



ロバスト設計の実践事例集

2025年3月28日 A改定
(2021年5月14日 初版制定)

宇宙航空研究開発機構

免責条項

ここに含まれる情報は、一般的な情報提供のみを目的としています。JAXA は、かかる情報の正確性、有用性又は適時性を含め、明示又は黙示に何ら保証するものではありません。また、JAXA は、かかる情報の利用に関連する損害について、何ら責任を負いません。

Disclaimer

The information contained herein is for general informational purposes only. JAXA makes no warranty, express or implied, including as to the accuracy, usefulness or timeliness of any information herein. JAXA will not be liable for any losses relating to the use of the information.

発行

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

宇宙航空研究開発機構 安全・信頼性推進部

JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)

目 次

1 適用範囲	1
2 関連文書	1
2.1 適用文書	1
2.2 参考文書	1
3 事例集	2
3.1 ロケット用ターボポンプ設計	2
3.1.1 背景と目的.....	2
3.1.2 実施内容.....	4
3.1.3 まとめ.....	6
3.2 ベアリング設計	9
3.2.1 背景と目的.....	9
3.2.2 実施内容.....	9
3.2.3 まとめ.....	10
3.3 シミュレーションによる効果的な吸収体配置レイアウトの最適化	11
3.3.1 目的.....	11
3.3.2 実施内容.....	11
3.3.3 まとめ.....	13
3.4 機構解析ツールによる Latch 設計	14
3.4.1 背景と目的.....	14
3.4.2 実施内容.....	14
3.4.3 まとめ.....	15
3.5 自動車のユーザ評価（定性・定量）データへの適用	16
3.5.1 背景・目的.....	16
3.5.2 定性・定量データを扱う PSD 手法の概要.....	16
3.5.3 事例適用.....	19
3.6 差動伝送線路の多目的満足化設計	24
3.6.1 背景・目的.....	24
3.6.2 検討モデル.....	24
3.6.3 メタモデリング.....	25
3.6.4 選好度の設定及び絞り込み結果.....	27
3.6.5 まとめ.....	30

1 適用範囲

本事例集は、JERG-0-060 ロバスト設計ハンドブックの事例集及び解説集として制定されるものである。これまでロバスト設計技術の宇宙機開発への適用は、具体的な適用例が少なかったが、本事例集を参考に、適用が進むことを期待して制定したものである。宇宙機開発のエンジニアの読みやすさを考慮して、解説文と図表による説明の構成としている。個々の内容の詳細については、適用文書に記載の論文を参考にすることを推奨する。

ロバスト設計の適用に当たっては、ロバスト設計の専門家の支援を仰ぐことが推奨される。

2 関連文書

2.1 適用文書

なし

2.2 参考文書

- (1) JERG-0-060 ロバスト設計ハンドブック

3 事例集

3.1 ロケット用ターボポンプ設計

3.1.1 背景と目的

(1) 液体ロケットエンジン用ターボポンプ

液体ロケットエンジンに用いられるターボポンプは、タンクから推進剤（液体酸素や液体水素など）を高圧状態にしてエンジン燃焼室に送り込むための高速回転機械である。ターボポンプは、エネルギー変換を目的とした機能を果たすために上位システム（ロケットエンジンシステム）に組み込まれ、上位システムを構成する1つの機械システムとして扱われる。一方、ロケットの推進剤をタンクからエンジン燃焼室に送る役目を担うため、液体ロケットエンジンの「心臓」と呼ばれ、上位システムの成立性や信頼性を大きく左右する重要な構成機械である。

一般の産業用回転機械と比較して極めて高速回転で高いエネルギー密度を有するロケット用ターボポンプは、これまでの開発において多くの軸振動に関連する不具合と、それに伴う大規模な手戻り作業の発生を経験してきた。また、国際競争が激化している近年の宇宙産業においては、開発スピードの向上やライフサイクルコストの低減がさらに求められている。このような背景から、概念設計段階において軸振動のような動的挙動に関わる問題を抜本的解決する設計手法の構築が求められてきた。

(2) ターボポンプのダイナミック設計と品質工学

従来のターボポンプ設計では、流体力学的な最適化（羽根車の翼形状最適化など）を中心とした設計プロセスであった。ターボポンプを構成する各要素の効率や流力性能の最適化に重点が置かれ、ロータシステムなどの複数要素から成り立つシステム最適化は後回しにされてきた。したがって、軸振動のようなシステム問題に対して必ずしも最適なターボポンプが設計できていない可能性があった。この問題を解決するための新たな設計手法の確立を目標に、JAXA 及びロケット用ターボポンプのステークホルダー、大学などの研究機関が協働して「ターボポンプのダイナミック設計」に関する研究⁽¹⁾⁽²⁾を2010年より始めた。

ダイナミック設計は、以下の設計概念⁽²⁾に基づく上流設計段階での適用を考えた設計手法である。なお、設計手法の詳細については参考文献^{(2)～(5)}を参照いただきたい。

① ダイナミック設計

定常・一定・静的など、動きや応答などを取り入れない静的設計（従来設計）に対し、非定常・変動・安定性・相互干渉など、動きやその応答を考慮する設計手法。

②多領域最適化

1つのサブシステムを1領域とし、領域毎に最適化を実行しつつ、それらを包含するシステムにおいて全体最適を目指す設計方法。ターボポンプにおいては、ポンプ（インデューサ+インペラ）、タービン、軸受、シールなどのサブシステムが「領域」にあたる。

③形態設計

翼プロファイルなどのような個々の要素形状を追求するのではなく、ターボポンプサブシステムの配置配列、軸スラストバランス、内部循環流路など、システム形態を第一義に設計する手法。

ダイナミック設計では、複数サブシステムから構成される全体システム（ターボポンプ）の最適化に重点を置いているが、その達成のためには、いくつかの課題があった。例えば、上位システムの要求を適切にサブシステムに伝達する方法、各サブシステムの設計パラメータと全体システムとの関係性を把握して適切な設計プロセスを構築する方法などが課題として挙げられる。また、上流設計への適用を前提としたダイナミック設計では、詳細設計などの下流工程における微調整によって生じる特性のばらつきを抑える工夫も必要である。そこで、ダイナミック設計に品質工学を取り込むことで、これらの課題の解決を試みた。

瀧田らは、ターボポンプのポンプを駆動するタービンを対象にして、**QFD**とロバスト設計を連携させた最適設計を実施した^{(6)~(14)}。従来の最適設計では設計パラメータの選択が設計者の知識や経験に依存し、最適設計にて得られた結果が必ずしも上位システム要求を反映していない場合があったが、**QFD**とロバスト設計の組み合わせにより、上位要求に合致した最適化が可能になると考えられる。また、本手法はロジカルであるため設計者にとっては扱い易く、実践的設計手法として有用である。次項に本事例「**QFD**とロバスト設計手法を組み合わせたロケット用タービンの最適化」の概要について述べる。また、本事例の解説用スライド資料も添付するので、詳細についてはそちらを参照いただきたい。

なお、本事例はタービン要素に対するロバスト設計の適用例であるが、ターボポンプの全体システムに対するロバスト性の評価についても様々な試みを行っており^{(20)~(25)}、品質工学的手法だけでなく応答曲面法に基づく信頼度評価手法⁽²⁵⁾などについても検討している。また、複数サブシステムによって構成されるターボポンプは、全体システムとサブシステムとの関係性も複雑になる。システム全体を最適化するためには、その関係性を明らかにして適切に設計プロセス（設計順序や設計パラメータの取扱い方法など）へ反映することが重要となる。そこで、**QFD**を援用して適切な設計プロセスを構築するための検討も行っている^{(21)~(26)}。例えば、特性要因図を利用して**QFD**の二元表を作成する手法⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾や、**QFD**と公理的設計の概念を組み合わせた手法⁽²⁶⁾など、様々な工夫や試みを行っていることも補足しておく。

3.1.2 実施内容

(1) 事例「QFD とロバスト設計手法を組み合わせたロケット用タービンの最適化」の概要 (6)~(14)

本節では、「QFD とロバスト設計手法を組み合わせたロケット用タービンの最適化」事例のロバスト設計部分について概要を述べる。本事例は、液体ロケットエンジン用ターボポンプのタービンを対象とし、Thomas Force と呼ばれる不安定化励振力を低減するタービン形態・形状を見出すことを目的とした研究の成果である。なお、最適化の対象タービンは、LE-7 原型エンジンの液体水素ターボポンプ用タービン（以降、現行翼と呼ぶ。）の仕様をベースにした。

最適化は、【STEP1】QFD を活用して設計パラメータ（制御因子）を選定し、【STEP2】1次元損失モデルを用いてロバスト設計を実施し、【STEP3】最後に CFD 解析により Thomas Force の低減効果を評価する流れで実施した。また、ロバスト設計は、①パラメータダイアグラムの設定、②最適条件の定義、③制御因子の設定、④誤差因子の設定、⑤要因効果図及び最適条件の設定、⑥再現性の確認、というオーソドックスな手順により実施した。

① パラメータダイアグラム

ロケット用タービンの機能は、タービン駆動ガスが持つ流体エネルギーを軸出力に変換し、同軸で繋がれたポンプを駆動することであり、これを基本機能と定義した。入力タービン圧力比、出力はタービン軸出力とした。タービンの場合、非線形の入出力関係となるため、標準 S/N 比を用いた動特性として評価する。Thomas Force はタービン動翼先端からの漏洩量の周方向不均一によって生じるトルクアンバランス力であるため、チップクリアランス変化や形状ばらつきをノイズとして設定し、ノイズに対する出力が変化しにくい（S/N 比が大きい）最適化を実施すれば Thomas Force を低減することができる考えた。

② 最適条件

最適条件は、現行翼と同等のタービン軸出力を有しながら標準 S/N 比を最大化することとして定義した。なお、前提条件は動翼チップシュラウド無し、制約条件はエンジンシステムとマッチングすること（=現行翼と同等の軸出力）とした。

③ 制御因子

表 3.1-1 に制御因子の一覧を示す。計算負荷が比較的小さい 1 次元損失モデルによる解析を用いることから、極力大きな直交表として L36 ($2^3 \times 3^{13}$) を使用し、QFD から求めた重要設計パラメータを含む 16 パラメータを選定した。

④ 誤差因子

Thomas Force に対して影響が大きいチップクリアランスはターボポンプの作動状態によって変化し、コントロールできないため、ノイズ（外乱）として与えた。また、製造誤差や作動中の形状ばらつき（内乱）も含めて合計 15 因子をノイズとして選定した。表 3.1-2 に誤差因子の一覧を示す。

⑤ 要因効果図及び最適条件

標準 S/N 比に対する感度の大きい因子は 8 パラメータあり、そのうち 2 パラメータは軸出力特性の指標である 1 次比例係数に対しても感度は大きい、トレードオフの関係は見られない。したがって、最適条件の定義に基づいた制御因子の組み合わせを比較的容易に選択することができた。

⑥ 再現性の確認

⑤ における制御因子の組み合わせに対して再現性確認を行った結果、要因効果図からの推定値と解析結果の利得の差は 0.05dB であり、利得の再現性を有していると判断できる。本制御因子の組み合わせによる最適翼は、S/N 比は約 4dB の利得（ばらつき 30%低減）を有し、出力特性も現行翼を上回る結果が得られた。

⑦ CFD 確認結果

⑥ は 1 次元損失モデルを用いたロバスト設計での評価であるが、CFD を用いて Thomas Force の低減効果を確認した。その結果、最適翼の Thomas Force は現行翼に対して 30%低減し、1 次元損失モデルによる解析と同等な改善効果が見られた。

表 3.1-3 制御因子の一覧 (L36 ($2^3 \times 3^{13}$))

No.	因子名		単位	水準			【参考】QFD重要設計 パラメータ
				水準1	水準2	水準3	
1	A	ノズル 最大翼厚/コード比	-	0.180	0.200	-	
2	B	動翼 最大翼厚/コード比	-	0.160	0.180	-	
3	C	動翼 後縁くさび角	deg	4.000	5.903	-	
4	D	動翼反動度(1N出口静圧)	kg/cm2	175.0	179.2	185.0	○
5	E	ノズル ソリディティ	-	1.600	1.967	2.100	○
6	F	ノズル スタガ角	deg	35.0	45.0	55.0	
7	G	ノズル 出口角度	deg	16.0	20.0	24.0	○
8	H	ノズル コード長	mm	36	41.2	45	
9	I	動翼 ソリディティ	-	1.20	1.65	2.10	○
10	J	動翼 前縁半径	mm	0.600	0.711	0.800	
11	K	動翼 迎角	deg	0.00	1.00	2.00	○
12	L	動翼 出口角	deg	24.0	27.1	31.0	○
13	M	動翼 スタガ角	deg	-12.0	-18.0	-24.0	
14	N	動翼 コード長	mm	13.0	16.2	19.0	○
15	O	平均径	mm	95	100	105	○
16	P	チップクリアランス	mm	0.500	0.550	0.600	○

表 3.1-4 誤差因子の一覧 (L16 (2¹⁵))

No.	因子名	単位	誤差因子の水準	
			水準1	水準2
A	ノズル スロート面積	mm ²	0.00%	0.30%
B	動翼 スロート面積	mm ²	0.00%	0.30%
C	ノズル スタガ角	deg.	0%	+0.5
D	ノズル 最大翼厚/コード比	-	0.00	0.005
E	ノズル 出口角度	deg.	0.000	0.050
F	ノズル コード長	mm	0%	0.10
G	ノズル 後縁厚さ	mm	0.000	0.005
H	動翼 前縁半径	mm	0.00	0.050
I	動翼 スタガ角	deg.	0.00	0.50
J	動翼 最大翼厚/コード比	-	0.00	0.005
K	動翼 コード長	mm	0.00	0.10
L	動翼 出口角	deg.	0.000	0.050
M	動翼 後縁厚さ	mm	0.000	0.005
N	平均径	mm	-0.25	+0.25
O	チップクリアランス	-	0%	50%

3.1.3 まとめ

今回、ロケット用ターボポンプにおけるロバスト設計の適用事例として、QFD とロバスト設計手法を組み合わせたロケット用タービンの最適化について簡単に紹介した。「ターボポンプのダイナミック設計」に関する研究では、品質工学や QFD を活用した様々な試みを実施した。基本的な考え方やアイデアはターボポンプ以外の機械全般に適用可能と考えられ、様々な製品の設計開発に対して少しでも役立つ知見が提供できれば幸いである。

<参考文献>

- (1) 宇宙航空研究開発機構, 「ターボポンプ」、近未来の設計手法 ～ ロケットエンジンの“心臓部” ～, <https://fanfun.jaxa.jp/topics/detail/2760.html>.
- (2) 内海政春, 吉田義樹, ターボポンプのダイナミック設計 (軸振動の抑制をめざしたロータシステムの最適化), ターボ機械, Vol. 40, No. 6 (2012), pp. 324-330.
- (3) Uchiumi, M., Shimagaki, M., Kawasaki, S., Yoshida, Y. and Adachi, K., Integrated Design Method of a Rocket Engine Turbopump Sub-system for Suppressing Rotor Lateral Vibration, Proceedings of 28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2012-4.3.4, Brisbane, Australia (2012).
- (4) 内海政春, 島垣満, 川崎聡, ターボポンプのダイナミック設計 (その2), ターボ機械, Vol. 41, No. 10 (2013), pp. 578-585.
- (5) 川崎聡, 島垣満, 内海政春, 安達和彦, 要素の配置配列をパラメータとしたロケット用ターボ

- ポンプの形態設計, 日本機械学会論文集, Vol. 82, No. 842 (2016), p.16-00134.
- (6) 瀧田純也, 福岡勝, 内海政春, 國枝麿, 船崎健一, ロケットターボポンプ用タービン設計への QFD の適用, 第 41 回信頼性 保全性シンポジウム発表報文集 (2011), pp. 213-718.
 - (7) Takida, J., Akao, Y., Funazaki, K. and Uchiumi, M., An Application of QFD Method for Design of Rocket Turbopump Turbines, Proceedings of 17th International QFD Symposium (ISQFD 2011), Stuttgart , Germany (2011).
 - (8) 瀧田純也, 福岡勝, 國枝麿, 船崎健一, 内海政春, QFD を用いたロケットターボポンプ用タービンの重要設計パラメータの抽出, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-11-021 (2012).
 - (9) 瀧田純也, 内海政春, 島垣満, 船崎健一, ロバスト設計手法によるターボポンプ用タービンの Thomas Force 低減, ターボ機械, Vol. 40, No. 6 (2012), pp. 350-358.
 - (10) 瀧田純也, 内海政春, 島垣満, 船崎健一, ロバスト設計手法を用いたターボポンプ用タービンのトーマスフォース低減, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-11-011 (2012).
 - (11) 瀧田純也, 藤本良一, 船崎健一, 内海政春, QFD とロバスト設計手法を組合せたロケットターボポンプ用タービンの最適化, 第 42 回信頼性・保全性シンポジウム発表報文集 (2012), pp. 365-370.
 - (12) 瀧田純也, 福岡勝, 國枝麿, 船崎健一, 内海政春, ロケットターボポンプ用タービンのパラメータ設計 (第 1 報: QFD を用いた重要設計パラメータの抽出), ターボ機械, Vol. 40, No. 12 (2012), pp. 705-714.
 - (13) 瀧田純也, 船崎健一, 内海政春, 島垣満, ロケットターボポンプ用タービンのパラメータ設計 (第 2 報: タービン Thomas Force 低減のための最適化), ターボ機械, Vol. 41, No. 2 (2013), pp. 78-88.
 - (14) 瀧田純也, 福田太郎, 宇山遼一, 船崎健一, 内海政春, ロケットターボポンプ用タービンのパラメータ設計 (第 3 報: タービン諸特性 (回転部重量、翼応力、動翼共振回避、Thomas Force) を考慮したロケットターボポンプタービンの多目的最適化), ターボ機械, Vol. 41, No. 6 (2013), pp. 368-377.
 - (15) 丑澤拓夢, 他 6 名, 軸振動の低減を目指したロバスト設計援用によるターボポンプロータシステムの形態設計, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集, J101033 (2013).
 - (16) 岩崎仁, 四宮教行, 内海政春, ターボポンプロータの形態設計手法におけるロバスト設計の適用に関する検討, 日本機械学会, Dynamics and Design Conference 2014 論文集, 227 (2014).
 - (17) 四宮教行, 内海政春, 岩崎仁, ターボポンプロータの形態設計手法におけるひずみエネルギーを考慮したロバスト設計手法, 第 72 回ターボ機械協会(大分)講演会講演論文集 (2014).
 - (18) 四宮教行, 内海政春, 岩崎仁, ターボポンプロータの形態設計手法における配置・配列を考慮したロバスト設計の検討, 日本航空宇宙学会北部支部 2015 講演会講演論文集, JSASS-2015-H058 (2015).

- (19) 四宮教行, 内海政春, 岩崎仁, 設計ばらつきを考慮したターボポンプロータの設計手法, 第 73 回ターボ機械協会総会講演会講演論文集 (2015).
- (20) 久保世志, 内海政春, ターボポンプの高信頼度評価手法, ターボ機械, Vol. 45, No. 3 (2017), pp. 136-147.
- (21) 川崎聡, 他 5 名, ロケット用ターボポンプの多領域システム設計における品質機能展開(QFD)の援用, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-12-009 (2013).
- (22) 川崎聡, 他 5 名, ロケット用ターボポンプの多領域最適設計における品質機能展開(QFD)の援用, ターボ機械, Vol. 41, No. 10 (2013), pp. 602-607.
- (23) 弘松純, , 他 5 名, QFD 援用によるロケットターボポンプ多領域最適化設計, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-13-007 (2013).
- (24) 黒木康洋, 他 6 名, QFD 援用によるターボポンプ内部循環流れの多領域最適化設計, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-15-002 (2016).
- (25) 川崎聡, 他 7 名, 品質機能展開を利用したターボポンプの多領域設計支援, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-15-009 (2016).
- (26) 黒木康洋, 川崎聡, 矢田和之, 品質機能展開を援用したターボポンプの多領域最適設計プロセスの構築, ターボ機械, Vol. 45, No. 3 (2017), pp. 148-156.

以上

2011年作成資料を基に2020年に再編集

QFDとロバスト設計手法を組合せた ロケットターボポンプ用タービンの最適化

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構
研究開発部門 第四研究ユニット

DYNAMICS
DESIGN
TEAM

1. 研究の背景

- ロケットターボポンプ用タービンの現状
- QFD(品質機能展開)とは?
- 最適化の流れ

2. ロバスト設計手法によるタービン最適化

- 設計対象
- ロバスト設計の手順
- Thomas Force低減を目的としたロバスト設計実施例

3. まとめ

1. 研究の背景

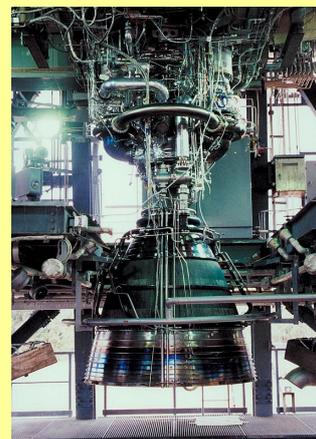
■ ロケットの構造とロケットエンジン

◆ ロケットは巨大な燃料タンク

全備重量の85~90%は推進剤(液体水素、液体酸素)が占める

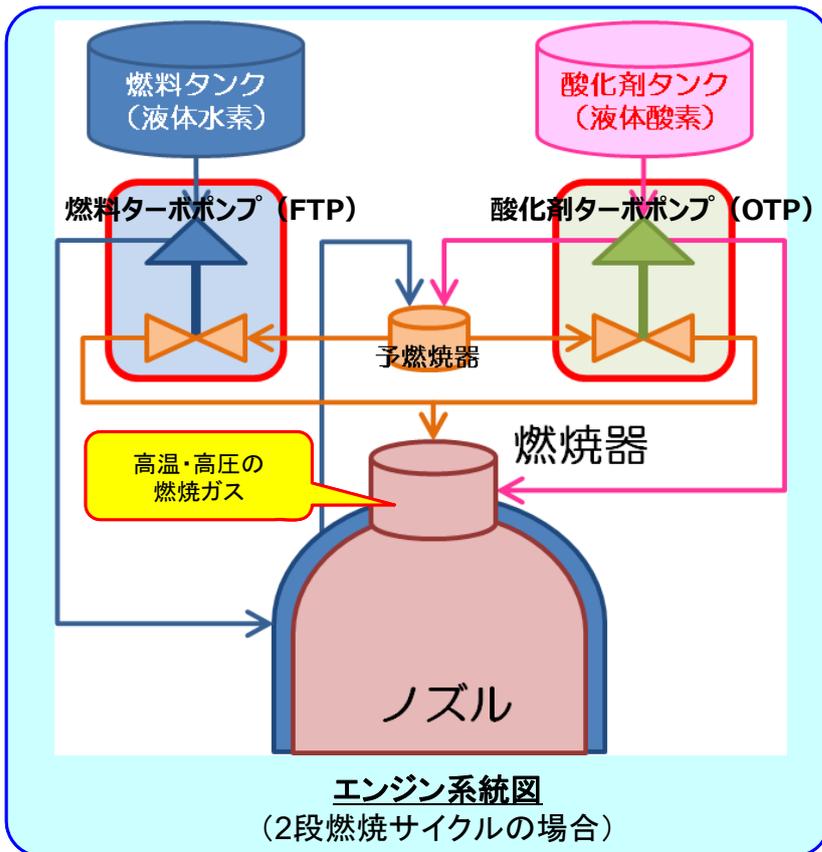
◆ ロケットエンジンは推力発生装置

高温高圧の燃焼ガスをノズルで加速し推力を得る



第1段エンジン LE-7A
(種子島宇宙センター)

■ ロケットエンジンとターボポンプ



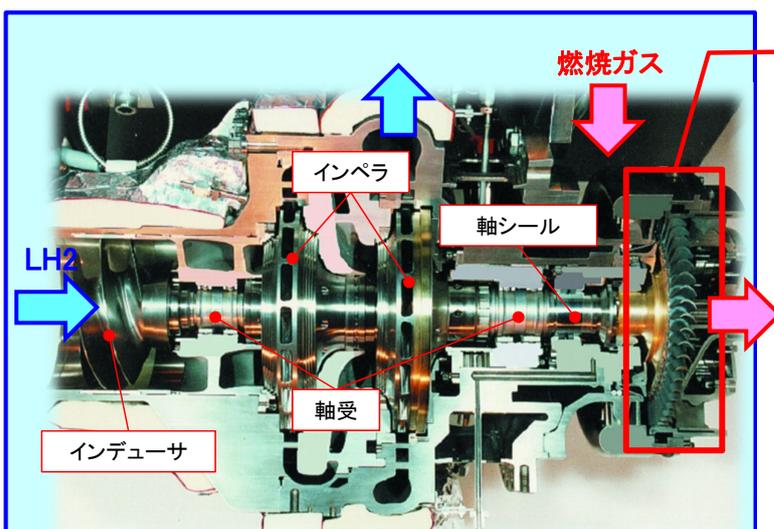
◆ ロケットエンジンの構成

- ✓ 燃焼器、予燃焼器、ノズル、ターボポンプ
- ✓ ターボポンプはロケットエンジン1台につき2台搭載(燃料、酸化剤)

◆ ターボポンプの役割

- ✓ 低圧のタンクから推進剤を吸込み 高圧に昇圧して燃焼器へ送る回転機器
- ✓ ロケットエンジンの心臓部

■ ロケットターボポンプ用タービンの現状



LE-7液体水素ターボポンプ(FTP)カットモデル

- 回転数: 42,000 rpm
- 軸出力: 22 MW
- 全長×全幅: 0.7m × 0.6m

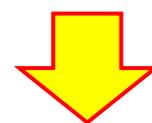
ターボポンプ用タービン

◆ 仕様の特異性

- 少ない段数(単段 or 2段)
- 低速度比(U/C0)、衝動タービン
- インデューサ、インペラと比べて少ない研究実績

◆ 新規開発の機会無し

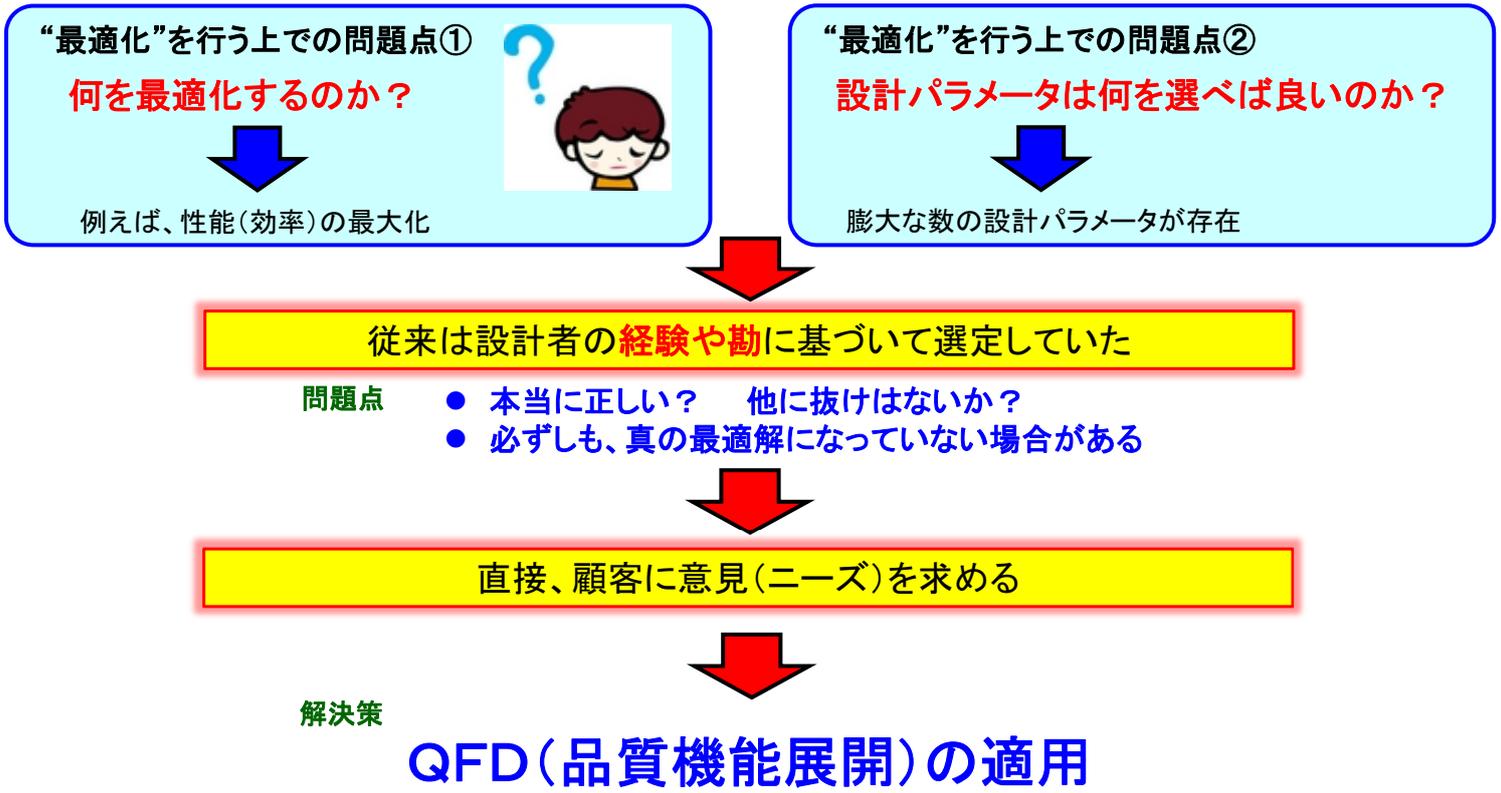
- 現行エンジンの開発完了から20年以上経過
- 当時の技術者からの技術伝承も困難



- ✓ 新規開発への対応
- ✓ 技術力の維持向上

最適設計の必要性

■ 最適化を行う上での問題点



■ QFD(品質機能展開)とは？

※ QFDの具体的な手順については文献[1]~[3]を参照

QFD(品質機能展開)
Quality Function Deployment

顧客に満足が得られる設計品質を設定し、その設計の意図を製品や製造工程まで展開する手法

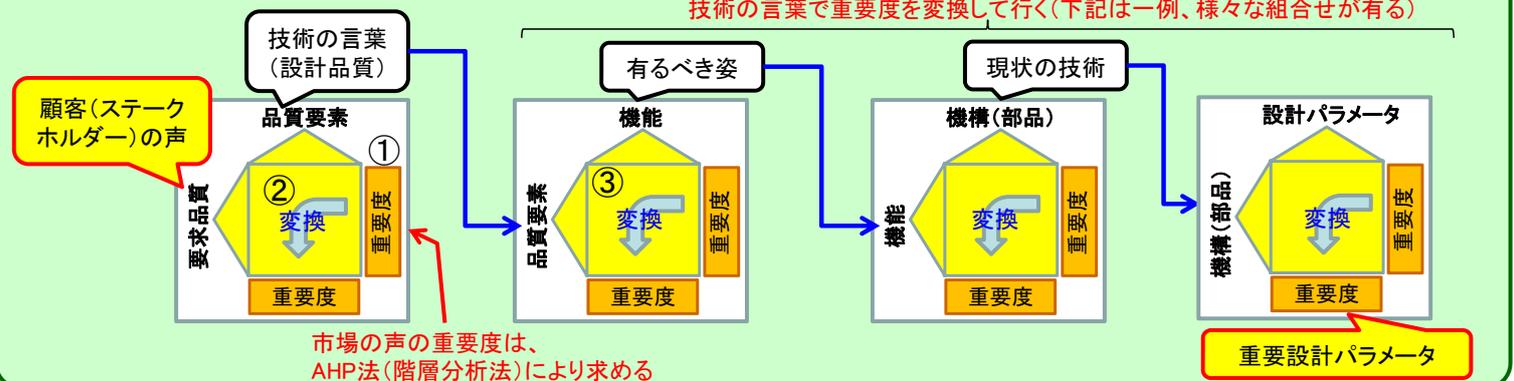
一言でいうと

顧客の要望(ニーズ)を製品開発につなげる為の手法
《市場の世界と技術の世界との橋渡し》

QFDの手順

- ① 顧客の声をアンケートにより収集し、重要度を算出
- ② 二元表による重要度の変換
- ③ 技術の言葉による重要度の変換を繰り返す

技術の言葉で重要度を変換して行く(下記は一例、様々な組合せが有る)



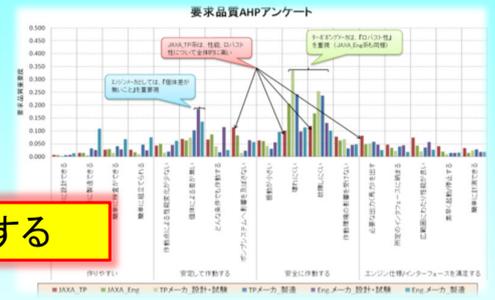
■ QFDの目的と成果

① 最適化の判断指標(市場の声)を得ること

- ・ 性能が良い(効率最大化)
- ・ 壊れにくい、故障しにくい



何を最適化するのか?
顧客に対するアンケート



タービンの不安定化力(Thomas Force※)を小さくする

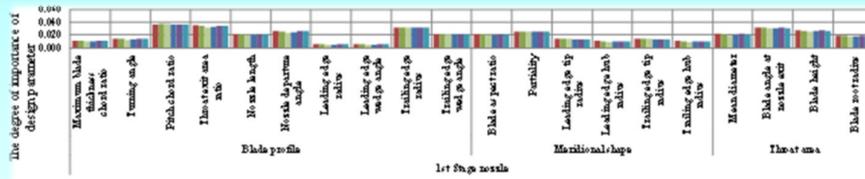
※ Thomas Forceの説明は後述

② タービンの“重要設計パラメータ”を選定すること



二元表による重要度変換

市場の声を反映した“重要設計パラメータ”を選定



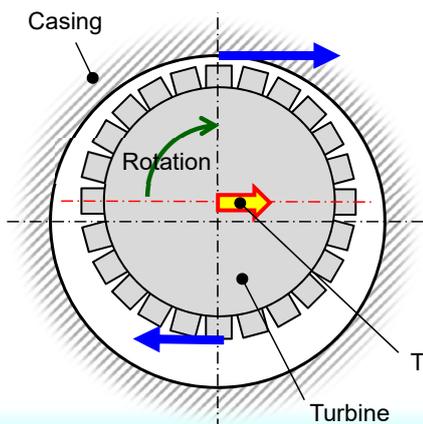
重要設計パラメータの一例

Component	Important Design Parameters
1 st Stage Nozzle	Pitch Chord Ratio
	Throat Area Ratio at Nozzle Exit
	Trailing Edge Radius
	Blade Aspect Ratio
	Nozzle Partiality
Rotor Blade	Mean Diameter
	Blade Angle at Nozzle Exit
	Blade Height
	Blade Thickness Chord Ratio
	Pitch Chord Ratio
	Trailing Edge Radius
	Blade Aspect Ratio
Turbine Disk	Tip Clearance
	Axial Gap between Rotor and Stator
	Mean Diameter
	Blade Angle at Rotor Exit

■ Thomas Forceとは？

- ロケットターボポンプ用のタービンでは、タービンの不安定化励振力(=Thomas Force)による軸振動の増大が問題となる場合があり、例えば、LE-7A 液体水素ターボポンプ開発初期には、Thomas Forceに起因する軸振動問題(文献[4])が発生した。
- この事例ではターボポンプシステム全体で減衰を増やすことによって振動を抑制することが出来ている。しかしながら、新たなターボポンプを開発では、従来の対策だけでは振動を十分に抑制できない可能性も考えられることから、Thomas Force自体を低減するようなタービン形状を見出すことが重要である。

タービン不安定化励振力(=Thomas Force)



Thomas Forceとは、タービン動翼先端からの漏洩量の周方向不均一によって生じるトルクアンバランス力であり、軸系のふれまわり振動に対して励振力として作用する。



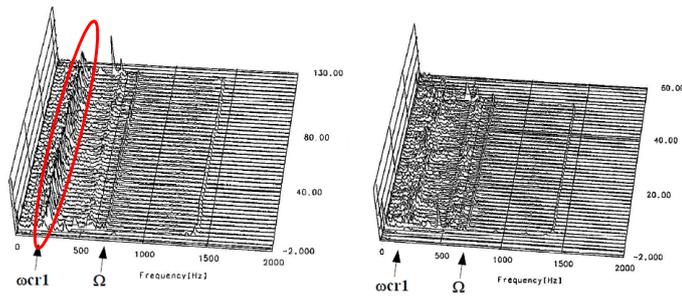
ターボポンプ軸振動の増大

■ ロケットターボポンプ開発時の事例

- LE-7A 液体水素ターボポンプ開発初期において、Thomas Forceに起因する亜同期(250 Hz帯域)の軸振動が過大であった
- シールリングに流入する流体に対し軸回転方向と逆方向に予旋回流を与えることによって、軸系全体の減衰比が上がり、亜同期軸振動を抑制することに成功した

LE-7A 液体水素ターボポンプでの事例

■ 事象

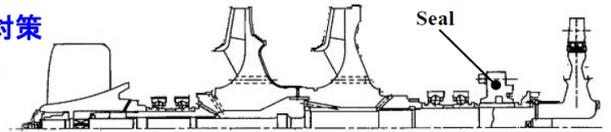


(a)対策前

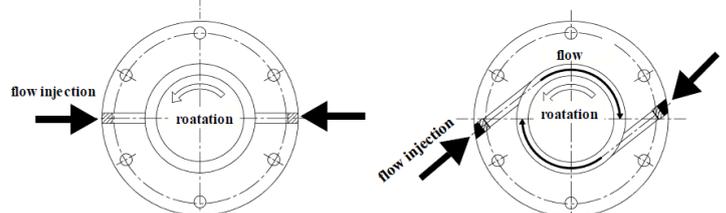
(b)対策後

FTP Rotor Vibraton(DRF) at Engine Firing Tests
(出典 Motoi, et al, ISCORMA-2、文献[4])

■ 対策



(a) Turbine Seal (Cross-Section of FTP)



(a) Conventional Type

(b) Improvement Type

Injecting Direction of Fluids to the Seal
(出典 Motoi, et al, ISCORMA-2、文献[4])

■ 研究目的

ロバスト設計手法の援用によりThomas Forceを低減するタービン形態・形状を見出す

■ 最適化の流れ

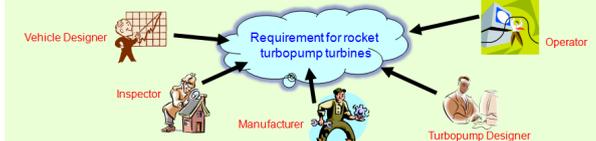
QFD(品質機能展開)とロバスト設計との組合せ

- 理由
- ✓ QFDは重要な品質についての指標を与えることは出来るが、その品質を実現するための検討は別に行う必要がある
 - ✓ 何を最適化するか、どの設計パラメータを選択するか、については設計者の技量や経験に依存
 - ✓ 両者を組み合わせることで、お互いの弱点を補強できる

QFDによる、「重要設計パラメータ」の抽出

- QFDを、設計パラメータ選定の為の手段、と位置付け
- 延べ50名のロケットエンジン関係者から意見を収集
- タービンに対する「重要設計パラメータ」を特定した

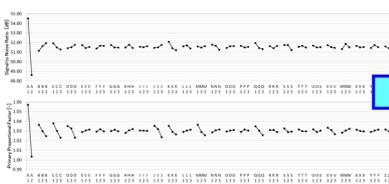
Stakeholders for rocket turbopump turbine



重要設計パラメータ(制御因子)

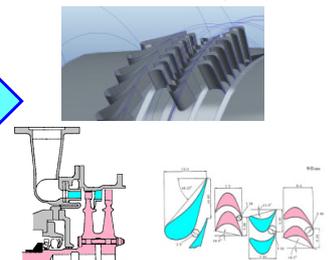
タービン最適化

ロバスト設計(=パラメータ設計)



最適なタービン形状

Thomas Force低減



2. ロバスト設計手法によるタービン最適化

■ ロバスト設計(=パラメータ設計)の利点

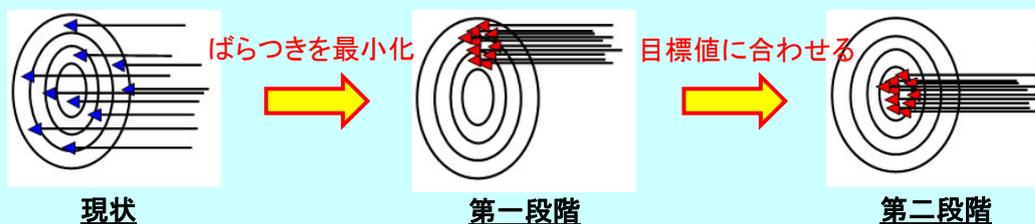
① 実験や解析の回数を削減(=時間短縮)

- 実験計画法(L36直交表)により設計パラメータ(=制御因子)を組合せ
- 今回の取組みでは、設計パラメータを16個用いている

総当たり⇒ 膨大な組合せ(1.3×10^7)
実験計画法(L36) ⇒ 36通り

② 設計段階でロバスト性を高めることができる

- 設計段階で、様々なノイズ(=誤差因子)の影響を考慮し、品質を作りこむ
- ノイズを退治するのではなく、ノイズの存在を認識した上で、その影響が小さくなるように設計する
- ノイズに対するばらつきを最小化(第一段階)した後に、目標値に合わせる2段階設計



