

学位論文

デジタルエンジニアリングにおける実験計画法の活用

2008年2月

吉野 睦

研究の梗概

本研究は、CAE を適用した製品設計業務の品質改善を目的とした統計学、主に実験計画法応用技術の研究である。近年、CAE の適用が製品設計業務のフロントローディング化を可能にしたが、一方で、多くの設計者が開発初期段階の問題の潰し込みが固有技術的にブラックボックスのまま進行することに強い懸念を抱いているのも事実である。そこで、CAE を使い続けながらも技術力を低下させない新しいパラダイムに変革しようという視点に立ち、パラメータと出力特性(以下、応答)との因果関係が把握可能な手段として実験計画法を応用する研究を進めた。

現在、日本の産業界は厳しい開発競争に晒されている。藤本隆宏ら(2007)がまとめた“ものづくり経営学—製造業を超える生産思想—”(光文社新書)に紹介されているように、今日、製品のアーキテクチャが従来の擦り合わせ型からモジュラー型に転換したものが数多く出現した。代表例がDVDプレーヤーである。この結果、従来日本メーカーが得意とした基礎技術主導で開発を進めることによりメカニズムでも生産技術力でも世界一を誇っていた製品が、基幹部品の組合せで構成されたキャッチアップ型製品に次々と市場を奪われている。だからといって日本の企業はキャッチアップ型企业に成り下がるわけにはいかない。なぜなら、市場が形成された後に参入することはコストで消耗戦を挑むことと同じであり、日本の高固定費の企業体質ではとても太刀打ちできないからである。そこで多くの企業が、モジュラー型製品においてもキャッチアップ派を上回る開発スピードでダントツの競争力を確保し早期に市場を席卷しようと躍起になっている。開発業務の多くにCAEを取り込むことも、その現れである。

本研究に着手する際ベンチマーク対象として取り上げた最適化支援エンジンは、このような環境変化に時を同じくして登場し急速に普及した。最適化支援エンジンはコンピュータ・シミュレーションとリンクして安定設計が早期に確立できるという業務支援ツールである。本文中で紹介しているように、最近の最適化支援エンジンの多くは遺伝子アルゴリズムなどの探索手法を駆使して自動的に最適設計値を探し出す。しかし、このことは設計者が“なぜその設計値が最適なのか、どの要因が効いていたのか”というパラメータと応答の因果関係を知らないまま設計が完了するという状況に陥らせしめる。CAE を援用した業務スタイルが技術のブラックボックス化を招いているのである。そのため経営層の一部に、このままでは開発スピードは向上しても技術力低下を招きかねないという危惧が生じた。技術が蓄積していかないために、開発の都度同じサイクルを回す必要があることにもまして(これはアウトソーシングでどうにでもなるが)経験豊かな技術者が育たないことが心配であるというのである。

このような背景もあって、本研究は産業界からの要請によって開始された。元トヨタ自動車副社長でデンソー会長であった故高橋朗氏が JSQC 会長職にあった時に研究の必要性を提言され、JSQC はその提言を受けて研究会活動を発足させた。提言は、CAE を用いた最適化結果が必ずしも製品化の段階で再現されているわけではないという“下流再現性”の乏しさを指摘するものであった。しかし、この指摘を掘り下げていくと、最適化ルーチンの過度の高度化およびブラックボックス化が進んだために、設計者が CAE の結果を鵜呑みにせざるを得ず、過去の技術的知見やフ

ールドのデータを持っていたとしてもそれが利用できない設計環境に元凶があるということが判明した。上で述べた問題と根源は同じなのである。

本研究では、この解決のために SQC が活用できるのではないかと考えた。技術者が持ち合わせている予備知識や対処方法との融合を図る上で SQC の持つモデル化の機能や直交分解の方法が有効であると考えたのである。さらに CAE と融合することは、従来にない多くのパラメータと非線形の応答との因果関係を扱うようになるため、SQC の持つ多次元の解析能力が不可欠であると考えた。

SQC は既に実験計画のツールとして定着している。実は先に紹介した最適化支援エンジンも初期の頃は実験の省略のために SQC のひとつである実験計画法を使用していた。しかし、多くの問題点があったため、SQC 的なモデル化手法から力技である直接探索法に移っていった。問題点を一言で言えば SQC 手法を従来のパラダイムのまま用いていたということに他ならない。例えば、新しい技術を製品の設計に適用したとき、その効果によって“パラメータに対する応答が従来とは有意な差を持つ”という仮説を検証するために SQC が用いられる。これは検定とよばれる技術であるが、基準として実機実験の特徴である誤差分散を使用する。しかし、シミュレーションには誤差が無い。何度試みても、初期条件が同じであるかぎり得られる解も同じなのである。したがって従来パラダイムの実験誤差を基準にする方法を用いると、どんなに小さな差であっても有意になってしまうのである。未だにシミュレーション結果に重回帰分析を適用してモデル化し、そのときの重相関係数が 0.99 であったと堂々と報告しているケースが散見される現状を見るにつけ胸が痛む。この結果が招くことは“獲らぬ狸の皮算用”であり、CAE の成果が製品化の段階で再現されないという高橋氏の指摘につながるのである。このことをあらかじめ念頭に置いて CAE と SQC の融合を進めることが、まさに本研究が狙いとする統計的方法応用技術の再構成なのである。

以上述べたことをもとに本研究のテーマを定義する。本研究のテーマである“デジタルエンジニアリングにおける統計的方法応用技術の再構成”とは、学術的に言えば“新しいパラダイムに適用可能な統計的方法の確立”であり、これを工業的見地から述べると、“CAE 業務の品質向上のために技術者の知見を生かすことができるツールの提供”ということである。すなわち、上で述べた技術力を低下させない最適化設計業務とは、技術者の持つ知見・ノウハウをシミュレーション技術に融合させることであり、それらを媒介させるために SQC 手法をどう援用したらよいかが研究のテーマである。そして、本論文はその研究成果として、第 1 に、シミュレーションの特徴を踏まえた上で SQC 活用の新しい方法論を体系的にまとめ、技術者が理解できる形にして示すことができた。第 2 に、SQC をシミュレーションにアナロジー的に適用する際の誤用について警鐘を鳴らすことができた。

本論文では研究の成果として次のような内容を報告した、第 2 章において、これまでの研究のレビューとして、設計パラメータ最適化に関連する研究動向を俯瞰した。その結果、最適化に関する分野においては収束速度など効率面に視点が向けられ、シミュレーションの品質に関する研究が殆ど無かったことを紹介した。また、シミュレーションの品質に関する研究を開始する契機となった横幹連合の研究会の活動についても紹介し、両者を通じて本論文の位置付けを明確化し

た.

第 3 章では, 改めて従来の最適化手法の整理を行い, それを通じて研究課題を明確化した. 冒頭で述べた課題以外にも多くの検討課題が浮かび上がった.

第 4 章以降は具体的な対応策に関する提案を行った.

第 4 章では, 合わせ込みの良否が下流再現性に影響を及ぼしていることを明らかにした上で, その原因となっている過度な合わせ込みを避け常に一定の品質が得られる手順を提案した.

第 5, 6 章では, ロバスト最適化の問題点であるバラツキにのみ影響がある因子の抽出と, その実験計画法を活用した評価手順の提案を行った.

第 5 章では, バラツキにのみ影響のある因子を効率的に抽出するスクリーニング方法を提案した.

第 6 章ではバラツキに影響のある因子を取り込んだ場合と取り込まない場合で, バラツキ最小となる最適設計点がどのように異なってくるか事例を用いて検討した. さらに, バラツキに影響がある因子も含めた設計パラメータの最適化方法に関して提案した. 最後に, ロバスト最適化の最終ステップである特性値の平均値と偏差の同時最適化に関して整理し, 本論文で取り上げた事例についてロバスト最適化結果を導いた.

第 7 章では, 動特性への展開に関する方法論を検討し, 将来の展望を述べた.

第 8 章では, 本論文の結論を述べた.

目次

[要旨]	.....	1
1. 序論	.....	3
1.1 研究の背景と目的	.....	3
1.1.1 コンピュータ・シミュレーションの適用の現状	.....	4
1.1.2 コンピュータ・シミュレーションに関わる問題点の背景	.....	5
1.1.3 シミュレーションの精度に関する問題点について	.....	6
1.1.4 合わせ込みの問題点について	.....	7
1.1.5 シミュレーションの下流再現性の問題点について	.....	8
1.1.6 近似手法の問題点について	.....	10
1.1.7 ロバスト最適化の問題点について	.....	10
1.1.7.1 ロバスト最適化とは	.....	10
1.1.7.2 シミュレーションにおけるロバスト最適化の一般的概念とその問題点	.....	12
1.1.8 本論文で検討する内容	.....	14
1.2 論文構成	.....	15
[参考文献]	.....	15
2. これまでの研究のレビュー	.....	17
2.1 デジタルエンジニアリング分野の研究の動向	.....	17
2.2 代表的な研究のレビュー	.....	22
2.3 本論文の位置付け	.....	23
2.3.1 横幹連合の研究会活動と新たな研究テーマ	.....	23
2.3.2 本論文の位置付け	.....	24
3. 従来最適化手法の整理を通じた研究課題の明確化	.....	25
3.1 はじめに	.....	25
3.2 最適化技術の歴史	.....	25
3.3 最適化問題の種類	.....	25
3.4 最適化の方法	.....	26
3.4.1 事例の概要	.....	26
3.4.2 設計パラメータのスクリーニング	.....	28
3.4.3 応答曲面モデリング	.....	29
3.4.4 ロバスト最適化	.....	31
3.5 最適化手法の今日的課題	.....	34

3.5.1	スクリーニングのステップの問題点	.....	34
3.5.2	応答曲面モデリングのステップの問題点	.....	34
3.5.3	最適化のステップの問題点	.....	35
3.5.4	シミュレーション特有の問題点	.....	35
3.6	第3章のまとめ	.....	35
	[参考文献]	.....	38
4.	合わせ込み	.....	39
4.1	合わせ込みとは	.....	39
4.2	従来法のレビューとその問題点	.....	40
4.3	合わせ込みの課題	.....	41
4.4	合わせ込みへの実験計画の応用	.....	42
4.5	ワイヤボンディングの共振問題への適用	.....	44
4.5.1	ワイヤボンディングの共振問題とは	.....	44
4.5.2	合わせ込み因子および信号因子の選定と水準の設定	.....	46
4.5.3	実験の割付けと実験(シミュレーション)結果	.....	46
4.5.4	合わせ込みの実施	.....	47
4.5.5	合わせ込みの結果	.....	49
4.6	提案方法によるメリット	.....	50
4.7	第4章のまとめ	.....	50
	[参考文献]	.....	51
5.	ロバスト最適化のための設計パラメータのスクリーニング	.....	53
5.1	シミュレーションを用いたロバスト最適化とその問題点	.....	53
5.1.1	従来のロバスト最適化法のレビュー	.....	53
5.1.2	従来のロバスト最適化法の問題点	.....	54
5.2	設計パラメータのスクリーニングの必要性	.....	56
5.3	スクリーニングにおける課題	.....	56
5.4	スクリーニング方法の提案	.....	57
5.4.1	スクリーニングの基準	.....	57
5.4.2	スクリーニングにおいて考慮すべき交互作用	.....	58
5.4.3	交互作用の評価方法	.....	59
5.4.4	シャイニン・メソッドを活用したスクリーニング方法	.....	59
5.4.4.1	主効果の測定	.....	59
5.4.4.2	交互作用の測定	.....	60
5.5.	シャイニン・メソッドを利用したスクリーニングの実施事例	.....	61

5.5.1	主効果の測定	.....	62
5.5.2	交互作用の測定	.....	63
5.6	第 5 章のまとめ	.....	65
	[参考文献]	.....	66
6.	ロバスト最適化のための実験計画と解析方法	.....	68
6.1	ロバスト最適化のための実験計画の必要性	.....	68
6.2	考慮すべきパラメータ	.....	68
6.2.1	ユーザに知見の無い場合およびソルバーで取り扱えないパラメータ	.....	68
6.2.2	主効果が小さくても交互作用が大きいパラメータ	.....	68
6.2.3	3 因子交互作用を発現するパラメータ	.....	69
6.3	ロバスト最適化のための実験計画	.....	69
6.3.1	想定するモデルと実験計画の考え方	.....	66
6.3.2	モデルの検出力の評価方法	.....	70
6.4	実験計画とその評価	.....	71
6.4.1	提案する実験計画	.....	71
6.4.2	従来方法との比較	.....	72
6.5	試行結果 (1) 交互作用因子を調整しない場合	.....	73
6.5.1	実験の割付け	.....	74
6.5.2	特性値の偏差が最小となる点の求め方とその変化	.....	74
6.5.3	結果の検証	.....	73
6.6	試行結果 (2) 交互作用因子を調整する場合	.....	76
6.6.1	実験の割付け	.....	78
6.6.2	特性値の偏差が最小となる点の求め方とその変化	.....	80
6.6.3	結果の検証	.....	82
6.7	応答と偏差の 2 応答によるロバスト最適化	.....	83
6.7.1	応答と偏差の 2 応答を用いた多目的最適化によるロバスト最適化の現状	.....	83
6.7.2	事例におけるロバスト最適化	.....	84
6.8	第 6 章のまとめ	.....	86
	[参考文献]	.....	86
7	今後の展望—動特性への拡張—	.....	88
7.1	ロバスト最適化の種類	.....	88
7.2	タグチの動特性の理解	.....	89
7.3	動特性をシミュレーションで解析する際の問題点と今後の対応	.....	95
7.3.1	β を b で代用するときの問題点と今後の対応	.....	96

7.3.2	σ を求めるときの問題点と今後の対応	.....	97
7.4	第7章のまとめ	.....	98
	[参考文献]	.....	98
8.	結論	.....	99
	[謝辞]	.....	102
	[関連発表の記録]	.....	103

デジタルエンジニアリングにおける実験計画法の活用

要旨

近年、CAE の適用が製品設計業務のフロントローディング化を可能にし、開発期間の大幅短縮という効果を上げている。しかしその一方で、多くの設計者が開発初期段階の問題の潰し込みが固有技術的にブラックボックスのまま進行することに強い懸念を抱いているのも事実である。そこで、技術的に納得できる CAE 適用手順の確立が強く望まれている。また、実機実験は誤差を持つがシミュレーションには誤差が無く何度試みても初期条件が同じであるかぎり得られる解も同じである。したがって従来パラダイムの実験誤差を基準にする統計的手法を用いると、どんなに小さな差であっても有意になってしまう。この結果が招くことは“獲らぬ狸の皮算用”であり、CAE の成果が製品化の段階で再現されないという“下流再現性”の悪化を招いている。下流再現性をどのようにしたら向上できるかも重大な関心事である。

この問題の背景には最適化支援エンジンの急速な普及がある。最適化支援エンジンはコンピュータ・シミュレーションとリンクして安定設計が早期に確立できるという業務支援ツールである。最近の最適化支援エンジンの多くは遺伝子アルゴリズムなどの探索手法を駆使して自動的に最適設計値を探し出す。

このことは設計者が“なぜその設計値が最適なのか、どの要因が効いていたのか”というパラメータと出力との因果関係を知らないまま設計が完了するという状況に陥らせしめる。つまり、CAE を採用した業務スタイルが技術のブラックボックス化を招いており、このままでは開発スピードは向上しても技術力低下を招きかねないという新たな問題点を生じている。しかし、先行研究に目を向けても最適化分野における研究は収束速度など効率面に重点が置かれ、最適化結果の下流再現性に関する研究はこれまで殆ど無かった。

そこで本研究ではこの解決を図ることを目的とした。そして、解決手段に SQC を活用できるのではないかと考えた。技術者が持ち合わせている予備知識や対処方法との融合を図る上で SQC の持つモデル化の機能や直交分解の方法が有効であると考えたのである。さらに CAE と融合することは、従来にない多くのパラメータと非線形の応答との因果関係を扱うようになるため、SQC の持つ多次元の解析能力も不可欠であると考えた。本論文の第 3 章では、CAD の裏側で遂行されている最適化手順の整理を行い、設計者に理解されていない最適化法の課題を明確化した。第 4 章では、技術者の知見を CAE に反映する上で重要なステップとなる“合わせ込み”について検討し、SQC を活用することで下流再現性の悪化原因となっている過度な合わせ込みを避けバイアスよりもパターン的一致を優先する手順を提案した。また、第 5～6 章では、ロバスト最適化の手順を検討し、従来は無視されていたバラツキにのみ影響のある因子の存在に着目してそれらを効率的に抽出するスクリーニング方法とそのような因子も含めた設計パラメータの最適化方法に関して新たな実験計画を提案した。

本論文のテーマである“デジタルエンジニアリングにおける実験計画法の活用”とは、工業的見

地から述べる”CAE 業務の品質向上のために技術者の知見を生かすことができる SQC ツールの提供”ということである。すなわち、技術力を低下させない最適化業務を実現するためには、技術者の持つ知見・ノウハウをシミュレーション技術に融合させることが必要であり、それらを媒介させるために SQC 手法を活用した。研究では主に実験計画法応用技術の検討を行い、CAE を適用する場面全般に渡って具体的な対応策に関する提案を行うことができた。

1. 序論

1.1 研究の背景と目的

近年、コンピュータによるシミュレーション、特に有限要素法解析(以下、FEM 解析)のソフトの機能が向上し、応力・歪だけでなく熱分布や流体など多くの問題が解けるようになってきた。FEM 解析は表 1.1 に示すようなあらゆる工学領域に関して展開が進んでいる。

表 1.1 FEM 解析の適用領域

		解析可能範囲 50%		→難しさのレベル		
応力・歪問題	線形解析	弾性 座屈		異方性材料		
	非線形解析	接触解析・大変形解析・弾塑性解析・弾クリープ解析			衝撃・衝突	
	信頼性解析	超弾性解析・粘弾性解析・クリープ寿命解析			疲労寿命解析	亀裂進展解析
	連成解析	熱応力解析・半導体プロセス解析		機構解析		
熱問題	伝熱解析	熱伝導	輻射	熱伝達		
	化学反応解析	発熱体		結晶成長	燃焼	
	相変化解析	体積変化		溶融・凝固	昇華・蒸発 二相流	
	連成解析	流れ・強度		電磁場	加工	
騒音・振動問題	一般振動解析	固有値解析・周波数応答解析・過渡応答解析				
	連成解析	音場連成解析		磁場連成解析	流体騒音連成解析	
	新解析手法の適用	複素固有値	スペクトル応答	逆解析	非線形振動解析 アクティブ振動制御解析	
	同定技術	最小二乗法	局所的同定	特性利用解析		
加工問題	塑性加工(大変形解析)	板材変形解析	多工程解析	型寿命解析 鍛造解析	スピニング粉体解析 割れ解析	
	樹脂成形(流動解析)	樹脂流動解析 ひけ・そり解析		繊維配向・強度予測解析	結晶粒解析	
	ダイカスト(流れ解析)	溶湯流れ解析・冷却解析			凝固収縮解析 潤滑剤解析	型変形・型寿命解析
	接合(熱+変形)	レーザー溶接変形解析・かしめ変形解析		溶融はんだ形状解析	融着・プロジェクション溶接過程解析	
	切削(除去解析)		任意形状解析		刃具摩耗解析	
磁場解析	一般磁場解析	2D 移動過渡解析・2D 回転過渡解析・静磁場解析				
	連成解析	外部電気回路連成解析		熱流体連成解析	振動連成解析 磁気音解析	
	材料特性解析		鉄損・着磁解析 モータ効率解析	材料ヒステリシス解析		
その他	光学特性、回路、運動方程式、釣合い方程式			拡散、BRDF、BTDF		

その結果、製品開発の現場、特に技術開発あるいは設計パラメータの検討にシミュレーションが活用され、開発期間の短縮やコストダウンに貢献している。シミュレーションを適用することによって、実際に試作品を作らなくても強度問題、熱問題、組付け問題などに関する検討が可能となり、開発期間の短縮とコストダウンが可能である。例えば、金型関連の開発では実験に供する金型の製作費が大変高額で加工のリードタイムも大きいですが、最近では金型を製作せずシミュレーションで検討することで開発経費と開発期間を大幅に削減している。この効果は絶大であり、例えば自動車の開発期間短縮の効果は図 1.1 に示すように従来の半分に近い期間にまで短縮することが可能になった。

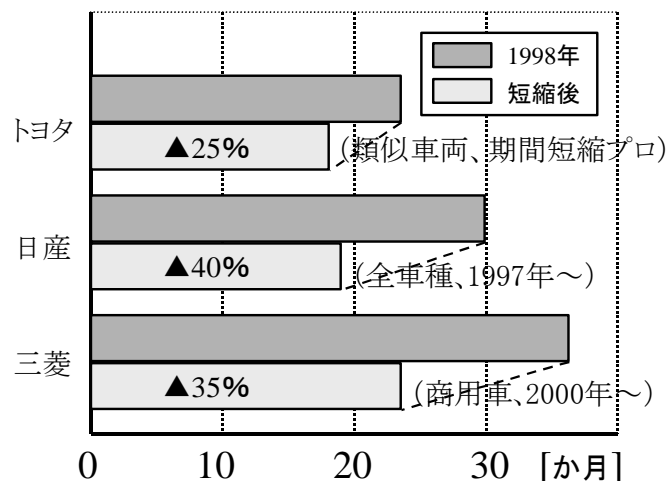


図 1.1 デジタルエンジニアリングによる開発期間の短縮例

しかし、全く問題点が無いわけではない。第 1 章では特に、技術開発あるいは設計パラメータ検討へのシミュレーション適用時の問題点に関して掘り下げ、本論文が狙いとする統計的方法応用技術の再構成が必要な背景を述べる。

1.1.1 コンピュータ・シミュレーションの適用の現状

現在、コンピュータ・シミュレーション技術の進歩と歩調を合わせるように、設計環境の CAD (Computer Aided Design) 化が急速に進行している。そして、CAD と CAE (Computer Aided Engineering) や CAM (Computer Aided Machining) とのリンクも進んでいる。CAD と CAE がリンクすることによって、設計と同時に製・部品の FEM 解析用メッシュモデルが自動生成され即座に解析が実施される。言い替えれば、強度不足や共振などの問題点を CAD 画面上で即時チェックすることなどが一般的に行われている。このようなデジタルエンジニアリング化は、設計から生産準備までの業務のコンカレント化を可能にしている。

さらに FEM 解析ソフト(以下、ソルバー)の機能も向上し、複数の問題が同時に解けるようになっている。FEM 解析が扱う問題は 1.1 でも述べたように多岐に渡るが、これらを連成させ問題を解くことができるようになった。例えば電子製品の抵抗溶接プロセスにおける通電に起因する発熱の問題と発熱に伴う溶融変形とを相互に関連付けて解くことができるようになった。この結果、設計者の扱う開発課題の殆どが、シミュレータを操作する労力を伴わず解けるようになったといっても過言ではない。

近年、このような設計環境のデジタルエンジニアリング化に呼応して、設計パラメータを実験計画に割付け解析する機能とソルバーを直接制御する機能の両方を兼ね備えた最適化支援エンジンとよばれるソフトが登場した。最適化支援エンジンには 1995 年頃から積極的に SQC 手法が取り込まれている^{[1][2][3]}。SQC を用いた最適化手法の詳細については吉野ら^[4]がレビューしているが、これは設計者が試行錯誤を繰り返さなくても、コンピュータが SQC の手法を利用して自動的に設計パラメータを変化させ、最適値を求めてくれるという機能である。このように、設計者がソルバーの操

作知識や実験計画法等の知識を有していなくても、コンピュータ画面の裏側で各種SQC手法が駆使されソルバーを制御して、最適パラメータ値を求めてくれる環境が構築されつつある。

このようなSQCの適用方法における大きな変革点は、従来はSQC手法が扱う問題は現物を用いた実験であったのに対し、近年はシミュレーションで求めた特性値にSQCを適用して解析していることである。これが種々の問題を誘発している。そこで、次節からはSQCの視点にフォーカスして問題点を整理する。

1.1.2 コンピュータ・シミュレーションに関わる問題点の背景

本節では、CAE業務におけるシミュレーションの実務の手順を追って、そこに内在する問題点を探る。ここで、CAE業務とはシミュレーションを活用した技術開発業務を指す。ソルバーを用いた構造解析のステップは図1.2のとおりである。

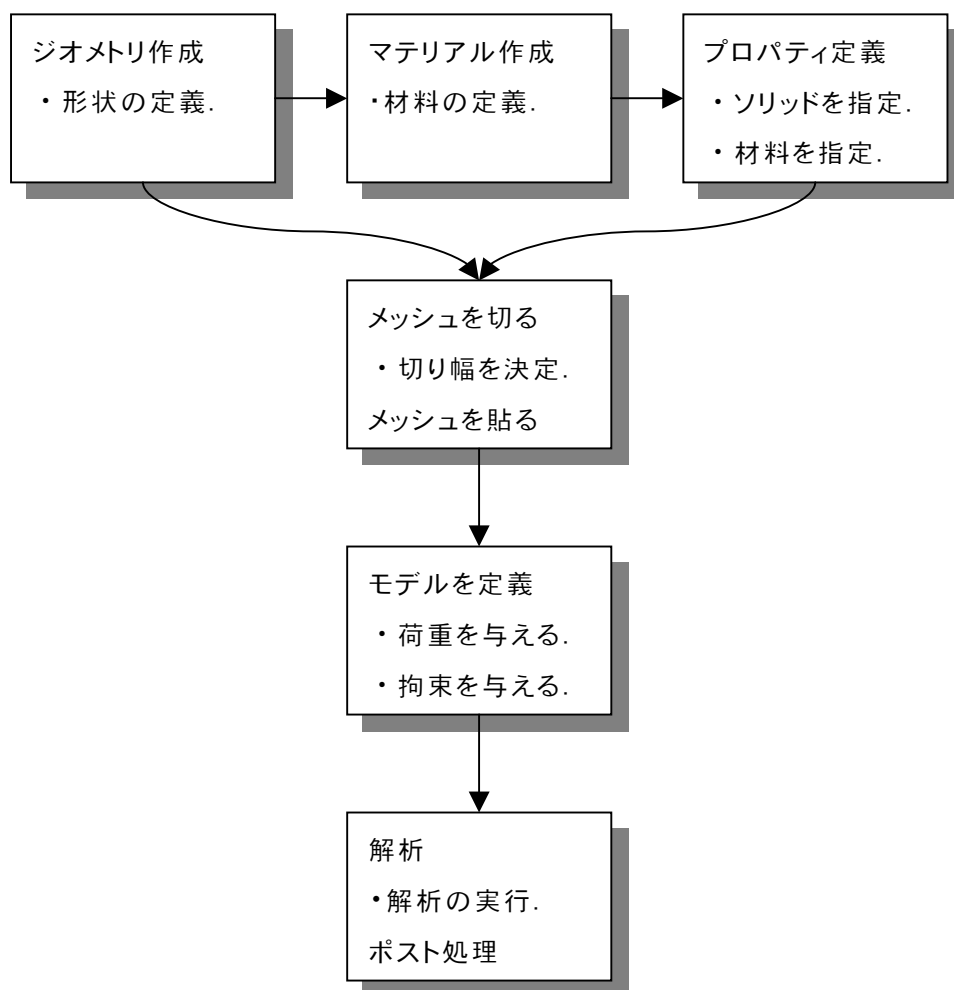


図 1.2 一般的な FEM 解析(構造解析)の手順

最初に、ジオメトリ作成を行う。これは幾何学的構造を入力するステップであり、解析対象の形状をここで定義する。多くの場合、形状データは 3D-CAD からインポート可能だが、3D 解析には多大な解析時間を要することから、2D モデルで代用するケースも多い。2D モデルを使用する場合は若干の形状のデフォルメが必要になる。2D モデルへの変換は単に断面形状を用いる場合や軸対象モデルを用いる場合などがあり、CAE 技術者の経験により選択されている。

マテリアル作成およびプロパティ定義とは、計算上のルールを決めておく部分である。構成部材ごとに材質や要素の種類を定義するために、ヤング率、ポアソン比、密度、降伏点などの材料物性および要素タイプを入力する。降伏点に温度依存性があったり加工硬化したりする場合は、構成式とよばれる式でその特性を定義しておく必要がある。形状を検討する時は、材質にかかわるパラメータは標示因子となるが、後述する“合わせ込み”ではフィッティング・パラメータとして用いられることが多い。

次に通称メッシュを貼るという操作を行い、構造全体を要素分割する。要素分割の善し悪しは精度に大きな影響が出るが、分割数に係わるルールは無く、解析時間の制約等を勘案して CAE 技術者の経験により分割数が決められている。

モデル定義では、印加荷重や拘束条件を定義する。解析対象の一部を固定したり、自由に滑る箇所を定義するのだが、摩擦があるような時は現物との対応が非常に難しくなる。

以上はプリプロセッサとよばれるソフトを用いて行う準備作業である。この後、ソルバーによって応力分布や歪分布を計算し、ポストプロセッサとよばれる処理ソフトによって階調的に色分けされたコンタ図として出力する。

CAE 業務では、このようなシミュレーションのステップを回しながら、パラメータ値や工程条件の最適化を行う。以上のように、一般的な構造解析であってもシミュレーションを実施する上での自由度が大きく、それが手順化されていないために CAE 技術者による差が存在する。それが実機との整合性(以下、精度)に少なからず影響していることが判明した。

1.1.3 シミュレーションの精度に関する問題点について

CAE 業務におけるシミュレーションの精度の問題は二つの側面がある。

第一の側面は内部演算に依存する精度の問題である。FEM 解析とは微小要素間の相互作用に矛盾がなくなるように収束解を求めていく作業である。このとき、相互作用そのものに関する物理モデルの仮定が間違っていたとしたら、誤った結果を与えるのは明白である。これがソルバーの精度問題である。ソルバーの精度の検証に関しては V&V(Verification and Validation)という学問領域が確立しており Roache^[5]などの報告がある。

第二の側面は、1.1.2 で述べたシミュレーションを業務に適用する際の精度の問題である。これは、準備段階のジオメトリ作成やプロパティ定義におけるモデルの仮定が CAE 技術者の技量や経験に依存するため、再現性がないという問題である。一般的な構造解析であってもシミュレーションを実施する上での自由度が大きく、それが手順化されていないために人による差が存在する。この問題については、未だ十分な検討がなされていない。以下、後者の問題についてさらに掘り下げ、

SQC の援用課題として整理してみた。

1.1.4 合わせ込みの問題点について

CAE 業務は、シミュレーション結果が既存の実機実験の結果をズレなく再現することを前提にしている。そのためシミュレーションモデルの合わせ込みが必要になる。合わせ込みとは、いくつかの実験点における実測結果とシミュレーション結果を一致させることを指す。塑性加工の形状解析の事例を用いて説明する。これは後述する横幹連合の研究会において埴本委員が紹介したもので研究会主査の仁科^[6]が報告している。

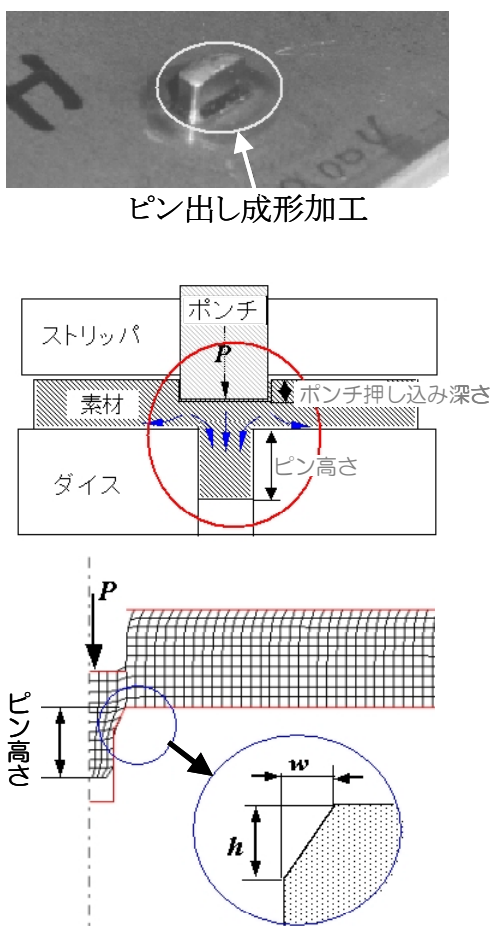


図 1.3 冷間鍛造によるピン出し成形加工

この事例は、図 1.3 に示すように冷間鍛造により部品に所定高さのピンを立てるための金型形状を最適化する問題である。最適化に先立ち、従来の結果を用いて合わせ込みを実施した。この時、ピン幅等の形状の変更は新たな金型製作が必要であることから実験およびシミュレーションは従来金型のみで行った。両者の比較において図 1.4 のように実験とシミュレーションとに乖離が生じた。CAE 技術者は試行錯誤の末、金型と材料のすべりに関する拘束条件を変更して両者を一致させた。

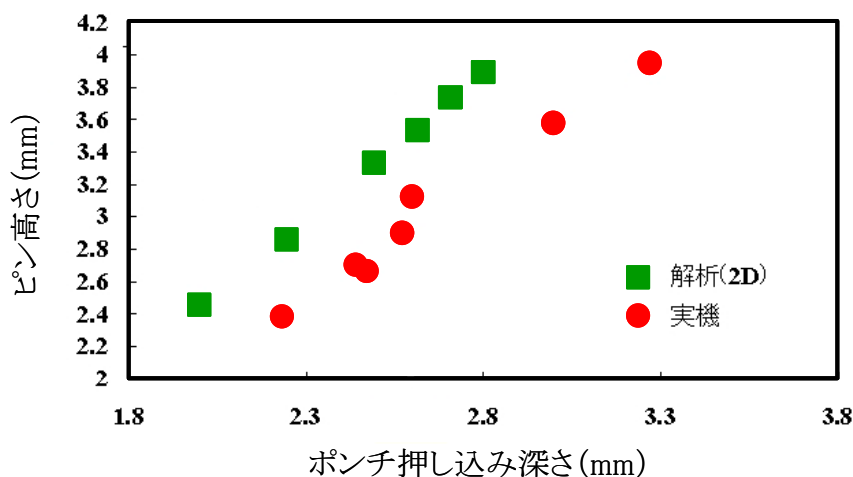


図 1.4 実験とシミュレーションの乖離の例

この事例では、金型形状は制御因子であるのでフィッティングには使用しないが、ポンチ押し込み量は金型形状変更時の一般性を保証するためにフィッティングの際の検証のための因子として使用された。

ここでは次の手順が不明である為にCAE技術者のノウハウに依存し、非効率になっていることが明らかになった。

- ・ 実機とシミュレーションのズレの定義とその計量
- ・ ズレを調整する因子の発見方法。
- ・ どこまで一致すればよいか。すなわち実機実験とのフィッティングの定義。
- ・ 調整に必要なシミュレーション数、すなわちフィッティング・パラメータを調整して上記評価尺度を最小にする時に必要な実機実験とシミュレーションの条件(フィッティング・パラメータを水準設定し実機での実験結果と比較するときの実験計画)。

以上のように合わせ込みの技術とは、言い替えれば未知のフィッティング・パラメータの探索とその効率的な調整であると言える。したがって次のようなSQCの問題に落とし込むことが可能である。

- ・ ズレ、フィッティングの定式化
- ・ フィッティング・パラメータのスクリーニング
- ・ 実機実験での検証のための因子(再現性を確保できる因子)の選定
- ・ 既存の実験結果との照合のための制約の下で、そのモデルのパラメータ値の選定
- ・ 効率的な実験計画

1.1.5 シミュレーションの下流再現性の問題点について

シミュレーション結果が得られたならば、それに基づき最適設計を行う。多くの場合、シミュレーション結果を2次の直交多項式で近似した応答曲面モデルから、所期の目標値を与えるパラメータ値を求めるという手順をとる。この際、従来の統計手法に基づく近似式のパラメータ選択を行うと推定しすぎになり、下流での効果の再現性が期待したほど得られない。

これを吉野ら^[4]が用いた事例をもとに説明する。この事例は RC カーの設計パラメータの最適化問題で、全 16 パラメータであった。各パラメータの効果の大きさは図 1.5 のとおりである。ここで効果が一番小さいパラメータと応答の関係を見てみると図 1.6 のように応答の全変化幅のたった 0.8%にも関わらずシミュレーションでは誤差に埋もれることなく効果の測定が可能である。すなわち全てのパラメータをモデルに取り込むことが可能である。

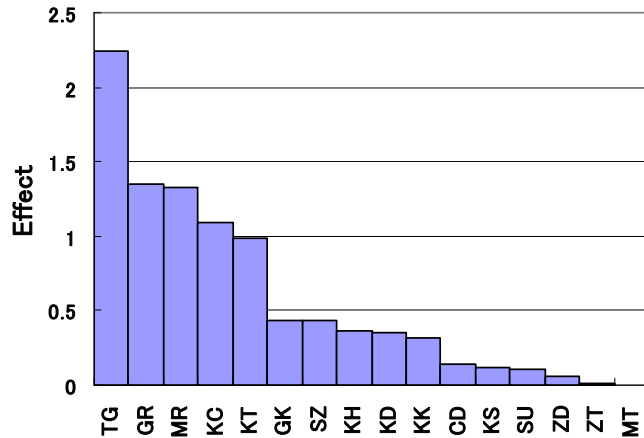


図 1.5 RC カー・シミュレーションの各パラメータの効果の大きさ

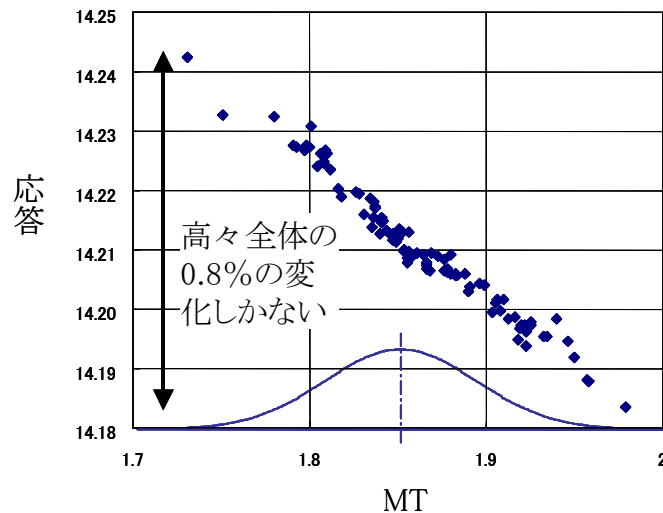


図 1.6 効果が一番小さいパラメータに対する応答のプロット

しかしながら、どこまでモデルに取り込むかという点が問題となる。吉野ら^[4]は 5 パラメータに絞込み応答曲面近似を行っているが、統計的背景はない。

シミュレーションは統計学が前提としている誤差がない。したがって従来の統計的指標を使って近似モデルの良し悪しを判定したり、パラメータの取り込みを行うことに理論的正当性がない。これは、ロバスト最適化の方法論と相まって重要な課題である。

