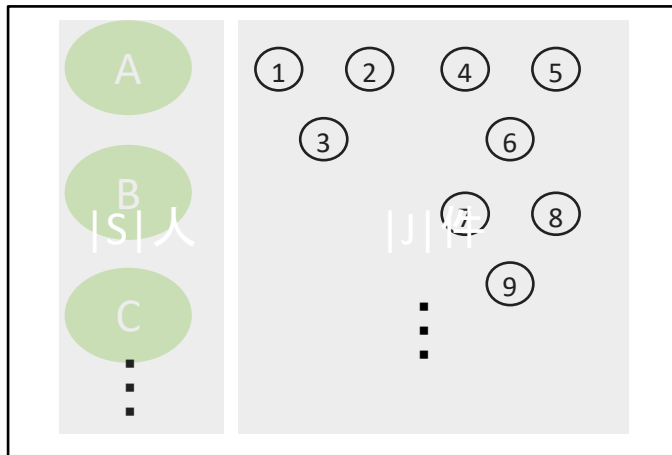


4-1. 工事手配の実施条件(モデル1)

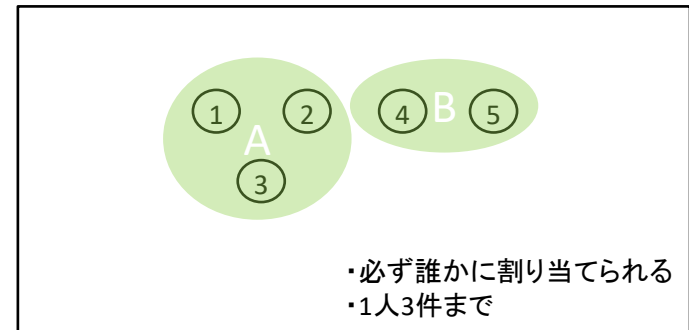
現場にヒアリングを実施した結果、以下の要件が出た。

- A) $|J|$ 件の工事に対し、 $|S|$ 人の工事立会者を手配することを考える。
- B) 各工事には必ず1人の工事立会者を手配する必要がある。
- C) 事故を起こさないようにするために1人の工事立会者に対する最大割当て件数は3件までとする。
- D) 各工事立会者は事務所を出発し担当する工事を全て巡回した後事務所に帰還する。
- E) 全ての工事立会者に対して、事務所を出発し担当する工事を全て巡回した後事務所に帰還する経路の総移動時間を最小化したい。

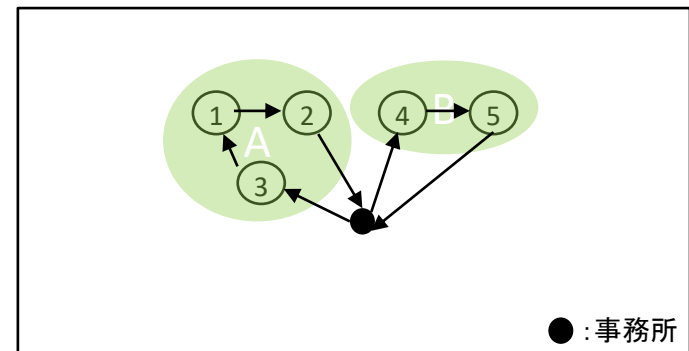
■ A)



■ B), C)



■ D), E)



4-1. 工事手配の実施条件(モデル1)

モデル1は配送計画問題に帰着できる. 配送計画問題の解の探索アルゴリズムは盛んに研究されているため, 橋本らの既存アルゴリズムを用いて求解する.

■モデル1と配送計画問題の対応表

工事手配問題モデル1	配送計画問題	値
事務所	デポ	1
立会工事	顧客	$ J $
工事立会者	配車	$ S $
1つの立会工事	顧客の需要量	1
工事立会者の担当工事数	配車の積載量上限	3

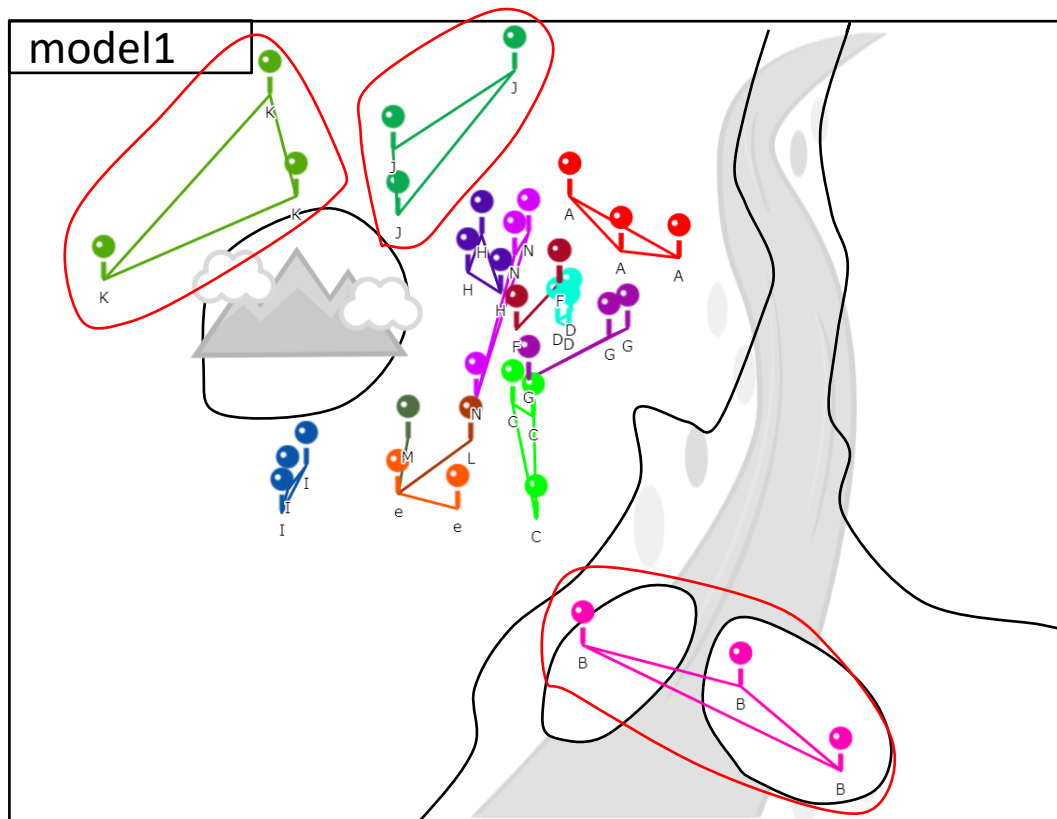
■配送計画問題の求解ソフトウェア

<http://alg.u.e.kaiyodai.ac.jp/software.html>

4-1. モデル1における結果と評価

モデル1における結果を下に示す. なお, 結果を他の結果と比較できるようにするため, 事務所を除いて巡回する立会工事の様子を描写している.

本結果について手配者と議論した結果, 下図の赤枠箇所が実際の割当てでは行わないということが判明した. 理由は, 各工事は1回ずつ巡回するわけではなく, 1時間毎に工事の様子を見回る必要があり, 事務所を除いて担当する工事の巡回路の総移動時間を小さくしたいためである.



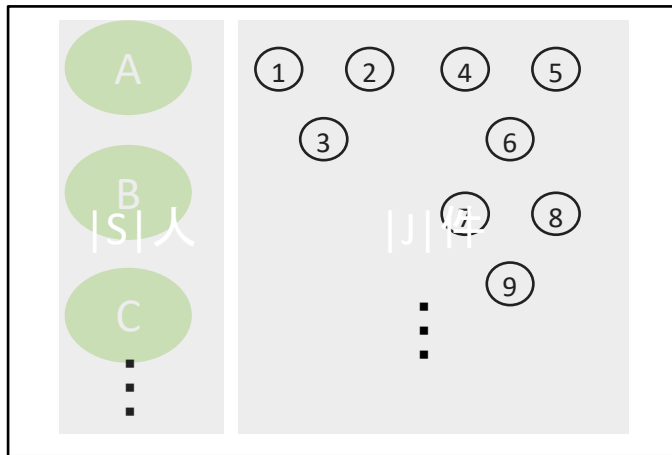
Staff	T1	T2	T3	総移動時間	総品質	総影響度
A	19	28	29	681	15	6
B	35	36	20	1,511	10	8
C	9	7	8	886	17	8
D	13	10	17	594	10	7
E	21	-	-	0	12	2
F	11	12	15	720	7	8
G	18	30	14	675	14	8
H	23	22	24	608	17	8
I	4	5	6	518	17	8
J	34	25	26	1,273	13	7
K	31	27	32	2,041	12	7
L	2	-	-	0	15	3
M	3	-	-	0	23	3
N	16	33	1	1,030	15	8
合計				10,537	197	91

4-2. 工事手配の実施条件(モデル2)

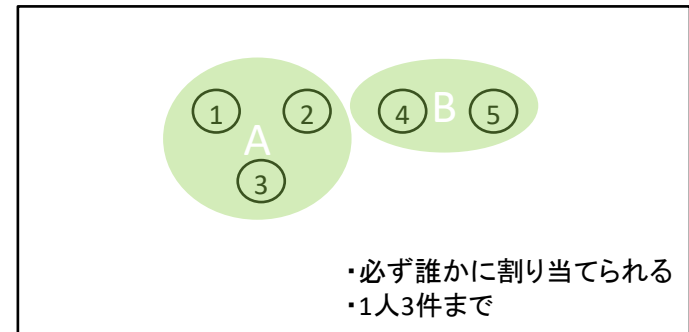
現場にヒアリングを実施した結果、以下の要件が出た。

- A) $|J|$ 件の工事に対し、 $|S|$ 人の工事立会者を手配することを考える。
- B) 各工事には必ず1人の工事立会者を手配する必要がある。
- C) 事故を起こさないようにするために1人の工事立会者に対する最大割り当て件数は3件までとする。
- ~~D) 各工事立会者は事務所を出発し担当する工事を全て巡回した後事務所に帰還する。~~
- ~~E) 全ての工事立会者の総移動時間を最小化したい。~~

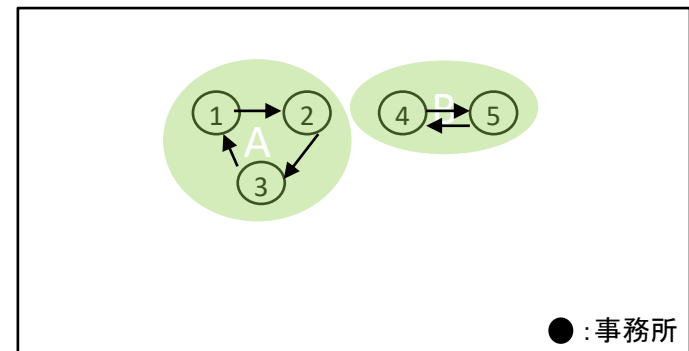
■ A)



■ B), C)



■ D), E)



4-2. モデル2の定式化

■集合

S : 工事立合者の集合 $S = \{1, 2, \dots, n\}$

J : 立合工事の集合 $J = \{1, 2, \dots, m\}$

T : 立合工事の枠の集合 $T = \{1, 2, 3\}$

■要素

s : 工事立合者 $s \in S$

j : 立合工事 $j \in J$

t : 立合工事の枠 $t \in T$

■入力パラメータ

d_{j_1, j_2} : 立合工事 j_1 から立合工事 j_2 への移動時間 ($j_1 \in J, j_2 \in J$)

■決定変数

x_{sjt} : 工事立合者 s が立合工事 j を枠 t に行うならば1, そうでないならば0

■目的関数

$$\min \sum_{s \in S} D_s$$

■制約条件

工事立合者 s , 枠 t は1つ以下の立合工事が割当てられる: $0 \leq \sum_{j \in J} x_{sjt} \leq 1 \quad (\forall s \in S, \forall t \in T)$

立合工事は必ずいずれかの工事立合者に割当てられる: $\sum_{s \in S, t \in T} x_{sjt} = 1 \quad (\forall j \in J)$

工事立合者 s の移動時間: $D_s = \sum_{t+1 \in T} \sum_{j_1, j_2 \in J} d_{j_1, j_2} * x_{sj_1 t} * x_{sj_2 (t+1)} \quad (\forall s \in S)$

$x_{sjt} \in \{0, 1\} \quad (\forall s \in S, \forall j \in J, \forall t \in T)$

4-2. 移動時間の計算についての工夫

モデル2では工事の枠数が3であり, 1人あたり最大3つの立会工事が割当て可能である. 以下, 通常の距離行列を用いた場合と移動時間の計算を工夫した**ダミー工事を取り入れた距離行列**を用いた場合について比較した.