■ ロバスト設計(=パラメータ設計)の利点

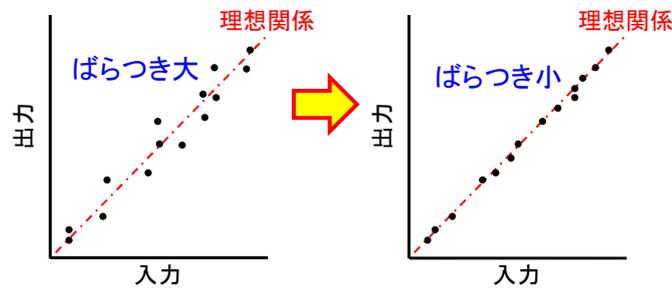
③ 動特性(=入出力関係)としてのロバスト性を向上出来る

- 動特性のパラメータ設計により、非設計点も含めた最適化が可能
- 動特性のパラメータ設計では、入出力が線形関係となる“線形システム”を対象とした事例が多いが、タービンの場合、その入出力は非線形となる
- “非線形システム”の場合でも、“標準S/N比※”を用いることで線形システムと同様の取扱いが可能

※ 標準S/N比の詳細は文献[5]参照

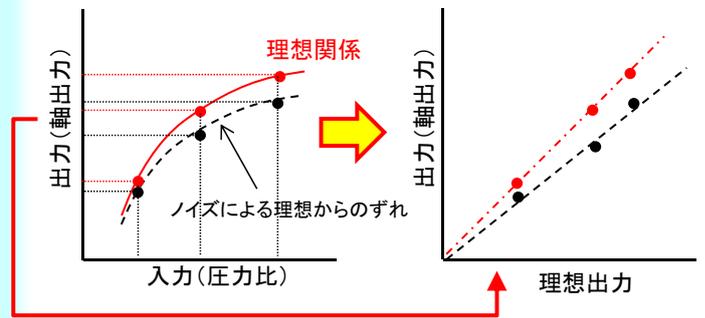
線形システム

- ✓ 動特性のロバスト性を高めることは、理想の入出力関係に近づくこと
- ✓ 設計点だけでなく、非設計点も含めてのロバスト性が向上する



非線形システム

- ✓ 非線形システムの場合でも、理想(目標)出力を横軸にとることで、線形システムと同様の取り扱いが可能となる

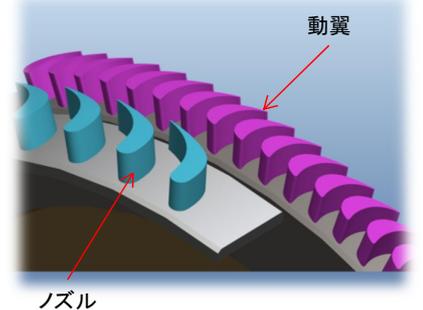


■ 設計対象

LE-7 原型エンジン 液体水素ターボポンプ用タービン

以降、“現行条件”と称す

Turbine Type	Impulse Turbine
Stage Number	Single Stage
Mean Diameter	200 mm
Rotational Speed	46,300 rpm
Pressure Ratio	1.46
Shaft Power	23.6 MW



■ 解析手法

設計パラメータの組合せ毎のタービン性能評価には、1次元損失モデル(AMDC+KOモデル)を使用

既存1D損失モデル

■ AMDC+KO 損失モデル※

- 翼列試験を基にした実験式により定式化されている
- 個々の損失要素毎にモデルが構成されている
- 航空エンジンやガスタービンの性能予測に広く用いられている

※ Ainley & Mathieson[1951]
Dunham & Came[1970]
Kacker & Okapuu[1982]
詳細は文献[6][7]

損失係数の構成

$$K_T = K_P (1 + 60(M-1)^2) f_{Re} + K_S + K_{TE} + K_C$$

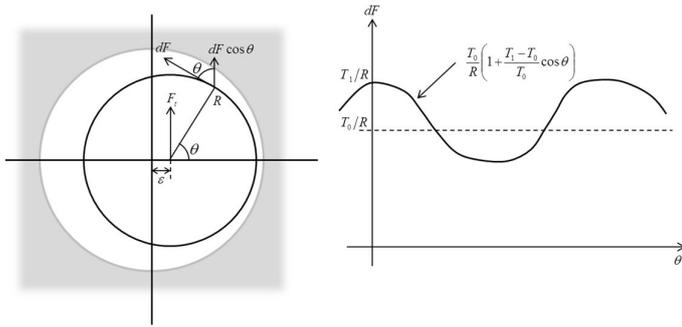
レイノルズ数補正
 プロファイル損失 (翼面の摩擦損失) 超音速流れによる損失増分 (M>1の時のみ)
 2次流れ損失 (流路内の渦) 後縁損失 チップ洩れ損失

■ Thomas Forceの評価方法

Thomas によるモデル式(文献[8])により評価する

Thomas Tip Clearance Whirl Model

- ロケットターボポンプ用タービンでは、回転数が高いこと、動翼の翼枚数が十分多いことから、準定常的な取り扱いが可能
- 全周均一のクリアランスとした定常解析から求めたトルク(T_0 、 T_1)を用いてThomas Forceを評価する



■ Thomas Force

$$F_t = \sum \frac{T_0}{R} \left(1 + \frac{T_1 - T_0}{T_0} \cos \theta \right) \cos \theta$$

$$= \int_0^{2\pi} \frac{1}{2\pi} \frac{T_0}{R} \left(1 + \frac{T_1 - T_0}{T_0} \cos \theta \right) \cos \theta d\theta$$

$$= \alpha \frac{T_{total}}{2R} \quad \left(\alpha = \frac{T_1 - T_0}{T_0} \right) \dots (1)$$

全周均一のクリアランスとした定常解析からトルクを求める

■ Cross Coupled Stiffness by Thomas Force

$$K_{xy} = \frac{F_t}{\varepsilon} = \beta \frac{T_{total}}{DL} \dots (2)$$

NOMENCLATURE

- R: turbine mean radius
- D: turbine mean diameter
- F_t: unstabilizing force
- K_{xy}: cross coupled stiffness by Thomas Force
- L: length of turbine blade
- T₁: torque on maximum tip clearance side
- T₀: torque on average tip clearance side
- T_{total}: total torque of all turbine blade
- β: experimental parameter in the Thomas tip clearance whirl model
- ε: eccentricity

■ 設計フロー

STEP1

Selection of Important Design Parameter by QFD

QFDにより設計パラメータ(制御因子)を選定

STEP2

Input of Design Parameters and Noise factors

Evaluation of Signal to Noise Ratio from L36 Orthogonal Array

Reproducibility of Signal to Noise Ratio

Optimized Blade

Robust Design Process

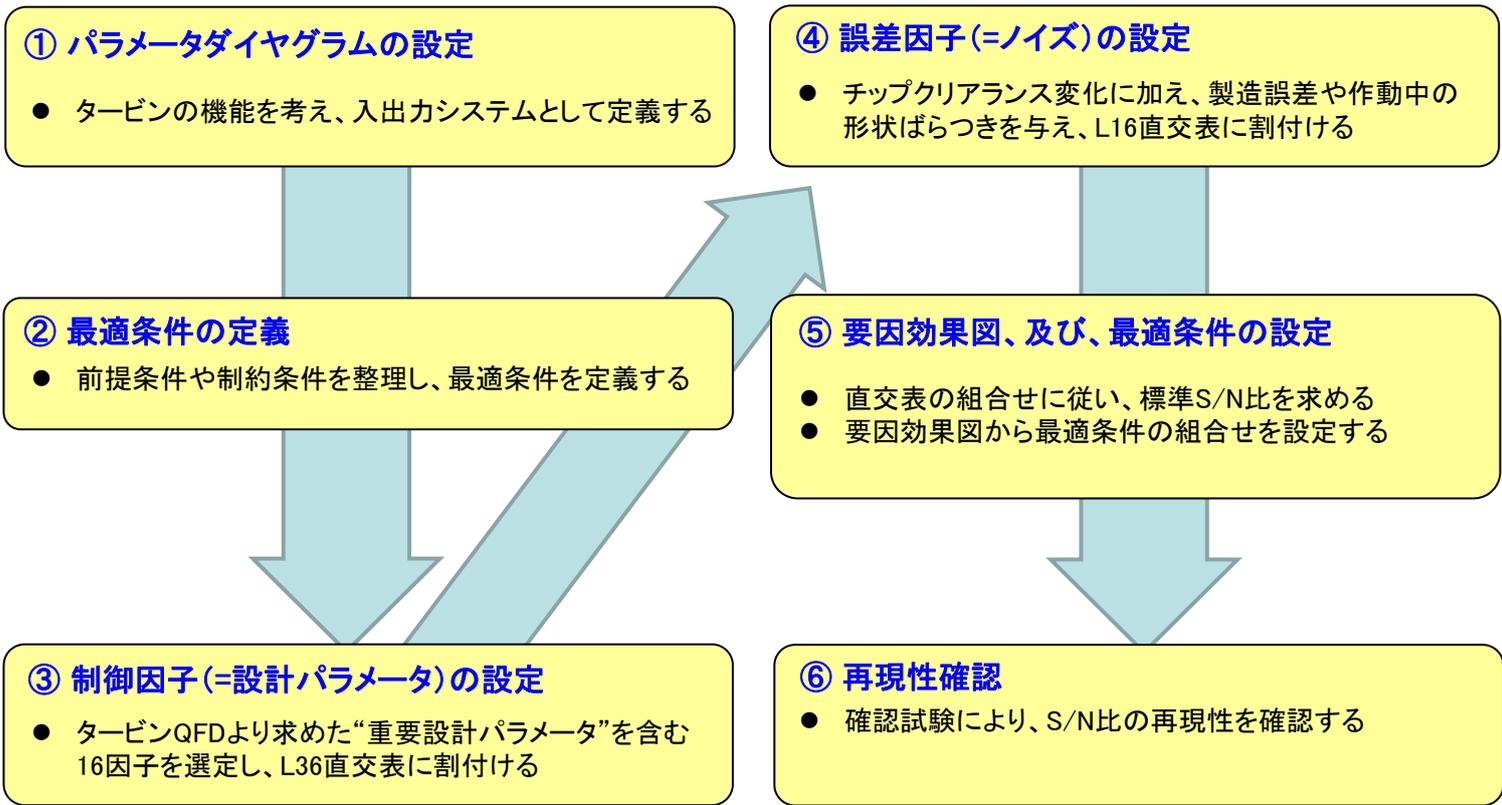
1次元損失モデルを用いてロバスト設計(パラメータ設計)を実施

STEP3

Evaluation of Thomas Force by CFD

Thomas Force低減効果をCFDにより最終評価

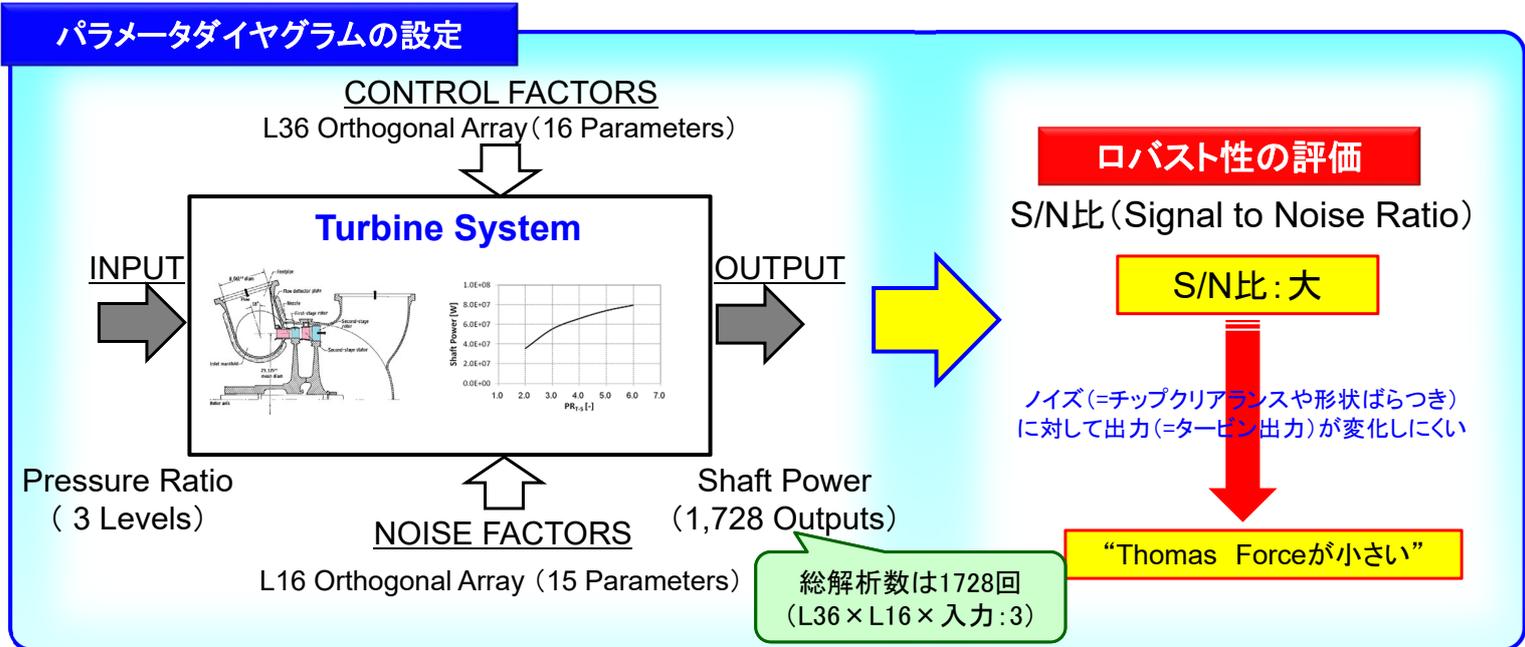
■ ロバスト設計の手順



■ パラメータダイアグラム

- タービンの基本機能を定義し、**入出力システム**として整理する
- タービンの場合は非線形の入出力となる為、**標準S/N比を用いた動特性のパラメータ設計**を行う
- S/N比が高いほど、ノイズ(=チップクリアランス変化や形状ばらつき)に対して出力(=タービン出力)が変化しにくい
⇒**S/N比が大きいことは、Thomas Forceが小さいことを意味する**

入出力システムの整理が最重要
ここを間違ると、ロバスト設計は上手く行かない



■ 最適条件の定義

最適条件

“動翼チップシュラウド無し”を前提条件とし、現行翼と同等の軸出力を有しながら(制約条件)標準S/N比を最大化すること

■ 前提条件 ⇒ 動翼チップシュラウド無し

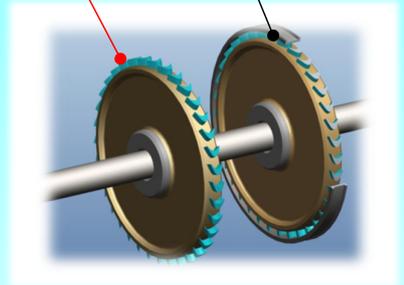
QFD(品質機能展開)による「市場の声」 ⇒ 信頼性重視

理由

- ターボポンプでは、構造簡素化の観点からブリスク翼が採用されることが多く、ディスクと翼が一体化している。ブリスク翼に対しシュラウドを設置することは製造上困難である
- 蒸気タービンやガスタービンに比べて高速回転であり、翼強度上の面からもシュラウド設置は困難である

シュラウド無し

シュラウド付き



■ 制約条件 ⇒ エンジンシステムとのマッチング

最適化によってロケットエンジン性能に影響を及ぼさないようにする為、タービン流量、タービン軸出力に制約を課す

Constraint functions	Turbine Flow Rate: Fixed (41.2 kg/s) Shaft Power: More than 23.6 MW
----------------------	--

■ 制御因子(設計パラメータ)の設定

特に1次元解析の場合には解析時間の制約も受けけない為、極力大きな直交表を用いるべき

- 初期により多くの設計パラメータの影響を調査する為、L36 ($2^3 \times 3^{13}$)直交表を用いる
- QFDによる重要設計パラメータを含む合計16パラメータを選定

表: L36 ($2^3 \times 3^{13}$)による制御因子組合せ

No.	因子名		単位	水準			備考	【参考】QFD重要設計パラメータ
				水準1	水準2	水準3		
1	A	ノズル 最大翼厚/コード比	-	0.180	0.200	-		
2	B	動翼 最大翼厚/コード比	-	0.160	0.180	-		
3	C	動翼 後縁くさび角	deg.	4.000	5.903	-		
4	D	動翼反動度(1N出口静圧)	kg/cm2	175.0	179.2	185.0		○
5	E	ノズル ソリディティ	-	1.600	1.967	2.100		○
6	F	ノズル スタガ角	deg.	35.0	45.0	55.0		
7	G	ノズル 出口角度	deg.	16.0	20.0	24.0		○
8	H	ノズル コード長	mm	36	41.2	45		
9	I	動翼 ソリディティ	-	1.20	1.65	2.10		○
10	J	動翼 前縁半径	mm	0.600	0.711	0.800		
11	K	動翼 迎角	deg.	0.00	1.00	2.00		○
12	L	動翼 出口角	deg.	24.0	27.1	31.0		○
13	M	動翼 スタガ角	deg.	-12.0	-18.0	-24.0		
14	N	動翼 コード長	mm	13.0	16.2	19.0		○
15	O	平均径	mm	95	100	105	周速一定	○
16	P	チップクリアランス	mm	0.500	0.550	0.600		○

■ 誤差因子(ノイズ)の設定

- チップクリアランスはターボポンプの作動状態によって変化しコントロール出来ない為、大小2水準のノイズ(外乱)として与える
- 製造誤差や作動中の形状ばらつき(内乱)も含めた15因子を選定し、L16 (2¹⁵)直交表に割り付ける

表:L16(2¹⁵)誤差因子と水準値

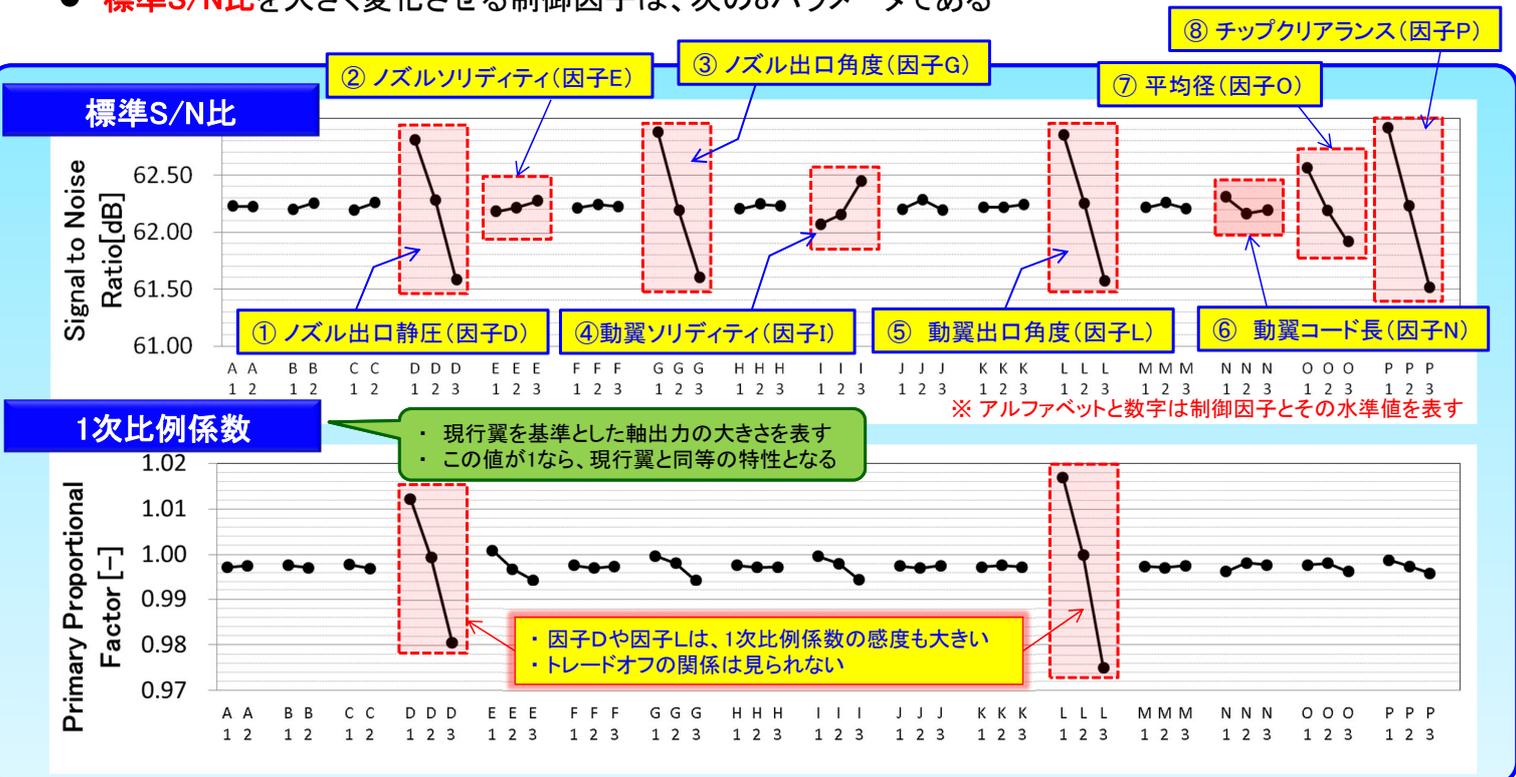
No.	因子名	単位	誤差因子の水準	
			水準1	水準2
A	ノズル スロート面積	mm ²	0.00%	0.30%
B	動翼 スロート面積	mm ²	0.00%	0.30%
C	ノズル スタガ角	deg.	0%	+0.5
D	ノズル 最大翼厚/コード比	-	0.00	0.005
E	ノズル 出口角度	deg.	0.000	0.050
F	ノズル コード長	mm	0%	0.10
G	ノズル 後縁厚さ	mm	0.000	0.005
H	動翼 前縁半径	mm	0.00	0.050
I	動翼 スタガ角	deg.	0.00	0.50
J	動翼 最大翼厚/コード比	-	0.00	0.005
K	動翼 コード長	mm	0.00	0.10
L	動翼 出口角	deg.	0.000	0.050
M	動翼 後縁厚さ	mm	0.000	0.005
N	平均径	mm	-0.25	+0.25
O	チップクリアランス	-	0%	50%

■ 誤差因子の設定根拠

- 「チップ漏洩量」と関連の高い翼形状に関連する制御因子について、製造や作動中の形状のばらつきを与える。⇒内乱として水準値は一般的な製造公差を想定
- ロータ振動レベルの変動を想定し、チップクリアランスを変動させる ⇒外乱として (クリアランスの水準に対し、50%の変動を与える)

■ 要因効果図

- 標準S/N比を大きく変化させる制御因子は、次の8パラメータである



■ 最適条件の選定と再現性確認

- 「最適条件の定義」に基づき、**S/N比が最大**となるよう制御因子を組合せる
- この組合せに対して再現性確認を行った結果、**利得の再現性を有している**ことを確認
- 最適翼のS/N比は現行翼に対し約**4dBの利得(=ばらつき30%低減)**を有し、**出力特性も現行翼を上回る**

最適条件の組合せ

【最適条件】 S/N比が最大となる組合わせ

Control Factor	D	E	G	I	L	N	O	P
Optimum Level	1	3	1	3	1	1	1	1
Original(Initial) Level	2	2	2	2	2	2	2	3

■ 最適翼の組合せ(現行翼を基準として)

- ① ノズル出口静圧(因子D)を**小さく**
- ② ノズルソリディティ(因子E)を**大きく**
- ③ ノズル出口角度(因子G)を**小さく**
- ④ 動翼ソリディティ(因子I)を**大きく**
- ⑤ 動翼出口角度(因子L)を**小さく**
- ⑥ 動翼コード長(因子N)を**小さく**
- ⑦ 平均径(因子O)を**小さく**
- ⑧ チップクリアランス(因子P)を**小さく**

利得の再現性確認

最適翼の1次比例係数は1.03であり、現行翼を上回る

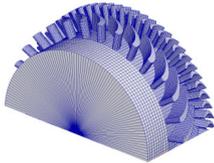
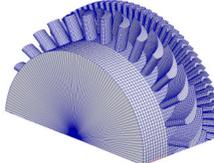
	Signal to Noise Ratio [dB]		Primary Proportional Factor
	Estimation (Predicted)	Analysis (Actual)	
Optimum	65.48	65.42	1.03
Original	61.58	61.57	1.00
Gain	3.90	3.85	
	3.90 - 3.85 =	0.05	

- 要因効果図から利得を推定すると、3.90 [dB]
実際にパラメータを組合せた解析結果は、3.85 [dB]
その差は0.05 [dB](得られた利得に対して1%程度)であり、利得の再現性を有している
- 約4 [dB]の利得は、ばらつきが約30%低減(=1/(10^(4/20))=0.63)することに相当

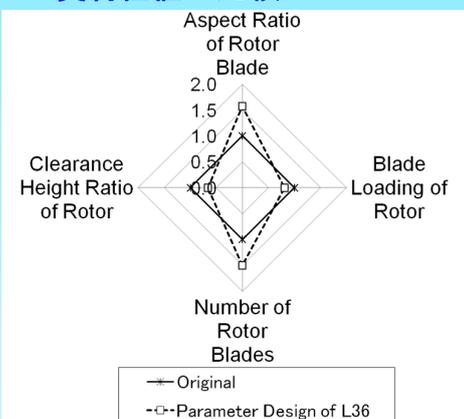
■ 最適翼の特性値比較

- 最適翼は現行翼に比べて、平均径が小さく翼枚数が増える方向に、子午面形状は翼高さが増える方向に変化
- 最適翼の翼特性値は、動翼アスペクト比が大きく、翼負荷およびクリアランス翼高さ比が小さくなる方向に変化
⇒これらは**チップからの洩れの影響を受けにくくなる形状変化**であり、技術的感覚とも一致する。

タービン形状特性値の比較

No.	Item	Unit	Characteristics			
			Original		Optimized	
1	Overview	-				
2	Meridional Shape	-				
3	Mean Diameter	mm	200		190	
4	Tip Clearance	mm	0.600		0.500	
Position			Nozzle	Rotor	Nozzle	Rotor
5	Number of Blades	-	30	64	30	90
6	Blade Height	mm	20.3	22.6	26.1	28.5

■ 翼特性値の比較



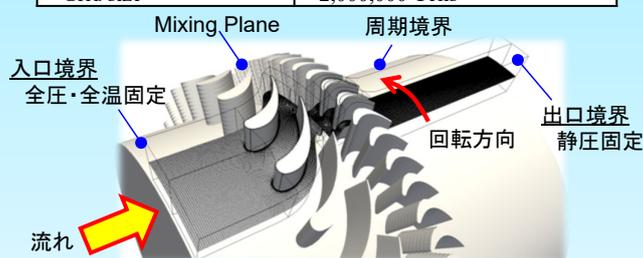
- ◆ 最適翼の翼特性値を現行翼を基準としたレーダーチャートで比較する
- ◆ 今回得られた最適翼は、翼アスペクト比が60%増、動翼負荷が20%減、クリアランス翼高さ比では30%減となっている

■ Thomas Forceの低減効果

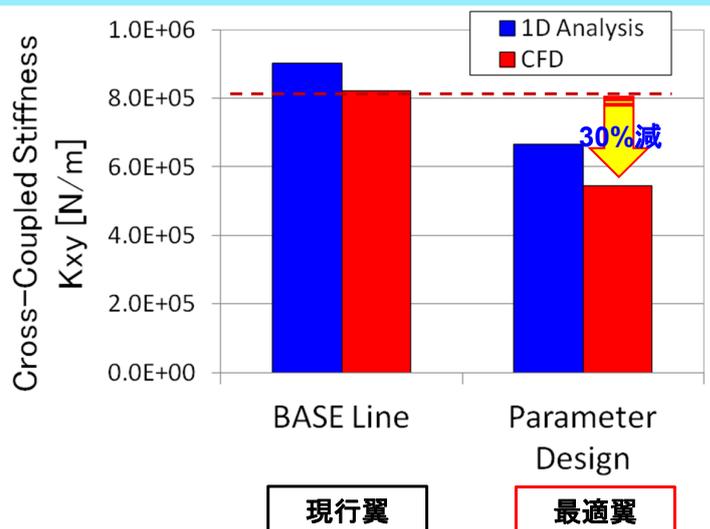
- Thomas Forceの低減効果を検証する為のCFD解析を実施し、1次元解析と同等な低減効果を確認
- 最適翼のThomas Forceは現行翼に比べて**30%低減**する

■ CFD解析仕様

CFD Solver	Pushbutton CFD®
Operating Fluid	Combustion Gas (Ideal Gas)
Boundary Condition	Inlet: Absolute Pressure Absolute Temperature Outlet: Static Pressure Wall: Non-slip, Adiabatic
Space Accuracy	2nd Order
Turbulence Model	Spalart-Allmaras 1eq. model
Y ⁺	200
Cells in Tip Clearance	12 Cells
Grid size	2,000,000 Cells



Thomas Forceの評価



3. まとめ

- QFD(品質機能展開)とロバスト設計手法とを組合わせた最適化によって、“市場のニーズ(今回はThomas Forceの低減)に合致した最適化を効率よく行うことが出来る
- 今回の最適化では翼応力や固有値等、翼体格としての評価は行っていない
今回得られた最適翼の形状変化はThomas Forceの低減には有効である一方、翼体格の成立性の観点からは制約となり得ることから、今後は翼体格の成立性評価も含めた最適化を実施する予定である
- ロバスト設計が成功する(=利得の再現性が得られる)ポイントは次の通り
 - ① **パラメータダイヤグラムを整理し、動特性として考える**
 - ・ 基本機能を考え、入出力の関係に整理する
 - ・ 動特性のパラメータ設計により非設計点も含めたロバスト性が向上する
 - ② **多くの制御因子を用いる**
 - ・ シミュレーションの場合には、実験と比べ時間・コストの制約を受けないことから、大きい直交表を用いるべき
 - ・ 但し制御因子間の交互作用には注意が必要(水準幅の設定は技術者の力量に依存)
 - ③ **誤差因子の選定**
 - ・ ロバスト設計は、ノイズを退治するのではなく、その影響を小さくするように設計する手法
 - ・ 誤差因子の調合や予備試験により、実使用環境で想定されるノイズを抜きの無いように選定する

- [1] 赤尾, 品質展開入門(品質機能展開活用マニュアル1), 1990, 日科技連出版社
- [2] 大藤・小野・赤尾, 品質展開法(1)―品質表の作成と演習(品質機能展開活用マニュアル2), 1990, 日科技連出版社
- [3] 大藤・小野・赤尾, 品質展開法(2)―技術・信頼性・コストを含めた総合的展開(品質機能展開活用マニュアル3), 1994, 日科技連出版社
- [4] Motoi, H.,他7名, “Sub-Synchronous Whirl in the LE-7A Rocket Engine Fuel Turbopump”, Second International Symposium on Stability Control of Rotating Machinery (ISCORMA-2), 4-8 August 2003.
- [5] 井上, 他4名, 入門パラメータ設計, pp.148, 日科技連(2008)
- [6] Ainley, D. G., Mathieson, G. C. R., “An Method of Performance Estimation for AXIAL-Flow Turbines”, R&M 2974 Aeronautical Research Council, 1957.
- [7] Kacker, S. C., Okapuu, U., 1981, “A Mean Line Prediction Method for Axial Flow Turbine Efficiency”, ASME paper no. 81-GT-58.
- [8] Thomas, H. J., “Instable Eigenschwingungen von Turbinenlaufern, Angefaucht durch die Spaltströmungen Stopfbuschsen un Beschau felungen”, AEG-Sonderdruck, (1958).

3.2 ベアリング設計

3.2.1 背景と目的

ホイール・タイプ S は、タイプ M、L に続いて開発された姿勢制御装置である。いずれのタイプもローテティングマスの支持に油潤滑玉軸受が採用されている。ホイールに使用される玉軸受には、高速回転において長寿命かつ低摩擦トルクであることが要求され、軸受設計において最も重要なのはリテーナインスタビリティ（保持器不安定現象）の防止である。リテーナインスタビリティを防止するためには、保持器のポケットすきま寸法と案内すきま寸法を適切に設計する必要があり、従来は数多くの試験を行い、試行錯誤しながら保持器のすきま寸法を決定していた。本研究では、軸受動特性シミュレーションと品質工学を利用してホイール・タイプ S 用軸受の保持器すきま寸法の候補を選択し、試験数の削減やロバストな軸受特性の実現に貢献することを目的としている。

3.2.2 実施内容

(1) 軸受動特性シミュレーションとは

本研究で用いた軸受動特性シミュレーションは、玉軸受における保持器の幾何形状や接触部の混合潤滑状態を考慮したマルチボディダイナミクス解析である。本シミュレーションモデルにより、リテーナインスタビリティの発生条件を予測できることを過去のホイール開発時に検証している。

(2) 品質工学の適用

品質工学を保持器設計に適用するため、予備シミュレーションを行い、8つの設計パラメータと、ノイズ、出力を決定した。設計パラメータには予圧、すきま寸法のように制御可能なものだけではなく、実際には制御が困難でも出力特性に与える影響を調べるため、油膜厚さや表面粗さも設計パラメータとして設定した。出力は、保持器安定性を評価する上で適していると考えられる保持器並進速度を選択した。

(3) シミュレーション結果

望み特性の SN 比と感度を計算し、各設計パラメータの影響を調べた。SN 比を高くするためには、案内すきまを大きく、ポケットすきまを小さく設定することが良いことが分かった。また、再現性の確認のため、SN 比の最適条件と最悪条件におけるシミュレーションを行い、推定結果が妥当

であることを確認した。

(4) 軸受回転試験による検証

品質工学によって得られた保持器設計結果が妥当であることを確認するため、すきま寸法が異なる2種類の保持器を試作し、回転試験を行った。その結果、SN比が高いと推定される保持器を組み込んだ軸受は、試験雰囲気依存しない安定な摩擦トルク特性を示すロバストな軸受特性であった。一方、SN比が低いと推定される保持器を組み込んだ軸受ではリテーナインスタビリティが発生した。これらの結果から、本研究で構築した保持器設計手法は、軸受設計に有効であることが実証された。

3.2.3 まとめ

本シミュレーション結果や開発試験結果を元に、ホイール・タイプS用軸受の保持器寸法を決定することができた。また、品質工学を適用するにあたり、シミュレーションの限界と特性を把握しておくことが効率的に研究開発を進める上で重要であることが分かった。

3. 2 ベアリング設計

1

目次

1. 研究背景
 - ホイール・タイプS開発
 - ホイール用軸受の技術課題
 - 目的
2. 軸受動特性シミュレーション
 - モデル概要
 - 混合潤滑モデル
 - モデルの妥当性検証
 - シミュレーション条件
3. 品質工学の適用
 - P-ダイアグラム
 - 設計パラメータとノイズの水準
 - 直交表への割付
 - SN比&感度の計算
4. シミュレーション結果
 - 保持器並進速度
 - SN比の要因効果図
 - 感度の要因効果図
 - 再現性の確認
5. 軸受回転試験による検証
 - 供試体
 - 試験装置
 - 試験結果
6. まとめ・教訓

2

1. 研究背景

ホイール・タイプS開発

- 人工衛星・探査機の姿勢制御装置ホイール・タイプSを開発(2008~2012年, タイプM/Lをこれより以前に開発済)
- ローテイングマス/シャフトを2ペア(4個)の油潤滑玉軸受で支持

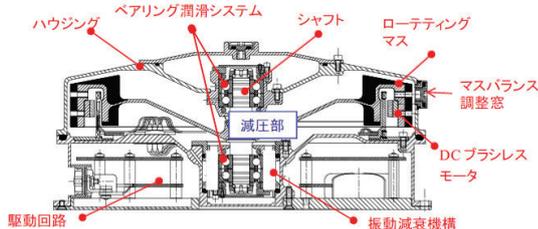


図2 タイプS断面図と主要構成



油潤滑玉軸受

- ・ 組合せアンギュラ玉軸受
- ・ 7000C(内径10mm)
- ・ 油潤滑
- ・ 綿ベースフェノール保持器

ホイール開発と並行して軸受の研究開発を実施

表1 タイプS開発仕様

項目	仕様値
最大蓄積角運動量	5Nms, 10Nms
最大出力トルク @5000rpm	> 0.05Nm
最大回転数	±5000rpm
消費電力	ピーク@5000rpm, 0.05Nm
	定常@5000rpm, 0Nm
バランス	静バランス: < 0.25×10 ⁻⁵ kgm 動バランス: < 2×10 ⁻⁷ kgm ²
擾乱	力:
	トルク:
電源電圧範囲	22 to 52 Vdc
信号インタフェース	アナログ
質量	5Nms:<3.9kg, 10Nms:<5.3kg
寸法	<Φ230mm×H100mm
機械環境	正弦波: 245.2m/s ² (25G)
	ランダム波: 196.0m/s ² r. m. s. (面内), 206.3m/s ² r. m. s. (面外)
寿命	地上保管時
	軌道上

(参考文献)井澤克彦, 岩田隆敬, 田島崇男, 田邊和久, 梶田直希, 谷口典史: 国産新型リアクションホイール・タイプS: 高信頼性低擾乱ホイールファミリー小型タイプの開発, 第56回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2012-4588(2012-11).

1. 研究背景

ホイール用軸受の技術課題(1/2)

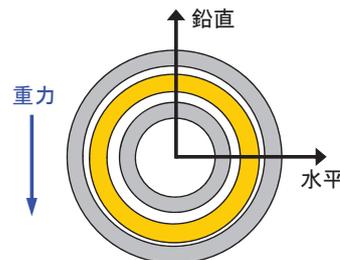
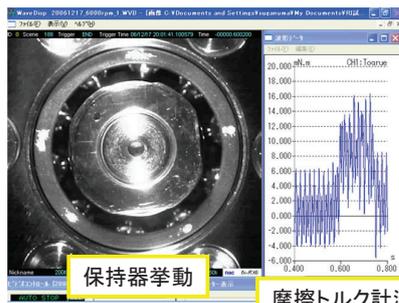
- ホイール用軸受には, 真空, 微小重力下において, 下記の機能・性能が要求される.
 - 数千rpmの高速回転
 - 長寿命
 - 低く安定した摩擦トルク・低振動
- 上記性能を実現するため, ホイール用軸受は極微量の油で潤滑され, 保持器に油を含浸させて, オイルリザーバの役割を持たせる. さらに, **保持器不安定現象(リターナインスタビリティ; RI)の防止が必須**である.