この問題を SQC の問題に落とし込むと次のようになる。

- バラツキの表現方法
- 誤差因子を含んだ効率的な実験計画
- 近似曲面の求め方(最小 2 乗が良いか)

1.1.6 近似手法の問題点について

計算工学の分野では計算能力の向上に主眼をおいた研究が行われている。しかし、現実には計算機的能力向上や計算アルゴリズムの改善のスピードを上回る速さで CAE 技術者は複雑な問題に取り組んでいる。例えば衝突問題のような多峰性のある多目的問題は、現状では遺伝子アルゴリズム(以下, GA)でないと解けないために高速のスパコンが必要である。GA は数百回のシミュレーションを必要とするためである。しかしこれは正しい技術開発の姿であるとは考えられない。2.3.1 で紹介する高橋氏の指摘どおり、実機との整合性を上げるがために一向に開発コストの削減が進まないからである。

この問題の解決に統計的アプローチの貢献が求められる。効率的な離散的水準設定の方法と、多峰性のある現象を近似できる Kriging (例えば, David Ruppert et al.^[7]) のような近似モデルが必要である。これにより GA を使用しなくても最適化が可能になると推察される。この問題を SQC の問題に落とし込むと次のようになる。

- 一様実験のような多水準実験計画
- 多峰性に対応した近似モデル
- 未知領域へ外挿して推定する際の精度の保証

設計パラメータの最適化に関しては SQC の貢献により応答曲面法が普及したが、先端研究を見れば探索的手法が先行している。三井らによる解説^[8]に見られるように適用分野も広く、普及が加速している。

しかし、探索的手法は技術をブラックボックス化する懸念がある。同じような問題が再発しても、どのパラメータがどの特性に効いているのかといった知見が蓄積されていないため、現場では再度同じ規模のシミュレーションを繰り返すことになる。現在、この問題に関しては大林^[9]が報告しているように焼きなまし法(以下, SA)などの直接探索法においてもその探索過程の知見をラフ集合を用いてモデルに反映する試みや、川岸ら^[10]のように直交表を局所探索に小刻みに使いながら大域的探索に結びつけるという試みがある。しかしその効果は収束効率(収束経路の短縮)と背反であり群盲象を撫でるが如く全体像を把握できるまでには至っていない。

このように、技術的知見の蓄積という点で見ると、最初から全体をモデル化する近似手法が優れている。多峰現象のモデル化に適用できる近似手法の確立が待たれる。

1.1.7 ロバスト最適化の問題点について

1.1.7.1 ロバスト最適化とは

ロバスト最適化とは、外乱や設計パラメータの変動に対する特性値の頑健性を確保することを狙いとするものである。ロバスト最適化はその立場によって二つの考え方がある。

第1は、タグチ流ロバスト最適化である。いま図 1.7 に示すように外乱あるいは設計パラメータに対して非線形応答を示す特性値 y があるとする。また、この特性値は望小特性であるとする。このとき、最適設計 A は最適設計点を外れると急激に特性値が悪化するのに対して、最適設計 B は最適設計点を外れても特性値の悪化の度合いが小さく、この図のケースでは同じ程度の外乱あるいは設計パラメータの変動を考慮した場合、最適設計 B の特性値の変動幅は最適設計 A のそれを上回ることは無い。これより最適設計 B のほうが外乱あるいは設計パラメータ変動に対して頑健な設計であると言える。

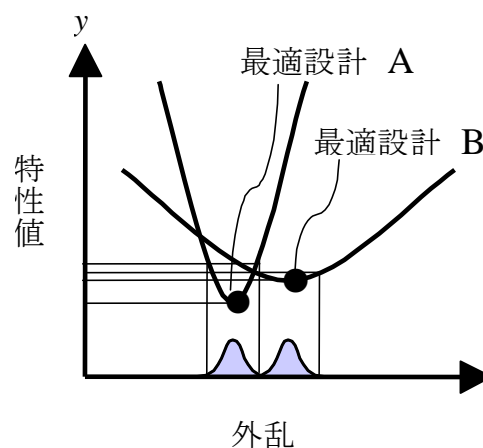


図 1.7 タグチ流ロバスト最適化の概念図

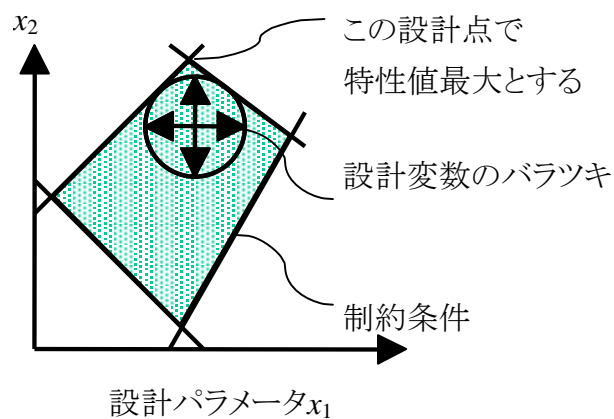


図 1.8 OR 流ロバスト最適化の概念図

第 2 は、OR(Operation Research)流ロバスト最適化である。いま図 1.8 に示すように設計パラメータ x_1, x_2 に関して制約条件があり、設計が成立する領域は図中のハッチング部であるとする。特性値は紙面に垂直になるので記載していないが、制約条件で囲まれた領域のひとつの端部に特性値の最適点があるとする。このとき設計パラメータがある幅で変動する(バラツキを持つ)ことを考える。すると領域の端部である特性値最適点では設計値がこの領域を逸脱し設計が成立しないというケースが生じる。設計パラメータの変動を考慮すると、最適パラメータ値は変動分だけ制約条件の内側になければならない。こうして設計パラメータ変動に対する頑健性が確保される。

本論文では、ロバスト最適化とはタグチ流ロバスト最適化を指すものとする。この立場から OR 流ロバスト最適化を定義すると“許容差設計”あるいは“トランス・デザイン”となり、生産技術分野の“プロセス・ウィンドウ”と同義となる。

また、タグチ・メソッドでは、横軸にとった外乱は“誤差因子”とよんで内乱(設計パラメータ変動)とは区別している。誤差因子は“環境”であるとか“劣化”であり、設計パラメータとは異質だからである。しかし、シミュレーションにおいては、劣化すなわち耐久試験前/後のような質的な因子はシミュレーションモデルのパラメータとしては扱いにくいので、横軸に設計パラメータ変動(内乱)を使うことが多い。

1.1.7.2 シミュレーションにおけるロバスト最適化の一般的概念とその問題点

これまで、シミュレーション実験を用いてロバスト最適化を行う際の概念に関して、一般的に次のような説明がなされていた。いま図 1.9 に示すように設計パラメータ x_1 に対して非線形の応答を持つ特性値 y があるとする。このような非線形性は x_1 の 2 次効果あるいは x_1 と他の設計パラメータとの交互作用によってもたらされる。このとき設計パラメータ x_1 が図中に示すようにある幅で変動することを考える。すると設計パラメータ x_1 は B より A を採用したほうが特性値の変動が少ない。よって A はロバスト最適である。

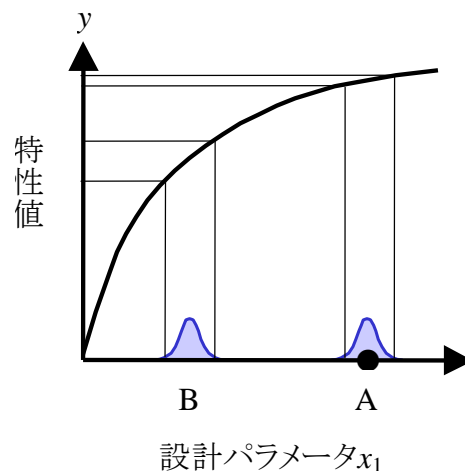


図 1.9 一般的なシミュレーションを用いたロバスト最適化の解説

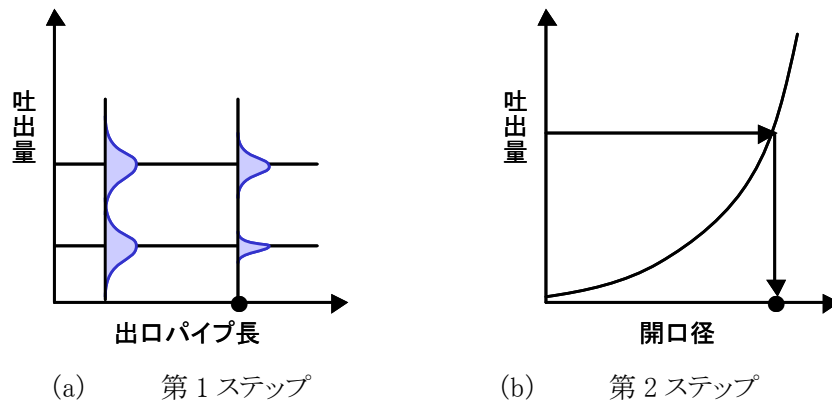


図 1.10 ホッパーモデルのロバスト最適化の解説



写真 1.1 ホッパーの外観

ここで、比較のために実機実験を用いたタグチ流ロバスト最適化を考える。いま図 1.10 に示すようなホッパーの設計パラメータ最適化を考える。ホッパーとは写真 1.1 に示すようにセメント工場などで見られる粉流体の供給装置である。ホッパーでは出口開口径によって吐出量をコントロールするが、出口に設けたパイプの長さを調整することにより $1/f$ ゆらぎの影響をキャンセルし吐出量が安定するということが知られている(例えば^[11])。ただしパイプの長さによって吐出量が変わることは殆ど無いという。このときタグチ・メソッドでは、まず第 1 ステップとしてバラツキを最小にすべくパラメータを調整する。図 1.10 (a) において、いくつかの吐出量を標示因子的に用いながら、いずれの吐出量においても一番流量が安定する出口パイプ長の水準を選ぶ。次に第 2 ステップとして、出口パイプ長を固定した上で出力の調整を行う。ここでは図 1.10 (b) のように所期の吐出量が得られるように出口開口径を調整する。

従来の一般的説明では、出口パイプのようなバラツキを最小化する因子の説明ができない。なぜなら、出口パイプ長は特性値の非線形性が無いためである。また、特性値を変化させる効果が無いことから、設計パラメータをスクリーニングする際、主効果の大きさに着目する従来のスクリーニング方法では、このような因子はスクリーニング段階で除外され以降の検討においては永久に無視される。

出口パイプ長のような因子は、実機実験なら実験を行うテストピースの間で意識しなくても変動するためバラツキの影響は考慮される。しかし、シミュレーションでは評価の対象から外され定数に固定されるため、その変動の影響を考慮することができず、ロバスト最適値の下流再現性を悪化させる一因となっている。

このような因子を如何に取り込むかという点も、重要な課題である。この問題を SQC の問題に落とし込むと次のようになる。

- ・ 特性値の偏差を生む因子の効率的な抽出
- ・ そのような因子を含んだ実験計画の割付け
- ・ 特性値の応答と偏差の応答の“多目的最適化 (Multi-objective Optimization)”によるロバスト最適化(“多目的最適化”の用語に関しては CAE 関連業務の慣習にしたがった。また、このときの“応答”を“目的関数”とよぶこともある)

1.1.8 本論文で検討する内容

以上、シミュレーション実務における種々の問題点について述べたが、これを整理すると次のようになる。

(1) 技術が蓄積しない。

現在急速に普及している最適化支援エンジンの多くは GA などの探索手法を駆使して最適設計値を探し出す。しかし、このことは設計者が“なぜその設計値が最適なのか、どの要因が効いていたのか”というパラメータと応答の因果関係を知らないまま設計が完了するという状況に陥らせしめる。CAE を援用した業務スタイルが技術のブラックボックス化を招いているのである。このままでは開発スピードは向上しても技術力低下を招きかねない。技術が蓄積していかないために、開発の都度同じサイクルを回す必要があることに加えて経験豊かな技術者が育たないという問題も生んでいる。

(2) CAE を用いた最適化結果が必ずしも製品化の段階で再現されない。

“下流再現性”が乏しいという言い方もある。この指摘を掘り下げていくと、最適化ルーチンの過度の高度化およびブラックボックス化が進んだために、設計者が CAE の結果を鵜呑みにせざるを得ず、過去の技術的知見やフィールドのデータを持っていたとしてもそれが活かされない設計環境に元凶があるということが判明した。

(3) SQC 手法を従来のパラダイムのまま用いている。

例えば、新しい技術を製品の設計に適用したとき、その効果によって“パラメータに対する応答が従来とは有意な差を持つ”という仮説を検証するために SQC が用いられる。これは検定とよばれる技術であるが、基準として実機実験の特徴である誤差分散を使用する。しかし、シミュレーションには誤差が無い。何度試みても、初期条件が同じであるかぎり得られる解も同じなのである。したがって従来パラダイムの実験誤差を基準にする方法を用いると、どんなに小さな差であっても有意になってしまう。この結果が招くことは“獲らぬ狸の皮算用”であり、CAE の成果が製品化の段階で再

現されないという(2)の問題の原因のひとつになっている。

本論文ではこの解決のために SQC の新しいパラダイムを構築しながらそれを活用することを検討した。技術者が持ち合わせている予備知識や対処方法との融合を図る上で SQC の持つモデル化の機能や直交分解の方法が有効であること。さらに CAE と融合することは、従来にない多くのパラメータと非線形の応答との因果関係を扱うようになるため、SQC の持つ多次元の解析能力が不可欠であることがその理由である。そして検討を通じてシミュレーションの特徴を踏まえた新たな SQC 活用方法を体系的に示すことを狙った。

1.2 論文構成

本論文は、次のような構成をとる。

第 2 章ではこれまでの研究をレビューする。研究を開始するに当たり文献調査を行い、設計パラメータ最適化に関連する研究動向を俯瞰する。その結果、最適化に関する分野においては収束速度など効率面に視点が向けられ、シミュレーションの品質に関する研究が殆ど無かったことを紹介する。また、シミュレーションの品質に関する研究を開始する契機となった横幹連合の研究会の活動についても紹介し、両者を通じて本論文の位置付けを明確化する。

第 3 章では、改めて従来の最適化手法の整理を行い、それを通じて研究課題を明確化する。冒頭で述べた課題以外にも多くの検討課題が浮かび上がった。

第 4 章以降は具体的な対応策に関する提案を行う。

第 4 章では、合わせ込みの良否が下流再現性に影響を及ぼしていることを明らかにした上で、その原因となっている過度な合わせ込みを避け常に一定の品質が得られる手順を提案する。

第 5, 6 章では、ロバスト最適化の問題点であるバラツキにのみ影響がある因子の抽出と、その実験計画法を活用した評価手順の提案を行う。

第 5 章では、バラツキにのみ影響のある因子を効率的に抽出するスクリーニング方法を提案する。

第 6 章ではバラツキに影響のある因子を取り込んだ場合と取り込まない場合で、バラツキ最小となる最適設計点がどのように異なってくるか事例を用いて検討する。さらにバラツキに影響がある因子も含めた設計パラメータの最適化方法に関して提案する。最後に、ロバスト最適化の最終ステップである特性値の平均値と偏差の同時最適化に関して整理し、本論文で取り上げた事例についてロバスト最適化結果を導く。

第 7 章では、動特性への展開に関する方法論を検討し、将来の展望を述べる。

第 8 章では、本論文の結論を述べる。

[参考文献]

- [1] 日本機械学会編[1999]:“応答曲面法による非線形問題の最適設計入門”, 講習会教材
- [2] 日経デジタルエンジニアリング[2000]:“注目企業にみる IT 活用戦略—Part1 自動車—”, No.2, 70-85
- [3] 溶接学会編[2004]:“特集「最適化の手法と適用」”, 溶接学会誌, Vol.73, No.3, 5-27
- [4] 吉野睦, 仁科健[2004]:“SQC とデジタル・エンジニアリング—設計パラメータ最適化の技術動向と今日的課題”, 品質, Vol.34, No.3, 5-12
- [5] Patrick J. Roache[1998]:“Verification and Validation in Computational Science and Engineering”, Hermosa Publishers
- [6] 仁科健, 吉野睦[2008]:“CAE によるロバスト最適化における実験計画法の活用—シミュレーションと SQC 拡大研究会第 1 分科会成果報告—”, 品質, Vol.38, No.1, 12-23
- [7] David Ruppert, M. P. Wand, R. J. Carroll[2003]:“Semiparametric Regression”, Cambridge University Press, 242-248
- [8] 三井和男, 大崎純, 大森博司, 田川浩, 本間俊雄[2004]:“発見的最適化手法による構造のフォルムとシステム”, コロナ社
- [9] 大林茂[2007]:“ラフ集合による設計空間特徴抽出”, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集(6), 161-162
- [10] 川岸裕之, 工藤一彦[2007]:“直交表による大域的最適解探索法の開発(機械設計問題への適用)”, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.73, No.732, 161-168
- [11] 田口善弘[1995]:“砂時計の七不思議—粉粒体の動力学”, 中公新書

2. これまでの研究のレビュー

2.1 デジタルエンジニアリング分野の研究の動向

研究を進めるにあたり、最適化手法に関連する先行研究を調査した。本分野に関する研究は、主に機械学会、計算工学会を中心に発表されるとともに、日経デジタルエンジニアリングのような専門誌で取り上げられていた。収集した論文、講演予稿、記事のタイトルおよび内容に関する一覧表を表 2.1 に示す。

表 2.1 先行研究の一覧

No.	著者	発表年	タイトル	出典	内容	分類
1	奥野忠一, 芳賀敏郎	1969	実験計画法	【単行本】培風館	・列の別名を避ける(p169) ・L32直交表への割付け(p192)	手法解説
2	中川徹, 小柳義夫	1982	最小二乗法による実験データ解析	【単行本】東京大学出版会	・回帰診断とロバスト推定法	手法解説
3	尾田十八(日本機械学会(編))	1989	構造・材料の最適設計	【単行本】技報堂出版	・最適化のルーチンは数値計画法のみで直接ソルバーを制御しながら収束させた(pp246-261)	手法解説
4	J.C.Miller, J.N.Miller著宗森信訳	1991	データのとり方とまとめ方ー分析化学のための統計学ー	【単行本】共立出版	・単体法ではないシンプレックス法の解説あり(pp194-198)	手法解説
5	赤木新介	1991	設計工学(上)(下)ー新しいコンピュータ応用設計ー	【単行本】コロナ社	・ロバスト設計問題の事例を紹介(下・pp111~114)	手法解説
6	二里木孝	1993	実験計画支援システム RS/Discover	計算機統計学, Vol.6, No.1,2, pp61-65	・ソフト紹介 ・実験計画の種類と特徴 ・混合実験における混合変数とプロセス変数の違い	手法解説
7	中山弘隆, 谷野哲三(社)計測自動制御学会編	1994	多目的最適化の理論と応用	【単行本】コロナ社	・多目的最適化に際してのスカラー化について触れる(p38)	手法解説
8	荒川雅生	1997	ロバスト設計における最適化	日本機械学会講習会教材[複合領域の設計における最適化及び満足化], pp47-56	・最小感度設計は分かるがタグチメソッドの説明は容認しがたい ・制約条件境界に、バラツキも含めて接するか否かを議論	手法解説
9	山川宏	1997	複合領域の設計における最適化および満足化	日本機械学会講習会教材[複合領域の設計における最適化及び満足化], pp1-13	・複合領域の問題を単なる多目的最適化の一形態ではないとし、位相、フィードバック制御等の問題について事例を紹介	手法解説
10	柏村孝義, 白鳥正樹, 于強	1997	統計的最適化手法におけるばらつきと構造信頼性の評価	日本機械学会論文集A編, Vol.63, No. 610(1997年6月), pp1348-1353	・1998年機械学会論文賞を受賞した論文	アルゴリズム研究
11	柏村孝義, 白鳥正樹, 于強	1998	実験計画法による非線形問題の最適化手法ー統計的設計支援システムの開発ー	機械の研究, Vol.50, No.7, pp8-18	・市販された本と同じ内容 ・直交表+直交多項式+RMS+逐次二次計画法, バラツキは一次近似二次モーメント法	アルゴリズム研究
12	山崎光悦	1998	最近の非線形構造最適化研究と統合最適化設計環境の動向について	日本機械学会第3回最適化シンポジウム講演論文集, pp141-146	・T-SIGHTが普及すると予見	手法解説
13	轟章	1998	積層構成最適化GAの応答曲面作成のための実験計画	日本機械学会第3回最適化シンポジウム講演論文集, pp93-98	・応答曲面を線形重回帰で求めるとしている	アルゴリズム研究
14	Kikuo Fujita, Noriyasu Hirokawa, Shinsuke Akagi, Shinji Kitamura, Hideaki Yokohata	1998	MULTI-OBJECTIVE OPTIMAL DESIGN OF AUTOMOTIVE ENGINE USING GENETIC ALGORITHM	Proceedings of DETC98 1998 ASME Design Engineering Technical Conferences, pp1-11	・日本機械学会第3回最適化シンポジウム講演論文集, pp295-300と同内容か	アルゴリズム研究
15	Dave Spicer, Jeremy Cook, Carlo Poloni, Pratyush Sen	1998	EP 20082 Frontier: Industrial multiobjective design optimisation	1998 D.C. Spicer, J. Cook, C. Poloni, P. Sen ECCOMAS 98 Published in 1998 by John Wiley & Sons, Ltd.	・Frontierの用いる多目的最適化アルゴリズムについてのレビュー	アルゴリズム研究
16	藤田喜久雄, 廣川敬康, 赤木新介, 平田隆教	1998	遺伝的アルゴリズムによる機械システムの最適化とそのエンジン設計への適用	日本機械学会第3回最適化シンポジウム講演論文集, pp295-300	・マツダの事例 ・多目的最適化におけるバレット最適解の導出において、古典的数値計画法が困難な事例を検討	適用事例
17	柏森孝義, 白鳥正樹, 于強	1998	実験計画法による非線形問題の最適化	【単行本】朝倉書店	・機械学会賞の論文を補強し書籍化	手法解説
18	安木剛	1999	自動車設計における最適化およびロバスト設計の事例	日本機械学会東海支部講習会[コンピュータによる機械構造の最適化デザイン], pp45-52	・感度解析の新技术を提案 ・RSMが多峰性の問題に弱いことを指摘 ・変数スクリーニングの必要性、最適値近傍での再モデル化にも言及	アルゴリズム研究
19	山崎光悦	1999	最適化手法の現状と将来	日本機械学会講習会教材[応答曲面法による非線形問題の最適化設計入門], pp1-9	・大域近似と局所近似を解説 ・多目的最適化の概要を解説	手法解説

表 2.1 のつづき

20	轟章	1999	応答曲面法	日本機械学会講習会教材[応答曲面法による非線形問題の最適設計入門], pp11-23	・中心複合計画の詳細解説あり	手法解説
21	白鳥正樹, 于強	1999	実験計画法による応答曲面法～統計的設計支援システムとその応用～	日本機械学会講習会教材[応答曲面法による非線形問題の最適設計入門], pp73-94	・機械の研究の報文にロバスト最適化の解説を補強	アルゴリズム研究
22	Carlo Poloni, Andrea Giurgevich, Luka Onestiy, Valentino Pediroda	1999	Hybridisation of a Multi-Objective Genetic Algorithm, a Neural Network and a Classical Optimizer for a Complex Design Problem in Fluid Dynamics	Dipartimento di Energetica Universit a di Trieste Italy, May 14, 1999	・イタリア国家プロジェクトの成果	アルゴリズム研究
23	大倉健, 山本秀夫	2000	統計的設計支援ソフトウェア DesignDirector を利用したロバスト設計について	計算工学講演会論文集Vol.5, A-4-1	・4水準直交表を用いた3次の近似 ・外側の割付けを行ないパラツキを計算	アルゴリズム研究
24	大富浩一	2000	分散協調設計技術とその適用事例	日本機械学会講習会教材[設計プロセスの革新技術], pp13-17	・DSMの紹介 ・関連サイト http://web.mit.edu/dsm/	アルゴリズム研究
25	山崎光悦	2000	応答曲面近似と非線形構造最適化	日本機械学会第4回最適化シンポジウム講演論文集, pp169-174	・MDOを可能にするのが応答曲面近似をはじめとした近似法だという ・その理由は最適化のアルゴリズムから頻りにソルバーが呼び出されないから ・参考文献豊富(海外のもの多い)	収束効率研究
26	長谷川浩志, 酒井新吉, 渡辺隆之	2000	実数型交差モデルと応答曲面モデルを用いたハイブリッド型の近似最適化手法について	日本機械学会第4回最適化シンポジウム講演論文集, pp175-180	・中心複合計画では交互作用が考慮できないといった誤った認識あり(p176) ・RSMをアップデートして収束させるという手法を紹介しているが、統計的配慮は全く無い	収束効率研究
27	山川宏	2000	最適設計技術	日本機械学会講習会教材[設計プロセスの革新技術], pp37-42	・複合領域まで含めて最適設計技術を概観	手法解説
28	日経デジタルエンジニアリング	2000	【製品別】注目企業にみるIT活用戦略-Part1 自動車-	日経デジタルエンジニアリング, 2000年2月号, pp70-85	・活用事例	紹介記事
29	日経デジタルエンジニアリング	2000	注目製品レポート-加工誤差などを考慮できる「iSIGHT5.0」	日経デジタルエンジニアリング, 2000年2月号, p46	・製品情報	紹介記事
30	日経デジタルエンジニアリング	2000	注目製品レポート-廉価版を設定した「iSIGHT5.5」	日経デジタルエンジニアリング, 2000年12月号, p49	・製品情報	紹介記事
31	廣畑賢治, 向井稔, 川村法晴, 川上崇, 于強, 白鳥正樹	2000	統計的手法を用いた電子機器はんだ接合部の構造信頼性設計	日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, pp500-512	・東芝の事例 ・モンテカルロ法による1設計点のパラツキとストレスモデルの組合せによる信頼性向上	適用事例
32	安木剛, 岡本敦, 岡本昌明	2000	衝撃試験での性能バラツキ評価法の開発	日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, pp699-700	・トヨタの事例 ・設計空間全域にわたり100ケースをサンプリングしモンテカルロ法を適用、応答曲面を作成	適用事例
33	安藤友亮, 于強, 白鳥正樹, 矢島秀起	2000	自動車衝撃吸収材の断面形状最適化	自動車技術学会学術講演会前刷集, No.64-00, pp5-8	・ホンダの事例 ・逐次二次計画法による多目的最適化	適用事例
34	安藤友亮, 于強, 白鳥正樹, 矢島秀起	2000	モード制御アプローチを取入れたサイドメンバの形状最適化	自動車技術学会学術講演会前刷集, No.64-00, pp9-12	・ホンダの事例 ・多峰値問題に対しモード制御アプローチを提案、扱う問題を限定することによりRSMを成立させる	適用事例
35	下舞健, 奈良崎則雄	2000	LBPシャーンの振動および流動特性を考慮した最適化設計	成型加工, Vol.12, No.10, pp638-640	・三菱エンブラの事例 ・iSIGHTの機能であるMMFDを使用して最適値探索を実施	適用事例
36	酒井秀久, 清水啓史, 山岡伸嘉	2000	最適化システムCAOSによる電子機器の最適実装設計	富士通技報, Vol.51, No.5, pp275-279	・富士通の事例 ・柏村らの方法と同じ	適用事例
37	土屋雅弘, 石井博, 山口和幸, 高木亨之	2000	実験計画法に基づく軸振動最適設計支援システム	日本機械学会論文集(C編), Vol.67, No.656, pp954-961	・日立の事例 ・柏村らの方法と同じだが、直積法を用いたロバスト設計機能を追加 ・非線形偏差解析法による目的関数の標準偏差の導出法を付録	適用事例
38	SangJin NAM, 須田恵子, 坂場克哉, 工藤啓治, 加藤毅彦	2000	設計統合化・最適化支援プログラムi-SIGHTの複合領域最適化問題への適用	日本機械学会第4回最適化シンポジウム講演論文集, pp295-300	・東レの事例 ・構造と射出成形条件の同時最適化 ・とは言ってもシリーズで行なっているようだ	適用事例
39	吉田欣吾, 藤本哲也	2000	最適化手法を脈動解析に適用したエンジン開発	自動車技術学会学術講演会前刷集, No.85-00, pp11-14	・ダイハツの事例 ・上記日経DE02年12月号の記事のベースとなる研究事例報告	適用事例
40	川面恵司, 横山正明, 長谷川浩志	2000	最適化理論の基礎と応用	【単行本】コロナ社	・近似手法を紹介	手法解説
41	C.F.Jeff Wu, Michael Hamada	2000	Experiments ~Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization~	【単行本】John Wiley & Sons Inc.,USA	・正規確率プロット(ハーフプロット)が出てくる	手法解説
42	田口玄一	2001	シミュレーションによるロバスト設計	標準化と品質管理, Vol.54, No.3, pp102-115	・Appendixの事例はL27に13因子を割り付け! ・Q&Aでシステムの安定性を見るのならシミュレーションの正確さは不要と言及	手法解説

表 2.1 のつづき

43	田口玄一	2001	シミュレーションによるロバスト設計(2)～信号因子の途中で機能を変えたい場合～	標準化と品質管理, Vol.54, No.4, pp71-79	・制御因子の出力への効果は無意味。因果関係は合わなくてよい。それはSN比改善後の合わせ込みでやる。(因果関係を無視するのはいかがかと思う)	手法解説
44	南百瀬勇	2001	品質工学を使ったシミュレーションの課題	標準化と品質管理, Vol.54, No.5, pp45-49	・制御因子の変動しか扱えないと	手法解説
45	許全托, 工藤啓治	2001	大規模CAE問題に対する最適化手法の提案～ i SIGHT VCM近似による板成形シミュレーションの最適化～	自動車技術会学術講演会前刷集, No.25-01, pp1-4	・最適化の際、RSMを用いる近似解法は大規模な解析では初期計算量が多い一方、精度が確保されないで結果の信憑性が低い ・そこで、近似解法での最適点探索とその点での詳細解析(実際の解析)を繰り返し収束させる手法を提案	収束精度研究
46	宮田悟志, 工藤啓治	2001	大規模CAE問題に対する最適化手法の提案～ i SIGHT Stepwise RSM による衝突シミュレーションの最適化～	自動車技術会学術講演会前刷集, No.25-01, pp5-8	・標準的RSMを求める場合の実験数をフルモデル, CCD, BoxBehnkenで比較、大規模な解析では非現実的と結論 ・そこで基底(高次の項)のモデルからの除外、取り込みを反復しモデルを構築することを提案 ・モデルの改善の判定はAICを利用	収束効率研究
47	廣畑賢治, 川上崇, 向井稔, 川村法晴, 于強, 白鳥正樹	2001	応答曲面法およびベイズ理論に基づく構造信頼性設計手法の提案	日本機械学会論文集(A編), Vol.67, No.660, pp1297-1304	・はんだの信頼性について解析 ・ストレス・ストレングスモデルにおける分布を計算する	適用事例
48	土屋雅弘, 山川宏	2001	実験計画法による軸振動最適設計	日本機械学会論文集(C編), Vol.67, No.662, pp3086-3092	・コンピュータ実験なのに分散分析をやって寄与率を出している ・振動モードごとに応答曲面を作成しているが従属関係は無いのだろうか	適用事例(誤用例)
49	宮下朋之, 山川宏	2001	探索エージェントによる最適設計に関する研究	日本機械学会論文集(C編), Vol.67, No.662, pp3227-3235	・局所最適解(多峰性)に対する独自アプローチ(探索エージェント) ・遺伝的アルゴリズムなどと比較している	アルゴリズム研究
50	三島望	2001	工作機械の設計評価の研究—小型化を指向した設計パラメータ評価—	精密工学会誌, Vol.67, No.11, pp1787-1791	・加工精度と設計パラメータの関係の導出。誤差を設計パラメータで記述 ・タグチメソッドを使ったと書いてあるが分散の計算方法等がおかしい	アルゴリズム研究
51	立林和夫	2001	現像プロセスとフレーム設計への品質工学の適用	日本機械学会第14回計算力学講演会講演論文集, pp727-728	・シミュレーション利用 ・L18, ノイズは調合	適用事例
52	高木俊雄	2001	テストベース/コンピュータシミュレーションを使った研究の再現性向上	日本機械学会第14回計算力学講演会講演論文集, pp729-730	・なにか哲学のような話 ・要因とレスポンスの因果関係を研究するなど言っている	その他
53	于強	2001	統計的設計支援システムによる複雑非線形問題の最適化	日本機械学会第14回計算力学講演会講演論文集, pp731-732	・多峰性の問題に対する独自アプローチ(モードコントロール)	アルゴリズム研究
54	山崎光悦, 正韓晶	2001	応答曲面近似による衝撃吸収の最適化	日本機械学会第14回計算力学講演会講演論文集, pp733-734	・直交表を使用 ・特に新しさは見られない	適用事例
55	長谷川浩志	2001	CAX: Computer Aided Exploration の発想—最適化の適用事例を中心として—	日本機械学会第14回計算力学講演会講演論文集, pp735-736	・シミュレーテッド・アニーリング法を使用したとあるが詳しい説明は無い	適用事例
56	轟章	2001	タグチメソッドと応答曲面	日本機械学会第14回計算力学講演会講演論文集, pp737-738	・Myersによるタグチメソッド批判を紹介 ・制御因子と誤差因子の交互作用がある場合に最適化できない ・応答曲面法は交互作用を入れたまま解くことができる	手法解説
57	田口玄一, 米山高範, 田口伸, 矢野宏	2001	座談会—品質工学実践の課題	標準化と品質管理, Vol.54, No.5, 2001年5月号, pp4-18	・17年前の事例もシミュレーションだったと田口が発言(p16) ・言った者勝ちか!	手法解説
58	日経デジタルエンジニアリング	2001	注目製品レポート—実験や数値解析に基づいて最適な条件を導き出す「Design Director Plus」	日経デジタルエンジニアリング, 2001年5月号, p97	・製品情報	紹介記事
59	日経デジタルエンジニアリング	2001	設計・製造ソリューション展で見た注目製品・サービス—公差を考慮しながら設計を進められる「TASysWorks」	日経デジタルエンジニアリング, 2001年8月号, p95	・公差解析ツールの紹介	紹介記事
60	日経デジタルエンジニアリング	2001	設計・製造ソリューション展で見た注目製品・サービス—複数の最適化を一度に検討できる「FRONTIER」	日経デジタルエンジニアリング, 2001年8月号, p96	・製品情報 ・指定した全ての目的関数について個別に最適化しトレードオフを設定した後、ユーザーが一対比較	紹介記事
61	國家啓嗣, 李長久, 李福海	2001	プラズマ溶射Ni-50Cr皮膜の組織、物性および溶射条件の相関性	溶接学会論文集, Vol.19, No.1, pp27-36	・石川島播磨重工の事例 ・中心複合計画による実験と最適化の事例, 生データあり ・内部従属関係にある特性値を独立に最適化している	適用事例
62	宮田悟志, 許全托	2001	VCM(Variable Complexity Model)近似による設計初期段階へのCAE最適化適用の可能性	計算工学講演会論文集, Vol.6, 2-11-3	・エンジニアズ社の報告 ・iSIGHTのVCM機能を紹介 ・簡易ケースと詳細ケースの繰り返しによる精度向上	収束精度研究

表 2.1 のつづき

63	荒川俊, 新実繁樹	2001	ソレノイド磁気回路寸法最適化システムの構築	自動車技術会学術講演会前刷集, No.24-01, pp22-25	・アイシン精機の事例 ・iSIGHTのRSMとMMFD(許容修正方向法)機能を用いた最適化	適用事例
64	大野勝久編著 田村隆善, 伊藤崇博	2001	Excelによるシステム最適化	【単行本】コロナ社	・メタヒューリスティクスとして ・アニーリング法, GAを簡単に説明	手法解説
65	日経デジタルエンジニアリング	2002	NDEレポート-ダイハツ, エンジンの設計仕様をExcelで評価	日経デジタルエンジニアリング, 2002年12月号, p36	・活用情報 ・エンジン性能曲線: 化学分析のIRスペクトルのように特性値間に相関があるので, PLS回帰のような手法が必要であろうが, そんなことはやっていない。 ・エンジニアズ社が絡んでいる	紹介記事
66	日経デジタルエンジニアリング	2002	注目製品レポート-最適化支援-構造・衝突解析ツールの設定が容易に「I-SIGHT 7.0」	日経デジタルエンジニアリング, 2002年11月号, p47	・製品情報 ・応答曲面で3次,4次を加え精度が向上(と言うけれど・・・) ・Kriging近似が可能に	紹介記事
67	日経デジタルエンジニアリング	2002	品質向上・期間短縮で本領発揮必要に応じてソリッド化	日経デジタルエンジニアリング, 2002年10月号, pp87-89	・公差解析ツールによる最適化を紹介	紹介記事
68	垣田健, 堀藤二, 菅谷智, 永田亮平, 梶川寿, 安達範久	2002	CAEを用いた鋳造用鋳型設計条件の最適化	品質工学会第10回研究事例発表大会講演予稿集, pp54-57	・マツダの事例 ・誤差因子は調合 ・ソルバーの制御はI-SIGHTにやらせている	適用事例
69	白川智久, 斎藤之男, 矢野宏, 福井徹	2002	伝熱シミュレーションを用いたパラメータ設計	品質工学会第10回研究事例発表大会講演予稿集, pp42-45	・東京電機大学 ・誤差因子は調合せず外側L81に割付け ・ソルバーの制御はI-SIGHTにやらせている	適用事例
70	高橋英俊, 丸田敏浩, 三国雄一, 湊祐之, 関谷純子	2002	フレーム設計におけるCAEと品質工学の融合	品質工学会第10回研究事例発表大会講演予稿集, pp38-41	・富士ゼロックスの事例 ・ノイズは調合 ・ソルバーの制御はI-SIGHTにやらせている	適用事例
71	広田知生, 東川芳晃	2002	CAO手法を用いたプラスチック衝撃吸収部品の最適設計	成型加工学会講演前刷集, pp151-152	・住友化学工業の事例 ・自動メッシュ修正技術の応用例紹介	適用事例
72	鎌田慶宣, 福島広隆, 萩原一郎	2002	応答曲面法を用いた低周波数域車内音低減最適化技術	日本機械学会論文集(C編), Vol.68, No.673, pp2556-2563	・三菱自動車の事例(東工大) ・いくつかの最適化法を比較 ・実験ではなく音響解析を使用 ・多峰性があるため実験計画は用いていない	適用事例
73	尼子龍幸	2002	FOAにおける応答曲面法による寸法最適化	R&D Review of Toyota CRDL Vol. 37 No. 1 pp31-36	・設計の初期段階でのFirst Order Analysis (FOA)における最適化計算手法の一つとして, 形状寸法の最適値やその影響度を算出する寸法最適化に応答曲面法を採用することを紹介。	アルゴリズム研究
74	大林茂	2002	CFD利用の新段階-数値最適化	日本機械学会誌, Vol.105, No.999, pp2-7	・数値流体力学(CFD)を切り口にしているが, 最適化問題を広範囲にレビューしている	手法解説
75	中森義輝	2002	システム工学	【単行本】コロナ社	・ニューラルネットワーク, 遺伝子アルゴリズムを解説	手法解説
76	尾崎幸洋, 宇田明史, 赤い俊雄	2002	化学者のための多変量解析	【単行本】講談社サイエンティフィック	・PLS回帰の解説 ・MODDEの解説	手法解説
77	南茂夫監修, 河田聡	2002	科学計測のためのデータ処理入門	【単行本】CQ出版社	・最小二乗の意味について解説(pp122-123) ・非線形最適化問題も扱う	手法解説
78	于強	2003	実用非線形最適化手法と構造システムの最適設計	機械の研究, Vol.55, No.3, pp10-18	・多目的最適化にSQPを使用したとあるがSQPについては解説なし。 ・同時最適化ではなくシーケンシャルに行なっている。	アルゴリズム研究
79	渡邊真也	2003	近傍個体の交叉に基づく多目的遺伝的アルゴリズムとその応用に関する研究	同志社大学大学院工学研究科知識工学専攻博士論文,2003年3月	・多目的遺伝子アルゴリズムについてレビューあり	アルゴリズム研究
80	日経デジタルエンジニアリング	2003	特別レポート-理想の設計がここにある 品質工学とCAEの最強タッグ	日経デジタルエンジニアリング, 2003年10月号, pp92-99	・効用を説いているが, 気になるのは加工誤差が固有振動に与える影響を小さくしたという内容	紹介記事
81	日経デジタルエンジニアリング	2003	NDEトレンド-複数の設計要求を高いレベルで調和する	日経デジタルエンジニアリング, 2003年11月号, pp101-103	・いくつかの最適化支援エンジンに搭載された多目的最適化法についてレビュー	紹介記事
82	D&A小林社長	2003	Mech D&A News【特集】現代のCAE-シミュレーションの技法-	Mech D&A News Vol. 2003-4	・陽解法と陰解法 ・不確定性と確立過程	紹介記事
83	渡邊真也・廣安知之・三木光範	2003	遺伝的アルゴリズムを用いた多目的最適化へのアプローチ	日本機械学会誌, Vol.106, No.1011,p49	・多目的GA探索についての解説	適用事例
84	Thomas J. Santner Brian J. Williams William I. Notz	2003	The Design and Analysis of Computer Experiments (Springer Series in Statistics)	【単行本】Springer,USA	・コンピュータ実験の問題点を初めて指摘	手法解説
85	Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery	2003	Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments 2nd EDITION(Wiley Series in Probability and Statistics.)	【単行本】Wiley,USA	・応答曲面法の解説の草分け	手法解説