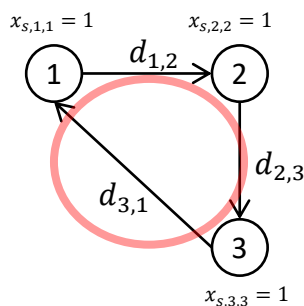
前者の場合, 担当する立会工事が2つ以下のとき合計移動時間が正しく計算できない. 一方で, 後者の場合, 担当する立会工事が2つ以下ときでも合計移動時間が正しく計算できていることがわかる.

■通常の距離行列

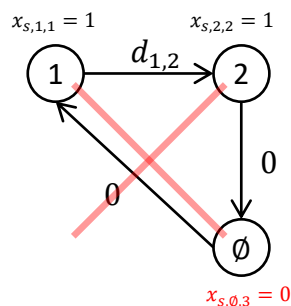
	1	2	3	...
1	0	$d_{1,2}$	$d_{1,3}$	
2	$d_{2,1}$	0	$d_{2,3}$	
3	$d_{3,1}$	$d_{3,2}$	0	
⋮				

■ダミー工事を取り入れた距離行列

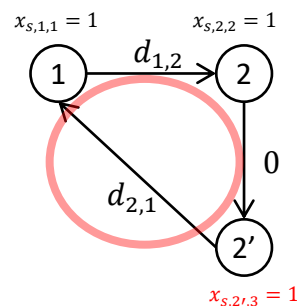
	1	2	3	...	1'	2'	3'	...
1	0	$d_{1,2}$	$d_{1,3}$		0	∞	∞	
2	$d_{2,1}$	0	$d_{2,3}$		∞	0	∞	
3	$d_{3,1}$	$d_{3,2}$	0		∞	∞	0	
⋮								
1'	0	$d_{1,2}$	$d_{1,3}$		0	∞	∞	
2'	$d_{2,1}$	0	$d_{2,3}$		∞	0	∞	
3'	$d_{3,1}$	$d_{3,2}$	0		∞	∞	0	
⋮								



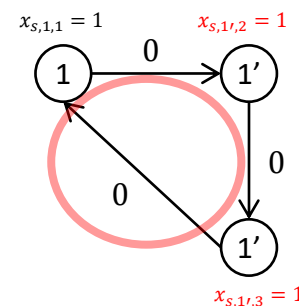
(A)



(B)



(C)



(D)

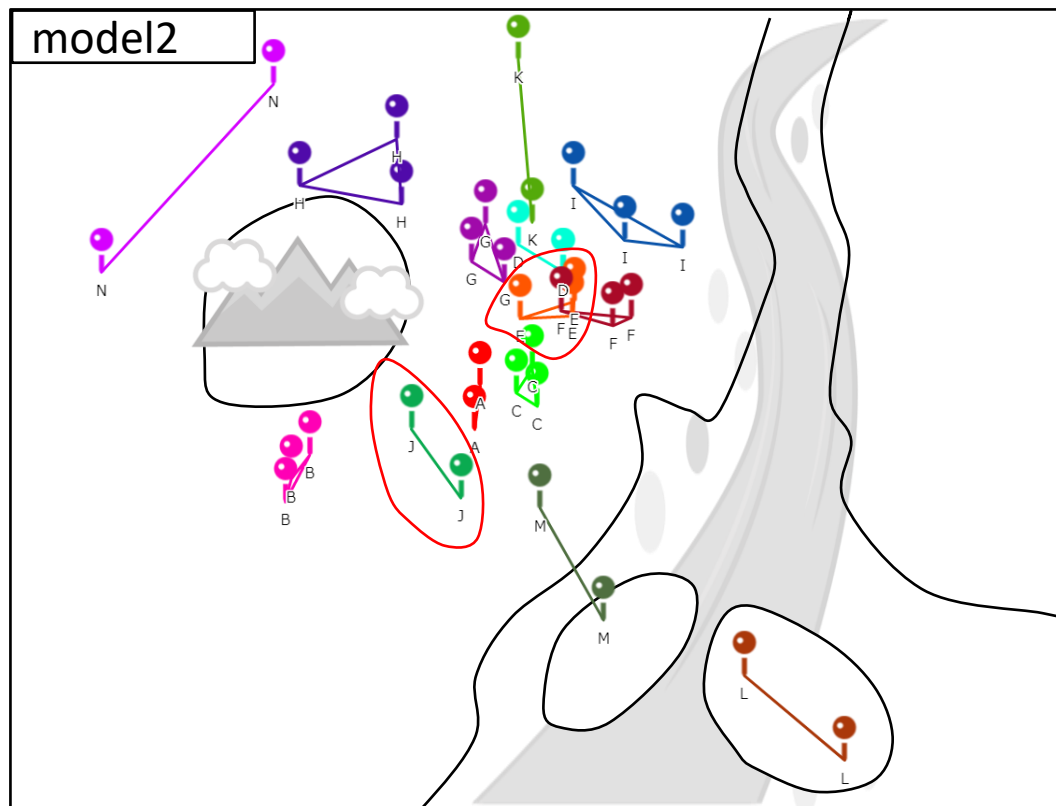
各拠点での足踏みが許容されない

各拠点での足踏みが許容される

4-2. モデル2における結果と評価

モデル2における結果を下に示す. なお, 本結果は前頁で定式化されたモデルをもとに, NUOPTにて実装及び計算実験を行った結果である.

本結果について手配者と議論した結果、下図の赤枠箇所が実際の割当では行わないということが判明した。理由は、割当てられた立会工事者とその工事に関する知識やスキルが不足しているためである。例えば、工事立会者Eは工事13、工事15に関するスキルは不足しているが、工事12については他の工事立会者より長けたスキルを保有しているため、積極的に割当てたい。



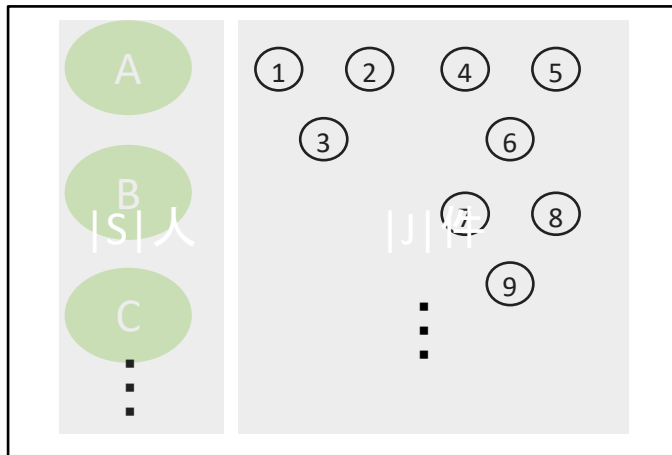
Staff	T1	T2	T3	総移動時間	総品質	総影響度
A	2	1	-	256	12	5
B	6	4	5	518	23	8
C	7	9	14	431	15	7
D	16	11	12	354	15	9
E	10	13	15	782	7	6
F	31	17	18	545	11	9
G	24	23	22	604	24	8
H	25	31	26	820	21	7
I	29	19	28	681	16	6
J	3	21	-	868	4	5
K	33	34	-	796	10	5
L	35	36	-	702	10	5
M	20	8	-	668	8	6
N	27	32	-	1,570	12	5
合計				9,595	188	91

4-3. 工事手配の実施条件(モデル3)

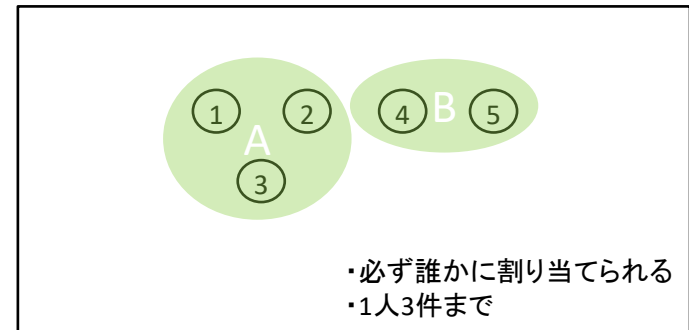
現場にヒアリングを実施した結果、以下の要件が出た。

- A) $|I|$ 件の工事に対し、 $|S|$ 人の工事立会者を手配することを考える。
- B) 各工事には必ず1人の工事立会者を手配する必要がある。
- C) 事故を起こさないようにするために1人の工事立会者に対する最大割当件数は3件までとする。
- D) 全ての工事立会者の総移動時間を最小化したい。
- E) 各工事立会者を割当てたときの全ての立会工事の品質を最大化したい(※)。

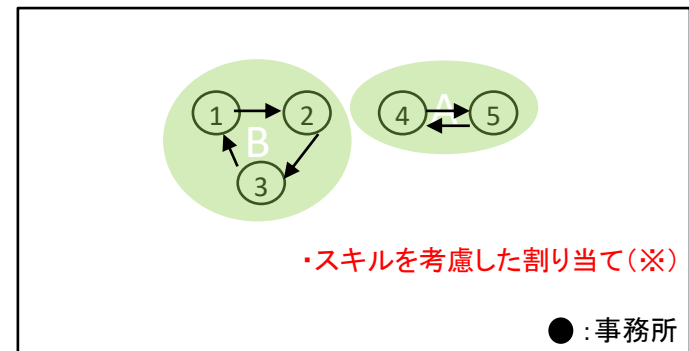
■ A)



■ B), C)



■ D), E)



※: 立会工事の品質を最大化するとは、各工事に求められるスキルマップに対し、各工事立会者が有しているスキルを数値化したスキル表をもとに、割当を行ったときのスキル表の数値を最大化することを指す。

4-3. モデル3の定式化(加重平均法)