RIの特徴

- ・ 保持器が激しく運動(並進速度の増加)
- ・ 異音が発生
- ・ 摩擦トルク, 温度が急上昇
- ・ 振動が増加

高速度カメラによるRI観察→

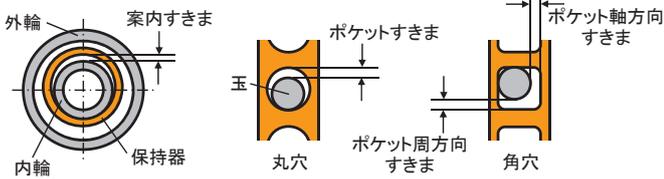
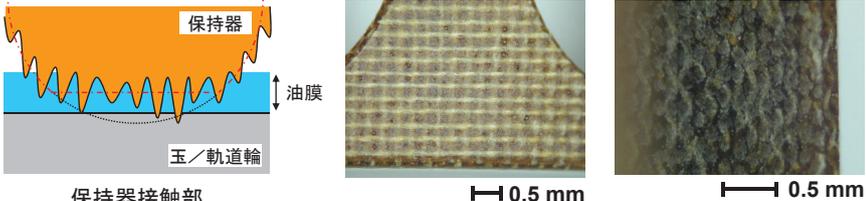
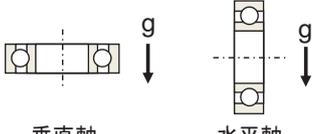


➔ RIは軸受の寿命低下, ホイールの性能劣化を引き起こすため, 発生条件を予測し, 防止することが重要

1. 研究背景

ホイール用軸受の技術課題(2/2)

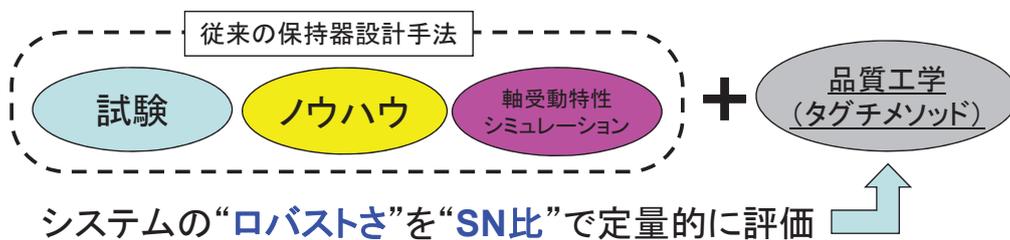
保持器挙動に影響を与えるパラメータは、以下の通り、過去の試験等から明らかになっている。

<p>ポケット形状</p> <p>角穴ポケットの方がRIは起こりにくい</p>	<p>丸穴  角穴 </p>
<p>案内すきま ポケットすきま</p> <p>適切な保持器すきま寸法の選定が必要</p>	 <p>外輪 案内すきま 保持器 内輪 玉 丸穴 ポケットすきま 角穴 ポケット軸方向すきま ポケット周方向すきま</p>
<p>油膜厚さ 表面粗さ</p> <p>保持器表面の油膜厚さ・表面粗さはRIの起こりやすさに影響を与える重要な因子</p>	 <p>保持器 油膜 玉/軌道輪 保持器接触部</p> <p>0.5 mm 0.5 mm</p>
<p>重力(軸姿勢)</p> <p>1G, 水平軸でRIは起こりやすい</p>	<p>軌道上(0G) or 地上(1G)</p>  <p>垂直軸 水平軸</p>

1. 研究背景

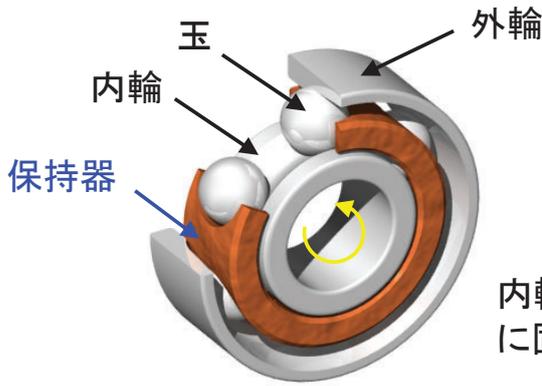
目的

- ホイール・タイプSの開発を効率的に進めるために、過去の開発で得られた知見を最大限に活用し、軸受の設計・評価試験を行う。
- 保持器設計に関わる評価試験数を減らすため、過去の開発時に作成・検証された軸受動特性シミュレーションを利用する。
- 品質工学を適用することにより、シミュレーションの効率化を図り、ロバストな軸受(=リターナインスタビリティが発生しない軸受)の実現に貢献する。



軸受動特性シミュレーションと品質工学を組み合わせた保持器の最適設計手法を確立し、ホイール・タイプS用軸受の保持器設計に活用する。

2. 軸受動特性シミュレーション モデル概要



★重要なポイント

保持器挙動に影響を与えるパラメータ(ポケット形状, 案内すきま, ポケットすきま, 油膜厚さ, 表面粗さ, 重力)が考慮されている。

内輪をシャフトに, 外輪をハウジングに固定した状態を想定

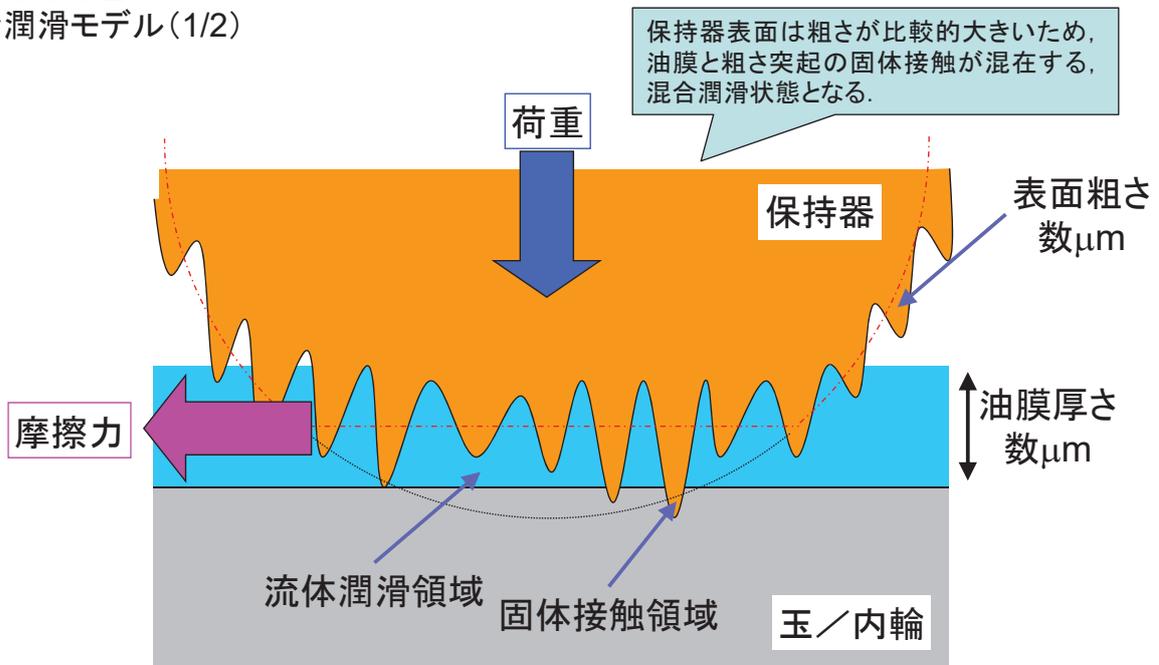
- 内輪, 外輪, 玉, 保持器を剛体と仮定
- 内輪回転, 外輪固定, 玉と保持器の6自由度運動方程式を数値積分
- 重力を考慮
- 玉と内輪, 玉と外輪の接触力はヘルツ接触理論により計算
- 玉と内外輪の間は潤滑油のトラクション, 転がり抵抗を考慮
- 保持器と玉, 保持器と内輪の接触部では混合潤滑状態をモデル化

(参考文献)

1. T. Nogi, K. Maniwa & S. Obara: Dynamic Analysis of Minimally Lubricated Ball Bearings for Space Applications, Proceedings of STLE/ASME International Joint Tribology Conference, IJTC2008-71154 (2008-10).
2. T. Nogi, K. Maniwa & S. Obara: Numerical Analysis of Cage Instability in Minimally Lubricated Ball Bearings, Proceedings of World Tribology Congress 2009 (2009-9).

7

2. 軸受動特性シミュレーション 混合潤滑モデル(1/2)



保持器表面は粗さが比較的大きいため, 油膜と粗さ突起の固体接触が混在する, 混合潤滑状態となる。

$$\text{荷重: } w = w_f + w_a$$

$$\text{摩擦力: } f = f_f + f_a$$

w_f : 油膜による支持力

w_a : 粗さ突起による支持力

f_f : 油膜のせん断力

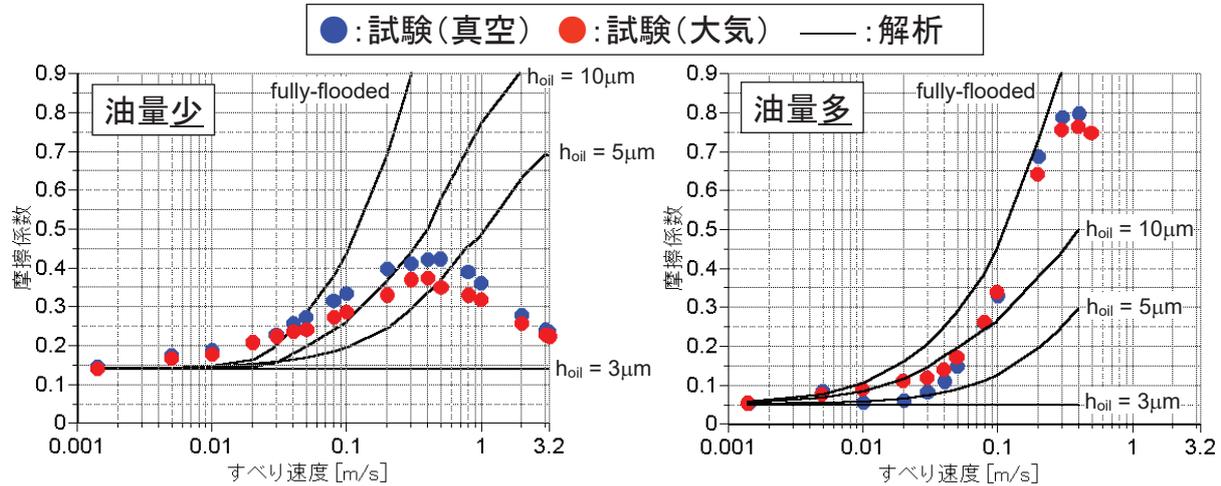
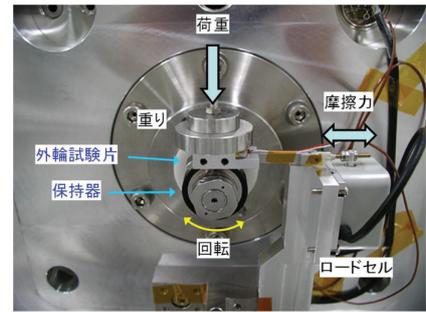
f_a : 粗さ突起支持部における摩擦力

8

2. 軸受動特性シミュレーション 混合潤滑モデル(2/2)

保持器と外輪の接触部を模擬した摩擦試験を行い、作成した混合潤滑モデルの検証を行った。

- 摩擦試験では、油量、すべり速度、荷重を変えて、摩擦係数を測定した。
- 保持器／外輪間の摩擦特性をモデル化するためには、高速域で油不足により油膜厚さが減少することを考慮する必要があることが分かった。
- 実際の軸受回転中における油膜厚さ(油量)は未知のため、軸受設計においては、油膜厚さをパラメータとした解析が必要である。



(参考文献)間庭, 野木, 小原: 宇宙用油潤滑玉軸受の保持器と外輪案内面における摩擦特性, トライボロジー会議2008春東京予稿集(2008-5).

2. 軸受動特性シミュレーション モデルの妥当性検証

ホイール・タイプM/Lの軸受開発試験データを用いて、軸受動特性シミュレーションモデルの妥当性を検証した。

- 開発試験では、大気・真空下において、保持器すきま寸法を振って(標準, 種類1~3)摩擦トルク特性を評価した。
- シミュレーションでは、保持器すきま寸法と油膜厚さを振って摩擦トルクを計算した。リターナインスタビリティが発生する保持器すきま寸法は、試験とシミュレーションで一致した。

★重要なポイント
軸受シミュレーションがリターナインスタビリティの発生条件予測に利用できることを確認した。

保持器種類	保持器すきま寸法	試験結果	シミュレーション結果
標準	ノミナル	・大気圧下, 真空圧下において良好なトルク特性であり, ホイール用軸受の標準保持器として採用	・油膜厚さに依存せず, 摩擦トルクは低く, 保持器安定
種類1	ノミナルよりも案内すきまやや小, ポケットすきま大	・大気圧下でスパイク, トルクシフトが発生 ・真空圧下では異音, トルクシフトが発生 (リターナインスタビリティ発生)	・保持器油膜厚さ大の条件で摩擦トルクは高く, リターナインスタビリティ発生
種類2	ノミナルよりも案内すきま小, ポケットすきま大	・大気, 真空圧下において, 異音を伴うスパイク頻発 ・種類1~3の中では最も程度が良くない (リターナインスタビリティ発生)	・保持器油膜厚さ中・大の条件で摩擦トルクは高く, リターナインスタビリティ発生
種類3	ノミナルよりも案内すきま大, ポケットすきま大	・大気圧下において, 異音無きトルク波動あり ・真空移行後, 異音無きトルク変動あり (リターナインスタビリティは発生していない)	・油膜厚さに依存せず, 摩擦トルクは低く, 保持器安定

2. 軸受動特性シミュレーション シミュレーション条件

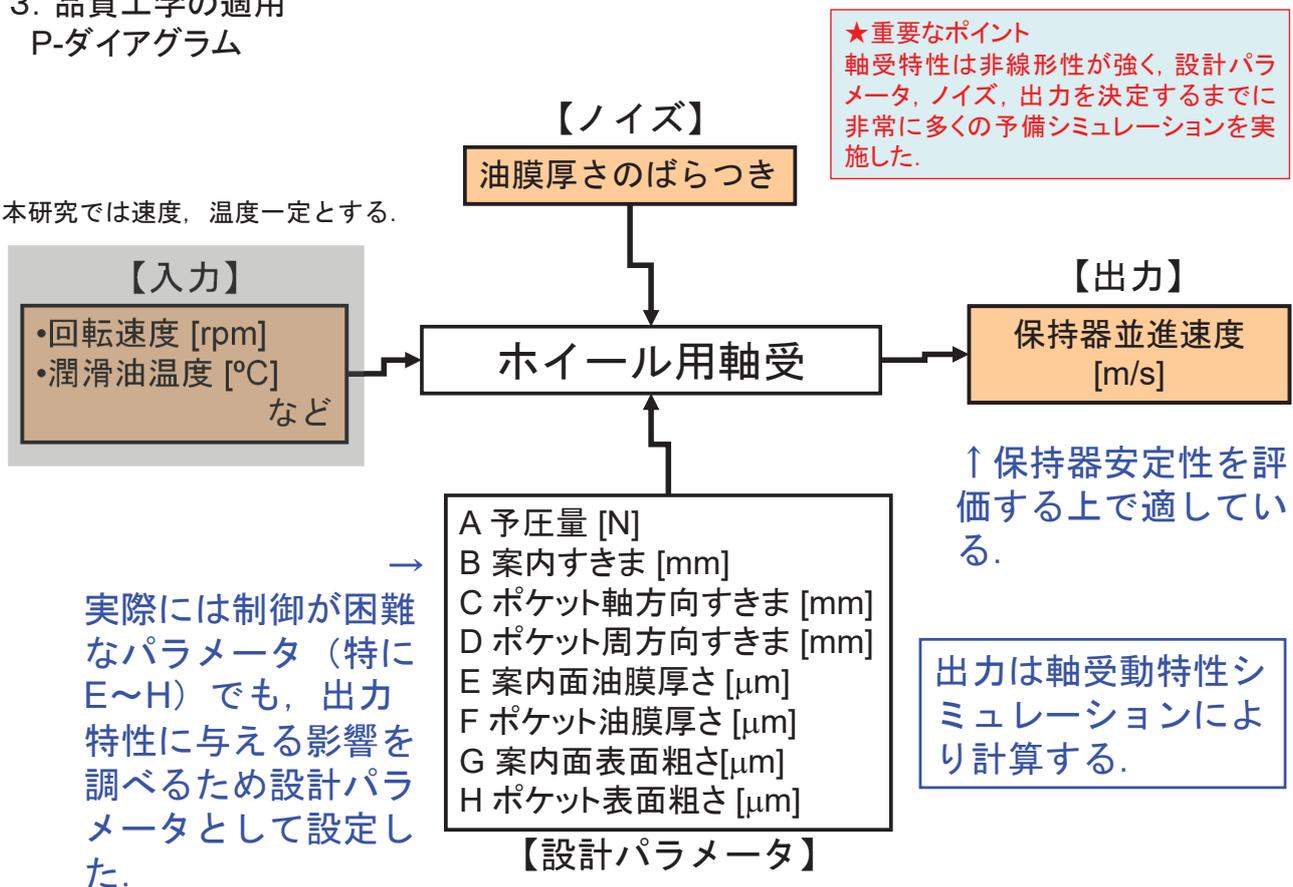
軸受への要求性能, 過去の開発で得られた知見を元にシミュレーション条件を決定した.

軸受型式	アンギュラ玉軸受7000C: タイプS用軸受として選定された型式 内径10 [mm], 外径26 [mm], 幅8 [mm]
保持器材質	綿ベースフェノール (質量, ヤング率などを模擬)
保持器案内方式	内輪案内
回転速度	5000 [rpm]: ホイール最高回転速度
潤滑油温度(粘度)	40 [°C] (0.096 [Pa·s]): 代表的な軸受動作温度 (宇宙用潤滑油として主流の合成炭化水素油 Multiply Alkylated Cyclopentaneの粘度)
保持器接触部における粗さ突起支持部の摩擦係数	0.15: 摩擦試験により決定
重力(軸姿勢)	1 [G](水平軸): 無重力よりもリテーナインスタビリティが起こりやすい条件
シミュレーション時間	6 [s](内輪500回転相当)

11

3. 品質工学の適用 P-ダイアグラム

本研究では速度, 温度一定とする.



12

3. 品質工学の適用 設計パラメータとノイズの水準

設計パラメータ	水準		
	1	2	3
A 予圧量	小	大	—
B 案内すきま	小	中	大
C ポケット軸方向すきま	小	中	大
D ポケット周方向すきま	小	中	大
E 案内面油膜厚さ	小	中	大
F ポケット油膜厚さ	小	中	大
G 案内面表面粗さ	小	中	大
H ポケット表面粗さ	小	中	大

★重要なポイント
軸受特性は非線形性が強く、各パラメータの水準を決定するまでに非常に多くの予備シミュレーションを実施した。また、寸法等の製造公差も考慮し、現実的な範囲で水準を選んだ。

ノイズ	N1	N2	N3	N4
E 案内面油膜厚さ	0.9	0.9	1.1	1.1
F ポケット油膜厚さ	0.9	1.1	0.9	1.1

制御できない因子である油膜厚さをノイズとしてロバストさを評価した。

3. 品質工学の適用 直交表L₁₈への割付

L18_2x3 ⁷	予圧	案内すきま	ポケット軸方向すきま	ポケット周方向すきま	案内面油膜厚さ	ポケット油膜厚さ	案内面表面粗さ	ポケット表面粗さ
1	小	小	小	小	小	小	小	小
2	小	小	中	中	中	中	中	中
3	小	小	大	大	大	大	大	大
4	小	中	小	小	中	中	大	大
5	小	中	中	中	大	大	小	小
6	小	中	大	大	小	小	中	中
7	小	大	小	中	小	大	中	大
8	小	大	中	大	中	小	大	小
9	小	大	大	小	大	中	小	中
10	大	小	小	大	大	中	中	小
11	大	小	中	小	小	大	大	中
12	大	小	大	中	中	小	小	大
13	大	中	小	中	大	小	大	中
14	大	中	中	大	小	中	小	大
15	大	中	大	小	中	大	中	小
16	大	大	小	大	中	大	小	中
17	大	大	中	小	大	小	中	大
18	大	大	大	中	小	中	大	小

3. 品質工学の適用
SN比&感度の計算

直交表(18通り)×ノイズ(4通り)の計算結果から、SN比と感度を計算

【望目特性】

$$\text{SN比: } \eta = 10 \log \frac{1/n(S_m - V_e)}{V_e}$$

S_m : データ平均の変動
 V_e : 誤差分散

$$\text{感度: } S = 10 \log \frac{1}{n}(S_m - V_e)$$

SN比: **高いほどノイズに強い設計(ロバスト)**

SN比が高いほど、油膜厚さがばらついても保持器並進速度は変動しにくい。

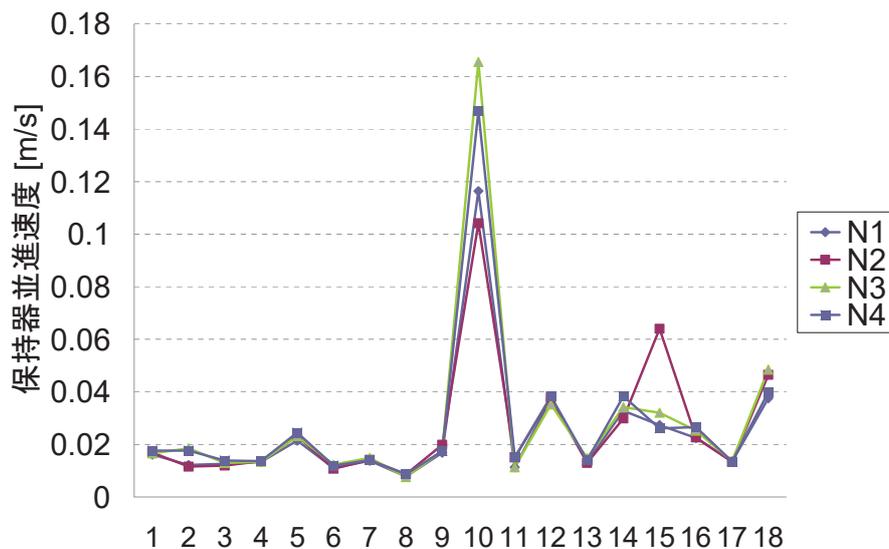
感度: **出力の平均に相当**

感度が低いほど、保持器並進速度は小さくなり、保持器運動に起因するトルク変動も小さくなる。

15

4. シミュレーション結果
保持器並進速度

72回のシミュレーションを行い、保持器中心の並進速度(時間平均)を計算



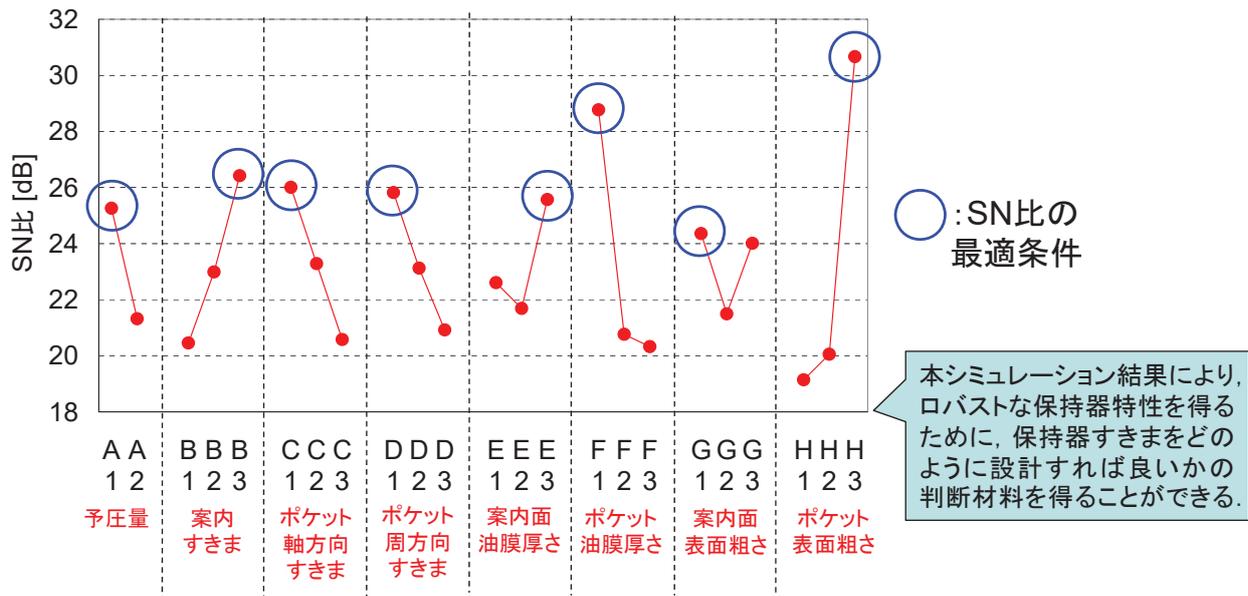
1~18: 直交表の各計算条件に対応

- 10番: 保持器並進速度が大(リテーナインスタビリティー)
- 15番: ばらつきが大(SN比が小)

16

4. シミュレーション結果
SN比の要因効果図

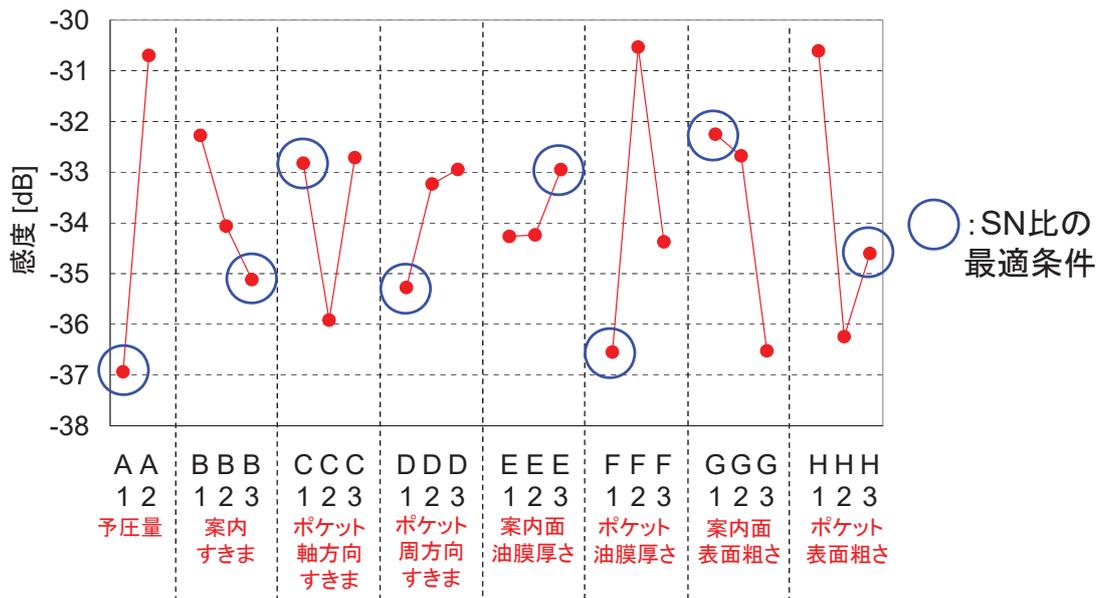
各設計パラメータがSN比をどのように変化させるかグラフ化



- SN比を大きく変化させるパラメータは、ポケット油膜厚さとポケット表面粗さである。
- SN比を高くするためには、案内すきま大、ポケットすきま小が望ましい。

4. シミュレーション結果
感度の要因効果図

各設計パラメータが感度をどのように変化させるかグラフ化



- 感度を大きく変化させるパラメータは、予圧量、ポケット油膜厚さ、ポケット表面粗さである。
- 基本的に、SN比を高く設計すれば感度も小さくなる。

4. シミュレーション結果
再現性の確認(1/2)

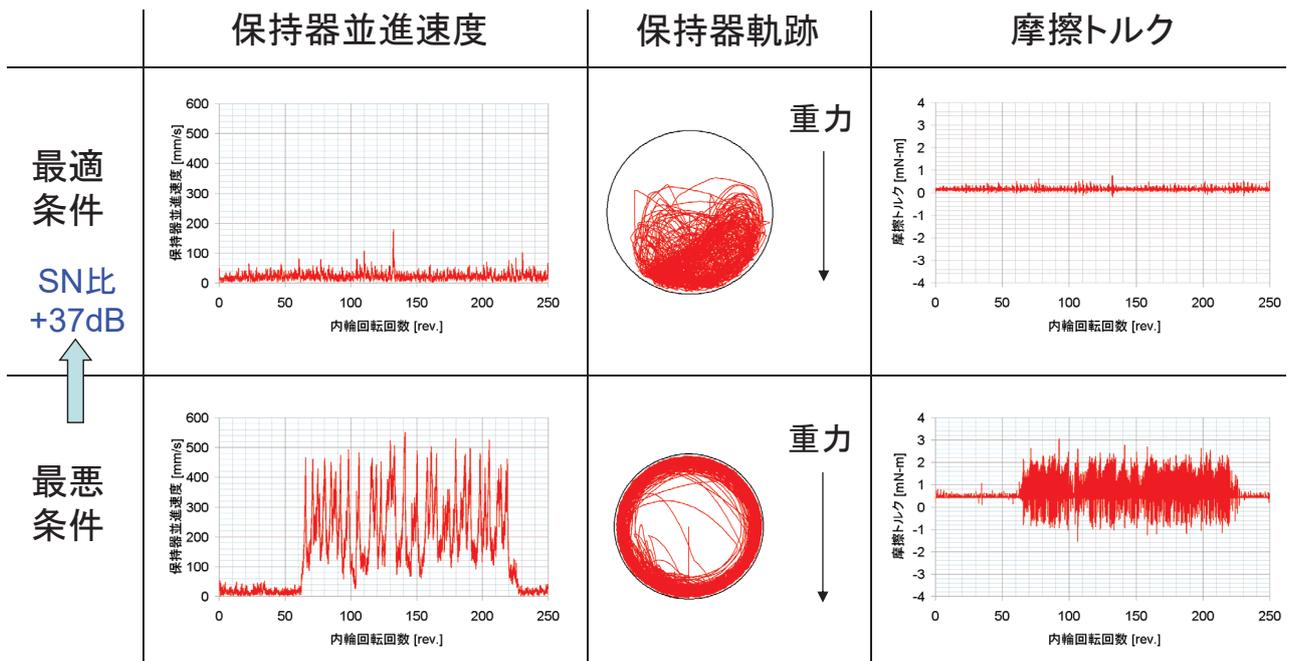
品質工学では得られた最適条件が信頼できるかどうか確認のための計算を行う。SN比の最適条件と比較条件の差(利得)が推定結果と確認計算結果で一致するかどうか確認する。

SN比の最適条件と最悪条件の利得

	条件組合せ								推定結果		確認計算結果	
	A	B	C	D	E	F	G	H	SN比	感度	確認	推定
最適条件	1	3	1	1	3	1	1	3	49.85	-39.78	36.47	-32.54
最悪条件	2	1	3	3	2	3	2	1	2.90	-23.81	-0.66	-20.64
利得									46.95	-15.97	37.13	-11.90

- SN比については推定結果と確認計算結果の差がやや大きい(9.8dB)が、**大きな利得が得られている**。
- 感度についても同様に、推定結果と確認計算結果の差がやや大きい傾向は合っている。

4. シミュレーション結果
再現性の確認(2/2)



- 最適条件: 保持器挙動 & 摩擦トルク安定
- 最悪条件: リテーナインスタビリティ発生, 摩擦トルク変動大

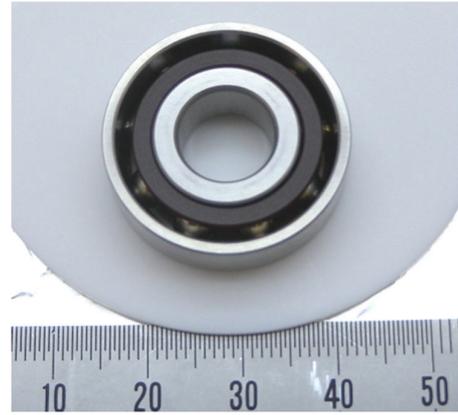
SN比の改善 ⇒ 保持器安定性の向上

5. 軸受回転試験による検証
供試体

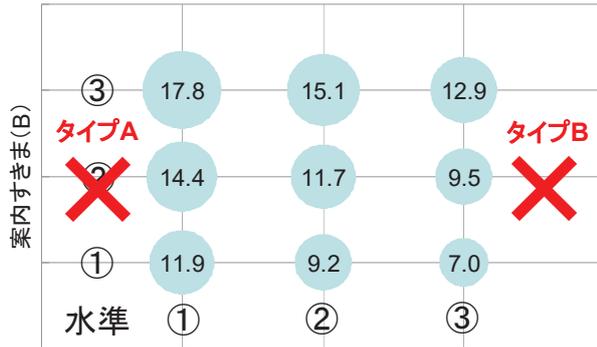
シミュレーション結果を元に設計した保持器の安定性を調べるために、軸受を試作し、回転試験を実施した。

供試体:

- アンギュラ玉軸受7000C
- 宇宙用として主流の合成炭化水素油で潤滑
- 2種類の保持器(タイプA, B)を試作



試作した軸受



ポケット周方向すきま(D)
要因効果図から得られたSN比

タイプA:
ポケット周方向すきまが水準1よりもわずかに小さい

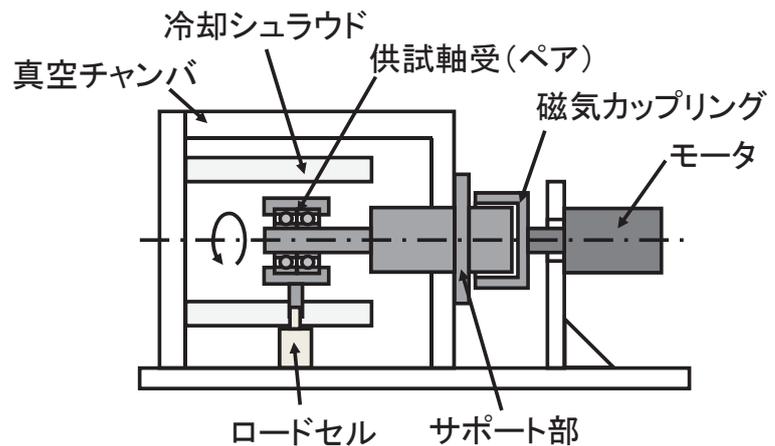
タイプB:
ポケット周方向すきまが水準3よりもわずかに大きい

タイプAの方がSN比は大きいと推定

5. 軸受回転試験による検証
試験装置



試験装置の外観



試験装置の概略図

- 測定項目: 軸受の摩擦トルク(回転時の抵抗), 軸受温度
- 試験雰囲気:

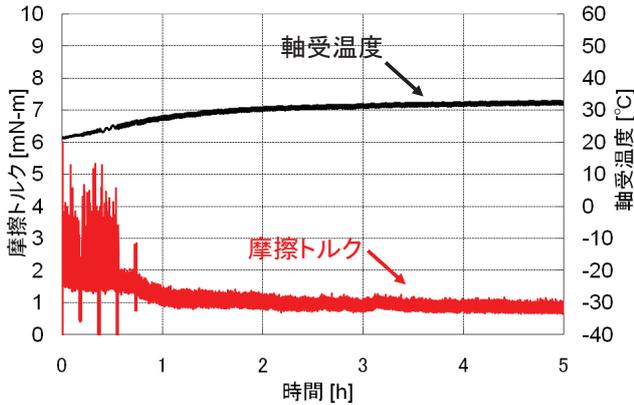
- ① 大気圧力(10⁵ Pa, GN₂雰囲気), 室温(22 °C)
- ② 大気圧力(10⁵ Pa, GN₂雰囲気), 低温(-4 °C)
- ③ 真空圧力(10 Pa以下), 室温(22 °C)

低温や真空はリテーナインスタビリティが起こりやすい環境であり、軸受特性のロバストさを評価するのに適している。

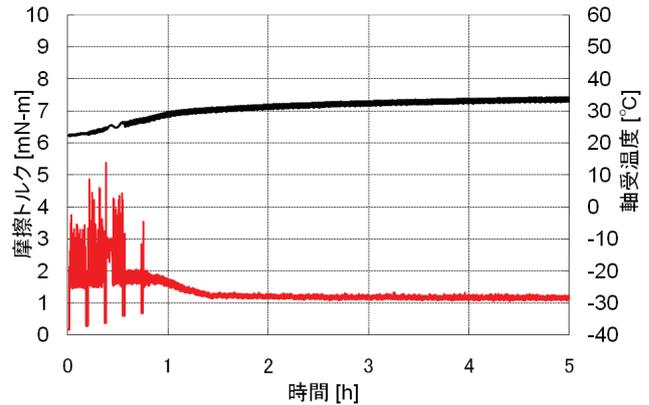
5. 軸受回転試験による検証

試験結果(1/3) 大気圧力・室温

- 大気圧力(10⁵ Pa, GN₂雰囲気), 室温(22 °C)
- 回転速度1000~4000rpm@10min, 5000rpm@24h



保持器タイプA(SN比 大)



保持器タイプB(SN比 小)

保持器タイプA: 摩擦トルクやや変動あるが、概ね**安定**

保持器タイプB: トルクスパイク(瞬間的なトルク上昇)が2回発生

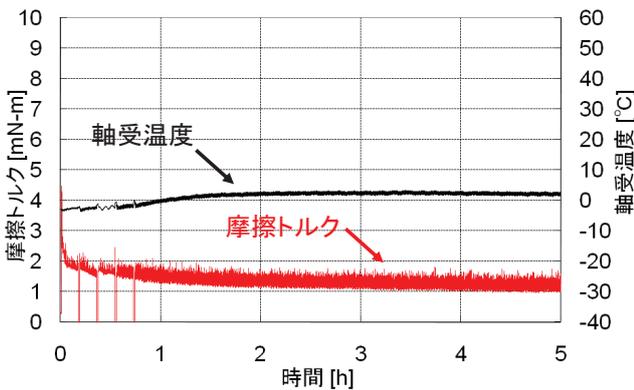
SN比が高いタイプAの方が良好な摩擦トルク特性

23

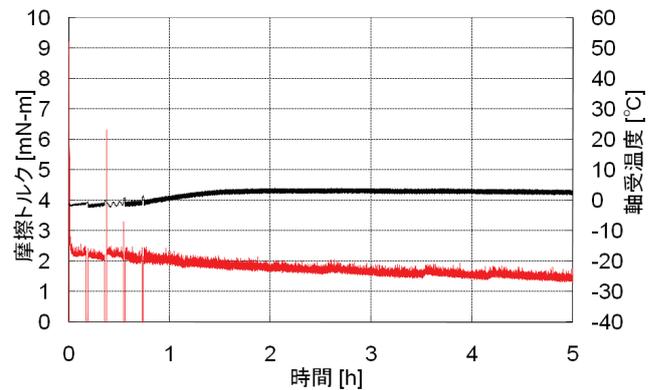
5. 軸受回転試験による検証

試験結果(2/3) 大気圧力・低温

- 大気圧力(10⁵ Pa, GN₂雰囲気), 低温(-4 °C)
- 回転速度1000~4000rpm@10min, 5000rpm@24h



保持器タイプA(SN比 大)



保持器タイプB(SN比 小)

保持器タイプA: 摩擦トルクやや変動あるが、概ね**安定**

保持器タイプB: 摩擦トルクやや変動あるが、概ね**安定**

タイプA, Bどちらも良好な摩擦トルク特性

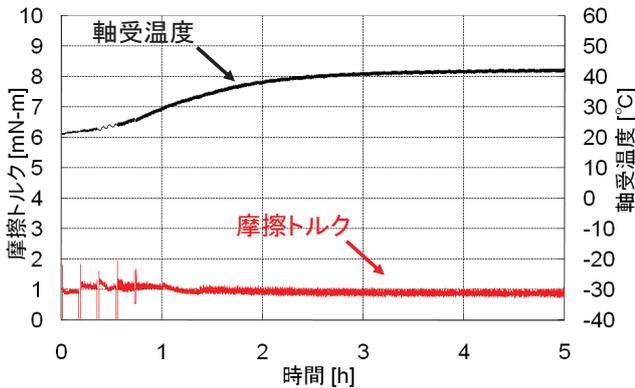
24

5. 軸受回転試験による検証

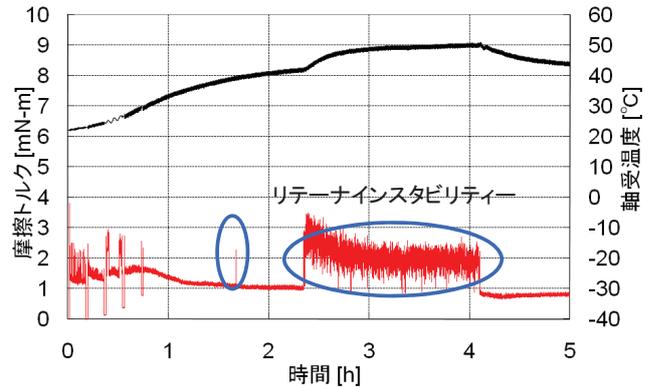
試験結果 (3/3) **真空圧力・室温**

- 真空圧力(10 Pa以下), 室温(22 °C)
- 回転速度1000~4000rpm@10min, 5000rpm@90h以上

★重要なポイント
SN比の大小と、RIの起こりやすさが関連していることを試験で実証できた。



保持器タイプA (SN比 大)



保持器タイプB (SN比 小)

保持器タイプA: 摩擦トルク安定

保持器タイプB: 摩擦トルク・軸受温度の上昇, 異音の発生
⇒ **リテーナインスタビリティの発生**

SN比が高いタイプAの方が良好な摩擦トルク特性

25

6. まとめ・教訓

- ホイール・タイプS用軸受の保持器設計に、品質工学におけるパラメータ設計の手法と軸受動特性シミュレーションを組み合わせた設計手法を利用した。
- SN比が高くなるように設計した保持器は、シミュレーション・試験のどちらにおいてもリテーナインスタビリティが発生しない、良好な軸受特性を示した。本シミュレーション結果や開発試験結果を元に、ホイール・タイプS用軸受の保持器寸法を決定した。
- シミュレーション手法(物理モデル)の作り込みと合わせて、試験によるモデルの検証を行い、シミュレーションの限界(定性的/定量的に何ができるか?)を事前に評価し把握しておくことが重要である。本研究では、“リテーナインスタビリティ発生条件の予測”にシミュレーションを利用したが、これだけで保持器を設計できるのではなく、過去に得られた様々な知見や試験結果と合わせた検討・評価が必要であった。
- シミュレーションの特性(非線形性の度合い)を知っておかないと、品質工学のパラメータ・水準選びに多大な時間を要することが分かった。 また、パラメータ・水準選びは寸法公差等の製造条件も考慮して行うことが重要である。

26

3.3 シミュレーションによる効果的な吸収体配置レイアウトの最適化

3.3.1 目的

本項では、EMC シールドルーム内において生じている低周波数帯域の定在波について、定在波を抑制しかつ使用する電波吸収体の数量を低減することを目的に、シミュレーションと品質工学を組み合わせた検討事例について紹介する。

3.3.2 実施内容

(1) ステップ1：目的機能の定義

EMC シールドルームを利用する顧客の要望から目的とする機能を考えると、背景も踏まえた上で本事例においては「ある低周波数領域において定在波が存在しない（若しくは許容できる）」とした。