表 2.1 のつづき

86	David Rupperet, M.P.Wand, R.J.Carroll	2003	Semiparametric Regression	【単行本】CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS,USA	・Kriging等の新しい回帰手法の解説	手法解説
87	菊池昇	2004	FEM(有限要素法)からCAEへ	豊田自動織機技報, No.48, FEB, 2004	・構造物のトポロジー最適化という学問領域について解説 ・ミンガン大菊池先生は非線形CAEの分野の大家	アルゴリズム研究
88	多田健一, 谷藤眞一郎, 杉本昌隆, 谷口貴志, 小山清人	2004	最適化システムによるCAEパラメータ取得技術の開発	プラスチック成形加工学会(2004年6月3~4日), 工業レオロジー-IV-104, pp285-286	・CAE解析に必要な物性パラメータをフィッティングさせるため、実験とCAE解析の結果の誤差を最小とするような最適化を行った。	アルゴリズム研究
89	日経デジタルエンジニアリング	2004	設計パラメータのばらつきを考慮した解析を自動実行「MSC.Robust Design 2004」	日経デジタルエンジニアリング, 2004年2月号, p41	・製品情報	紹介記事
90	廣川敬康	2004	溶接学会誌特集-最適化の手法と適用-応答曲面法による最適設計と適応的累積関数近似法の紹介	溶接学会誌, Vol.73(2004), No.3, pp5-12	・著者は適応的累積関数近似法という応答曲面関数導出法を開発。 ・サンプル点の追加により精度向上が可能であるという。	手法解説
91	泉井一浩	2004	溶接学会誌特集-最適化の手法と適用-GAによる最適化手法の現状と所期設計時の多目的最適化への展開	溶接学会誌, Vol.73(2004), No.3, pp13-18	・遺伝的アルゴリズムは多目的最適化問題においてパレート最適解集合を求めるのに適す。	手法解説
92	米澤智志	2004	溶接学会誌特集-最適化の手法と適用-自動化・統合化・最適化ソフト「SIGHT」の最新の技術動向と事例紹介	溶接学会誌, Vol.73(2004), No.3, pp19-22	・分散分析を使わず、効果の大きさのみで比較している	適用事例
93	小代泰弘, 金子康智, 森一石, 山下洋行	2004	溶接学会誌特集-最適化の手法と適用-振動数のばらつきを考慮した圧縮機動翼の最適設計法	溶接学会誌, Vol.73(2004), No.3, pp23-27	・タグチメソッドの事例である。 ・制御因子の振り方は、0%としているので、サンプル点毎に摂動量は異なるのであろう。	適用事例

収集した文献は身近にあり手に入りやすかったものが大半であるが、それでもほぼ 100 件に上った。これらから単なる手法解説と紹介記事を除いた 48 件が手法研究および適用事例研究に関する報告であった。これらを次のように分類してみたところ研究者の関心の高い領域が分かった。(最適化に持ち込むまでのアルゴリズム研究とは、最適解探索ステップに入る前のモデル化手順やその効率化(例えば実験計画法の適用など)に関する研究のことである)

- ・ 最適化に持ち込むまでのアルゴリズム研究 18 件 約 38%
- ・ 収束効率をあげるためのアルゴリズム研究 3 件 約 6%
- ・ 収束精度をあげるためのアルゴリズム研究 2 件 約 4%
- ・ 適用事例研究 25 件 約 52%

これより、最適化に持ち込むまでのモデル化アルゴリズム、すなわち実シミュレーション回数の低減など効率化に対する関心が高く、No.11 の文献を皮切りにして直交表を用いた効率化などが適用事例とともにさかんに議論されている状況が分かった。一方、モデル化後の最適解への収束効率に関しては公表されることが少なかった。これらの研究はソフトウェアベンダーのノウハウと深く関係することが影響していると思われる。なお、本論文の研究テーマである“下流再現性”の向上に該当するような研究は4%しかなく、以前から関心が低かったことが判明した。この理由は、2.3 で述べるように JSQC 会長の高橋氏が指摘するまで、最適化手法のメリットばかりがクローズアップされ、デメリットに目が向けられていなかったためと考えられる。

表 2.2 先行研究の動向(97年～04年)

年度	97	98	99	00	01	02	03	04	合計
アルゴリズム	1	4	3	2	3	1	2	2	18
効率化			2		1				3
精度					2				2
事例		1		9	7	5	1	2	25
合計	1	5	5	11	13	6	3	4	48

また、これを表 2.2 のように時系列に並べて見てみると、この分野の動向が読み取れる。

代表的な最適化支援エンジンである i-SIGHT が登場したのが 3.2 で述べるように 95 年であり、日本での普及が始まったのが 97 年である。これに対応するように、98 年には企業による初期の適用事例 (No.16) が公開されている。最適化支援エンジンが爆発的に普及し実験の割付けを肩代わりするようになる 2000 年前後に適用事例研究数もピークを示した。またこの頃は、表 2.1 の No.28 に見られるように専門誌もさかんに特集を組んでいた。しかし、この 2000 年前後を境に適用事例研究数は漸減した。これは、普及が一巡し物珍しさが失せてきたためであろう。全体の文献の合計も 01 年にピークを示した後漸減している。しかしその一方で、アルゴリズム研究だけは粛々と継続されていることが分かる。ただし、最近のアルゴリズム研究を見ると GA, SA などの探索手法に視点が移り、モデル化の効率化を論じているものは姿を消している。

2.2 代表的な研究のレビュー

次に先行研究のうち代表的報告をレビューし、本論文の議論を展開する上での参考とするとともに、反論すべき点を明確化する。

No.8 はロバスト最適の定義を OR 流の満足化問題としている。ロバスト最適の定義は 1.1.7.1 で指摘したとおり 2 種類あるが、本論文の立場はバラツキに対する頑健性である。

No.10 はモデル化ステップに直交表を適用することを提案した論文である。従来の SQC のパラダイムをそのままシミュレーション実験に適用した論文であり、3.5 で指摘するように問題が多いが、機械設計者には大きなインパクトを与えたと思われ機械学会論文賞を受賞している。なお、当時の i-SIGHT のアルゴリズムとの差は殆ど無く発表時期も微妙に重なっている。

No.18 は応答曲面法が多峰性の問題に弱いことを指摘している。これについて異存は無い。

No.26 は応答曲面を作る上で大規模な計画を用いない代わりに極値付近で実験点を追加しながら近似式を収束させるという効率化法を提案している。しかし統計的配慮は全く無く推定しすぎの問題がある。

No.42, 43 は著者の特徴ある指摘が目立つ。しかし、本論文はこのような態度が技術のブラックボックス化を招くものとする立場であり、迎合することはない。

No.44 はシミュレーションを用いたロバスト最適化は制御因子の変動しか扱えないことを指摘している。

No.56 はタグチ・メソッドのように外側に調合誤差を割付ける方法の問題点を他者の論文の引用

により指摘している. この調合誤差を割付ける方法は No.51 に見られる. この問題は No.41 の著者が来日して講演したときも指摘していた.

No.84 はコンピュータ実験の問題点を指摘した示唆に富んだ教科書である.

No.88 は合わせ込みを扱った数少ない報告である.

以上のように特徴ある報告も多くあり, これらを調べることは研究を進める上で貴重な示唆を多く与えてくれた.

2.3 本論文の位置付け

2.3.1 横幹連合の研究会活動と新たな研究テーマ

2002 年, 横断型基幹科学技術学会連合(横幹連合)研究委員会において“シミュレーションと SQC 調査研究委員会”が設置され, (社)日本品質管理学会(以下, JSQC)がその幹事学会となった.

横幹連合の研究会活動は当時 JSQC 会長の故高橋氏の提言により発足した. 提言は, “今日, 技術開発の多くの現場では偏微分方程式に基づく数値シミュレーションが実施され開発を加速している. しかし数値解と実機実験との整合性は高くなく設計開発コスト削減の最大の阻害要件となっている. この問題はアカデミアが総力を挙げて解決すべき課題である.”という内容であった.

JSQC では, この提言を受け 2003 年 9 月開催の理事会において筑波大学大学院教授椿広計氏を主査とした“シミュレーションと SQC”拡大研究会を発足させた.

拡大研究会は次の分科会から構成された.

WG1: シミュレーションにおける SQC の活用, 主査仁科健氏(名古屋工業大学)

WG2: 予測精度改善のための数理・計量的アプローチ, 主査山田秀氏(筑波大学)

WG3: デジタルエンジニアリングと品質保証, 主査金子龍三氏(日本電気通信システム株)

WG4: デジタルエンジニアリングと品質保証(自動車), 主査天坂格郎氏(青山学院大学)

WG1 は, 主に中部地区の自動車産業をはじめとする製造業に携わる設計者, 生産技術者といったシミュレーションの適用面での利用者を中心にメンバーが構成された. 筆者は, 自動車部品製造メーカーに所属する生産技術者として WG1 に参加する機会を得た.

各分科会の活動目的は, 統計的アプローチによりこの課題を解決に導くことであった. WG1 は上記構想に基づき, 次のような観点で研究を行った.

- ① CAE 現場における課題を明らかにし, CAE における SQC へのニーズ分析を行う.
- ② SQC から CAE に発信できること, 啓蒙すべき点を探る.
- ③ CAE 現場からのニーズに応えるための SQC の問題点を探り, シミュレーション精度の向上への提案を行う(第 2 分科会(WG2)との協力).

WG1 では、まず上記①, ②に関連する問題を抽出するために各社の事例を検討し整理する活動を行った。2004年3月から2007年3月まではほぼ毎月研究会を開催し、この間以下のようなテーマに関して議論を重ねた。

- ① 合わせ込みの効率化および設計者の視点から見た合わせ込み過ぎの対策
- ② ロバスト最適化の下流再現性確保のためのバラツキ因子の効率的抽出方法
- ③ ロバスト最適化の下流再現性確保のためのバラツキ因子を含んだ実験計画法

2.3.2 本論文の位置付け

横幹連合の研究会を通じて実際の開発現場に携わる設計者や生産技術者らの声を聞くことができた。それによると、現在急速に普及している最適化支援エンジンの多くが GA などの探索手法を駆使して最適設計値を探し出しているために、設計者が“なぜその設計値が最適なのか、どの要因が効いていたのか”というパラメータと応答の因果関係を知らないまま設計が完了するという状況に陥っていることが明らかになった。さらに技術が蓄積していかないために、開発の都度同じサイクルを回す必要があり一向に効率化が進まないばかりか、技術力の低下さえ招きかねない状況であることが浮かび上がった。これらは、設計現場の視点で見た危機感である。

しかし残念ながら、先行研究を調査した結果、これまでの研究はシミュレータや最適化支援エンジンの開発者あるいは解析担当者の視点での研究が主流を占めていることが明らかになった。端的に言えば、シミュレーションの開発者は“効率・収束速度”に目が向いているのに対して、製品の開発現場あるいは製造現場にいる技術者は、シミュレーションで求めた最適値が現場あるいは実機で再現できるかどうかという“下流再現性”と、なぜそれが最適なのかという技術的ヒントを与えてくれることが重要だと感じていたのである。特に下流再現性の問題は高橋氏が指摘するまでアカデミアで取り上げられることは皆無であった。本論文のスタンスは当然のことながら後者である。

[参考文献]

割愛(本文中の表 2.1 に示す)

3. 従来の最適化手法の整理を通じた研究課題の明確化

3.1 はじめに

SQC 手法を用いて設計パラメータを最適化することは SQC の黎明期から行われてきた。一般的な手順は多水準系実験計画に設計パラメータを割付けて実験を行い最適水準を選択する方法であるが、一部では応答曲面近似式と数理計画法を組合せて水準の間の最適値を推定する方法も使用されてきた。近年、応答曲面を用いた最適化ソフトの進歩により、複数の応答を対象とした同時最適化が可能となった。これを利用し、特性値の平均値と誤差の応答を対象にして同時最適化するロバスト最適化が行われるようになった。

第 3 章では、その方法論を解説するとともに、今日的な課題として、特性値をシミュレーションで求めた場合の特殊性について問題点を整理する。

3.2 最適化技術の歴史

尾田ら^[1]の報告によれば、1990 年頃までは、最適化支援エンジンの最適化部は数理計画法や最適性規準法のみであり、数理計画法のルーチンが直接ソルバーを動かしながら最適点への収束が図られていた。つまり設計者の試行錯誤を肩代わりする程度のものであった。1995 年頃になると、最適点探索にも効率が求められるようになった。川面ら^[2]は、設計パラメータを実験計画に割付け、特性値の応答を少ない解析回数で曲面関数に近似し、効率的に最適値に到達するという手法を紹介している。1994 年から隔年で開催されている日本機械学会最適化シンポジウムでは 2000 年度の報告の約 25%を応答曲面近似による最適化事例が占めていることから、現在では応答曲面から最適点を求める手法はかなり一般的になっていると考えられる。1998 年には、柏村、白鳥ら^[3]のロバスト最適化の研究が日本機械学会の論文賞を受賞している。このように近年ではロバスト最適化も行われるようになってきている。

最適化支援エンジンは 1995 年 GE から独立した Dr.Tong が作った i-SIGHT が代表的である。これは主にメインフレーム上で動作するソフトで、年間ライセンス料も高額であるが、急速に普及しつつある。また、ソルバーを制御する機能は無いがパソコン上で動作する安価な最適化ソフトも普及している。

品質工学会では 2000 年のシンポジウムより“シミュレーションを用いたロバスト設計”と題したセッションを開設している。タグチ・メソッドもデジタルエンジニアリング時代に呼応して変化している。これまでタグチ・メソッドでは理想機能を直線モデルで表していた。一方、シミュレーションでは後述するように、誤差の大きさが変化するのは非線形の特徴でしかない。そこでこの問題点に対して、標準 SN 比という非線形モデルを持ち込んだのである。

3.3 最適化問題の種類

最適化問題には、単一目的の最適化、多目的最適化、複合領域の最適化がある。それらを図 3.1 に示す。

単一目的の最適化とは、系の応答を設計パラメータを変更しながら測定し、応答が目的の値になるように設計パラメータを最適化するという問題である。

多目的最適化とは最適化したい系はひとつであるが応答が複数ある場合である。応答を平均値と誤差にするとロバスト最適化問題になる。(前述したように“多目的最適化”の用語に関してはCAE 関連業務の慣習にしたがった。また、このときの“応答”を“目的関数”とよぶこともある)

複合領域の最適化とは巨大システムの最適化であり、ここではある系の応答が別の系の設計パラメータになるなど、問題が複雑になる。山川^[4]によれば米国機械学会 (ASME) では、近年この話題が中心になっているということである。

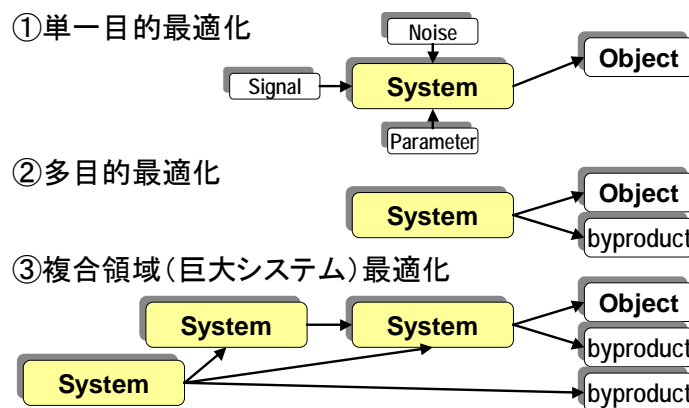


図 3.1 最適化問題の種類

3.4 最適化の方法

3.4.1 事例の概要

事例として、RC (ラジコン) カーの設計パラメータの最適化を取り上げる。表 3.1 のように 19 のパラメータ (独立なパラメータは 16) とそれらの値の幅が与えられている。特性値はサーキットを周回するラップタイムである。最小のラップタイムで周回できるようするには、各パラメータをいくりに設定すればよいかという最適化問題である。なお、シミュレータはインターネット^[5]から入手できる。

表 3.1 RC カー・シミュレーションのパラメーター一覧

シャシーパラメータ	略号	最小値	最大値	中央値
車体重量(kg)	SZ	1.2	1.8	1.5
タイヤのグリップ(G)	TG	1.28	1.92	1.6
駆動輪荷重比	KH	0.8	1.2	1
駆動輪直径(mm)	KC	56	84	70
ギア比	GR	2.0	6.0	4.0
ギア効率	GK	0.68	1.02	0.85
ころがり抵抗係数	KT	0.0528	0.0792	0.066
回転部分相当重量(kg)	KS	0.18	0.27	0.225
ブレーキ時制動輪荷重	SK	SK=KK		
ブレーキ時制動輪の浮き	SU	0.56	0.84	0.7
前輪荷重	ZK	ZK=i-KK		
後輪荷重	KK	0.4	0.6	0.5
ボディパラメータ	略号	最小値	最大値	中央値
抗力係数(CD)	CD	0.294	0.788	0.541
前面投影面積(m ²)	ZT	0.0191	0.0224	0.02075
制動輪ダウンフォース係数(CI)	SD	SD=KD		
前輪ダウンフォース係数(CIf)	ZD	-0.032	0.186	0.077
後輪ダウンフォース係数(CIr)	KD	0.082	0.84	0.461
モータートルク特性	略号	最小値	最大値	中央値
最高回転数(rpm)	MR	16500	23700	20100
最高(静止時)トルク(kg-cm)	MT	1.73	1.98	1.855

応答曲面の関数を作るには、各パラメータの 1 次効果(主効果)、2 次効果、2 因子交互作用の各係数と、定数項を求めなければならない。したがって必要な方程式の数すなわち独立な解析の回数 N は、パラメータ数を p とすると式(3.1)のようになる。

$$N=p+p+p_p C_2+1=(p+1)(p+2)/2 \quad (3.1)$$

$p=19$ の場合、必要な解析回数は 210 回にもなり非効率である。そこであらかじめ効果の大きいパラメータだけを選定する。このステップをスクリーニングとよぶ。 $p=5$ まで絞り込めれば、式(3.1)より 21 回の解析で済むことが分かる。

スクリーニングの後、応答曲面を求める。21 回程度の解析数で各係数がきちんと分離して求められるような実験の割付けを行う必要がある。その割付けに沿ってラップタイムを求め、最適化ソフトに入力すれば応答曲面が計算される。応答曲面の極小値がラップタイム最小であるので、その時のパラメータが最適パラメータ値となる。

最適値はこのように求められるが、実際の設計ステップとしては不十分である。最適値付近の応答曲面を見てみると図 3.2 のように傾斜が急な曲面や、図 3.3 のように比較的なだらかな曲面がある。傾斜が急な曲面は、最適値の付近でパラメータがばらつくと急激に特性値が悪化すると思われる。一方傾斜がなだらかな曲面はパラメータが少々ばらついても特性値は安定している。したがって傾斜がなだらかな場合のほうが好ましい。このようにパラメータの変動に対して特性値を安定させることも重要である。いわゆるロバスト化である。

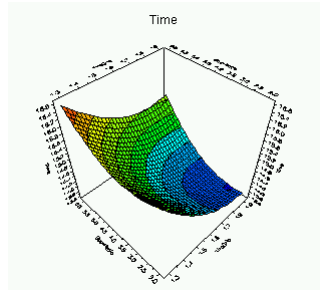


図 3.2 傾斜が急な応答曲面

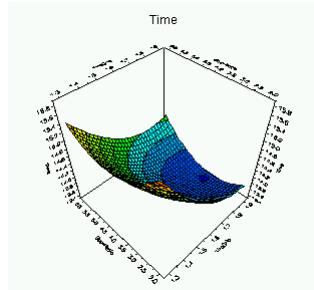


図 3.3 傾斜が緩やかな応答曲面

次節以降, 最適化に用いるSQC手法について手順を追って説明する. なお, 本論文ではパソコンで動くMODDE(株インフォコム)という最適化ソフトを用いた.

3.4.2 設計パラメータのスクリーニング

従来は, スクリーニングでは各パラメータが特性値に効いているか否かだけが分かればよいとして, 1 次の効果が分離できれば十分であると考えられてきた. したがってレゾリューションⅢの2水準系実験計画が用いられる. このとき, 凸形の効果のために有効なパラメータを見落とす可能性があるため, 念のため全てのパラメータの中心点を加えておくことが多い. シミュレーションでは誤差が無いので中心点の繰り返しは1回で十分である.

本事例ではパラメータ間に関数関係があるものが存在するので, それらを除いた16パラメータの効果が測定対象となる. パラメータを定義して最適化ソフトでスクリーニングを指定すると, 次のようにいくつかの実験計画が提案され, 下線のことを推奨してくる.

Design	Recom.	Runs	Model
Frac Fac Res V		256	Interaction
D-Optimal		144	Interaction
<u>Frac Fac Res IV</u>	<u>First</u>	<u>32</u>	<u>Linear</u>
Plackett Burman	Second	20	Linear
D-Optimal		32	Linear

レゾリューションⅣの実験計画で, 実験回数は中心点を加えて33回である. もっと小規模な実験も可能であるが, 交絡が一番少ないものがデフォルトであるので, ここでは指示にしたがってこの実験計画を使用する.

割付け表も最適化ソフトが作成するので, これをシミュレータにカット&ペーストしてラップタイムを計算し再び最適化ソフトに戻る.

次に, 計算結果を元に16パラメータの中でどれが特性値に効いているかを調べる. 現物実験では分散分析を用いたが, シミュレーションでは繰り返し誤差が発生せず群内変動が0になる点に注

意が必要である。

基準化した各パラメータの値を x_i , モデルのあてはめの欠如を ξ , 実験誤差を ε とするとスクリーニング実験における特性値 y は式 (3.2) のように表される。

$$y = \sum \beta_i x_i + \xi + \varepsilon \quad (3.2)$$

β_i はそれぞれのパラメータの効果である。シミュレーションでは $V(\varepsilon) = 0$ であるから ε と β_i の分散比は計算できず、原理的に分散分析はできない。

スクリーニングでは交互作用を考慮していないため、これによるあてはめの悪さが ξ に入っている。したがって、 ξ に対する β_i の大きさを記述的に比較することは可能である。ただし、実験計画の規模により ξ の大きさが変化することに注意が必要である。

一方、効果の小さいパラメータを誤差に埋もれているとみなし ε にプーリングして分散分析を行うことはできない。なぜならば、シミュレーションではパラメータの値は全て計算結果に反映されそれらの効果はどんなに小さくても全て観測可能でかつ偏りを持っているため、これらをプーリングした ε は正規分布に従わないからである。したがってプーリングを行った時の F 値で統計的有意性を判定することは避けるべきである。残念ながら有意性を判定する拠り所は現在のところ存在しない。

そこで、ここでは β_i の絶対値をパレート図で比較し大きい方から 5 個採用することにする。図 3.4 より TG, GR, MR, KC, KT を効果ありと見なす。念のため、凸形のために見落としたパラメータが無いか調べておく。散布図をひとつひとつ確認したところ、本事例では上記パラメータ以外に凸形は存在しなかった。

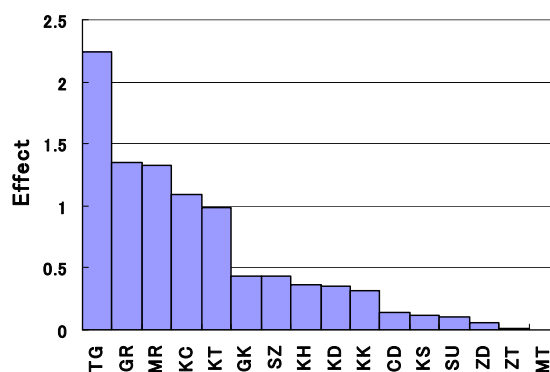


図 3.4 パラメータの効果 β_i の絶対値のパレート図

3.4.3 応答曲面モデリング

効果が大きいと分かった 5 個のパラメータの値を振って応答曲面を求める。これら以外のパラメータは、値を振っても特性値への影響は小さいので中心値に固定する。応答曲面モデリング(以

下 RSM)を目的とした実験計画はレゾリューション Vで、かつ 2 次の推定を行う必要があるので 3 水準系実験計画が用いられる。

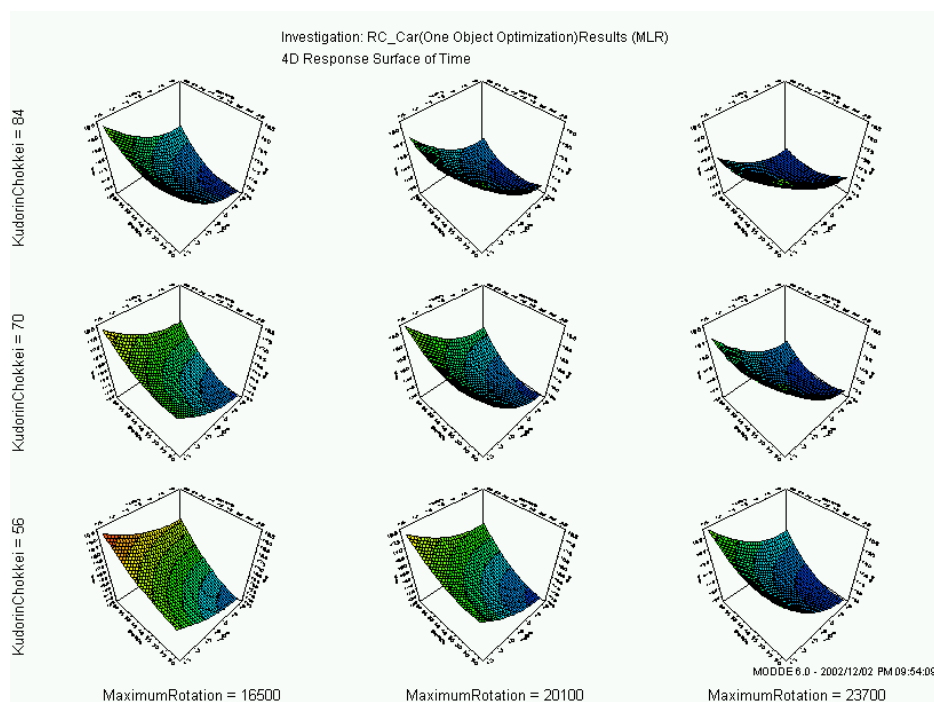
最適化ソフトで RSM を指定すると、次のような実験計画が提案され、下線のものが推奨される。

Design	Recom.	Runs	Model
Full Fac (3 levels)		243	Quadratic
Box Benhken		40	Quadratic
CC(回転可能)		26	Quadratic
<u>CC(面内)</u>	<u>First</u>	<u>26</u>	<u>Quadratic</u>
D-Optimal	Second	26	Quadratic

中心点を加えて 27 回の実験からなる中心複合計画 (Centered Composite Design) である。スクリーニング同様、割付け表を作成してくれるので、シミュレータにカット&ペーストしてラップタイムを計算し再び最適化ソフトに戻る。すると即座に応答曲面近似式を計算してくれる。

ここで本来なら回帰診断に基づいてパラメータ選択を行い、不要な交互作用項や 2 次項を除外する必要がある。本論文では紙幅の都合でその説明は省く。

生成された応答曲面を図 3.5 に示す。ロバスト最適化を行わない場合は、この応答曲面の極小値を与えるパラメータ値が最適値となる。



(座標軸は右側がTG—左側がGR, 配置は横にMR—縦にKC)

図 3.5 特性値の応答曲面

3.4.4 ロバスト最適化

ロバスト最適化は、特性値の偏差の統計量(レンジあるいは標準偏差)を求めて誤差とみなし、この応答と先に求めた特性値の応答とを併せて最適化を行うことで達成される。本来偶然であるべき誤差にモデルを仮定するのは間違いであると批判が出そうだが、求めているのは図 3.6 に示すように特性値の応答曲面近似式にパラメータの変動した値を代入したときの偏差の応答であり、パラメータの関数として表現するのは間違いではない。

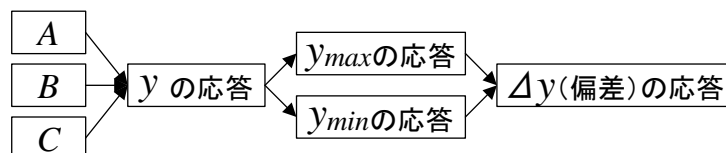


図 3.6 ロバスト最適化に用いる偏差の応答の求め方

一方、特性値の平均値の応答と偏差の応答は、共通の関数から導出され独立ではない。そこで、Myers et al. [6]が提案する“dual response modeling approach”の考え方にに基づき、多目的同時最適化を行う。

このステップでは、設計パラメータの関数で誤差を近似することがポイントとなる。赤木[7]が紹介するように、応答曲面関数を偏微分して得られる勾配から 1 次近似するか、関数に乱数を代入して特性値の偏差を求め、これを特性値の誤差と見なす方法が用いられる。これらは内乱の影響を評価する方法である。特性値が非線形となるパラメータのみに誤差の応答変化が現れることが特徴であり弱点でもある。外乱の影響を評価するときは、外乱を外側に割付けたときの特性値の偏差を用いる。

タグチ・メソッドでは特性値の偏差が+側に振れる最悪のパラメータセットを N_1 、-側に振れる最悪のパラメータセットを N_2 とする“誤差の調合”により実験回数を減らすことを奨励しているが、シミュレーションでは行ってはならない。なぜならば偏差が最大となる方向は応答曲面の最大傾斜方向であるが、それは一定方向ではないので常に同じパラメータセットで表すことができないからである。

本事例では、近似式にパラメータの上下限値を総当りで代入して特性値の変化幅を求め、その応答曲面を作る。パラメータが 3 個の場合の実験空間のイメージを図 3.7 に示す。この方法のメリットは応答曲面の極値においても 1 次近似法のように偏差が 0 にならないことおよび乱数法より効率的であることだが、偏差が最大となる偏微分係数の最大方向の組合せを必ずしも含まないというデメリットもある。ただし、その対策のために上下限値以外に点を増やし、3 水準以上の点を設けるときは、それらの点の中心からの距離が上下限値と等価になるように座標変換しなければならない。

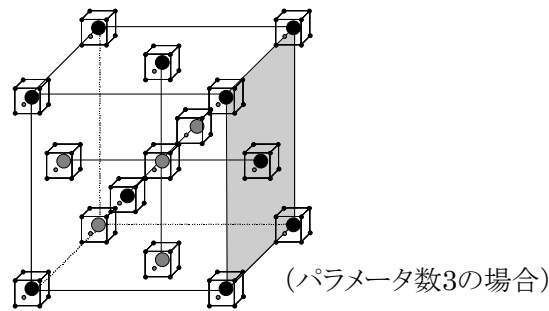
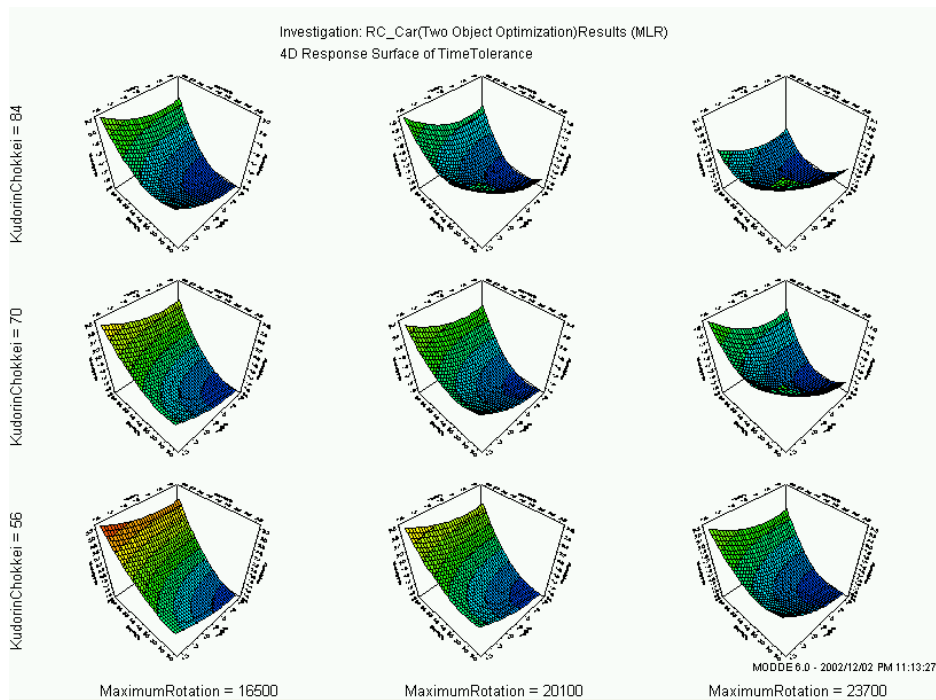


図 3.7 パラメータ摂動の実験空間イメージ

ここで各パラメータは取り得る値の1割程度はばらつくと仮定し、最適化ソフトの特性値予測機能を用いて計算させ偏差の統計量(レンジ)を求める。得られた応答曲面を図 3.8 に示す。



(座標軸は右側がTG—左側がGR, 配置は横にMR—縦にKC)

図 3.8 偏差の応答曲面

最後に、ふたつの応答曲面関数を用いて多目的最適化を行う。多目的最適化とは、同時に複数の特性値を対象にして最適化することである。中山ら^[8]が示すように、まず各々の特性値のターゲット値と側面制約条件から好ましき度あるいは乖離度を求め、これにそれぞれの特性値のウェイトを乗じて合算したスカラー量を求めておく。次に単一目的の最適化手法を用いて、このスカラー量の最適値を探索する。

好ましき度、乖離度の算出方法はソフトにより異なる。そこで、特性値のターゲット値を 50、側面

制約(許容範囲)を±20として、算出方法の違いを比較する。

JMP および JUSE-STATWORKS は Derringer and Suich^[9]の方法を採用している。この方法は図 3.9 のように側面制約条件範囲内の好ましき関数を定義しているが、側面制約を外れると、いくら外れても悪さ加減は同じと仮定し 0 と置いている。

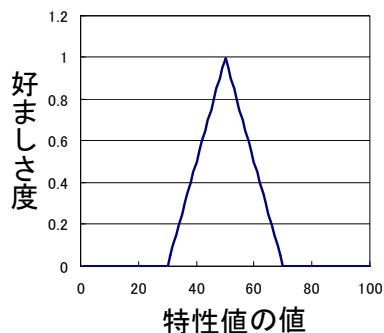


図 3.9 好ましき関数

MODDE^[10]は異なる方法を採用している。この方法は図 3.10 のように側面制約条件範囲内では乖離度を 0 としているが、側面制約を外れたときは、外れ量の 2 乗で乖離度が増加する関数になっている。どちらを用いるにしてもユーザがその性質を理解していることが重要と思われる。

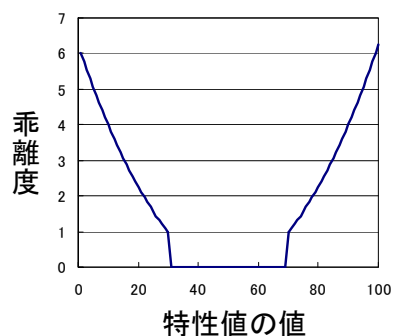


図 3.10 乖離度関数

最適化ソフトで多目的最適化を指定すると、図 3.11 のような画面が現れる。本事例ではウェイトを両者とも 1 と仮定した。解析を指示すると数理計画法ルーチンが起動し図中ハッチング部のようにパラメータの最適値を求めてくれる。

The screenshot shows the Optimizer software interface. At the top, there are control buttons and a status bar. Below that is a table of optimization factors and responses. The 'Iteration' is set to 50. The main table shows the results of 5 iterations for 5 factors: TireGrip, KudorinChokkei, GearRatio, KorogariTeiko, and MaximumRotation. The response variables are Time and TimeTolerance. The results are summarized in the table below.

Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit	Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1 TireGrip	Free		1.28	1.92	1 Time	Minimize	1		12.7111	13.3677
2 KudorinChokkei	Free		56	84	2 TimeTolerance	Minimize	1		0.491323	0.77001
3 GearRatio	Free		2	6						
4 KorogariTeiko	Free		0.0528	0.0792						
5 MaximumRotation	Free		16500	23700						

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	TireGrip	KudorinChokkei	GearRatio	KorogariTeiko	MaximumRotation	Time	TimeTolerance	iter	log(D)
1	1.9108	56.0435	2.7696	0.0791	23687.8	13.1206	0.6708	44	-0.3958
2	1.8925	56.3902	2.6982	0.0789	23697.2	13.1129	0.6781	50	-0.3853
3	1.9159	56.0761	2.479	0.079	23678.1	13.1013	0.6749	49	-0.4051
4	1.9106	56.5035	2.7106	0.0791	23659.6	13.1284	0.6748	40	-0.378
5	1.92	56	2.6	0.0792	23700	13.1086	0.6678	17	-0.416

図 3.11 最適化エンジンの最適化画面 (MODDE)

3.5 最適化手法の今日的課題

最適化ソフトを用いることにより設計パラメータの最適化を簡単に行うことができるので、ほとんどの設計者は SQC 手法の手順をブラックボックスのまま使用している。しかし、ある程度の知識がないと最適化ソフトの出力の意味やステップが理解できず、誤った解に到達するという問題がある。特に特性値としてシミュレーションの結果を用いる場合は、多くの点が従来の SQC 手法と異なるので問題は深刻である。3.2 で述べたように、この技術は 95 年頃から急速に普及してきたため解説が十分に行われていないなど、問題は利用者の責任ばかりともいえない。例えば柏森ら^[11]による解説では、2 次の応答曲面近似式を求めるのに直交表が使用してあったり、分散分析を従来の方法で用いたりするなど普及する立場から見て問題が多い。

以下、ステップ毎に主な例をあげて問題点を整理する。このほかにも問題点をあげれば枚挙にいとまがない。

3.5.1 スクリーニングのステップの問題点

シミュレーションを用いる場合は分散分析の意味が現物実験のときとは異なるので、そのことを知らなければスクリーニングの結果が違ってくる。シミュレーションでは、分散分析を従来どおりに用いると、多くの場合ほとんどのパラメータが有意になってしまう。

また、後述するように、主効果のみを評価対象とすることによって重要な因子の見落としが発生する問題がある。

3.5.2 応答曲面モデリングのステップの問題点

応答曲面を作るにはそれに適した実験計画が必要であり、最適化ソフトは D-Optimal も含め多くの計画を提案してくれる。しかしこれらの計画の知識がなければ戸惑う。直交表はレジリユーション III の実験計画であるため不適切であるが、これまで慣れ親しんだ直交表を使用するケースも数多く見受けられる。

また、近似解の精度向上と称して、応答曲面の極値付近の実験点を追加しながら近似式を収束させた事例も見られるが、近似式の推定精度の点では問題がある。これも計画の最適性や回転可能性の知識がなければ見過ごす問題である。

3.5.3 最適化のステップの問題点

多目的最適化の際の重み付け方法が確立していない。特に応答間に内部従属関係がある場合は適切に重みの再配分を行わないと、一部の特性値を犠牲にした解しか得られない。

ロバスト最適化に関しても、誤差の応答の求め方とともに、誤差の重みの考え方も検討が必要である。

3.5.4 シミュレーション特有の問題点

事例説明のところでは避けて通ったが、さらに根元的な問題もある。一般的に応答曲面近似式は最小二乗法によって求められる。最小二乗法には、測定値に偏りがなく、モデルにも近似の誤差がない(等分散である)という前提がある。

シミュレーションは誤差が出ない。正しく言えば測定点毎に一方向のみに偏った大きさ一定の誤差を持っている。すなわち最小二乗法が適用できる前提が崩れており、最小二乗法そのものを適用すべきではないという議論がある。最小二乗に代わるペナルティ調整法が必要であるとする。

また等分散を仮定したにもかかわらず、ロバスト最適化を行う際は誤差の応答を求める。この行為は明らかに自己矛盾である。この対策としては最初から実験計画を飽和させておくか、応答の近似式を作るときに自由度が無くなるように高次の式を作ることである。4次5次の近似式を作った事例も見受けられるが、固有技術的には全く意味の無い対応である。

誤差のモデル化の点でも問題がある。現物の実験では、図 3.6 の A, B, C 以外の制御できない因子や測定不可能である因子はモデルに取り込まなくても、1/f ゆらぎのような確率的変動とともに、これらによる摂動を実験誤差として捉えることができた。しかしシミュレーションではこれらを全く評価できない。したがって、いわゆるノイズファクターをどのようにモデルに取り込んでいくかは大きな課題である。このとき、応答、パラメータ、およびノイズファクター間の統計的因果モデルの構築が解決の糸口になると考える。

3.6 第3章のまとめ

以上、デジタルエンジニアリング、特に CAE と SQC を融合した設計特性の最適化技術について俯瞰した。利用されている手法は SQC の分野では従来から一般的に用いられてきたものである。しかし CAE を用いた最適化は次の点で現物実験の場合とは異なる。

- ① CAE では、繰り返し誤差が発生しないので中心複合計画の中心点の繰り返しや実験の自由度は無意味になる。従来の統計ソフトを使用するときは注意を要する。
- ② ロバスト最適化が行われるが、誤差と称して扱っているのは実は特性値の偏差であり真の誤

差ではない。

③ 現物実験を利用したタグチ・メソッドと比較して、 $1/f$ ゆらぎなどの真の誤差に対するロバストネスは解析できない。すなわち応答を非線形に変化させることのできるパラメータしか評価できない。

以上述べたように、手法は急速に普及しているが解決すべき課題や啓蒙すべき問題点は山積している。これらを表 3.2 にまとめた。今後我々 SQC の研究者がこれらの問題点に取り組み、正しい姿に発展させることが重要であると考え。

表 3.2 SQC と CAE の融合にける今日の課題の一覧表

解析のステップ	変数のスクリーニング			モデル化 (応答曲面法を中心に)		最適化		複合領域最適化
	実験の計画	結果の解析	実験の計画	結果の解析	単一特性最適化	多特性最適化	複合領域最適化	
統計学の分野では確立しているが、その他の分野や市販ソフトでは、必ずしも適用されていない事例	<ul style="list-style-type: none"> 直交表より効率的なフラクショナル・バルマンのような一部実施要因計画があるのに利用されないケースがある。 スクリーニングを行わず、最初から大規模計画に割付けて応答曲面を導いているケースがある。 割付けが適切でないソフトがある。 	<ul style="list-style-type: none"> 自由度の扱い方が旧来のままで、コンピュータ実験を解析しているという認識がないケースがある。 分散分析を従来のまま適用している。(統計的意味は同じではない。効果の小さいものをプルーニングすれば可能だがそれらに偏りがあるため適用できない) 分散分析を用いない時の、有意な要因の抽出方法が何か。 2水準系実験(2次元)の非線形特性(2次元)の高次の特性)をどのように見出すか。(中心点の追加でよい) 交絡はどの程度許容すべきか。 事前に特定の因子間の交互作用があると分かっているケースの計画はどうか。 	<ul style="list-style-type: none"> 中心複合計画など交互作用項を求め、適した計画を用いて直交表を用いているケースがある。 計画の別名関係に注意した交互作用の割付けを行っていないケースがある。 水準幅が一定でないケースがある。 全て内側に割付けるケースがある。 シミュレーションで同一の値しか得られない実験の繰り返しをどう扱うか。 実験を飽和させることが出来ていないケースは自由度をどう扱うか。 スクリーニングで除かれた変数に代入する数値は一定でよいのか、振動させるべきか。 	<ul style="list-style-type: none"> 1次項と2次項を直交させるための、重心化と水準幅の調整を行ってないケースがある。 変数選択を行わないケースがある。 ロバースト最適化のための各実験点におけるパラメータ振動量は共通にすべきであるが、共通にしていないケースがある。 多特性のケースにおいて変数選択は共通で行うべきか、各々の目的関数ごとに行うべきか。 ロバースト最適化のための各実験点における偏差量ほどの程度の幅で振ればよいのか。 ウエイトとの関連は、ばらつきを1次近似2次モーメント法で求める方法は適切か。 	<ul style="list-style-type: none"> 数理計画法で最適点を求められるが、手動操作で最適点を捜すソフトがある。 ロバーストの定義ばらつきが最小となる点とするか、ばらつきも含めて側面制約を満足する点とするか。 極値を収束させるために、仮の極値を新たな実験点として加えて再度モデル化する方法はどの程度問題か。 	<ul style="list-style-type: none"> パラメータの振動で誤差を作っているにもかかわらず2段階設計法を用いるケースがある。 特性値とばらつきを2特性同時最適化せず、統合的側面SN比を使用するケースがある。 スカラ一化しないケースがある。(右へ続く) 	<ul style="list-style-type: none"> 現状ではシリーズで行なわれている。 単なる多目的最適化を複合領域と呼ぶケースがある。 多峰だと認識せずに高次の応答曲面に同時最適化を適用するケースがある。 最適化をシリーズで行なうとき、その順序について決める手法が統一されていない。(代表的なものはMITのDSM法)。 	
統計学の分野でも意見が分かれる事例	<ul style="list-style-type: none"> 過飽和計画の適用はどうか? 多峰性のある特性の解析における一様計画の適用のしかたは? 	<ul style="list-style-type: none"> 外乱も内側に割付けてよいか。(本来は内側と外側の交互作用が問題だが、内側に割付け一緒にスクリーニングしてよいか) 交絡はどの程度許容すべきか。 事前に特定の因子間の交互作用があると分かっているケースの計画はどうか。 過飽和計画の適用のしかたは? 多峰性のある特性の解析における一様計画の適用のしかたは? 	<ul style="list-style-type: none"> 外乱を扱う際の外側割付けの最適方法論は? (直交表かモンテカルロか) ロバースト最適化のために各実験点でパラメータの偏差を与えるが、持つべき偏差点の最適規模は? (総当たりより少) モンテカルロ法で行う時の偏差点の最適規模は? (何) 多峰性のある特性の解析における一様計画の適用方法は? 	<ul style="list-style-type: none"> 各偏差点からばらつきを求めるとき、偏差点における特性値は近似式へ代入して得られた値でよいか、再度CABで解析して求めるべきか? ばらつきのある特性値を用いるとき、どのような統計量を特性値とすべきか? モデルのあてはめの最小2乗でよいか? 	<ul style="list-style-type: none"> ロバーストの定義ばらつきが最小となる点とするか、ばらつきも含めて側面制約を満足する点とするか。 極値を収束させるために、仮の極値を新たな実験点として加えて再度モデル化する方法はどの程度問題か。 	<ul style="list-style-type: none"> 各特性の最適点からの好みしき度乖離度を単一尺度に統合してスカラ一化する方が数種あるが、どの方法が適切か。 目的関数毎のウエイトの与え方の方法論が統一されていないか。 トレードオフの特性の扱い方はどうあるべきか。 目的関数間に内部従属関係があるケースの最適化方法は? ばらつきを与えるウエイトは? ばらつきのある側面制約の大きさはどう与えるか? シミュレーションのパラメータにできない要因の影響はどう見積もるか? (因果モデルを利用できないか?) 	<ul style="list-style-type: none"> 方法論が未確立。 	
未解決の事例	<ul style="list-style-type: none"> 過飽和計画の適用のしかたは? 多峰性のある特性の解析における一様計画の適用のしかたは? 	<ul style="list-style-type: none"> 外乱を扱う際の外側割付けの最適方法論は? (直交表かモンテカルロか) ロバースト最適化のために各実験点でパラメータの偏差を与えるが、持つべき偏差点の最適規模は? (総当たりより少) モンテカルロ法で行う時の偏差点の最適規模は? (何) 多峰性のある特性の解析における一様計画の適用方法は? 	<ul style="list-style-type: none"> 各偏差点からばらつきを求めるとき、偏差点における特性値は近似式へ代入して得られた値でよいか、再度CABで解析して求めるべきか? ばらつきのある特性値を用いるとき、どのような統計量を特性値とすべきか? モデルのあてはめの最小2乗でよいか? 	<ul style="list-style-type: none"> 各特性の最適点からの好みしき度乖離度を単一尺度に統合してスカラ一化する方が数種あるが、どの方法が適切か。 目的関数毎のウエイトの与え方の方法論が統一されていないか。 トレードオフの特性の扱い方はどうあるべきか。 目的関数間に内部従属関係があるケースの最適化方法は? ばらつきを与えるウエイトは? ばらつきのある側面制約の大きさはどう与えるか? シミュレーションのパラメータにできない要因の影響はどう見積もるか? (因果モデルを利用できないか?) 	<ul style="list-style-type: none"> 数理計画法で最適点を求められるが、手動操作で最適点を捜すソフトがある。 ロバーストの定義ばらつきが最小となる点とするか、ばらつきも含めて側面制約を満足する点とするか。 極値を収束させるために、仮の極値を新たな実験点として加えて再度モデル化する方法はどの程度問題か。 	<ul style="list-style-type: none"> パラメータの振動で誤差を作っているにもかかわらず2段階設計法を用いるケースがある。 特性値とばらつきを2特性同時最適化せず、統合的側面SN比を使用するケースがある。 スカラ一化しないケースがある。(右へ続く) 	<ul style="list-style-type: none"> 現状ではシリーズで行なわれている。 単なる多目的最適化を複合領域と呼ぶケースがある。 多峰だと認識せずに高次の応答曲面に同時最適化を適用するケースがある。 最適化をシリーズで行なうとき、その順序について決める手法が統一されていない。(代表的なものはMITのDSM法)。 	

[参考文献]

- [1] 尾田十八(日本機械学会編)[1989]:“構造材料の最適設計”, 技報堂出版, 246
- [2] 川面恵司, 横山正明, 長谷川浩志[2000]:“最適化理論の基礎と応用”, コロナ社, 186-194
- [3] 柏村孝義, 白鳥正樹, 于強[1997]:“統計的最適化手法におけるばらつきと構造信頼性の評価”, 日本機械学会論文集 A 編, 63.[610], 1348-1353
- [4] 山川宏[2000]:“複合領域の最適設計の動向”, 日本機械学会第4回最適化シンポジウム2000 特別講演 I
- [5]<http://member.nifty.ne.jp/QYR03001/calc/calctop.htm>
- [6] R.H. Myers, D.C. Montgomery[2002]:“Response Surface Methodology :Process and Product Optimization Using Designed Experiment 2nd edition”, John Wiley & Sons Inc., USA, 557-586.
- [7] 赤木新介[1991]:“設計工学(下)”, コロナ社, 112.
- [8] 中山弘隆, 谷野哲三(計測自動制御学会編)[1994]:“多目的計画法の理論と応用”, コロナ社, 38.
- [9] G. Derringer, R. Suich[1980]:“Simultaneous Optimization of Several Response Variables”, Journal of Quality Technology, 12, [4], 214-219
- [10]MODDE オンラインマニュアル
- [11]柏森孝義, 白鳥正樹, 于強[1998]:“実験計画法による非線形問題の最適化”, 朝倉書店

4. 合わせ込み

4.1 合わせ込みとは

“合わせ込み (Calibration)”とは、シミュレーションモデルの材料物性値などのパラメータを理論値から故意にずらすことによって、コンピュータ実験の応答を実機実験の結果に“無理やり”合わせることをいう。

CAE 業務は、シミュレーション結果が既存の実機実験の結果をズレなく再現することを前提にしている。しかし一方では、シミュレーションモデルをできるだけ単純化し解析時間を短縮したいという実務上のニーズがある。実際には3次元の形状を持つものを2次元のモデルに単純化しメッシュ数を減らしたり、構造の一部を取り出してモデル化し、その端部を何らかの境界条件で代用したりすることにより解析時間を短縮することが日常的に行われる。

また、実機実験にはシミュレーションモデルでは考慮されていない様々な要因(因子)や誤差が存在している。しかし、シミュレーションモデルに取り上げることができるパラメータ数は、ソルバーの能力や解析時間あるいは解析コストの点で限度がある。

以上の理由から、実機実験の結果とコンピュータ実験の応答に何らかの乖離が生じることがほとんどである。

現状は、残念ながら CAE 技術者の経験やカン・コツに依存して対応している部分が多い。したがって、合わせ込みの効率的な方法を提案することの意義は大きい。

ここでは、第4章の議論に先立ち、“CAE 活用による微小ピン出し成形条件の最適化”の事例を用いて合わせ込みに関するポイントを紹介し用語を定義する。

この事例は、図4.1に示すように、冷間鍛造により部品に所定高さのピンを立てるための加工条件(ポンチ押し込み量 d 、ポンチ幅 b)と、ダイスの面取り形状(w , h)を最適化する問題である。これらが“制御因子(Control Factor)”となる。最適化に先立ち、実機実験の結果を用いてシミュレーションモデルの合わせ込みを行った。

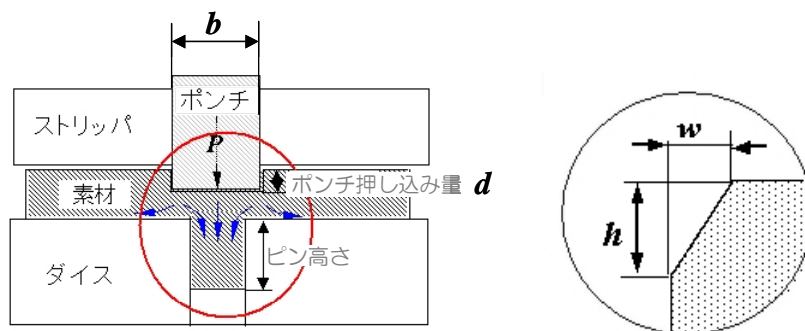


図 4.1 冷間鍛造によるピン出し成形加工のパラメータ

実機実験は、ダイスの面取り形状の水準変更には新たな金型製作が必要であることから従来金型のみを用い、ポンチ押し込み量 d の水準を変化させた。実機実験でポンチ押し込み量を変化さ

せたのは、合わせ込みを進める上での重要なポイントである。これは型形状変更時の再現性を確保するために、型形状のうち少なくとも 1 つは変更しておこうと考えた結果、および1点合わせによる過度な調整を避けるよう工夫した結果である。なおポンチ押し込み量以外の制御因子は一定の水準に保たれたままである。検討の結果、図 4.2 に示すように実機実験の結果とシミュレーションの結果との間に乖離が生じたので、CAE 技術者は試行錯誤の末、金型と材料のすべりに関する拘束条件(せん断摩擦係数)を変更して合わせ込みを行った。

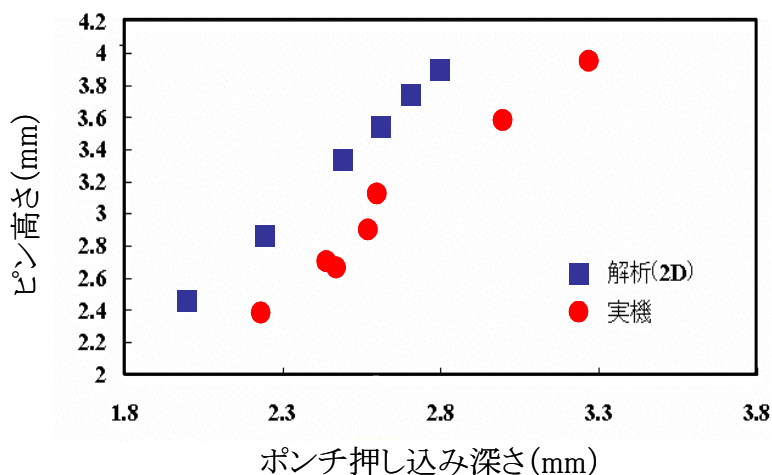


図 4.2 合わせ込み前の実験とシミュレーションの乖離

実験因子の種類をこの事例を用いて説明する。冷間鍛造の条件出しのための制御因子は上で述べたとおり、ポンチ押し込み量 d 、ポンチ幅 b と、ダイスの面取り形状 (w , h) である。ここで、実機実験において合わせ込みが1点合わせにならないために取り上げた因子を“検証因子 (Confirmation Factor)”とよぶこととする。検証因子は通常、実機実験の実施しやすさを考慮して制御因子の中から選択される。本事例ではポンチ押し込み量 d である。そして、コンピュータ実験の応答と実機実験の結果を合わせ込むための候補となるシミュレーションモデルのパラメータを、本論文では CAE 技術者達の呼び方にならない“合わせ込み因子 (Calibration Factor)”とよぶこととする。合わせ込み因子にはどのようなものがあるかは 4.3 で述べる。

4.2 従来法のレビューとその問題点

4.1 で述べた理由により、FEM 解析では形状面でも境界熱伝導等の物性面でも実機と寸分違わぬ解析モデルの実現は現実的には不可能であり、そのため実機実験結果との乖離が生じる。設計者が解析モデルの妥当性を意識することなく上述したような即時解析を可能にするには、基礎研究段階において、あらかじめ実機が与える結果と FEM 解析が与える結果をある程度一致させておかなければならない。CAE を業務とする技術者達の間では、このプロセスはこれまでも解析業務に付随して行われてきたが、精度や工数が CAE 技術者の経験や技量に依存するため、効率的でかつ再現性のある手法の確立が望まれてきた。

合わせ込みの効率化の面では、解決策の提供が進んでいる。最近普及してきた最適化支援エンジン(i-SIGHT など)には、合わせ込みの機能も搭載され実用に供されつつある(例えば、工藤^[1])。しかし、アドホックな解決に過ぎないという問題もある。なぜなら、ここでの方法は、実験値とそれに対応するシミュレーション値の乖離を特性値とした多目的同時最適化を探索的に行うものであり(例えば、多田^[2])、合わせ込みに用いるパラメータがどのような効果を持っていたかという情報を技術者に与えない。そのため、基礎研究段階の技術蓄積につながらない。その結果、現時点では事例ごとに合わせ込みが必要となり、非効率であるばかりか再現性の確保ができない状況にある。

このような背景を踏まえ、Nishina & Yoshino^[3]は合わせ込みの再現性向上のために実験計画法を活用した2段階合わせ込み法を提案した。本論文では、その応用事例としてワイヤボンディングの共振問題を取り上げ報告する。

シミュレーションを用いた設計値あるいは製造工程の最適化において1995年頃から積極的にSQC手法が取り込まれ^{[4][5][6]}、実験計画法を用いた合わせ込みの効率化の事例^{[7][8]}も見られるが、合わせ込みの再現性向上を取り上げた報告は見あたらない。

4.3 合わせ込みの課題

CAE業務はシミュレーションの精度がよい、すなわち、シミュレーション結果が実機の結果をよく再現することを前提にしている。しかし、4.1で述べたようにCAE技術者によって再現の方法が異なるのである。それが実機との整合性に少なからず影響している。本論文の課題である合わせ込み手順の確立の意義は、CAE技術者の能力に依存しない一定の合わせ込み品質の確保という点にある。

合わせ込みとは、実機実験におけるいくつかの実験点の結果と、それと同一条件で行ったシミュレーションの結果を一致させるためのシミュレーション・パラメータの調整のことである。例えばFEMによる構造解析では、図1.2に示したように、部品の寸法のようなジオメトリ(幾何構造)のほか、構成部品ごとにヤング率、ポアソン比、密度、降伏点などのマテリアル値(材料物性値)を入力しプロパティ(構成部品の性質)を定義する。合わせ込みとは、実験に使用しない値をパラメータとして名目値(以下、初期条件)から動かすことによって実験値とシミュレーション値を一致させる作業である。このときのパラメータが合わせ込み因子である。合わせ込みのためマテリアル値を調整した場合は本解析時も調整後のマテリアル値を用いる。例えば本来Al(アルミニウム)であってもAlのマテリアル値から外れた値を用いることになるが、解析上のマテリアル値は単なる属性値にすぎず問題は無い。むしろ解析の結果現れる応答が現物と一致していることがシミュレーションでは重要である。

次に、合わせ込みにおける問題点を整理する。池田^[7]の報告でも取り上げられているように、現在これらの対応が望まれている。

- ① 合わせ込み因子が多すぎて、どれが有効かを知るには手間がかかる。また、合わせ込み因

子をどの程度調整すればよいかを与える情報がない。

合わせ込みの技術とは、言い替えれば未知のフィッティング・パラメータの発見とその効率的な調整である。これについては実験計画法の活用による定石化が期待できる。

- ② 実機実験の結果への合わせ込みを行うが、実機実験で取り上げなかった条件での再現性が不安である。

合わせ込みは限られた実機実験の結果を基に行わざるを得ない。このような制約下で合わせ込みの再現性をできるだけ保証する合わせ込み方法が必要となる。この方法の必要性は Nishina & Yoshino が金型設計の事例をあげて指摘している。この問題への対応として Nishina & Yoshino はタグチの 2 段階設計法(例えば、立林^[10])の応用を提案した。これは、実験値とシミュレーション値との乖離をパターンの違いとバイアスに分離できることに着目し、パターンの乖離とバイアスを 2 段階で合わせ込む方法である。第 1 ステップでパターンを合わせ込み、第 2 ステップでバイアスの調整を行うが、後者での過度の調整を避けることで再現性を損なわないことが期待できる。

その他の問題点として、合わせ込みの評価基準がない点が上げられる。これに関しては Nishina & Yoshino は合わせ込みの評価基準を実機実験における実験誤差に求めている。

4.4 合わせ込みへの実験計画の応用

Nishina & Yoshino による合わせ込みの手順を説明する。まず実験計画の割付けは、前記問題点①②への対応としてタグチの 2 段階設計法を応用し、表 4.1 のような計画を用いる。表 4.1 において合わせ込み因子はタグチ・メソッドにおける制御因子に相当する。前述したようにヤング率、ポアソン比、密度、降伏点などのマテリアル値を合わせ込み因子とする。シミュレーションでは部品の一部を取り出してモデル化することもあるが、その場合は部品端部をフリーとはせず並進・回転などの拘束条件を付ける。その入力値も合わせ込み因子として取り上げることがある。これらを実験計画の内側に割付け、初期条件から水準を振り最適合わせ込み条件を要因効果図等から求める。

外側には制御因子のひとつを水準を振って割り付ける。本論文ではこれを検証因子とよぶことにした。検証因子は 1 条件での合わせ込みを避け、制御因子の水準を振ったときの応答のパターンを検証するために取り上げる量的因子である。したがって技術的見地から言えば、例えば金型に関する検討を行うなら金型形状の一部を取り上げ検証因子とする。ただしコストの観点から複数の金型製作を必要とするような水準変更はできるだけ避けたいので、検証因子はなるべく水準変更が容易な可動型のような因子を選択するのが好ましい。

検証因子が決まったら表 4.1 に示すとおり、検証因子の各水準に対応するように実機実験値 x とシミュレーション値 c を求める。特性値 y は、サンプル $No.i$ 、検証因子の水準 j での実機実験値 x とシミュレーション c の乖離とする。 y は表 4.1 から式(1)によって求める。

$$y_{ij} = g(\bar{x}_{j\bullet}, c_{ij}) \quad (1)$$

ここで、 $g(\bar{x}_{j\cdot}, c_{ij})$ は実機とシミュレーションの乖離を表す関数であり、特に指定する関数がない限りは、実機とシミュレーションの差を表す $g(x_{j\cdot}, c_{ij}) = \bar{x}_{j\cdot} - c_{ij}$ を用いる。

この結果、この合わせ込みはタグチメソッドにおけるゼロ望目特性の実験と同等であると言える。そこで、乖離のパターンの合わせ込みと、バイアスの合わせ込みを2段階設計法で行うことが可能となる。これを2段階合わせ込みとよぶこととする。図4.3にその概念図を示す。

表 4.1 合わせ込みの実験計画の例

	合わせ込み因子							実機実験						
	検証因子							$\bar{x}_{1\cdot}$	$\bar{x}_{2\cdot}$	\dots	$\bar{x}_{j\cdot}$	\dots	$\bar{x}_{J\cdot}$	
	A	B	C	D	F									
No.1	1	1	1	1	1	1	1	c_{11}	c_{12}	\dots	c_{1j}	\dots	c_{1J}	
No.2	1	1	2	2	2	2	2	c_{21}	c_{22}	\dots	c_{2j}	\dots	c_{2J}	
⋮														
No.i	内側直交表							c_{i1}	c_{i2}	\dots	c_{ij}	\dots	c_{iJ}	
⋮														
No.I	2	3	3	2	1	2	3	1	c_{I1}	c_{I2}	\dots	c_{Ij}	\dots	c_{IJ}

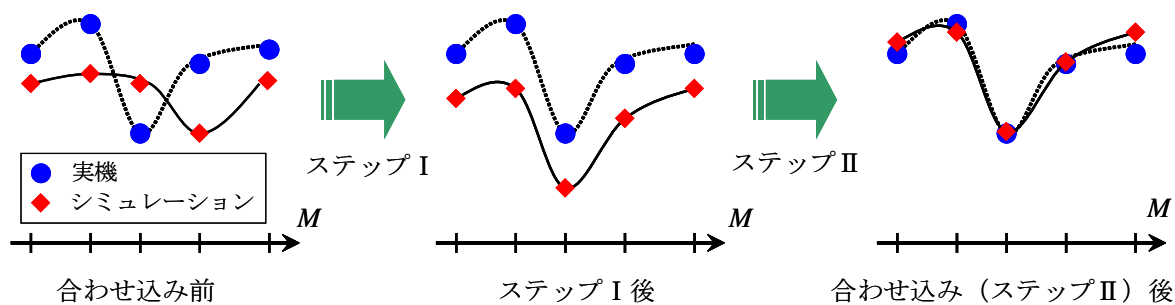


図 4.3 2段階合わせ込みの概念図

次に、パターン乖離を測る統計量を式(2)によって求める。

$$S_i = \sum_{j=1}^J (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (2)$$

ここで、 \bar{y}_i はバイアスであり式(3)によって求める。

$$\bar{y}_i = \sum_{j=1}^J y_{ij} / J \quad (3)$$

実機実験の結果とシミュレーション結果の乖離をパターンとバイアスに分離することに着目した理由は以下のとおりである。

パターンの違いとバイアスとは技術的な解釈が異なる。例えば、理論上は2次の応答を示すべきものが、シミュレーション結果では直線的応答を示すというようなパターンの違いは、モデルそのものの見直しにつながる可能性もある。これに対して、バイアスの違いは単に定数項の違いであったり、定数倍すれば調整可能であったりするように、技術者が別途対処法を持ち合わせているケースが多い。ここで技術者が行う定数倍の対処とは物理特性の傾きを変えるようなものではない。たとえば、単に対数変換できる物理特性であれば比例定数はバイアスであるため定数項と同様な扱いが可能であることを意味している。

また、宮川^[11]は目標値(乖離 y の目標値は 0)からの二乗和を解析特性にすることによって、見かけ上の交互作用が出てしまうことを指摘している。

合わせ込みの手続きでは、パターンの合わせ込みを優先し、バイアスの合わせ込みは合わせ込み因子をあり得ない値に調整しなければならないときは断念する。その結果、過度な調整を避けることができ、再現性の確保にもつながると考えられる。

合わせ込みの具体的なステップを以下に示す。

ステップ I : 乖離のパターンの違いに効く因子の選択と最適条件の探索

式(1)の偏差平方和 S_j を解析特性とし、その最小化を行う。

ステップ II : 乖離のバイアスに効く因子の選択と最適条件の探索

式(2)の平均値 $\bar{y}_{i\cdot}$ を解析特性とし、ステップ I で調整した因子を固定した上で、 $\bar{y}_{i\cdot}$ の最小化を行う。

4.5 ワイヤボンディングの共振問題への適用

実事例“Al ワイヤボンディングにおけるループ共振の解析”に 2 段階合わせ込み方法を適用し、妥当性の検証を行った。

4.5.1 ワイヤボンディングの共振問題とは

まず、超音波ワイヤボンディングにおけるワイヤの共振問題を簡単に紹介する。ワイヤボンディングとは素子電極と回路電極を結線する微細接合法であり、接合材料として Al や Au(金)の細線が用いられる。これらの線と電極間とは超音波摩擦圧接によって接合される。ワイヤボンディングの製

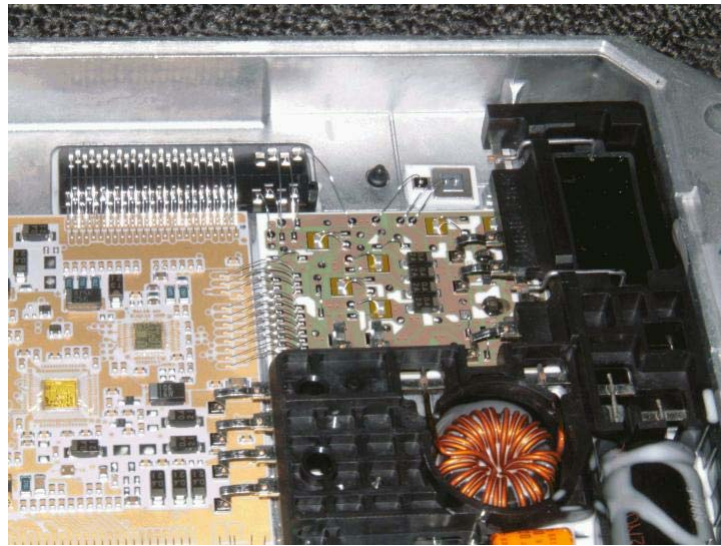


写真 4.1 ワイヤボンディングを用いた製品事例

品例を写真 4.1 に示す。

ワイヤボンディングの懸念点の一つにワイヤループの共振に起因するワイヤ損傷がある。これはワイヤの一端を接合(以下, 1st ボンディング)した後, ループを形成してもう一端の接合(以下, 2nd ボンディング)をするときに見られる現象で, 2nd ボンディング時の超音波加振によってループが共振し 1st ボンディングのネック部が折損するというものである。ワイヤボンディングの折損の事例を写真 4.2 に示す。

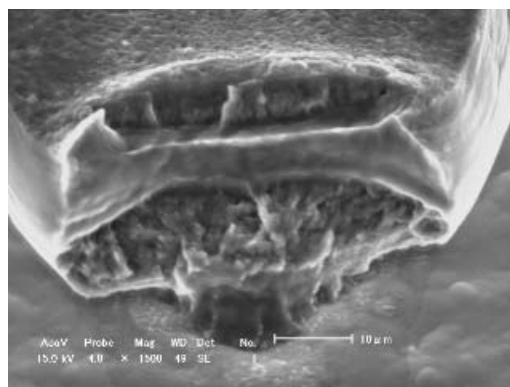


写真 4.2 ワイヤボンディングのワイヤ折損事例

この現象は特定のループ形状やボンディング周波数で発生することが知られている, しかし, ループ形状を決定するスパン長やスパン高さは製品に依存し, ボンディング周波数はワイヤボンダー設備によってそれぞれ異なる周波数を採用しているため, あらかじめ共振が生じるループ形状を調べておき, それを避けて製品設計・工程設計をする必要がある。これを実験で確認すると膨大な作業になるため, シミュレーションで調査することにした。その前段階として合わせ込みを行った。シミ

ュレーションの詳細は山崎ら^[12]が報告している。

4.5.2 合わせ込み因子および検証因子の選定と水準の設定

4.5.1 の共振問題の解析における制御因子は、ループのスパン長、スパン高さ、周波数である。そこで、合わせ込み実験ではこれら以外から合わせ込み因子を選ぶ必要がある。本事例では、ループのエレメント長(メッシュサイズ)、縦弾性率、ポアソン比、質量密度を取り上げた。これらの各水準の値を表 4.2 に示す。

表 4.2 合わせ込み因子とその水準

記号	因子名	第1水準	第2水準	第3水準
<i>M</i>	エレメント長	※0.05	0.025	
<i>E</i>	縦弾性率	6770.561(=7522.845*0.9)	※7522.845	8275.130(=7522.845)
<i>P</i>	ポアソン比	0.297(=0.33*0.9)	※0.33	0.363(=0.33*1.1)
<i>N</i>	質量密度	2.682E-10(=2.823E-10*0.95)	※2.823E-10	2.964E-10(=2.823E-10*1.05)

※：初期条件

検証因子は制御因子の中から選んだ。本事例では周波数を取り上げた。実機とシミュレーションで共通して水準変更が容易な因子は周波数であるが、周波数応答解析では周波数を 0~∞に振る必要があり、実機実験のように周波数を水準として固定することができない。そこで面倒ではあるが一旦 0~∞の周波数で解析を行った後、一般的なワイヤボンダー設備の周波数である 120kHz で実験の各条件において 3~5 次の共振が現れるループ長を逆算し、これを検証因子として用い外側に割付けた。外側割付けは、応答の次数は 2 次以下と想定し 3 水準とした。なお、本事例ではループ形状などの設計パラメータとワイヤボンダー設備の周波数という加工条件が制御因子であったためワイヤ材質に関する因子を合わせ込み因子として採用できたが、ワイヤ材質の変更も検討するような場合はこの限りではない。このときはメッシュサイズや要素種類といったシミュレータに由来する因子を合わせ込み因子とせざるを得ない。

4.5.3 実験の割付けと実験(シミュレーション)結果

合わせ込み因子間の交互作用は調整に使用しないという前提で実験計画は L_{18} 直交表を用い、表 4.2 の因子を内側 1, 3, 6, 7 列に割付けた。次にそれぞれの条件で周波数を変化させてシミュレーションを行い、周波数 120kHz で 3~5 次共振が現れるスパン長を逆算した。その結果を表 4.3 に示す。

表 4.3 シミュレーション結果(3~5次共振を生じるスパン長(mm))

	M	E	P	N	振動モード					
					3次	4次	5次			
No.1	1	1	1	1	1	1	1	2.029	3.254	4.326
No.2	1	1	2	2	2	2	2	2.093	3.317	4.401
No.3	1	1	3	3	3	3	3	2.122	3.383	4.477
No.4	1	2	1	1	2	2	3	1.879	3.123	4.193
No.5	1	2	2	2	3	3	1	2.138	3.393	4.478
No.6	1	2	3	3	1	1	2	2.185	3.445	4.552
No.7	1	3	1	2	1	3	2	1.957	3.182	4.250
No.8	1	3	2	3	2	1	3	2.011	3.257	4.335
No.9	1	3	3	1	3	2	1	2.246	3.518	4.623
No.10	2	1	1	3	3	2	2	1.957	3.182	4.257
No.11	2	1	2	1	1	3	3	2.011	3.257	4.349
No.12	2	1	3	2	2	1	1	2.246	3.518	4.623
No.13	2	2	1	2	3	1	3	1.879	3.123	4.193
No.14	2	2	2	3	1	2	1	2.134	3.393	4.478
No.15	2	2	3	1	2	3	2	2.184	3.445	4.552
No.16	2	3	1	3	2	3	1	2.026	3.253	4.326
No.17	2	3	2	1	3	1	2	2.093	3.317	4.402
No.18	2	3	3	2	1	2	3	2.122	3.379	4.477

