

2011 / 11 / 18

線形計画法を用いた
エンジン適合試験の効率化支援

株式会社 小野測器
村瀬 道夫

- 1 会社紹介
- 2 エンジン適合試験
- 3 応答曲面法による適合
- 4 エンジン運転時の課題
- 5 線形計画法の活用
- 6 まとめ

1. 会社紹介

1-1. 概要



(本社・ソフト開発センター)

設立 : 1954年1月20日(昭和29年)
資本金 : 71億円
売上高 : 91億円(2010年度)
従業員数 : 689名(グループ全体)
上場 : 東証第一部

ONOSOKKI

株式会社 小野測器

<http://www.onosokki.co.jp>



(テクニカルセンター)

事業内容

1954年国産初のジェットエンジン用回転計を開発したことにより、その歴史がスタートしました。計測分野でのデジタル信号処理の草分けとなりました。

現在は、自動車業界における研究開発・生産技術領域を中心とした計測器・性能 / 耐久試験装置の製造販売を行っております。

1. 会社紹介

1-2. 製品の例

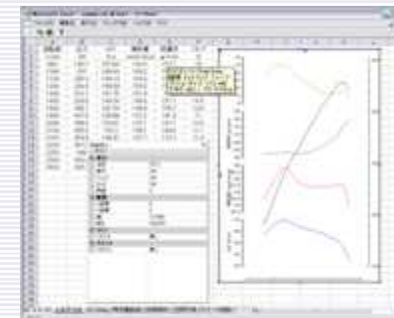
燃料流量計(連続重量、連続容積、間欠重量)



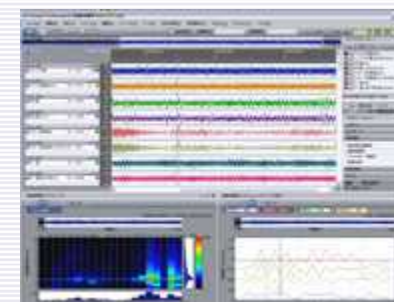
FFTアナライザー



O-Chart(グラフ作成)



Oscope(時系列データ解析)



Sensing

Analysis

Measurement

Control

寸法・変位計測



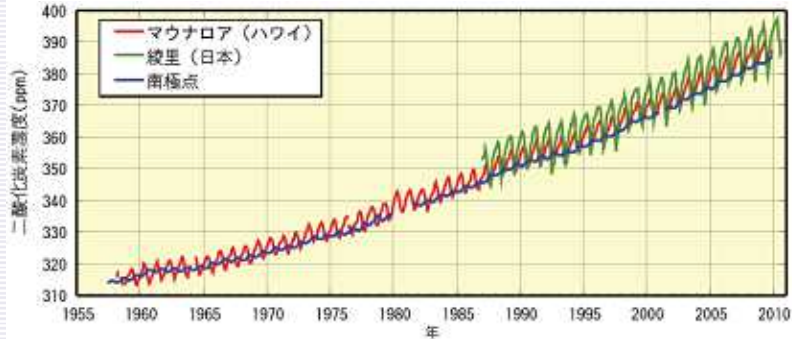
回転加振ベンチ



2. エンジン適合試験

2-1. エンジンをめぐる状況

大気中二酸化炭素濃度の増加



気候変動監視レポート2010(気象庁)

ただし二酸化炭素濃度増加の原因には火力発電等もあり、自動車の影響はあくまでその一部です

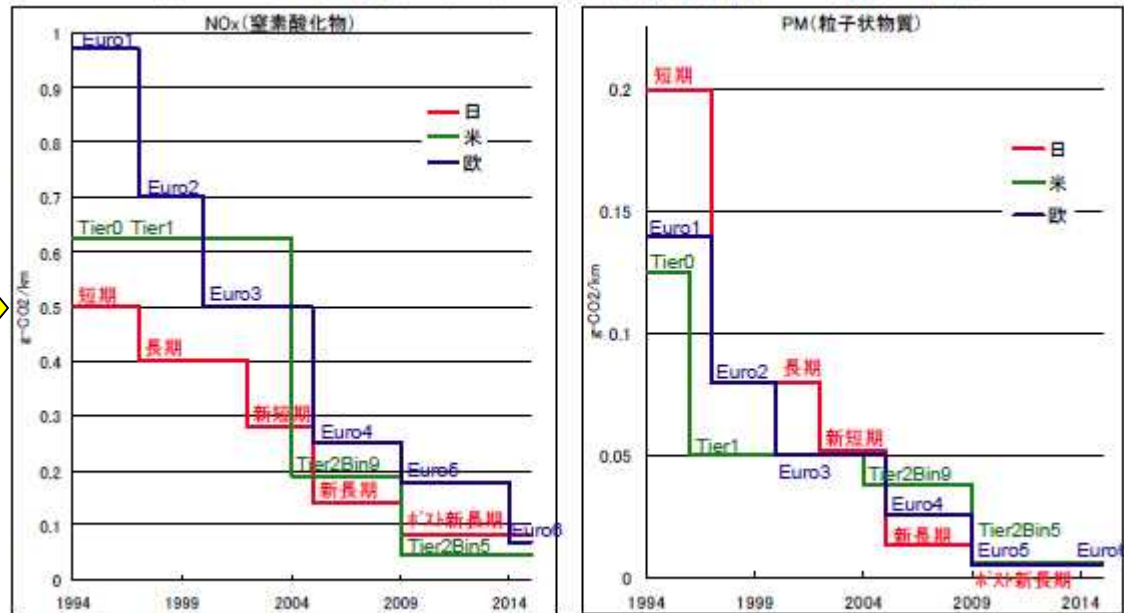
SPM(浮遊粒子状物質)等による健康被害の解明

自動車保有台数の増加



日本の長期統計12-10 車種別保有自動車数

図3-4: 日米欧のディーゼル乗用車排出ガス規制の推移



(出典: 各種資料より経済産業省作成)

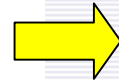
燃費・排ガス規制の強化が進む

2-2. 燃費・排ガス削減の工夫

燃料噴射時期の遅延	火花点火エンジンにおける点火時期の遅延と同様、燃焼温度が低下するため、NO _x の生成が抑制される。特に、直接噴射式においてその効果が大きい。しかし、完全燃焼が妨げられ、燃料消費率が増加し、黒煙の排出が増加する。
燃焼室の改善	粒子状物質は不均一な燃料の燃焼により発生するので、燃焼室の形状を改善によって、均一な混合気の形成を促進する。
吸気系の改善	吸気により燃焼室に激しい流動を起こすことで、短期間に均一な混合気の形成を促進する。
噴射系の改善	高圧噴射により噴射時間を短縮し、燃料の霧化を促進することで、混合気の形成を促進する。
排気再循環方式 (EGR)	排気の一部を吸気側に還流する方式で、燃焼温度が低下し、NO _x の生成が抑制される。しかし、EGR量の増加とともに燃焼状態が悪化して燃料消費率が増加する等の問題がある
酸化触媒	CO、HC及びSOF(排出ガス中の微粒子のうち可溶有機成分)を酸化する。NO _x は処理できない。
ディーゼル排気微粒子除去フィルター (DPF)	セラミック等でできたフィルターで、ディーゼル排気微粒子(DEP)を捕集しこれをヒーターや触媒などの作用によって分解除去する装置。
NO _x 還元触媒	NO _x を触媒の作用により還元し浄化する

2-3. ECUパラメータの最適化

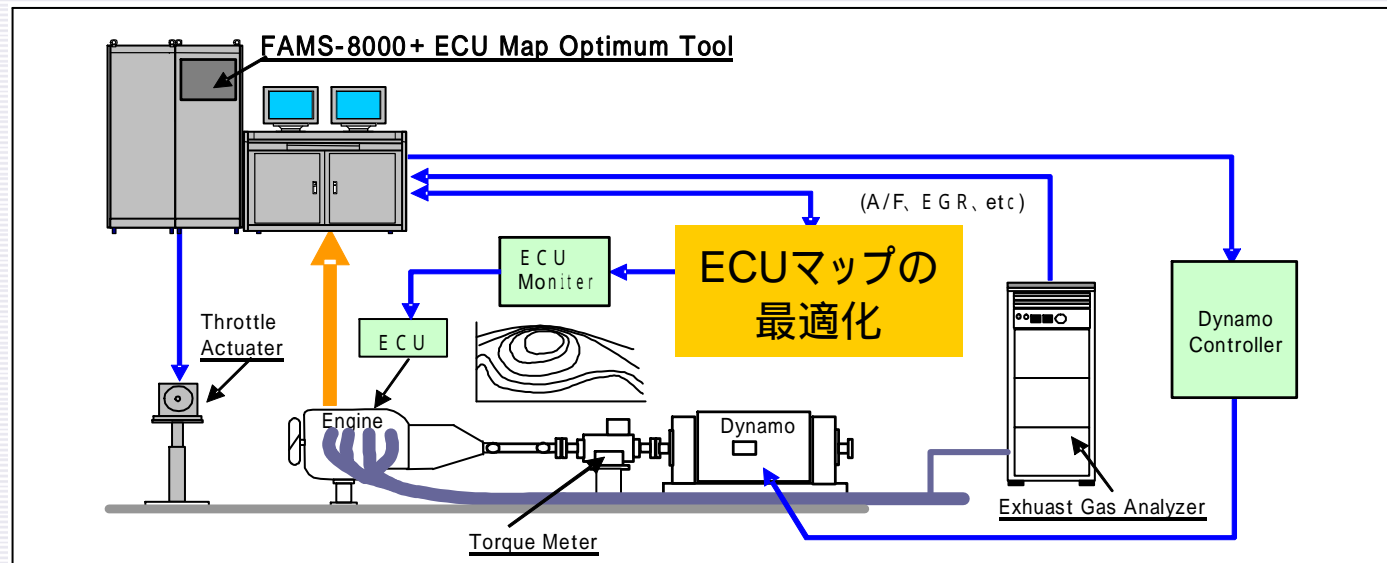
- ・燃料噴射時期の遅延
- ・吸気系の改善(過給)
- ・噴射系の改善(高圧噴射)
- ・排気再循環方式(EGR)