ここで、上記の機能は顧客やその背景で如何様にでも変わることには注意されたい。例えば、電磁波が室外に漏洩をしないことを顧客が要求するのであれば、目的機能は「如何なる周波数の電磁波であっても室外に漏洩しない。」となる。

(2) ステップ2：基本機能及び理想機能の明確化

【基本機能】

基本機能及び理想機能の明確化にあたり「定在波が存在しない」とは、どのような状態かについて考えると、定在波とは波の重なりであり、反射源としては主に床面、壁面及び天井面となる。よって、壁面等における反射率（若しくは減衰率）について評価することも手段の1つとして挙げられたが、「反射率及び減衰率がどうであろうと最終的には試験を実施する空間で定在波が存在していなければ良い」とした。ここで、定在波が存在していないことを定量的に評価するために、床を除く壁面及び天井面すべてに吸収体を設置した場合（以下、「理想環境」）における試験空間の音圧を基準（以下、「理想状態」）とした。

電波吸収体の数量を低減した場合にも空間の特性は理想状態と近いことが望ましい。したがって、基本機能とは「信号を変化させた場合における理想状態との関係性」と定義した。

【理想機能】

上記で定義した基本機能より、標準的な使用条件にて期待される働きとは「理想状態における入出力関係と一致すること」と定義した。ここで、理想機能は $y = \beta M$ という線形式で与えられるが入

出力関係は非線形であるので、標準 SN 比を用いて線形的な関係に変換した。なお、入出力関係が一致するとは、 $\beta = 1$ となるはたらきのことを指す。

(3) ステップ 3：因子と水準の抽出

因子と水準の抽出にあたってはまずは取得される値がどのような物理現象に基づいているかを考える必要がある。本事例はシミュレーションであるので、シミュレートされた値がどのようなアルゴリズムによって出力されているかを調査した。この時、入力値や設定値については説明変数として抽出し横一列に並べた。次に、これまでに定義した目的機能、基本機能及び理想機能を基に説明変数を制御因子、設計因子、誤差因子、標示因子及び出力に分類し、エンジニアード・システム図を作成した。

(4) ステップ 4：実験の割り付け

識別した各因子より制御因子は L_{18} 、誤差因子は L_9 の直交表を適用した。この時、 L_{18} 直交表については、壁面に貼付する吸収体の面積をより評価する（水準を増やす）ために、通常は $(2^1 \times 3^7)$ の水準であるところを直交表の第 1 列と第 2 列を統合し $(6^1 \times 3^6)$ の水準として割り付けた。

(5) ステップ 5：実験とデータ収集

実験によるデータ収集時には能率を優先して行うことが重要である。よって、シミュレーションモデル作成時においては、簡易的なモデルとなるよう心掛けた。

(6) ステップ 6：解析

解析においては分散分析表（ANOVA：ANalysis Of VAriance）を活用した。ANOVA とは、有効成分（信号）と有害成分（ノイズ）に分解されたデータを表に示したものである。なお、誤差因子として Ω ：領域（3次元方向）を設定していたが、結果への影響が微小であったため、誤差因子の直交表を用いた結果を平均して ANOVA の各値を算出した。（この教訓として、実験を行う前に誤差因子が出力にどの程度の影響を及ぼすか確認することが望ましい。）そして、作成した ANOVA を基に要因効果図を作成した。

(7) ステップ 7：最適条件（選定条件）の選択と工程平均の推定

要因効果図を基に最適条件を選択する。本事例においては、SN 比が最も高くなる水準は側面及び

天井面ともに吸収体貼付面積が 100%である場合である。しかし、本事例の背景を踏まえると 100%を条件として選定することは好ましくない。よって、最適条件の選択にあたっては、ある程度貼付面積が少ない水準を選択した。このように選定した条件は最適条件ではないので、以下、選定条件と呼ぶ。また、現行条件としては、吸収体を全面に貼付したものとした。工程平均の推定についての詳細は他の文献を参考とされたい。

(8) ステップ 8 : 確認実験

選定条件について推定した利得が再現するかを確認した。結果として、SN 比が高いものを選定した場合（選定条件）には、利得の差が 3dB 程度であるので再現性があると判断できる。なお、仮に再現しない場合には、要因を変えるのではなく、SN 比の設定（二乗和の分解）を見直す必要がある。再現性がないということは、加法性がなく SN 比を用いて機能を改善することができないからである。

3.3.3 まとめ

- 品質工学を適用することで、シミュレーションに割く時間を大幅に短縮することができかつ貼付するレイアウトや貼付場所に関する効果を定量的に示すことができた。
- 本事例は標準 SN 比を用いて評価したが、誤差因子の影響が少なかったため、本来ならば実施するはずの「目標特性への合わせこみ」を実施していないことに注意されたい。
- 誤差因子として室内寸法の変化は効果がなかったが、壁面に貼付する吸収体の吸収特性は、不変ではなく温度や製造公差により若干の特性の変化が存在すると考えられる。
- また、本事例ではシミュレーションを実施するにあたり解析ソフトを用いたが設定可能な因子が少なくかつ手動で因子の水準を変更させており、多大な時間を要した。シミュレーションを実施するソフトによっては、自動で因子の水準を変化させることも可能であり、その場合は大規模な直交表を使用することも可能であるので、今後はそういったことも考慮して品質工学を適用していきたい。

シミュレーションによる 効果的な吸収体配置レイアウトの最適化



経緯

- ▶ EMC試験設備（図1）はシールドルームと電波吸収体で構成されており、電磁シールドルーム床を除く5面に電波吸収体を設置し、試験中における電磁波の不要な反射や散乱を抑制し試験空間を確保している。
- ▶ しかしながら使用している電波吸収体の性能外となる低い周波数帯域（500MHz以下）では吸収性能がないため、試験空間の確保が難しい現状にある。
- ▶ 低周波数帯域における吸収性能を持つフェライトタイルと呼ばれる電波吸収体（図2）により、試験空間を確保することが可能であるが、その重量から壁面に貼付した場合には設備が耐えられない危険性がある。
- ▶ よって、設備の耐えられる重量に抑え且つ試験空間を確保可能であるように貼付する必要がある。
- ▶ 反射原理においては、電磁波と音波が等価であることを前提とした場合に、音響解析ソフトにて完全反射環境と理想環境（無響室）における定在波の様子を図3に示す。

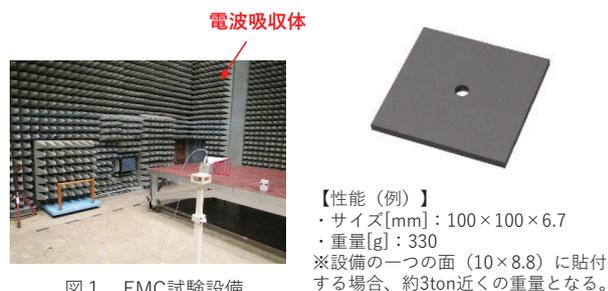


図1 EMC試験設備

図2 フェライトタイル

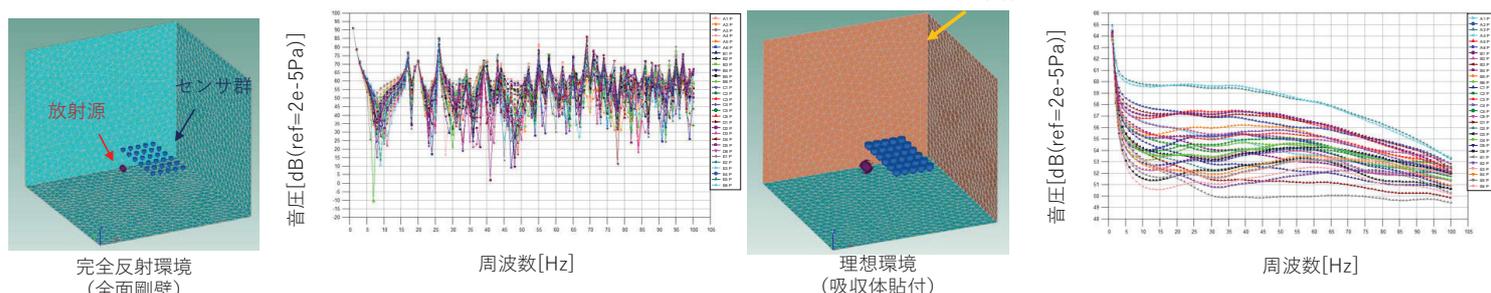
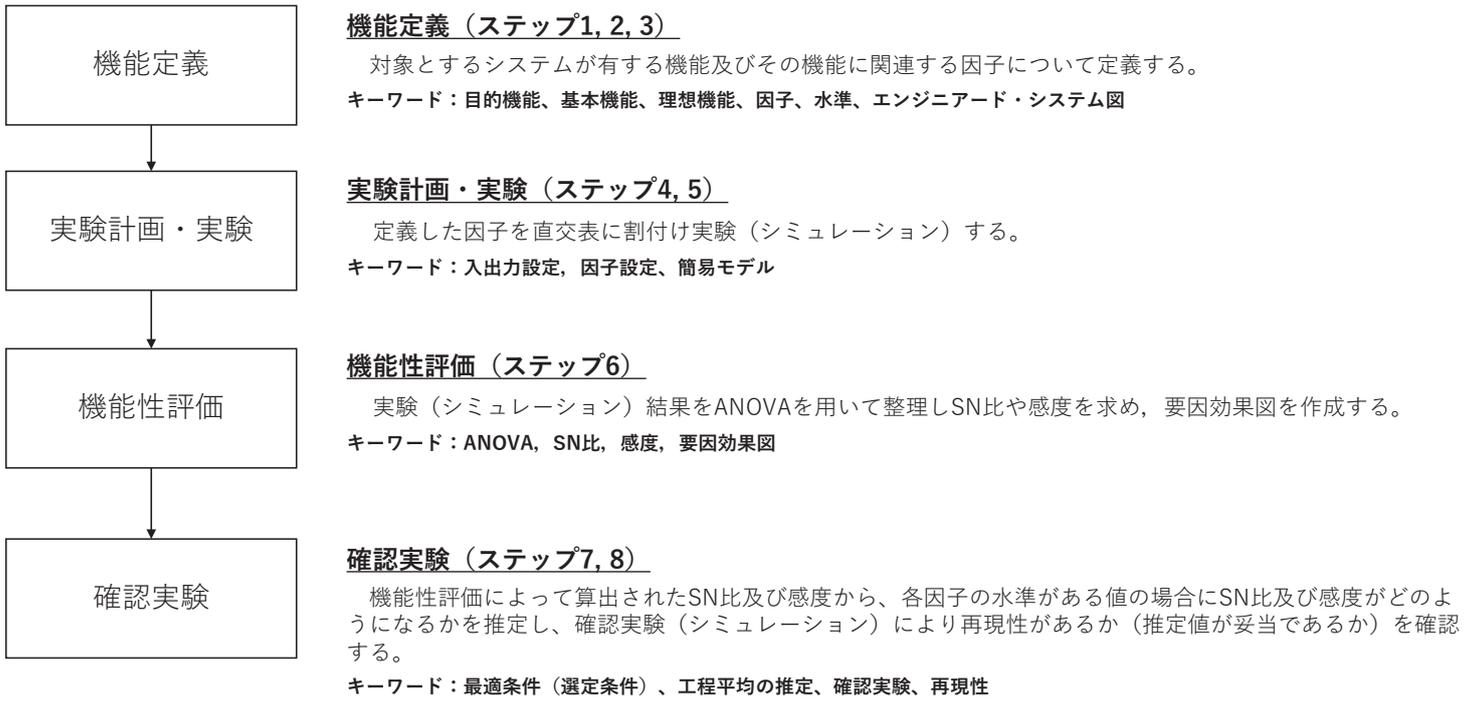


図3 定在波の様子

品質工学を用いて検討するにあたり大まかなフローを下図の通り示す。



機能定義 (ステップ1, 2, 3) キーワード：目的機能、基本機能、理想機能、因子、水準、エンジニアード・システム図

ステップ1：目的機能の定義

目的機能：「ある低周波数領域において定在波が存在しない（若しくは許容できる）」

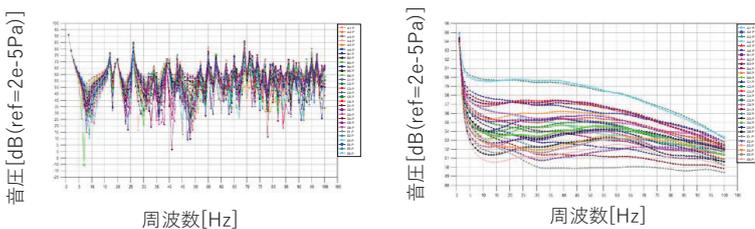


図4 吸収体貼付による周波数-音圧特性の変化

図4のように、完全反射環境では定在波が生じているが、理想環境では吸収体を貼付したことで定在波を抑制している。

ステップ2：基本機能及び理想機能の明確化

基本機能：「信号を変化させた場合における理想状態との関係性」
 条件を変更した場合と理想状態の波形とで、傾向にどのような差異があるかに着目している。条件を変更した場合でもこれらの波形に相関があることが望ましい。

理想機能：「理想状態における入出力関係と一致すること」
 周波数-音圧特性が非線形であるので、標準SN比を用いて線形的な関係に変換する。波形が一致する場合には $\beta = 1$ となる。

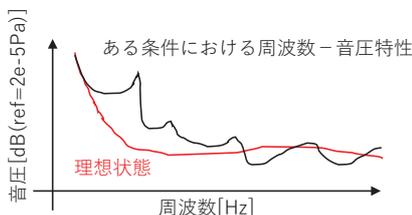


図5 基本機能 概念図

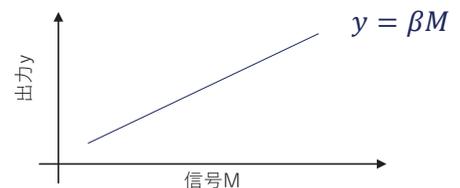


図6 基本機能 概念図

ステップ3: 因子と水準の抽出

システムは境界要素法 (BEM) を用いており、関連する説明変数を洗い出し因子設定を行った。

<説明変数>

Γ : 境界
 Ω : 領域
 $P(\mathbf{r}_p, \omega)$: ある角周波数 ω における任意点 p での音圧
 \mathbf{r}_p : 任意点 p における位置ベクトル
 $k_0 (= \omega/c_0)$: 空気の波数
 c_0 : 音速
 $P_D(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_p, \omega)$: \mathbf{r}_S にある音源が \mathbf{r}_p に作り出す音圧
 \mathbf{r}_S : 音源の位置
 \mathbf{r}_q : 境界 Γ 上の点 q における位置ベクトル
 $\partial/\partial n_q$: 境界 Γ 上の点 q における外向き法線方向の偏微分

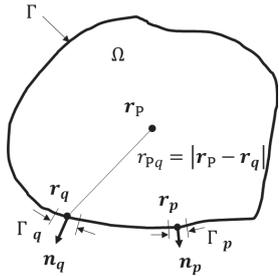


図7 境界要素法 (BEM) 概念図

(1) Γ : 境界 制御因子

境界条件に関わる設定は境界の特性 (反射or吸収) が考えられる (室形も含まれるが) Ω : 領域で説明する。その特性として音響インピーダンスに着目した。尚、音響インピーダンス Z は下記の式より求められる。

$$Z = \rho c_0 \times \frac{1+R}{1-R}$$

$$R = \sqrt{1-\alpha}$$

ρ : 空気の密度 (1.21[kg/m³])
 R : 反射率
 α : 吸音率

この他に吸収体貼付面積及びレイアウトが考えられる。

(2) Ω : 領域 誤差因子

縦 L 、横 W 及び高さ H の三次元領域が考えられる。領域の変動によって波の反射環境も変動するため、誤差因子として設定する。

(3) ω : 角周波数 信号因子

解析周波数を f としたとき、 $\omega = 2\pi f$ で表すことができ、本事例では周波数 f として因子に設定した。

(4) \mathbf{r}_S : 音源の位置 制御因子

領域 Ω 内における音源の位置。

(5) $P_D(\mathbf{r}_S, \mathbf{r}_p, \omega)$: \mathbf{r}_S にある音源が \mathbf{r}_p に作り出す音圧 制御因子

点音源を想定する。

ステップ3: 因子と水準の抽出

因子設定に基づき、エンジニアード・システム図を作成した。

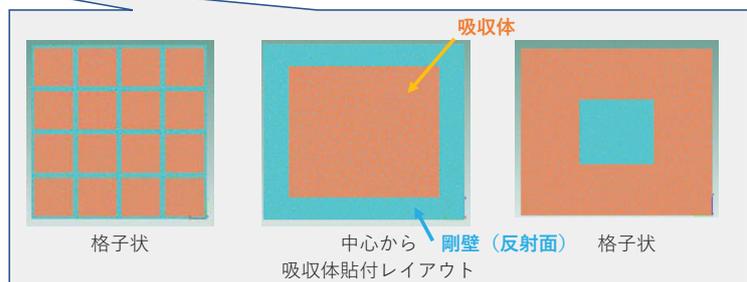
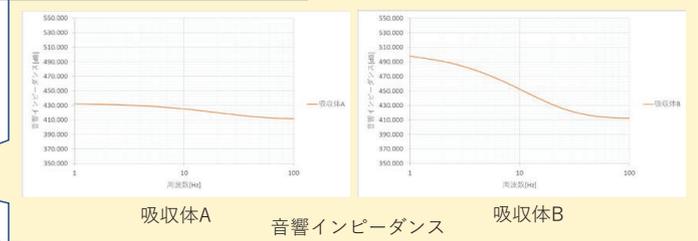
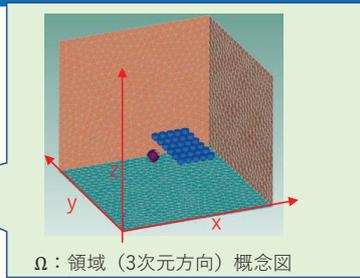
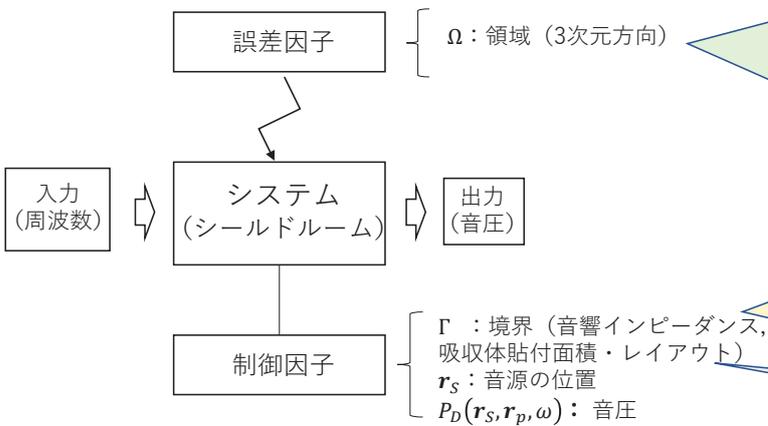


図8 エンジニアード・システム図

ステップ4：実験の割り付け 制御因子はL₁₈、誤差因子はL₉の直交表を適用した。

【制御因子】

因子名	単位	水準1	水準2	水準3	水準4	水準5	水準6
AB 側面貼付面積（全面貼り付けに対する比率）	%	100	95	90	85	80	75
C 上面貼付面積（全面貼り付けに対する比率）	%	100	90	80			
D 側面貼り方（レイアウト）	—	中心から	外側から	格子状			
E 上面貼り方（レイアウト）	—	中心から	外側から	格子状			
F 吸音材種類（吸音性能）	—	吸収体A	吸収体B	吸収体B(ダミー)			
G 音源位置	—	1.1	1.15	1.2			
H 音圧	dB	60	80	100			

通常は水準が3つであるが、直交表の第1列と第2列を統合することで水準を増やしている。

統合化された直交表の列

【L₁₈直交表】

実験No.	12	3	4	5	6	7	8	12	3	4	5	6	7	8
	AB	C	D	E	F	G	H	側面貼付面積（全面貼り付けに対する比率）	上面貼付面積（全面貼り付けに対する比率）	側面貼り方（レイアウト）	上面貼り方（レイアウト）	吸音材種類（吸音性能）	音源位置	音圧
1	1	1	1	1	1	1	1	100	100	中心から	中心から	吸収体A	1.1	60
2	1	2	2	2	2	2	2	100	90	外側から	外側から	吸収体B	1.15	80
3	1	3	3	3	3	3	3	100	80	格子状	格子状	吸収体B(ダミー)	1.2	100
4	2	1	1	2	2	3	3	95	100	中心から	外側から	吸収体B	1.2	100
5	2	2	2	3	3	1	1	95	90	外側から	格子状	吸収体B(ダミー)	1.1	60
6	2	3	3	1	1	2	2	95	80	格子状	中心から	吸収体A	1.15	80
7	3	1	2	1	3	2	3	90	100	外側から	中心から	吸収体B(ダミー)	1.15	100
8	3	2	3	2	1	3	1	90	90	格子状	外側から	吸収体A	1.2	60
9	3	3	1	3	2	1	2	90	80	中心から	格子状	吸収体B	1.1	80
10	4	1	3	3	2	2	1	85	100	格子状	格子状	吸収体B	1.15	60
11	4	2	1	1	3	3	2	85	90	中心から	中心から	吸収体B(ダミー)	1.2	80
12	4	3	2	2	1	1	3	85	80	外側から	外側から	吸収体A	1.1	100
13	5	1	2	3	1	3	2	80	100	外側から	格子状	吸収体A	1.2	80
14	5	2	3	1	2	1	3	80	90	格子状	中心から	吸収体B	1.1	100
15	5	3	1	2	3	2	1	80	80	中心から	外側から	吸収体B(ダミー)	1.15	60
16	6	1	3	2	3	1	2	75	100	格子状	外側から	吸収体B(ダミー)	1.1	80
17	6	2	1	3	1	2	3	75	90	中心から	格子状	吸収体A	1.15	100
18	6	3	2	1	2	3	1	75	80	外側から	中心から	吸収体B	1.2	60

ステップ4：実験の割り付け 制御因子はL₁₈、誤差因子はL₉の直交表を適用した。

【誤差因子】

因子名	単位	水準1	水準2	水準3
N None	-	N/A	N/A	N/A
O 室形（縦）	m	10.019	10.044	10.069
P 室形（横）	m	10.019	10.044	10.069
Q 室形（高さ）	m	8.833	8.858	8.881

吸収体の厚みを考慮して、既存の室内有効空間の±2.5cmを水準に設定した。

【L₉直交表】

実験No.	1	2	3	4	1	2	3	4
	N	O	P	Q	N	O	P	Q
					None	室形（縦）	室形（横）	室形（高さ）
1	1	1	1	1	N/A	10.019	10.019	8.833
2	1	2	2	2	N/A	10.044	10.044	8.858
3	1	3	3	3	N/A	10.069	10.069	8.881
4	2	1	2	3	N/A	10.019	10.044	8.881
5	2	2	3	1	N/A	10.044	10.069	8.833
6	2	3	1	2	N/A	10.069	10.019	8.858
7	3	1	3	2	N/A	10.019	10.069	8.858
8	3	2	1	3	N/A	10.044	10.019	8.881
9	3	3	2	1	N/A	10.069	10.044	8.833

ステップ5: 実験とデータ収集

モデルは能率を優先して行ったため、グラウンドプレーン (供試体を設置するテーブル)、アンテナ架台及び供試体等といったものを設定しておらず、既存のEMCシールドルームを精密に再現したものではないことに注意されたい。下図に作成したモデルの一例を示す。

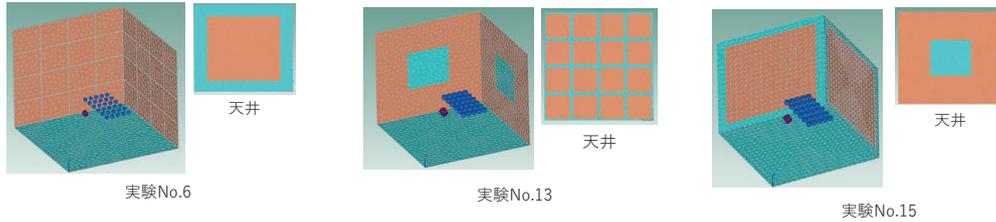


図9 シミュレーションモデル群 (一部)

また、データ収集の為に設定した評価点については右図の通りである。実試験においては下図に示すテーブル上に供試体を設置することが多いため、まずはテーブル上の空間を評価対象とし、評価点としてテーブル上に30点を設定した。

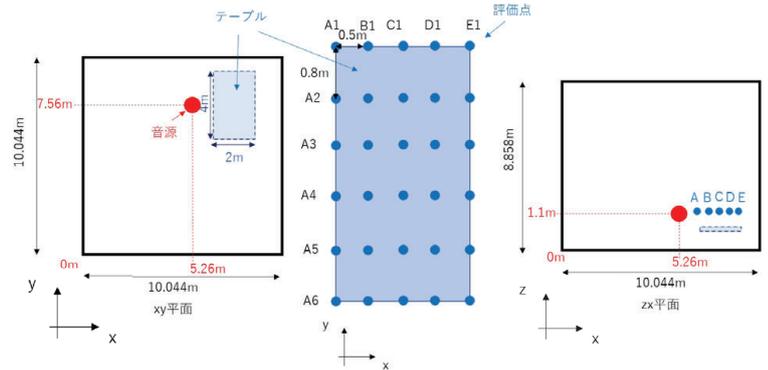


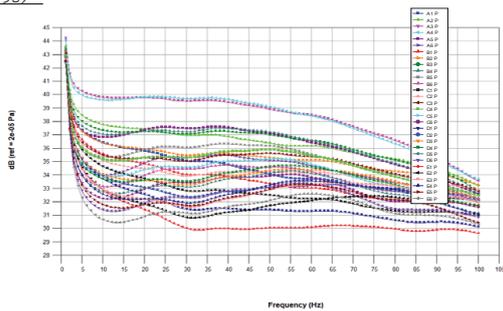
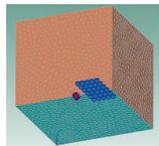
図10 評価点

機能性評価 (ステップ6)

図11に直交実験の一部の結果について示す。

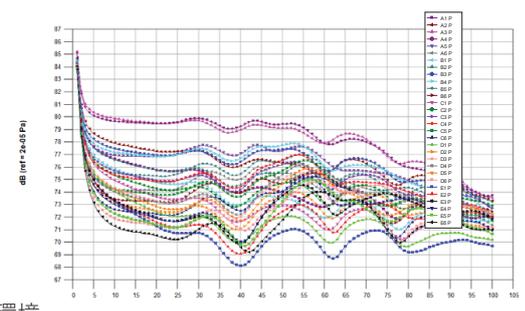
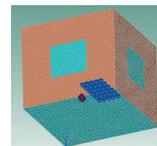
実験No.1 (理想環境)

側面: 100%
上面: 100%



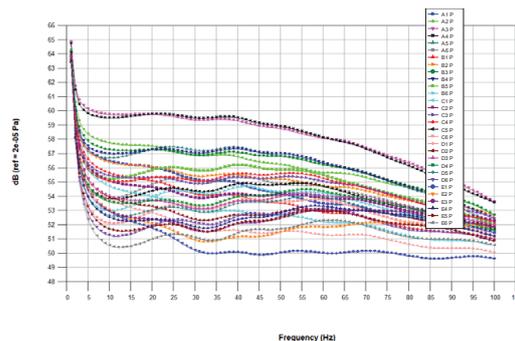
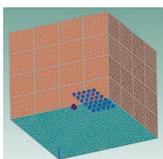
実験No.12

側面: 85% 外側から
上面: 80% 外側から



実験No.6

側面: 95% 格子状
上面: 80% 中心から



(参考) 完全反射環境

側面: 0%
上面: 0%

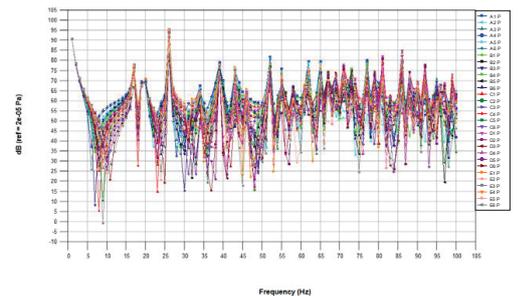
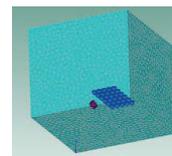


図11 出力結果

- 各実験No.によって結果が大きく異なることがわかり、実験No.6は傾向としては、実験No.1 (理想状態) とほとんど変わらない。
- 実験No.12は定在波を抑制できているものの、実験No.6と比較すると抑制効果が薄い。

ANOVAとは分散分析 (Analysis Of Variance) の略称であり, 有効成分 (信号) と有害成分 (ノイズ) に分解されたデータを表に示したものである。下記にANOVAと分解の概念図を示す。尚, 誤差因子として Ω : 領域 (3次元方向) を設定したが, 結果への影響が微小であったため, 誤差因子の直交表を用いた結果を平均してANOVAの各値を算出した。

Source	f	S	V	備考
β	f_β	S_β	-	全データを考慮した際の回帰直線の傾き。感度。
$P \times \beta$	$f_{P \times \beta}$	$S_{P \times \beta}$	$V_{P \times \beta}$	センサ間の位置による β の変動。
e	f_e	S_e	V_e	回帰直線上のデータのばらつき。
(N)	$f_{(N)}$	$S_{(N)}$	$V_{(N)}$	「センサ間の位置による β の変動」と「データのばらつき」の和。何かしらのパラメータを誤差因子として解析する場合に使用する。 $S_{(N)} = S_e + S_{P \times \beta}$
T	f_T	S_T	-	全データの二乗和。

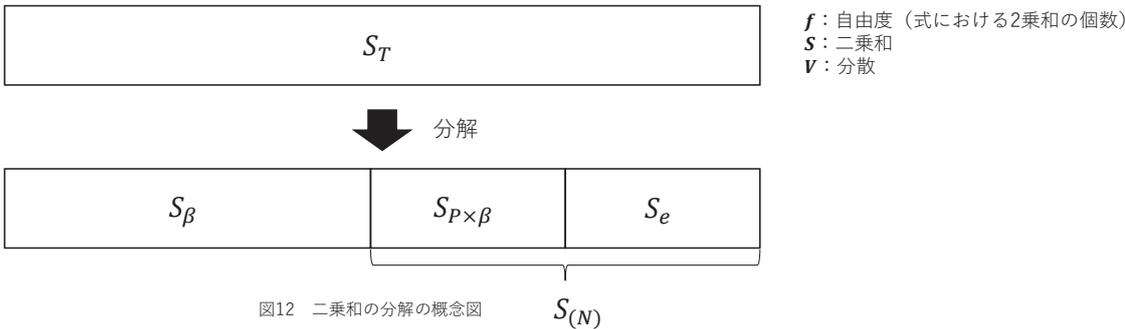
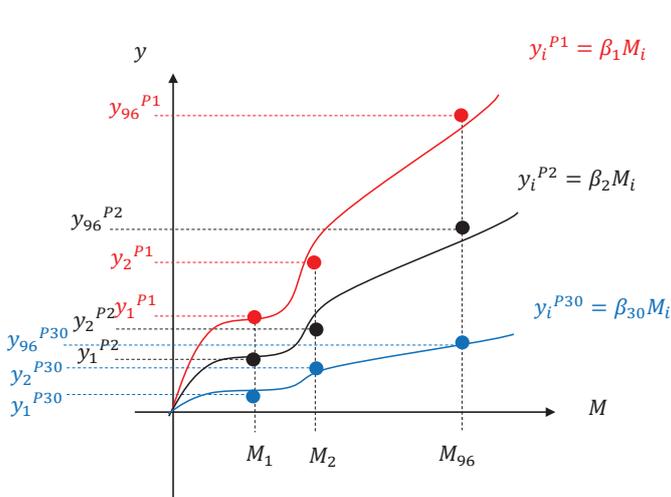


図12 二乗和の分解の概念図

ANOVAにおける各値の考え方と導出式について下記に示す。

Source T について

全データの二乗和を S_T とする。評価点: P は30か所に設定し, 解析する周波数: M は5~100Hzとしたため, 下記の式より S_T は算出される。尚, 各出力 y は前述の通り誤差因子に関する直交表で振った結果で平均している。



【 S_T 】

$$S_T = \{(y_1^{P1})^2 + (y_2^{P1})^2 + \dots + (y_{96}^{P1})^2\} + \{(y_1^{P2})^2 + (y_2^{P2})^2 + \dots + (y_{96}^{P2})^2\} + \dots + \{(y_1^{P30})^2 + (y_2^{P30})^2 + \dots + (y_{96}^{P30})^2\}$$

$$= \sum_{j=1}^{30} \sum_{i=1}^{96} (y_i^{Pj})^2$$

→各実験結果で出力されるため割愛する。本事例においては, L_{18} の直交表であるから18個の S_T が算出される。

【 f_T 】

全データ数は $30 \times 96 = 2880$ 個であるので, $f_T = 2880$.

図13 横軸に信号因子 M , 縦軸に出力 y をとった場合の非線形グラフィイメージ

Source β について

標準SN比を算出する場合の S_β を求める。通常であれば信号因子(周波数): M が横軸となるが、標準SN比を算出するため、横軸を理想状態における出力: Y_i^{Pj} とする。

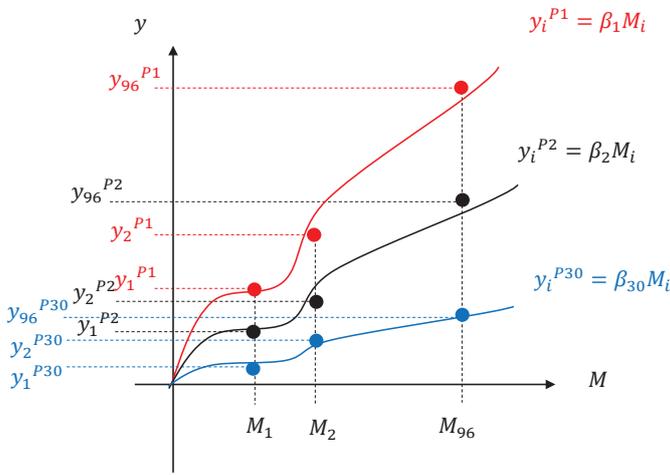


図14 横軸に信号因子 M , 縦軸に出力 y をとった場合の非線形グラフィイメージ

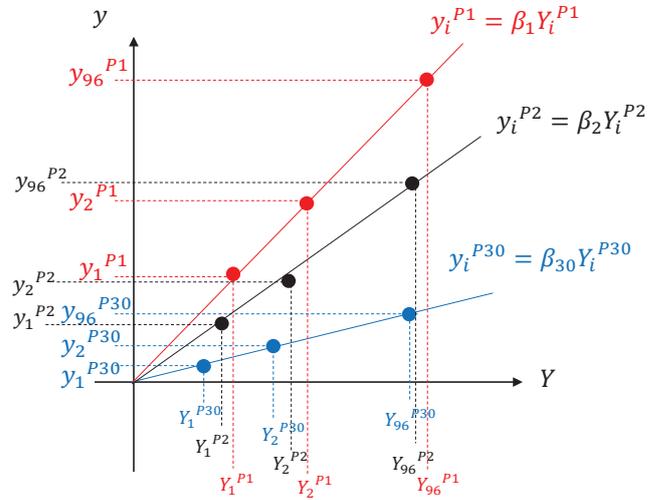


図15 標準SN比算出のために線形式に変換したグラフィイメージ

Source β について

【 S_β 】

前頁より、線形グラフに変換した後に通常のSN比の考え方を取り入れる。詳細な定義は他の文献を参考されたいが、 S_β は下記の式で定義される。

右図の様に線形グラフの数だけ線形式: L と二乗和の入力: r が存在し、その比が S_β である。

$$S_\beta = \frac{(\sum_{j=1}^m L_j)^2}{\sum_{j=1}^m r_j} = \frac{(\sum_{j=1}^{30} L_j)^2}{\sum_{j=1}^{30} r_j}$$

$$L_j = \sum_{i=1}^{96} y_i^{Pj} Y_i^{Pj}$$

$$r_j = \sum_{i=1}^{96} (Y_i^{Pj})^2$$

【 f_β 】

S_β の式に二乗の項が1つであるので、 $f_\beta = 1$ 。

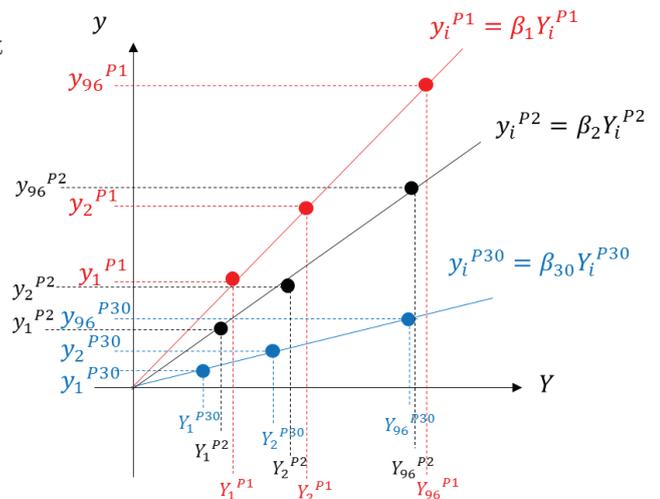


図16 標準SN比算出のために線形式に変換したグラフィイメージ

Source $P \times \beta$ について

【 $S_{P \times \beta}$ 】

取得した値におけるセンサ位置間による変動を考慮する。出力（比例式）の変動を $S_{P \times \beta}$ とし、 $S_{P \times \beta}$ はセンサ位置の違いによって、全データを考慮した回帰直線からどれだけ乖離したかを示すものであり、以下に定式化される。

$$S_{P \times \beta} = S_{P1 \times \beta} + S_{P2 \times \beta} + \dots + S_{Pm \times \beta}$$

$$= \frac{\sum_{j=1}^m L_j^2}{r} - S_\beta$$

$$= \frac{\sum_{j=1}^{30} L_j^2}{r} - S_\beta$$

【 $f_{P \times \beta}$ 】

$S_{P \times \beta}$ には二乗の項が $m = 30$ 個あるので、

$$f_{P \times \beta} = m - f_\beta = 30 - 1 = 29$$

【 $V_{P \times \beta}$ 】

$$V_{P \times \beta} = \frac{S_{P \times \beta}}{f_{P \times \beta}}$$

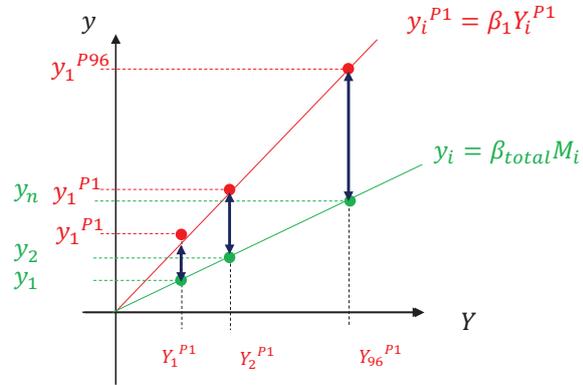


図17 センサの位置によって得られる出力が全データを考慮した回帰直線から乖離しているグラフィメージ (簡略化の為、 $y_i^{P1} = \beta_1 Y_i^{P1}$ のグラフのみ記載)

Source e について

Source e は回帰直線上からのデータのばらつきであったが、全データの二乗和は図12のように分解しているため、次の式から求めることが可能である。

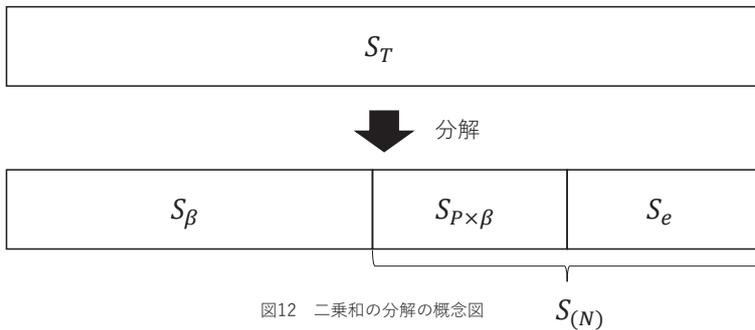


図12 二乗和の分解の概念図

【 S_e 】

$$S_e = S_T - S_\beta - S_{P \times \beta}$$

【 f_e 】

$$f_e = f_T - f_\beta - f_{P \times \beta}$$

【 V_e 】

$$V_e = \frac{S_e}{f_e}$$

Source (N) について

Source (N) は全ての有害成分（ノイズ）の二乗和であり、図12のようにSource $S_{P \times \beta}$ と e の合計である。

【 $S_{(N)}$ 】

$$S_{(N)} = S_e + S_{P \times \beta}$$

【 f_e 】

$$f_{(N)} = f_e + f_{P \times \beta}$$

【 V_e 】

$$V_{(N)} = \frac{S_{(N)}}{f_{(N)}}$$

標準SN比について

SN比： η とは有効エネルギーと有害エネルギーの比のことである。その比は常用対数で取るものとし、SN比が大きいほどノイズ（内乱及び外乱）に強いということを意味する。有効成分である二乗和は S_β であるが、真に有効な成分ではなく誤差： V_e が含まれていると考えられるため、その分の影響を引き真に有効な成分を推定する。また、有害成分は $V_{(N)}$ であり、SN比： η は下記の通り定式化される。

$$\eta = 10 \log \frac{\text{有効成分}}{\text{有害成分}}$$

$$= 10 \log \frac{S_\beta - V_e}{V_{(N)}} [db]$$

感度について

この場合の感度： β とは回帰直線の傾きを示す。標準SN比の計算を行うために横軸に理想状態における出力を適用しているため、感度が1に近いほど理想状態に近いと考えることができる。

$$\beta = 10 \log \frac{\sum_{j=1}^{30} L_j}{\sum_{j=1}^{30} r_j}$$

参考までに作成したANOVAと標準SN及び、傾きについて下記に示す。

ANOVA C01_E01-09 有効除数 r = 3.179E-03			
source	f	S	V
β	1	3.254E-03	3.254E-03
$P \times \beta$	29	5.279E-08	1.820E-09
e	2850	4.373E-07	1.534E-10
(N)	2879	4.901E-07	1.702E-10
T	2880	3.081E-03	
標準SN比	η	72.81	(db)
傾き	β	1.012	