4.5.4 合わせ込みの実施

実機実験の結果を表 4.4 の直交表の上欄に示す。実機実験の値を表 4.3 の各々の行・列から減じ、これらから S_i , $\bar{y}_{i\bullet}$ を求めた。これを表 4.4 に示す。

表 4.4 乖離データに変換し S_i , $\bar{y}_{i\bullet}$ を計算した結果

	M	E	P	N	実機実験			S_i	$\bar{y}_{i\bullet}$			
					1.950	3.094	4.560					
					3次	4次	5次					
No.1	1	1	1	1	1	1	1	-0.078	-0.159	0.234	0.0864	-0.001
No.2	1	1	2	2	2	2	2	-0.142	-0.222	0.159	0.0806	-0.069
No.3	1	1	3	3	3	3	3	-0.172	-0.289	0.083	0.0722	-0.126
No.4	1	2	1	1	2	2	3	0.071	-0.028	0.367	0.0844	0.137
No.5	1	2	2	2	3	3	1	-0.187	-0.299	0.082	0.0768	-0.135
No.6	1	2	3	3	1	1	2	-0.234	-0.350	0.008	0.0670	-0.192
No.7	1	3	1	2	1	3	2	-0.006	-0.088	0.310	0.0884	0.072
No.8	1	3	2	3	2	1	3	-0.061	-0.163	0.225	0.0808	0.000
No.9	1	3	3	1	3	2	1	-0.296	-0.424	-0.063	0.0668	-0.261
No.10	2	1	1	3	3	2	2	-0.006	-0.088	0.303	0.0850	0.070
No.11	2	1	2	1	1	3	3	-0.061	-0.163	0.211	0.0745	-0.004
No.12	2	1	3	2	2	1	1	-0.296	-0.424	-0.063	0.0668	-0.261
No.13	2	2	1	2	3	1	3	0.071	-0.028	0.367	0.0844	0.137
No.14	2	2	2	3	1	2	1	-0.184	-0.299	0.082	0.0765	-0.133
No.15	2	2	3	1	2	3	2	-0.234	-0.351	0.008	0.0672	-0.192
No.16	2	3	1	3	2	3	1	-0.075	-0.159	0.234	0.0858	0.000
No.17	2	3	2	1	3	1	2	-0.142	-0.222	0.158	0.0805	-0.069
No.18	2	3	3	2	1	2	3	-0.172	-0.284	0.083	0.0707	-0.124

ステップ I として S_i による合わせ込みを行う。合わせ込み因子の水準ごとに S_i の平均を求め、 S_i に対する合わせ込み因子の要因効果図を作成した。これを図 4.4 に示す。

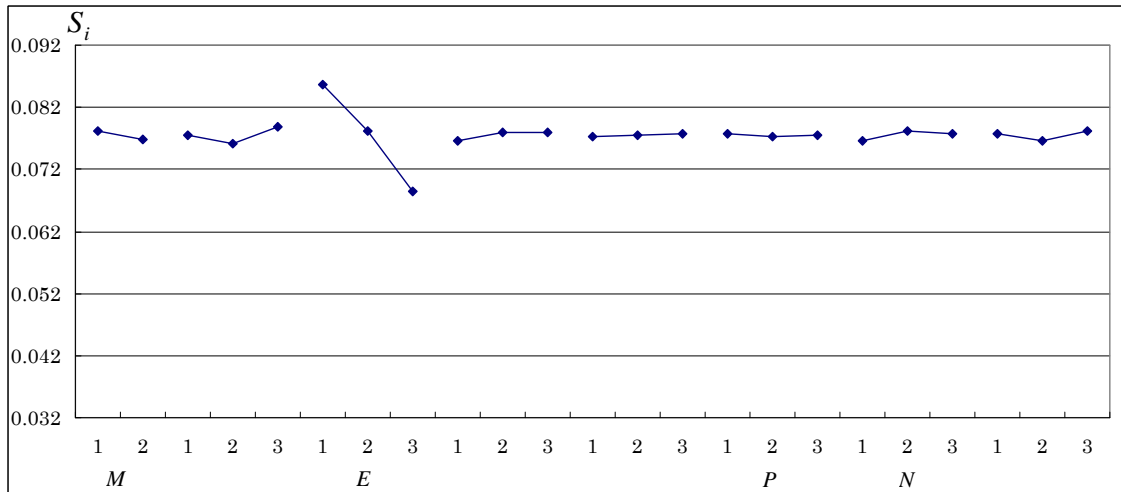


図 4.4 S_i に対する合わせ込み因子の要因効果図

図 4.4 から、パターンに影響を与えているのは E のみであるといえる。 E は第 3 水準でパターンの違い S_i が一番小さいので、 E が第 3 水準のとき実機とシミュレーションのパターンがよく一致しているといえる。また、 P は明らかに効果がなく、 M と N は誤差列と比較してもさほど変わらないので、ほとんど効果がないと考えられる。

ステップ II として $\bar{y}_{i\cdot}$ による合わせ込みを行う。各因子の要因効果図を図 4.5 に示す。

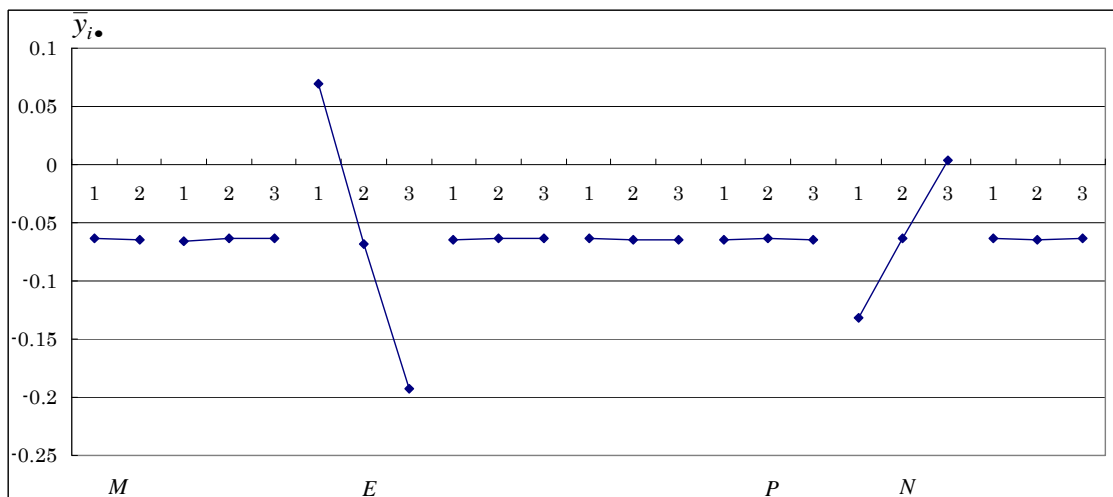


図 4.5 $\bar{y}_{i\cdot}$ に対する合わせ込み因子の要因効果図

図 4.5 から、 E と N はバイアスに影響を与えるが、 M と P は影響を与えないことが分かる。

以上より、提案方法にしたがってまずパターンの違いに効果がある E を決定し、それから N を動かしてバイアスを小さくする。この事例では、もしバイアスを 0 にしようとする N を大きく外挿する必

要が出てきてしまうが、そのような調整は次に述べる理由により行うべきではないと考える。なぜなら、4.3で述べたとおり、第一に過度なフィッティングによる合わせ込み因子の初期条件からの逸脱は、かえって再現性を損なう危険性があるからである。第二に、パターン的一致はモデルの欠陥が顕在化したと考えられるのに対し、バイアスの不一致は単なる定数項の問題と考えられるとともに、別途対処する手段があるからである。

4.5.5 合わせ込みの結果

パターンの違いへの寄与が大きい E は、 S_i が一番小さくなる第 3 水準を選択した。 N もパターンへの寄与があるがその効果は小さく、他に合わせ込み因子となり得る因子が存在しなかったため、 N をバイアスを小さくする合わせ込み因子として用いた。 N は前節でも述べたとおりバイアスを 0 にしようとする E の調整の影響分も負うために大きく外挿する必要があるが、ここでは過度の調整を避けるため実験範囲の最大値を調整限度として第 3 水準を選択した。 S_i 、 \bar{y}_i 両方に影響がなかった M と P は初期条件のままとした。得られた各合わせ込み因子の最適水準を表 4.5 に示す。

表 4.5 合わせ込み因子の最適水準

記号	因子名	合わせ込み前	合わせ込み後
M	エレメント長	0.05	※0.05
E	縦弾性率	7522.845	8275.13
P	ポアソン比	0.33	※0.33
N	質量密度	2.82E-10	2.96E-10

※:初期条件

表 4.5 にある合わせ込み前・後のパラメータを用いて、最初の実機実験以外のスパン長、ループ高さにも拡張して 3, 4, 5 次モードの共振発生をシミュレーションから予測した。これらの結果を実機の共振現象のデータと比較したものを図 4.6 に示す。シミュレーション結果は破線が合わせ込み前、実線が合わせ込み後である。これより、合わせ込み前に比較して合わせ込み後は 5 次共振を除いて実機とシミュレーションの一致度が向上していることが分かる。また、スパン長 3mm における、ループ高さ 0.4mm 近傍、1.6mm 近傍の実機共振データは、検証のために追加したものである。これらの追加実験点では、ループ高さ 0.4mm では、初期条件の方が実機に近いが合わせ込み後も乖離はわずかである。また 1.6mm では、合わせ込み後の実機との乖離は初期条件の約半分改善している。これより実機実験の範囲外における再現性の面でも提案方法は問題ないことが確認できた。

なお、どの程度まで乖離が無くなればよいかというストップルールに関しては、本事例では実機実験の誤差が測定できない状況であったため検討していない。誤差が分かっているならば、合わせ込みの程度は誤差の範囲内に入るかどうかというところに留めておき、非現実的な材料物性などを与えないように配慮すべきである。

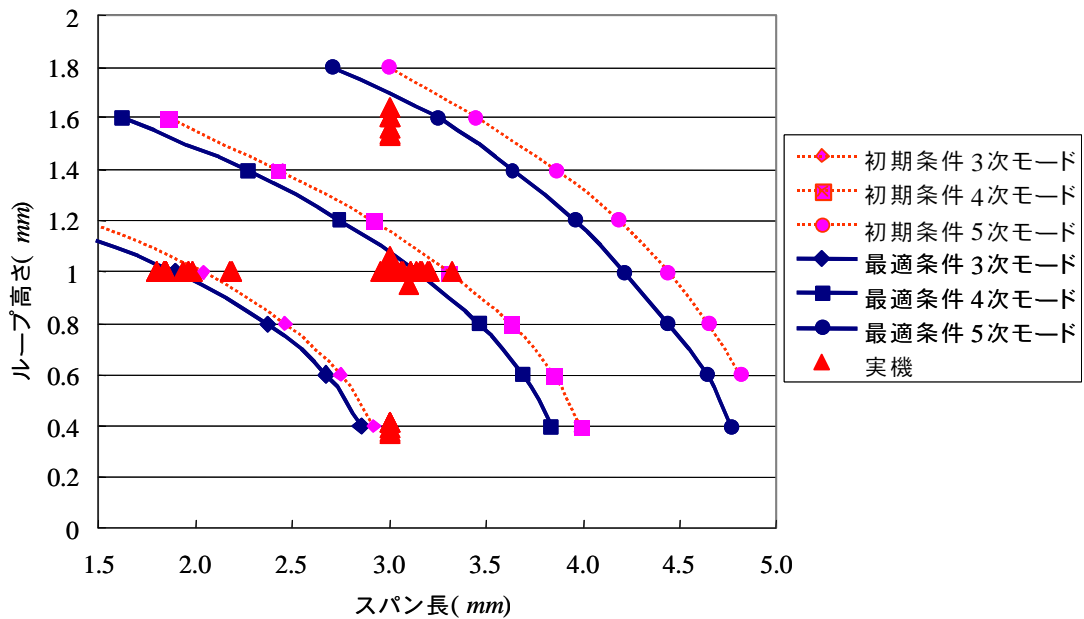


図 4.6 合わせ込み後の条件による実機実験との再現性

4.6 提案方法によるメリット

今回の提案方法には、3 で述べたように、2 ステップ法を用いることによりパターンの合わせ込みを優先し過度な調整を避けることによって再現性を確保できるというメリットがある。その他にも、実験計画法を活用することによるメリットが 2 つある。

1 つは、合わせ込みができないことを早期に知ることができるという点である。例えば想定しているシミュレーション自体(物理・数学的モデル)の間違いなどにより、合わせ込み因子をいくら動かしても合わないという場合がある。そのことを早い段階で知り、堂々巡りを避けることができる。また、合わせ込み因子の見逃しについても知ることができる。それにはパターンとバイアスの情報が大変有効である。パターンを変えるような因子がないため合わせ込みができないのか、バイアスのみに影響を与える因子がないため合わせ込みができないのかを知ることができ、それに対処することができる。また、合わせ込み因子による変動を定量的に把握することができるため、合わせ込み因子の変更の効果に比較して実験の誤差があまりにも大きいことなども情報として得ることができる。

もう 1 つは、類似ケースのために情報を蓄積できる点である。合わせ込みの結果、どの因子をどれだけ動かしたかという情報は他の合わせ込み手法でもたらされる。しかし、提案方法を用いることによりさらに詳しい情報を得ることが可能である。提案方法で合わせ込みをした場合、どの因子がどれだけパターンやバイアスに効果を持っているかを定量的に知ることができる。その結果、以降、類似ケースの合わせ込みをする場合に、合わせ込み因子の絞り込みが可能となって、合わせ込みのための実機実験の効率化にも貢献できる。

4.7 第 4 章のまとめ

第 4 章では、実験計画法を活用した合わせ込みの再現性確保の方法を提案した。

実験計画法を活用した合わせ込みに関する研究は従来も見られる。例えば池田^[7]は、どの合わせ込み因子が精度を落としているか知る手段として、直交表が指示した各設計点における現物とシミュレーションとの差あるいは比を誤差として評価することを提案している。しかし直交表が指示する全ての現物サンプルを作製しなければならず、製作費やリードタイムの大きな対象物では現実的ではない。また日座ら^[8]は合わせ込みを直交表の解析を通じ実験的回帰分析によって行っているが、乖離全体を特性値としパターンとバイアスに分離することは行っていない。そのため見かけ上の交互作用の影響と過度のフィッティングを招く恐れがある。本論文はこれらを発展させ、より現実的な方法を提案するものである。すなわち、提案する方法は池田が行ったように多数の設計パラメータの組み合わせに対し万遍なく調整するという機能は劣るものの、検証因子として設計パラメータの1つを合わせ込み実験に持ち込み水準を振ることによって少しでも一般性を失わないよう配慮した。これによって効率を確保しつつ、かつ設計パラメータを1つしか取り上げていないことによる一般性の欠如によって発生する現実との乖離についてはパターンの違いの調整を優先することによって過度の調整を避けるようにしたのである。

また、立林^[13]は、設計パラメータを直交表を使って外側に割付けた直積空間での対応を評価すべきであるという考え方を示している。これは複合部品のシミュレーションに有効な評価法である。例えば樹脂と金属との組み合わせ部品において、樹脂の変形挙動を合わせ込むために金属のマテリアル値を調整するような場合、直交表の持つ因子間の直交性を利用することは非常に効率的な方法であると言える。しかし今回の事例のように単一部材のマテリアル値が単一部品の応答に影響を及ぼすという単一の因果関係を想定している場合、直積法はむしろ非効率であると考えられる。また逆に本論文の方法では、複合部品の場合は部材ごとに合わせ込み因子の調整を繰り返す必要があるが、それぞれの本来の初期条件からのズレは他の部材の影響を受けることはなく、再現性はより確保されると考えられる。どちらの方法を用いるかはケースに応じて技術者が判断すべきであると思われる。また、今後の事例の積み重ねによる検証も必要である。

今後の研究課題としては、今回検討できなかった合わせ込みのストップルールの検討、パターンの違いとバイアスに影響する因子が分離できないときの対処、多特性の場合の同時合わせ込みなどが挙げられる。

[参考文献]

- [1] 工藤啓治(2005):”実験値とのパラメータ同定問題”, CAO フロンティア 2005, エンジニアスジャパン株式会社セミナー資料
- [2] 多田健一, 谷藤眞一郎, 杉本昌隆, 谷口貴志, 小山清人(2004):”最適化システムによる CAE パラメータ取得技術の開発”, プラスチック成形加工学会講演予稿集, 285-286
- [3] Nishina K. & Yoshino M. (2007):”Application of DOE to Computer Aided Engineering”, *The Grammar of Technology Development*, Springer, 153-161

- [4] 日本機械学会編(1999), ”応答曲面法による非線形問題の最適設計入門”, 講習会教材
- [5] 日経デジタルエンジニアリング(2000): ”注目企業にみる IT 活用戦略—Part1 自動車—”, No.2, 70-85
- [6] 溶接学会編(2004), ”特集—最適化の手法と適用—”, 溶接学会誌, Vol.73, No.3, 5-27
- [7] 池田賢治(2000): ”テストデバイス評価におけるトレンチ型流路設計ツールの開発”, 第8回品質工学研究発表大会予稿集, 38-41
- [8] 日座和典, 西村貞之(2006): ”多変数逐次近似法「実験的回帰分析」の適用方法—光学部品のデータ解析事例—”, 品質工学, Vol.14, No.2, 102-110
- [9] Patrick J. Roache (1998): ”*Verification and Validation in Computational Science and Engineering*”, Hermosa Publishers
- [10] 立林和夫(2004): ”入門タグチメソッド”, 日科技連
- [11] 宮川雅巳(2000): ”品質を獲得する技術”, 日科技連
- [12] 山崎康櫻, 増田道広, 吉野睦(2005): ”AI ワイヤボンディングにおけるループ共振の解析”, 溶接学会 11th Symposium on ”Microjoining and Assembly Technology in Electronics” (Mate2005) 論文集, 409-412
- [13] 立林和夫(2002): ”コンピュータ・シミュレーションと品質工学”, 品質工学, Vol.10, No.5, 58-66

5. ロバスト最適化のための設計パラメータのスクリーニング

5.1 シミュレーションを用いたロバスト最適化とその問題点

5.1.1 従来のロバスト最適化法のレビュー

最初に、現在一般的に行われているコンピュータ・シミュレーション(以下、シミュレーション)を用いたロバスト最適化の方法について説明する。図 5.1 に示すように特性値の応答 y の変化が非線形を示す場合がある。このような応答 y の非線形性は設計パラメータ x の 2 次効果のほかにも x と他のパラメータとの交互作用によってももたらされる。 y の応答曲面関数を x で偏微分したとき、 x あるいは他のパラメータが微係数に残る場合がこれに相当する。このとき、設計パラメータ x の変動幅が同じであっても応答 y のグラフにおける接線の傾きが小さい領域では応答 y の変化幅(以下偏差あるいは Δy という)が他より小さいので、この領域の x のほうが他よりもロバストなパラメータ値であると考えられる。

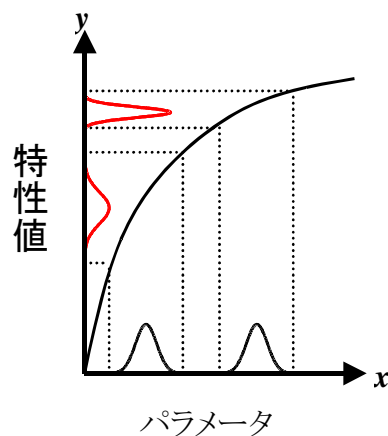


図 5.1 設計パラメータの変動の影響

そこで、設計パラメータを摂動(=意図的に変化)させたときに特性値に現れる偏差の統計量(レンジあるいは標準偏差)を求めて誤差とみなし、この誤差の応答と特性値の応答を併せて同時最適化を行えば、両者を最も好ましい値に設定できる。同時最適化する理由は、両者が独立でないからである。

特性値の偏差の求め方は、応答 y の接線の傾きから 1 次近似して上下限値を求めるか、設計パラメータの変動を乱数で与えこれを応答の関数に代入して応答を求め、それからレンジを得る方法などがある。吉野ら^[1]は総当たり法を紹介している。これは図 5.2 に示すように、応答の関数に、各設計パラメータの各々の水準における変動の上下限値を総当たりで代入し、得られたレンジを“バラツキ”の代用値として扱う方法である。この方法のメリットは、応答曲面の極値においても 1 次近似法のように偏差が 0 にならないこと。乱数法に比較して効率的であることだが、偏差が最大となる組合せを必ずしも含んでいないというデメリットもある。なお、このデメリットを克服するために、総当り

法においてさらに多くの組合せを調べる目的で変動の上下限值(2水準)ではなく3水準とする場合がある. このときの追加点は図 5.2 の小さな立方体の各边上および面心上に設けるのではなく, それぞれの追加点の小さな立方体の重心からの距離をその各頂点と等価になるよう調整しなければならない. また同様の理由により, 摂動によって生じる特性値の偏差の推定値を設計パラメータの種類を変えて比較するときは, 取り上げる設計パラメータ数 p によって各摂動点の重心からの距離が変化するので, あらかじめ比較するものの中で等価になるよう調整するなどの配慮が必要である.

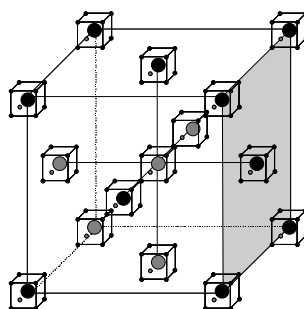


図 5.2 バラツキを求める方法(総当たり法)

シミュレーションを用いたロバスト最適化と, タグチ・メソッドを適用した実機実験によるロバスト最適化との違いは, 特性値の偏差を測定するために外側に割付けるパラメータの違いである. 一般にタグチ・メソッドでは特性値の応答への関与メカニズムがあいまいな誤差因子とよばれるパラメータを外側に割付ける. しかし, 誤差因子はシミュレーションモデルに取り込むことが不可能な因子(“劣化”など)であることが多い. そこでタグチ・メソッドにおいても, シミュレーションに適用する場合は, 外側の割付けは制御因子の変動としている. この点において, 基本的に上の考え方と変わりはない. ただ, この場合, 制御因子を外側にも割付け, その結果, 応答曲面関数の変化に与える内側と外側のパラメータの寄与の独立性が無くなっているにも関わらず 2 段階設計を行う点には疑問が残る.

以上のように特性値の偏差の応答曲面関数が求められれば, ロバスト最適化は応答曲面法の多目的最適化の一種として, 容易に達成できる. 直接探索法では, ロバスト最適化を伴う場合, 探索の都度 $2p$ 回(摂動が2水準の場合)の偏差算出のための解析が必要であるのに対し, 応答曲面法では, 特性値の偏差の応答曲面関数は特性値の応答曲面関数(モデル)が求められていればその関数に設計パラメータの摂動値を代入するだけで求められる. そのため, 応答曲面法は, 直接探索法である GA や SA に比較し, 圧倒的に効率的であると言える.

しかしながら, このような応答曲面を用いた従来のロバスト最適化法には問題点が無いわけではない.

5.1.2 従来のロバスト最適化法の問題点

従来の方法による第一の問題点は、最初のモデルに取り込まれる設計パラメータの変動のみしか反映されないことである。図 5.3 に示すように、スクリーニングの結果に基づいてモデルが仮定されるが、特性値の偏差は、このスクリーニングで除外された設計パラメータや、ユーザに知見が無い解析モデルに取り上げられなかった設計パラメータ、およびソルバーで取り扱うことができない設計パラメータに起因する特性値の偏差は一切考慮されない。この問題点は直接探索法でも同様に存在する。

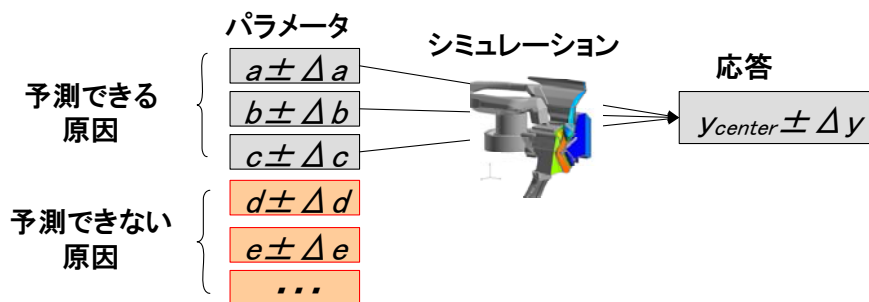


図 5.3 予測できるパラメータと予測できないパラメータの影響

従来の方法による第二の問題点は、5.3 で述べるように、スクリーニングが主効果のみを判断材料とすることにある。選択された設計パラメータとそれ以外の設計パラメータの交互作用が例え大きくても、これによる特性値の偏差は一切考慮されない。そのため、特にロバスト最適化で重要となる非線形性が正しくモデル化されないという問題点がある。

従来の方法による第三の問題点は、極めて希なケースではあるが、上記以外の要因効果が存在する場合に、それが考慮できないことである。例えば、3 因子交互作用がそれに該当する。図 5.4 は吉野ら^{[1][2]}が事例として取り上げた RC カー・シミュレーション(このシミュレーションでは、例えば GR(ギヤ比)は実際には量的パラメータではないが、本論文では議論を容易にするために全てのパラメータを連続値として扱った)について、MR×KC×GRが存在することを示している。実機の実験ではこのような交互作用は実験上分離できなくても必ず観測値にバラツキとして現れた。しかしシミュレーションでは意図して設計パラメータを変動させない限り、これらの影響は観察されない。

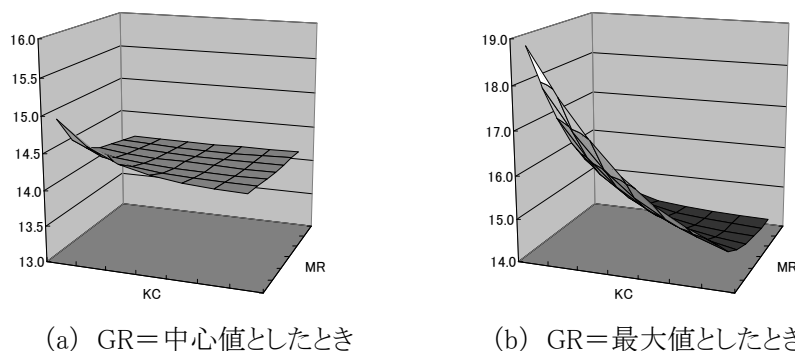


図 5.4 3 因子交互作用の存在

以上述べたように、ロバスト最適化において、特性値の偏差の応答曲面関数を作って最適化を行うとした場合、応答曲面関数に取り込まれる設計パラメータに由来する特性値の偏差しか考慮されない。このことが、直接探索法である GA や SA に比較して、効率の点では勝るが精度の点で劣ると言われる所以である。

5.2 設計パラメータのスクリーニングの必要性

5.1.1 で述べたように、シミュレーションによる設計パラメータの最適化では特性値の応答が非線形であることを利用して極値を最適解として求めている。また、特性値の応答が非線形であれば設計パラメータの変動による特性値の偏差の大きさが設計パラメータの値によって異なるので、これを利用してロバスト最適化が行われる。

このように、最適化を行うにあたっては特性値の応答の非線形性を表現する必要があるために特性値の 2 次多項式近似、すなわち応答曲面関数を用いる。ところが、応答曲面関数を作るには、各設計パラメータの 1 次項, 2 次項, 1 次の積項の各係数と定数項を求めなければならない。したがって、必要な方程式の数すなわち独立な解析の回数 N は設計パラメータの数を p とすると式 (5.1) のようになる。

$$N = p + p + {}_p C_2 + 1 = (p+1)(p+2) / 2 \quad (5.1)$$

式(5.1)から分かるように、 p が大きくなると必要な解析回数は p の 2 乗に比例して増加する。実際に応答曲面関数を作るには 3 水準系の中心複合計画などが用いられるので、一般的に解析回数はさらに増大する。そこで、あらかじめ効果の大きい設計パラメータだけを抽出するのが好ましい。このステップをスクリーニングとよぶ。

5.3 スクリーニングにおける課題

スクリーニングは、できるだけ少ない解析回数で効果の大きい設計パラメータのみを抽出することが要件となっている。そこで、現状では主効果(1次効果)の大きさだけが判明すればよいとして、レゾリューションⅢ(主効果どおしが交絡しない計画)の 2 水準系計画が多用される。なお、凸型の効果をもつ設計パラメータの見落としを防止するため、全ての設計パラメータの中心点を加えることもある。

スクリーニングの結果は次のステップであるロバスト最適化のためのモデル構築に大きな影響を与える。ロバスト最適化では 5.1.1 で述べたように、モデルを近似した応答曲面関数上でパラメータを摂動させることによってバラツキを算出する。したがってスクリーニングもこのロバスト最適化の方法を踏まえたものでなければならない。すなわち、1.1.7.2 で述べたホッパーモデルにおける出口パイプに相当する因子を抽出できるものでなければならない。

1.1.7.2 のホッパーモデルの説明における図 1.10(a)では、横軸にとった出口パイプは特性値は変化させないがバラツキを変化させている。このとき、図 5.1 を次元拡張して考えてみると、図 1.10

(a)の紙面に垂直方向に位置する因子の摂動の影響が出ているためだと考えることができる。すなわち、出口パイプと他の何らかの因子の交互作用が存在し、それが紙面に垂直方向のグラフの傾き(1次微分係数)を変化させているのである。したがって、主効果のみではなく、交互作用にも着目しなければならないことが分かる。

ところがこのレゾリューションⅢの計画では、1次効果の積の項、いわゆる交互作用が大きくなる設計パラメータであっても単独の主効果が小さいときは抽出されない。その結果、その後の解析において永久に評価の対象から外されることになる。

一方、この問題を解決するために交互作用も考慮しようとする、基本的にはレゾリューションⅤの計画が必要となり、少ない解析回数で設計パラメータを絞り込むというスクリーニングの本来の狙いが損なわれてしまう。

このように、現状のスクリーニングには実用上の課題が残されている。これ以外の課題も含めて整理すると次のようになる。

- ① シミュレーション結果には繰り返し誤差がないため、 F 値を基準にした統計的有意性検定ができない。つまり、効果の大きい設計パラメータを抽出する際の基準が無い。
- ② 交互作用を考慮すると、少ない解析回数で設計パラメータを絞り込むことができない。
- ③ 予備知識によって、交互作用の存在が分かっているにもかかわらず、そのみ単独で評価することができない。なぜなら、繰り返しのある2元配置実験を行うことで交互作用が分かるはずであるが、シミュレーション実験では繰り返しが意味をなさないからである。

5.4 スクリーニング方法の提案

本節では、5.1.2 で述べたロバスト最適化の第二の問題点である交互作用の欠落について対策を検討する。

5.4.1 スクリーニングの基準

まず、考慮すべき交互作用の対象範囲について検討する。

いま、ある設計パラメータ x_1 は主効果が小さいにもかかわらず他の設計パラメータ x_2 とは交互作用を発現すると仮定する。ここで言うスクリーニングの基準とは、第1に複数の設計パラメータの中から何を取り上げ何を捨てるか、その判断基準は何かという問題であり、第2に交互作用効果が小さい場合は x_1 は初めから考慮の対象から外することができるがその基準をどこに設けるか、という問題である。しかし、これは5.3で取り上げた問題①主効果をどこまで取り込むか、と同じく現在は解決策が無い。

主効果の大きいものをどこまで取り込むかという問題について取り扱った例を見ると、吉野^[1]らはRC(ラジコン)カーの設計パラメータの最適化問題においてパレート図を用いて効果の大きさが著しく小さくなるまで取り込んでいる。山田^[3]は F 値ではパラメータの選択がうまくいかないことを指摘し、対策としてあらかじめ選択するパラメータの個数を例えば5個程度に定めておく方法が効果的

であるとしている。

そこで、今回はこれらの方法にならい、まず大きな主効果を持つ設計パラメータ(これらを A グループとする)は記述統計的な観点から効果の大きさが変化するまでとし、これを制御因子とする。交互作用を考慮する因子は制御因子数の半数程度を選択することにする。また、初めから考慮の対象から外す基準は、残された設計パラメータの個数の半分とするというように、あらかじめ個数の制限を設ける方法を用いることとする。(ここで考慮の候補対象となった設計パラメータを B グループとする)

5.4.2 スクリーニングにおいて考慮すべき交互作用

まず、重要な交互作用が欠落したときの影響について検討する。

5.4.1と同様、ある設計パラメータ x_1 は主効果が小さいにもかかわらず他の設計パラメータ x_2 との交互作用は大きいと仮定する。このとき、2 次多項式に關与する項は、 x_1 、 x_1^2 、 x_2 、 x_2^2 、 x_1x_2 である。想定するモデルは次の 2 ケースである。

第 1 のケースとして、 x_1 が抽出されず x_2 のみが抽出されたとすると、応答曲面関数 y は表 5.1 に示すように、 x_2 、 x_2^2 だけで表され、大きな項 x_1x_2 は入らない。その結果、予測すべき関数の形が変わることによって極値の位置をも変えてしまう恐れがある。

第 2 のケースとして、 x_1 、 x_2 両者とも主効果が小さい場合、 x_1x_2 が欠落しても、他の設計パラメータの係数には影響を及ぼさず、単に y の大きさの予測値を読み誤るのみである。また、ロバスト最適化の際は x_1 、 x_2 は中心値に固定するので交互作用項は定数項としてしか作用せず、結果に影響することはない。

以上のことから考慮すべき交互作用は、一方に大きな主効果を含む場合に限定してもよい。そして、第 1 ケースの x_2 のような設計パラメータが制御因子とよばれるのに対して、 x_1 のように主効果が小さいにもかかわらず制御因子と大きな交互作用を持つ設計パラメータを、本論文では交互作用因子 (Interaction Factor) とよぶことにする。また、交互作用因子は 1 次成分しか評価しないことにする。なぜなら、今着目しているバラツキを変化させる因子とは特性値の 2 次多項式の接線の傾きを変化させるもの、すなわち特性値の 2 次多項式を特性値で偏微分したときの微分係数を変化させるものであるから、交互作用因子が偏微分係数中に残れば十分だと考えたからである。

表 5.1 交互作用因子の欠落の影響と検討の要否

変数の組合せ		計算される応答関数	検討要否
1	x_1, x_2 の効果が大, かつ x_1 の主効果:小 x_2 の主効果:大	$y = \beta_0 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_2 \cdot x_2^2 + \delta$ x_1 は考慮されず, $\beta_{12} \cdot x_1 x_2$ が無いことにより, β_2, β_2 が間違っって求められてしまう.	考慮必要
2	x_1, x_2 の効果が大, かつ x_1 の主効果:小 x_2 の主効果:小	$y = \beta_0 + \delta$ x_1, x_2 ともに考慮されないので, 交互作用の 欠落の影響は, 定数項にしか及ばない.	考慮不要

5.4.3 交互作用の評価方法

最後に, AグループとBグループ間の交互作用のみの評価方法について検討する. 取り上げると決めたAグループ内の交互作用については, あらかじめスクリーニングで評価する必要は無い. なぜなら, 応答曲面法の第2ステップで2次多項式近似を行うために用いる計画は, 取り上げた設計パラメータに関する全交互作用が評価できる計画が採用されるからである. しかしながら, 従来のような一括して計画を作る方法では, A, B 引っくるめてレゾリューションVの計画を適用せねばならず2度手間になる. すなわちできるだけ少ない解析回数で済ませたいという本来の目的を損ねる. そこで, 簡素化のために逐次実験が可能なシャイニン・メソッドの適用を提案する.

5.4.4 シャイニン・メソッドを活用したスクリーニング方法の紹介

シャイニン・メソッドはDorian Shainin^[4]が1986年に提案した実験計画法である. 直交表に比較して実験回数が低減でき, 予期せぬ交互作用に対して確実に主効果が推定できるというメリットを持つ. また, 興味ある交互作用についてのみ逐次調査が可能である. 実験回数の低減という目的で用いられる過飽和実験とは異なり直交性は保存されている. 具体的な計算方法は宮川^[5], Bhole^[6]が紹介している.

5.4.4.1 主効果の測定

シャイニン・メソッドの概要を5因子の実験で説明する. まず主効果の抽出実験に関して, シャイニン・メソッドは表5.2に示すような計画を与える.

表 5.2 主効果を求める計画 ($p=5$)

	X1	X2	X3	X4	X5	Y	runs
1	-1	-1	-1	-1	-1	y0	setup
2	1	-1	-1	-1	-1	y1	swapping
3	-1	1	-1	-1	-1	y2	swapping
4	-1	-1	1	-1	-1	y3	swapping
5	-1	-1	-1	1	-1	y4	swapping
6	-1	-1	-1	-1	1	y5	swapping
7	-1	1	1	1	1	y6	swapping
8	1	-1	1	1	1	y7	swapping
9	1	1	-1	1	1	y8	swapping
10	1	1	1	-1	1	y9	swapping
11	1	1	1	1	-1	y10	swapping
12	1	1	1	1	1	y11	setup

表 5.2 から分かるように、シャイニン・メソッドの実験計画は 1 組の setup run と 5 組の swapping run から構成される。実験回数は $2p+2$ である。下線部を並び替えると表 5.3 のようになる。ここで想定しているモデルを式 (5.2) のように考える。

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i \cdot x_i + \sum \sum \beta_{ij} \cdot (x_i x_j) + \delta \quad (5.2)$$

表 5.3 主効果を求める計画から必要部分を抽出 ($p=5$)

X1	X2	X3	X4	X5	X1と他の 交互作用	Y	runs
-1	-1	-1	-1	-1	1	y0	setup
1	1	1	1	1	1	y11	
1	-1	-1	-1	-1	-1	y1	swapping of factor1
-1	1	1	1	1	-1	y6	

すると、 x_1 の主効果は、

$$\begin{aligned} y_1 - y_0 &= 2\beta_1 - 2\beta_{12} - 2\beta_{13} - \dots \\ +) y_{11} - y_6 &= 2\beta_1 + 2\beta_{12} + 2\beta_{13} + \dots \\ \hline &4\beta_1 \end{aligned}$$

というように求めることができる。しかし、僅か 4 個のデータから求めているため再現性が乏しいこと、3 因子交互作用のバイアスが深刻に影響することなどがデメリットとして知られている。

5.4.4.2 交互作用の測定

次に交互作用を求める。今、 $x_1 x_2$ 交互作用について調べたいとする。この場合は、これまでの計画に表 5.4 に示すような 2 つの capping run とよばれる実験を追加する。これにより x_1, x_2 に関して x_3 以降とは各々 L_8 直交計画となり、着目している交互作用 $x_1 x_2$ は、表 5.4 で確認できるように他の

交互作用とも直交した計画になっている. よって式(5.3)のように x_1x_2 が分離できる.

$$\beta x_1x_2 = \{(y_0 + y_{12} + y_{13} + y_{11}) - (y_1 + y_2 + y_6 + y_7)\} / 8 \quad (5.3)$$

表 5.4 交互作用を求める計画 (x_1x_2 について求める場合)

X1	X2	X3~	X1X2	X1X3-5	X2X3-5	Y	runs
-1	-1	-1	1	1	1	y0	
1	-1	-1	-1	-1	1	y1	
-1	1	-1	-1	1	-1	y2	
1	1	-1	1	-1	-1	y12	capping
-1	1	1	-1	-1	1	y6	
1	-1	1	-1	1	-1	y7	
-1	-1	1	1	-1	-1	y13	capping
1	1	1	1	1	1	y11	

以下同様に行っていけば最後の交互作用は合計から解ける. ここで注目すべき点は, 上側半分の 2元配置実験だけでも, 主効果が既知であるので交互作用が解けるという点である. 今回は式(5.4)から求めて式(5.3)の結果と比較してみることにした.

$$\beta x_1x_2 = \{(y_0 + y_{12}) - (y_1 + y_2)\} / 4 \quad (5.4)$$

この時も着目している交互作用 x_1x_2 は, 表 5.4 で確認できるように他の設計パラメータとの交互作用とも直交した計画になっている. ただし, 他の設計パラメータを $-1, 1$ の両側ではなく, -1 側の片方に固定したところで特性値を測定していることが懸念点である. ただ, シミュレーションでは繰り返し誤差が無いことから必要以上に実験を繰り返さなくても効果の確認が可能である. そこで, 今回はオリジナルのシャイニン・メソッドの半分の方法を採用することとする.