これらの制御量は、ECU(Engine Control Unit, Electric Control Unit)を用いて電子制御される



- ・ECUパラメータは年々増加しており、副作用や交互作用もあるため、最適な制御値を決めるのは非常に難しい
- ・下図のような試験装置を用いて制御値の最適化を行っている



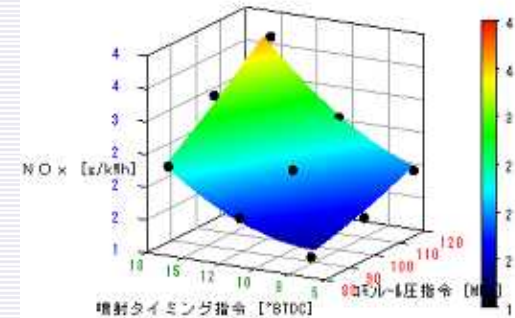
3-1. 応答曲面法(1) 概要

応答曲面 (Response Surface)

設計変数に対する応答変数の
近似曲面

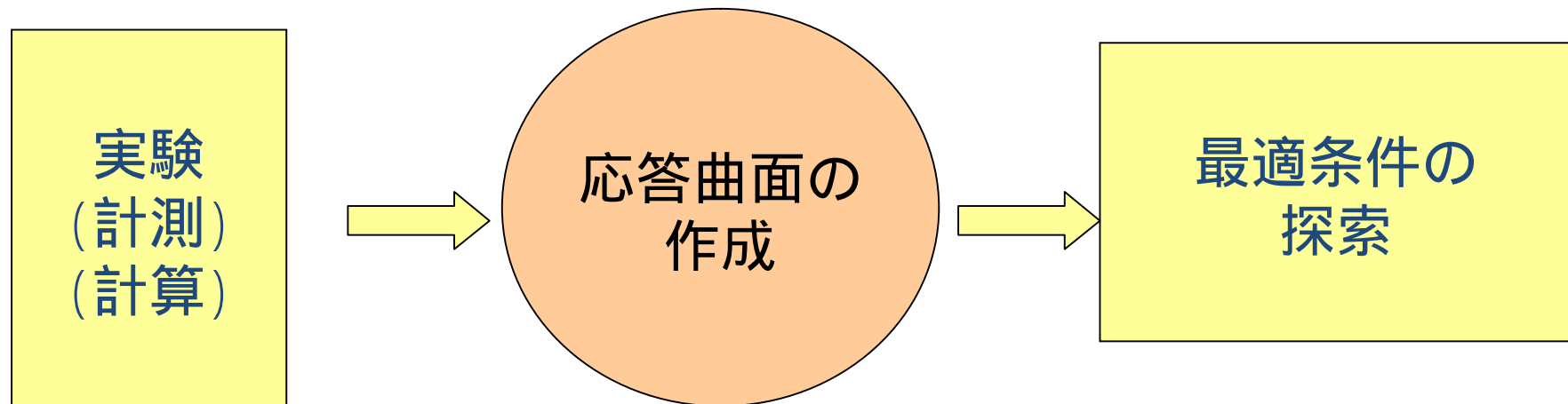
- ・燃料噴射時期
- ・燃料噴射圧 等

- ・燃費
- ・排ガス (NO_x, PM) 等



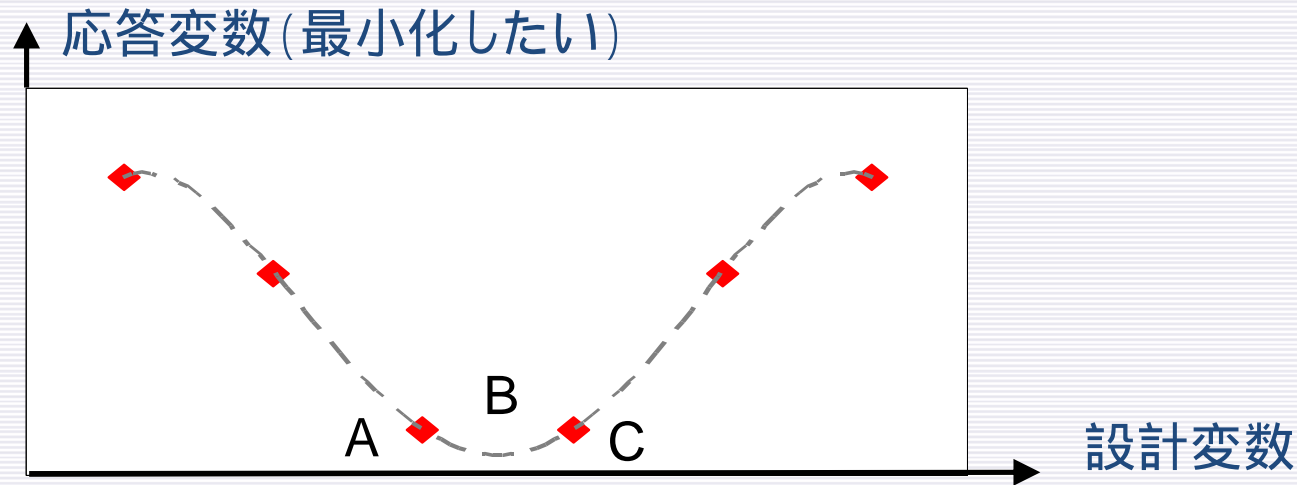
応答曲面法 (Response Surface Method)