ANOVA（実験No.1）

ANOVA C02_E01-09 有効除数 r = 3.179E-01			
source	f	S	V
β	1	3.176E-01	3.176E-01
$P \times \beta$	29	1.169E-07	4.030E-09
e	2850	6.380E-05	2.239E-08
(N)	2879	6.392E-05	2.220E-08
T	2880	3.081E-03	
標準SN比	η	71.55	(db)
傾き	β	1.000	

ANOVA（実験No.2）

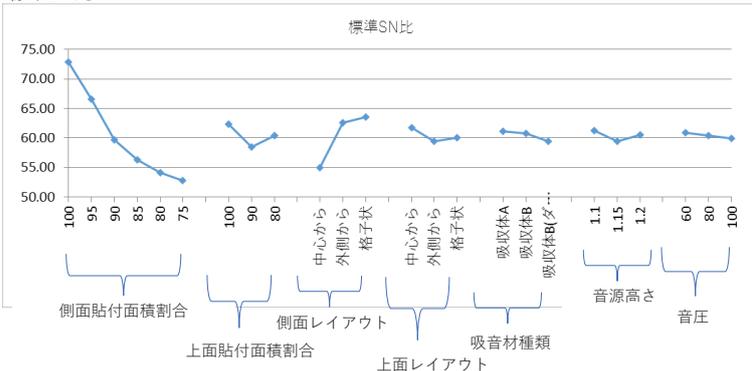
ANOVA C18_E01-09 有効除数 r = 3.179E-03			
source	f	S	V
β	1	3.064E-03	3.064E-03
$P \times \beta$	29	2.446E-07	8.436E-09
e	2850	1.629E-05	5.716E-09
(N)	2879	1.653E-05	5.743E-09
T	2880	3.081E-03	
標準SN比	η	57.27	(db)
傾き	β	0.982	

ANOVA（実験No.18）

図18 作成したANOVA

各標準SN比及び傾きについての要因効果図は下記となる。

標準SN比



傾き

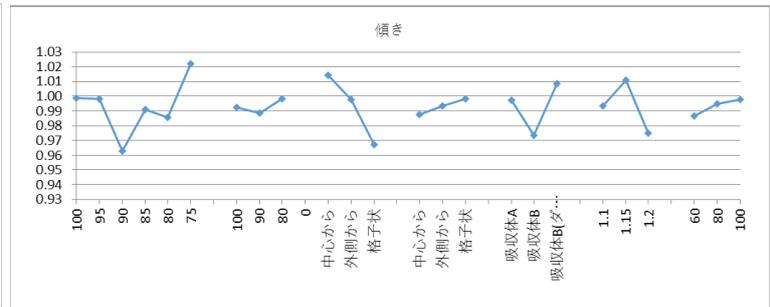


図19 要因効果図

ステップ7：最適条件（選定条件）の選択と工程平均の推定

要因効果図を基に最適条件（選定条件）を設定する。

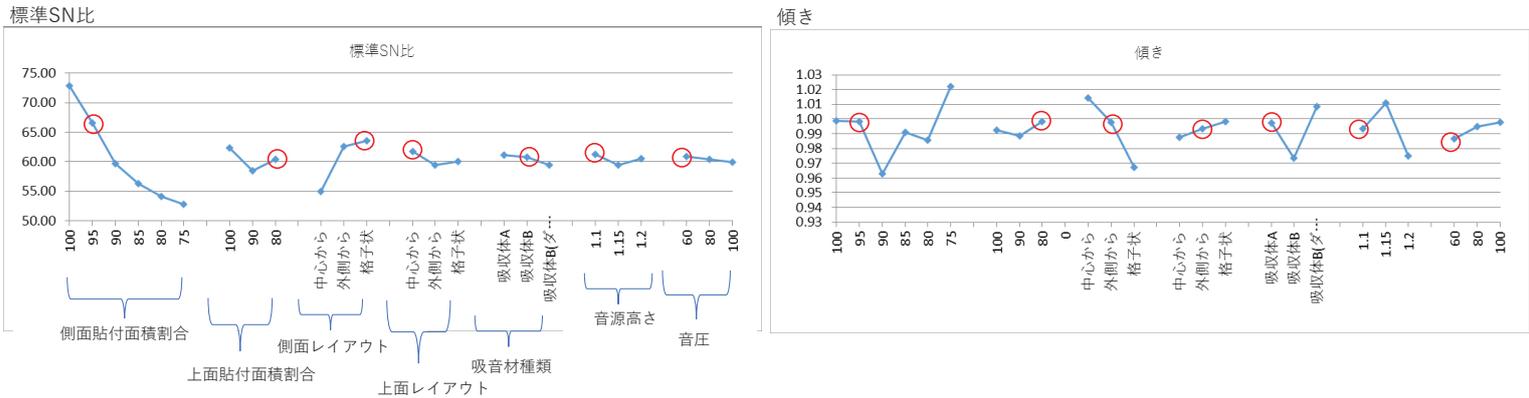


図20 要因効果図と選定条件

- ▶ 誤差因子は出力に大きな影響を与えていなかったため、傾きは1.0近辺の値をとりそのバラツキは0.05未満である。従って、傾きについては参考程度として標準SN比の値に着目して条件を選定した。
- ▶ 側面貼付面積割合のSN比が示す傾向は、面積割合が下がるほど減少しているのが妥当であると判断できる。
- ▶ 上面貼付面積割合の傾向については、V字カーブ（谷形の傾向）となっている。軽量化のため80%の条件をまずは選定した。
- ▶ 側面レイアウト及び上面レイアウトについては、標準SN比の傾向から側面は「格子状」、上面は「中心から」を選定した。
- ▶ 吸音材については吸収体Aの方が吸収体Bよりもやや標準SN比が良いものの、入手性の観点から吸収体Bを選定した。
- ▶ 音源高さは1.1の場合が標準SN比が高いため、条件として選定した。
- ▶ 音圧については、水準に応じて出力レベルが1/10や10倍となりSN比に関係ないことが判明した。よって、まずは80dBを条件として選定した。

19

ステップ7：最適条件（選定条件）の選択と工程平均の推定

前頁で推定された要因効果図を基に各因子と水準におけるSN比と傾きを推定した。

確認条件	因子と水準								推定			
	A	B	C	D	E	F	G	H	SN比	利得	傾き	利得
選定条件	2	3	3	1	2	1	2		72.32	-0.50	0.95	-0.06
全面貼付	1	1	1	1	1	1	1		72.81	基準	1.01	基準

ステップ8：確認実験

選定条件にて確認実験（シミュレーション）を行い、取得した標準SN比と傾きについて下記に示す。推定値と確認実験値の利得の差が3db程度であるので、再現性があると判断できる。要因効果図では、上面貼付面積割合や上面貼付レイアウトに若干の谷形傾向が確認されたが、再現性に大きな影響は表れていない。

確認条件	因子と水準								推定				確認結果				再現性	
	A	B	C	D	E	F	G	H	SN比	利得	傾き	利得	SN比	利得	傾き	利得	SN比	傾き
選定条件	2	3	3	1	2	1	2		72.32	-0.50	0.95	-0.06	69.56	-3.26	1.0111	0.00	-2.76	0.06
全面貼付	1	1	1	1	1	1	1		72.81	基準	1.01	基準	72.81	基準	1.01	基準	基準	基準

まとめ

- EMCシールドルームに設置する吸収体の配置レイアウトの最適化について、標準SN比を用いて評価し貼付するレイアウトや貼付場所に関する効果を定量的に示した。
- 定在波は空間のサイズによって生じる周波数帯域が異なり且つ貼付する吸収体の厚みも一定ではない。よって、誤差因子として室内の寸法を±2.5cm程度で変化させたが、出力に大きな影響はなかった。他の要因を誤差として設定することが望ましいことが確認された。誤差因子の候補としては、吸収体の周波数-吸収特性が挙げられる。
- 要因効果図から一部の因子にはV字カーブ（谷形傾向）が確認されたが、再現性に大きな影響は与えておらず、選定条件について再現性があることが確認された。

3.4 機構解析ツールによる Latch 設計

3.4.1 背景と目的

本報告では、機構解析ツールの Adams を利用し、Latch 製品の設計を対象とする。ここで取り上げた Latch 製品とは、アポロ計画において、月着陸船を司令/機械船に固定するために使用された機器である。計算機で使用したモデルは、機構解析ツールの Adams の入門用として利用されているものであり、シンプルな構造に置き換えられているものである。

線形解析においては、多峰性を持つ設計解空間の中から、局所解をキャンセルしつつ大域的な最適解を捜す必要がある。本研究では、非線形解析での最適解を算出するために、多水準直交表を利用した点に工夫がある。

3.4.2 実施内容

(1) 品質工学としての位置づけ

今回の課題においては、ユーザが Latch のハンドルを持って挟むという 1 種類の動作モードだけを想定していたため、品質工学における静特性と言われる手法で検討した。静特性は制御因子と誤差因子の直積実験によって行われるため、シンプルで分かりやすい特徴がある。しかし、実際の製品であれば、複数の動作モードを考える場合が多いため、静特性より動特性が使われる場合が多くなっている。

また本検討では、新しい試みとして品質工学の定義を利用してパラメータ成立範囲の算出を目的として行っている。これは、一般的にはセットベースデザインと言われる手法であり、自動車業界などで検討が進められている方法である。パラメータ成立範囲を算出するためには、多くの計算量が必要となるため、応答曲面で平滑化する方法がとられるが、この方法の難点は、応答曲面は非線形解析で利用すると解の精度が良くないという点である。そこで本検討では、応答曲面の様な近似式を用いずに、多水準直交表を用いて実現している点が特徴である。

(2) 品質工学の適用

制御因子としては、Latch モデルの取り付け位置とし、モデルが正常に動作できる範囲を設計探索範囲とした。また誤差因子としては、Latch を動作させる際のバラつきや劣化を表現するものとしてユーザの力と、モデルに付随するバネの力やバネ定数とした。目的関数は、発生する Latch 力 (800N 以上)、Latch 角度 (0 度であること)、ハンドル高さ (6cm 以下) の 3 つとして、それら 3 つを満足させる多目的最適化問題とした。

パラメータの初期値は、設計者の思い込みを排除するために、設計者が決めるのではなく、シミュレーションモデルの動作可能範囲を採用し、結果を見ながら段階的に絞り込む方法としている。

(3) 得られた結果

ユーザの力のバラつきや、バネの劣化等を考慮し、それらがどのような値を取ったとしても Latch 力、Latch 角度、ハンドル高さの 3 つの制約を満足できるパラメータ成立範囲の算出を行っている。このパラメータ成立範囲は実際に製造する場合の公差としての利用が可能であり、この範囲で製造して置けば性能を保證できる指針として利用できる。

3.4.3 まとめ

本検討により、非線形解析に対するロバスト設計解の算出法を示す事が出来た。今後は機構解析だけでなく、流体解析や制御解析などの非線形性が強い解析への適用を進め、有効性を検証していきたい。

品質工学の良いところは、品質工学を理解しておけば、その製品の専門家でなくても最適解が得られる可能性が高まる点である。本検討においても、検討を進める中で Latch 製品の特長などが把握でき、設計のコツの様なものが把握できた点は収穫であった。

出展

角有司，谷中洋司，木内大地，青山和浩，他，“製品情報と運用情報の組み合わせ探索による設計手法の研究（第 5 報：非線形解析における多目的ロバスト設計解の取得）”，日本機械学会 第 13 回最適化シンポジウム・2018. 10. 15-16

文献

- (1) 佐藤寛之，石渕久生，” 進化型多数目的最適化の現状と課題”，日本オペレーションズリサーチ学会誌，2017 年 3 月
- (2) 立川智章，渡辺毅，大山聖，” スーパーコンピュータ京を用いた大規模集団サイズでの多数目的進化計算”，進化型計算学会論文誌 Vo. 6 No. 3 2015
- (3) 石川晴雄，多目的最適化設計（セットベース設計手法による多目的満足化）、コロナ社（2010）」
- (4) 小平剛央，剣持寛正，大山聖，立川智章，” 応答曲面法を用いた複数車種の同時最適化ベンチマーク問題の提案”，進化型計算学会誌 Vol. 8 No. 1 2017

非線形解析への適用事例 (機構解析ツールによるLatch設計)



宇宙機の特長



様々なミッションを、厳しい環境で長期間（1年～5年以上）実施する必要がある。しかし、一度打ち上げると修理が出来ないため、高い信頼性が求められる。



Image from http://sec.gsfc.nasa.gov/sec_image_gallery.htm



業務の効率化・高信頼化には、CAEの役割が重要。

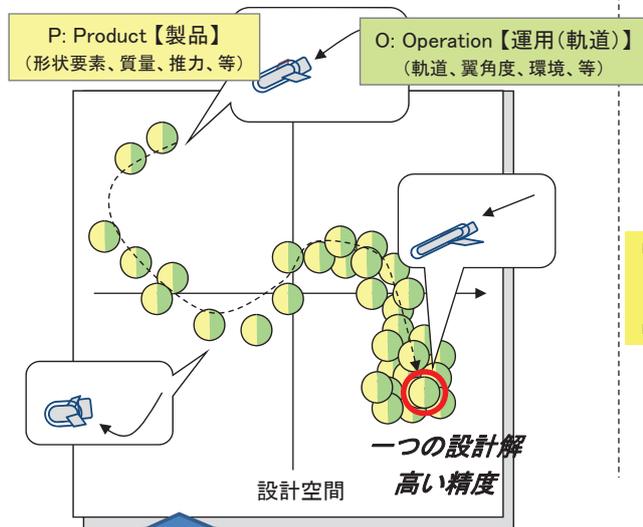
CAE結果の「他分野との情報共有」と「手戻りが少ない適切な判断」への要望が高い。

- ① 非線形解析の利用。
- ② 多目的最適化への対応。
- ③ ロバスト設計解の算出。

本研究が目指す設計手法

【従来の設計手法】

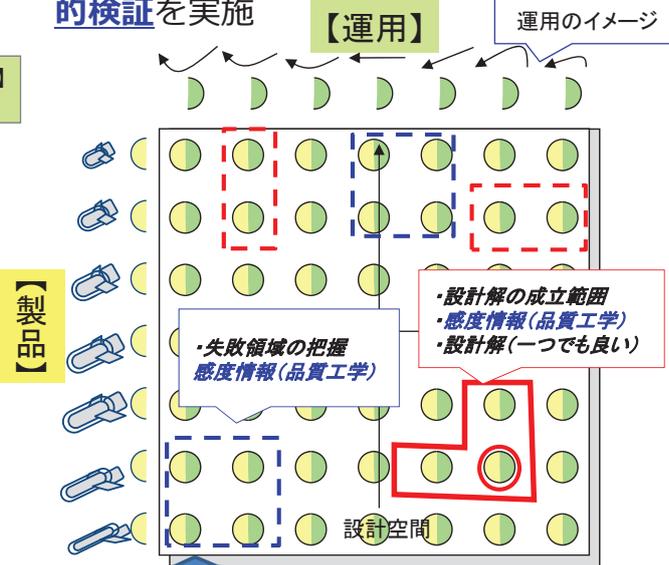
- 解析ツールに対し、【製品】と【運用】に関する多くのパラメータを試行錯誤しながら入力し、設計解を探索する。



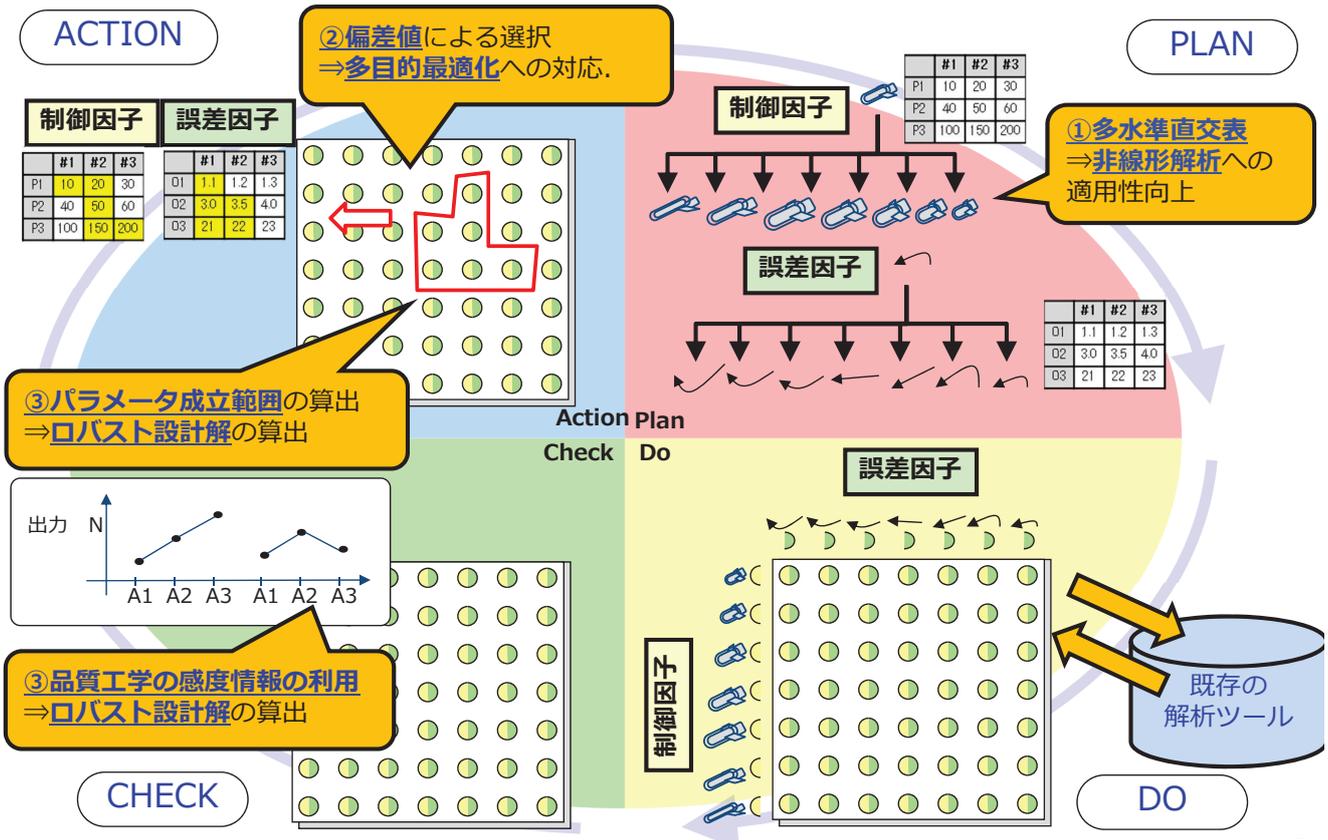
方向性：CAEツールによる自動設計

【本研究の設計手法】

- 品質工学と同様の思想。
- 【製品】と【運用】のパラメータの全ての組み合わせをあらかじめ準備し、CAEツールに入力・実行させることで、**網羅的検証**を実施



方向性：CAEツールとの対話



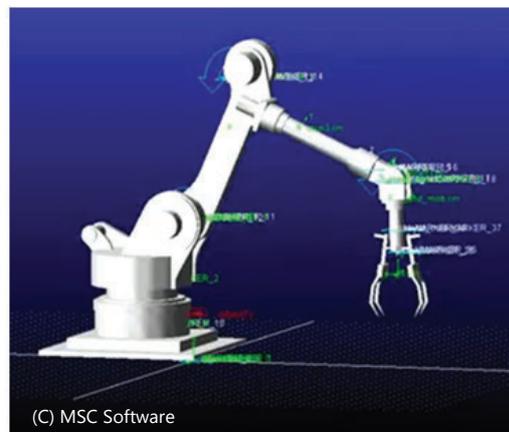
5

機構解析とは

機構解析 : Multibody Dynamics Analysis

- 複数の「剛体」や「弾性体」が、「ジョイント」や「ギヤ」等の位置を拘束する構造や、「バネ」や「ダンパー」や「アクチュエーター」など力を伝達する機構により相互に接続されたモデルが対象。
- 機械として運動する様子を、運動方程式の形にモデル化し、その振る舞いを調べる運動力学の手法である。

Last_Run Time= 0.0000 Frames=001



難しい点 :

- 各構造体の状態の組み合わせが膨大。網羅的な検証に労力がかかる。
- 各構造体の状態によっては、不安定な状態や実現不可能な状態となる。

Latch(ラッチ)設計問題

- 機構解析ツールAdamsのチュートリアル用のサンプルモデル。
- 大型輸送コンテナの2つの部分を安全に固定するためのラッチモデル。
- このラッチは、アポロ計画において、月着陸船を司令/機械船に固定するために使用された12のラッチの内の1つです。

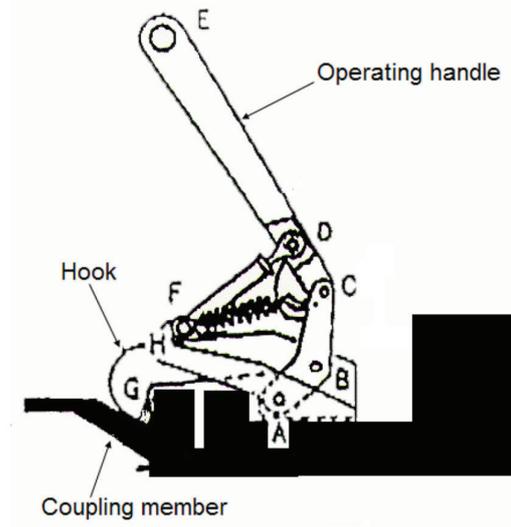
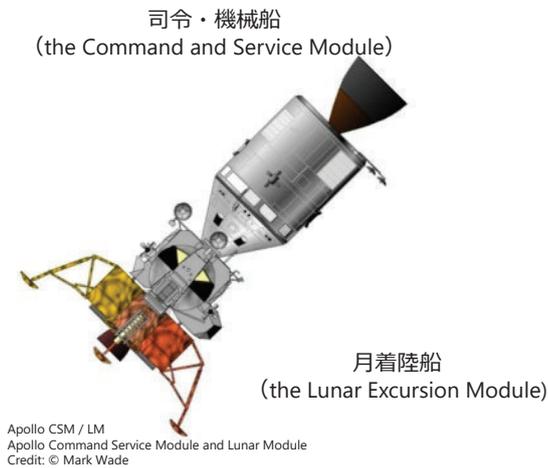
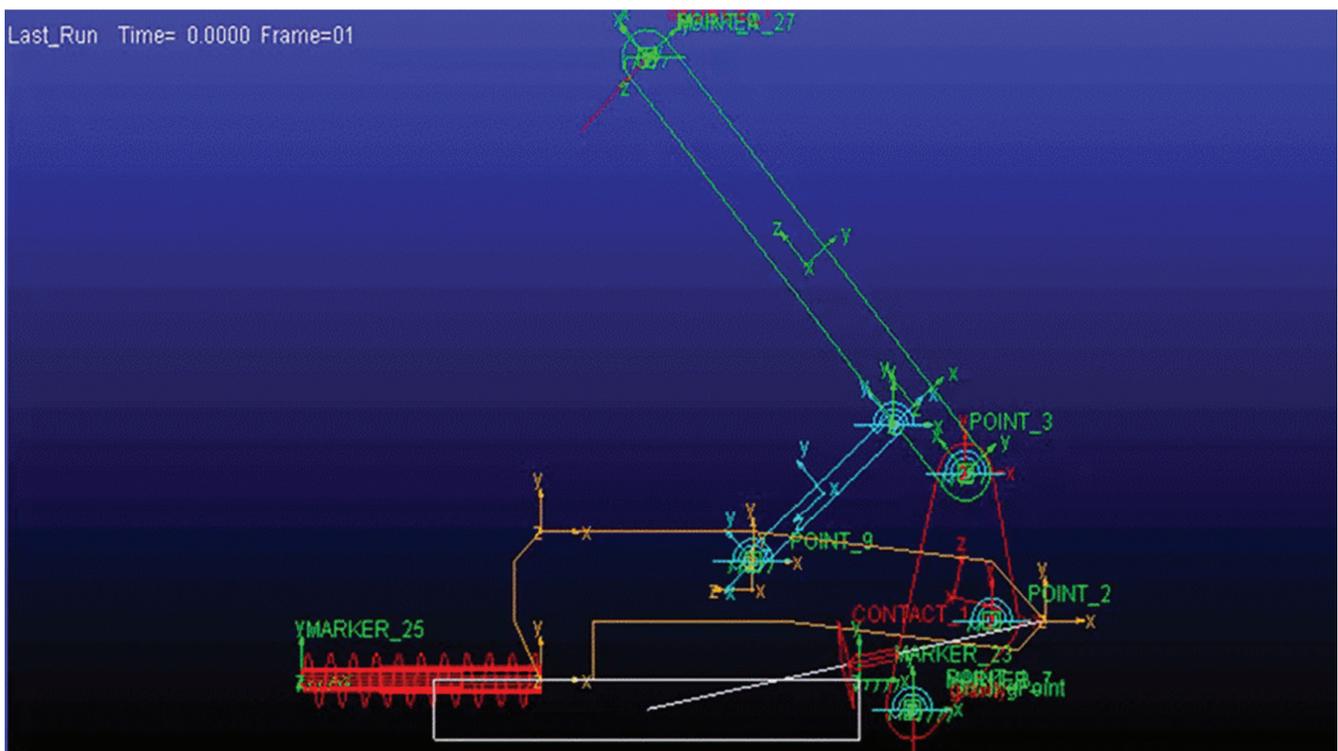
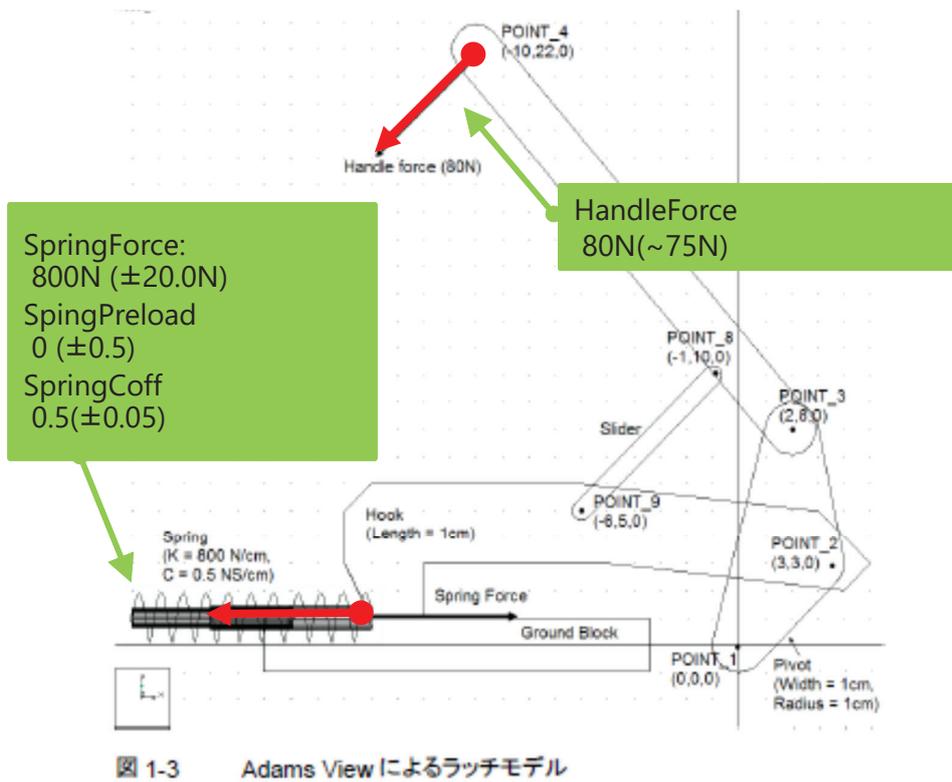
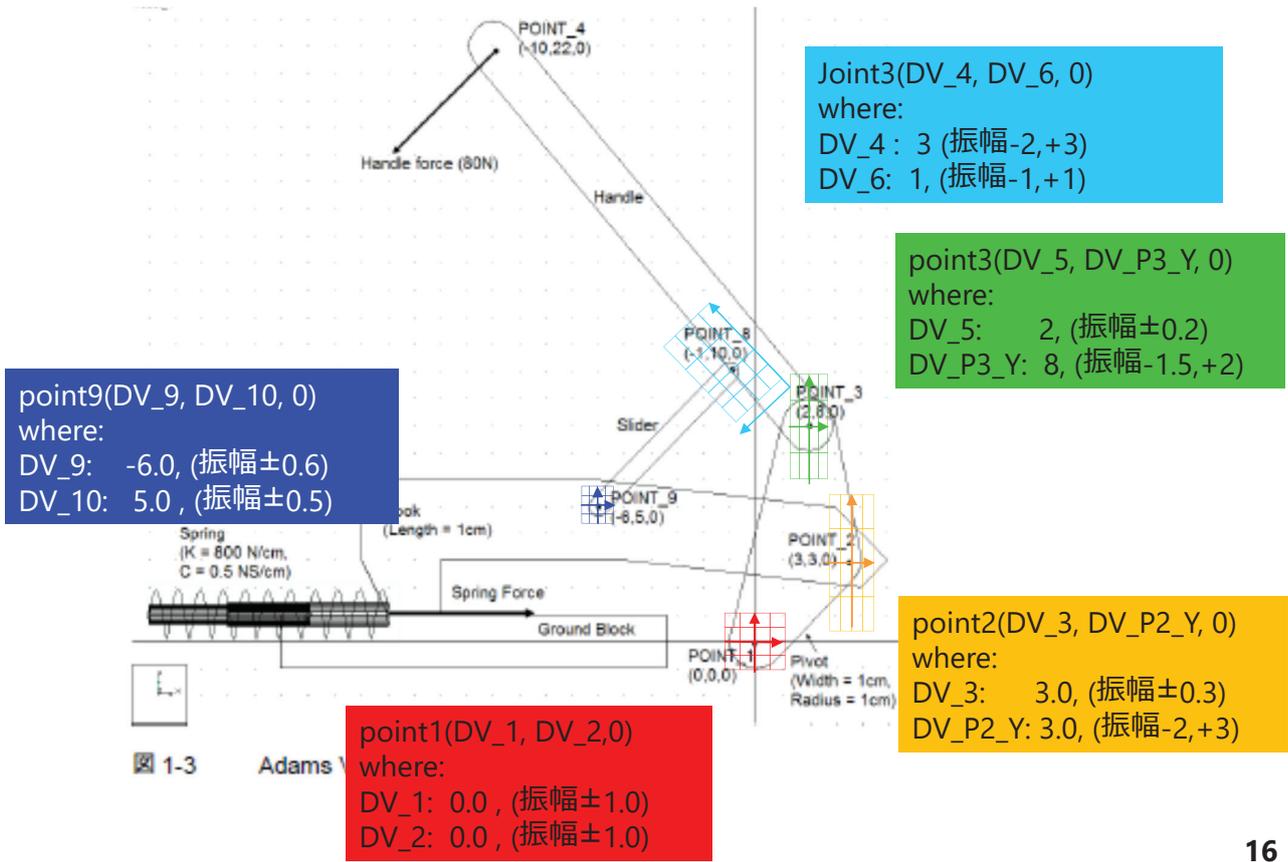


図 1-2 ハンドルラッチ設計の物理モデル

AdamsのLatchモデルの定義





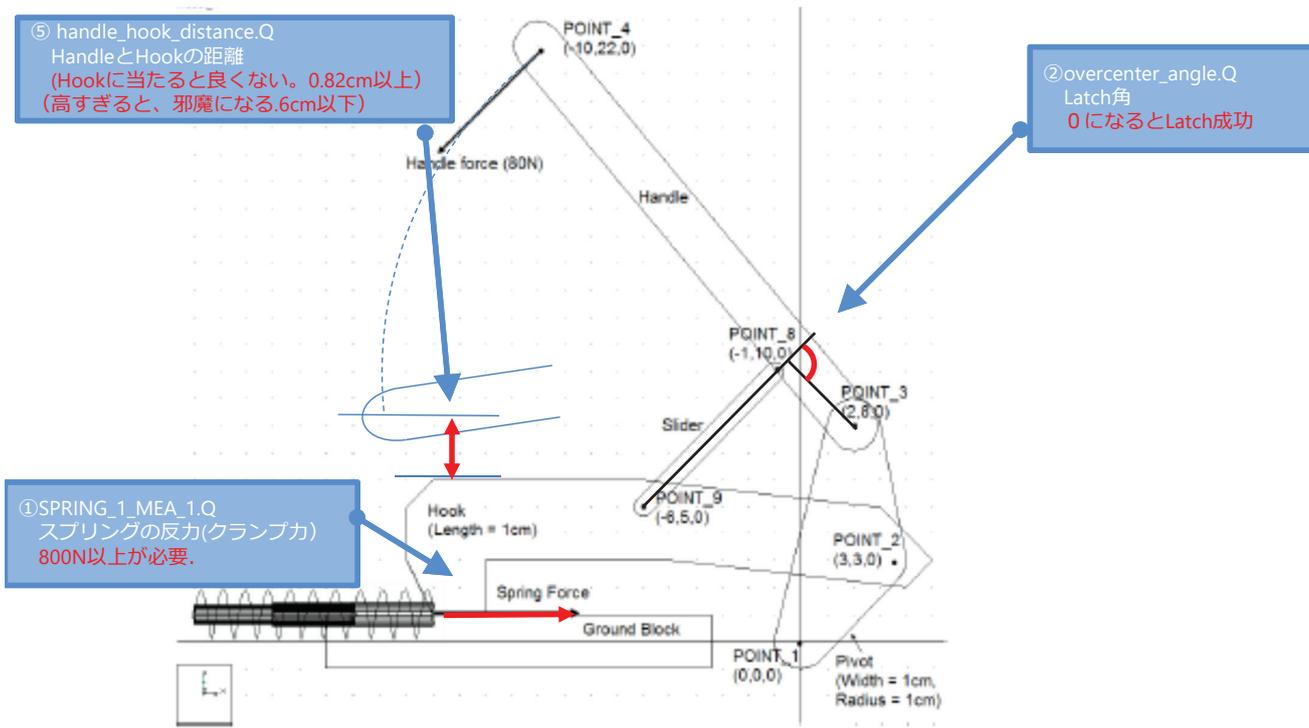


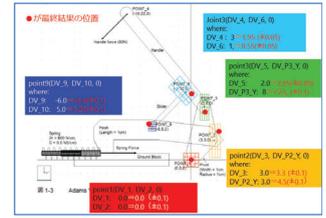
図 1-3 Adams View によるラッチモデル

検討 1 : デフォルト値での検討

【製品】 【運用】 パラメータの定義

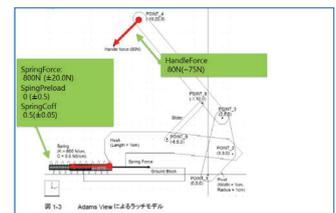
製品： P.8の範囲 (Latchモデルのデフォルトの範囲)
L50(5¹¹、2¹)直行表で割り付け

No.	パラメータ名 (単位)	水準 1	水準 2	水準 3	水準 4	水準 5
1	DV_1 (cm)	-1	-0.5	0	0.5	1
2	DV_2 (cm)	-1	-0.5	0	0.5	1
3	DV_3 (cm)	2.7	2.85	3	3.15	3.3
4	DV_P2_Y (cm)	1	2	3	4.5	6
5	DV_5 (cm)	1.8	1.9	2	2.1	2.2
6	DV_P3_Y (cm)	6.5	7.25	8	9	10
7	DV_4 (cm)	1	2	3	4	5
8	DV_6 (cm)	0	0.5	1	1.5	2
9	DV_9 (cm)	-6.6	-6.3	-6	-5.7	-5.4
10	DV_10 (cm)	4.5	4.75	5	5.25	5.5
11		0	0	0	0	0
12						



運用： HandleForce 75N~80N
L50(5¹¹、2¹)直行表で割り付け

No.	パラメータ名 (単位)	水準 1	水準 2	水準 3	水準 4	水準 5
1	HandleForce (N)	75	76	77.5	79	80.0
2	SpringForce (N)	780	790	800	810	820
3	SpringPreload (cm)	-0.5	-0.25	0.0	0.25	0.5
4	SpringCoff ()	0.45	0.475	0.5	0.525	0.55
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						