5.5. シャイニン・メソッドを利用したスクリーニングの実施事例

本論文で提案するスクリーニングの手順は次の通りである.

- ① 各々の主効果をシャイニン・メソッドの 2 つの setup run と 2 つの swapping run を用いて求める. swapping run は設計パラメータごとに行うので $2 + 2p$ 回の解析が必要.
- ② 抽出した主効果 1 つについてシャイニン・メソッドの capping run を 1 つだけ追加して, 2元配置で交互作用の大きさを求める. ①で抽出した主効果が q 個(5.4.1 で述べた A グループに相当), 交互作用を考慮すべき設計パラメータが r 個(5.4.1 で述べた B グループに相当)だとすると, 新たに $q \times r$ 回の capping run の解析が必要. 交互作用の大きさ順に交互作用因子を選択する. 交互作用因子の選択数は制御因子の半数程度とする.

ここで, ①のステップは $(1, 0, 0, 0, \dots)$ と $(-1, 0, 0, 0, \dots)$ という他を 0 に固定した 2 回の実験でも良いのではないかという疑問が生じるが, ①の解析結果は②で利用できるので 4 回のほうが有利である.

仁科^[7]は、②のステップまでで検討されていない設計パラメータの 2 次効果を推定することを提案している。その方法は、-1, 1 の水準に対して 0 の水準を追加し、-1, 1 の特性値の平均と比較するというものである。ただ本論文では、6.3.1 の式(6.1)にあるようにバラツキを含んだモデルには交互作用因子は 1 次の効果までしか取り込まないので、2 次の効果の評価ステップは割愛する。

ここで仮に $p=15, q=5, r=5$ であれば解析回数は 57 回となり、フルモデル(レゾリューション V)の実験を用いたときの解析回数 256 回に比較し大幅に低減できることが分かる。

5.5.1 主効果の測定

吉野^[1]らの用いた RC カーのシミュレータ(全 16 パラメータ)を事例として取上げ検討した(5.1.2 でも述べたように、このシミュレーションでは、例えば GR(ギヤ比)は実際には量的パラメータではないが、本論文では議論を容易にするために全てのパラメータを連続値として扱った)。まず手順①に沿って主効果を求めた。その結果を全因子計画(L_{256})、レゾリューション IV の計画(L_{32})と比較して図 5.5 に示す。要因数は 16 であるので、シャイニン・メソッドの①のステップの解析回数は 34 回になり、この時点では従来法に比較して解析回数の低減はできていない。

抽出された設計パラメータは TG, MR, GR, KC であり、上位に来る主効果の大きさの序列は他の計画の結果と異ならなかった。しかし、効果の大きさの推定値は図 5.5 から分かるように他の 2 つの計画がほぼ同じ結果を与えたのに対してシャイニン・メソッドの結果は大きく異なった。たった 4 回の解析結果から求めたためであると推定される。

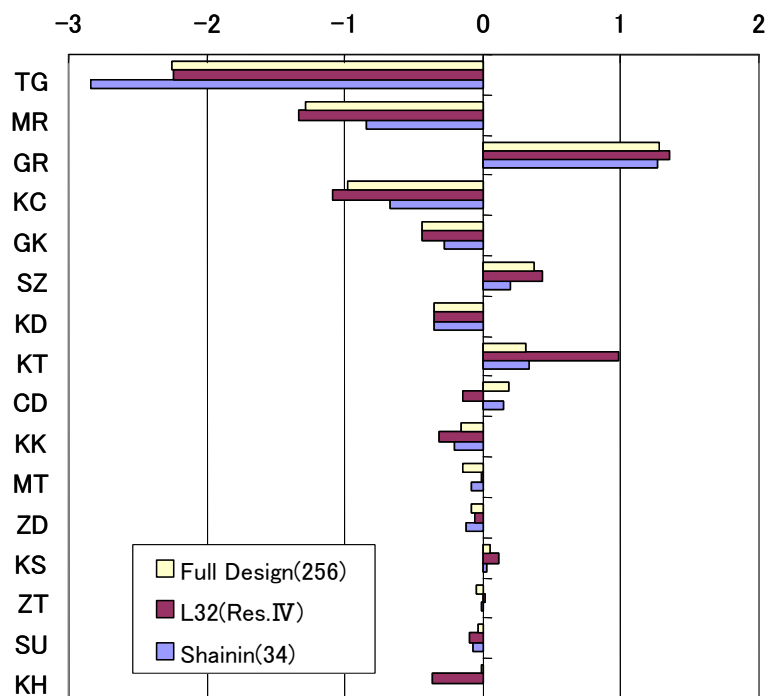


図 5.5 主効果測定結果の比較

5.5.2 交互作用の測定

次に手順②に沿って交互作用を求めた、確認のため、今回は TG, MR, GR, KC とその他の全ての組合せを調査した。まず、比較のために capping run を通常どおり 2 個加え式(5.3)のオリジナルのシャイニン・メソッドで求めた時の結果を表 5.5 に、提案方法の手順②で求めた結果を表 5.6 に、比較対象として L_{256} で求めた交互作用の結果を表 5.7 に示す。また、それぞれの制御因子に対する交互作用を直接比較できるように、これらの表の値を制御因子ごとにグラフにまとめたのが、図 5.6～5.9 である。なお、手順②では調査範囲は残った因子の半数(B グループ)としているが、今回は検討のために全てを比較した。図中に縦線と矢印で示した範囲が提案する調査範囲である。また、図中“オリジナル”と凡例があるものはシャイニンが提案した方法で式(5.3)によるもの、“上”とあるものは表 5.4 の 2 元配置の上側半分から式(5.4)によって求めたものである。

図 5.8 から分かるように、GR*GK に関しては、提案方法が与える結果は他の方法に比較して大きく符号が逆転する結果となり、capping run1 回の実験が与える結果に不安を残した。GR に関しては、吉野^[2]が図 5.4 に示すような他の設計パラメータとの 3 因子交互作用の存在を報告しているが、その影響が出ているものと考えられる。これについては今後検討を要する。

次に、図 5.6～図 5.9 の“上”と標記したグラフに着目して交互作用因子を選択する。大きさの順に並べると KT(図 5.6 より)、SZ(図 5.8 より)、KD(図 5.6 より)・・・である。今、制御因子数が 4 個であるので、選択する交互作用は 2 個とし KT, SZ を選択した。

以上が試行結果である。

表 5.5 オリジナルのシャイニン・メソッドで求めた交互作用

シャイニン	TG	MR	GR	KC
GK	-0.0334	0.0724	0.0741	0.0211
SZ	0.0321	-0.0246	0.0133	0.0161
KD	0.0622	-0.0300	0.0249	-0.0285
KT	-0.0597	-0.0339	-0.0260	-0.0179
CD	0.0020	-0.0263	-0.0123	-0.0118
KK	0.0687	-0.0108	0.0287	-0.0072
MT	-0.0165	0.0204	0.0113	0.0044
ZD	-0.0139	-0.0207	-0.0050	-0.0217
KS	0.0033	0.0003	-0.0037	0.0016
ZT	0.0055	-0.0083	0.0002	-0.0058
SU	0.0130	-0.0074	0.0075	-0.0025
KH	-0.0006	0.0000	0.0000	0.0000

表 5.6 上側 2 元配置実験(提案方法)で求めた交互作用

2元配置	TG	MR	GR	KC
GK	-0.0552	0.0008	-0.0543	-0.0046
SZ	0.0793	-0.0037	0.0836	0.0462
KD	0.0785	-0.0032	0.0606	0.0004
KT	-0.1026	0.0001	-0.0413	0.0031
CD	0.0037	-0.0046	-0.0039	0.0045
KK	0.0642	-0.0044	0.0586	0.0024
MT	-0.0205	-0.0002	-0.0221	-0.0014
ZD	-0.0008	0.0000	0.0000	0.0000
KS	0.0067	-0.0014	-0.0029	0.0002
ZT	0.0027	-0.0005	0.0040	0.0005
SU	0.0126	-0.0058	0.0159	0.0035
KH	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

表 5.7 L_{256} 計画で求めた交互作用

L256	TG	MR	GR	KC
GK	-0.1182	0.1282	0.0200	-0.0324
SZ	0.1005	-0.1086	-0.0299	0.0326
KD	0.1250	0.0007	0.0511	0.0008
KT	-0.0583	-0.0510	0.0263	0.0059
CD	0.0125	-0.0470	-0.0017	0.0076
KK	0.1802	-0.0567	0.0114	-0.0392
MT	-0.0338	0.0297	0.0208	-0.0274
ZD	-0.0251	-0.0426	0.0055	-0.0213
KS	0.0253	-0.0341	0.0215	-0.0322
ZT	-0.0237	0.0411	-0.0509	0.0370
SU	0.0322	-0.0447	0.0109	-0.0214
KH	-0.0042	-0.0067	0.0085	-0.0067

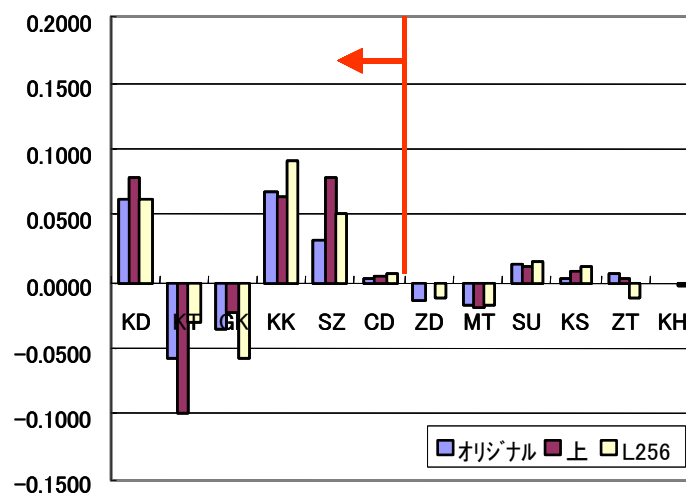


図 5.6 制御因子 TG との交互作用

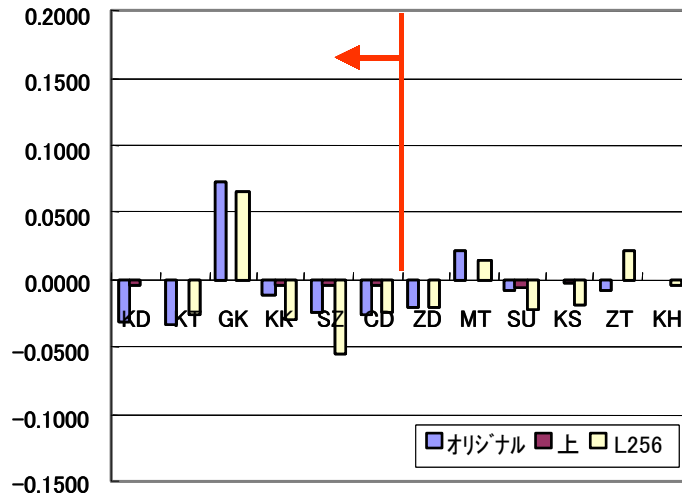


図 5.7 制御因子 MR との交互作用

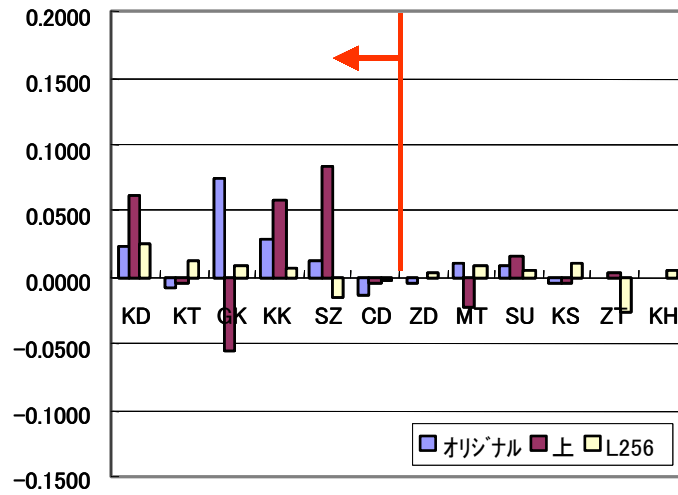


図 5.8 制御因子 GR との交互作用

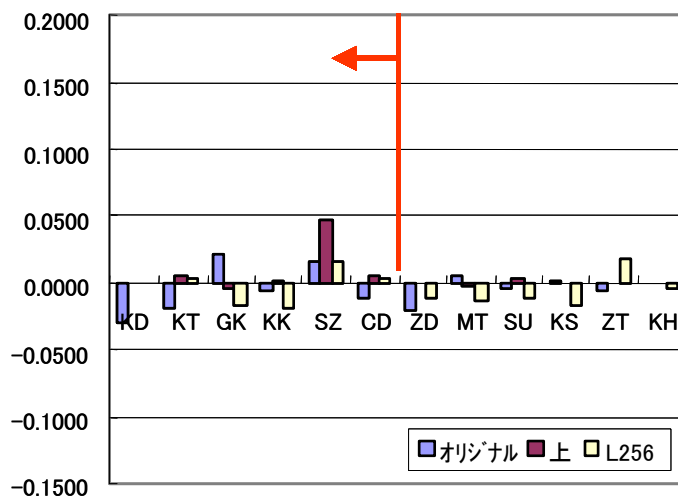


図 5.9 制御因子 KC との交互作用

5.6 第5章のまとめ

今回提案した方法は、スクリーニング段階で重要な交互作用を考慮したいという要求に対する解決策である。検討の結果、主効果の大きな設計パラメータと残された設計パラメータの半数を対象に評価すれば、ほぼ見落とし無く重要な交互作用を抽出できることが判明した。シャイニン・メソッドの逐次実験を利用すれば解析回数の低減も可能であることも示した。しかしながら、シャイニン・メソッドは、奇数次の交互作用には無力であるという欠点があるなど課題も残っている。実際に他の計画と比較すると、3 因子以上の交互作用の影響が見受けられる。具体的には図 5.10(a)に見られるように TG に関わる交互作用のうち TG*SZ は上側半分と下側半分で符号が逆転している。また図 5.10(b)に見られるように MR に関わる交互作用のうち MR*GK は上側半分と下側半分で大きさが大きく異なる。このような検出力の低さは先に指摘した問題①と併せて、今後検討を要する課題である。ただし結果に重大な影響を与えることはない。3 因子交互作用にまで調査対象を拡張することは多大な労力を要するため行わないが、その影響が 2 因子交互作用に現れるので、そのような因子を発見してモデルに取り込むことも考えられる。そのためには表 5.4 の上側半分、あるいは下側半分の 2 元配置のみで交互作用を調査するのではなく、オリジナルのシャイニン・メソッドである 8 回の実験を行う。その後図 5.10 のように上側下側に分けて解析することにより SZ のような 3 因子交互作用に関する因子の選択が可能である。なぜなら表 5.4 から分かるように、 x_1, x_2 を調査するとき、シャイニン・メソッドでは 8 回の実験を行うことにより x_3 以降は -1, 1 の両側を調査することになるからである。

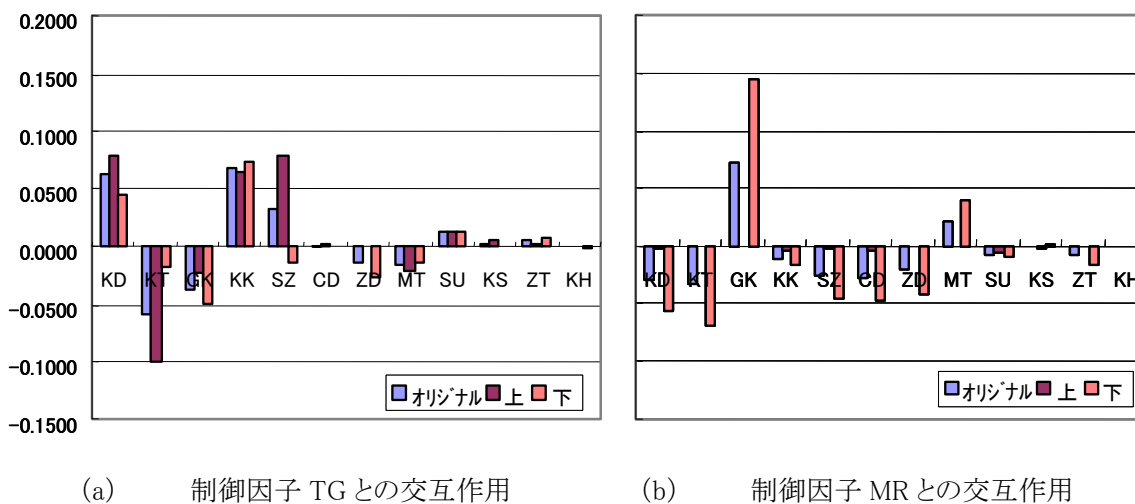


図 5.10 表 5.4 の上側半分と下側半分の 2 元配置実験の結果の比較

[参考文献]

- [1] 吉野睦, 仁科健[2004]: "SQC とデジタルエンジニアリング" —設計パラメータ最適化の技術動向と今日的課題—, 品質, Vol. 34, No. 3, 5-12

- [2] 吉野睦, 仁科健[2005]:“シミュレーションとSQCを融合したロバスト最適化における「ばらつき」の取り込み方法”, JSQC 第78回研究発表会, 5-8
- [3] 山田秀[2004]:“コンピュータシミュレーションのための実験計画法”—一様計画と過飽和実験計画—, 品質, Vol. 34, No. 3, 21-29
- [4] Dorian Shainin[1986]:“Better than Taguchi Orthogonal Tables”, ASQC Quality Congress Transactions, Anaheim, CA, 446-481
- [5] 宮川雅巳[2006]:“実験計画法特論—フィッシャー, タグチ, そしてシャイニンの合理的な使い分け”, 日科技連出版社
- [6] Keki R. Bhole, Adi K. Bhole[1991]:“World Class Quality:Using Design of Experiments to Make It Happen”, AMACOM
- [7] 仁科健, 吉野睦[2008]:“CAEによるロバスト最適化における実験計画法の活用—シミュレーションとSQC 拡大研究会第1分科会成果報告—”, 品質, Vol.38, No.1, 12-23

6. ロバスト最適化のための実験計画と解析方法

6.1 ロバスト最適化のための実験計画の必要性

ロバスト最適化を行うにあたり、モデルの非線形性を正しく表現することの必要性は5.4.2で述べたとおりである。第5章では、非線形性に重要な影響を及ぼす交互作用因子の選択方法を述べたが、モデルを正しく表現するための実験計画の割付けに関しては未検討であった。交互作用因子を制御因子と同列に扱い通常の実験計画に割付けると6.4.2で述べるように交互作用因子の影響を正しくモデル化することは不可能である。そこで新たな実験計画を提案する。なお、従来は交互作用因子の存在すら認知されていなかったため、本論文のような論旨の先行研究は皆無であった。

6.2 考慮すべきパラメータ

6.2.1 ユーザに知見の無い場合およびソルバーで取り扱えないパラメータ

これらのパラメータに関しては、残念ながら現時点で解決策は無い。この問題は探索的最適化法にも共通の課題である。対応としては今後の固有技術の進歩およびそれを反映したソルバーの開発に期待するほかない。

6.2.2 主効果が小さくても交互作用が大きいパラメータ

5.4.2でも述べたが、考慮が必要な交互作用が欠落したときの影響は非常に大きい。ここで、 x_1, \dots, x_p の設計パラメータがあり、設計パラメータ x_1 は主効果が小さいにもかかわらず他の設計パラメータ x_2 との交互作用は大きい、すなわち x_1x_2 項の係数が大きいと仮定する。

第1のケースとして、 x_1 が選択されず x_2 のみが選択されたとする。応答曲面関数 y は x_2, x_2^2 だけで表現され、大きな項 x_1x_2 は入らない。 x_1x_2 の効果は、 x_1x_2 項が式に含まれない代わりに x_2, x_2^2 の係数に含まれて表現される。その結果、予測に使用する関数の形が変わることによって極値の位置を変えてしまう恐れがある。

第2のケースとして、 x_1, x_2 両者とも主効果が小さい場合を考える。前者同様、交互作用 x_1x_2 は大きいにもかかわらず欠落する。しかし、他の設計パラメータの係数には影響を及ぼさず、単に y の大きさの予測値を読み誤るのみである。また、ロバスト最適化の際は x_1, x_2 は中心値に固定するので交互作用項は定数項としてしか作用せず、応答曲面の形状に影響することはない。

以上のことから考慮すべき交互作用は、一方に大きな主効果を含む場合に限定してもよい。そして、第1ケースの x_2 のような設計パラメータが制御因子とよばれるのに対して、 x_1 のように主効果が小さいにもかかわらず制御因子と大きな交互作用を持つ設計パラメータを、本論文では交互作用因子とよぶことにする。

5.3で述べたように、スクリーニングに使用されるレゾリューションⅢの計画は、1次効果の積の項、いわゆる交互作用が大きくなる設計パラメータであっても単独の主効果が小さいかぎり選択されな

い。その結果、そのような設計パラメータはそれ以降のロバスト最適化ステップにおいて評価の対象から外される。また、もしそのような設計パラメータが見つかったとしても、実験の計画によっては着目する交互作用を評価することが困難な場合がある。交互作用に着目したスクリーニング方法については第 5 章で提案した、逐次実験が可能なシャイニン・メソッドを用いるという方法である。これは、交換実験で主効果が既知であることを利用して、局所的に 2 元配置実験を作って交互作用を求める方法である。第 5 章では、この方法を RC カーのシミュレーションに適用し、制御因子として TG, MR, GR, KC を、交互作用因子として KT, SZ を選択した^{[1][2][3][4]}。

6.2.3 3 因子交互作用を発現するパラメータ

3 因子交互作用について調査することは多大な労力を要するため、それらの影響が 2 因子交互作用の係数に現れれば良いと考える。3 因子交互作用の存在が予想されるときは、表 5.4 の上側半分、あるいは下側半分の 2 元配置実験で交互作用を調査するのではなく、オリジナルのシャイニン・メソッドである 8 回の実験を行って上側半分・下側半分別々に解析を行うことにより影響を受けている交互作用因子を見つけて追加する。方法は 5.5.2 で述べたとおりである。

6.3 ロバスト最適化のための実験計画

6.3.1 想定するモデルと実験計画の考え方

ロバスト最適化において特性値の偏差を摂動によって求めるために使用するモデルと特性値の最適化を行うモデルとは別々に構築する。

まず、特性値の偏差を計算するためのモデルを選択された制御因子、交互作用因子を用いて作成する。この要件は、設計パラメータ摂動時の応答曲面関数において、交互作用因子の影響によってもたらされる①極値位置の変化、②曲率の変化、③交互作用によりいびつに変形する度合いの変化、の全てを評価できることである。そのため、制御因子で表現される応答曲面関数全体に対する交互作用についてモデル化することとした。ただし、5.4.2 で述べたように、今着目しているバラツキを変化させる交互作用因子は、特性値の 2 次多項式の接線の傾きを変化させるもの、すなわち特性値の 2 次多項式を特性値で偏微分したときの微分係数を変化させるものであるから、モデル中には 1 次の形で取り込むことで十分だと考えた。

想定するモデルは、制御因子数を l 、交互作用因子数を m とすると式(6.1)のようになる。ここで x_1, \dots, x_l は制御因子、 x_{l+1}, \dots, x_{l+m} は交互作用因子、 β は各項の係数である。

$$\begin{aligned}
y &= \beta_0 + \sum_{i=1}^l \beta_i x_i + \sum_{i=1}^l \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq l} \beta_{ij} x_i x_j \\
&\quad + \sum_{k=l+1}^{l+m} x_k \left(\beta_k + \sum_{i=1}^l \beta_{ik} x_i + \sum_{i=1}^l \beta_{iik} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq l} \beta_{ijk} x_i x_j \right) \\
&= \beta_0 + \sum_{i=1}^l \beta_i x_i + \sum_{i=1}^l \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq l} \beta_{ij} x_i x_j \\
&\quad + \underbrace{\sum_{i=l+1}^{l+m} \beta_i x_i}_{\text{下線部}} + \sum_{i=1}^l \sum_{j=l+1}^{l+m} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^l \sum_{j=l+1}^{l+m} \beta_{ijj} x_i^2 x_j + \sum_{1 \leq i < j \leq l, k=l+1}^{l+m} \beta_{ijk} x_i x_j x_k \\
&= \beta_0 + \sum_{i=1}^l \beta_i x_i + \sum_{i=1}^l \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq l} \beta_{ij} x_i x_j \\
&\quad + \sum_{i=1}^l \sum_{j=l+1}^{l+m} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^l \sum_{j=l+1}^{l+m} \beta_{ijj} x_i^2 x_j + \sum_{1 \leq i < j \leq l, k=l+1}^{l+m} \beta_{ijk} x_i x_j x_k
\end{aligned} \tag{6.1}$$

式(6.1)において、下線部は交互作用因子の主効果であるが、これは negligible small であると仮定したので 0 と置いた。

一方、特性値の最適化のために用いるモデルは式(6.2)のように式(6.1)の第 4 項までとする。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^l \beta_i x_i + \sum_{i=1}^l \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq l} \beta_{ij} x_i x_j \tag{6.2}$$

従来のロバスト最適化では式(6.2)を用いて特性値の偏差を求めていたことになる。これに比較し式(6.1)の第 5 項以降は交互作用因子が影響している項であり、新たに $lm(l+3)/2$ 個の係数を求める必要があることが分かる。

今後は簡単のために制御因子 x と区別するために交互作用因子を z で表し、特性値の偏差を求めるためのモデルを式(6.3)のように表す。

$$y = \beta_0 + f(x_i, x_i^2, x_i x_j) + f\{z_m(x_i, x_i^2, x_i x_j)\} \tag{6.3}$$

6.3.2 モデルの検出力の評価方法

実験計画を提案するにあたり、式(6.1)における交互作用因子を含んだ項の係数をもらさず求めることができるかどうかを評価する必要がある。具体的には、コード化した計画行列における交絡の度合いを測定すればよい。今回は次の値を算出して評価することにした。

- ① CN 値, ② VIF 値, ③ χ^2 値, ④ 内積

- ①, ②は一般的に重回帰分析における多重共線性の有無を調べる指標である(例えば朝野^[5])。③, ④は山田^[6]によって紹介されている交絡の指標である。詳細を表 6.1 に示す。

表 6.1 比較指標の詳細

評価指標	指標の概要
CN*値 (*Condition Number)	計画行列の固有値を $\lambda_1, \dots, \lambda_p$ とすると $CN = \lambda_1 / \lambda_p$. CN値が小さいほど良い. ランク落ちしていれば ∞ になる.
最大VIF*値 (*Variance Inflating Factor)	任意の1列が, 残りの列によって説明される度合い. $VIF = 1 / (1 - R^2)$. ここでRはその列以外でその列を回帰したときの重相関係数. VIFが10以下なら共線性は無い.
χ^2 値(平均)	例えば, 3水準系の27回の実験では, 任意の2列において(-1,-1) (-1,0) (-1,1) (0,-1) (0,0) (0,1) (1,-1) (1,0) (1,1)の組合せが3回ずつ出現するのが理想的である. これへの適合度を見る. 全ての組合せの χ^2 の平均が0に近いほど, 実験空間内にまんべんなく実験点が割付けられている.
内積	任意の2列の内積が0であれば直交している. 全ての組合せの内積の2乗平均が0に近いほど直交性が良い.

6.4 実験計画とその評価

6.4.1 提案する実験計画

6.3.1 で述べた課題を整理し, 実験計画の狙いと対処法についてまとめた. その結果を表 6.2 に示す.

表 6.2 ロバスト最適化のための実験計画の考え方

	狙い	対処法
1	交互作用のみを調べる	交互作用を調べる時の常套手段⇒外側割付け
2	想定したモデルは, できる限り解く	<ul style="list-style-type: none"> •必要条件: モデルが解ける⇒必要実験数の確保 •十分条件: 交絡が小さいこと
3	計画の規模は, できる限り小さくする	割付け点を減らす方法として n 次元空間内の最小立体の頂点を使用

外側の割付けを用いることにより交互作用が求められることは宮川^[7]が報告している.

これより, 次の提案方法を考案した.

- ① 制御因子を内側に割付ける. 内側の計画には中心複合計画を用いる.
- ② 交互作用因子を外側に割付ける. 外側の計画には正単体の頂点を実験点として用いる.

ここで、正単体とは n 次元における最小の頂点数 ($n+1$ 個) を持つ正多面体で、 n の値によらず存在する (例えば宮崎ら^[8]). したがって、最小数の実験点を n 次元の実験空間に均等に配する上で適切な割付け法と考えられる. 正単体の頂点座標は行列 (6.4) のとおりである.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \\ x & x & \cdots & x \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

最後の頂点はその他の頂点から均等に $\sqrt{2}$ の距離にあるので、 x は $(x-1)^2 + (n-1)x^2 = 2$ すなわち、 $nx^2 - 2x - 1 = 0$ を満たす. 故に $x = \{ 1 \pm \sqrt{(1+n)} \} / n$ となる (例えば佐藤^[9]). 実験計画はこのどちらか一方の座標を用いる. 仮に制御因子数 $l=5$, 交互作用因子数 $m=3$ としたときの実験計画を表 6.3 に示す.

表 6.3 提案する実験計画の例(コード化した水準値のまま)

					F	1	0	0	-0.3333
					G	0	1	0	-0.3333
					H	0	0	1	-0.3333
A	B	C	D	E					
-1	-1	-1	-1	1					
1	-1	-1	-1	-1					
-1	1	-1	-1	-1					
1	1	-1	-1	1					
-1	-1	1	-1	-1					
1	-1	1	-1	1					
-1	1	1	-1	1					
~~~~~									
0	0	0	-1	0					
0	0	0	1	0					
0	0	0	0	-1					
0	0	0	0	1					
0	0	0	0	0					

### 6.4.2 従来方法との比較

今回は、制御因子、交互作用因子とも全て内側の中心複合計画に割付けた場合と比較した. 中心複合計画は他の計画に比較し交互作用因子を含んだ応答曲面関数を求める目的に対して最も手堅い方法であると考えられるからである.

制御因子数  $l=5$ , 交互作用因子数  $m=3$  としたとき、提案方法および中心複合計画について求めたい係数の検出力を比較した結果を表 6.4 に示す.



表 6.4 より, 提案方法は, 6.3.1 で想定した全ての係数を求めることができるのに対して, 中心複合計画は一部推定できない係数があることが確認された. 一方,  $\chi^2$  値で表される“万遍なく調べる能力”は中心複合計画より低いというデメリットも明らかになった.

表 6.4 提案方法と中心複合計画の比較

	中心複合計画	外側正単体計画
実験数は必要最小限か	81	$27 \times 4 = 108$
	必要実験回数81回以上は両者とも満たしている	
CN値	$\infty$ (57個目以降は全て $\lambda = 0$ )	59.52
最大VIF値	$\infty$	7.51
以上より	解けない項あり	全て解ける
$\chi^2$ 値	79.3	188.8
内積	64.1	12.7

### 6.5 試行結果 (1) 交互作用因子を調整しない場合

第5章のスクリーニングでRCカーのシミュレーションにおける4つの制御因子 TG, MR, GR, KC, 2つの交互作用因子 KT, SZ を抽出したのでこれらを用いて試行した. 全体の試行の流れを図 6.1 に示す.

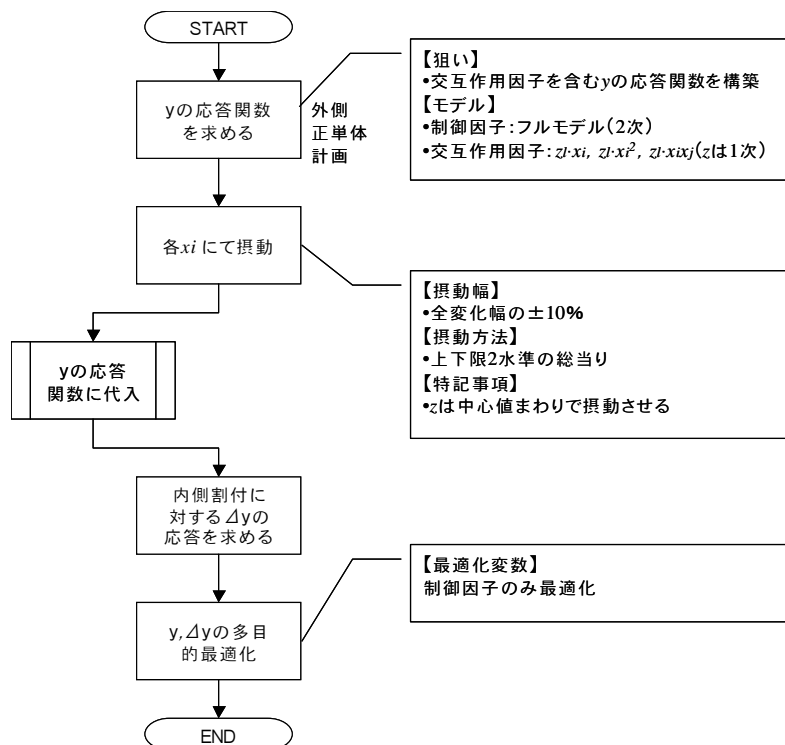


図 6.1 試行全体の流れ

### 6.5.1 実験の割付け

実際の実験においては、平均値の応答曲面関数を正しく求めるために、外側に割付けられる正単体の各座標は重心を0に、重心からの距離を1に変換する。この変換を行って作った実験計画を表6.5に示す。

表 6.5 RC カー・シミュレーションの実験の割付け(重心移動済み)

				KT	0.966	-0.259	-0.707
TG	MR	GR	KC	SZ	-0.259	0.966	-0.707
-1	-1	-1	-1				
1	-1	-1	-1				
-1	1	-1	-1				
1	1	-1	-1				
~~~~~							
0	0	-1	0				
0	0	1	0				
0	0	0	-1				
0	0	0	1				
0	0	0	0				

6.5.2 特性値の偏差が最小となる点の求め方とその変化

表 6.5 の割付けに従った実験を行い、2つの応答曲面関数を求める。

1 つめは特性値最適化を行う目的で制御因子のみで表現される応答曲面関数である。この関数の係数は、外側割付けの平均値を用いて求められる。式(6.2)に相当する応答曲面関数である。

2 つめはロバスト最適化を行う準備段階で必要な交互作用因子の影響が表現された応答曲面関数である。この関数の係数は外側の割付けを積み上げた計画行列から求められる。交互作用因子の影響を考慮した式(6.1)のモデルの応答曲面関数である。ただし、この時点では式(6.1)の応答曲面関数は、まだ特性値の応答を現している。

ロバスト最適化では、特性値の偏差の応答曲面関数を用いる。特性値の偏差は設計パラメータを摂動させて求める。ここでは各設計パラメータの実変動が不明であるため、吉野ら^[4]が行ったように、各実験において各設計パラメータが取り得る値の幅の±10%を摂動として与えることにした。交互作用因子は水準を考えないので取り得る値の中央値を中心に摂動させた。この摂動を総当りで式(6.1)の応答曲面関数に代入し、1 つめの応答曲面関数を求めた中心複合計画の各実験における特性値 y の最大値 $\max(y)$ 、最小値 $\min(y)$ を求めた。

最後に、特性値の偏差 $\Delta y = \max(y) - \min(y)$ として Δy の応答曲面関数を求めた。以上の過程を表 6.6 に、特性値の偏差の概念図を図 6.2[10]に示す。

表 6.6 特性値の偏差 Δy まで求めたところ

				KT	0.966	-0.259	-0.707				
TG	MR	GR	KC	SZ	-0.259	0.966	-0.707	平均	$max(y)$	$min(y)$	Δy
-1	-1	-1	-1	16.0970	16.0233	15.7698	15.9633	16.8593	15.2534	1.6060	
1	-1	-1	-1	13.2159	13.3894	13.0613	13.2222	14.5330	13.1079	1.4252	
-1	1	-1	-1	16.0110	15.9398	15.6928	15.8812	16.3315	14.9248	1.4067	
1	1	-1	-1	12.9811	13.1346	12.9255	13.0137	12.9255	12.4190	0.5065	
-1	-1	1	-1	19.5101	19.4796	19.0075	19.3324	20.7411	17.5983	3.1428	
1	-1	1	-1	19.5528	18.8425	18.3828	18.9260	19.5671	16.4344	3.1327	
-1	1	1	-1	16.2083	16.1235	15.8954	16.0757	17.5048	15.3940	2.1108	
1	1	1	-1	14.2781	14.3177	14.0755	14.2238	15.5388	13.6501	1.8887	
-1	-1	-1	1	16.2193	16.1995	15.8782	16.0990	16.5961	15.1809	1.4152	
1	-1	-1	1	13.4145	13.7851	13.2458	13.4818	13.3030	12.7900	0.5131	
-1	1	-1	1	16.1662	16.1068	15.8267	16.0332	18.2884	15.6675	2.6209	
1	1	-1	1	13.2599	13.5162	13.0990	13.2917	14.3299	12.8530	1.4769	
-1	-1	1	1	16.3315	16.2651	15.9605	16.1857	17.2823	12.8655	4.4167	
1	-1	1	1	14.4342	14.4896	14.1176	14.3471	15.7166	13.7868	1.9298	
-1	1	1	1	15.9170	15.8375	15.6094	15.7880	15.8492	14.6710	1.1782	
1	1	1	1	12.9785	13.0769	12.9276	12.9943	13.3509	12.5001	0.8508	
-1	0	0	0	15.9919	15.9025	15.6687	15.8543	16.3477	15.0501	1.2976	
1	0	0	0	13.0360	13.2012	12.9637	13.0670	13.9353	12.8546	1.0808	
0	-1	0	0	14.3864	14.5220	14.2486	14.3857	15.7443	14.0919	1.6524	
0	1	0	0	14.1186	14.1801	14.0195	14.1061	14.1016	13.3860	0.7156	
0	0	-1	0	14.2890	14.4164	14.1714	14.2923	14.3860	13.5482	0.8378	
0	0	1	0	14.7671	14.8245	14.5157	14.7024	16.1682	14.2610	1.9072	
0	0	0	-1	14.2824	14.3609	14.1916	14.2783	15.6265	13.9933	1.6332	
0	0	0	1	14.1841	14.2465	14.0952	14.1753	14.1837	13.4668	0.7169	
0	0	0	0	14.2008	14.2539	14.1014	14.1854	14.7279	13.5913	1.1366	

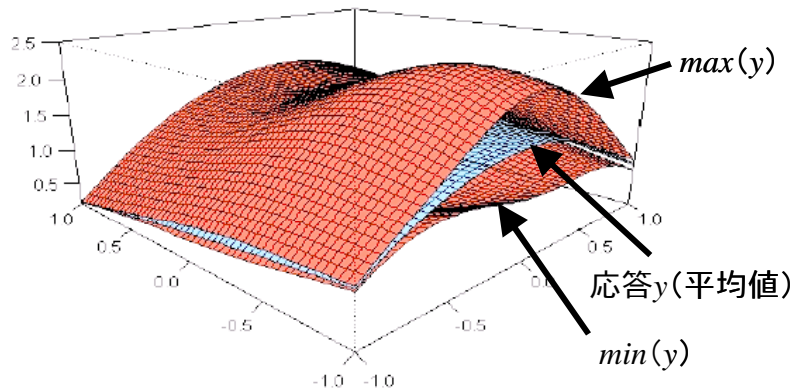


図 6.2 特性値の偏差の概念図

ロバスト最適化は、特性値の応答 y と特性値の偏差 Δy の 2 つの応答曲面関数を用いて多目的同時最適化を行うことによって達成される。

本論文では、 Δy の応答曲面関数導出過程における交互作用因子の取り込み方法の提案が目的である。そこで、交互作用因子を取り込まない場合／取り込む場合で特性値の偏差が最小になる点がどう変化するか比較することにした。具体的には Δy の応答曲面関数を、式 (6.1) の第 4 項ま

で含む(式(6.2)に相当)／第5項以降も含む, の2つの特性値応答曲面関数から算出し, 特性値の偏差が最小になる点を求めた.