応答曲面を作成して、最適条件を探索するための方法論

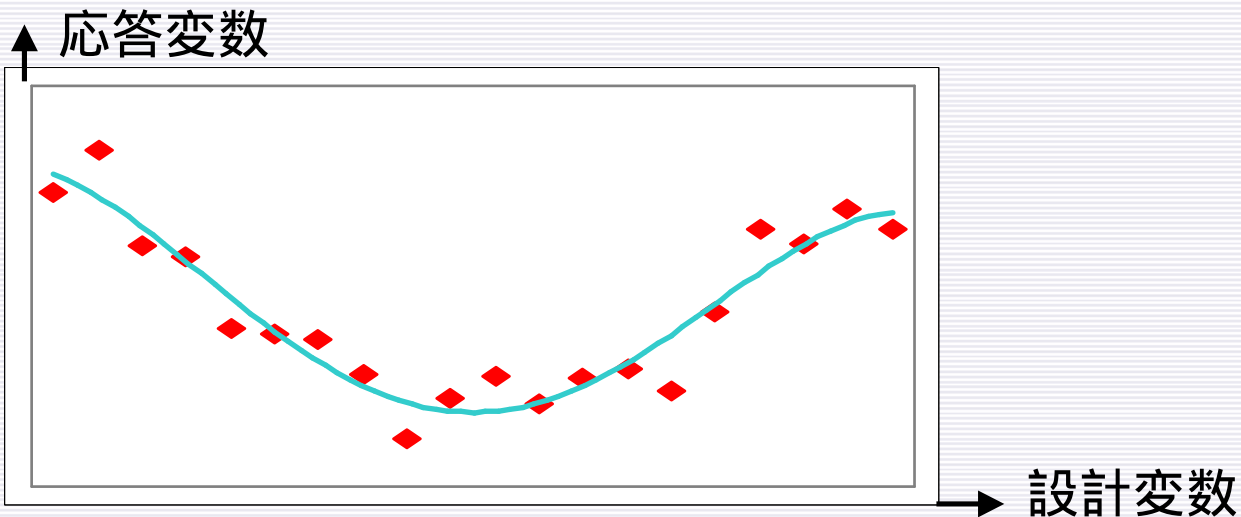


3-1. 応答曲面法(2) 利点

(1) 有限の計測点から、設計変数空間全体にわたる最適点を計算できる



(2) ノイズや計測誤差に対応できる



3. 応答曲面法による適合

3-1. 応答曲面法(3) エンジン適合への応用

(例) 制御パラメータ コモンレール圧、燃料噴射時期
最適化対象 排ガス(NOx)量 の場合

実験計画の作成

コモンレール圧や燃料噴射時期を
どのように設定して
実験するかを決める

計測

実験計画に基づいてコモンレール圧や
燃料噴射時期を制御してエンジンを運転し、
その時のNOx量を計測する

最適化

応答曲面を利用して、NOx量が最小となる
コモンレール圧や燃料噴射時期の値を
計算する

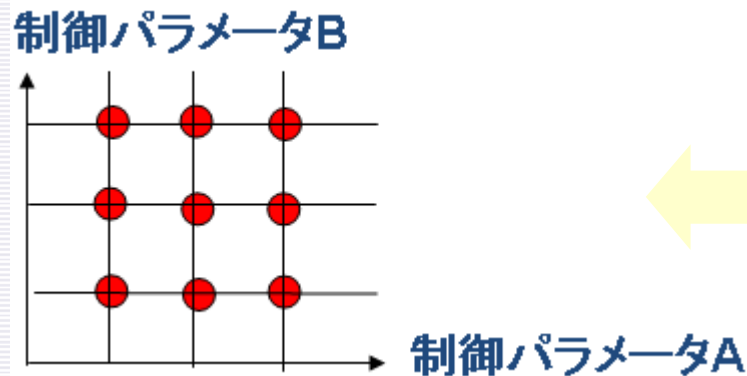
応答曲面の作成

計測結果を元に
コモンレール圧や燃料噴射時期に対する
NOx量のモデル(応答曲面)を作成する

3-2. 実験計画(1) 必要性

実験計画法 (Design of Experience)

- ・フィッシャー (1890 ~ 1962) 等により発展
- ・効率的な実験の方法を計画する



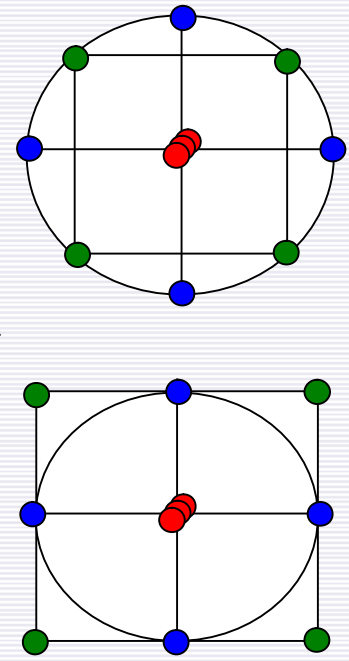
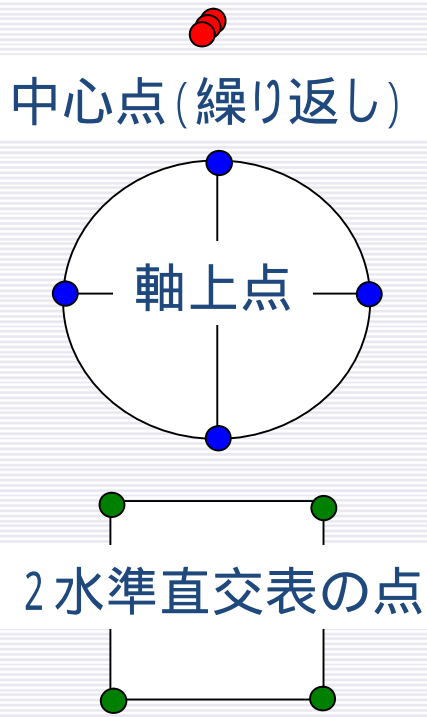
パラメータ数が少なければ
メッシュ上に計測点を
配置すれば良い

パラメータが増えると、メッシュの点数は爆発的に増加する

パラメータ数	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3水準メッシュの点数	9	27	81	243	729	2187	6561	19683	59049

3. 応答曲面法による適合

3-2. 実験計画(2) 例



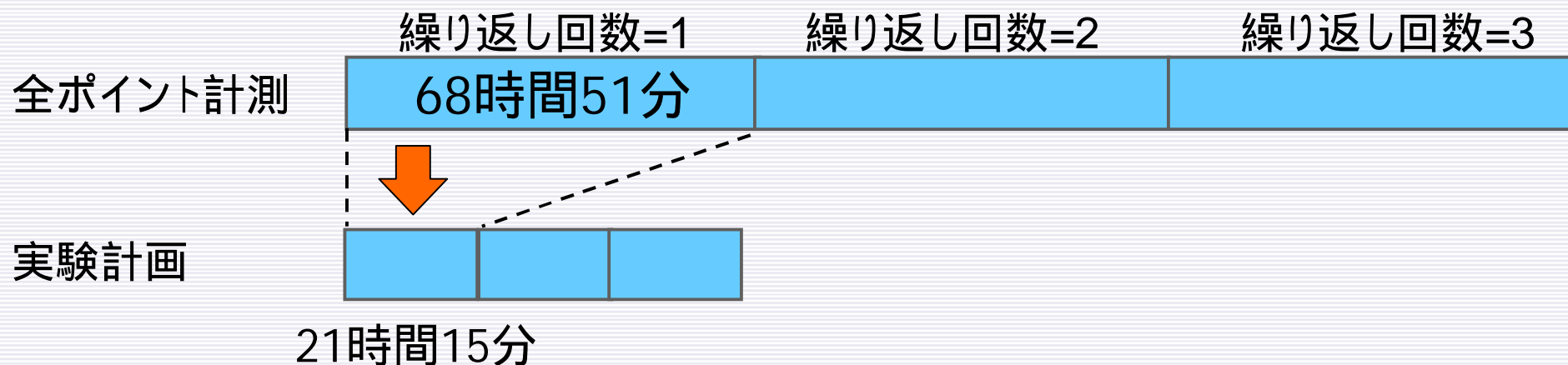
中心複合計画
(Central Composition)

面心立方格子計画
(Face Centered Cube)

パラメータ数	2	3	4	5	6	7	8
計画点数(中心点は1点とする)	9	15	25	27	45	79	81

3-3. 計測

実験計画により、実験時間を1/3以下に短縮できる。



パラメータ数=4、51モードの場合

実験計画なし 4131ポイント (68時間51分)

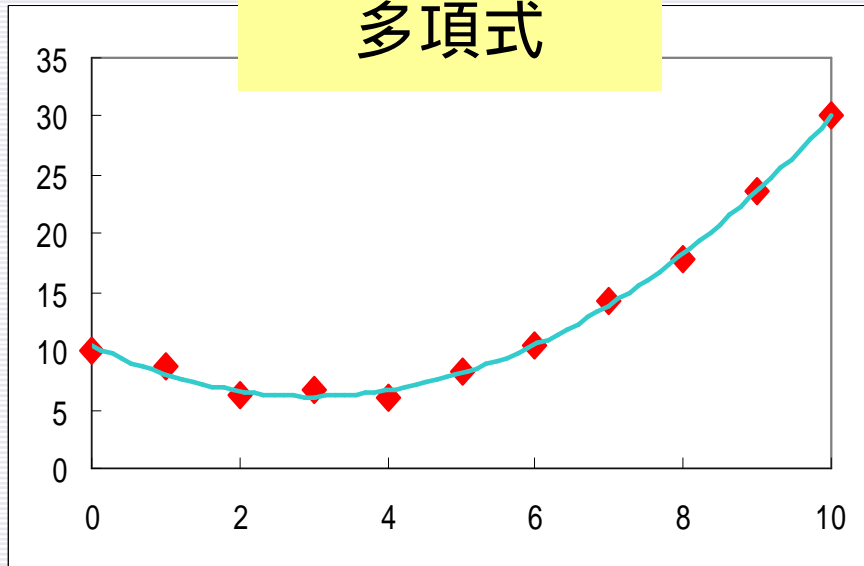
実験計画あり 1275ポイント (21時間15分)

1ポイントの計測時間を1分とする

3. 応答曲面法による適合

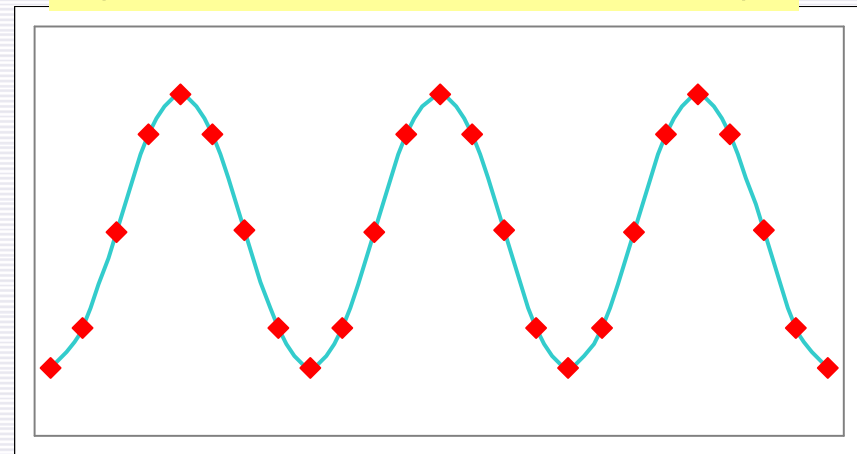
3-4. 応答曲面の作成

多項式



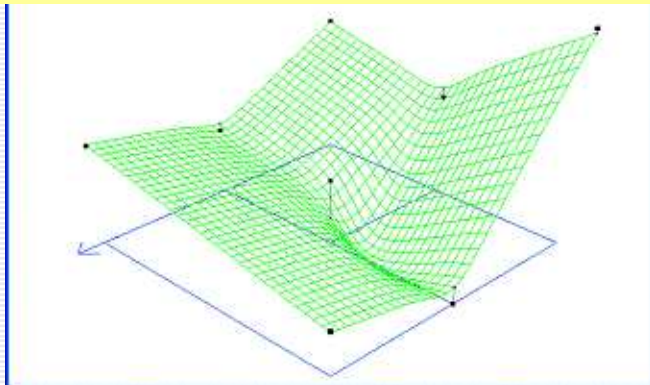
RBF

(Radial Basis Function)