■集合

S : 工事立合者の集合 $S = \{1, 2, \dots, n\}$

J : 立合工事の集合 $J = \{1, 2, \dots, m\}$

T : 立合工事の枠の集合 $T = \{1, 2, 3\}$

■要素

s : 工事立合者 $s \in S$

j : 立合工事 $j \in J$

t : 立合工事の枠 $t \in T$

■入力パラメータ

d_{j_1, j_2} : 立合工事 j_1 から立合工事 j_2 への移動時間 ($j_1 \in J, j_2 \in J$)

p_{sj} : 工事立合者 s が立合工事 j を行ったときに担保できる品質 ($s \in S, j \in J$)

■決定変数

x_{sjt} : 工事立合者 s が立合工事 j を枠 t に行うならば1, そうでないならば0

■目的関数

$$\min \sum_{s \in S} D_s - \alpha * \sum_{s \in S} Q_s$$

■制約条件

工事立合者 s , 枠 t は1つ以下の立合工事が割当てられる: $0 \leq \sum_{j \in J} x_{sjt} \leq 1 \ (\forall s \in S, \forall t \in T)$

立合工事は必ずいずれかの工事立合者に割当てられる: $\sum_{s \in S, t \in T} x_{sjt} = 1 \ (\forall j \in J)$

工事立合者 s の移動時間: $D_s = \sum_{t+1 \in T} \sum_{j_1, j_2 \in J} d_{j_1, j_2} * x_{sj_1 t} * x_{sj_2(t+1)} \ (\forall s \in S)$

工事立合者 s が担保できる総品質: $Q_s = \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} p_{sj} * x_{sjt} \ (\forall s \in S)$

$x_{sjt} \in \{0, 1\} (\forall s \in S, \forall j \in J, \forall t \in T)$

4-3. 多目的組合せ最適化の手法

多目的組合せ最適化の手法はいくつか存在する。例えば、加重平均法や制約化法がある。

■加重平均法

各多目的関数に重み付けをして1つの評価指標を作り、単一目的化することで最適化を行う手法。
重み付けを変更することで、複数の解が出力可能である。

■制約化法

複数ある目的から1つを目的関数とし、その他を制約条件にすることで最適化を行う手法。

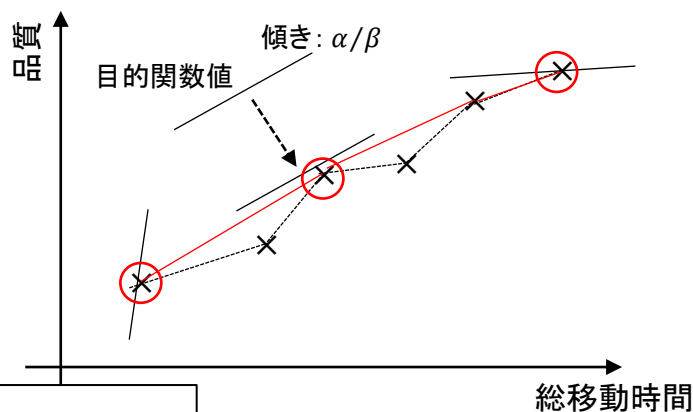
本研究では、**現場の手配者が直感的に何を優先しているかがわかる**加重平均法を用いてモデル化する。

■加重平均法:

説明変数に係数を掛け、重み付き和を目的関数とする。
目的関数は重みで調整する。

解空間(またはパレート解)が凸であれば、どのパレート解もそれが最適解となる重み付けが存在する。

$$\min \alpha * dist + \beta * prof (\alpha \geq 0, \beta \leq 0)$$

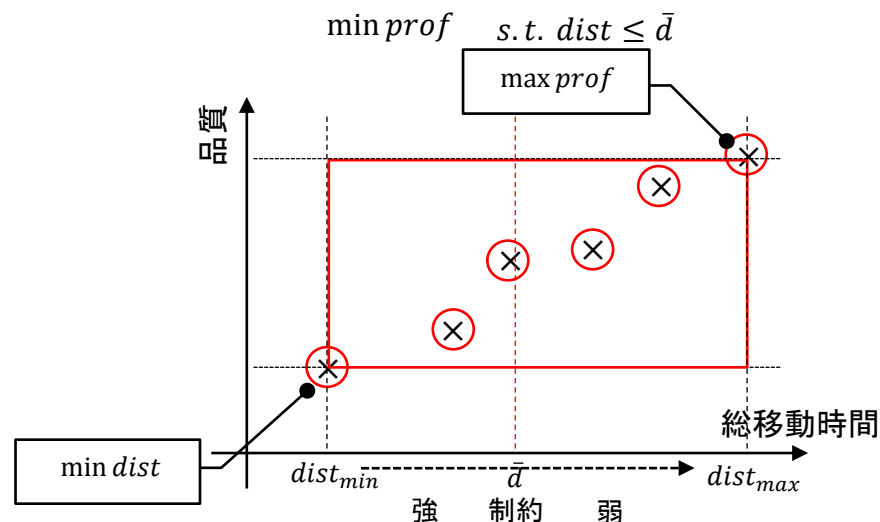


凡例
x: パレート解
⊗: 出てくるパレート解

■制約化法:

目的関数の設計変数は1つに固定する。制約条件で調整する。

$\bar{d}$ の調整次第で解を複数出力可能

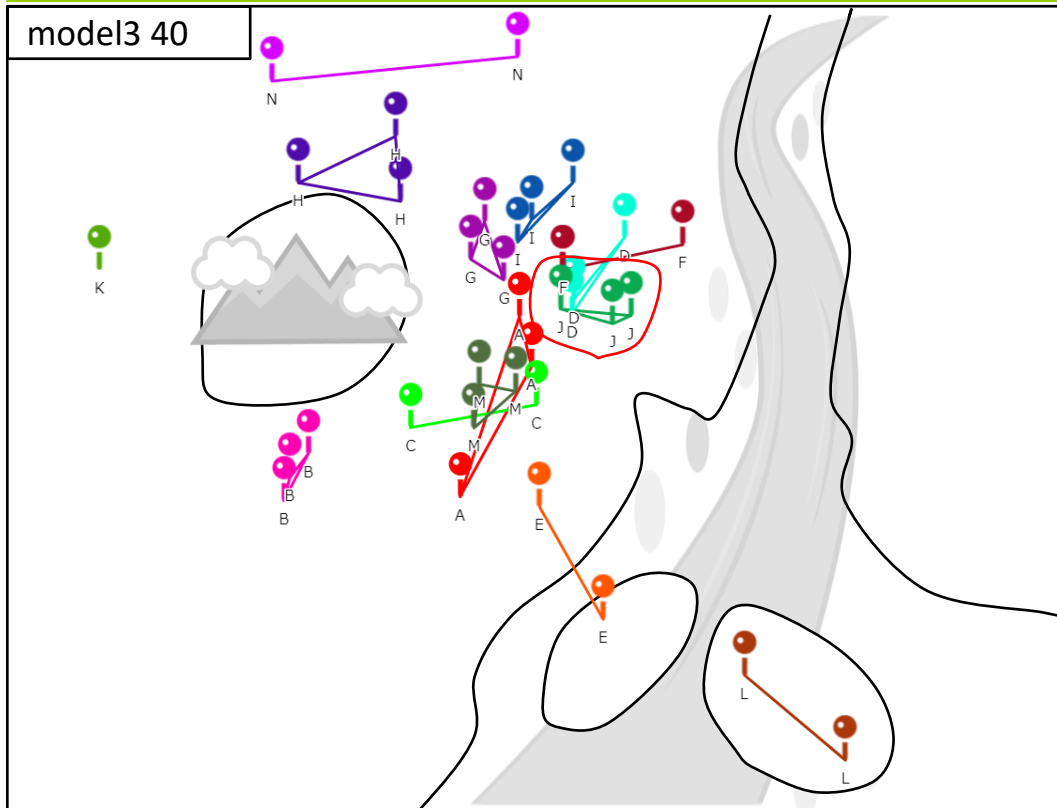


4-3. モデル3($\alpha = 40$)における結果と評価

モデル3における結果を下に示す。なお、本結果は前頁で定式化されたモデルをもとに、NUOPTにて実装及び計算実験を行った結果である。

本結果について手配者と議論した結果、下図の赤枠箇所が実際の割当では行わないということが判明した。理由は、一部の工事立会者に難しい工事が集中しており、負担が大きいためである。そのため、各工事の難しさを点数化し、合計値が基準値を超えないようにする。

また、本モデルから総移動時間と総品質の2つの指標を目的とした多目的関数モデルとなっており、複数の結果が出るが、その中で最も良い結果を手配者に判断してもらい、結果を表示している。

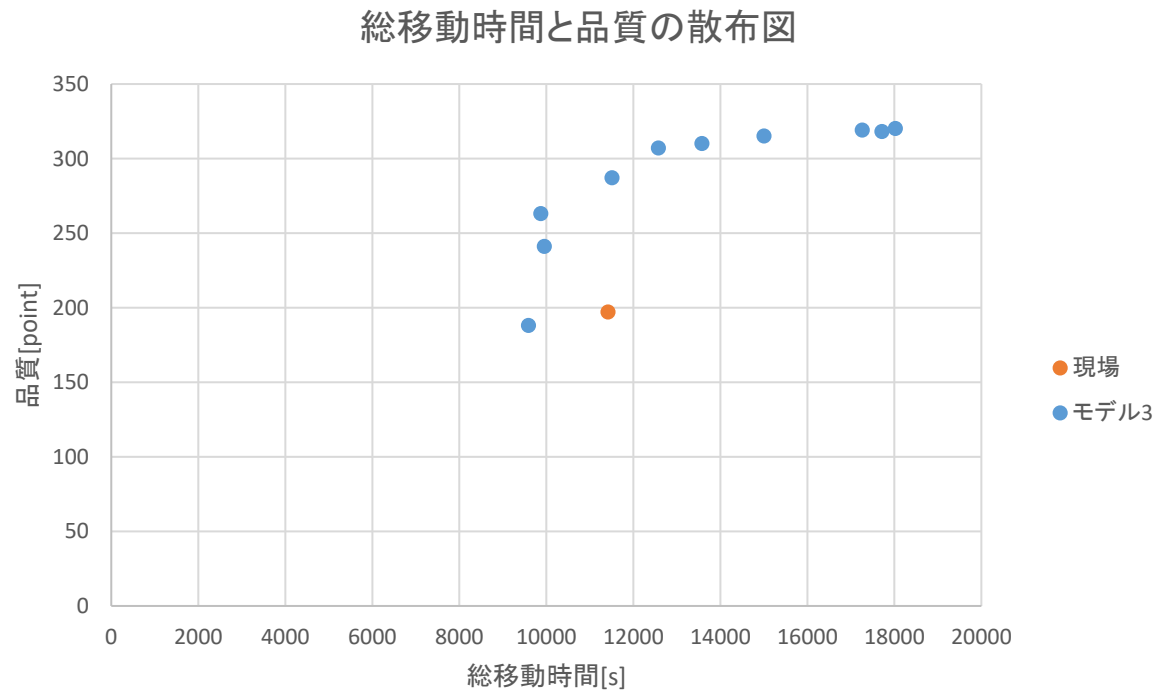


Staff	T1	T2	T3	総移動時間	総品質	総影響度
A	21	14	15	1,205	23	6
B	6	4	5	518	23	8
C	3	7	-	962	18	5
D	10	13	28	702	24	6
E	20	8	-	668	18	6
F	19	11	12	612	18	8
G	23	24	22	604	24	8
H	31	26	25	820	21	7
I	29	16	33	641	17	8
J	17	18	30	545	19	9
K	32	-	-	0	6	3
L	36	35	-	702	10	5
M	1	2	9	468	26	8
N	34	27	-	1,430	16	4
合計				9,877	263	91

【参考】4-3. モデル3における結果

モデル3における結果を下に示す. なお, 本結果は前頁で定式化されたモデルをもとに, NUOPTにて実装及び計算実験を行った結果である.