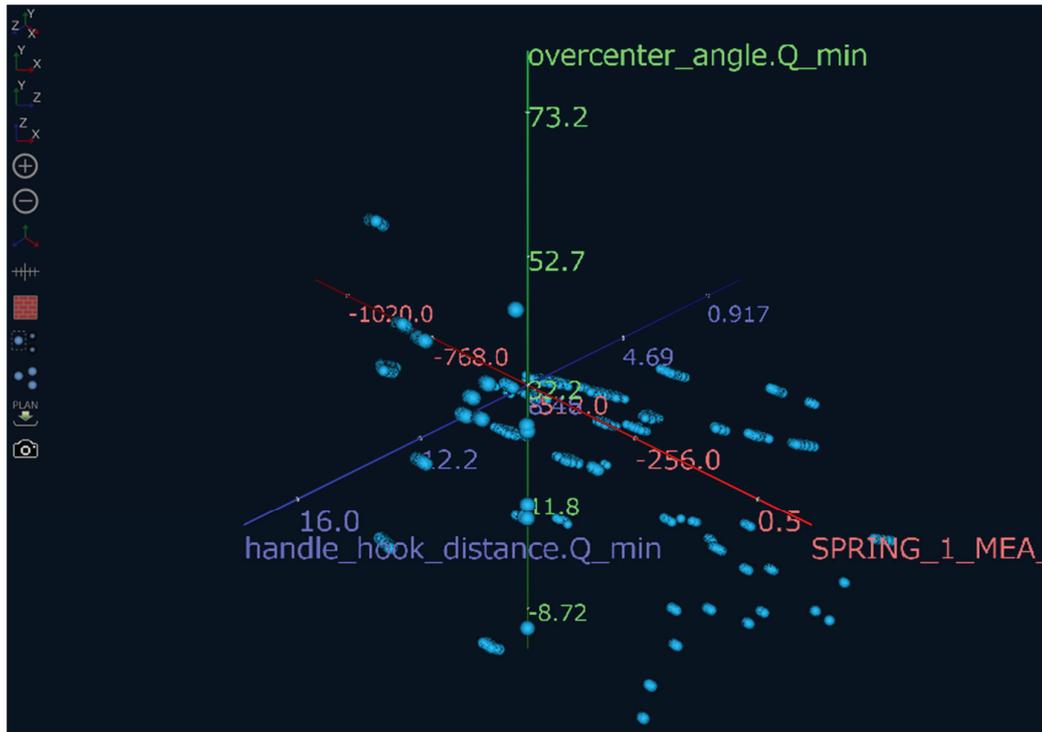
本システム(JIANT)による計算

【製品】パラメータ入力

【運用】パラメータの定義

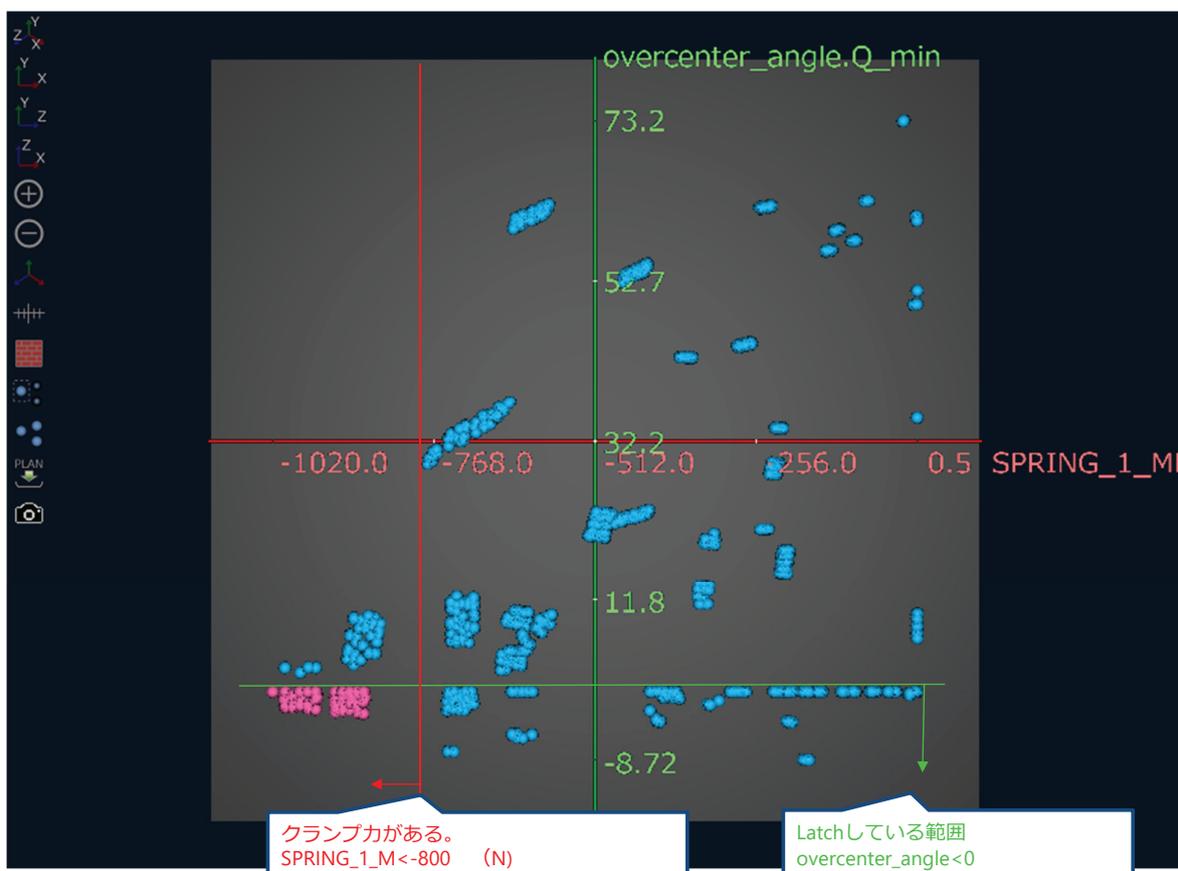
計算の実行

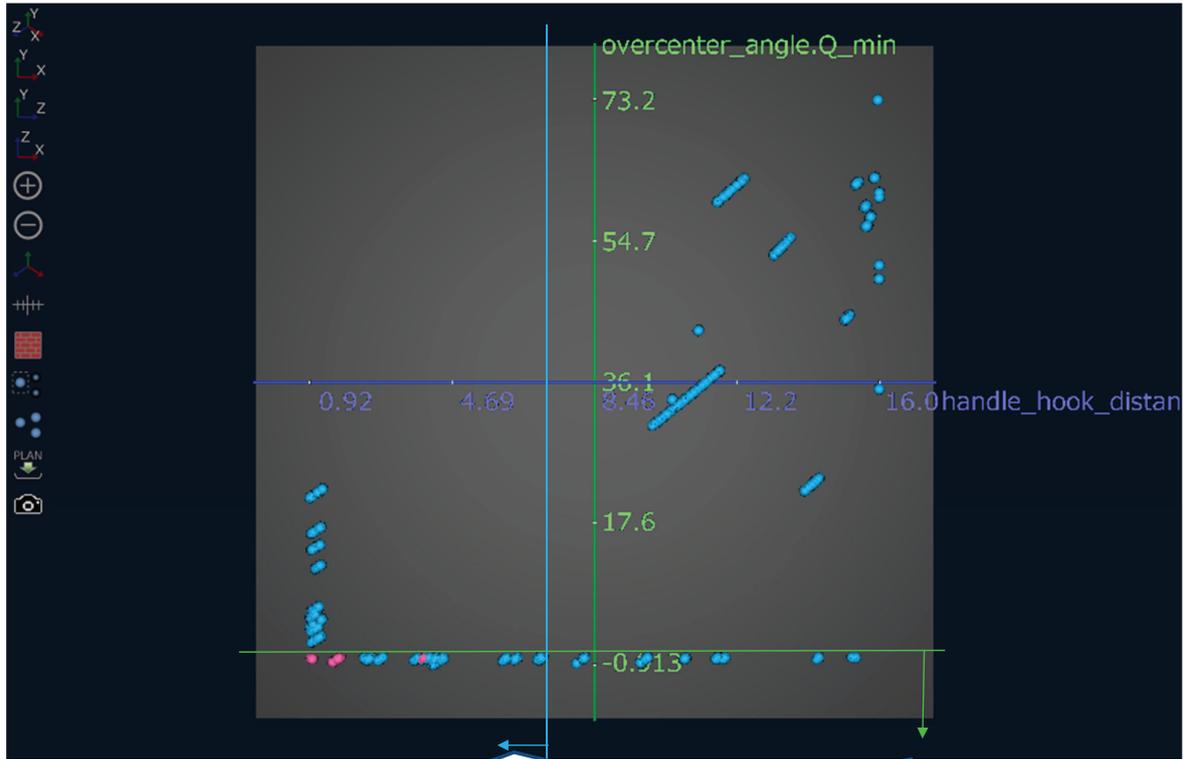
50x50=2500ケースの計算を実施。(1ケース約5秒)
計算時間：約4時間



名称	パラメータ名	目標値	結果	
① スプリングの反力(Latch力)	SPRING_1_MEA_1.Q	-800(N)以下	0.5 ~ -1024.6	(N)
② Latch角	overcenter_angle.Q	0度でLatch完了	73~-8.72	(度)
③ HandleとHookの距離	handle_hook_distance.Q	0.92~6(cm)	15~0.917	(cm)

マップによる確認





⑤ handle_hook_distance.Q
HandleとHookの距離
高すぎると、邪魔になる6cm以下

Latchしている範囲
overcenter_angle<0

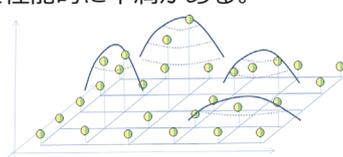
制約範囲を満たす【製品】【運用】ランキング

No.	製品名	偏差値	ラッチ力 (N)	ラッチ角度 (度)	ラッチ高さ (cm)
1	p026	65.45	-923.4	-0.1	3.9
2	p002	64.11	-738.1	5.5	1.1
3	p042	63.22	-707.8	2.2	2.1
4	p046	62	-704.9	1	3
5	p003	61	-699.6	4	3
6	p011	61.23	-698.1	5.4	3.7
7	p023	60.91	-667.7	11.8	2.9
8	p014	58.15	-596.7	-0.2	3.5
9	p047	57.99	-593.9	0.8	2.9
10	p050	57.92	-595.7	10.9	1.3
11	p048	56.66	-510.1	0.7	3.9
12	p034	56.45	-534.3	3.5	3.4
13	p006	55.82	-529.2	9.9	2.2
14	p007	54.62	-569.6	17.7	2.4
15	p001	54.58	-542.2	7.4	2.4
16	p024	54.04	-517.9	2.7	3.5
17	p028	53.53	-540.7	2.1	4.5
18	p039	53.32	-500.6	2.6	8.2
19	p013	53.24	-536.9	2.5	9.1
20	p012	53.08	-559.5	1.2	6.3
21	p002	52.83	-540.7	1.2	5.9
22	p041	52.62	-534.9	2.2	8.6
23	p017	52.49	-501.9	3.1	5.3
24	p029	52.33	-595.9	2.6	7.9
25	p050	52.1	-528.0	12.3	10.1
26	p038	51.78	-528.0	0.8	10.6
27	p020	50.97	-447.7	21.9	14.1
28	p025	49.25	-48.6	3.5	11.9
29	p027	48.75	-585.4	10.9	13.9
30	p040	48.19	-587.8	37.1	11.9
31	p033	47.14	-511.0	38.6	10.9
32	p019	46.88	-552.7	26.7	13.4
33	p010	46.79	-599.7	21.5	13.4
34	p018	46.7	-523.0	0.0	15.4
35	p008	45.85	-460.0	54.1	13.5
36	p045	45.8	-588.7	44.7	15.2
37	p036	45.01	-20.5	35.3	16.0
38	p015	43.21	-254.8	62.2	15.4
39	p044	40.74	-57.1	56.7	15.7
40	p037	40.33	-548.2	59.2	15.7
41	p005	39.75	-517.4	57.7	15.8
42	p004	39.61	-37.8	48.9	15.7
43	p021	39.28	-25.0	49.7	16.0
44	p049	38.89	-20.6	51.9	16.0
45	p029	38.83	-98.4	63.0	15.9
46	p022	38.8	-20.5	60.4	16.0
47	p021	38.09	-20.6	61.0	16.0
48	p038	37.42	-43.7	73.2	16.0
49	p043	37.35	-19.1	0.0	0.0
50	p016	36.03	-19.1	0.0	0.0

No.	パラメータ名(単位)	水準1	水準2	水準3	水準4	水準5
1	DV 1 (cm)	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0
2	DV 2 (cm)	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0
3	DV 3 (cm)	2.7	2.85	3.0	3.15	3.3
4	DV P2 Y (cm)	1.0	2.0	3.0	4.5	6.0
5	DV 5 (cm)	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2
6	DV P3 Y (cm)	6.5	7.25	8.0	9.0	10.0
7	DV 4 (cm)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
8	DV 6 (cm)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
9	DV 9 (cm)	-6.6	-6.3	-6.0	-5.7	-5.4
10	DV 10 (cm)	4.5	4.75	5.0	5.25	5.5
11						
12						

No.	運用名	SPRING_1_MEAN_Q_min	overcenter_angle.Q_min	handle_hook_distance.Q_min
1	p043	-295.5	19.9	8.6
2	p042	-279.5	20.4	8.7
3	p041	-279.6	20.4	8.7
4	p022	-285.4	21.1	8.7
5	p012	-276.8	21.1	8.7
6	p050	-283.8	21.1	8.9
7	p049	-283.3	21.2	8.9
8	p048	-281.2	21.1	8.9
9	p047	-281.4	21.1	8.9
10	p046	-279.5	21.0	8.9
11	p045	-279.6	21.0	8.9
12	p039	-282.8	21.2	8.9
13	p040	-282.7	21.2	9.0
14	p029	-281.3	21.2	8.9
15	p030	-281.2	21.2	8.9
16	p044	-277.0	21.0	8.9
17	p038	-280.1	21.2	8.9
18	p037	-280.3	21.2	8.9
19	p036	-278.2	21.1	8.9
20	p035	-278.4	21.1	8.9
21	p034	-275.9	21.1	8.9
22	p028	-279.1	21.2	8.9
23	p019	-279.8	21.2	9.0
24	p027	-278.7	21.2	8.9
25	p020	-279.7	21.3	9.0
26	p023	-275.3	21.1	8.9
27	p025	-276.1	21.1	8.9
28	p032	-273.4	21.0	8.9
29	p031	-273.6	21.0	8.9
30	p026	-276.0	21.2	8.9
31	p018	-277.1	21.2	9.0
32	p017	-277.2	21.2	9.0
33	p024	-274.0	21.1	8.9
34	p023	-274.2	21.1	8.9
35	p010	-278.1	21.3	9.0
36	p009	-278.2	21.3	9.0
37	p015	-274.6	21.2	8.9
38	p008	-276.0	21.3	9.0
39	p007	-276.4	21.3	9.0
40	p021	-271.7	21.1	8.9
41	p016	-274.5	21.2	9.0
42	p013	-272.5	21.2	8.9
43	p006	-274.0	21.2	9.0
44	p014	-272.4	21.2	8.9
45	p005	-273.5	21.3	9.0
46	p011	-270.0	21.1	8.9
47	p004	-271.4	21.2	9.0
48	p003	-271.5	21.2	9.0
49	p002	-269.4	21.2	8.9
50	p001	-269.5	21.2	8.9

【製品】
NO.1は良好 (Hook力が平均-923.4N、Latchも高さも良好)
それ以下は、ちょっと性能的に不満がある。



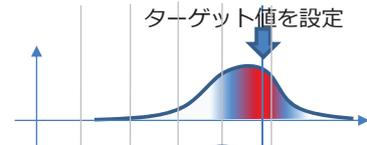
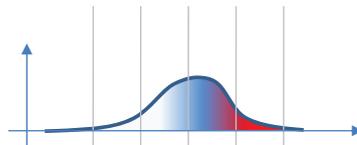
偏差値のメリット

- ・簡単な課題を解いた場合と、難しい課題を解いた場合とを総合的に扱える。
- ・設計者が関与しやすい（直感的な分かりやすさ、傾斜配点による総合評価）

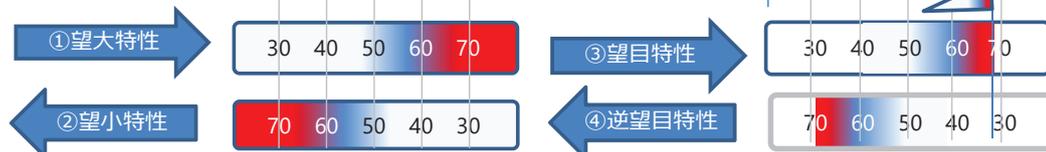
偏差値による評価手法

1. 評価対象の出力結果に対して、制約条件を設定する。
条件としては以下の4種類
 - ① 望大特性
 - ② 望小特性
 - ③ 望目特性
 - ④ 逆望目特性
2. 制約条件の満足度に応じて、偏差値を算出。

CAE結果の分布



偏差値換算の結果

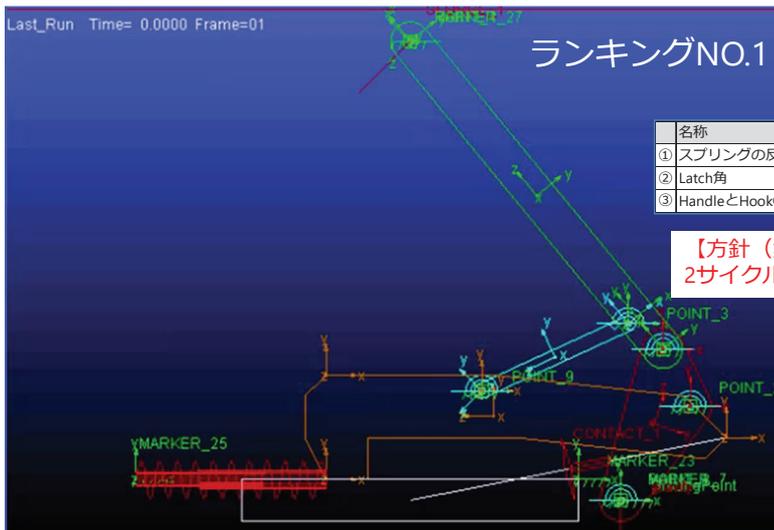


【特願2018-193340】

結果の確認

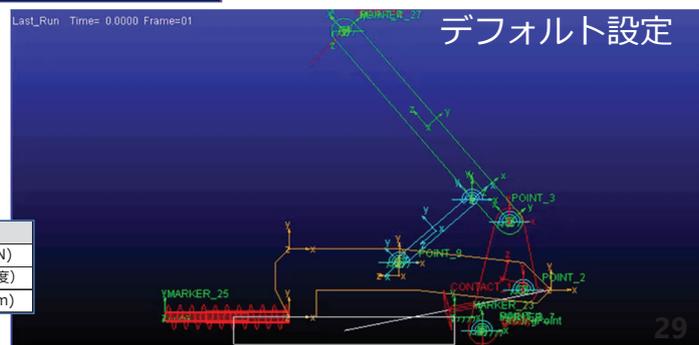
p026

No.	パラメータ名(単位)	水準1	水準2	水準3	水準4	水準5
1	DV 1 (cm)	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0
2	DV 2 (cm)	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0
3	DV 3 (cm)	2.7	2.85	3.0	3.15	3.3
4	DV P2 Y (cm)	1.0	2.0	3.0	4.5	6.0
5	DV 5 (cm)	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2
6	DV P3 Y (cm)	6.5	7.25	8.0	9.0	10.0
7	DV 4 (cm)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
8	DV 6 (cm)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
9	DV 9 (cm)	-6.8	-6.3	-6.0	-5.7	-5.4
10	DV 10 (cm)	4.5	4.75	5.0	5.25	5.5
11						
12						



名称	パラメータ名	目標値	結果	
① スプリングの反力(Latch力)	SPRING_1_MEA_1.Q	-800(N)以下	-980	(N)
② Latch角	overcenter_angle.Q	0度でLatch完了	-0.7	(度)
③ HandleとHookの距離	handle_hook_distance.Q	0.92~6(cm)	1.5	(cm)

【方針(案)】
2サイクル目は、【製品】No.1のp026をベースに行う。



名称	パラメータ名	目標値	結果	
① スプリングの反力(Latch力)	SPRING_1_MEA_1.Q	-800(N)以下	-704	(N)
② Latch角	overcenter_angle.Q	0度でLatch完了	0	(度)
③ HandleとHookの距離	handle_hook_distance.Q	0.92~6(cm)	2.4	(cm)

参考) ランキング 2、3位の結果

p002

No.	パラメータ名(単位)	水準1	水準2	水準3	水準4	水準5
1	DV 1(cm)	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0
2	DV 2(cm)	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0
3	DV 3(cm)	2.7	2.85	3.0	3.15	3.3
4	DV P2 Y(cm)	1.0	2.0	3.0	4.5	6.0
5	DV 5(cm)	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2
6	DV P3 Y(cm)	6.5	7.25	8.0	9.0	10.0
7	DV 4(cm)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
8	DV 6(cm)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
9	DV 9(cm)	-6.6	-6.3	-6.0	-5.7	-5.4
10	DV 10(cm)	4.5	4.75	5.0	5.25	5.5
11						
12						

名称	パラメータ名	目標値	結果	
① スプリングの反力(Latch力)	SPRING_1_MEA_1.Q	-800(N)以下	-738	(N)
② Latch角	overcenter_angle.Q	0度でLatch完了	5.5	(度)
③ HandleとHookの距離	handle_hook_distance.Q	0.92~6(cm)	1.1	(cm)

p042

No.	パラメータ名(単位)	水準1	水準2	水準3	水準4	水準5
1	DV 1(cm)	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0
2	DV 2(cm)	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0
3	DV 3(cm)	2.7	2.85	3.0	3.15	3.3
4	DV P2 Y(cm)	1.0	2.0	3.0	4.5	6.0
5	DV 5(cm)	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2
6	DV P3 Y(cm)	6.5	7.25	8.0	9.0	10.0
7	DV 4(cm)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
8	DV 6(cm)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
9	DV 9(cm)	-6.6	-6.3	-6.0	-5.7	-5.4
10	DV 10(cm)	4.5	4.75	5.0	5.25	5.5
11						
12						

名称	パラメータ名	目標値	結果	
① スプリングの反力(Latch力)	SPRING_1_MEA_1.Q	-800(N)以下	-708	(N)
② Latch角	overcenter_angle.Q	0度でLatch完了	2.2	(度)
③ HandleとHookの距離	handle_hook_distance.Q	0.92~6(cm)	1.9	(cm)

p041

No.	パラメータ名(単位)	水準1	水準2	水準3	水準4	水準5
1	DV 1(cm)	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0
2	DV 2(cm)	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0
3	DV 3(cm)	2.7	2.85	3.0	3.15	3.3
4	DV P2 Y(cm)	1.0	2.0	3.0	4.5	6.0
5	DV 5(cm)	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2
6	DV P3 Y(cm)	6.5	7.25	8.0	9.0	10.0
7	DV 4(cm)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
8	DV 6(cm)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
9	DV 9(cm)	-6.6	-6.3	-6.0	-5.7	-5.4
10	DV 10(cm)	4.5	4.75	5.0	5.25	5.5
11						
12						

参考) NGのパラメータの組み合わせ

HandelForceが不足

Latchが早すぎ

No.	パラメータ名(単位)	水準1	水準2	水準3	水準4	水準5
1	DV 1(cm)	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0
2	DV 2(cm)	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0
3	DV 3(cm)	2.7	2.85	3.0	3.15	3.3
4	DV P2 Y(cm)	1.0	2.0	3.0	4.5	6.0
5	DV 5(cm)	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2
6	DV P3 Y(cm)	6.5	7.25	8.0	9.0	10.0
7	DV 4(cm)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
8	DV 6(cm)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
9	DV 9(cm)	-6.6	-6.3	-6.0	-5.7	-5.4
10	DV 10(cm)	4.5	4.75	5.0	5.25	5.5
11						
12						

- : 最終結果の位置
- ② : 2番目の結果
- ③ : 3番目の結果
- Ⓐ : NG (HForce不足)
- Ⓑ : NG (Latch早すぎ)

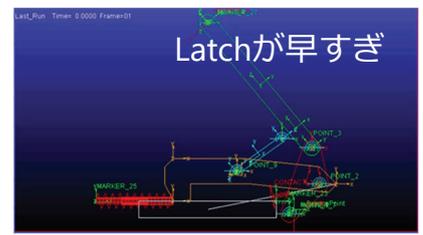
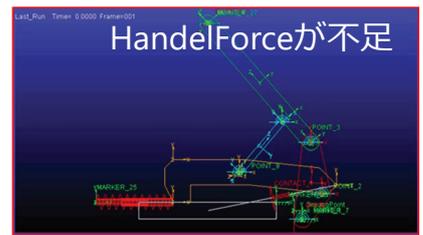
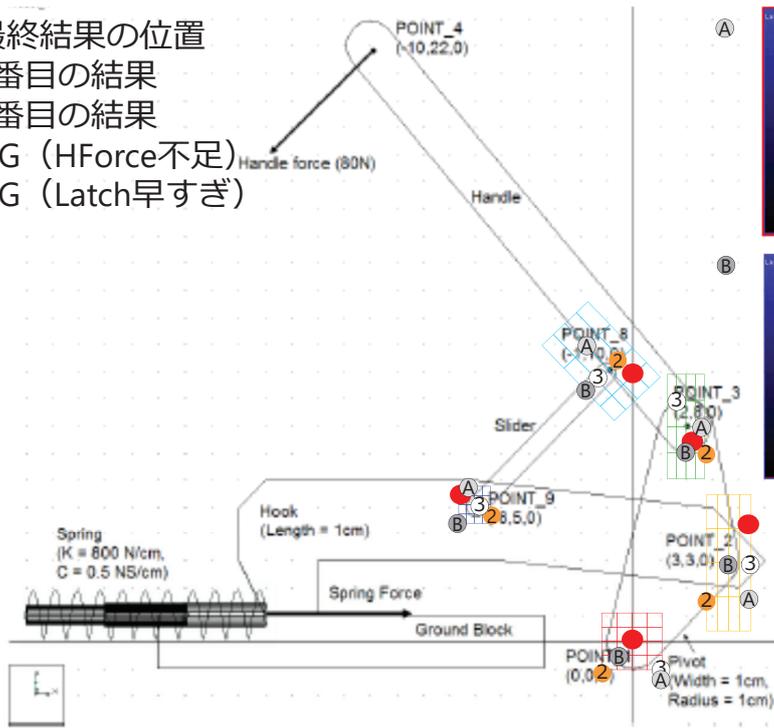


図 1-3 Adams View によるラッチモデル

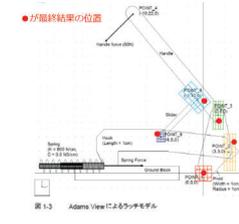
検討 2 : チャンピオンデータを中心に、±0.1cm

【製品】 【運用】 パラメータの定義

製品： **ランキングNO.1を±0.1cmで振りなおし**
L50(5[^]11、2[^]1)直行表で割り付け

No.	パラメータ名(単位)	水準1	水準2	水準3	水準4	水準5
1	DV 1(cm)	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0
2	DV 2(cm)	-1.0	-0.5	0.0	0.5	1.0
3	DV 3(cm)	2.7	2.85	3.0	3.15	3.3
4	DV P2 Y(cm)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
5	DV 5(cm)	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2
6	DV P3 Y(cm)	6.5	7.25	8.0	9.0	10.0
7	DV 4(cm)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
8	DV 6(cm)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
9	DV 9(cm)	-6.8	-6.3	-6.0	-5.7	-5.4
10	DV 10(cm)	4.5	4.75	5.0	5.25	5.5
11						
12						

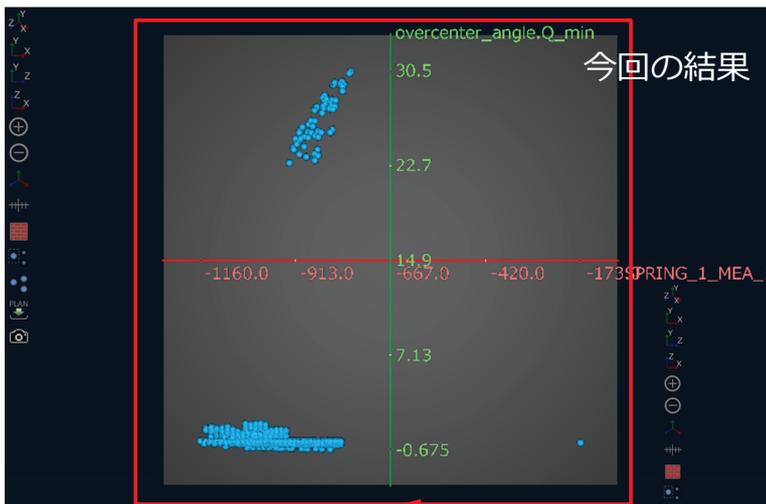
No.	パラメータ名(単位)	水準1	水準2	水準3	水準4	水準5
1	DV 1(cm)	-0.10	-0.05	0.0	0.05	0.10
2	DV 2(cm)	-0.10	-0.05	0.0	0.05	0.10
3	DV 3(cm)	3.20	3.25	3.30	3.35	3.40
4	DV P2 Y(cm)	4.40	4.45	4.50	4.55	4.60
5	DV 5(cm)	2.00	2.03	2.05	2.08	2.10
6	DV P3 Y(cm)	7.15	7.20	7.25	7.30	7.35
7	DV 4(cm)	1.90	1.93	1.95	1.98	2.00
8	DV 6(cm)	0.50	0.53	0.55	0.58	0.60
9	DV 9(cm)	-6.70	-6.65	-6.60	-6.55	-6.50
10	DV 10(cm)	5.15	5.20	5.25	5.30	5.35
11						
12						



運用： HandleForce 75N~80N (前回と同じ)
L50(5[^]11、2[^]1)直行表で割り付け

No.	パラメータ名(単位)	水準1	水準2	水準3	水準4	水準5
1	HandleForce (N)	75	76	77.5	79	80.0
2	SpringForce (N)	780	790	800	810	820
3	SpringPreload (cm)	-0.5	-0.25	0.0	0.25	0.5
4	SpringCoff ()	0.45	0.475	0.5	0.525	0.55
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						

3D画面による確認



水色が1回目、グレーの部分が2回目



名称	パラメータ名	目標値	結果	
① スプリングの反力(Latch力)	SPRING_1_MEA_1.Q	-800(N)以下	-782~-1160	(N)
② Latch角	overcenter_angle.Q	0度でLatch完了	3.0~-3.3	(度)
③ HandleとHookの距離	handle_hook_distance.Q	0.92~6(cm)	10.1~0.917	(cm)

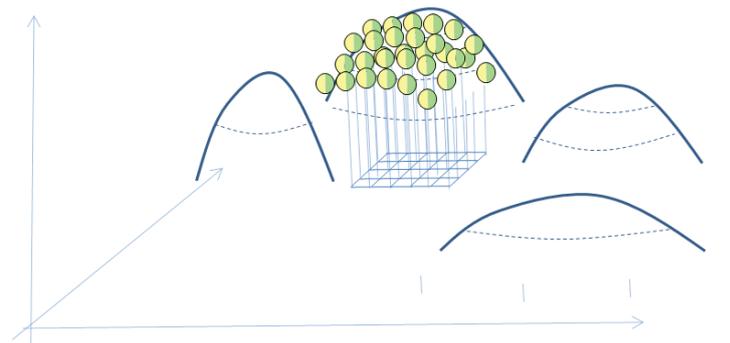
名称	パラメータ名	目標値	結果	
① スプリングの反力(Latch力)	SPRING_1_MEA_1.Q	-800(N)以下	0.5~-1024.6	(N)
② Latch角	overcenter_angle.Q	0度でLatch完了	73~-8.72	(度)
③ HandleとHookの距離	handle_hook_distance.Q	0.92~6(cm)	15~0.917	(cm)

No.	製品名	SPRING_1_MEA_1_Q_min	overcenter_angle.Q_min	handle_hook_distance.Q_min
1	p050	-887.12	-0.170	1.83
2	p028	-904.99	-0.169	1.89
3	p013	-935.23	-0.168	2.08
4	p035	-888.39	-0.165	2.41
5	p033	-906.51	-0.155	2.55
6	p029	-854.57	-0.158	2.50
7	p040	-832.90	-0.154	2.24
8	p030	-894.08	-0.151	1.91
9	p025	-929.24	-0.153	1.92
10	p005	-1,013.61	-0.153	1.57
11	p007	-932.22	-0.150	2.12
12	p015	-990.91	-0.144	1.77
13	p049	-1,020.32	-0.139	1.47
14	p042	-967.95	-0.142	1.97
15	p041	-1,025.22	-0.139	1.38
16	p026	-895.92	-0.141	1.46
17	p020	-916.56	-0.140	1.93
18	p006	-965.02	-0.139	2.05
19	p048	-958.52	-0.135	1.25
20	p045	-820.64	-0.135	2.89
21	p039	-969.48	-0.137	1.14
22	p027	-952.04	-0.138	2.34
23	p017	-871.39	-0.137	2.23
24	p004	-1,048.71	-0.135	1.51
25	p032	-938.33	-0.135	2.78
26	p014	-946.99	-0.132	2.46
27	p012	-883.39	-0.133	2.29
28	p011	-1,017.09	-0.134	1.51
29	p009	-938.24	-0.135	2.44
30	p036	-1,037.01	-0.131	1.19
31	p008	-815.28	-0.128	2.96
32	p003	-1,008.39	-0.130	1.23
33	p031	-1,042.79	-0.125	1.59
34	p044	-1,042.08	-0.122	2.57
35	p018	-1,032.34	-0.117	1.04
36	p002	-1,052.93	-0.102	1.24
37	p043	-1,067.94	-0.089	1.80
38	p046	-1,071.43	0.031	0.96
39	p034	-992.27	0.042	0.88
40	p001	-1,003.54	0.408	1.04
41	p023	-1,050.12	0.439	1.00
42	p047	-995.09	0.548	1.03
43	p037	-1,091.41	0.623	1.01
44	p024	-963.03	0.642	1.05
45	p019	-1,090.17	0.760	1.00
46	p010	-1,017.01	1.203	1.03
47	p022	-1,050.04	2.814	3.03
48	p016	-1,088.16	3.919	1.96
49	p021	-1,036.39	9.128	3.85
50	p038	-959.30	15.089	6.08

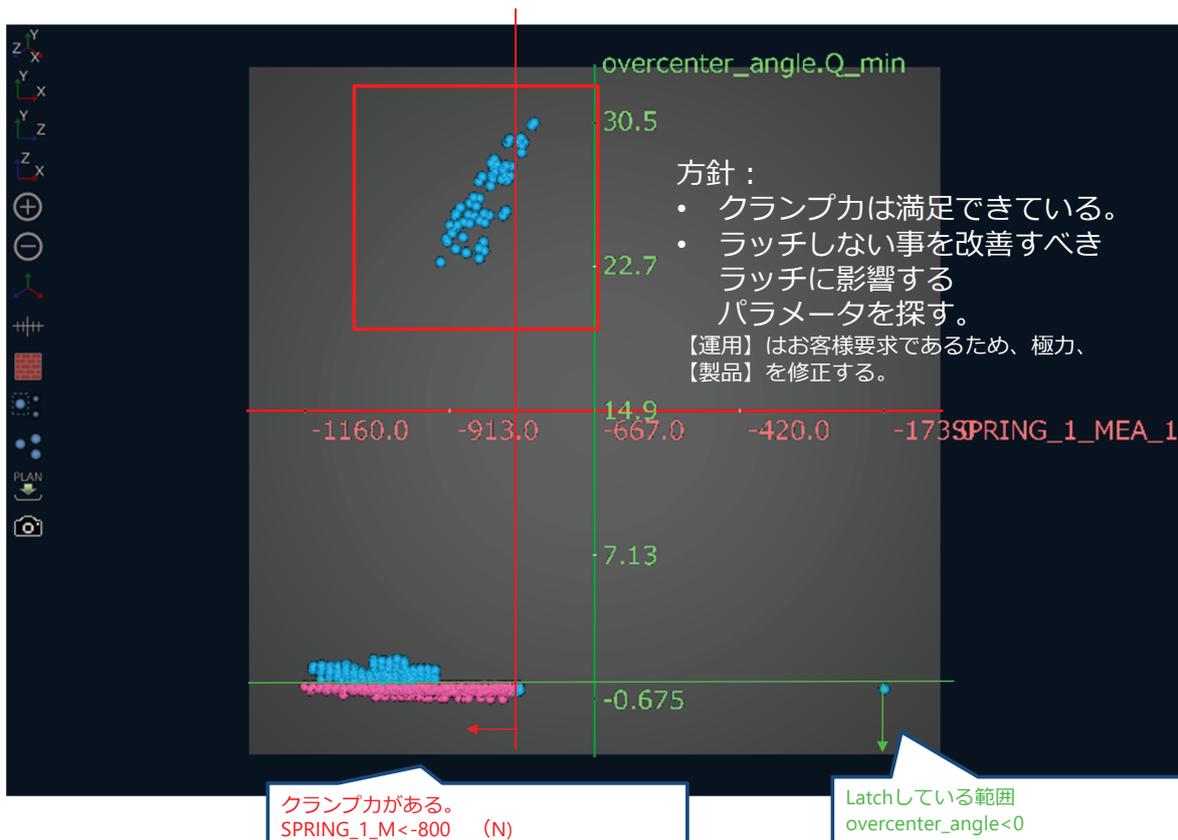
どの結果も制約条件をほぼ満足していて大差が無い。

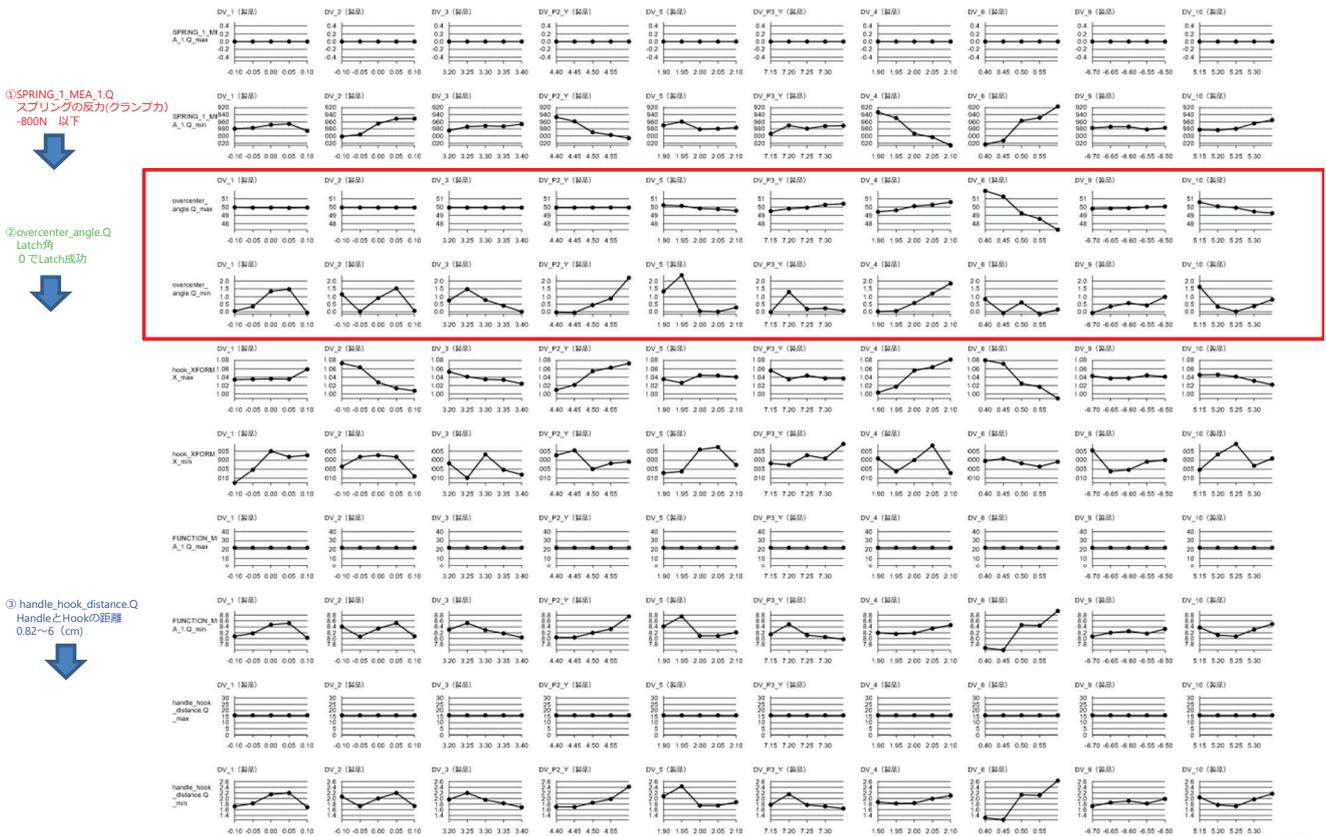
この結果に対して、ランキング機能を利用しても、あまり改善できない。（堂々巡りになる）

⇒品質工学の「要因効果図」で結果を評価し、有効なパラメータの選択と、絞込みを行う。



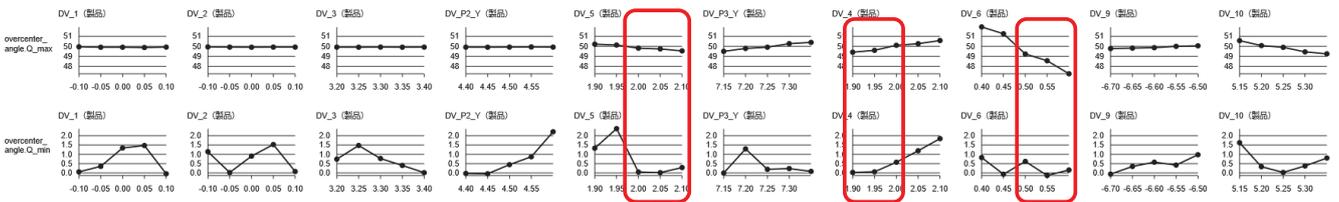
3 制約を満足する解の分布





パラメータ範囲の選択

Latch角の判定(Overcenter_angle_Q)の最大値、最小値下げるパラメータを選択



No.	パラメータ名(単位)	水準1	水準2	水準3	水準4	水準5
1	DV 1 (cm)	-0.10	-0.05	0.0	0.05	0.10
2	DV 2 (cm)	-0.10	-0.05	0.0	0.05	0.10
3	DV 3 (cm)	3.20	3.25	3.30	3.35	3.40
4	DV P2_Y (cm)	4.40	4.45	4.50	4.55	4.60
5	DV 5 (cm)	1.90	1.95	2.0	2.05	2.10
6	DV P3_Y (cm)	7.15	7.20	7.25	7.30	7.35
7	DV 4 (cm)	1.90	1.95	2.00	2.05	2.10
8	DV 6 (cm)	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
9	DV 9 (cm)	-6.70	-6.65	-6.60	-6.55	-6.50
10	DV 10 (cm)	5.15	5.20	5.25	5.30	5.35
11						
12						

このパラメータ範囲で、3回目の検討を実施。

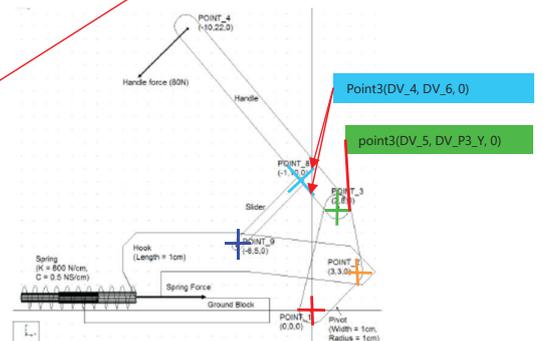


図 1-3 Adams View によるラッチモデル

検討 3 :

要因効果図で、感度の高いパラメータの絞込み



【製品】 【運用】 パラメータの定義



製品 : **ランキングNO.1±0.1cm DV5,DV4,DV6を絞込み**
L50(5¹¹、2¹)直行表で割り付け

No.	パラメータ名(単位)	水準1	水準2	水準3	水準4	水準5
1	DV_1(cm)	-0.10	-0.05	0.0	0.05	0.10
2	DV_2(cm)	-0.10	-0.05	0.0	0.05	0.10
3	DV_3(cm)	3.20	3.25	3.30	3.35	3.40
4	DV_P2_Y(cm)	4.40	4.45	4.50	4.55	4.60
5	DV_5(cm)	1.90	1.95	2.0	2.05	2.10
6	DV_P3_Y(cm)	7.15	7.20	7.25	7.30	7.35
7	DV_4(cm)	1.90	1.95	2.00	2.05	2.10
8	DV_6(cm)	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60
9	DV_9(cm)	-6.70	-6.65	-6.60	-6.55	-6.50
10	DV_10(cm)	5.15	5.20	5.25	5.30	5.35
11						
12						