LOLIMOT

(Local Linear Model Tree)



応答値の特性に合わせて、
適切な応答曲面を作成する

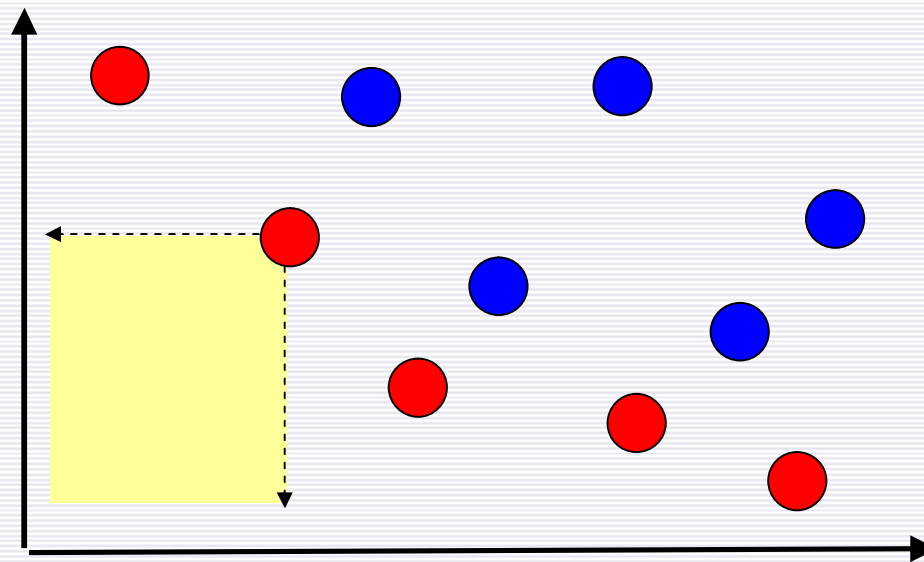
3-5. 最適化

NUOPTを活用

応答変数(燃費、排ガス等)を最適化(最小化)するための設計変数(ECU制御パラメータ)の値を求める

複数の応答変数を最適化する場合(多目的最適化)
下図のようなパレート解を計算して、ユーザーの価値判断に応じて、解を選択していただく

悪い
燃費
良い



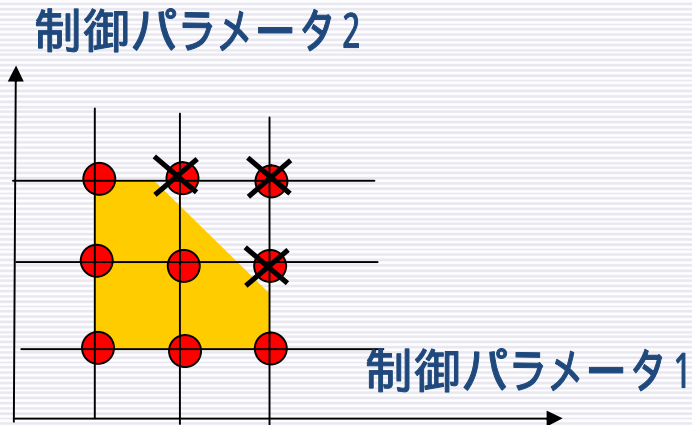
赤い点が
パレート解
(全ての目的を
これ以上同時に
改善できない解)
となる

少ない NOx 多い

4-1 限界点探索(1) 概要

エンジンは高温、高圧環境で高速で運転される

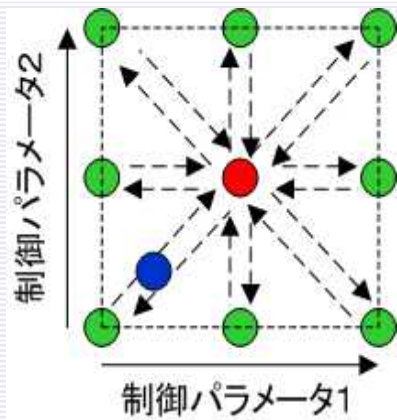
(例) 2000度以上、100気圧以上、毎分2000回転以上



運転可能領域

制御パラメータの組み合わせによっては装置が(過熱等により)運転不可能になることがある。
実験計画生成時には、そのような状況を防ぐため、制御可能領域(左図の橙色の領域)内に点を生成する必要がある

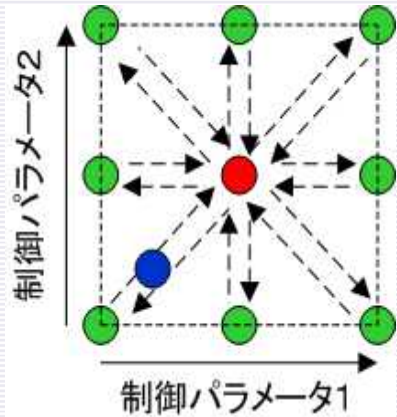
そのため



限界点探索

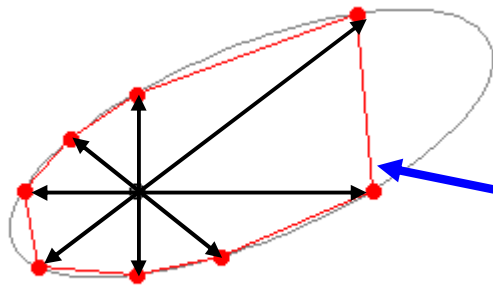
制御パラメータを徐々に動かしながら装置の運転可能性を確認し、限界まで来たら止める
「限界点探索」によって装置の運転可能領域を推定している。