本結果はモデル3における重み変数 α の値を変えることで, 総移動時間を重視するモデルか, 品質を重視するモデルかを決定している. 下図は重み変数 α の値を変えることで得られた解の総移動時間と品質を散布図で表現した図である.



【参考】4-3. モデル3の定式化(制約化法)

■集合

S : 工事立合者の集合 $S = \{1, 2, \dots, n\}$

J : 立合工事の集合 $J = \{1, 2, \dots, m\}$

T : 立合工事の枠の集合 $T = \{1, 2, 3\}$

■要素

s : 工事立合者 $s \in S$

j : 立合工事 $j \in J$

t : 立合工事の枠 $t \in T$

■入力パラメータ

d_{j_1, j_2} : 立合工事 j_1 から立合工事 j_2 への移動時間 ($j_1 \in J, j_2 \in J$)

p_{sj} : 工事立合者 s が立合工事 j を行ったときに担保できる品質 ($s \in S, j \in J$)

$\bar{D}$: 全ての工事立合者の総移動時間を $\bar{D}$ 以下とするパラメータ

■決定変数

x_{sjt} : 工事立合者 s が立合工事 j を枠 t に行うならば1, そうでないならば0

■目的関数

$$\max \sum_{s \in S} Q_s$$

■制約条件

工事立合者 s , 枠 t は1つ以下の立合工事が割り当てられる: $0 \leq \sum_{j \in J} x_{sjt} \leq 1 \quad (\forall s \in S, \forall t \in T)$

立合工事は必ずいずれかの工事立合者に割り当てられる: $\sum_{s \in S, t \in T} x_{sjt} = 1 \quad (\forall j \in J)$

総移動時間を制約とする: $\sum_{s \in S} D_s \leq \bar{D}$

工事立合者 s の移動時間: $D_s = \sum_{t+1 \in T} \sum_{j_1, j_2 \in J} d_{j_1, j_2} * x_{sj_1 t} * x_{sj_2 (t+1)} \quad (\forall s \in S)$

工事立合者 s が担保できる総品質: $Q_s = \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} p_{sj} * x_{sjt} \quad (\forall s \in S)$

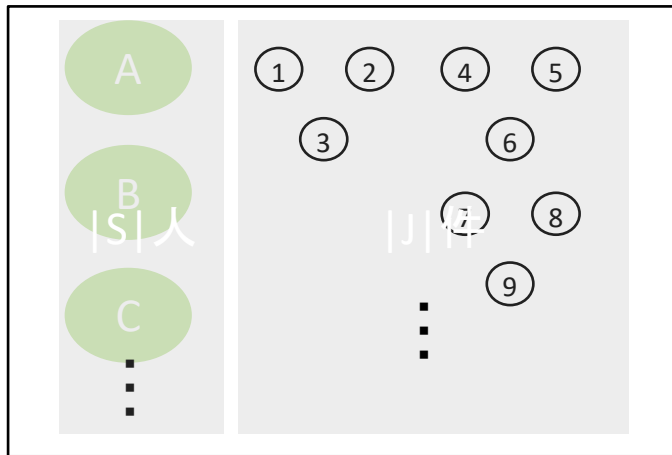
$x_{sjt} \in \{0, 1\} \quad (\forall s \in S, \forall j \in J, \forall t \in T)$

4-4. 工事手配の実施条件(モデル4)

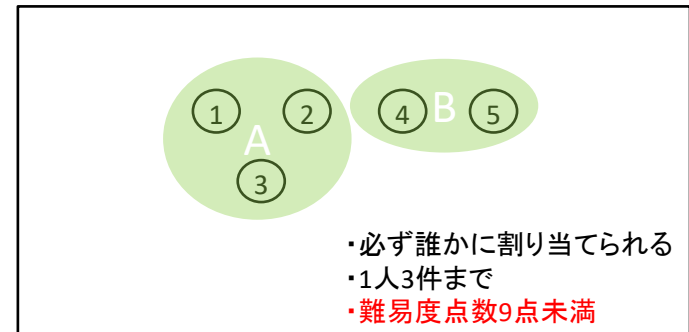
現場にヒアリングを実施した結果、以下の要件が出た。

- A) $|J|$ 件の工事に対し、 $|S|$ 人の工事立会者を手配することを考える。
- B) 各工事には必ず1人の工事立会者を手配する必要がある。
- C) 事故を起こさないようにするために1人の工事立会者に対する最大割当件数は3件までとする。
- D) **難しい工事の偏りをなくすために1人の工事立会者に対する工事難易度の点数を9点未満とする。**
- E) 全ての工事立会者の総移動時間を最小化したい。
- F) 各工事立会者を割当てたときの全ての立会工事の品質を最大化したい。

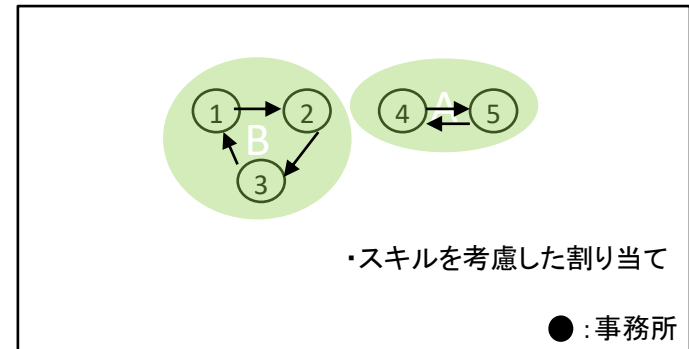
■ A)



■ B), C), D)



■ E), F)



4-4. モデル4の定式化(加重平均法)

■集合

S : 工事立合者の集合 $S = \{1, 2, \dots, n\}$

J : 立合工事の集合 $J = \{1, 2, \dots, m\}$

T : 立合工事の枠の集合 $T = \{1, 2, 3\}$

■要素

s : 工事立合者 $s \in S$

j : 立合工事 $j \in J$

t : 立合工事の枠 $t \in T$

■入力パラメータ

d_{j_1, j_2} : 立合工事 j_1 から立合工事 j_2 への移動時間 ($j_1 \in J, j_2 \in J$)

p_{sj} : 工事立合者 s が立合工事 j を行ったときに担保できる品質 ($s \in S, j \in J$)

i_j : 立合工事 j の難易度 ($j \in J$)

■決定変数

x_{sjt} : 工事立合者 s が立合工事 j を枠 t に行うならば1, そうでないならば0

■目的関数

$$\min \sum_{s \in S} D_s - \alpha * \sum_{s \in S} Q_s$$

■制約条件

工事立合者 s , 枠 t は1つ以下の立合工事が割当てられる: $0 \leq \sum_{j \in J} x_{sjt} \leq 1 \ (\forall s \in S, \forall t \in T)$

立合工事は必ずいずれかの工事立合者に割当てられる: $\sum_{s \in S, t \in T} x_{sjt} = 1 \ (\forall j \in J)$

各工事立合者が担当する立合工事の難易度の合計は9未満とする: $\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} i_j * x_{sjt} < 9 \ (\forall s \in S)$

工事立合者 s の移動時間: $D_s = \sum_{t+1 \in T} \sum_{j_1, j_2 \in J} d_{j_1, j_2} * x_{sj_1 t} * x_{sj_2 (t+1)} \ (\forall s \in S)$

工事立合者 s が担保できる総品質: $Q_s = \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} p_{sj} * x_{sjt} \ (\forall s \in S)$

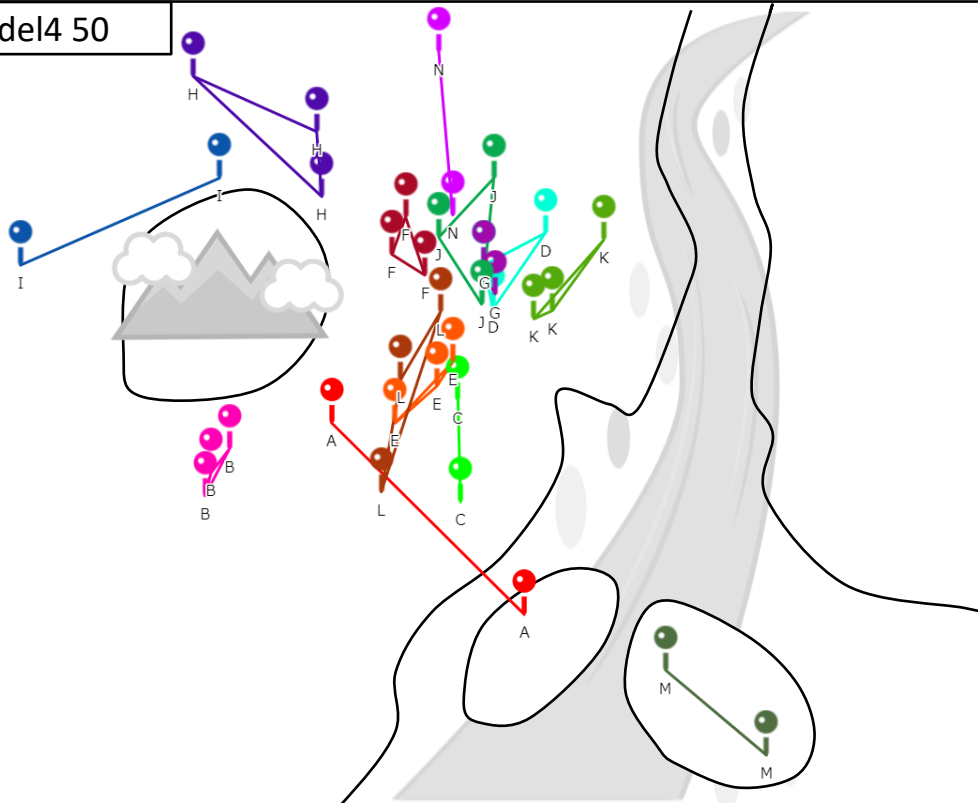
$x_{sjt} \in \{0, 1\} (\forall s \in S, \forall j \in J, \forall t \in T)$

4-4. モデル4($\alpha = 50$)における結果と評価

モデル4における結果を下に示す. なお, 本結果は前頁で定式化されたモデルをもとに, NUOPTにて実装及び計算実験を行った結果である.