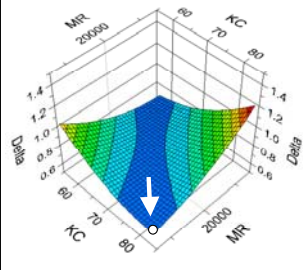
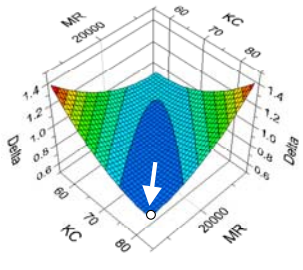
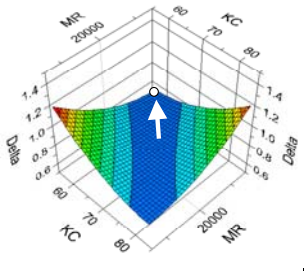
また, タグチ・メソッド的な解法として, 外側割付けの各列を標示因子 $N_1 \sim N_3$ として用いた方法も比較した. この方法は, 例えば表 6.5 の外側第 1 列について, 式(6.5)

$$y_1 = f_{N_1}(TG, MR, GR, KC) \quad (6.5)$$

を求めるというように, 外側の各々の列ごとに応答曲面を求める方法である. ただし, 交互作用因子の影響を他の方法と等価にするために, 外側割付けの各座標は重心からの距離を 0.1 に変更した. 次にロバスト最適化は求められた 3 つの応答曲面について内側因子の摂動を行い, 3 つの応答曲面関数のうちで最大, 最小になる値から Δy を求めて行った. これ以降の計算方法は他と同じである. この方法はモデルを前提としないので内側の割付けの計画をもっと小規模にできるというメリットがある. ただし今回は, 内側の割付けは他と同じものを用い小規模にはしなかった.

表 6.7 に特性値の偏差の最小値を与える制御因子の値を比較したものを示す. これより, 交互作用因子を取り込まない場合／取り込む場合で, 最小値を与える点がドラスティックに変化することが確認できた.

表 6.7 特性値を最小化する制御因子の最適値

比較した計画	内側の中心複合計画のみ	標示因子として外側を利用	外側正単体計画
交互作用の考慮	制御因子間のみ	—	交互作用因子含む
Δy の応答曲面			
Δ 最小点	TG	1.92	1.92
	MR	16500	23700
	GR	2.000	2.200
	KC	84.0	56.0

6.5.3 結果の検証

Δy 最小点を与える各設計パラメータ値の結果の妥当性を検証するために, 最小値として推定された表 6.7 の各々の点において実際の Δy を求めて比較した. 具体的には各最適点における摂動を応答曲面関数に代入するかわりに実際のシミュレータに代入し Δy を求めた. 摂動する設計パラメータは TG, MR, GR, KC, KT, SZ 全てとし, 摂動幅は応答曲面関数に代入した場合と同様,

各々の全変化幅の 1/10 とし、最適点を基準に摂動させた。ただし、KT, SZ は中央値を基準に摂動させた。

その結果、内側の中心複合計画のみで推定した場合の最適点、すなわち、

$$(TG, MR, GR, KC) = (1.92, 16500, 2.000, 84.0) \text{ の時, } \Delta y = 1.164,$$

外側に正単体計画を配して推定した場合の最適点、すなわち、

$$(TG, MR, GR, KC) = (1.92, 23700, 2.200, 56.0) \text{ の時, } \Delta y = 0.590$$

となり、外側正単体計画を利用して推定した最適点が実シミュレーションにおいても Δy が小さく、推定が正しいということが検証できた。

なお、本節では各々の方法による Δy の応答曲面から Δy の推定値を求めて比較することを行わなかった。それは各設計パラメータの摂動幅を固定しているため、取り上げる設計パラメータの数が増えると摂動点の重心からの距離が大きくなり、摂動の影響が取り上げたパラメータ数が異なる方法の間で等価にならないからである。実際の事例に適用する場合は、設計パラメータの数が変わっても各摂動点の重心からの距離が常に等しくなるよう変換するなどの注意を要する。

6.6 試行結果 (2) 交互作用因子を調整する場合

6.5.3 では交互作用因子は中心値まわりで摂動した。この時の考え方は、“主効果は無いが交互作用はある”という因子(交互作用因子)と他の因子の応答曲面を考えると必ず鞍点を持つような形状となるはずであり、さらに鞍点は実験空間の中心付近にあると想定されるから、交互作用因子の最適値は中心付近にあると仮定してもよいというものである。しかし鞍点は必ずしも実験空間の中心にあるわけではない。また、ホッパーモデルが出発点であることを考えると、交互作用因子も調整対象とすべきである。そこで、交互作用因子を調整することを考えた。

ただし、ロバスト最適化は特性値の応答である式(6.2)との同時最適化を行うため、偏差の応答はあらかじめ交互作用因子を含まない式(6.2)のモデルで構築しなければならない。(さらに付け加えるならば、交互作用因子も加えて同時最適化を行うならば、最初から制御因子として扱うべきである)

そのため、最初にバラツキにのみ影響のある交互作用因子の最適化を行い、その後その最適値まわりで摂動を行った偏差を用いて偏差の応答関数を構築することを考えた。これは図 1.10 に示すタグチ・メソッドの手順と同じ手順である。

ここでの問題は、モデルが交互作用因子の 1 次式であるということである。そのため、何も考慮しないと n 次立方体である交互作用因子空間のどこかの頂点を採用することになってしまう。本論文ではこれを避ける方法も検討した。

6.6.1 実験の割付け

交互作用因子の最適化の流れを図 6.3 に示す。

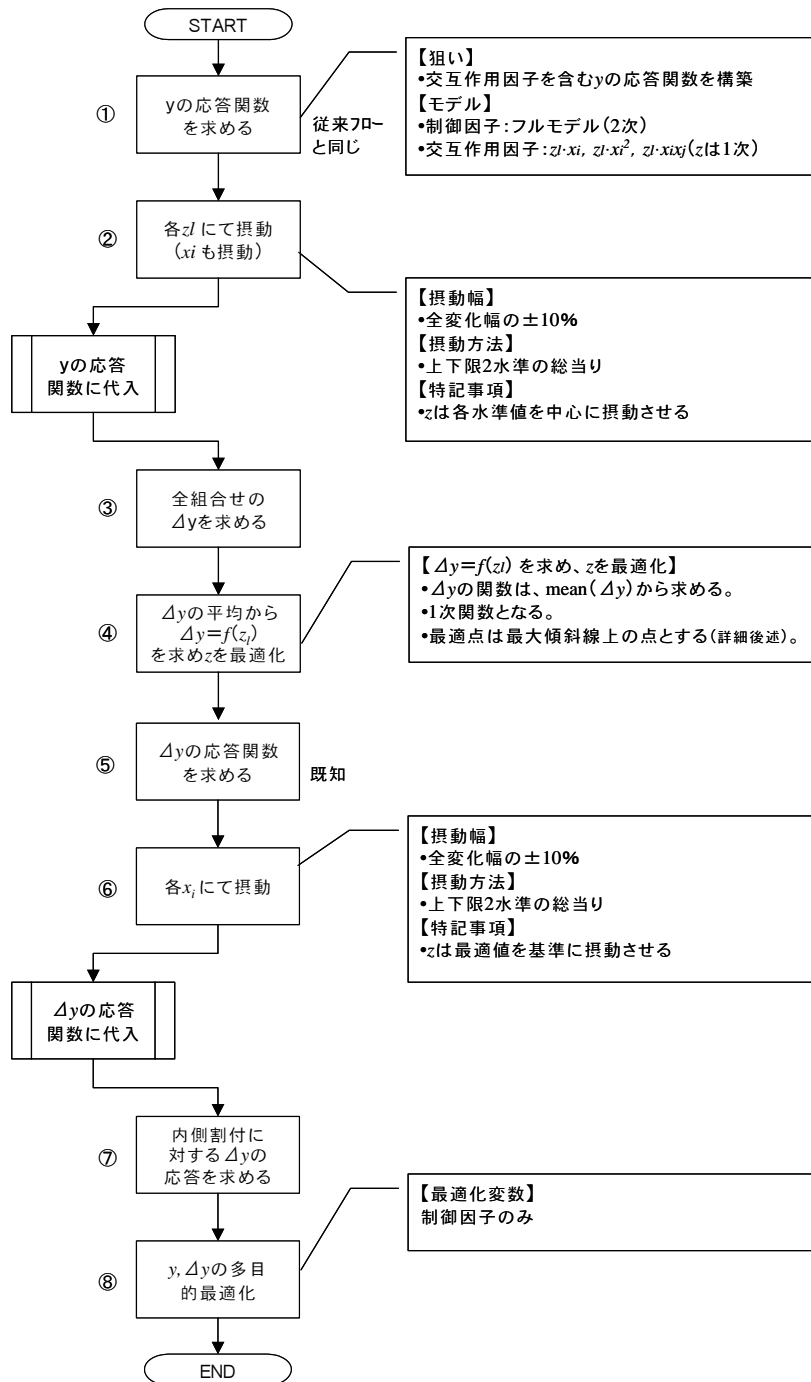


図 6.3 交互作用因子の最適化の流れ

式(6.1)のモデル化①までは 6.5.2 の手順と同じである。応答の偏差を求めるステップ以降が異なる。応答の偏差を求めるための摂動計算を行う実験の割付けを表 6.8 に示す。6.5.2 では、このス

テップは交互作用因子は中心値まわりに摂動したが，ここでは各水準値まわりに摂動させる．そして摂動値を式(6.1)に代入してそれぞれの偏差 Δy を求める．

表 6.8 交互作用因子の最適化のための摂動計算の割付け

				1	2	3	4	5	6	7		3	24	25		
			TG	-1	1	-1	1	-1	1	-1			0	0		
			MR	-1	-1	1	1	-1	-1	1			0	0		
			GR	-1	-1	-1	-1	1	1	1			0	0		
			KC	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1			-1	1	0	
	KT	SZ													mean	
1	0.966	-0.259		Δy_{11}	Δy_{12}	Δy_{13}	Δy_{14}	Δy_{15}	...							座標1
2	-0.259	0.966		Δy_{21}	Δy_{22}	Δy_{23}	Δy_{24}	...								座標2
3	-0.707	-0.707		Δy_{31}	Δy_{32}	Δy_{33}	...									座標3

実際に RC カー・シミュレーションのケースで摂動計算を行った結果を表 6.9 に示す．次に交互作用因子の各水準(探索点)における Δy の平均を求める．実際に RC カー・シミュレーションのケースで計算した結果を表 6.9 に示す．

表 6.9 試行事例における交互作用因子の水準毎の Δy とその平均

			TG	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			MR	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
			GR	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	
			KC	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0
KT	SZ																										平均	
	0.966	-0.259	1.73	1.45	1.68	0.45	3.59	3.68	2.40	2.13	1.69	0.57	3.08	1.66	2.40	2.24	1.29	0.89	1.45	1.10	1.81	0.73	0.99	2.15	1.77	0.76	1.22	1.71664
	-0.259	0.966	1.56	1.42	1.32	0.54	3.01	3.02	2.02	1.84	1.34	0.53	2.49	1.42	1.98	1.85	1.14	0.83	1.25	1.07	1.60	0.70	0.79	1.83	1.59	0.70	1.11	1.47708
	-0.707	-0.707	1.53	1.44	1.21	0.63	2.83	2.81	1.91	1.78	1.27	0.63	2.29	1.35	1.84	1.77	1.10	0.83	1.20	1.08	1.54	0.71	0.77	1.74	1.54	0.69	1.09	1.42349

表 6.9 の平均より式(6.6)を求める．

$$\Delta y = f(z_m) \tag{6.6}$$

式(6.6)は，交互作用因子 z をパラメータとして表した Δy の応答曲面関数である．この応答曲面を模式的に示したのが図 6.4 である．式(6.3)において交互作用因子 z は 1 次式であったので，応答曲面は平面となる．

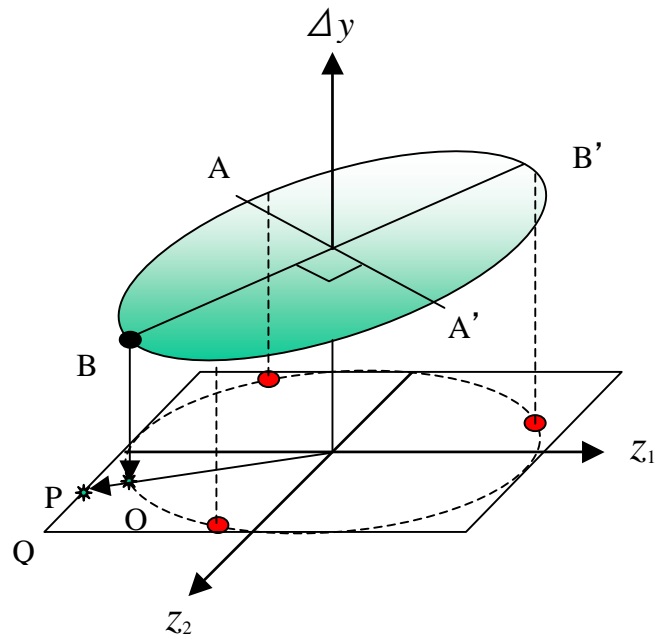


図 6.4 Δy の応答曲面の模式図

式(6.4)を用いて Δy の最小点を与える交互作用因子の値を求める. 本論文では最適点は図 6.4 における点 O とする. それは, 中心からの距離が表 6.8 の割付けにおける探索点と等距離になる円周上の点としている. 実験空間の境界上 (l 次元立方体の边上) まで延長した点 P とはしない理由は, l 次元に拡張したときおよび, 傾斜方向が異なっても常に中心からの距離を一定にしておくことにより, 交互作用因子の影響の大きさを等価に保つことができるという一般性を考慮した結果である. さらに, どんな場合でも l 次元立方体の頂点 Q が Δy 最小値を与えることは自明であるがそれも行わない. その理由を図 6.4 を用いて説明する.

図 6.4 で $A-A'$ 方向は交互作用因子を摂動しているにもかかわらず Δy が変化していない. これは式(6.1)の交互因子を含んだ項が効いていないことを意味している. 交互作用因子は式(6.1)を x で偏微分したときに偏微分係数が 0 にならないものを選んでいたので, 各交互作用因子の効果が Δ で相殺されたものと考えられる. したがって, 制御因子の調整効果を最大限得るには, ここでは Δy 最小値を与える点 Q を選択すべきではなく, 敢えて $B-B'$ 線上の組合せを選択すべきである.

以上の手順で交互作用因子の最適値を求める. RC カー・シミュレーションでは,

$$(KT, SZ) = (-0.996, 0.089) \quad (\text{コード化値})$$

となった.

最後に交互作用因子が $l (> 3)$ 個ある場合に考慮すべき点を示しておく. それは, 多重共線性が出た場合である. この場合はどちらか一方を調整し, 他方は中心値に固定することとする.

6.6.2 特性値の偏差が最小となる点の求め方とその変化

特性値の偏差が最小となる点を求めるには、6.6.1 で求めた交互作用因子の最適点まわりでの摂動を改めて行う必要がある。試行事例において、制御因子、交互作用因子の再摂動を行って式(6.1)に代入し Δy まで求めた結果を表 6.10 に示す。

表 6.10 ロバスト最適化のために再摂動を行った結果

				KT	0.966	-0.259	-0.707				
TG	MR	GR	KC	SZ	-0.259	0.966	-0.707	平均	$max(y)$	$min(y)$	Δy
-1	-1	-1	-1		16.0970	16.0233	15.7698	15.9633	16.4369	14.9562	1.4807
1	-1	-1	-1		13.2159	13.3894	13.0613	13.2222	14.1722	12.7344	1.4378
-1	1	-1	-1		16.0110	15.9398	15.6928	15.8812	15.8262	14.7012	1.1250
1	1	-1	-1		12.9811	13.1346	12.9255	13.0137	12.8691	12.2027	0.6663
-1	-1	1	-1		19.5101	19.4796	19.0075	19.3324	19.8199	17.1346	2.6852
1	-1	1	-1		19.5528	18.8425	18.3828	18.9260	18.4836	15.8028	2.6808
-1	1	1	-1		16.2083	16.1235	15.8954	16.0757	16.9517	15.1359	1.8158
1	1	1	-1		14.2781	14.3177	14.0755	14.2238	15.1529	13.4233	1.7296
-1	-1	-1	1		16.2193	16.1995	15.8782	16.0990	16.0521	14.8507	1.2014
1	-1	-1	1		13.4145	13.7851	13.2458	13.4818	13.0119	12.3359	0.6760
-1	1	-1	1		16.1662	16.1068	15.8267	16.0332	17.4958	15.3476	2.1482
1	1	-1	1		13.2599	13.5162	13.0990	13.2917	13.9423	12.6552	1.2871
-1	-1	1	1		16.3315	16.2651	15.9605	16.1857	16.9147	15.1779	1.7368
1	-1	1	1		14.4342	14.4896	14.1176	14.3471	15.1180	13.4162	1.7018
-1	1	1	1		15.9170	15.8375	15.6094	15.7880	15.4535	14.3907	1.0628
1	1	1	1		12.9785	13.0769	12.9276	12.9943	13.1960	12.3829	0.8132
-1	0	0	0		15.9919	15.9025	15.6687	15.8543	16.0811	14.9338	1.1472
1	0	0	0		13.0360	13.2012	12.9637	13.0670	13.8200	12.7517	1.0683
0	-1	0	0		14.3864	14.5220	14.2486	14.3857	15.4798	13.9900	1.4897
0	1	0	0		14.1186	14.1801	14.0195	14.1061	14.0976	13.3998	0.6979
0	0	-1	0		14.2890	14.4164	14.1714	14.2923	14.1903	13.4428	0.7475
0	0	1	0		14.7671	14.8245	14.5157	14.7024	15.8324	14.1727	1.6597
0	0	0	-1		14.2824	14.3609	14.1916	14.2783	15.4844	13.9923	1.4921
0	0	0	1		14.1841	14.2465	14.0952	14.1753	14.1551	13.4822	0.6729
0	0	0	0		14.2008	14.2539	14.1014	14.1854	14.6684	13.6132	1.0552

表 6.10 の Δy を用いて応答曲面関数を構築し、その最小点を探索すればそれが“特性値の偏差が最小となる点”である。

実際に最適化ソフトを用いて求めた結果を図 6.5 に示す。

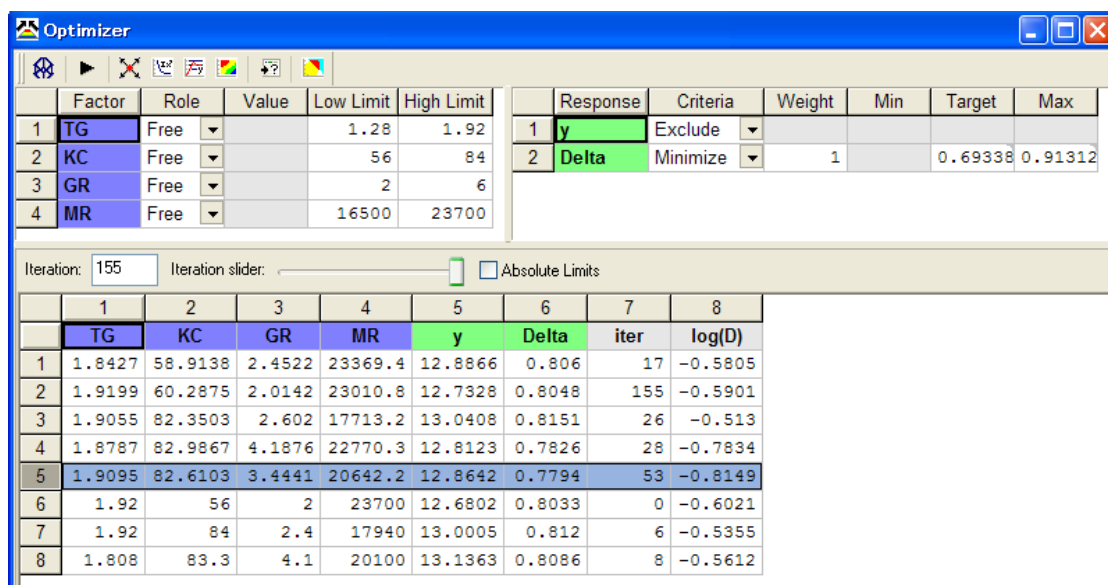


図 6.5 最適化ソフトによる Δy 最小点探索結果

6.6.3 結果の検証

これまで、① 交互作用因子を考慮しなかった場合、② 交互作用因子を考慮するが調整を行わない場合、③ 交互作用因子を考慮しさらに調整も行う場合について検討した。これらの特性値の偏差が最小になる点を含んだ応答曲面を比較したのが図 6.6 である。また、各制御因子、各交互作用因子の最適値を比較したのが表 6.11 である。これらより①②③の結果は全く異なることが分かった。そこで、各最適値まわりの摂動を実際の RC カー・シミュレーションに直接代入し最適化の効果を比較した。その結果、当然ではあるが③が最も優れていることが検証された。また、②と③では応答の偏差の改善はわずかであるが、図 6.6 から、③においては最適点のまわりには非常に広い安定した領域が広がっていることが分かった。

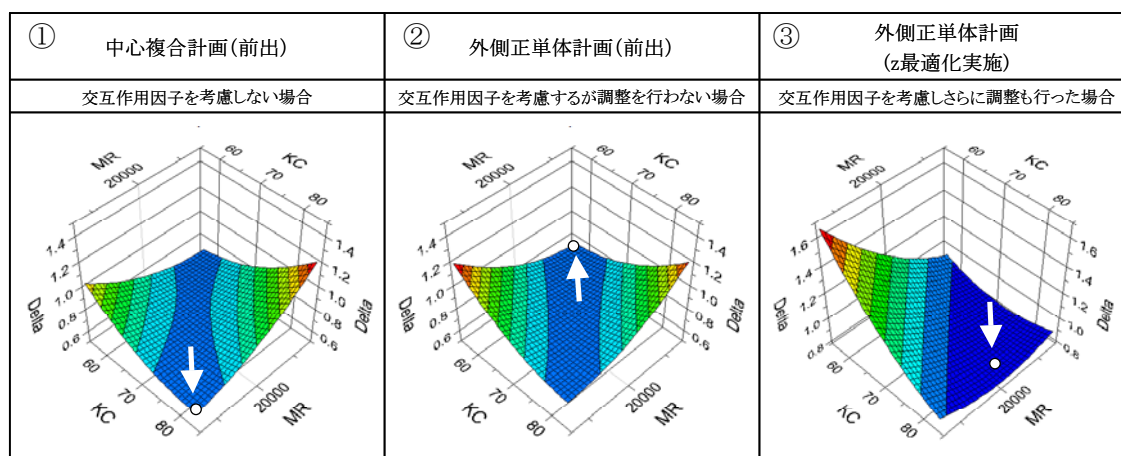


図 6.6 種々の方法で求めた Δy 最適化結果の比較

表 6.11 種々の方法で求めた Δy 最小を与えるパラメータ値および直接計算した実際の Δy

方法		① 中心複合計画	② 外側正単体計画	③ 外側正単体計画 (z最適化実施)
△最小値を与えるパラメータ	TG	1.920	1.920	1.910
	MR	16500	23700	20642
	GR	2.000	2.200	3.444
	KC	84.0	56.0	82.6
	KT	考慮せず	中心(0.0660)	0.0529
	SZ	考慮せず	中心(1.500)	1.527
直接計算した Δy		1.164	0.590	0.490

6.7. 応答と偏差の 2 応答によるロバスト最適化

6.7.1 応答と偏差の 2 応答を用いた多目的最適化によるロバスト最適化の現状

第 5～6 章の手順によって特性値の偏差の応答曲面関数が求められることができたならば、ロバスト最適化は応答曲面法の多目的最適化の一種として容易に達成できる。しかし、解析方法に関しては未だ残された課題がある。

多目的同時最適化を行うには、2 つの応答曲面関数をひとつの統合尺度にまとめた上で、ダウンヒル・シンプレックス法などで最適点探索を行う。しかし、この統合尺度に変換する段階で、好ましき関数や乖離度関数など複数の手法が乱立している。また統合する際に、応答・偏差それぞれにウェイトを乗ずるが、ウェイトの配分についての定石は無い(吉野ら^[11]の報告に見られるように検討した例は存在する)。

また、最も注意すべき点は、この方法はタグチ・メソッドのような真のロバスト最適化とは概念が異なる点である。真のロバスト最適化とは、本来、設計者が制御できない設計パラメータとは独立の“劣化”とか“使用環境”に対する頑健性を狙いとするものである。それに対し、コンピュータ実験を用いたロバスト最適化はあくまでも設計パラメータの変動に対する頑健性を狙いとしている。この点ではコンピュータ実験を用いたロバスト最適化は“安定化設計”とでもよぶべきであり、ユーザの手に渡った後の頑健性を直接向上しているものではないことを強く認識すべきである。しかし、設計パラメータ変動に起因する特性値の偏差を小さくすることは、図 6.7 に示すストレス・ストレングスモデルにおける余裕度(Safety Margin)を向上し、その結果、ユーザのもとでの故障確率を低減していると考えれば、この方法によるロバスト最適化は、全く役に立たないわけではない。

また、シミュレーションは実機実験のようなランダムウォークとよばれる変動や、系統誤差とよばれる偏りを生じないので、真のロバスト最適化に近づけるには、さらに工夫が必要であると思われる。

しかし、応答曲面法は SQC の流れを汲む方法として確立し、最適化の経緯がブラックボックスではないこと、局所最適に陥ることが少ないこと、などから安心して使用できるというメリットがあり現時点では開発現場においては有効な手段と考えられる。

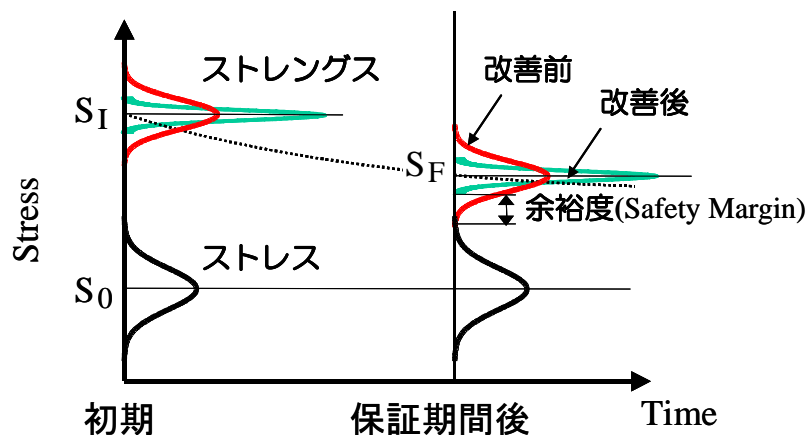


図 6.7 ストレス・ストレングスモデルにおけるバラツキの低減効果

6.7.2 事例におけるロバスト最適化

6.6 までの検討によって、TG, MR, GR, KC を設計パラメータとした特性値の応答 y の応答曲面関数である式(6.7)と特性値の偏差 Δy の応答曲面関数である式(6.8)は既に求められた。次のステップとしては、これらをひとつの関数に統合して、その関数の最適点を探索する。

$$y = f(\text{TG}, \text{MR}, \text{GR}, \text{KC}) \quad (6.7)$$

$$\Delta y = f(\text{TG}, \text{MR}, \text{GR}, \text{KC}) \quad (6.8)$$

関数の統合については、応答曲面法の黎明期には単にこれらの関数を合算することが行われたが、これは間違いである。正しくは、これらの関数を一旦尺度化した上でウェイトを乗じて合算し統合尺度としなければならない。これにより、それぞれの関数の単位が異なっても対等に扱われることになる。最近では同時最適化に関する詳細な教科書も現れている(例えば Vuchkov ら^[12])。

ここでは、尺度化は 3.4.4 で述べた乖離度関数を使用することにした。乖離度関数とは、特性値の最適点(目標値あるいは最大値, 最小値)を含む許容範囲内は乖離度ゼロとし、許容限界を越える部分においては最適点からの逸脱度合いに応じて何らかのペナルティを与えた関数である。統合する際はこれらの対数をとってウェイトを乗じて合算する。許容限界は側面制約とよぶ場合もある。

本事例では、最小点から実験空間内の最小値と最大値の差の 1/5 までを許容範囲とし(最小値から最悪値までの幅の 20% 程度の悪化は許容すると仮定した)、その範囲内では乖離度 0 とした。また、許容限界の部分では乖離度を 1、さらに許容限界を超えて最小点からの逸脱する度合いに応じ 2 乗のペナルティを与える関数とした。特性値の応答 y および特性値の偏差 Δy の最適値、許

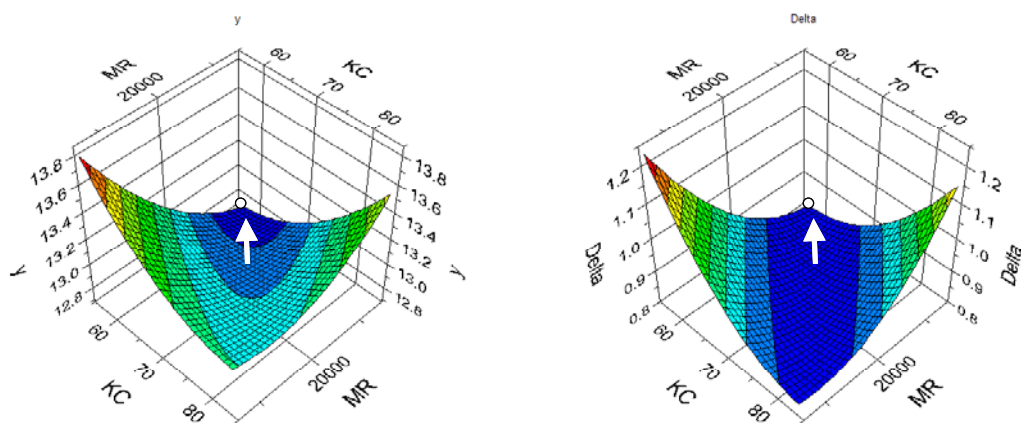
容限界を表 6.12 に示す. 許容範囲は図 6.6 中に示した応答曲面の底面の同一色部分にほぼ相当する.

表 6.12 特性値の応答 y および偏差 Δy の最適値と許容限界

	狙い値 (最小値)	最大値	許容限界 (20%)
応答 y	12.356	19.498	13.784
偏差 Δy	0.693	3.111	1.177

ウェイトに関しては本論文では未検討であるため, 今回は 1:1 とした.

最適点探索は, 最適化ソフトウェア MODDE を用いて行った. そのときの y および Δy の応答曲面を図 6.8 に示す.



(a) 特性値の応答 y の応答曲面 (b) 特性値の偏差の応答 Δy の応答曲面

図 6.8 ロバスト最適点近傍における特性値の応答 y および偏差 Δy の応答曲面

以上, 提案した手法を用いてロバスト最適化まで行った. ロバスト最適点は,

$$(TG, MR, GR, KC) = (1.92, 23700, 2.000, 56.0) \text{ (実験空間のコーナー点)}$$

であった. この値は, 吉野ら^[4]が従来法で推定した最適点

$$(TG, MR, GR, KC) = (1.92, 23700, 2.600, 56.0)$$

と一部異なる値となった.

今後は、実際の技術開発の場面に適用して、有効性を検証していきたい。

6.8 第6章のまとめ

本章では、スクリーニングにて選択された重要な交互作用を考慮したロバスト最適化を実施したいという要求に対する解決策として、適切なモデルと実験計画を提案した。ここで重要な交互作用とは、主効果は無いがモデルの非線形性を生じさせているもので、具体的には、式(6.3)のモデルに取りこまれた交互作用因子 z である。 z の探索過程は 5.3 に示している。5.3 では zx の大きさを評価して採否を決めている。この項は、式(6.3)の微係数の中に残りモデルの非線形性に効果を持っている。

本章における検討の結果、提案したモデルと実験計画によれば、交互作用因子 z による特性値の偏差を的確に表現でき、要求を満たすことが可能であると判明した。

なお、交互作用の影響を評価する実験計画において、交互作用因子を外側に割付けるのは常套手段だが、本論文では実験数を最小化する視点から正単体座標を割付けたところに新規性があり、また、良好な結果を得ることができた。しかし、内側の割付けについての考慮は不足しており、全体の実験数にはまだ余裕がある。限られた実験数(例えば飽和計画の実験数)において最良の計画を見出すのは今後の課題である。このとき、CAE は繰り返し誤差がないので、繰り返し誤差に基づく従来の最適基準(例えば D 効率)ではなく、交絡の度合い(例えば VIF 値)を新たな指標として用いることが考えられる。

[参考文献]

- [1] 吉野睦, 仁科健[2005]: "シミュレーションと SQC を融合したロバスト最適化における「ばらつき」の取り込み方法", JSQC 第 78 回研究発表会, 5-8
- [2] 吉野睦, 入倉真, 仁科健, 松田眞一, 石井成[2006]: "CAE を用いた最適化プロセスにおける変数スクリーニングの効率化", JSQC 第 80 回研究発表会, 263-266
- [3] 宮川雅巳[2006]: "実験計画法特論-フィッシャー, タグチ, そしてシャイニンの合理的な使い分け", 日科技連出版社
- [4] 吉野睦, 仁科健[2004]: "SQC とデジタルエンジニアリング-設計パラメータ最適化の技術動向と今日的課題-", 品質, Vol. 34, No. 3, 5-12
- [5] 朝野熙彦[2000]: "入門多変量解析の実際 第 2 版", 講談社
- [6] 山田秀[2004]: "コンピュータシミュレーションのための実験計画法-一様計画と過飽和実験計画-", 品質, Vol. 34, No. 3, 21-29
- [7] 宮川雅巳[1994], "外側配置による交互作用解析", 標準化と品質管理, Vol. 47, No. 1, 76-81
- [8] 宮崎興二, 小高直樹[2000]: "図形科学-空間・立体・投象", 朝倉書店

[9] 佐藤郁郎: "Ikuro's Home Page", http://www.geocities.jp/ikuro_kotaro/koramu/koujigen.htm

[10] Isabelle Zabalza Mezghani, Emmanuel Manceau, Frederic Roggero[2001]: "A NEW APPROACH FOR QUANTIFYING, THE IMPACT OF GEOSTATISTICAL UNCERTAINTY ON PRODUCTION FORECASTS: THE JOINT MODELING METHOD", IAMG2001 (Acrobat PDF), 7

[11] 吉野睦, 仁科健[2002]: "設計変数最適化法におけるウェイト算出法～変数構造を考慮した多目的最適化～", 品質管理学会第70回研究発表会, 65-68

[12] I. N. Vuchkov, N. L. Boyadjieva[2001]: "Quality Improvement with Design of Experiments: A Response Surface Approach (Topics in Safety, Risk, Reliability and Quality)", Springer

7. 今後の展望－動特性への拡張－

7.1 ロバスト最適化の種類

ロバスト最適化とは、1.1.7.1 でも述べたように、あるシステムにおいて外乱あるいは内乱（設計パラメータ変動）があっても、観測されるシステムの出力あるいは特性値の変動にそれらの影響がなるべく現れないように設計パラメータを適切に選択することである。

影響因子のひとつ“外乱”に関しては、タグチメソッドではそれを“ノイズ”あるいは“誤差因子”とよんで内乱とは区別しているが、シミュレーションでは多くの場合外乱を使用しない。それは外乱が“環境”とか“劣化”のように概念的なものであり、シミュレーションモデル上の変数として扱いにくいためである。そのため、シミュレーションではこのような外乱が一旦設計パラメータに影響を与え、その結果設計パラメータが変動するという内乱モデルに置き換えて適用している。田口ら^[1]は、“外乱は内部定数に影響を与え、その結果、機能がばらつくことが多い。したがって、設計定数などのばらつきである内乱を考慮した上での安定性さえ改善されれば、市場のノイズに対しても安定性が改善されることが期待できる”と述べているので、この方法でロバスト最適化を行うことについて特に問題は無いと考えられる。本論文の第6章までは、この考え方に基づきシミュレーションにおけるロバスト最適化の手順を論じてきた。

ここで、タグチメソッドにおけるロバスト最適化には大別して2種類のアプローチがある。ひとつは静特性のロバスト最適化であり、もうひとつは動特性のロバスト最適化である（例えば矢野ら^[2]）。これらは、観測されるシステムの出力あるいは特性値に着目して区別されている。

静特性とは、宮川^[3]によれば、システムの目標値がゼロ、無限大、あるいはユーザーが所望する一定値であるような特性値を指す。静特性では、この特性値がゼロ、無限大、あるいはユーザーが所望する目標値にあると仮定したとき、外乱あるいは内乱に起因する特性値の変動が最も小さくなるような状態をロバスト最適であるといい、その設計値をロバスト最適点という。本論文の第6章までは、いわば静特性のロバスト最適点の求め方に関する手順を議論してきた。

これに対して動特性とは、宮川^[3]によれば、システムの目標値がユーザーの入力条件によって変化し、ユーザーの所望した何段階かの出力がユーザーの指示通りに再現されることが求められる特性値を指す。動特性ではユーザーの指示値（入力）に対する出力の1次式を考え、その傾きが一定値であると仮定したとき、この傾きを変動させようとする影響因子の作用が最も小さくなるような状態をロバスト最適であるといい、その設計値をロバスト最適点という。なお、タグチメソッドでは入力のことを“信号因子”とよんで設計パラメータとは区別している。動特性を発現するシステムを概念的に示すと図7.1のようになる。

なお、シミュレーションによるロバスト最適化においても、タグチメソッドにおける静特性／動特性という分類を、アナロジー的に適用することは可能である。このとき、図7.1のノイズに関しては、シミュレーションでは設計パラメータが変動するという内乱モデルに置き換えて適用することになる。以降、本章では影響因子のことを内乱も含めて“ノイズ”とよぶ。

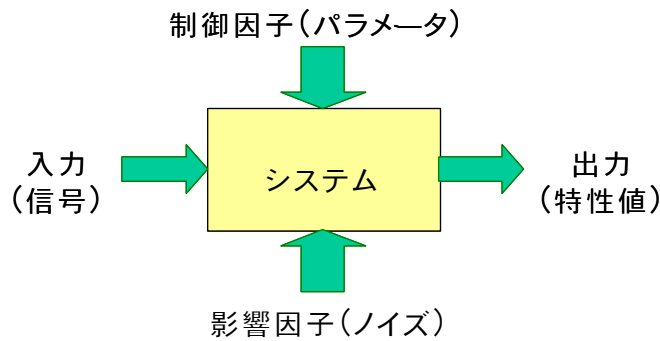


図 7.1 動特性の特性(目標値)を出力するシステムの概念図

図 7.1 より, 静特性と動特性の違いは, 出力が一定か, または入力(以下, 信号)に応じて変化するか, というただ 1 点にあることが分かる. しかし, ロバスト最適という状態の定義は, 後述するように大きく異なる. 静特性のロバスト最適化は単なる“ばらつき減らし”であるのに対して, 動特性は“機能の安定性”を狙うものである.