4-1 限界点探索(2) 課題

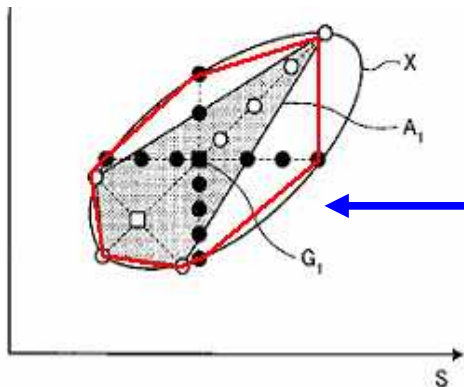


運転可能性を確認しながら徐々に制御パラメータを変化させるため、限界点探索は非常に時間がかかる。

従来の探索手法は、探索前に全ての探索方向を決めていたため、探索途中での結果を有効に活用できず、効率の悪い探索となってしまうことがあった。



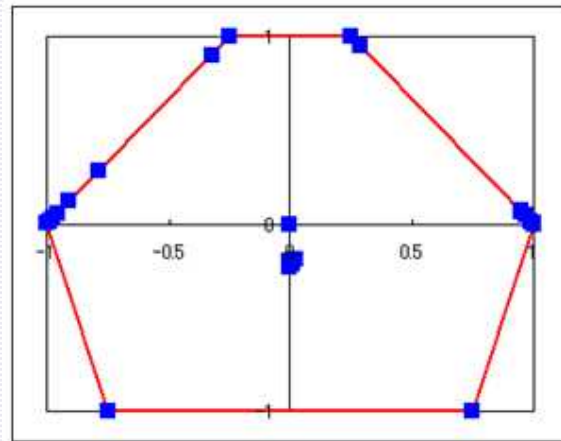
均等な8方向を探索すると、領域右上の部分十分に探索できない



既存の特許で、探索開始点を移動しているがやはり隙間が出てしまう

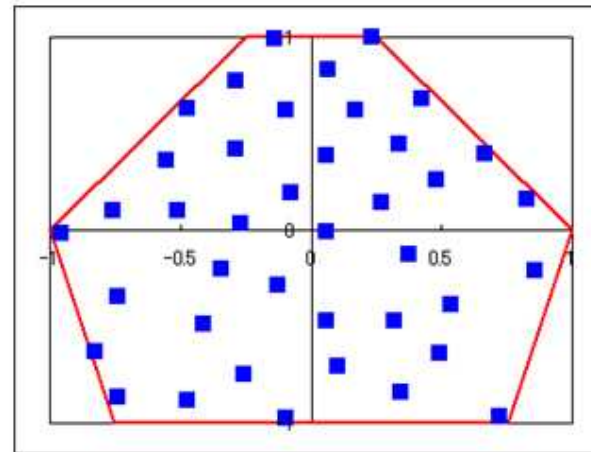
4-2 実験計画の課題

運転可能領域内に計画点を配置する必要がある
面心立方格子計画等は使用できない



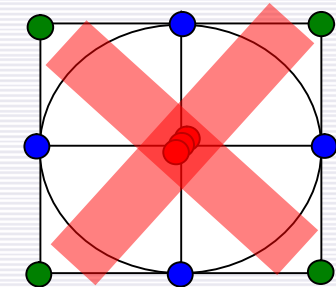
D最適計画

D効率が最も高くなるように
計画点を配置する。



空間充填計画

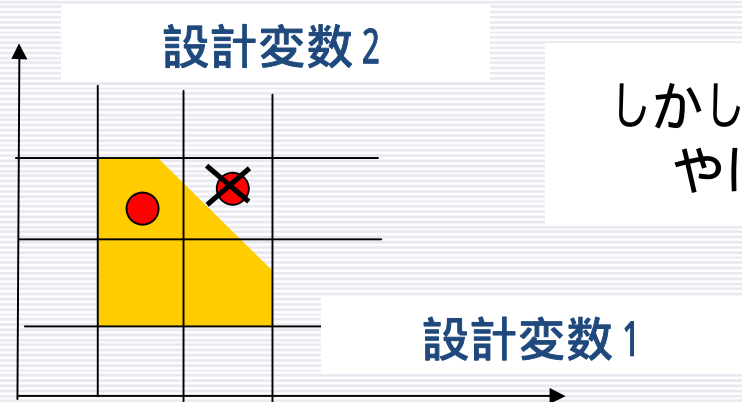
計画点同士ができるだけ
接近しないように計測点を配置する



制御可能領域内に効果的に計画点を配置できるが
8パラメータ以上になると効率が悪化する

4-3 最適化の課題

最適点も、運転可能領域内に求める必要がある



しかし、8パラメータ以上になると
やはり効率が悪化していた

8パラメータ以上の
領域内実験計画や最適化で
効率が悪化していた理由

…内部で境界面の式を計算してため

因子数	境界面の 計算時間
4	0秒
6	0秒
7	2秒
8	17秒
9	4分30秒
10	1時間55分

5-1 線形計画法

NUOPTを活用

線形計画問題 (Linear Programming)

等式制約 $Ax=b$

不等式制約 $x \geq 0$ (s.t. $x_1 \geq 0, \dots, x_N \geq 0$)

の元で、

目的変数 $w = c^T x$

を最小化する x と最小値 w を求める

1947年 単体法 (Danzig, 米)

・ 計算機を使用した最適化の草分けとなった問題

1984年 内点法 (Karmarkar, 印)

5-2 領域内外判定

点集合 $(\vec{D}_1, \dots, \vec{D}_N)$ から作られる凸境界と直線 PX (ただし P は凸領域の内点) の交点を求める

目的 t の最大化

制約 (1) $t \geq 0$

制約 (2) $t(\vec{X} - \vec{P}) + \vec{P} = \vec{Y}$

制約 (3) $\vec{Y} = \sum_{i=1}^N \lambda_i \vec{D}_i$

制約 (4) $\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$

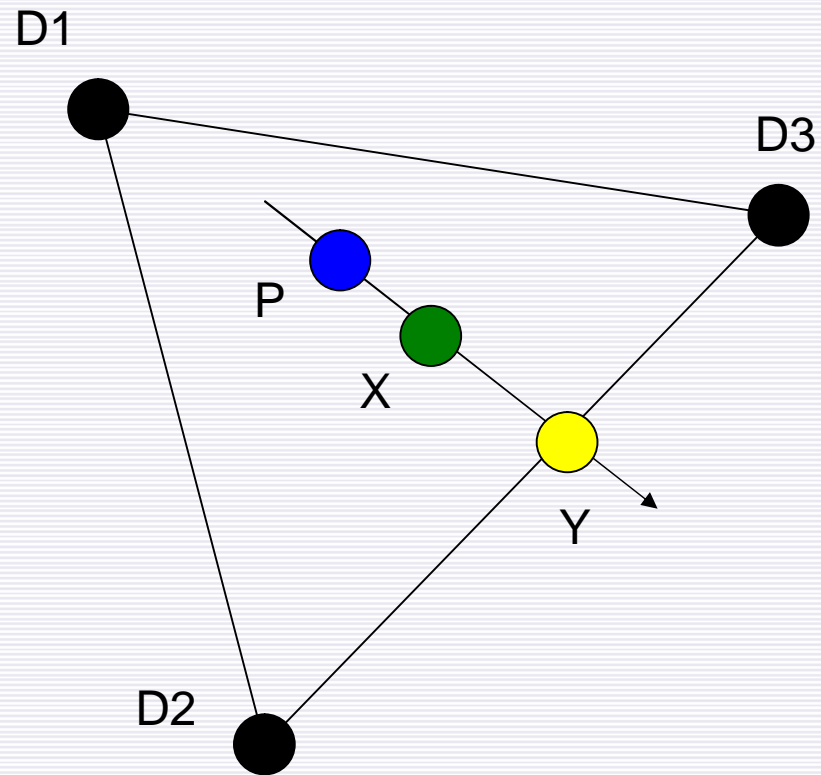
制約 (5) $0 \leq \lambda_i \leq 1 \quad i = 1, \dots, N$

結果 \vec{Y} は直線 PX と凸境界の交点

$t < 1$ なら \vec{X} は外点

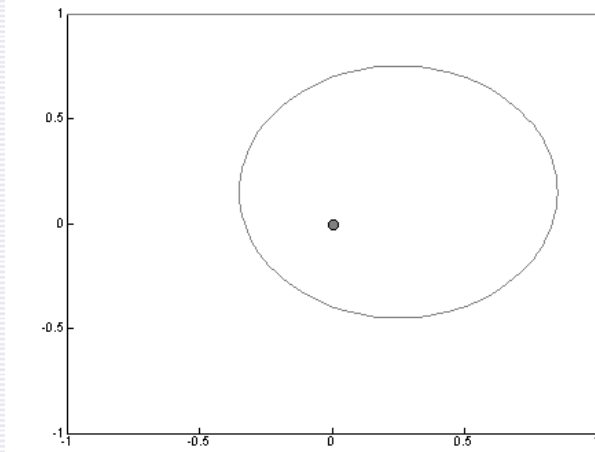
$t = 1$ なら \vec{X} は境界点

$t > 1$ なら \vec{X} は内点

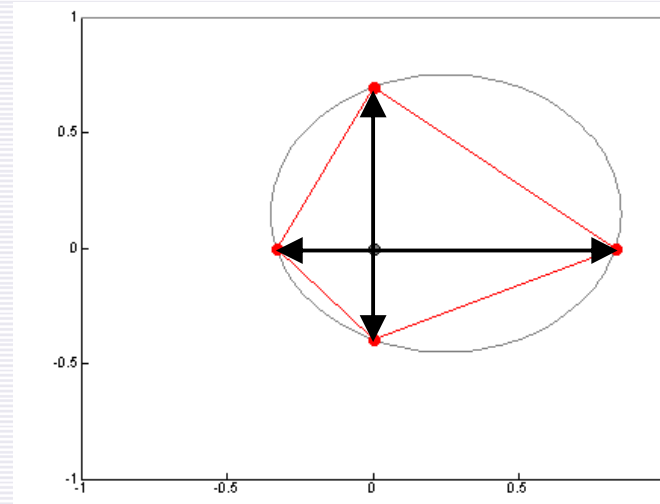


因子数	4	9	10
境界面の計算時間	0秒	4分30秒	1時間55分
線形計画法による計算	22秒	40秒	43秒

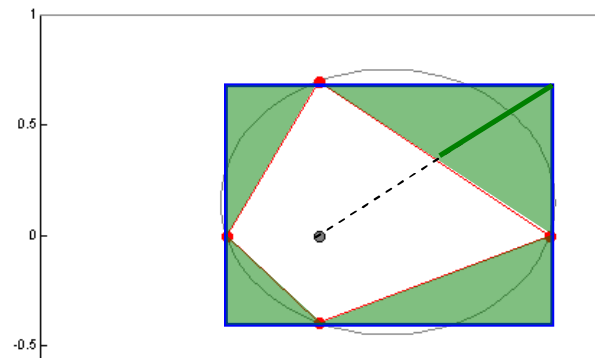
5-3 限界点探索の効率化(1)