本結果について手配者と議論した結果, $\alpha = 50$ とした数理モデル4により出された解は現場の手配結果としてそのまま利用できそうであるという意見を得ることができた. 場合によっては, そのままの利用ではなく, 数理モデルにより出された結果を微修正することで利用可能であることが判明した. 数理モデル4が実社会で十分活用可能であることがわかったため, 今後は数理モデル4により得られる解を実際の手配として利用してもらい, 有効性の評価を行っていく.

model4 50

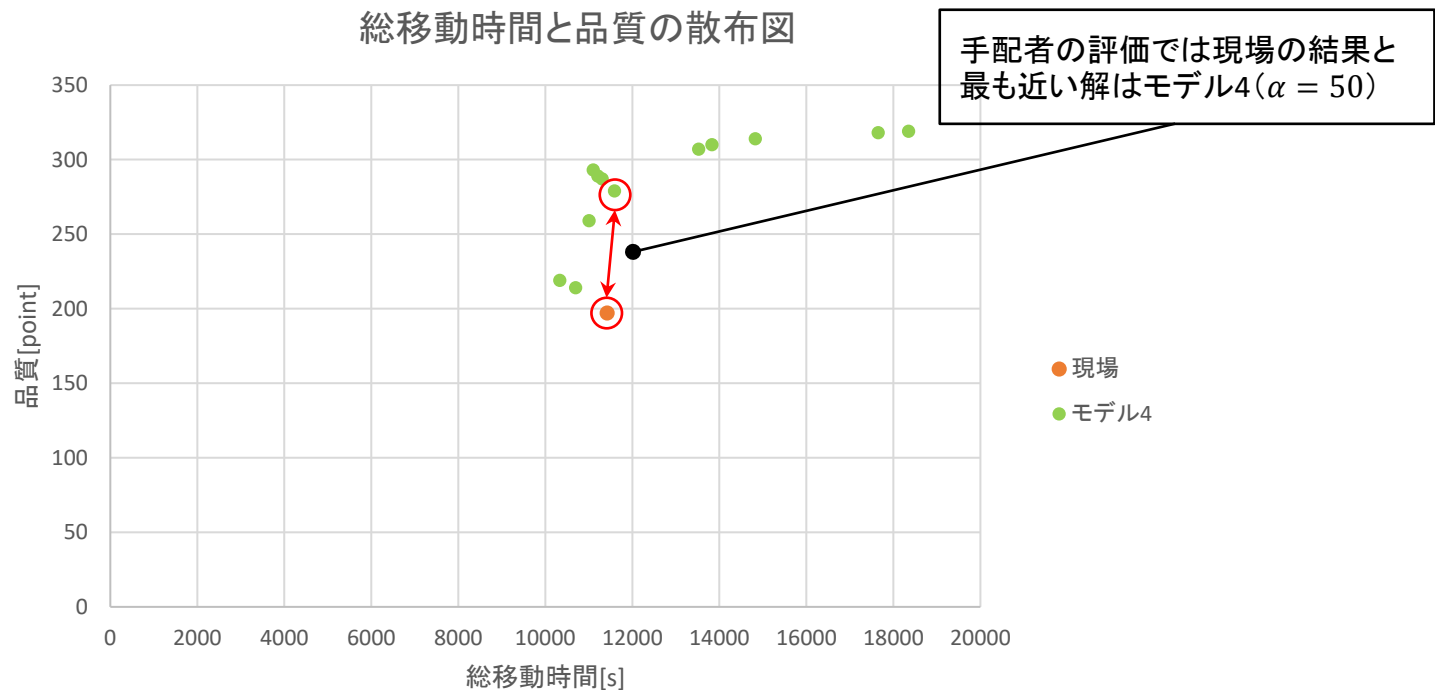


Staff	T1	T2	T3	総移動時間	総品質	総影響度
A	3	20	-	1,310	16	6
B	6	4	5	518	23	8
C	8	7	-	676	17	5
D	10	12	28	816	21	7
E	9	14	2	595	19	8
F	23	24	22	604	24	8
G	13	11	-	446	15	5
H	27	25	26	1,115	20	7
I	31	32	-	1,276	18	5
J	29	17	16	928	24	8
K	30	18	19	725	22	8
L	15	1	21	1,086	25	6
M	36	35	-	702	18	5
N	34	33	-	796	17	5
合計				11,593	279	91

【参考】4-4. モデル4における結果

モデル4における結果を下に示す。なお、本結果は前頁で定式化されたモデルをもとに、NUOPTにて実装及び計算実験を行った結果である。

本結果はモデル4における重み変数 α の値を変えることで、総移動時間を重視するモデルか、品質を重視するモデルかを決定している。下記は重み変数 α の値を変えることで得られた解の総移動時間と品質を散布図で表現した図である。



【参考】4-4. モデル4の定式化(制約化法)

■集合

S : 工事立合者の集合 $S = \{1, 2, \dots, n\}$

J : 立合工事の集合 $J = \{1, 2, \dots, m\}$

T : 立合工事の枠の集合 $T = \{1, 2, 3\}$

■要素

s : 工事立合者 $s \in S$

j : 立合工事 $j \in J$

t : 立合工事の枠 $t \in T$

■入力パラメータ

d_{j_1, j_2} : 立合工事 j_1 から立合工事 j_2 への移動時間 ($j_1 \in J, j_2 \in J$)

p_{sj} : 工事立合者 s が立合工事 j を行ったときに担保できる品質 ($s \in S, j \in J$)

i_j : 立合工事 j の難易度 ($j \in J$)

$\bar{D}$: 全ての工事立合者の総移動時間を $\bar{D}$ 以下とするパラメータ

■決定変数

x_{sjt} : 工事立合者 s が立合工事 j を枠 t に行うならば1, そうでないならば0

■目的関数

$$\max \sum_{s \in S} Q_s$$

■制約条件

工事立合者 s , 枠 t は1つ以下の立合工事が割当てられる: $0 \leq \sum_{j \in J} x_{sjt} \leq 1 \quad (\forall s \in S, \forall t \in T)$

立合工事は必ずいずれかの工事立合者に割当てられる: $\sum_{s \in S, t \in T} x_{sjt} = 1 \quad (\forall j \in J)$

総移動時間を制約とする: $\sum_{s \in S} D_s \leq \bar{D}$

各工事立合者が担当する立合工事の難易度の合計は9未満とする: $\sum_{t \in T} \sum_{j \in J} i_j * x_{sjt} < 9 \quad (\forall s \in S)$

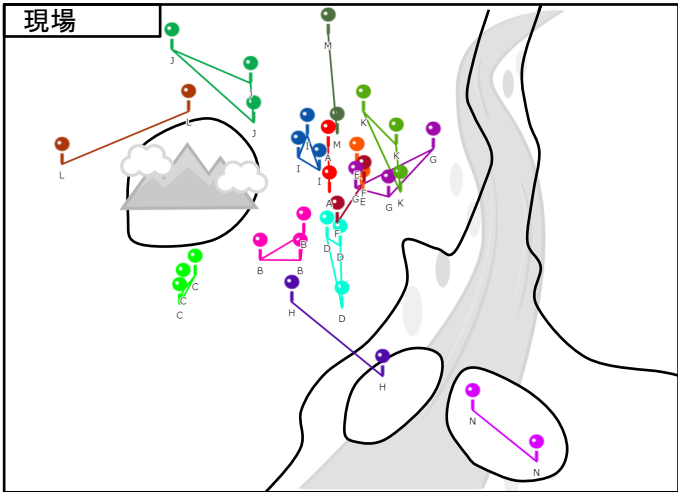
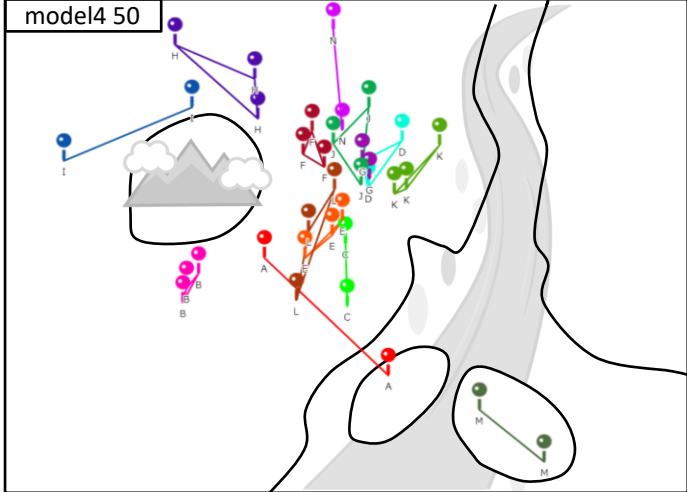
工事立合者 s の移動時間: $D_s = \sum_{t \in T} \sum_{j_1, j_2 \in J} d_{j_1, j_2} * x_{sj_1 t} * x_{sj_2 (t+1)} \quad (\forall s \in S)$

工事立合者 s が担保できる総品質: $Q_s = \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} p_{sj} * x_{sjt} \quad (\forall s \in S)$

$x_{sjt} \in \{0, 1\} \quad (\forall s \in S, \forall j \in J, \forall t \in T)$

4-5. モデル構築の結果まとめ

現場ヒアリング, モデル構築, 結果の議論を繰り返し行うことで, 現場の手配者が重要視している条件が明確になり, 最終的に現場の手配者が満足するような解を算出可能な数理モデルを提案することができた. これにより, 本稿の目的であった“**スキルの高い手配者の思考を再現可能なモデルを構築する**”ことができた.

過去の工事手配業務			研究成果による工事手配業務
長期効果	人件費	年間1億(関東エリア:年間6万件)	年間0.1億(関東エリア:年間6万件)(想定)
	品質	年間工事事故5件	年間工事事故0件(想定)
短期効果	総移動時間	11,424 s(3.2 h)	11,593 s(3.2 h)※1
	総品質	197 pt	279 pt※1
付随効果	手配時間	3時間×2回/1日	5分×2回/1日
	やり方	アナログ(手書き)	デジタル
	手配結果		

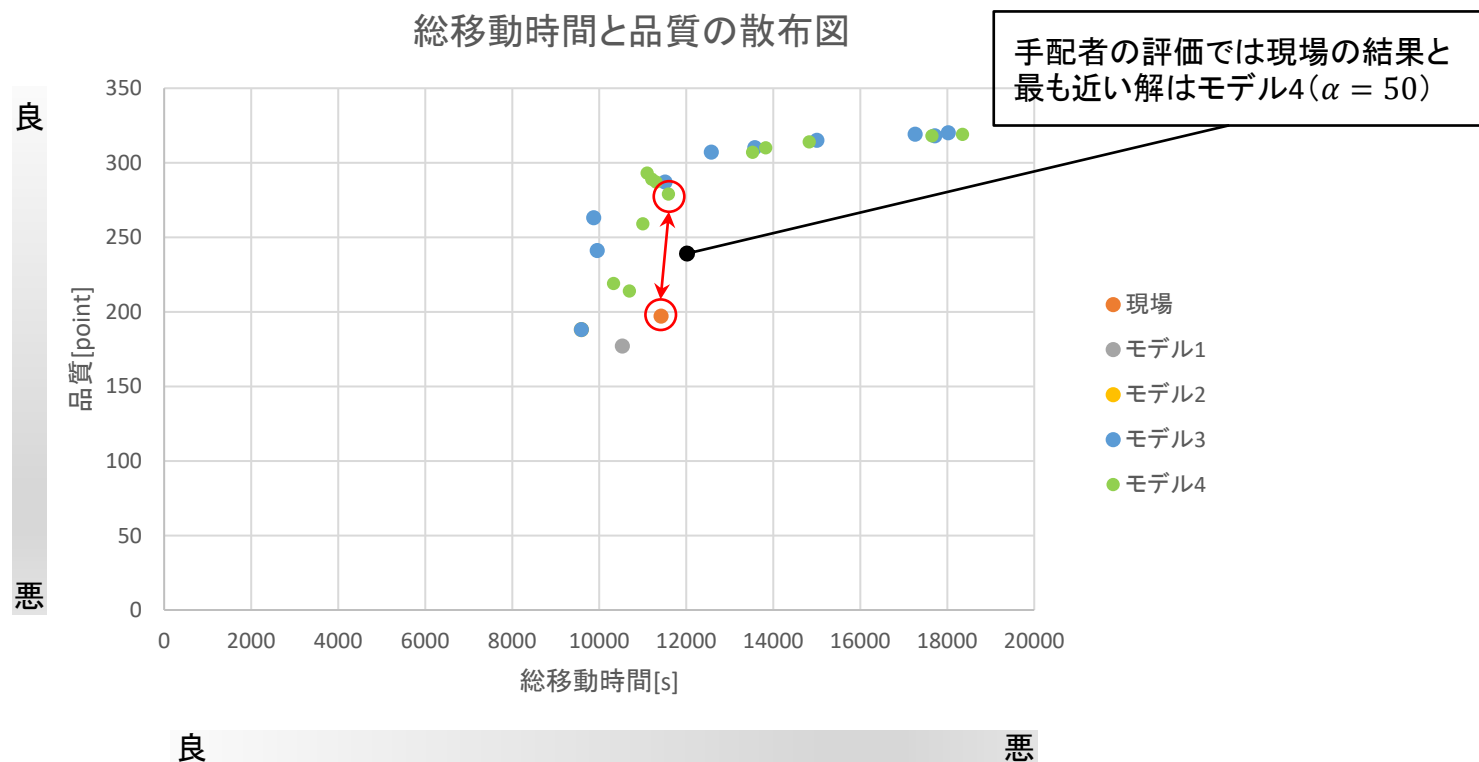
※1: モデル4で総移動距離を重視すると, 総合移動時間10,697 s, 総品質214 ptとなる.