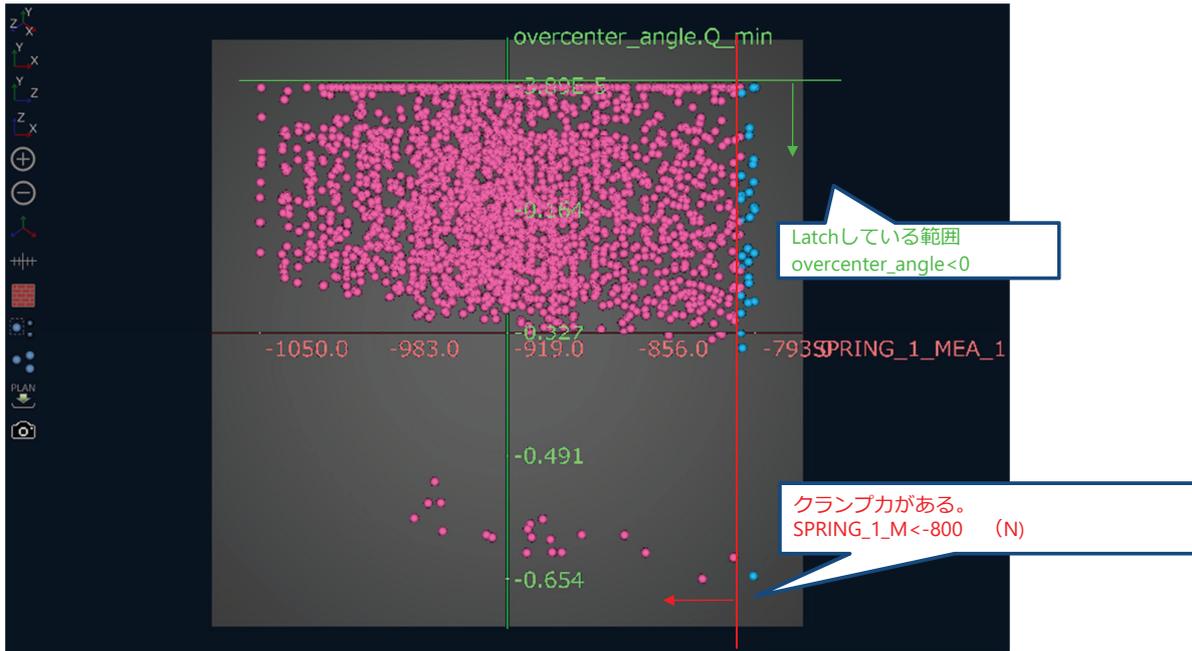
No.	パラメータ名(単位)	水準1	水準2	水準3	水準4	水準5
1	DV_1(cm)	-0.10	-0.05	0.0	0.05	0.10
2	DV_2(cm)	-0.10	-0.05	0.0	0.05	0.10
3	DV_3(cm)	3.20	3.25	3.30	3.35	3.40
4	DV_P2_Y(cm)	4.40	4.45	4.50	4.55	4.60
5	DV_5(cm)	2.00	2.025	2.05	2.075	2.10
6	DV_P3_Y(cm)	7.15	7.20	7.25	7.30	7.35
7	DV_4(cm)	1.90	1.925	1.95	1.975	2.00
8	DV_6(cm)	0.50	0.525	0.55	0.575	0.60
9	DV_9(cm)	-6.70	-6.65	-6.60	-6.55	-6.50
10	DV_10(cm)	5.15	5.20	5.25	5.30	5.35
11						
12						

運用 : **HandleForce 75N~80N (前回と同じ)**
L50(5¹¹、2¹)直行表で割り付け

No.	パラメータ名(単位)	水準1	水準2	水準3	水準4	水準5
1	HandleForce (N)	75	76	77.5	79	80.0
2	SpringForce (N)	780	790	800	810	820
3	SpringPreload (cm)	-0.5	-0.25	0.0	0.25	0.5
4	SpringCoff ()	0.45	0.475	0.5	0.525	0.55
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						

最終結果：3D/2Dプロット

ほぼ満足する解が得られた。



名称	パラメータ名	目標値	結果			
			Max	Ave	Min	
① スプリングの反力(Latch力)	SPRING_1_MEA_1.Q	-800(N)以下	-792.55	-915.95	-1046.34	(N)
② Latch角	overcenter_angle.Q	0度でLatch完了	-0.00003	-0.147	-0.654	(度)
③ HandleとHookの距離	handle_hook_distance.Q	0.92~6(cm)	3.04	2.24	1.5	(cm)

43

最終結果：要因効果図



JIANT-Adamsで3回計算。

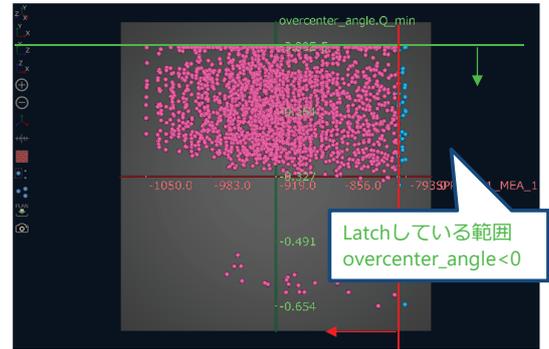
1回の計算は(L50xL50=2500の組み合わせ)約4時間(夜中に計算)。
作業期間は約1週間。

【結果】

製品パラメータを以下の数値の範囲にしておけば

No.	パラメータ名(単位)	水準1	水準2	水準3	水準4	水準5
1	DV.1(cm)	-0.1	-0.05	0.0	0.05	0.1
2	DV.2(cm)	-0.1	-0.05	0.0	0.05	0.1
3	DV.3(cm)	3.2	3.25	3.3	3.35	3.4
4	DV.P2.Y(cm)	4.4	4.45	4.5	4.55	4.6
5	DV.5(cm)	2	2.025	2.05	2.075	2.1
6	DV.P3.Y(cm)	7.15	7.2	7.25	7.3	7.35
7	DV.4(cm)	1.9	1.925	1.95	1.975	2
8	DV.6(cm)	0.5	0.525	0.55	0.575	0.6
9	DV.9(cm)	-6.7	-6.65	-6.6	-6.55	-6.5
10	DV.10(cm)	5.15	5.2	5.25	5.3	5.35

(赤字は最適値)



クランプ力がある。
SPRING_1_M<-800 (N)

運用パラメータが、以下の範囲を動いても

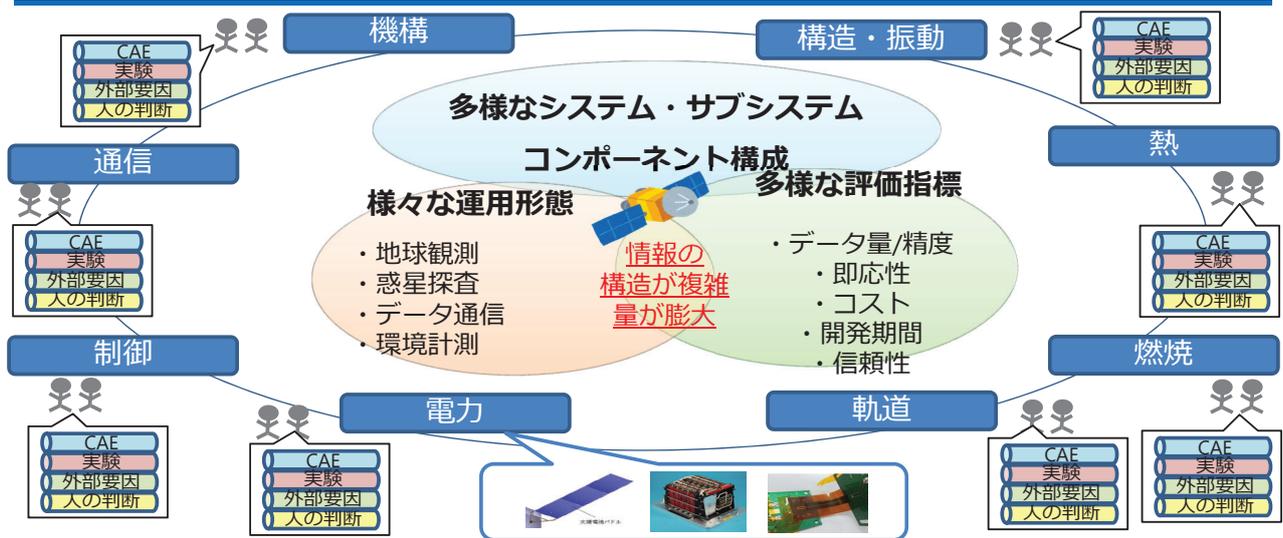
No.	パラメータ名(単位)	水準1	水準2	水準3	水準4	水準5
1	HandleForce(N)	75.0	76.0	77.5	79.0	80
2	SpringForce(N)	780.0	790.0	800.0	810.0	820.0
3	SpringPreload(cm)	-0.5	-0.25	0	0.25	0.5
4	SpringCoff()	0.45	0.475	0.5	0.525	0.55

以下の結果が得られる。

名称	パラメータ名	目標値	結果			
			Max	Ave	Min	
① スプリングの反力(Latch力)	SPRING_1_MEA_1.Q	-800(N)以下	-792.55	-915.95	-1046.34	(N)
② Latch角	overcenter_angle.Q	0度でLatch完了	-0.00003	-0.147	-0.654	(度)
③ HandleとHookの距離	handle_hook_distance.Q	0.92~6(cm)	3.04	2.24	1.5	(cm)

(最適値の結果：①スプリング反力) 1019(N), ②Latch角全て0以下, ③HandleとHookの距離全て2.0cm以下。

まとめ



- 宇宙機開発における設計・評価作業を支援するために、CAE結果の「他分野との結果共有」と「手戻りしない適切な判断」が可能な手法を提案した。
 - 多水準直交表の繰り返し計算により、非線形解析への適用と計算精度・解精度の向上。
 - 偏差値による総合評価法により、多目的最適化への対応。
 - パラメータ範囲と感度情報によるロバスト設計解の提示を可能とした。
- 今後の課題：

さらに、様々な宇宙機設計への適用による検証を進めたい。
表計算ソフトウェアなどによる簡易な解析、流体解析などの非線形解析、等

3.5 自動車のユーザ評価（定性・定量）データへの適用

3.5.1 背景・目的

近年、AI 技術の発展とその産業応用の拡大により、多くのデータセットが公開され利用されている。それらのデータは、定量的なものから定性的なもの、さらには両者の組み合わせに至るまで様々である。セットベース設計手法は定量データを扱うことを前提としているものの、定性データも扱うことができれば、同手法のさらなる適用範囲の拡大が期待できる。本項では、定性データと定量データを扱う選好度セットベース設計手法（PSD 手法）を、（定性・定量データを含む）米国の自動車の各種仕様とユーザ評価に関するデータに対して適用した結果を紹介する。なお、本内容の詳細は、文献⁽¹⁾を参照されたい。

3.5.2 定性・定量データを扱う PSD 手法の概要

定性・定量データを扱う PSD 手法（以下、定性・定量 PSD 手法）は、ラフ集合理論⁽²⁻⁴⁾を応用したものである。

ラフ集合理論は、対応のあるデータセット（複数の対象とそれらが有する特徴の組み合わせのデータセット）を、予測したいデータ項目（決定属性）とその予測に用いるデータ項目（条件属性）に分類し、決定属性値の集合に対応する条件属性値の集合の組み合わせ（決定ルール）を導出することで、データセットが包含するデータ項目間の傾向を可視化することができる。ラフ集合理論では、条件属性及び決定属性を、（数値でない）定性的な語句にすることはもとより、定量的な数値又は数値範囲（上限値と下限値）にすることもできる。このため、得られる決定ルールは、(quality = high, medium) → (evaluation = high) のような定性的なルールも、(price ≥ 15000) → (evaluation = medium) のような定量的なルールもある。ここで、矢印の前後は条件属性と決定属性のそれぞれの集合を表しており、決定ルールにおける条件部と結論部と呼ばれる。すなわち、前者のルールは、「quality という条件属性の値が high 又は medium の時に、evaluation という決定属性の値が high になる」ことを表し、後者のルールは、「price という条件属性の値が 15000 以上の時に、evaluation という決定属性項目が medium になる」ことを表している。以下に、ラフ集合を用いた定性・定量 PSD 手法の各種パラメータの定義について述べる。

PSD 手法は、設計変数の選好度分布と目的関数から算出される可能性分布と要求性能分布の積集合（図 1 左における 2 つの分布の重なり部分）の大きさや傾きなどを用いて、設計変数の選好度分布を定める。この 2 つの分布を用いた評価を行うために、定性・定量 PSD 手法における設計変数、性能及び 2 つの分布は、以下のように定義されている。

- 1) 設計変数と性能は、（ラフ集合理論における）条件属性と決定属性として定義されている。ここで、決定属性は、（2 つの分布における選好度を設定する必要があるため）製品に関するユーザ評価や販売台数などのような、優劣のある属性値を含むデータ項目である必要がある。優劣のある決定属性値は、一部のラフ集合理論に基づく手法^(2,3)と同様に、優位な（評価の高い）順番を表す重要度 $j=1,2,\dots$ の順番に並び替えられ、クラス Cl_j と呼ばれる。例えば、決定属性をユーザの好みの評価とすると「 Cl_1 :好き、 Cl_2 :やや好き、 Cl_3 :どちらでもない、 Cl_4 :やや嫌い、 Cl_5 :嫌い」のように表される。なお、重要度は PSD 手法における選好度に対応するため、決定属性値 Cl_j は、 Cl_1 から Cl_{n-1}

が設計者の最も好む決定属性値から妥協できる決定属性値までを順に並べたものになるように、 Cl_n が設計者の好まない（設計者が妥協できない）決定属性値となるようにする。その際、データベースの製品評価に基づいて適宜属性値を統合し、上述した n 個になるようにする。例えば、先の例で、設計者が妥協できない評価が、「やや嫌い」と「嫌い」である場合、決定属性値は、「 Cl_1 :好き、 Cl_2 :やや好き、 Cl_3 :どちらでもない、 Cl_4 :やや嫌い/嫌い」のようにする。

- 2) 2つの分布の縦軸である選好度は決定属性値として、横軸である性能は対象の集合（図1右）としてそれぞれ定義されている。ここで、分布の横軸に対応する対象の集合は、可能性分布では決定ルール Cl_j の結論部に従う対象の集合、要求性能分布では決定ルールに従う対象の集合である。先に述べた決定属性値 Cl_j に基づいて、要求性能分布における対象の集合は1~ j 番目に重要なクラス群 $CLASS_j^2$ を含む対象群 $CLASS_j^2$ 、可能性分布における対象の集合は Cl_j を結論部とする決定ルールに従う対象群 $RULE_j$ と表す。なお、 j 番目のクラスではなく、そのクラス以上に重要なクラス群を用いる理由は、PSD手法において、高い選好度の設計変数/目的関数の範囲は、低い選好度のそれに包含されるためである。

以下に、定性・定量 PSD 手法の評価指標について述べる。

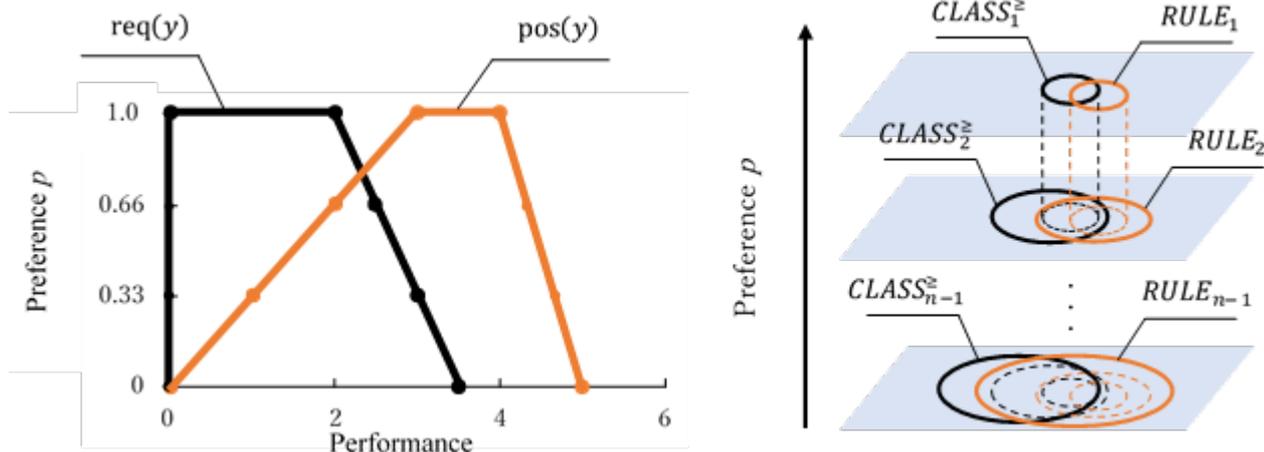


図1 可能性分布と要求性能分布

PSD手法は、設計における満足度と安定性に関する4つ評価指標を用いて、設計変数の選好度分布を定める。定性・定量 PSD 手法も同様の指標を用いるが、ここでは紙面の都合上 DPI と DAI の指標についてのみ、定性・定量 PSD 手法での算出方法を述べる。

- 1) DPIは、PSD 手法において、要求性能分布 $req(y)$ と可能性分布 $pos(y)$ からなる共通選好度分布 $com(y) (= \min(pos(y), req(y)))$ の面積（図2左）として定義される。共通選好度分布の面積は、大きいほど可能性分布が設計者の要求を満たすことを意味する。すなわち、設計案（設計変数の範囲）が好ましいことを意味する。一方、定性・定量 PSD 手法における DPI^* は、決定属性値群 Cl_j を含む対象群 $CLASS_j^2$ （要求性能分布に対応）と、 Cl_j を結論部とする決定ルール候補に従う対象群 $RULE_j$ （可能性分布に対応）の積集合（図2右）として次式のように定義される。

$$DPI^* = \sum_{j=1}^{n-1} |CLASS_j^z \cap RULE_j|$$

ここで、(1)式における重要度 j は、 $1, 2, \dots, n-1$ であり、設計者の好まない重要度である n を除いている。これにより、同積集合に該当する対象数は多いほど、その決定ルールが（設計者が妥協できる）決定属性のクラス群 Cl_j を有する対象を多く包含することを意味する。つまり、本指標は、設計者が妥協でき、かつ、対象数の多い決定ルールを高く評価する。

- 2) DAI は、PSD 手法において、可能性分布の $pos(y)$ における選好度 0 の範囲として定義される（図 3 左）。この範囲は、範囲が狭いほど、設計変数の範囲に対する性能の範囲が小さいことを意味する。すなわち、設計案（設計変数の範囲）がロバストである（性能に対する設計変数の感度が低い）ことを表す。一方、定性・定量 PSD 手法における DAI^* は、 Cl_{n-1}^z を結論部とする決定ルール候補に従う対象の数 $|RULE_{n-1}|$ を全対象数 $CLASS_n^z$ で除した確率を 1 から引いたものとして次式のように定義される。

$$DAI^* = 1 - \frac{|RULE_{n-1}|}{CLASS_n^z}$$

この確率は、決定ルールが決定属性のクラス群 Cl_{n-1}^z を有する対象を少なく包含することを意味する。つまり、本指標は、設計者が妥協でき、かつ、対象数の少ない決定ルールを高く評価する。

PSD 手法は、複数の評価指標を正規化するとともに、それらの指標の重みを用いて幾何平均したものを目標として、遺伝的アルゴリズムや粒子群最適化法などのヒューリスティクスを用いて設計変数の範囲を探索する。定性・定量 PSD 手法も同様に、次式を目標として、PSO で決定ルールを探索する。なお、式は、前述した 2 指標で表しているが、PSD 手法には他の指標もあるため、それらを加えることも可能である⁽⁵⁾。

$$\{(NDPI^*)^{\omega_P} \times (NDAI^*)^{\omega_A}\}^{\frac{1}{\omega_P + \omega_A}} \quad \left(NDPI^* = \frac{DPI^*}{DPI^*_{max}}, NDAI^* = \frac{DAI^*}{DAI^*_{min}} \right)$$

ここで、 ω_P, ω_A は、両指標の重みであり、大きくなるほどその指標を優先することとなる。上式の目標が最大になるような決定ルールを、粒子群最適化法により探索する。

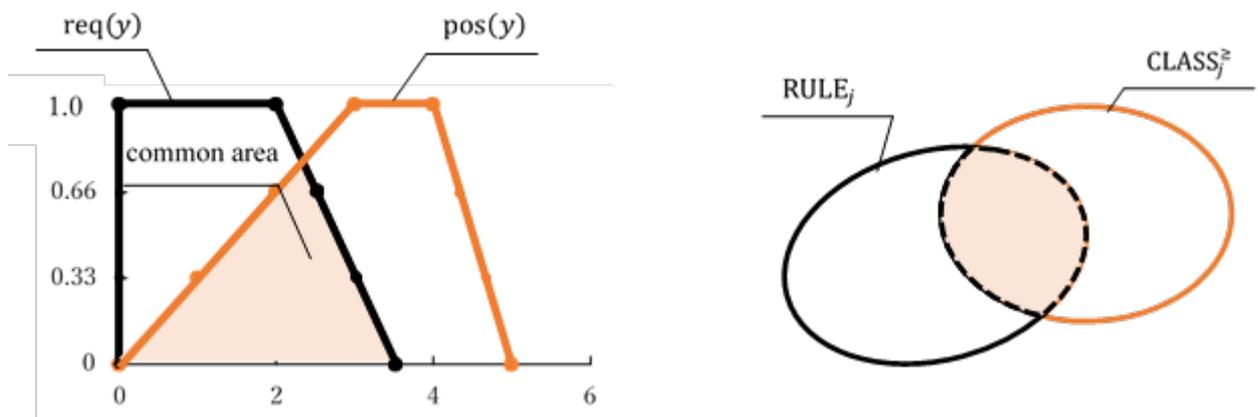


図 2 DPI の概念図

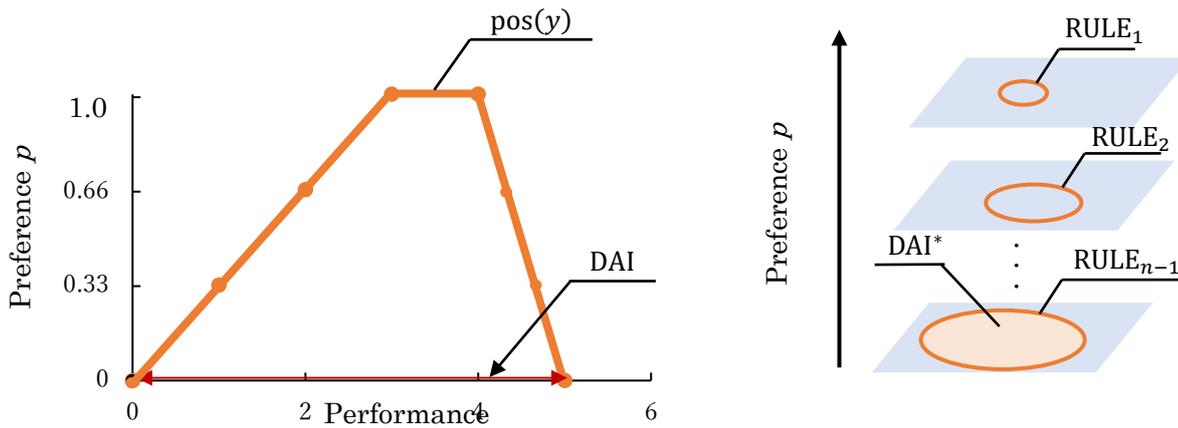


図3 DAIの概念図

3.5.3 事例適用

本事例では、米国自動車マーケットプラットフォーム Cars.com におけるホンダ車の評価データ⁽⁶⁾を事例に用いた。同データにおける consumer rating を決定属性 D とし、決定属性値を、4.5 以上を very good Cl_1 、4.0 以上を good Cl_2 、3.5 以上を acceptable Cl_3 、3.5 未満を bad Cl_4 のように設定した。Consumer rating 以外のデータを条件属性とし、属性値を表 1 のように設定した。これらの条件属性値に対応する決定属性の属性値のデータ数を表 2 に示す。

表 1 条件属性と決定属性

Conditional attribute	Model	C_1	Minivan v_{11}	Sedan v_{12}	SUT v_{13}	SUV v_{14}	Other v_{15}		
	Condition	C_2	New v_{21}		Certified v_{22}	Used v_{23}			
	Color	C_3	Black v_{31}	Blue v_{32}	N Bule v_{33}	Red v_{34}	Silver v_{35}	White v_{36}	Other v_{37}
	Drivetrain	C_4	AWD v_{41}		FWD v_{42}	RWD v_{43}			
	Fuel Type	C_5	Gasoline v_{51}			Hybrid v_{52}			
	Price	C_6	0		~		99999		
	MPG	C_7	0		~		50		
Decision attribute	D	very good Cl_1	good Cl_2	acceptable Cl_3	bad Cl_4				

表 2 条件属性値と決定属性値における対象数

		Cl_1	Cl_2	Cl_3	Cl_4	total
C_1	v_{11}	50	142	59	12	263
	v_{12}	272	541	194	99	1106
	v_{13}	33	99	23	11	166
	v_{14}	382	899	253	164	1698
	v_{15}	4	27	6	4	41
C_2	v_{21}	379	558	137	127	1201
	v_{22}	50	148	29	30	257
	v_{23}	312	1002	369	133	1816
C_3	v_{31}	133	319	109	67	628
	v_{32}	56	105	34	16	211
	v_{33}	19	48	22	14	103
	v_{34}	45	123	38	18	224
	v_{35}	245	610	172	95	1122
	v_{36}	226	459	139	71	895
	v_{37}	17	44	21	9	91
C_4	v_{41}	330	754	220	143	1447
	v_{42}	411	946	314	146	1817
	v_{43}	0	8	1	1	10
C_5	v_{51}	656	1584	478	252	2970
	v_{52}	85	124	57	38	304

本事例では、PSOにおける粒子数を1000個、更新回数を100として決定ルールを導出した。なお、3式における指標の重み(ω_P, ω_A)の組み合わせは、(1, 0)、(0.75, 0.25)、(0.5, 0.5)、(0.25, 0.75)、(0, 1)の5パターンとした。両指標の値について付置した散布図を図4に示す。同図より、2指標の重みに応じて、決定ルールのパレート最適解が導出されていることが確認できる。さらに、導出された決定ルールを表3に示すとともに、各決定ルールの考察を述べる。

- DPIのみを評価する(1, 0)の条件で導出された決定ルールのすべての結論部で、全対象を包含するためにすべての条件属性値が含まれている。これは、DPIが、選好度に関わらず決定ルールに従う対象数の多さのみを評価する指標であるためだと考えられる。一方で、DAIのみを評価する(0, 1)の条件で導出された決定ルールのすべての結論部で、1つのデータを指定するために、対象数の少ない v_{51} や v_{43} などの属性値が含まれている。これは、DAIが、選好度に関わらず決定ルールに従う対象数の少なさのみを評価する指標であるためであると考えられる。以上のことから、両指標は、単体ではなく他の指標と組み合わせて用いる必要があることがわかる。
- DPIとDAIの重みが均等な(0.5, 0.5)では、(0, 1)よりデータ数が多い、かつ(1, 0)の条件よりも対象数が少ない v_{12} や v_{42} を含む決定ルール、すなわち両指標の特徴を有する決定ルールが導出されている。同様に、DPIの重みが大きい(0.75, 0.25)の条件とDAIの重みが大きい(0.25, 0.75)の条件により導出された決定ルールは、両指標の特徴を持ちつつ、それぞれDPIとDAIの特徴を多く含んでいる。
- DPIの重みが大きい(0.75, 0.25)の条件で導出された決定ルールでは、 v_{14} や v_{36} などのアメリカの自動車市場において販売台数の多い車の仕様(モデルと色)(Cars.com, UEPA)に加えて、それらよりも販売台数のやや少ない v_{31} や v_{41} などの車の仕様(色や駆動など)も選出された。販売台数の多さは(データセットにおける)対象数の多さに影響するため、対象数の多さを評価するDPIが

このような一般大衆に人気な仕様を選出したと考えられる。反対に、DAIの重みが大きい ω_{16} や ω_{20} などの条件で導出された決定ルールでは、 v_{15} や v_{43} などのアメリカの自動車市場において販売台数の少ない車の仕様を選出された。なお、販売台数の少ない車は必ずしも人気がないとは限らず、高級車やスポーツカーなどはもとより、ヴィンテージカーの人気は高い。このため、このように複数の指標を組み合わせることで、設計者に意図にある仕様を導出できると考えられる。

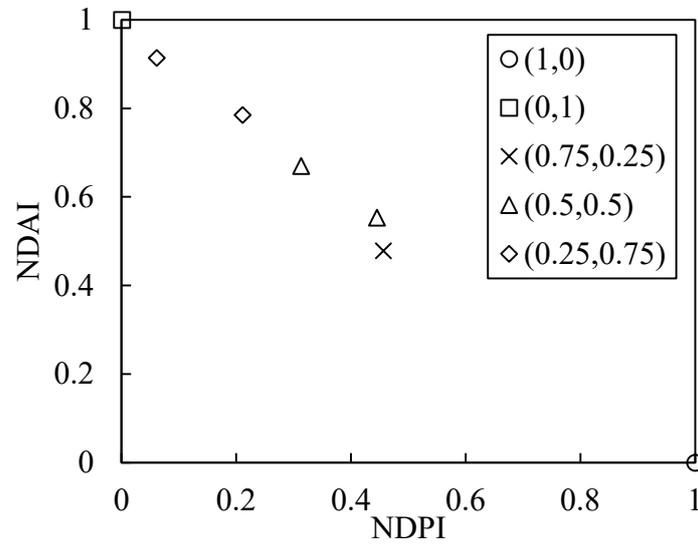


図4 導出した決定ルールの散布図

表 3 指標の重みと導出された決定ルール例

2 指標の重み (ω_P, ω_A)	導出された決定ルール
(1, 0)	$\begin{cases} \text{All} \rightarrow (u \in Cl_1^{\geq}) \\ \text{All} \rightarrow (u \in Cl_2^{\geq}) \\ \text{All} \rightarrow (u \in Cl_3^{\geq}) \end{cases}$
(0.75, 0.25)	$\begin{aligned} & (C_1 = \begin{matrix} \text{Sedan} \\ \text{SUV} \end{matrix}) \wedge (C_2 = \text{Used}) \wedge \left(C_3 = \begin{matrix} \text{Black} \\ \text{Blue} \\ \text{Navy Blue} \\ \text{Silver} \\ \text{White} \\ \text{Other} \end{matrix} \right) \wedge (C_4 = \begin{matrix} \text{AWD} \\ \text{FWD} \end{matrix}) \wedge (C_5 = \text{Gasoline}) \rightarrow (u \in Cl_1^{\geq}) \\ & \left(C_1 = \begin{matrix} \text{Minivan} \\ \text{Sedan} \\ \text{SUV} \end{matrix} \right) \wedge (C_2 = \text{Used}) \wedge \left(C_3 = \begin{matrix} \text{Black} \\ \text{Blue} \\ \text{Navy Blue} \\ \text{Silver} \\ \text{White} \\ \text{Other} \end{matrix} \right) \wedge (C_4 = \begin{matrix} \text{AWD} \\ \text{FWD} \end{matrix}) \rightarrow (u \in Cl_2^{\geq}) \\ & \left(C_1 = \begin{matrix} \text{Minivan} \\ \text{Sedan} \\ \text{SUV} \end{matrix} \right) \wedge (C_2 = \begin{matrix} \text{Certified} \\ \text{Used} \end{matrix}) \wedge (C_4 = \begin{matrix} \text{AWD} \\ \text{FWD} \end{matrix}) \rightarrow (u \in Cl_3^{\geq}) \end{aligned}$
(0.5, 0.5)	$\begin{aligned} & \left(C_1 = \begin{matrix} \text{Minivan} \\ \text{Sedan} \\ \text{SUV} \end{matrix} \right) \wedge (C_2 = \begin{matrix} \text{Certified} \\ \text{Used} \end{matrix}) \wedge \left(C_3 = \begin{matrix} \text{Navy Blue} \\ \text{Silver} \\ \text{White} \end{matrix} \right) \wedge (C_4 = \text{FWD}) \wedge (C_5 = \text{Hybrid}) \rightarrow (u \in Cl_1^{\geq}) \\ & \left(C_1 = \begin{matrix} \text{Minivan} \\ \text{Sedan} \\ \text{SUT} \\ \text{SUV} \end{matrix} \right) \wedge (C_2 = \begin{matrix} \text{Certified} \\ \text{Used} \end{matrix}) \wedge \left(C_3 = \begin{matrix} \text{Blue} \\ \text{Navy Blue} \\ \text{Silver} \\ \text{White} \end{matrix} \right) \wedge (C_4 = \begin{matrix} \text{AWD} \\ \text{FWD} \end{matrix}) \rightarrow (u \in Cl_2^{\geq}) \\ & \left(C_1 = \begin{matrix} \text{Minivan} \\ \text{Sedan} \\ \text{SUT} \\ \text{SUV} \end{matrix} \right) \wedge (C_2 = \begin{matrix} \text{Certified} \\ \text{Used} \end{matrix}) \wedge \left(C_3 = \begin{matrix} \text{Blue} \\ \text{Navy Blue} \\ \text{Silver} \\ \text{White} \\ \text{Other} \end{matrix} \right) \wedge (C_4 = \begin{matrix} \text{AWD} \\ \text{FWD} \end{matrix}) \rightarrow (u \in Cl_3^{\geq}) \end{aligned}$
(0.25, 0.75)	$\begin{aligned} & (C_1 = \begin{matrix} \text{Sedan} \\ \text{SUV} \end{matrix}) \wedge (C_2 = \text{New}) \wedge (C_3 = \begin{matrix} \text{Black} \\ \text{White} \end{matrix}) \rightarrow (u \in Cl_1^{\geq}) \\ & \left(C_1 = \begin{matrix} \text{Sedan} \\ \text{SUV} \\ \text{Other} \end{matrix} \right) \wedge (C_2 = \text{New}) \wedge \left(C_3 = \begin{matrix} \text{Black} \\ \text{White} \\ \text{Other} \end{matrix} \right) \rightarrow (u \in Cl_2^{\geq}) \\ & \left(C_1 = \begin{matrix} \text{Sedan} \\ \text{SUT} \\ \text{SUV} \\ \text{Other} \end{matrix} \right) \wedge (C_2 = \text{New}) \wedge \left(C_3 = \begin{matrix} \text{Black} \\ \text{Red} \\ \text{White} \\ \text{Other} \end{matrix} \right) \rightarrow (u \in Cl_3^{\geq}) \end{aligned}$
(0, 1)	$\begin{aligned} & (C_1 = \text{Other}) \wedge (C_2 = \begin{matrix} \text{Certified} \\ \text{Used} \end{matrix}) \wedge \left(C_3 = \begin{matrix} \text{Navy Blue} \\ \text{Red} \\ \text{Silver} \\ \text{White} \end{matrix} \right) \wedge (C_4 = \text{RWD}) \rightarrow (u \in Cl_1^{\geq}) \\ & (C_1 = \text{Other}) \wedge (C_2 = \begin{matrix} \text{Certified} \\ \text{Used} \end{matrix}) \wedge \left(C_3 = \begin{matrix} \text{Navy Blue} \\ \text{Red} \\ \text{Silver} \\ \text{White} \end{matrix} \right) \wedge (C_4 = \text{RWD}) \rightarrow (u \in Cl_2^{\geq}) \\ & (C_1 = \text{Other}) \wedge (C_2 = \begin{matrix} \text{Certified} \\ \text{Used} \end{matrix}) \wedge \left(C_3 = \begin{matrix} \text{Navy Blue} \\ \text{Red} \\ \text{Silver} \\ \text{White} \end{matrix} \right) \wedge (C_4 = \text{RWD}) \rightarrow (u \in Cl_3^{\geq}) \end{aligned}$

<参考文献>

- (1) Oyama, S. and Kato, T., Preference Set-based Design Method for Qualitative Assessments Using Dominance-based Rough Set Approach, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing, Accepted for Publication, 2025.
- (2) Stefanowski, J., On Rough Sets Based Approaches to Induction of Decision Rules, Rough sets in Knowledge Discovery, (1998).
- (3) Ko YC., Tzeng GH., A Dominance-Based Rough Set Approach of Mathematical Programming for Inducing National Competitiveness, Intelligent Decision Technologies10, (2011), pp. 23-36.
- (4) Greco, S, Matarazzo, B, Slowinski, R and Stefanowski, An Algorithm for Induction of Decision Rules Consistent with the Dominance Principle, Rough-sets and Current Trends in Computing, (2005), pp. 304-313.
- (5) 石川晴雄, 多目的最適化設計 セットベース設計手法による多目的満足化, コロナ社 (2010).
- (6) Omar, T. Honda Cars Data, Kaggle (online), available from <<https://www.kaggle.com/datasets/omartorres25/honda-data>>, (accessed on 16 September 2024).

選好度セットベース設計の事例

～自動車ユーザ評価(定性・定量)データへの適用～

目次

2

1. 選好度セットベース設計手法の概要と定性評価
2. 定性評価のための選好度セットベース設計手法
3. 自動車のユーザ評価データへの適用

PSD手法の課題：製品企画や概念設計などの設計の上流過程において重要な定性データに適用できない

例) スマートフォンの企画



定性データを適用可能とすることで上流過程の設計支援が可能

研究目的：定性データも適用可能なPSD手法の提案

定性データから属性値間の関係を導出できるラフ集合理論¹⁾に着目

1) Pawlak, Z.: Rough sets: Theoretical aspects of reasoning about data, Springer Science & Business Media, 9 (2012).