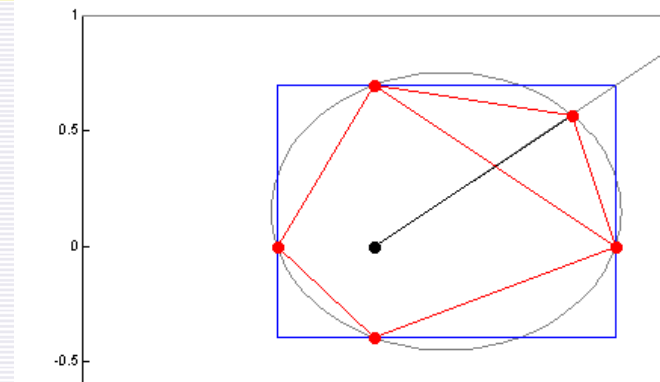
1. 図の楕円のような運転可能領域を中心点から探索することを考える



2. まずは軸方向に限界点探索を行う。赤線のような境界が作成される

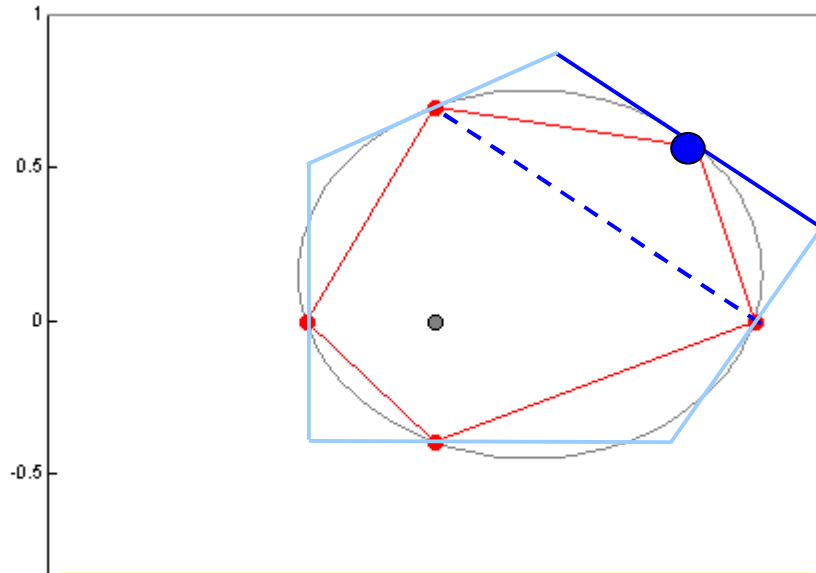


3. 大境界(図の青線)を計算し、境界ギャップ(緑三角形の面積)を計算



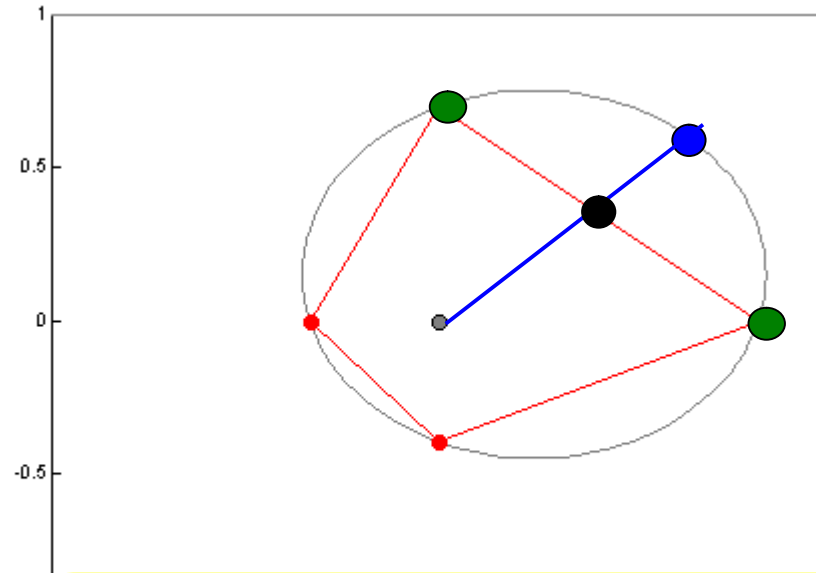
4. 境界ギャップが最大の方向に向けて探索を行う

5-3 限界点探索の効率化(2)



ある境界点(青点)を通る大境界の
辺(青線)の式を計算したい

まず点線の式を計算して、
青点を通るよう平行移動する

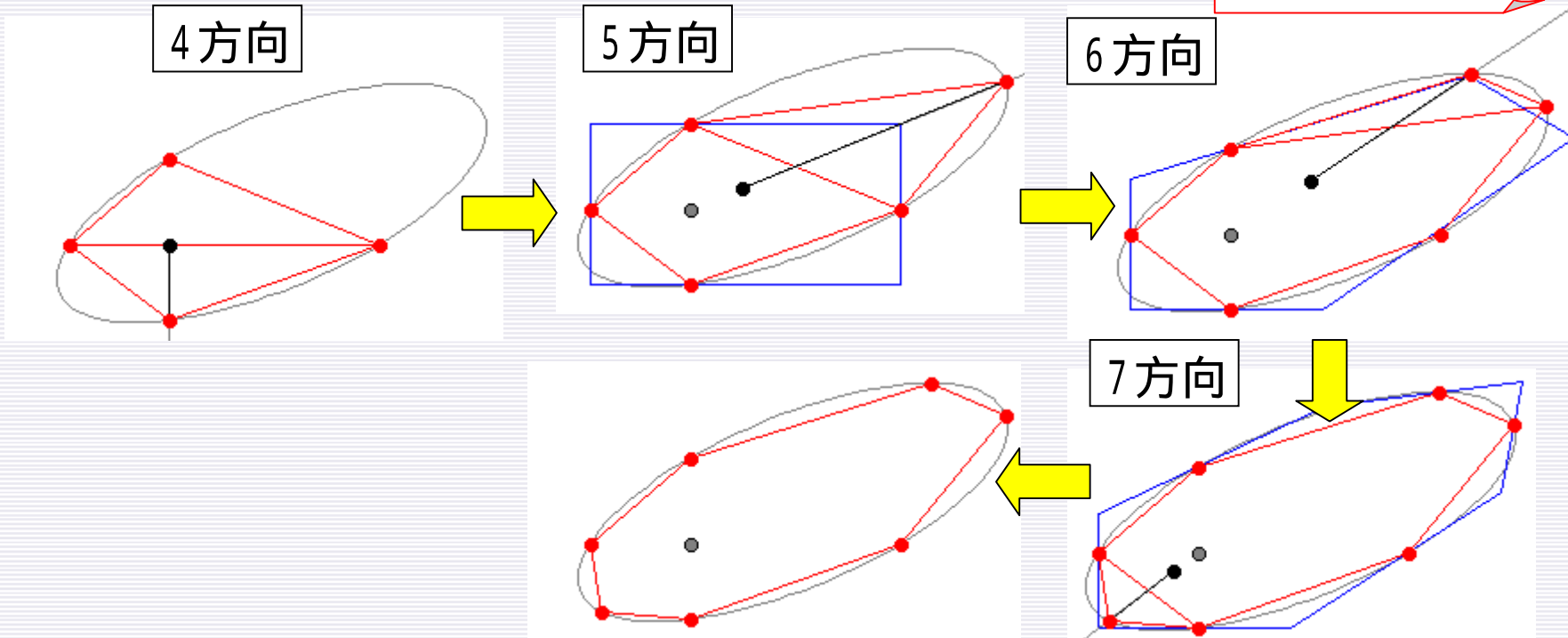


単体法(線形計画法)を用いて、
青線と(青点を除いて作成した)
赤境界との交点(黒点)を求めると、
緑点の座標も一緒に求まる。
ここから左図の点線の式が求まる

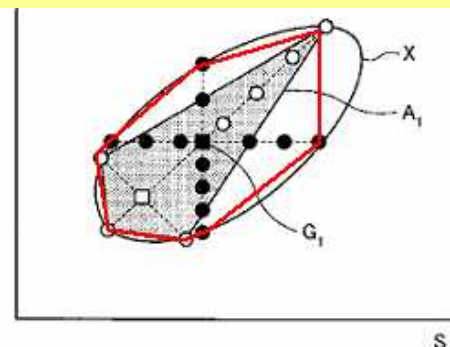
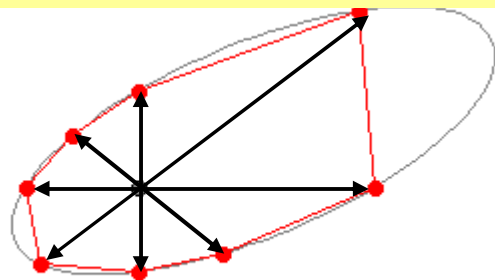
N次元では、辺(線)ではなくN-1次超平面を求めることになるが、
上と同様に計算できる

5-3 限界点探索の効率化(3)