4-5. モデル1からモデル4における結果

モデル1からモデル4における結果を下に示す。

ここで注目したいのは、散布図上の点でユークリッド距離が最も小さい点は、現場の結果と近いという評価は得られなかった点である。勿論、総移動時間と品質では数値のスケールが違うため、ごく自然である。

以降の章(6章)で、解同士の類似性に関する評価方法を提案する。



5-1. 集合被覆アプローチによるモデル4' (加重平均法)

■集合

S : 工事立合者の集合 $S = \{1, 2, \dots, n\}$

J : 立合工事の集合 $J = \{1, 2, \dots, m\}$

R : 実行可能ルート集合 $R = \{1, 2, \dots, m^3\}$

■要素

s : 工事立合者 $s \in S$

j : 立合工事 $j \in J$

r : ルート $r \in R$

■入力パラメータ

c_r : ルート r の総移動時間 ($r \in R$)

$q_{r,s}$: 工事立合者 s がルート r を担当したときに担保できる品質 ($r \in R, s \in S$)

h_r : ルート r の総難易度 ($r \in R$)

$a_{r,j}$: ルート r が工事 j を通る場合1, 通らない場合0 ($r \in R, j \in J$)

■決定変数

y_{rs} : 工事立合者 s がルート r を担当するならば1, そうでないならば0

■目的関数

$$\min \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} (c_r - \alpha * q_{r,s}) * y_{rs}$$

■制約条件

工事立合者 s は1つ以下の立合工事が割当てられる: $\sum_{r \in R} y_{rs} \leq 1 \ (\forall s \in S)$

立合工事は必ずいずれかの工事立合者に割当てられる: $\sum_{s \in S} \sum_{r \in R} a_{r,j} * y_{rs} \geq 1 \ (\forall j \in J)$

各工事立合者が担当する立合工事の難易度の合計は9未満とする: $h_r * y_{rs} < 9 \ (\forall r \in R, \forall s \in S)$

$y_{rs} \in \{0, 1\} (\forall r \in R, \forall s \in S)$

5-2. 数値実験 最適解求解までの計算時間の比較

数理最適化を用いた手配結果の計算時間を大幅短縮するモデルを提案し、厳密な最適解を得るまでの計算時間を大幅に削減した。

■計算環境

CPU: Intel Core i9-9900K CPU @ 3.60 GHz

Memory: 32 GB

Solver: Numerical Optimizer 21.1.0

問題例	工事件数[件]	人数[人]	モデル4の計算時間[秒]	モデル4'の計算時間[秒]
1	10	4	0.16	1.33
2	11	4	0.63	2.01
3	12	5	4.66	3.40
4	13	5	19.13	5.31
5	15	6	51.79	8.54
6	16	6	867.12	17.46
7	18	7	1267.93	35.29
8	20	8	20509.11	75.50
9	36	14	-	3472.71
10	40	15	-	8174.45

-:1ヶ月計算し続けても最適解の求解不可

【参考】5-1. 集合被覆アプローチによるモデル4' (制約化法)

■集合

S : 工事立合者の集合 $S = \{1, 2, \dots, n\}$

J : 立合工事の集合 $J = \{1, 2, \dots, m\}$

R : 実行可能ルート集合 $R = \{1, 2, \dots, m^3\}$

■要素

s : 工事立合者 $s \in S$

j : 立合工事 $j \in J$

r : ルート $r \in R$

■入力パラメータ

c_r : ルート r の総移動時間 ($r \in R$)

$q_{r,s}$: 工事立合者 s がルート r を担当したときに担保できる品質 ($r \in R, s \in S$)

h_r : ルート r の総難易度 ($r \in R$)

$a_{r,j}$: ルート r が工事 j を通る場合1, 通らない場合0 ($r \in R, j \in J$)

$\bar{D}$: 全ての工事立合者の総移動時間を $\bar{D}$ 以下とするパラメータ

■決定変数

y_{rs} : 工事立合者 s がルート r を担当するならば1, そうでないならば0

■目的関数

$$\max \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} q_{r,s} * y_{r,s}$$

■制約条件

工事立合者 s は1つ以下の立合工事が割当てられる: $\sum_{r \in R} y_{rs} \leq 1 \ (\forall s \in S)$

立合工事は必ずいずれかの工事立合者に割当てられる: $\sum_{s \in S} \sum_{r \in R} a_{r,j} * y_{rs} \geq 1 \ (\forall j \in J)$

総移動時間を制約とする: $\sum_{s \in S} \sum_{r \in R} c_r * y_{r,s} \leq \bar{D}$

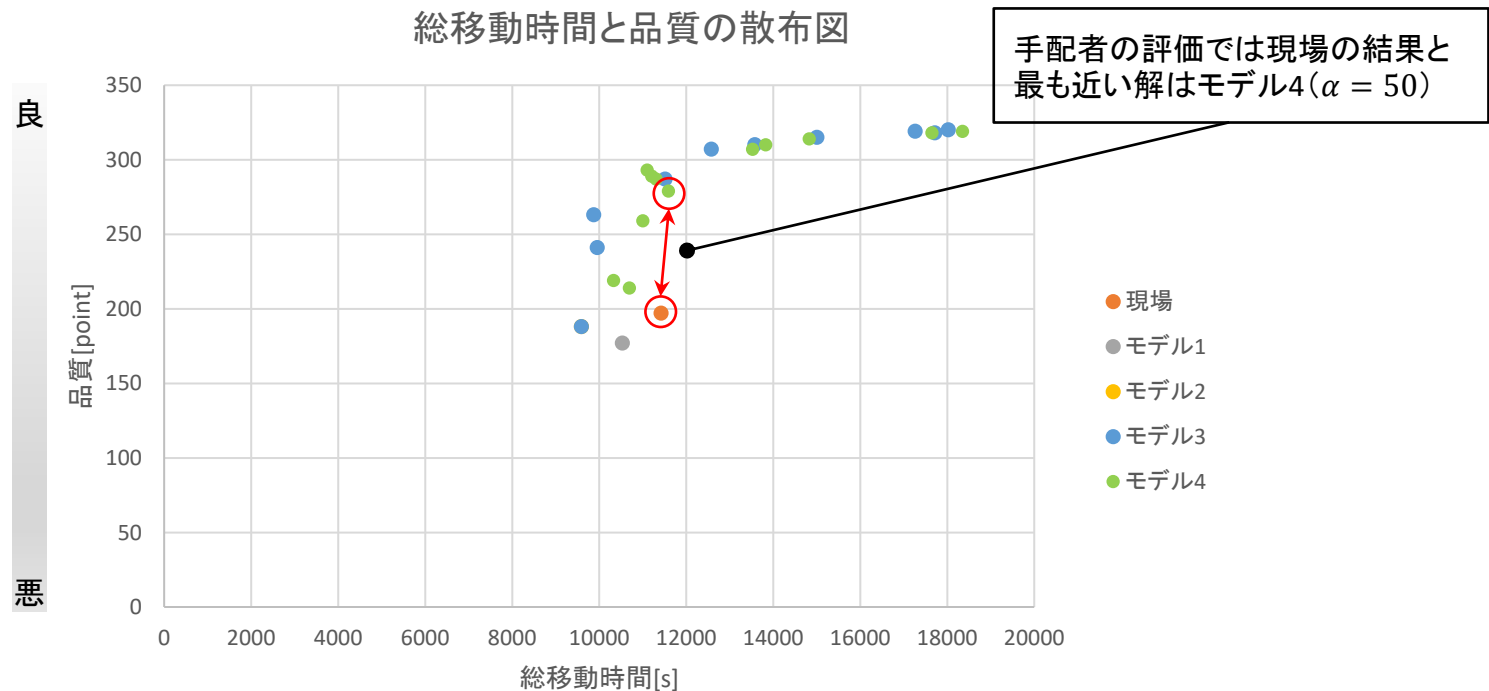
各工事立合者が担当する立合工事の難易度の合計は9未満とする: $h_r * y_{r,s} < 9 \ (\forall r \in R, \forall s \in S)$

$y_{rs} \in \{0, 1\} \ (\forall r \in R, \forall s \in S)$

6-1. 提案したモデルから得られる解の評価

数理モデル1から数理モデル4に改善するにあたり、各モデルから得られる解を現場の手配者に評価してもらい、実用性について**主観評価**を行った。

本章では、各モデルから得られる解と現場の手配者による結果の**解同士の距離を測定する手法**を提案し、モデルの改善により解同士の距離が数値的に良くなる様を示し、**客観評価**を行う。