シミュレーションにおける静特性のロバスト最適点の求め方に関する手順は, 本論文の第 5~6 章に示したようにほぼ確立できたといえる. 具体的にはシステムの“狙いとなる特性値”に着目して, その特性値に寄与している設計パラメータを抽出し(設計パラメータのスクリーニング), 次にこれらの設計パラメータを説明変数として特性値の応答のモデル関数を求め(応答曲面近似), その関数上でノイズの影響を考慮したとき(内乱として設計パラメータを摂動させたとき), 特性値の出力に現れる変動(Δy)が最も小さくなる設計パラメータセットを探索するという方法である.

一方, シミュレーションにおける動特性のロバスト最適点の求め方はいまだ確立されていない. すなわち, これまでに本論文にて取り上げ検討してきた特性値の応答のモデル関数には, そもそも“信号”の項が含まれていないのである.

しかしながら, 工業的なシステムの特性値は一定のものばかりではない. むしろユーザーが与える信号に応じて変化する場合のほうが多い. そこで, 今後の展望として, シミュレーションにおいても, 動特性のロバスト最適点の求め方について明確な手順を確立する必要があると考えられる.

7.2 タグチの動特性の理解

7.1 で述べたように, 動特性のロバスト最適化とは, ユーザーの指示値すなわち信号に対する出力の 1 次式を考え, その傾きが一定値(目標値)であると仮定したとき, この傾きを変動させようとするノイズの作用(モーメント)が最も小さくなるような状態を探索することである. 宮川^[3]によれば, “このような目的に対してタグチはグラフの傾き β が変動するモデルを考えた”と述べている. これを概念的に示すと図 7.2 のようになる.

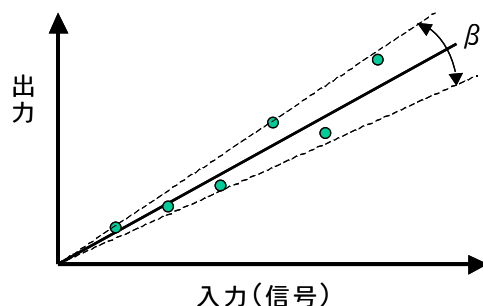


図 7.2 動特性の信号対出力の概念図

図 7.2 に示された概念図より，動特性のロバスト最適点を与える設計パラメータセットの探索を行うには，傾き β および σ を変えようとするモーメント σ について次のような定式化が必要である．

$$\begin{aligned} \beta &= \text{const.} = \text{改善前(あるいは理想値)} \\ \sigma &\rightarrow \text{min.} \end{aligned} \quad (7.1)$$

タグチメソッドの一般的なテキストでは，式(7.1)のように傾き β を安定させることを，“機能性の向上”と言っている． β の極大化，すなわち出力効率の改善は機能性の向上には該当しない．

式(7.1)の最適化を実行するための指標として，タグチは式(7.2)のような動特性の SN 比を定義した．

$$\eta = 10 \log \left(\frac{\beta^2}{\sigma^2} \right) \quad (7.2)$$

タグチメソッドでは，式(7.2)を最大化することで式(7.1)の最適化を達成する．式(7.2)を設計ケースごとに求めて比較することを“機能性の評価”という．なお，タグチメソッドでは式(7.2)のように対数をとることで加法性を与えているが，本章では，簡単のためにそれは行わない．

式(7.2)において， β と σ はそれぞれどんな物理的意味を持つのであろうか．そこで，まず，タグチの動特性の SN 比を紐解き，動特性の SN 比が狙っている概念を解き明かしてみることにする．なお，動特性の SN 比には，0 点比例式，基準点比例式，1 次式があり，1 次式が最も一般性が高いが，簡単のために，本章で扱う動特性の SN 比は 0 点比例式とし，必要に応じ 1 次式の場合も議論することとする．

まず，傾き β の安定性の指標として一般的に考えられる最小 2 乗法によって求めた傾き \hat{b} の分散を求める．その準備として傾き b の期待値， $E(\hat{b})$ を求める．ここでは 1 次式を考える．

$$\begin{aligned}
E(\hat{b}) &= E \left[\frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right] \\
&= E \left[\frac{\sum \{x_i - \bar{x}\} \left\{ (a + bx_i + e_i) - \left(a + b\bar{x} + \frac{\sum e_i}{n} \right) \right\}}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right] \\
&= E \left[\frac{\sum \{x_i - \bar{x}\} \left\{ b(x_i - \bar{x}) + \left(e_i - \frac{\sum e_i}{n} \right) \right\}}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right] \\
&= E \left[\frac{b \sum (x_i - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} + \frac{\sum (x_i - \bar{x}) e_i}{\sum (x_i - \bar{x})^2} - \left\{ \frac{\sum (x_i - \bar{x})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right\} \frac{\sum e_i}{n} \right] \quad (7.3)
\end{aligned}$$

ここで,

$$\frac{\sum e_i}{n} = E(e_i) = 0 \quad (7.4)$$

であることから,

$$E(\hat{b}) = b \quad (7.5)$$

となる.

次に \hat{b} の分散, $V(\hat{b})$ を求める. ここで先に求めた式(7.3)を次の第 2 行に代入する.

$$\begin{aligned}
V(\hat{b}) &= E \left\{ \left(\hat{b} - E(\hat{b}) \right)^2 \right\} \\
&= E \left\{ \left(\hat{b} - b \right)^2 \right\} \\
&= E \left\{ \left(b + \frac{\sum (x_i - \bar{x}) e_i}{\sum (x_i - \bar{x})^2} - \left(\frac{\sum (x_i - \bar{x})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right) \frac{\sum e_i}{n} - b \right)^2 \right\} \\
&= E \left\{ \left(\frac{\sum (x_i - \bar{x}) e_i}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right)^2 \right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= E \left\{ \frac{\sum ((x_i - \bar{x})e_i)^2 + \sum \sum (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})e_i e_j}{\left(\sum (x_i - \bar{x})^2\right)^2} \right\} \\
&= \frac{E(e_i^2)}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \\
&= \frac{\sigma^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \tag{7.6}
\end{aligned}$$

第 3 行から第 4 行への変形は、次の関係を用いた.

$$\frac{\sum e_i}{n} = E(e_i) = 0 \tag{7.7}$$

第 4 行から第 5 行への展開は、次の関係を用いた.

$$\begin{aligned}
\left(\sum a_i b_i\right)^2 &= \sum a_i b_i \cdot \sum a_i b_i \\
&= (a_1 b_1 + a_2 b_2 + \cdots + a_n b_n)(a_1 b_1 + a_2 b_2 + \cdots + a_n b_n) \\
&= \sum (a_i b_i)^2 + \sum \sum a_i b_i a_j b_j \quad (i \neq j) \tag{7.8}
\end{aligned}$$

第 5 行から第 6 行へは、誤差どおしは無相関であることから次の関係を用いて第 2 項を消去した.

$$\begin{aligned}
\text{Cov}(e_i, e_j) &= E\{(e_i - E(e_i))(e_j - E(e_j))\} = 0 \\
\therefore E(e_i e_j) &= 0 \tag{7.9}
\end{aligned}$$

第 6 行から第 7 行への変形は、次の関係を用いた.

$$\begin{aligned}
V(e_i) &= \sigma^2 \\
V(e_i) &= E(e_i^2) - (E(e_i))^2 = E(e_i^2) = \sigma^2 \tag{7.10}
\end{aligned}$$

以上より、傾き b を安定化させようとするとき、式(7.6)の結果である \hat{b} の分散 $\sigma^2 / \sum (x - \bar{x})^2$ を最小化すればよいと考えられる。しかし、タグチの SN 比の式(7.2)には分母 $\sum (x - \bar{x})^2$ が含まれない。それはなぜなのであろうか。そこで、さらに \hat{b} の分散 $V(\hat{b})$ について掘り下げてみることにした。

式(7.6)の分母分子に n を掛けると、

$$\begin{aligned}
 V(\hat{b}) &= \frac{\sigma^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \\
 &= \frac{1}{n} \frac{n\sigma^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \\
 &= \frac{1}{n} \sum \left(\frac{\sigma}{(x_i - \bar{x})} \right)^2
 \end{aligned} \tag{7.11}$$

と変形することができる. 式(7.11)を図 7.2 における直線を回転させようとするモーメントを表していると考え、図 7.3 のような模式図を描くことができる. ここでは 0 点比例式を考え、式(7.11)の \bar{x} に 0 を代入した.

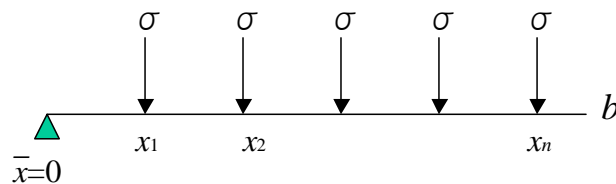


図 7.3 入出力関係を曲げようとするモーメント (σ が一定の場合)

図 7.3 において、式(7.11)は直線を回転させようとする各々のモーメントを支点からの距離で割って力を出し再度 2 乗和して平均した値であることが分かる.

直感的には、傾き b を安定化させるには σ^2 を小さくすれば良いと思われる. しかし、 σ がどこでも一定だとすると、式(7.11)の分母である支点からの距離、すなわち信号の取り方によって、曲げようとする作用を表す式(7.11)の大きさが異なってくる. 言い方を換えれば、信号 x は離散的であるほうが式(7.11)の値は小さくなり、傾きは見かけ上安定してしまう. これでは正しい尺度にはならない.

これに対して、タグチメソッドではノイズ N_1, N_2 の影響によって傾きが変化させられた状態の説明図として図 7.4 のような図を示している (例えば立林^[4]). 図 7.4 では、信号を M としている.

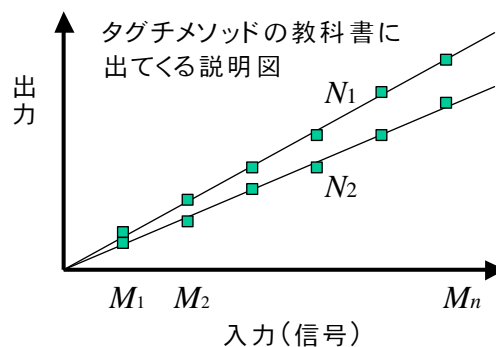


図 7.4 タグチの動特性の一般的な説明図におけるノイズの大きさ

図 7.4 から、タグチはノイズの大きさは一定ではなく x に比例していると想定していることが分かる。つまり図 7.5 のように変動係数一定のモーメントを想定しているのであって、このときの傾き b の分散は σ^2 になる。以上より、タグチの動特性の SN 比、式(7.2)の分母の意味が解明できた。

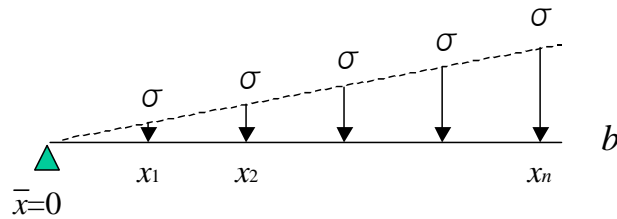


図 7.5 入出力関係を曲げようとするモーメント(変動係数一定の場合)

一方、分子の β であるが、これは次のように説明することができる。

もし、いくつかの設計パラメータセットにおける動特性の SN 比を比較しようとしたとき、あるものは図 7.6 のように傾き b が大きく、あるものは図 7.7 のように傾き b が小さかったとする。ノイズの影響による偏差は両者とも同じ程度であるが、少なくとも図 7.6 の方は図 7.7 のように出力が半減しているという状況にはない。そうであれば、とりあえず傾き b で基準化して機能の安定性を比較してみようとするのが自然である。よって傾き b で基準化した傾きの分散 σ の式(7.12)が定義できる。

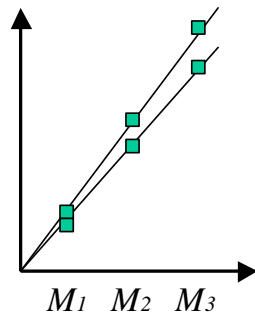


図 7.6 b が場合大きい場合

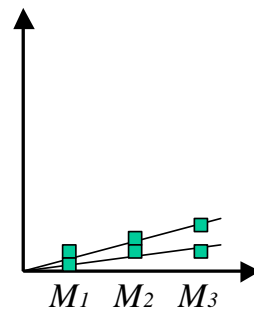


図 7.7 b が小さい場合

$$\eta' = \frac{\sigma}{\beta} \quad (7.12)$$

指標はなるべく大きくなるように調整したほうが好ましいと考えて、式(7.12)を逆数にして指標化したのがタグチの SN 比の式(7.2)である。2 乗して対数を取るのはタグチの流儀である。

7.3 動特性をシミュレーションで解析する際の問題点と今後の対応

7.2 で述べた動特性のロバスト最適化をシミュレーション実験でも行いたい. その概念を図 7.8 を用いて説明する. 図 7.8 において, 直線は外乱の無い状態での入出力関係であり, 外乱があってもこの状態にあることを理想とする. それに対してプロット点は設計パラメータの摂動によって生じた傾き b を変化させようとするモーメントを表している. このとき, 動特性のロバスト最適化の評価式である式(7.1)を解くことを考える.

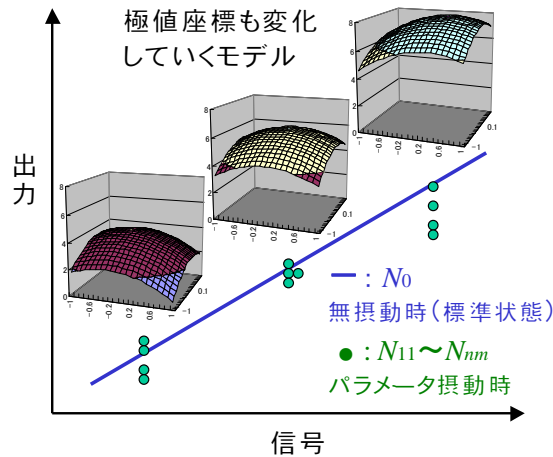


図 7.8 シミュレーションにおける動特性のロバスト最適化の概念図

式(7.1)を実際に解くには, 新たに信号因子を取り込んだ応答曲面のモデル関数が必要となる. 図 7.8 に示したように信号によって応答曲面の極値座標も変化していくという一般形を想定すると, 信号と各設計パラメータとの交互作用もモデル化する必要があることが分かる.

まず, 傾き β を求めるためのモデルとして式(7.13)を考える. M を信号とすると, 出力は,

$$Y = \alpha + f(M) + f\{M(x, x^2, x_i x_j)\} \quad (7.13)$$

となり, 設計パラメータセット毎の傾き β を求めることが可能となる. 次に, 傾きを変化させようとするモーメント σ を求めるためのモデルとして式(7.14)を考える.

$$Y = \alpha + f(M) + f\{M(x, x^2, x_i x_j)\} + f\{M_z(x, x^2, x_i x_j)\} \quad (7.14)$$

式(7.14)において, z は 6.3.1 で述べた交互作用因子である. 式(7.14)上で設計パラメータを摂動させることにより, 信号毎, 設計パラメータセット毎のモーメントを求めることが可能になる.

これらのモデル式を効率的な実験計画から解き, 中心複合計画等によって β と σ の応答曲面関数を求めて, 式(7.1)に基づいた最適点探索を行えば動特性のロバスト最適化が達成される. しかし, ここで全く問題が無いわけではない. 第 1 に効率的にモデル式を求めるための実験の割り付けはどうあるべきかという課題がある. 第 2 に, シミュレーション特有の問題からタグチの方法で β や σ を求めることができないという問題がある.

ここで、シミュレーションで動特性を解析する際の課題を整理すると以下ようになる。

- ・モデル式を解くための効率的な実験計画を立案する必要がある。
- ・ β を例えば最小 2 乗法で求めた単回帰係数 b で代用しなければならない。
- ・ σ を求めるとき、摂動結果を適切な方法で尺度化しなければならない。

次節以降、これらの問題について詳細に述べるとともに今後の対応を提案したい。

7.3.1 β を b で代用するときの問題点と今後の対応

議論に入る前に、再度タグチの動特性の SN 比 (0 点比例式) の求め方を確認する。タグチメソッドの一般的な解説書 (例えば立林^[4]) にある SN 比の求め方では、信号と出力の関係である傾き β は最小 2 乗法で求められた単回帰の傾き b を使用しない。

今、表 7.1 に示すようなデータセットがあるとすると、タグチの SN 比は式(7.15)によって求められる。

表 7.1 0 点比例式の SN 比を求めるための実験データ

繰り返し	M_1	M_2	\cdots	M_k
1	y_{11}	y_{12}	\cdots	y_{1k}
2	y_{21}	y_{22}	\cdots	y_{2k}
r_0	y_{r_01}	y_{r_02}	\cdots	y_{r_0k}
小計	y_1	y_2	\cdots	y_k

$$\begin{aligned}
 r &= r_0 (M_1^2 + M_2^2 + \cdots + M_k^2) && : \text{有効除数 (Sxx)} \\
 y_i &= y_{i1} + y_{i2} + \cdots + y_{ir_0} && : \text{信号 } i \text{ での } y \text{ の合計} \\
 S_T &= y_{11}^2 + y_{12}^2 + \cdots + y_{1r_0}^2 + \cdots + y_{kr_0}^2 && : \text{総変動} \\
 S_\beta &= \frac{1}{r} (M_1 y_1 + M_2 y_2 + \cdots + M_k y_k)^2 && : \text{回帰変動} \\
 S_e &= S_T - S_\beta && : \text{誤差変動} \\
 V_e &= \frac{1}{kr_0 - 1} S_e && : \text{誤差分散} \\
 \hat{\beta}^2 &= \frac{1}{r} (S_\beta - V_e) && : \text{感度} \\
 \hat{\sigma}^2 &= V_e \\
 \eta &= \frac{\beta^2}{\sigma^2} = \frac{1}{r} \frac{(S_\beta - V_e)}{V_e} && (7.15)
 \end{aligned}$$

式(7.15)から分かるように、SN比の分子に来る β^2 (感度)は最小2乗法で求めた単回帰係数 b を2乗して使用することはせず、総変動から回帰変動を引いた誤差変動から求めている。この理由は式(7.16)に示すように、 β^2 の期待値が偏りを持つからであると説明されている(例えば立林^[4])。

$$\begin{aligned}
 E(\hat{\beta}^2) &= E\left\{\frac{(\sum x_i(bx_i + e_i))^2}{(\sum x_i)^2}\right\} \\
 &= E\left\{\frac{(b\sum x_i^2 + \sum x_i e_i)^2}{(\sum x_i^2)^2}\right\} \\
 &= E\left\{b^2 + \frac{2b\sum x_i^3 e_i}{(\sum x_i^2)^2} + \frac{\sum x_i^2 e_i^2}{(\sum x_i^2)^2}\right\} \\
 &= E\left\{b^2 + \frac{\sum e_i^2}{\sum x_i^2}\right\} \\
 &= b^2 + \frac{\sigma^2}{r} \tag{7.16}
 \end{aligned}$$

式(7.15)より、タグチメソッドでは感度を、 $\beta^2 = \frac{1}{r}(S_\beta - V_e)$ の形で求めているが、シミュレーションではこの方法を用いることができない。なぜなら、3.4.2で述べたようにシミュレーションでは V_e が意味を持たないからである。そのため、 β の代用として単回帰係数 b を用いることを考えなければならない。

7.2に示したように、タグチの動特性のSN比によるロバスト最適化とは、“傾き b で基準化した傾きの分散 σ ”を指標として、その傾き b が一定値であると仮定したとき、この傾き b を変動させようとするノイズの作用(モーメント)が最も小さくなるような状態を探索することである。注意すべき点は、傾き b を変化させようとするモーメントが変動係数一定と仮定されていることである。

このように等分散ではない状態での回帰係数は重み付き最小2乗法を用いて解くことができ、変動係数一定の場合は、 $b = \sum(y_i/x_i)/n$ となる。 β を b で代用する場合は等分散の仮定で求めら

れた単回帰係数、 $b = \sum x_i y_i / \sum x_i^2$ ではなく、前者を用いるべきではないかと考える。

その効果としては、原点(あるいは直線の回転中心)から遠い位置の偏差を過大評価しないことが上げられる。今後、詳細に検討していきたいと考える。

7.3.2 σ を求めるときの問題点と対応

静特性のSN比では、安定化したい特性値の変動はy軸上で観察される量であったので、ロバスト最適化を考える際も1軸で尺度化して評価すればよかった。また、変動の大きさは単にその変化

幅を把握すればよかった。そこで静特性のロバスト最適化では、 $\Delta y = \max(y) - \min(y)$ のように y の変動の最大値・最小値を変動の尺度として代表させて用いた。

しかし動特性で安定化したいのは傾き b である。安定化を図りたい直線は図 7.8 の応答曲面の底面に対して垂直に立ち、各信号因子毎の曲面を貫いている。変動する方向は理想的な直線を基準として各設計パラメータ軸方向(横方向)になる。そこで、ロバスト最適化を行うには n 次元の応答曲面においてなるべく全方向に平らな部分を探索する必要がある。つまり n 次元の設計パラメータ空間内であらゆる方向に曲げようとしているモーメントを、おしなべて測定する必要がある。

これらのことを達成するために、まず、動特性における直線を曲げようとするモーメント σ を把握するには、変動量として設計パラメータを摂動して求めた点の理想状態からの偏差を用いなければならない。また、評価尺度は、それらの偏差の最大値などで代表させるべきでなく、全ての方向の 2 乗和を用いるべきであると考える。

その効果としては、例えば図 7.8 のパラメータ摂動時のプロットにおいて、左端の一群と右端の一群では $\Delta y = \max(y) - \min(y)$ は同程度であるが明らかに右端の方が理想状態からのズレが大きく好ましくないということを正しく評価できるし、また全ての方向を評価することによって、1 方向だけモーメントが大きいのか、いずれの方向にもモーメントが大きいのかを評価することができる。これらについても、今後、詳細に検討していきたいと考える。

7.4 第7章のまとめ

タグチメソッドにおける動特性は、出力効率(傾き β)の改善に躍起になっている現在の開発体制に一石を投じた手法である。また、単なるばらつきの改善をやり尽くした中で、さらに入出力関係が安定していなければ意味が無いことを知らしめる警鐘でもあった。

シミュレーションによるロバスト最適化においても、このような工学的意味のある動特性のロバスト最適化も達成できるようにしなければならないことは明白である。

本章では、シミュレーションによる動特性のロバスト最適化を具体的に実施する際に問題となる項目を上げ、対応策を述べた。具体的な方法論の確立および実例による検証は今後の課題である。引き続き検討を進めたいと考える。

[参考文献]

- [1]田口玄一, 横山巽子[2007]:“ベーシックオフライン品質工学”, 日本規格協会
- [2]矢野宏[2001]:“おはなし品質工学(改訂版)”, 日本規格協会
- [3]宮川雅巳[2000]:“品質を獲得する技術”, 日科技連出版社
- [4]立林和夫[2004]:“入門タグチメソッド”, 日科技連出版社

8. 結論

近年、デジタルエンジニアリング、特に“CAE”と、これに SQC を融合した設計特性の“最適化技術”が急速に普及している。

“CAE(Computer Aided Engineering)”とは、コンピュータ・シミュレーション(以下、シミュレーション)を活用した開発スタイルのことであり、開発期間の短縮や開発経費の低減を目的に多くの企業が導入している。この根幹を成すのが有限要素法解析(以下、FEM 解析)である。近年、そのソフト(以下、ソルバー)の機能が向上し、応力・歪だけでなく熱分布や流体など多くの問題が解けるようになってきている。その結果、技術開発あるいは設計パラメータの検討の多くの場面で FEM 解析が活用され、開発期間の短縮やコストダウンに貢献している。例えば、金型関連の開発では実験に供する金型の製作費が大変高額であるが、最近では金型を製作せずシミュレーションで検討することで開発経費を大幅に低減している。また、CAE の普及に歩調を併せて、設計環境の CAD (Computer Aided Design) 化も急速に進行し、さらに CAD と CAE や CAM (Computer Aided Machining) とのリンクも進んでいる。CAD と上記の FEM 解析を主とする CAE がリンクすることによって、CAD 上で設計すると同時に、FEM 解析の入力となる製・部品のメッシュモデルが自動生成され、即座に解析が実施される。言い替えれば、強度不足や共振などの問題点を CAD 画面上で即時チェックすることが可能となり、開発効率の大幅な向上に寄与している。

また、“最適化技術”とは、設計パラメータの最適値探索を行う際に CAE を試行錯誤的に援用するのではなく、実験計画法などを活用してソルバーをコントロールし、より効率的に最適解を探索する手法である。i-SIGHT をはじめとする最適化支援エンジンとよばれるソフトが登場し急速に普及している。

ところが、これらの手法の適用に全く問題が無いわけではない。すなわち本論文が検討対象とした CAE における下流再現性(実機確認での再現性)の欠如が大きな問題となっている。

CAE 業務において、設計者が解析モデルの妥当性を意識することなく上述したような即時解析を可能にするには、基礎研究段階において、あらかじめ実機が与える結果と FEM 解析が与える結果をある程度一致させておかなければならない。つまりモデルの精度が確保されていなければならない。しかし、一般に FEM 解析では解析時間の節約のため 3D モデルを使わず 2D モデルで代用したり、構造の一部分を取り出してモデル化し、その端部を何らかの境界条件で代用したりする。FEM 解析では形状面でも境界熱伝導等の物性面でも実機と寸分違わぬ解析モデルの実現は現実的には不可能であり、そのため実機実験結果との乖離が生じる。この乖離を埋め合わせる方法が確立していないために、下流再現性が損なわれている場合がある。

また、最適化の段階においては、シミュレーション結果が実機実験結果とは異なる性質を持っているにもかかわらず、実機実験と同じような扱いをするために下流再現性が損なわれる場合がある。例えばロバスト最適化を行う際に誤差と称して扱っているのは特性値の偏差であり真の誤差ではない。実機実験では敢えて設計パラメータを選択しなくても、その誤差の影響は特性値変動として観察される。しかしシミュレーションでは選択しなかったパラメータは中心値に固定され、特性値変動

に影響を及ぼすことはない。そのため、特性値変動に影響を持つ因子の取りこぼしがあつたまま最適化を行うと、ロバスト最適値だという結論にもかかわらず実機再現テストで大きなばらつきが出てしまう場合がある。

では、下流再現性の悪化を招いている原因はどこにあるのだろうか。シミュレーションは次の点で実機実験とは異なり、それらがモデルの精度低下や推定結果の誤りの原因となっている。

①解析モデルの精度の問題:シミュレーションは繰り返し誤差が発生しない。そのため実験誤差を判断基準にした統計的検定ができない。にもかかわらず従来のフィッシャー流のパラダイムを適用してフィッティング(以下、合わせ込み)を行うと、過度の合わせ込みを行ってしまう。

②最適化における特性値変動の見逃し問題:変動を発生させている因子の取りこぼしがあるとシミュレーションでは予測的に反映されないためにロバスト最適点を間違えて与える。

このように、シミュレーションの特性値は実機実験の特性値とは性質が異なるにもかかわらず、実機実験と同じ統計的方法を適用するために結果を正しく推定できていないのである。

本論文では、これらの問題点に取り組み、正しい姿に発展させることを狙いとし、次のような提案を行った。

第4章では、解析モデルの精度の問題を解決するために実験計画法を活用した合わせ込みの再現性向上方法を提案した。具体的には、実機実験結果とFEM解析結果との乖離をパターンとバイアスに分離し、パターンを一致させることを優先するとともにバイアスについては初期条件から逸脱するような調整を避けるという提案である。これにより過度の合わせ込みを行わずに技術者が納得できる精度を確保することができるようになった。今後の研究課題としては、今回検討できなかった合わせ込みのストップルールの検討、パターンの違いとバイアスに影響する因子が分離できないときの対処、多特性の場合の合わせ込みなどがある。

第5～6章では、ロバスト最適化の下流再現性を確保する方法を提案した。シミュレーション実験では変数スクリーニングの段階で主効果が小さいため選択されなかった因子はその後の解析では中心値に固定される。そのため、もし、それらの因子の影響でロバスト最適化に使用される応答の非線形性が変化するケースがあつたとしても、その変化は観測されない。これが原因となって、ロバスト最適化を行っても下流再現性が得られないケースが多かつた。一方、タグチメソッドにおける2段階設計は、その第1ステップでは主効果は無いがばらつきには効いている因子を調整して、まずばらつきを最小化していることに特徴があり、そのような因子を考慮しなければならないことを示唆している。そのような因子は、シミュレーション実験における応答の非線形性を利用したロバスト最適化においては、それ自身の主効果は小さいが、主効果が大きい制御因子と交互作用を持ち、応答曲面関数の微係数を変化させている因子であると考えられる。そこで、そのような因子を“交互作用因子”とよぶことにし、それをばらつき(Δy)を計算するモデルに取り込むことを提案した。この提案に伴って、新たな課題が生じた。

- ① 交互作用因子の効率的な探索(レゾリューションV実験では非効率なので)
- ② 交互作用因子をモデルに取り込むために必要な効率的な実験計画

交互作用因子の探索に関しては、直交表のような巨大実験を組むことを避け、シャイニン・メソッドによる逐次探索を用いる方法を提案した。交互作用因子をモデルに取り込むために必要な実験計画に関しては、交互作用を検出する常套手段である外側割付けを使いながら、割付け点を減らす方法として、 n 次元空間の最小頂点数をもつ正多面体である「正単体」の頂点を用いることを提案した。さらに、それらが計画として成立することを、いくつかの交絡の指標を調べることによって確認した。想定したモデルは、制御因子の応答曲面関数と、それら全ての項に交互作用因子を乗ずるモデルとした。ただし、交互作用因子と定数項の積である交互作用因子の1次項は、スクリーニングの際に無視できるとした結果と矛盾しないように、モデルからは外した。その結果、本来のロバスト最適点を求めることが可能になった。ただし、内側の割付けについての考慮は不足しており、全体の実験数にはまだ余裕がある。今後の研究課題としては限られた実験数(例えば飽和計画の実験数)において最良の計画を見出すことがある。このとき、CAEは繰り返し誤差がないので、繰り返し誤差に基づく従来の最適基準(例えばD効率)ではなく、交絡の度合い(例えばVIF値)を新たな指標として用いることが考えられる。

以上のような提案を行うことによって、第一に従来CAE技術者の経験や技量によっていたモデル化の手順を確立することができた。第二にロバスト最適化を行う際に従来の実機実験では自足的(self-sufficient)に考慮されたばらつきが、シミュレーションにおいても考慮することが可能になった。また、これらの手法を事例に適用して検証したところ、いずれも効果が得られることが分かった。このことから本研究の成果は工業的にも利用価値の高いものであることが推察される。今後は実際の開発に適用してさらに効果の検証を進めたい。

[謝辞]

指導教官の仁科健教授には、この研究テーマを与えて頂き、また在学中の長きにわたってご指導を賜りました。また、仁科研究室の石井成助教、院生の芝田巧さんには、共同研究者として積極的に意見交換に応じて頂くなど大変お世話になりました。

JSQC 拡大研究会 WG1 のメンバーの皆様には、合わせ込みの具体的事例、および交互作用因子の抽出方法に関して、研究会活動を通じて共に検討して頂き、また多くのご意見を頂きました。特に筑波大学大学院ビジネス科学研究科椿広計教授、山田秀教授には JSQC 拡大研究会 WG1 の活動を越えて、発表機会を与えて頂くなどバックアップをして頂きました。

元名工大院生で現日東電工の近藤総氏は、合わせ込みの事例に関する共同研究者として、ワイヤボンディングの FEM 解析を数多く行われました。この貴重なデータを活用させて頂きました。

元デンソー会長、元 JSQC 会長の故高橋氏には、キックオフの講演用スライドの作成をお手伝いした際に示唆に富んだご助言を多数頂きました。この論文の根底に流れる技術者視点の思想は高橋氏から頂いたご助言がヒントになっているものが殆どであります。

南山大学情報システム数理学科の松田眞一准教授には JSQC の研究発表会における私の発表の共同発表者として数々のご助言を頂くとともに、実験空間の交絡度合いの計算において R のプログラムと計算実行の手助けをして頂きました。

本論文は皆様の支えによって完成することができました。心より感謝致します。

[関連発表の記録] (在学中(2005.4~2008.3)以前のものも含む)

第1章 課題の抽出

- (1) 口頭発表: 吉野睦, 仁科健[2004]: "シミュレーションと SQC 拡大研究会第 1 分科会中間報告 (1)", JSQC 第 34 回年次大会研究発表会要旨集, 157-160
- (2) 口頭発表: 吉野睦, 仁科健[2005]: "シミュレーションと SQC 拡大研究会第 1 分科会中間報告 (2)", JSQC 第 77 回研究発表会要旨集, 183-186

第2章 横幹連合の研究会活動

- (1) 解説(共著): 仁科健, 吉野睦[2008]: "CAE によるロバスト最適化における実験計画法の活用 -シミュレーションと SQC 拡大研究会第 1 分科会成果報告-", 品質, Vol.35, No.1, 12-23

第3章 従来法のレビュー

- (1) 解説: 吉野睦, 仁科健[2004]: "SQC とデジタル・エンジニアリング設計パラメータ最適化の技術動向と今日的課題", 品質, Vol.34, No.3, 5-12
- (2) 査読付き Post Proceedings: M. Yoshino, K. Nishina[2007]: "SQC and Digital Engineering -Technological Trends in Design Parameter Optimization and Current Issues-", The Grammar of Technology Development, Springer, 135-151

第4章 合わせ込み

- (1) 査読付き Proceedings(共著): 山崎康櫻, 増田道広, 吉野睦[2005]: "Al ワイヤボンディングにおけるループ共振の解析", 溶接学会 11th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics"(Mate2005) 論文集, 409-412.
- (2) 口頭発表(共同): 近藤総, 吉野睦, 仁科健, 松田眞一, 石井成[2005]: "統計的手法を活用したシミュレーションモデルの合わせ込み", JSQC 第 35 回年次大会研究発表会要旨集, 155-158
- (3) 寄稿(共著): K. Nishina, M. Yoshino[2007]: "Application of DOE to Computer Aided Engineering", The Grammar of Technology Development, Springer, 153-161
- (4) 査読付き論文: 吉野睦, 近藤総, 仁科健[2007]: "シミュレーションモデルの合わせ込みにおける実験計画法の活用", 品質, 投稿中(受理)

第5章 スクリーニング

- (1) 口頭発表: 吉野睦, 仁科健[2005]: "シミュレーションと SQC を融合したロバスト最適化における「ばらつき」の取り込み方法", JSQC 第 78 回研究発表会要旨集, 5-8
- (2) 口頭発表: 吉野睦, 入倉真, 仁科健, 松田眞一, 石井成[2006]: "CAE を用いた最適化プロセスにおける変数スクリーニングの効率化", JSQC 第 80 回研究発表会要旨集, 263-266

第 6 章 ロバスト最適化のための計画

- (1) 口頭発表: 吉野睦, 仁科健, 松田眞一, 石井成, 芝田巧[2007]: “シミュレーションと SQC を融合したロバスト最適化における「ばらつき」の取り込み方法～第 2 報～”, JSQC 第 84 回研究発表会要旨集, 21-24
- (2) 口頭発表(共同): 石井成, 芝田巧, 吉野睦, 仁科健[2007]: “CAE におけるロバスト最適化のための実験計画”, JSQC 第 37 回年次大会研究発表会要旨集, 181-184