特許出願中

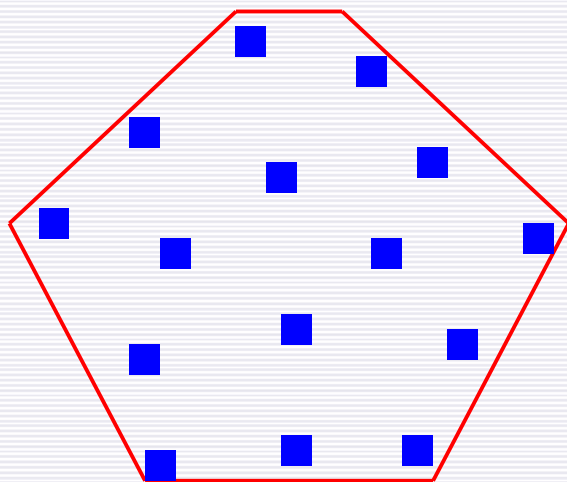


探索毎に柔軟に方向を変えられるため効率が良い
7方向への探索で、従来の8方向探索より良好な結果を得た

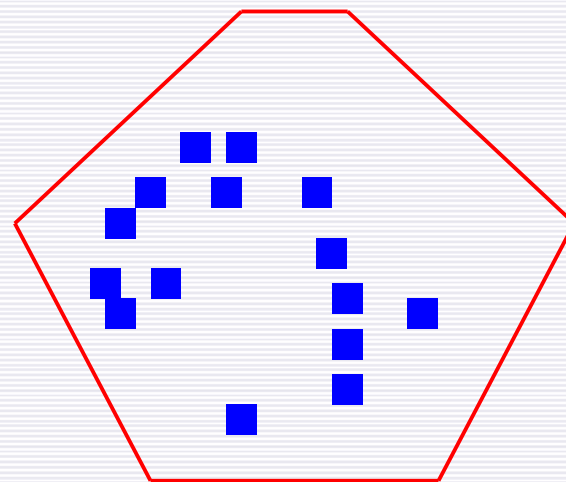


5-4 実験計画の効率化(1)

多数のパラメータによる複雑な制御可能領域内で、
散らばりの良い計画を高速に作成したい。



散らばりの良い計画

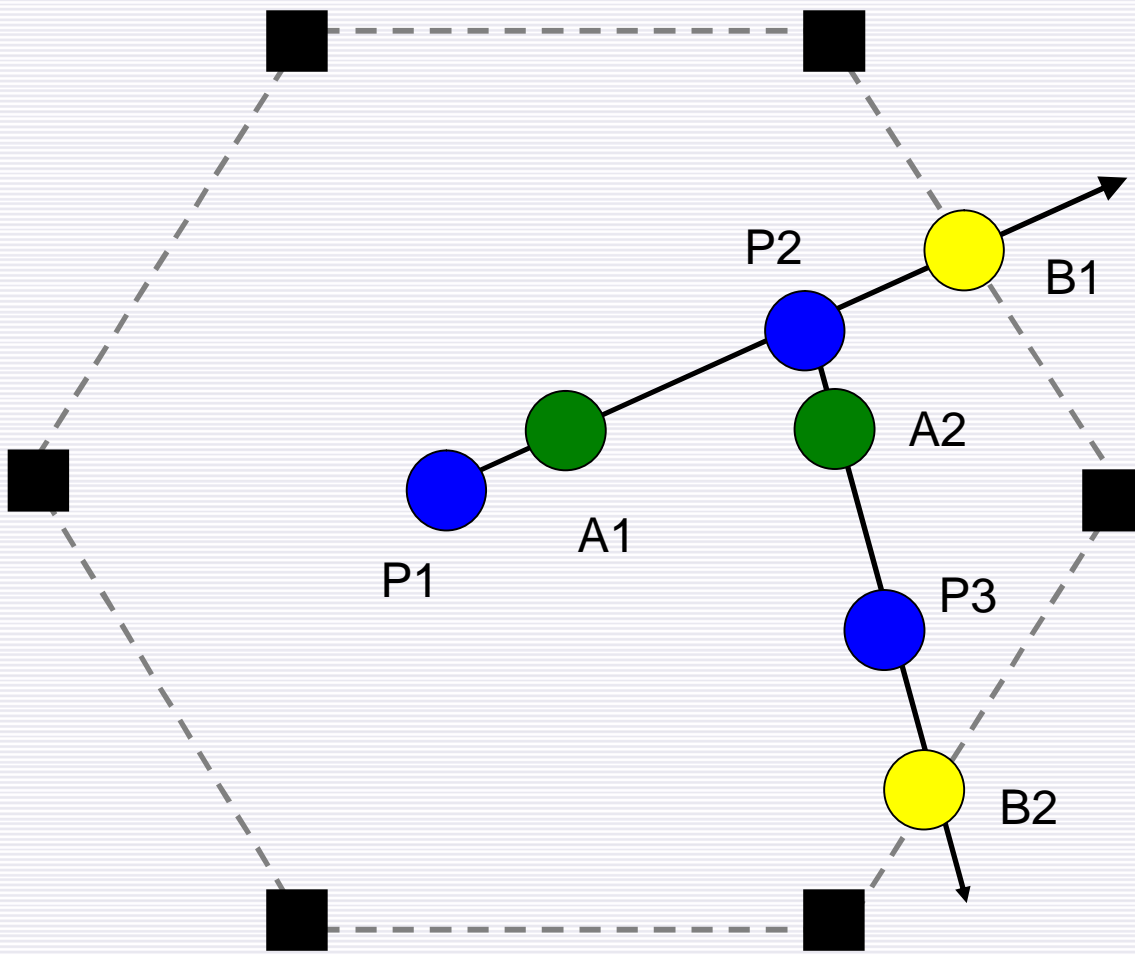


散らばりの悪い計画

5-4 実験計画の効率化(2)

「凸境界衝突法」を開発

特許出願中



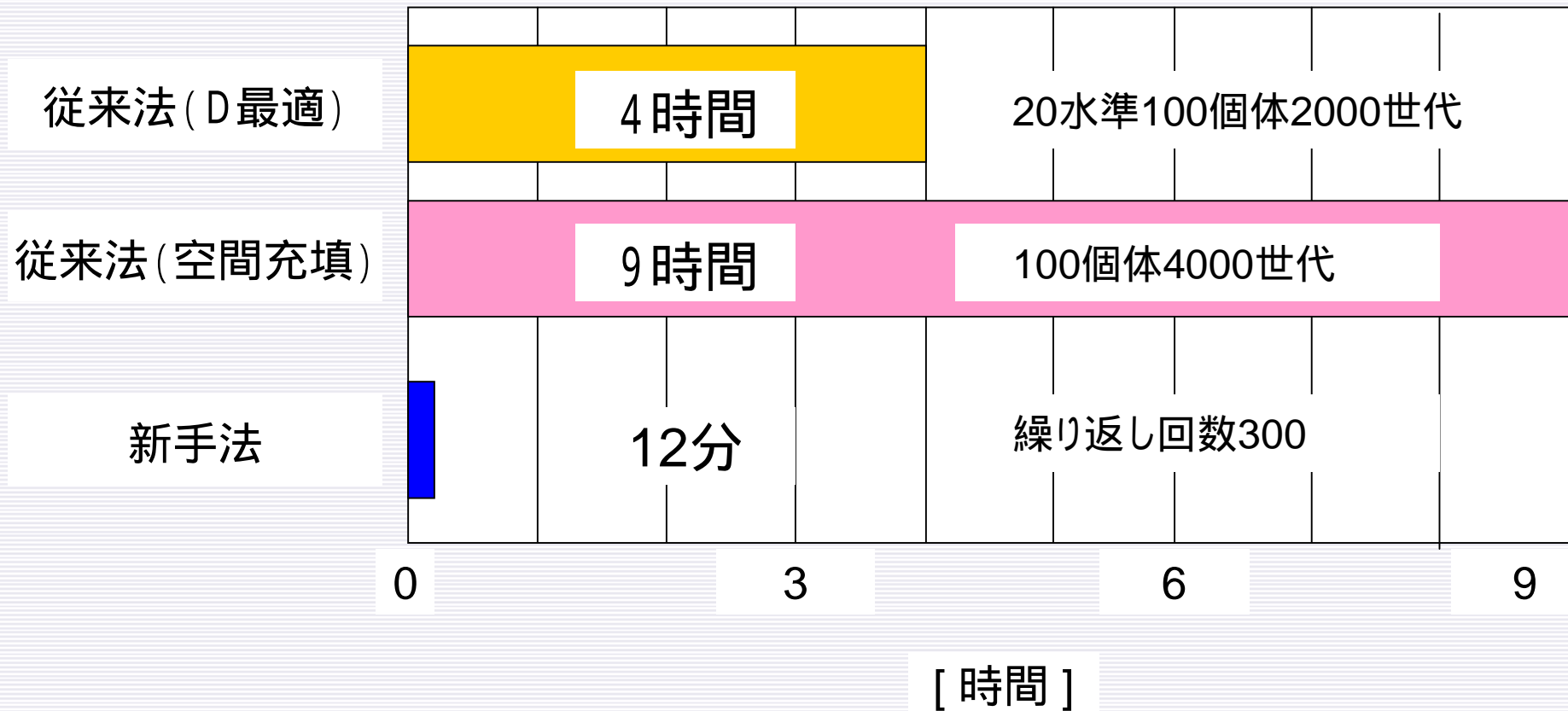
- 計画に採用する点
- 乱数で計算する点
- 線形計画法で計算する点

5-4 実験計画の効率化(3)