6-2. 解の類似性についての尺度の提案

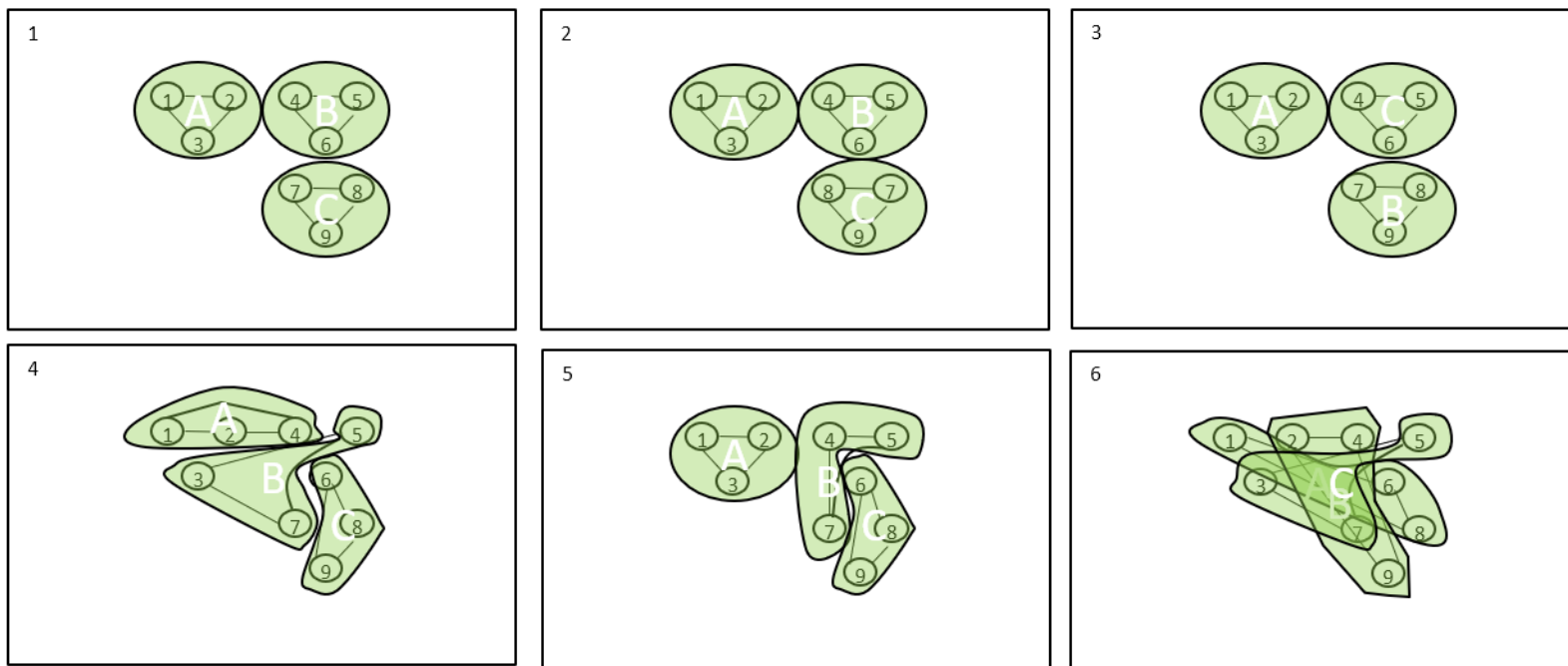
工事手配問題は、工事の集合と工事立会者の集合が与えられたとき、各人にいずれの工事を割当てるかを決める組合せ問題である。このとき、下記2つの観点により各人にいずれの工事を割当ててかが決定されている。

【観点1】各工事に着目したとき、いずれの工事の組合せで1つのルートを構築しているか

【観点2】各工事立会者に着目したとき、いずれの工事グループが割当てられているか

次頁以降で、下記工事手配問題の6つの解に対する解の類似度を算出する。

■工事手配問題の解の例



6-2. 解の類似性についての尺度の提案

【観点1】の工事の割当グループにおける解の類似性の算出方法について述べる。

1. 各解 X_n ($n = 1, 2, \dots, 6$)毎の各ルートを単純無向グラフ $G_{u_n} = (V, E_n)$ に変換する。
2. $G_{u_n} = (V, E_n)$ を隣接行列 A_{u_n} に変換する。
3. n つの隣接行列から任意に2つ選択し、差分を取る(2つのグラフの相異なる辺の総数を求める)。
4. 1. から3. を繰り返す $n \times n$ の類似度行列 H_A を求める。
行列内の各要素の値は小さいほど類似した解となる。

■6つの解の隣接行列

1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	1	0	0	0	0	0	0
3	1	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	1	0	0	0
5	0	0	0	1	0	1	0	0	0
6	0	0	0	1	1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	1	1
8	0	0	0	0	0	0	1	0	1
9	0	0	0	0	0	0	1	1	0

2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	1	0	0	0	0	0	0
3	1	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	1	0	0	0
5	0	0	0	1	0	1	0	0	0
6	0	0	0	1	1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	1	1
8	0	0	0	0	0	0	1	0	1
9	0	0	0	0	0	0	1	1	0

3	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	1	0	0	0	0	0	0
3	1	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	1	0	0	0
5	0	0	0	1	0	1	0	0	0
6	0	0	0	1	1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	1	1
8	0	0	0	0	0	0	1	0	1
9	0	0	0	0	0	0	1	1	0

4	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
2	1	0	0	1	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	0	1	0	0
4	1	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	1	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	1	1
7	0	0	1	0	1	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	1	0	0	1
9	0	0	0	0	0	1	0	1	0

5	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
2	1	0	1	0	0	0	0	0	0
3	1	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0	1	0	0
5	0	0	0	1	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	1	1
7	0	0	0	1	1	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	1	0	0	1
9	0	0	0	0	0	1	0	1	0

6	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	1	0	1	0
2	0	0	0	1	0	0	0	0	1
3	0	0	0	0	1	0	1	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	1	0	0	0	1	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0	1	0
7	0	0	1	0	1	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	1	0	0	0
9	0	1	0	1	0	0	0	0	0

■類似度行列

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	28	16	36
2	0	0	0	28	16	36
3	0	0	0	28	16	36
4	28	28	28	0	16	16
5	16	16	16	16	0	28
6	36	36	36	16	28	0

6-2. 解の類似性についての尺度の提案

- 【観点2】の工事立会者がいずれの工事を担当するか解の類似性の算出方法について述べる。
1. 各解 X_n ($n = 1, 2, \dots, 6$)を工事 j をいずれの工事立会者 s が担当するかを示す配列 B_u に変換する。
 2. n つの配列から任意に2つ選択し、差分を取る(相異なる工事数を計算する)。
 3. 1. から2. を繰り返す $n \times n$ の類似度行列 H_B を求める。
- 行列内の各要素の値は小さいほど類似した解となる。

■6つの解の隣接行列

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	1	1	1	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	1	1	1	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0	1	1	1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	1	1	0	1	0	0	0	0	0
B	0	0	1	0	1	0	1	0	0
C	0	0	0	0	0	1	0	1	1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	1	1	1	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	1	1	1	0	0	0
C	0	0	0	0	0	0	1	1	1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	1	1	1	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	1	1	0	1	0	0
C	0	0	0	0	0	1	0	1	1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	1	1	1	0	0	0	0	0	0
B	0	0	0	0	0	0	1	1	1
C	0	0	0	1	1	1	0	0	0

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0	1	0	1	0	0	0	0	1
B	1	0	0	0	0	1	0	1	0
C	0	0	1	0	1	0	1	0	0

■類似度行列

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	12	8	4	12
2	0	0	12	8	4	12
3	12	12	0	10	8	12
4	8	8	10	0	4	14
5	4	4	8	4	0	16
6	12	12	12	14	16	0

6-3. 実データへの適用結果

評価には4章で得られた結果のうち、散布図上で偏りのないデータ10個を用いる。

この10個の解同士の距離を提案手法により計算した結果を解の類似度行列[図1]に記す。なお、行列内の数値は[観点1]の H_A と[観点1]の H_B の組合せ和により求めた。本類似度行列をもとに、散布図上の解をクラスタリングした結果が[図2]である。本結果から10個におけるデータ間の類似度がわかる。例えば、モデル3のデータ7とモデル4のデータ10が非常に類似していることがわかる。

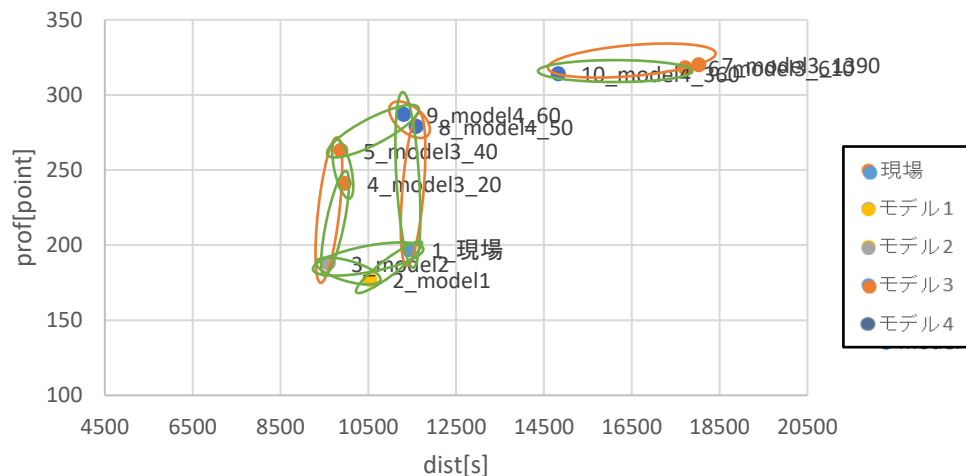
現場の結果と各モデルから得られる結果については、**現場の結果(データ1)とモデル4の結果(データ8)**が類似していることがわかり、**手配者の主観評価とも合致する結果となる。**

現場の結果と各モデルから得られる結果の類似度

		モデル1		モデル2		モデル3		モデル4				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	solve	1	0	70	64	84	78	100	92	60	64	104
1	1_現場	2	70	0	62	74	80	106	110	82	86	98
2	2_model1	3	64	62	0	64	54	100	112	76	72	104
3	3_model2	4	84	74	64	0	66	100	112	72	72	100
4	4_model3_20	5	78	80	54	66	0	86	106	70	62	90
5	5_model3_40	6	100	106	100	100	86	0	76	100	100	64
6	6_model3_610	7	108	110	112	112	106	76	0	108	92	52
7	7_model3_1390	8	60	82	76	72	70	100	108	0	60	100
8	8_model4_50	9	64	86	72	72	62	100	92	60	0	92
9	9_model4_60	10	104	98	104	100	90	64	52	100	92	0
10	10_model4_360											

[図1] 解の類似度行列

distとprofの散布図



[図2] 散布図と解のクラスタリング

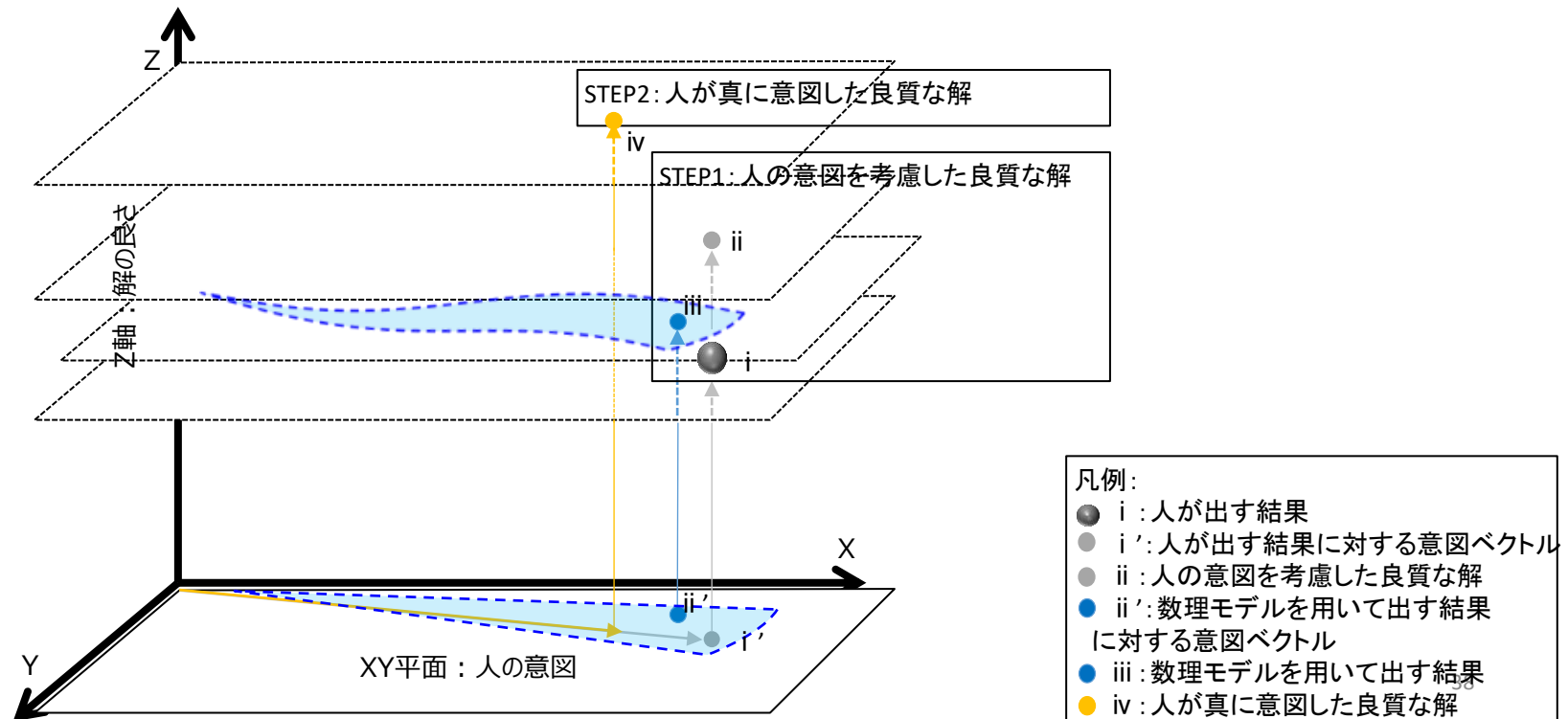
凡例

- : 非常に似ている解
- : 似ている解

7. 結論及び今後の展望

人手で意思決定が行われている工事手配業務に対し、**手配者の思考/嗜好を反映可能な実用的な解を提示可能な数理モデルを提案した**。同時に、集合被覆アプローチによるモデルを提案することで、高速に厳密解の求解を可能にした。さらに、**解同士の距離を計測する手法を提案し**、手配者の結果と数理モデルによる結果の類似度を定量的に示すことを可能にした。

次の課題は、本研究によって得られた解から人の意図ベクトルを分析し、**本来のあるべきルールで定義されたモデルを算出すること**、さらには、**人が出す結果と数理モデルを用いて出す結果を自動的に行う方法を検討することである**。



参考文献

■国土交通省 維持管理に関する現状と課題

http://www.nilim.go.jp/lab/pbg/siryou/20181212_hatyusyasekinin_ijikanribukai/301212_siryou2.pdf

■NTT 西日本: 管路・電柱等

<https://www.ntt-west.co.jp/open/99guidebook/pdf/2-6syo.pdf>

■月刊ビジネスコミュニケーション: ワンストップサービスを提供するインフラネットのIT システム群

<https://www.bcm.co.jp/magazine/00-02/html/052.html>

■高須賀将秀, 吉田寛: 個人能力差を考慮した開発における人員資源割当問題に対する解法の提案 (IPSJ SIG Technical Report, Vol.2017-MPS-112 No. 26, 2017)

■池上敦子: 問題把握の難しさ (特集『21 世紀を最適化する女性たち』, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 51, No. 7, pp. 388-391, 2006).

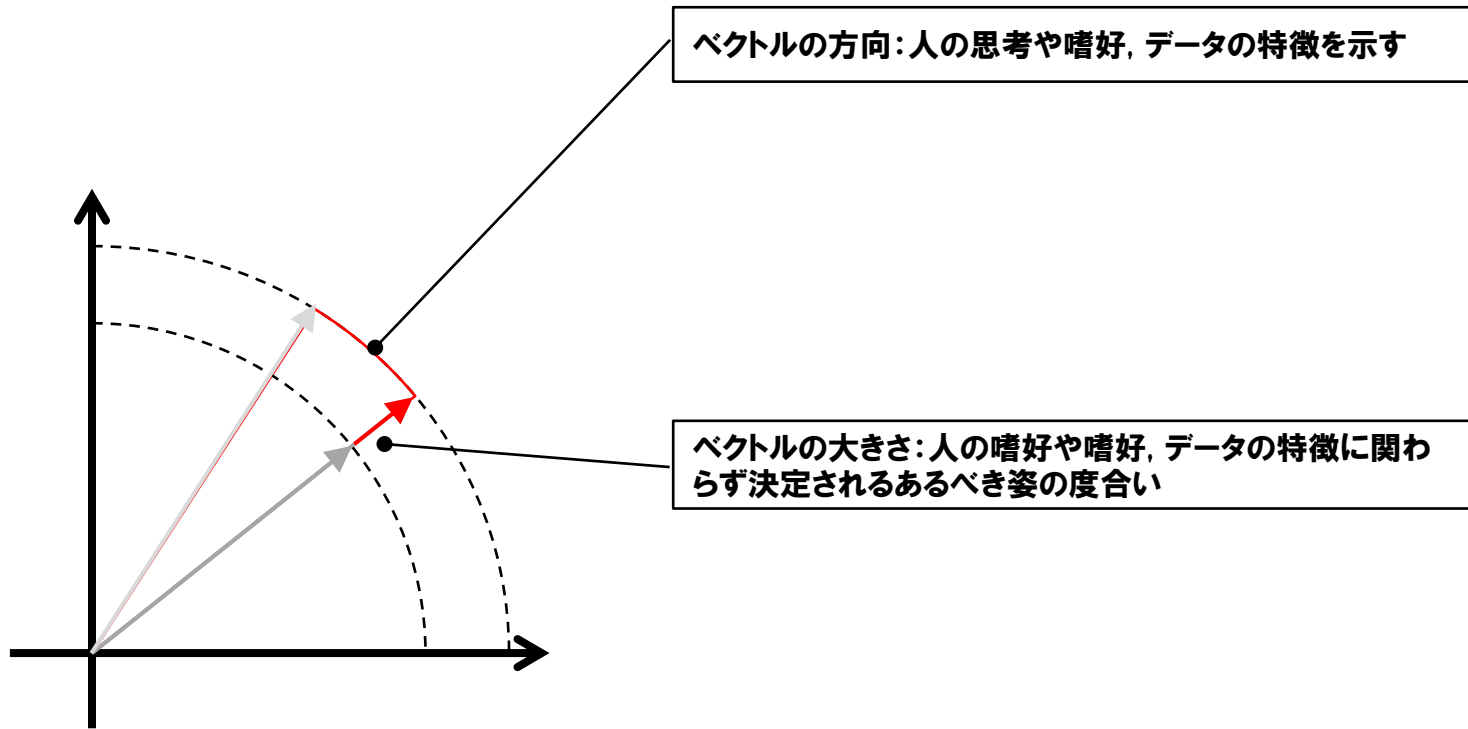
■橋本秀樹, 江崎洋一, 柳浦睦憲, 野々部宏司, 茨木俊秀, Arne Lokketangen: 多制約配送計画問題に対する集合被覆アプローチ (IPSJ SIG Technical Report, 2007).

【別紙】人の意図を表すベクトルについて

人の意図を表すベクトル(意図ベクトル)について定義する.

ベクトルの方向: 人の思考や嗜好, データの特徴の方向性

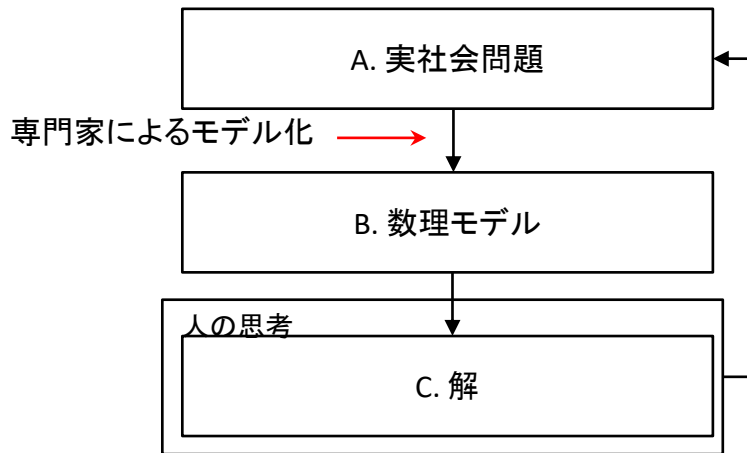
ベクトルの大きさ: 人の嗜好や嗜好, データの特徴に関わらず決定されるあるべき姿の度合い



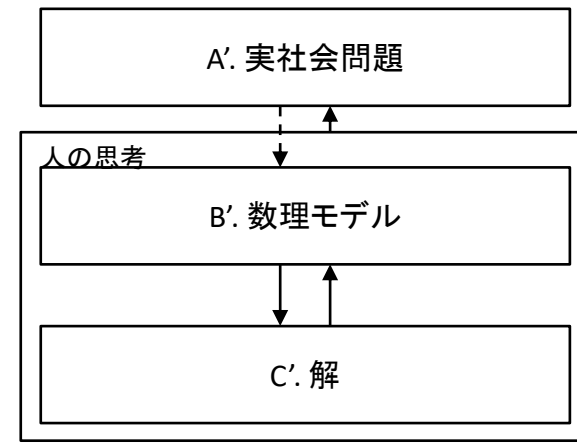
【付録】数理モデル構築のノウハウ集

数理モデル構築には、実社会問題を数理モデル化し、人の思考/嗜好に則した解を提示するトップダウン型の構築手法と人の意図(思考/嗜好)を反映可能なモデル化を行い、解を提示するボトムアップ型の構築手法に分類される。

しかしながら、人の意図を反映可能な動的かつ汎用的な数理モデルの構築手法は実在しておらず、トップダウン型の数理モデル構築手法により、専門家と実社会問題に係わっている現場の意思決定者が互いに協力し合うことで問題解決を図っている。しかしながら、トップダウン型数理モデル構築手法は膨大な人的コストと時間的コストを要しており、今後は自律的にモデル操作可能なボトムアップ型数理モデル構築手法が求められてくるであろう。



トップダウン型数理モデル構築手法



ボトムアップ型数理モデル構築手法

【付録】数理モデル構築のノウハウ集

トップダウン型数理モデル構築手法は膨大な人的コストと時間的コストを要するため、少しでも負担を減らすために今回のモデル化で得たノウハウを記す。

- ・モデルはシンプルに、変数や制約は少ないほど良い。
- ・定式化を行うときは、需要側の要件と供給側の要件に分類する。
- ・ハード制約とソフト制約を明確にする。場合によっては、ハード制約が不要な制約であることもある。
- ・多目的な場合は、何に基づいて算出した解かを明確に説明できるようにする。
- ・解の提示は性質の違うものを3～5個提示すると良い。提示した中に現場の求める解がない場合でも、提示した3～5個の解が次のモデルのヒントとなる。
- ・現場の意思決定者により数理モデルにより得られる解が納得してもらえない場合は、的を絞ってどこの組合せが使えないかということとその理由を簡易に聴く。
- ・数理モデルにより得られる解の良し悪しは明確にする。また、同時に解の良し悪しを客観的に定量評価可能なものさしを検討すること。そうすることで、現場の人へのヒアリングのコストを削減することができる。