NUOPTを活用

計算時間の一例

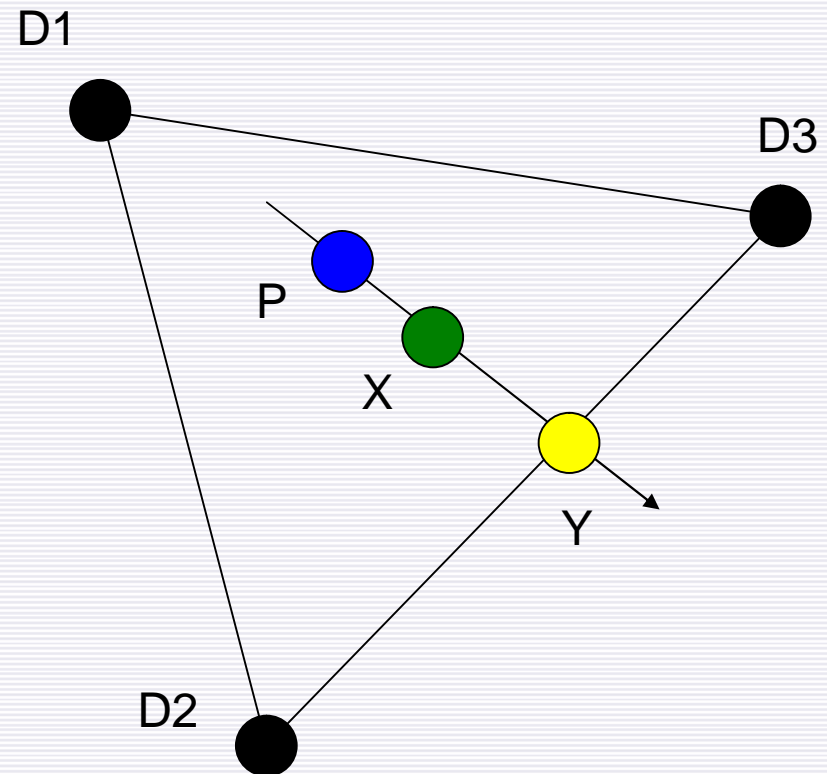
10因子300点



5-5 最適化の効率化(1)

(1) 線形計画法による内外判定を、既存の最適化手法に応用する

- 目的 t の最大化
- 制約 (1) $t \geq 0$
- 制約 (2) $t(\bar{X} - \bar{P}) + \bar{P} = \bar{Y}$
- 制約 (3) $\bar{Y} = \sum_{i=1}^N \lambda_i \bar{D}_i$
- 制約 (4) $\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$
- 制約 (5) $0 \leq \lambda_i \leq 1 \quad i = 1, \dots, N$
- 結果 \bar{Y} は直線 PX と凸境界の交点
 $t < 1$ なら \bar{X} は外点
 $t = 1$ なら \bar{X} は境界点
 $t > 1$ なら \bar{X} は内点



(2) 内外判定の式に出てくる i に注目して最適化を行う

5-5 最適化の効率化(2)

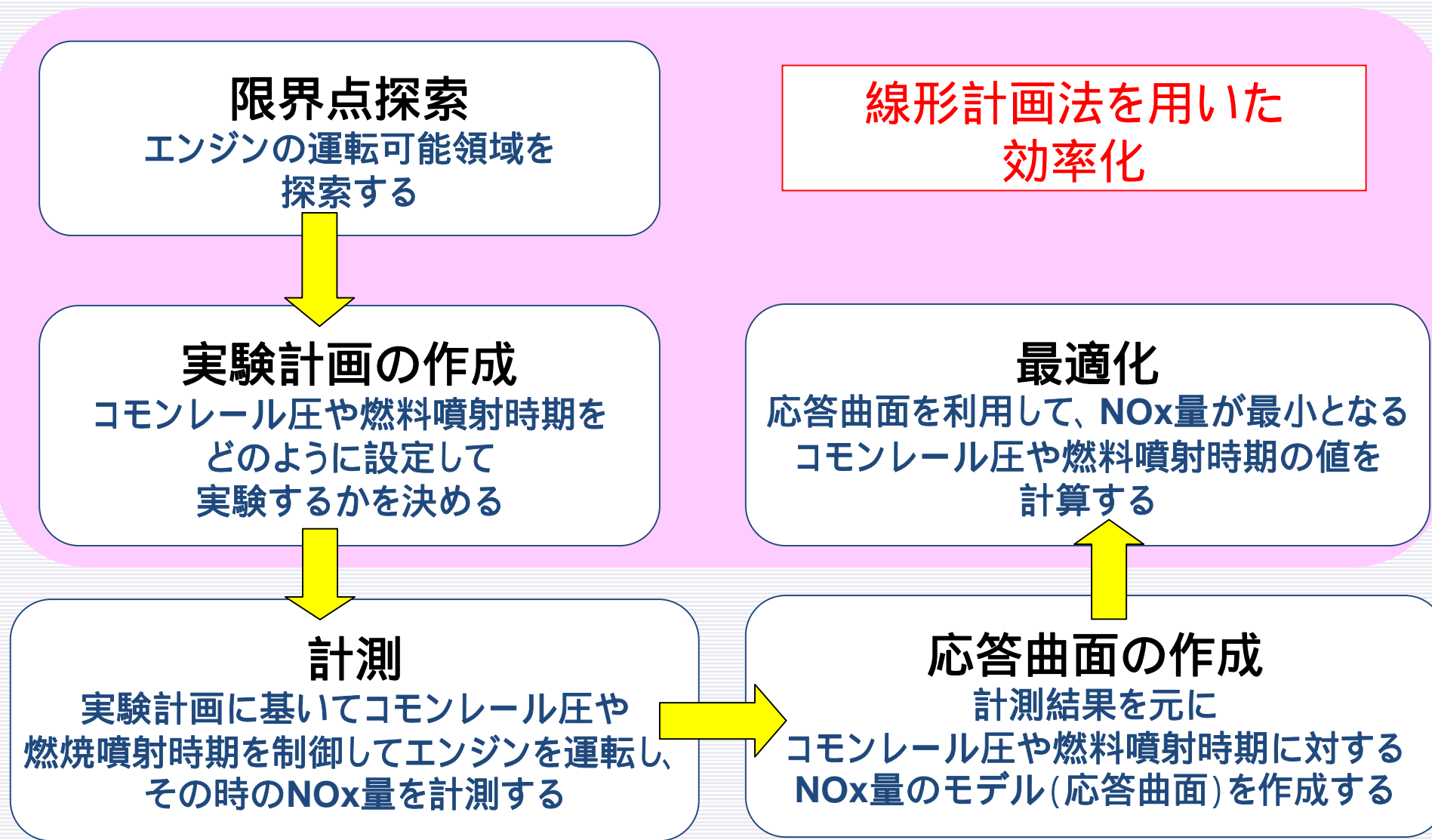
NUOPTを活用

◆ 計算時間の一例

(境界内の次元数:8 単一目的最適化問題)



6-1 線形計画法を用いたエンジン適合試験の効率化支援



6 まとめ

6-2 当社製品への反映

ORANGE Navigator



適合運転パターンをグラフィカルに設定。
ASAM-ACI(相当)の計測制御システムと接続し、適合運転が可能。

特長

- ・運転スケジュールと実験計画を統合管理。
- ・ECUパラメータの限界点探索機能、および、境界内計画を装備。
- ・高次元(最大20次元)境界内の実験計画を実現。
- ・限界点探索の効率化を実現予定
- ・運転パターンをベンチシステムに順次出力。
- ・データ収集結果を即チェックでき、チェック結果による分岐運転も可能。
- ・インターフェースにASAM-ACI(相当)を採用し、オープンなシステム構築が可能。
- ・操作フローに従った簡単操作により適合試験が可能。

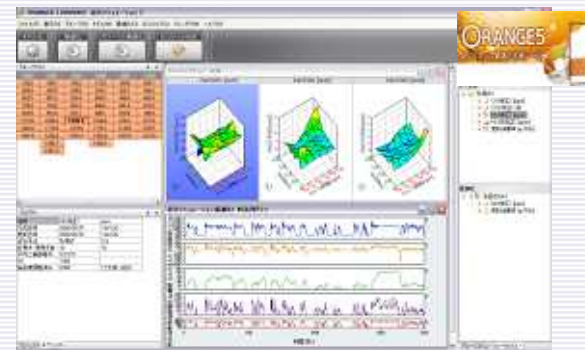
適合運転の計画を簡単設定。
様々なアプローチで、
効率的に適合業務を支援。



ASAM-ACI
(相当)



ORANGE Optimizer



トレードオフ関係にある多目的最適化問題を分りやすく可視化。最適値を簡単に選択でき適合業務の工数削減が可能。

特長

- ・最大10目的までの多目的最適化が可能。
- ・グローバル最適化、滑らかなECUマップ探索が可能。
- ・高次元(最大10次元)境界内最適化を実現。最大20次元境界内最適化を実現予定。
- ・走行シミュレーション最適化に汎用運転パターンを反映。

自動計測制御システム

御清聴ありがとうございました。