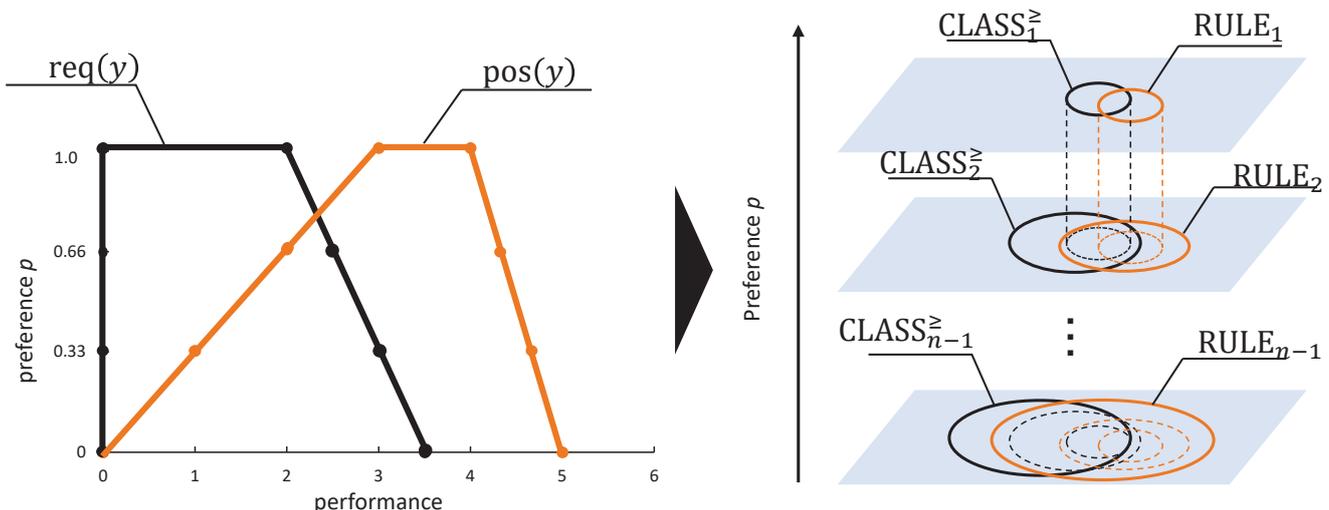
2. 定性評価のための選好度セットベース設計手法

2.0 評価指標提案のための定義

■クラス Cl_I は、設計者が好ましいと思う順番 $I (=1, 2, \dots, n)$ に n 段階で設定する。
 $I = 1$ の時が設計者が最も好む設計($I = n$ の時が望まない設計)とする。
なお、 $I = n - 1$ の時が設計者が最大限妥協した設計とする。

■PSD手法における2つの分布を以下のように定義する

- ・要求性能分布 $req(y)$ → I 番目以下のクラス Cl_I を有する対象群 $CLASS_I^{\geq}$
- ・可能性分布 $pos(y)$ → Cl_I を結論部とする決定ルール(候補)に従う対象群 $RULE_I$



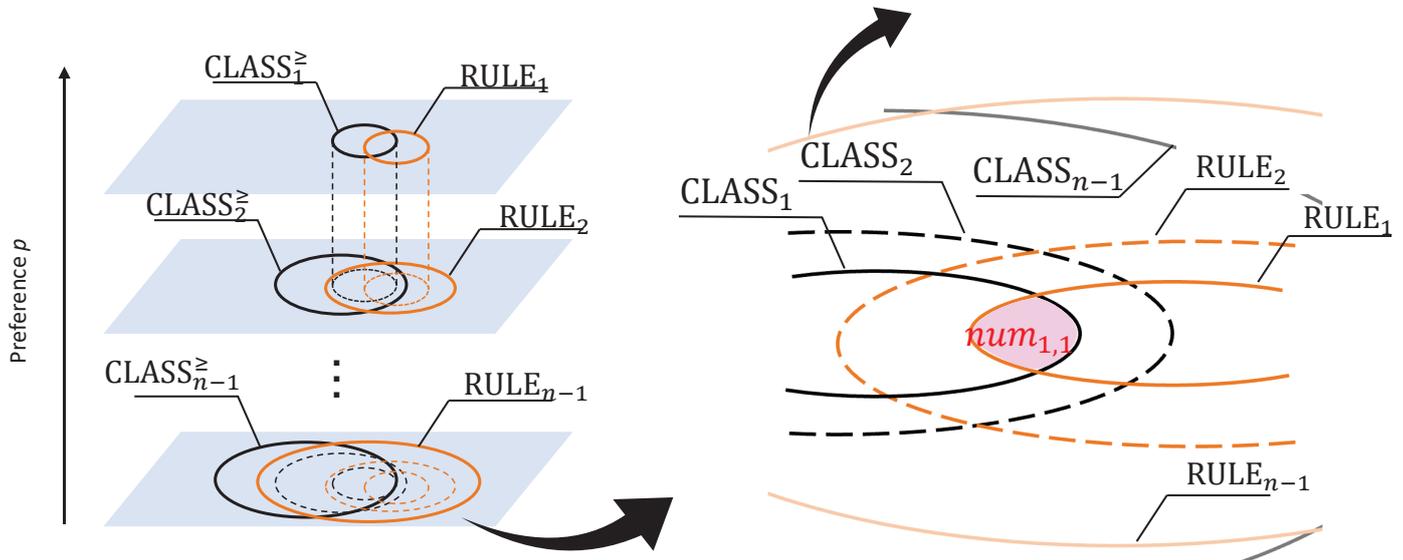
2.0 評価指標提案のための定義

CLASS_j[≧]は、次式のように表せる

$$CLASS_j^{\geq} = \sum_{i=1}^l CLASS_i$$

CLASS_i[≧]_(i=1,2,...,n)とRULE_j[≧]_(j=1,2,...,n-1)の2つの対象群用いて、PSD手法の指標を検討する。

	CLASS ₁	CLASS ₂	...	CLASS _n
RULE ₁	num _{1,1}	num _{1,2}	...	num _{1,n}
RULE ₂	num _{2,1}	num _{2,2}	...	num _{2,n}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
RULE _{n-1}	num _{n-1,1}	num _{n-1,2}	...	num _{n-1,n}



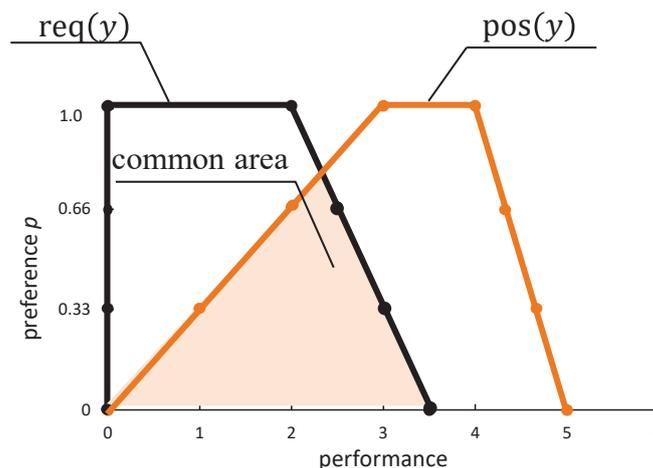
2. 定性評価のための選好度セットベース設計手法

2.1 提案指標1: DPI*

PSD手法では、要求性能分布 req(y)と可能性分布 pos(y)からなる共通選好度分布 com(y) (= min(pos(y), req(y)))の面積として定義される。

共通面積が大きいほど、設計案が好ましいことを表す。

$$DPI = \int com(y) dy = \int \min(pos(y), req(y)) dy$$



※指標の詳細については、石川著『多目的最適化設計』をご参照されたい。

2. 定性評価のための選好度セットベース設計手法

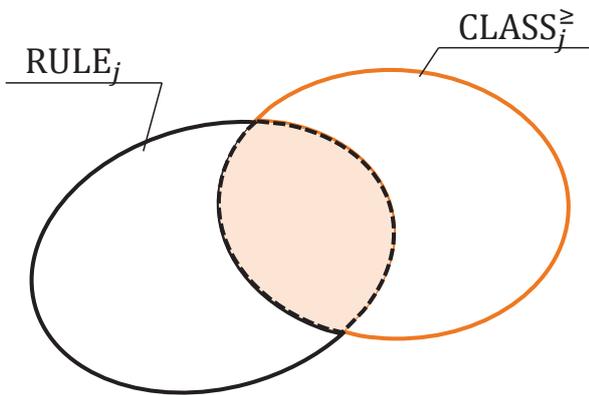
2.1 提案指標1: DPI*

ラフ集合理論では、望まない設計である $l = n$ の場合を除いた $n - 1$ 番目までの $RULE_l$ と $CLASS_j^{\geq}$ の積集合の和をDPI*と定義できる。

$$DPI^* = \sum_{l=1}^{n-1} |CLASS_l^{\geq} \cap RULE_l|$$

$CLASS_l^{\geq}$: l 番目以下のクラス $CLASS_l$ を有する対象群
 $RULE_l$: $CLASS_l$ を結論部とする決定ルール(候補)に従う対象群
 $|\cdot|$: 対象群に含まれる対象数

(例)



	CLASS ₁	CLASS ₂	CLASS ₃
RULE ₁	18	21	2
RULE ₂	22	48	8

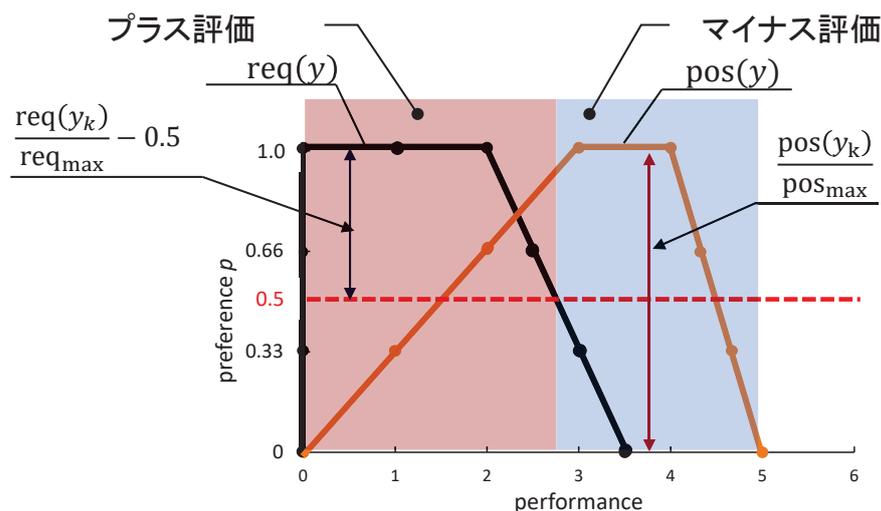
$$DPI^* = 18 + (22 + 48) = 88$$

2. 定性評価のための選好度セットベース設計手法

2.2 提案指標2: DCI*

PSD手法では、最大値で正規化した要求性能分布 $req(y)$ と可能性分布 $pos(y)$ の積として定義される。なお、要求性能分布の選好度が0.5以上となる部分を正、0.5未満となる部分を負とすることで、要求性能分布の選好度が高い(低い)領域において両分布が重なるほど、設計案が好ましい(好ましくない)ことを表す。

$$DCI = \sum_{k=0}^n \frac{pos(y_k)}{pos_{max}} \times \left(\frac{req(y_k)}{req_{max}} - 0.5 \right)$$



2. 定性評価のための選好度セットベース設計手法

2.2 提案指標2: DCI*

ラフ集合理論では、DPIで用いた $RULE_j$ と $CLASS_i$ の積集合の個数と、(設計者の好ましさを表すクラスの番号) j と i により算出した $RULE$ と $CLASS$ の重要度の線形和を DCI^* と定義できる。

重要度は、以下の2つの係数の積としている。

- ① 決定ルールの重要度を表す j が1の時に1となり、 j が大きくなるほど0に近づく係数
- ② 決定ルールを満たす時($i \leq j$ の時)に1, 満たさない時($i > j$ の時)に負の値となり、 i と j の差が大きくなるほど絶対値が大きくなる係数。

$$DCI^* = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=1}^n |CLASS_i \cap RULE_j| \times \left(1 - \frac{j-1}{n-1}\right) \times f(i, j)$$

$$f(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{if } i - j \leq 0 \\ -\frac{i-j}{n-1} & \text{if } i - j > 0 \end{cases}$$

$CLASS_i$: i 番目のクラス Cl_i を有する対象群
 $RULE_j$: j 番目のクラス Cl_j を結論部とする決定ルール(候補)に従う対象群

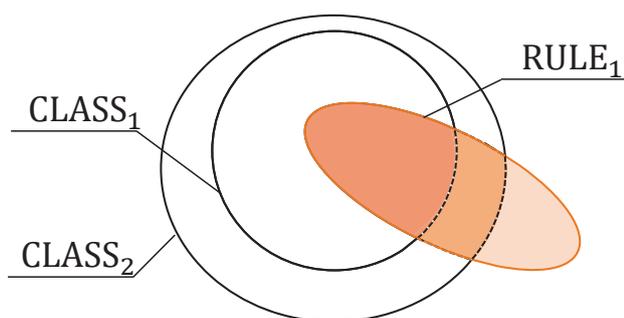
2. 定性評価のための選好度セットベース設計手法

2.2 提案指標2: DCI*

$$DCI^* = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=1}^n |CLASS_i \cap RULE_j| \times \left(1 - \frac{j-1}{n-1}\right) \times f(i, j)$$

$$f(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{if } i - j \leq 0 \\ -\frac{i-j}{n-1} & \text{if } i - j > 0 \end{cases}$$

(例)



$CLASS_i$: i 番目のクラス Cl_i を有する対象群
 $RULE_j$: j 番目のクラス Cl_j を結論部とする決定ルール(候補)に従う対象群
 $|\cdot|$: 対象群に含まれる対象数

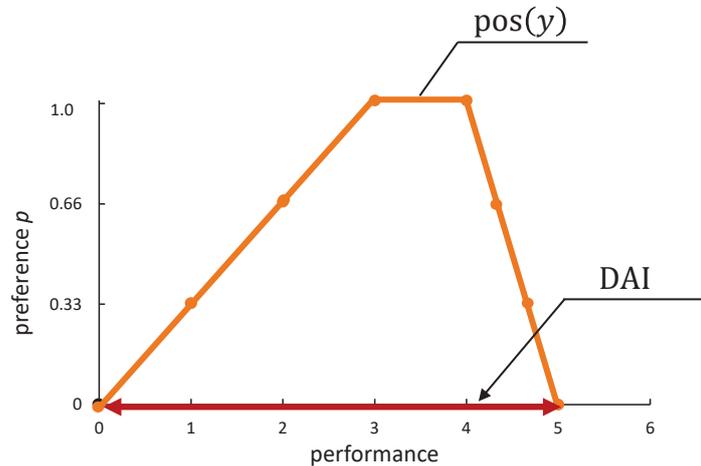
$j \setminus i$	$CLASS_1$	$CLASS_2$	$CLASS_3$
$RULE_1$	18	21	2
$RULE_2$	22	48	8

$$DCI^* = 18 \times 1 \times 1 + 21 \times 1 \times -\frac{1}{2} + 2 \times 1 \times -1 + 22 \times \frac{1}{2} \times 1 + 48 \times \frac{1}{2} \times 1 + 8 \times \frac{1}{2} \times -\frac{1}{2} = 59.5$$

青 マイナス評価 ($i > j$)
赤 プラス評価 ($i \leq j$)

2.3 提案指標3: DAI*

PSD手法では、可能性分布の $\text{pos}(y)$ における選好度0の範囲として定義される。範囲が狭ければ狭いほど、設計案が好ましい(設計変数の機能に対する感度が低くロバストである)ことを表す。



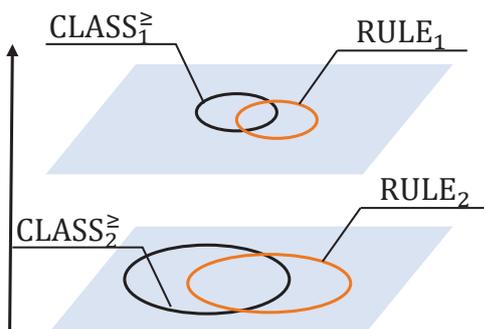
2. 定性評価のための選好度セットベース設計手法

2.3 提案指標3: DAI*

ラフ集合理論では、(設計者が最大限妥協した設計にあたる) $n-1$ 番目のクラス Cl_{n-1} を結論部とする決定ルール(候補)に従う対象群 RULE_{n-1} の対象数 $|\text{RULE}_{n-1}|$ を DAI^* と定義した。

$$\text{DAI}^* = |\text{RULE}_{n-1}|$$

(例)



	CLASS ₁	CLASS ₂	CLASS ₃
RULE ₁	18	21	2
RULE ₂	22	48	8

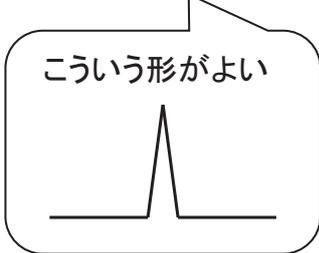
$$\text{DAI}^* = 22 + 48 + 8 = 78$$

2. 定性評価のための選好度セットベース設計手法

2.4 提案指標4: DSI*

PSD手法では、共通選好度分布の優先度 $PR(\text{com}(y))$ と傾き $\Delta p(y)$ の積として定義される。なお、優先度は、共通選好度分布を m 個のセグメント $y_k (k = 0, 1, \dots, m)$ に分割し、セグメントごとの共通選好度が大きいほど大きくなるように定義される。選好度の高い領域で選好度グラフの傾きが大きいほど、設計案が好ましいことを表す。

$$DSI = \sum_{k=0}^{m-1} \Delta p(y_k) \times \sum_{k=0}^{m-1} \frac{PR(\text{com}(y_{k+1})) + PR(\text{com}(y_k))}{2 \times (m + 1) (= 2PR_{\max})} \times \left(\frac{\Delta p(y_k)}{\Delta p_{\max}} \right)$$

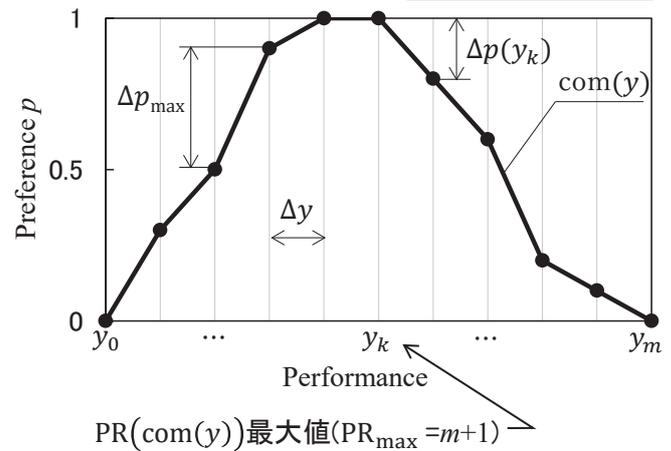


$$\Delta p(y_k) = \text{ABS}\{\text{com}(y_{k+1}) - \text{com}(y_k)\}$$

$$PR(\text{com}(y_k)) = \sum_{l=0}^m \text{pr}(\text{com}(y_k), \text{com}(y_l))$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{pr}(\text{com}(y_k), \text{com}(y_l)) = \\ \left\{ \begin{array}{l} 1. \text{ if } \text{com}(y_k) \geq \text{com}(y_l) \\ 0. \text{ if } \text{com}(y_k) < \text{com}(y_l) \end{array} \right. \end{array} \right]$$

com(y_k)より小さいcom(y_l)の数をカウント



2. 定性評価のための選好度セットベース設計手法

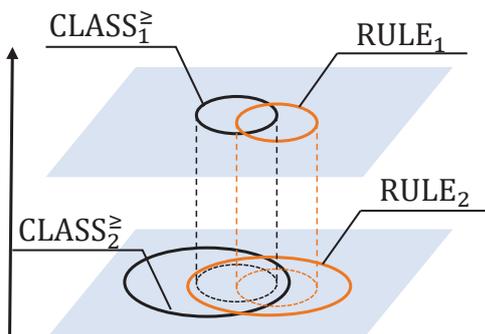
2.4 提案指標4: DSI*

ラフ集合理論では、(共通選好度分布に相当する) $RULE_I$ と $CLASS_I^{\geq}$ の積集合の I に関する低減率を1から引いたものと、 I により算出した $RULE_I$ の重要度の線型和を DSI^* と定義できる。

$$DSI^* = \sum_{I=2}^{n-1} \left(\left(1 - \frac{|\text{CLASS}_{I-1}^{\geq} \cap \text{RULE}_{I-1}|}{|\text{CLASS}_I^{\geq} \cap \text{RULE}_I|} \right) \times \left(1 - \frac{I-2}{n-1} \right) \right)$$

積集合の対象数の低減率 $RULE_I$ の重要度

(例)



	CLASS ₁	CLASS ₂	CLASS ₃
RULE ₁	18	21	2
RULE ₂	22	48	8

$$DSI^* = \left(1 - \frac{18}{22 + 48} \right) \times 1 = 0.74$$

2.5 提案手法5: PRI*

PSD手法では, DPI,DCI,DAIおよびDSIを正規化し, それらの値について幾何平均を用いて平均化することで定義される.

ラフ集合理論では, PSD手法と同様にPRI*を定義できる.なお, DPI*,DCI*,DAI*およびDSI*の重みづけをそれぞれ $\omega_P, \omega_C, \omega_A, \omega_S$ とした.

$$PRI^* = \{(NDPI^*)^{\omega_P} \times (NDCI^*)^{\omega_C} \times (NDAI^*)^{\omega_A} \times (NDSI^*)^{\omega_S}\}^{\frac{1}{\omega_P + \omega_C + \omega_A + \omega_S}}$$

$$\left(\begin{array}{l} NDPI^* = \frac{DPI^*}{DPI^*_{\max}}, NDCI^* = \frac{DCI^* - DCI^*_{\min}}{DCI^*_{\max} - DCI^*_{\min}} \\ NDAI^* = \frac{DAI^*_{\min}}{DAI^*}, NDSI^* = \frac{DSI^*}{DSI^*_{\max}} \end{array} \right)$$

4. 自動車のユーザ評価データへの適用

4.1 使用データ

米国自動車マーケットプラットフォームCars.comにおけるH社製の車の評価データ*)を事例に用いた. 重みの組み合わせは27パターンに設定した.

*) OmarTorres, (2023), Kaggle[<https://www.kaggle.com/datasets>]

Decision Table

Conditional attribute	Model C_1	Minivan	Sedan	SUT	SUV	Other		
		v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{14}	v_{15}		
	Condition C_2	New		Certified	Used			
		v_{21}		v_{22}		v_{23}		
	Color C_3	Black	Blue	N Bule	Red	Silver	White	Other
		v_{31}	v_{32}	v_{33}	v_{34}	v_{35}	v_{36}	v_{37}
	Drivetrain C_4	AWD		FWD	RWD			
	v_{41}		v_{42}		v_{43}			
Fuel Type C_5	Gasoline			Hybrid				
	v_{51}			v_{52}				
Price C_6	0		~	99999				
MPG C_7	0		~	50				
Decision attribute D	very good	good	acceptable	bad				
	Cl_1	Cl_2	Cl_3	Cl_4				

4.1 使用データ

米国自動車マーケットプラットフォームCars.comにおけるH社製の車の評価データ*)を事例に用いた。重みの組み合わせは23パターンに設定した。

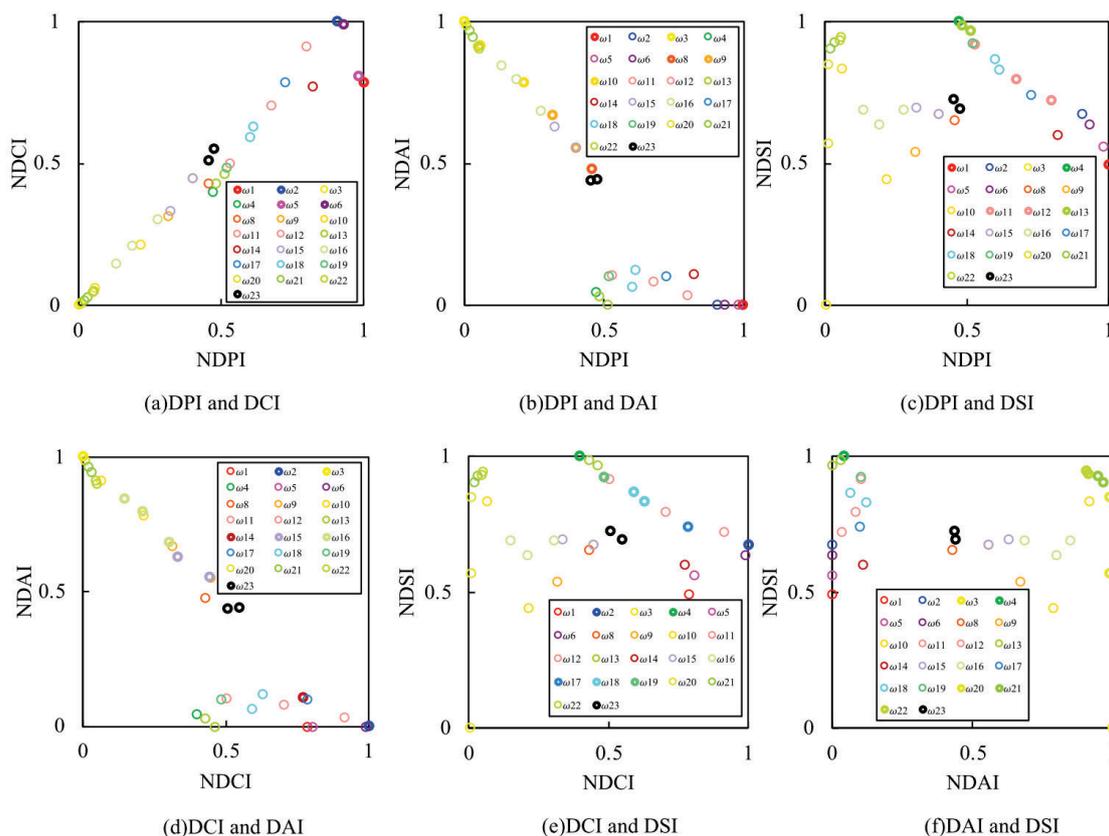
*)OmarTorres, (2023), Kaggle[<https://www.kaggle.com/datasets>]

	ω_P	ω_C	ω_A	ω_S		ω_P	ω_C	ω_A	ω_S
ω_1	1	0	0	0	ω_{14}	0	0.75	0.25	0
ω_2	0	1	0	0	ω_{15}	0	0.5	0.5	0
ω_3	0	0	1	0	ω_{16}	0	0.25	0.75	0
ω_4	0	0	0	1	ω_{17}	0	0.75	0	0.25
ω_5	0.75	0.25	0	0	ω_{18}	0	0.5	0	0.5
ω_6	0.5	0.5	0	0	ω_{19}	0	0.25	0	0.75
ω_7	0.25	0.75	0	0	ω_{20}	0	0	0.75	0.25
ω_8	0.75	0	0.25	0	ω_{21}	0	0	0.5	0.5
ω_9	0.5	0	0.5	0	ω_{22}	0	0	0.25	0.75
ω_{10}	0.25	0	0.75	0	ω_{23}	0.25	0.25	0.25	0.25
ω_{11}	0.75	0	0	0.25					
ω_{12}	0.5	0	0	0.5					
ω_{13}	0.25	0	0	0.75					

ω_P : DPI*の重み
 ω_C : DCI*の重み
 ω_A : DAI*の重み
 ω_S : DSI*の重み

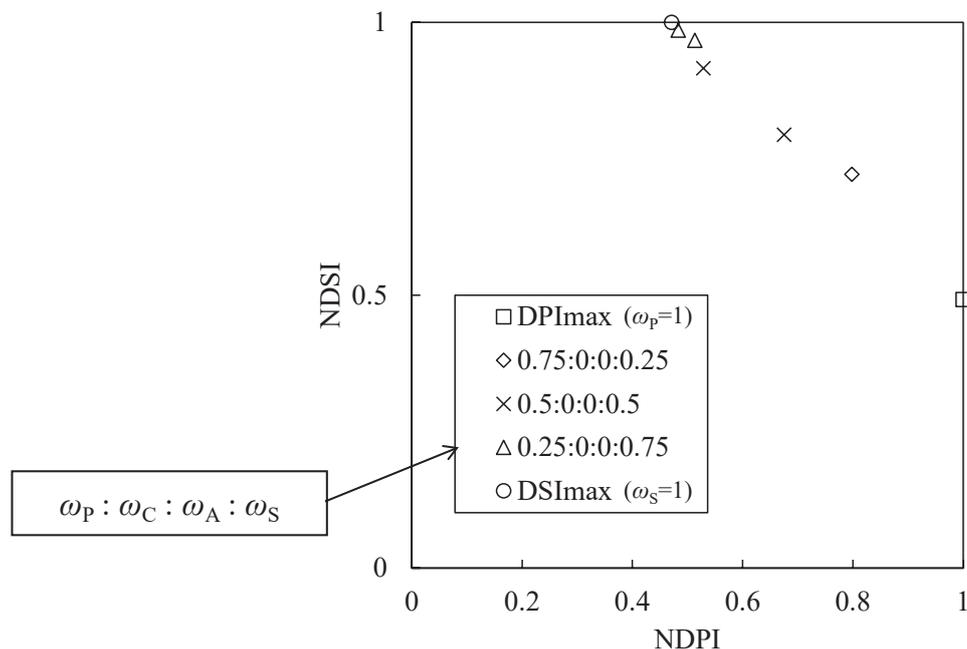
4. 自動車のユーザ評価データへの適用

4.2 結果および考察



4.2 結果および考察

各重みごとの結果を、縦軸をDSI*、横軸をDPI*とし付置した結果を以下に示す。



➡ 2つの指標の重みの設定に応じて、定性的および定量的な要求を同時に満たす決定ルールのパレート最適解を導出可能

4.2 結果および考察

各指標の車の仕様

DPI*	仕様	アメリカの自動車市場において販売台数が多い車の仕様
	詳細	SUVやSedanなどの車種に加えて、車体色黒かつAWD駆動
DCI*	仕様	アメリカの自動車市場において販売台数が多く、評価の高い車の仕様
	詳細	SUVなどの車種に加え、車体色白
DAI*	仕様	アメリカの自動車市場において販売台数が少ない車の仕様
	詳細	製造年数が古いスポーツカータイプ、車体色緑色・オレンジ色
DSI*	仕様	アメリカの自動車市場において販売台数が少ないが評価の高い、特定の需要を表す車の仕様
	詳細	Hybridかつ燃費が良い

3.6 差動伝送線路の多目的満足化設計

3.6.1 背景・目的

電子機器の設計では、複雑な電磁現象を考慮した上で、Electromagnetic Compatibility (EMC)を含む高性能で背反的な性質を含む様々な要求を満足した設計を行わなければならない。しかしながら、電気系においては従来から、複数の設計変数に対して初期値の設定とその値の修正を繰り返す試行錯誤的なポイントベース設計手法が多く行われている。ポイントベース設計では設計変数の修正を繰り返すことにより、最適な解（ポイント）を求めることになるため、設計変数が多いほど、また要求性能が多いほど仕様を満足する値を求めることが困難になる。また、製品開発の際には電気系のみで完結することはなく、機械的強度や放熱の問題などもあり、回路素子の配置上の物理的制約による配線や素子の接近に伴う不要な電磁結合や、素子の偏差など多くの不確定パラメータが生じ、設計をより困難なものにしている。このような背景に対して多種多様な性能要件を満たした上で低コスト、かつ短期間で製品を開発するために、集合論的設計法である選好度付きセットベースデザイン (Preference Set-based Design: PSD) 手法[1]-[2]が機械工学の分野で提案されている。本項では PSD 手法の電気系での適用事例として差動伝送線路系への適用例[3]について紹介する。差動伝送は、理想的な場合では2つの線路に等量異符号の差動(differential-mode: DM)信号を励振するため、線路は平衡状態にあり、ノイズ放射が小さく、また外部からの同相(common-mode: CM)ノイズに強い特徴がある。しかしながら、現実には平衡出力のドライバ実現は困難であり、また、屈曲や線路の隣接配線等に起因する幾何学的な非対称が存在するため、2つの線路を伝搬する信号は完全な等量異符号ではなく、振幅値、位相、スルーレートに差が発生し、CM成分が生じる。そのため、その抑制方法としてミアンダ等長配線が広く利用されており、本稿では差動伝送線路の等長配線用ミアンダ遅延線の設計例について紹介する。

3.6.2 検討モデル

差動伝送線路の非対称の原因には、ICピン等との接続のための不等長、グラウンドパターンや実装部品の線路付近への配置、屈曲部などがある。その位相補償のための一つの方法として等長配線・ミアンダ遅延線が広く用いられているが、蛇行部を密にすると電磁結合が生じてしまうため、図1に示すようなガイドライン等が推奨されている[4]。本項ではこのような設計問題を想定し、小型化を含めた屈曲差動伝送線路の位相補償用ミアンダ配線の多目的設計へのPSD手法の適用例について紹介する。

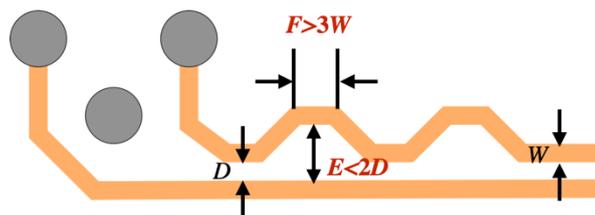


図1 蛇行部での結合防止のためのガイドラインの一例[4]

検討モデルを図 2 に示す。基板は厚み 0.1 mm、比誘電率 $\epsilon_r=4.4$ の FR-4 として、配線は差動インピーダンス $Z_{DM}=100\ \Omega$ となるように配線幅 $w=0.14$ mm、配線間隔 $s=0.14$ mm とした。等長配線のためのミアンダは 2 段とし、ミアンダ間の電磁結合量に関する l_s と、位相補償量に関する l_c の 2 つを設計変数とした。要求性能は 0.1~15 GHz における $|S_{dd1}|$ 、 $|S_{cd1}|$ 、 $|S_{cd2}|$ の最大値が -23 dB 以下、 $|S_{dd1}|$ の最小値が -0.45 dB 以上とした。ここで Mixed-mode S パラメータは DM 成分、CM 成分をモード別に表した S パラメータである。DM (差動) 成分の透過係数は、論理ポート 1 に DM で入力したエネルギーに対する論理ポート 2 への DM での出力割合 $|S_{dd1}|$ で表される。また CM (不平衡) へのモード変換透過係数は、論理ポート 1 に DM で入力したエネルギーに対する論理ポート 2 への CM での出力割合 $|S_{cd1}|$ で表される。要求性能を定性的に簡単に説明すれば、論理ポート 1 に DM 信号を入力した場合に、その入力信号が反射や CM への変換ができるだけ少ない条件で論理ポート 2 に伝送されることを目指した設計と言える。

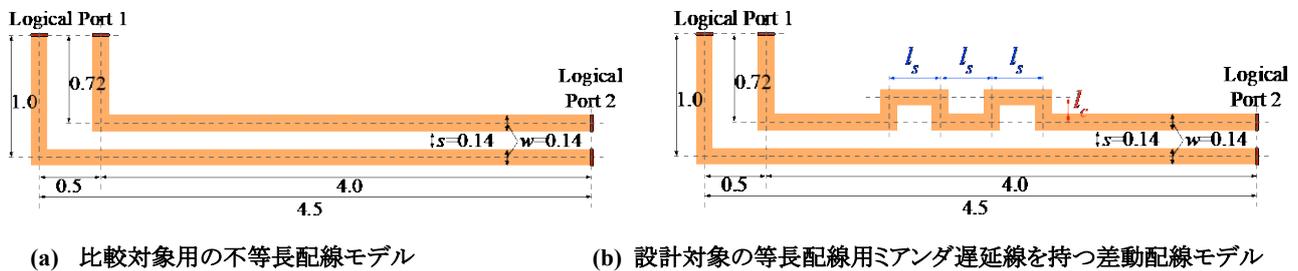


図 2 差動伝送線路モデル

3.6.3 メタモデリング

要求性能を満足するための設計変数を探索するためのモデル (メタモデリング式) を、少ない初期データから応答曲面法 (Response Surface Methodology: RSM) [5] を用いて作成する。初期データは実験、電磁界解析、理論計算のいずれを用いても得ることができるが、本検討例では要求性能を満たす設計変数範囲を探索するための初期データとしてそれぞれの設計変数に表 1 の“初期 3 水準”の列に示す 3 水準を設定し、計 9 (3^2) 通りについて有限差分時間領域 (Finite Difference Time Domain Method: FDTD) 法による電磁界解析を行い、各パラメータの周波数特性のワースト値を性能値とした。

相関係数の高いメタモデリング式を得るためには水準数を多くし、正しい範囲解を得るためには予想される範囲解の周囲を初期値に選ぶ等の方法が考えられるが、一般的には PSD により設計を行う場合には、設計対象の物理現象や、設計変数とその要求性能の定量的関係性が理論的に完全に明らかな場合は少ない。また、水準数を多くすると初期データを準備するためのコストが増加する。そのため、本項では 3 水準とし、第 1 水準、第 3 水準の値をそれぞれ機械的に第 2 水準の 1/2、2 倍に設定した。また l_s の第 2 水準の値は、 $l_s=3w=0.42$ mm とし、 l_c の第 2 水準の値は図 2 (a) での不等長 0.78 mm を 4 つの屈曲で補償することを考え、 $l_c=0.2$ mm とした。

表 1 設計変数の初期値及び範囲解

	初期 3 水準			範囲解
	水準 1	水準 2	水準 3	
l_s [mm]	0.21	0.42	0.84	0.21~0.24
l_c [mm]	0.1	0.2	0.4	0.28~0.29

計算結果を表 2 に示す。本計算結果に対して応答曲面法を適用することにより、設計変数と要求性能の関係を表す応答曲面を次式の 2 次項、1 次項、交互項の和で表される 2 次多項式（メタモデリング式）として求めた。

$$y = \beta_{20}l_s^2 + \beta_{10}l_s + \beta_{02}l_c^2 + \beta_{01}l_c + \beta_{11}l_sl_c + \beta_{00}$$

ここで y は $|S_{dd11}|$ などの要求性能であり、 β_{mn} は各要求性能に対する各項の係数である。

表 2 応答曲面算出のための初期データ

No	l_s [mm]	l_c [mm]	$ S_{dd11} $ [dB]	$ S_{da21} $ [dB]	$ S_{cd11} $ [dB]	$ S_{cd21} $ [dB]
1	0.21	0.1	-22.7	-0.49	-32.2	-15.2
2		0.2	-23.5	-0.43	-26.3	-19.2
3		0.4	-23.8	-0.45	-21.0	-26.8
4	0.42	0.1	-22.0	-0.48	-31.9	-15.5
5		0.2	-22.5	-0.41	-28.3	-20.7
6		0.4	-22.3	-0.46	-22.4	-20.6
7	0.84	0.1	-21.0	-0.49	-31.0	-15.5
8		0.2	-21.1	-0.40	-29.4	-20.6
9		0.4	-20.5	-0.44	-27.9	-20.3

図 3 は、実際の値と応答曲面から得られた値の関係を図示したものであり、理想的な応答曲面では、実際の値と応答曲面が完全に一致し、図 3 上では傾き 1、切片 0 の直線（図中の破線）となるが、現実には誤差を持つ。相関係数が低い、つまり近似度が悪い場合、得られた範囲解が要求性能を満足しない可能性があるが、その場合には最初に得られた範囲解を参考にし、狭い範囲を対象としてメタモデリング式を求め直すことで高い相関係数が得られ、問題を解決できる可能性がある[6]。本結果では、4つの性能とも 0.94 以上と高い相関係数が得られており、本応答曲面を用いて設計変数の全範囲での要求性能を算出し、PSD 手法の可能性分布、範囲絞り込みを行う。

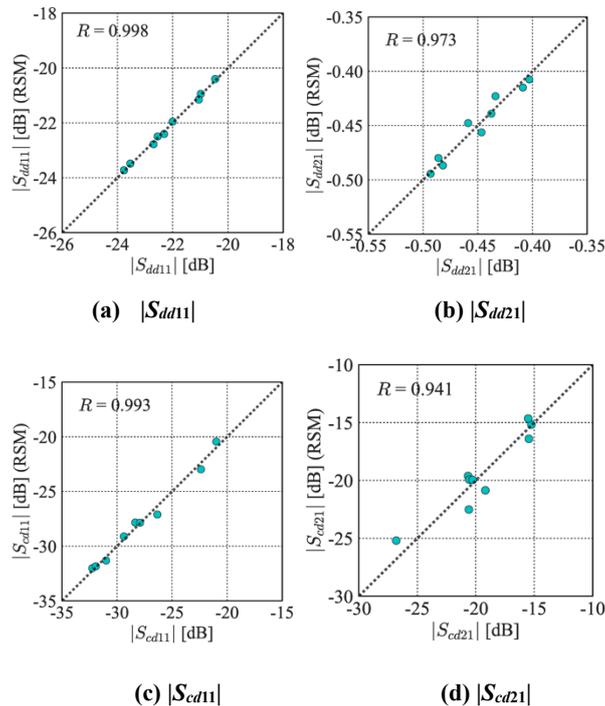


図 3 応答曲面による予測値と実際の値の比較

3.6.4 選好度の設定及び絞り込み結果

設計変数の選好度数の設定は、小型化、高密度化の観点から l_s 、 l_c ともに小さい値がより好ましいと考え、第 1 水準値の値 ($l_s = 0.21$ mm, $l_c = 0.1$ mm) の選好度数を最大値 1、そして第 3 水準値の値 ($l_s = 0.84$

mm, $l_c=0.4\text{mm}$)の選好度数を最小値0として、その間は線形の関係とした。また、要求性能の選好度は、6.5.3.2節での要求性能条件となるように設定した。

設計変数及び要求性能の選好度分布（絞り込み結果）をそれぞれ図4、5に示す。図4において、破線で囲った範囲(Input set)が“設計意図の表現”で設定した設計変数の選好度であり、実線で囲った範囲(Resultant set)が“設計変数の範囲絞り込み”においてPSD手法が求めたすべての要求性能を満足する設計変数の範囲解である。図5において、破線で囲った範囲(Required perform set)が“設計意図の表現”で設定した要求性能の選好度であり、Possible setは“実現可能性領域の見える化”で求めた可能性分布を示している。そして、実線(Narrowed set)で囲った範囲はPSDで絞り込みを行った結果であり、可能性分布と要求性能が重なる共通領域の中に範囲解が存在することを示している。

PSD手法により得られた設計変数の範囲解は表1の“範囲解”の列に示すように、 $l_s=0.21\sim 0.24\text{mm}$ 、 $l_c=0.28\sim 0.29\text{mm}$ と求められた。PSDではピンポイントの値ではなくこのようなセットとして設計変数が与えられることが大きな特徴である。また、 l_s については従来の設計ガイドライン(0.3mm以上)とは異なる設計指針を獲得することができた。

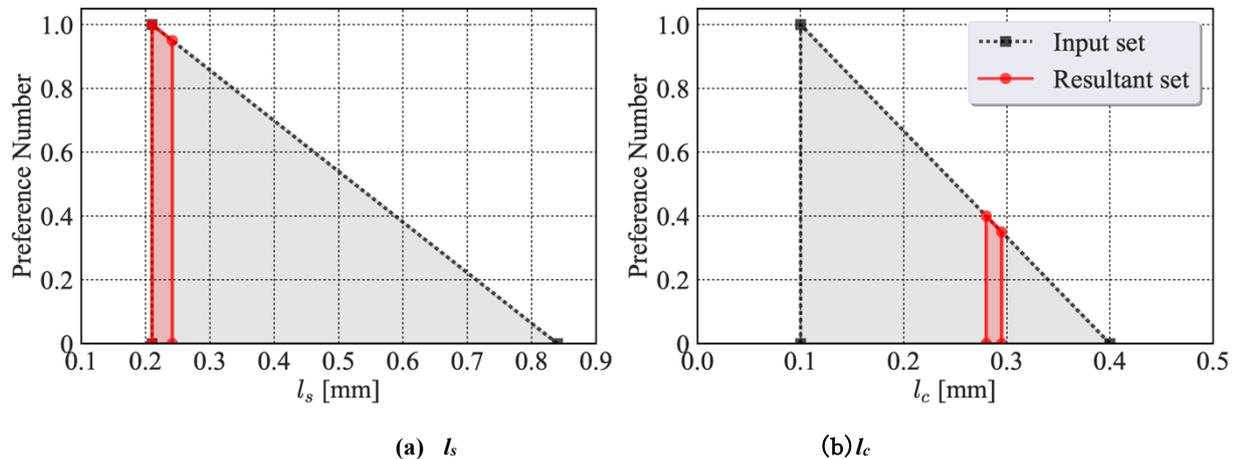


図4 設計変数のPSDによる絞り込み結果

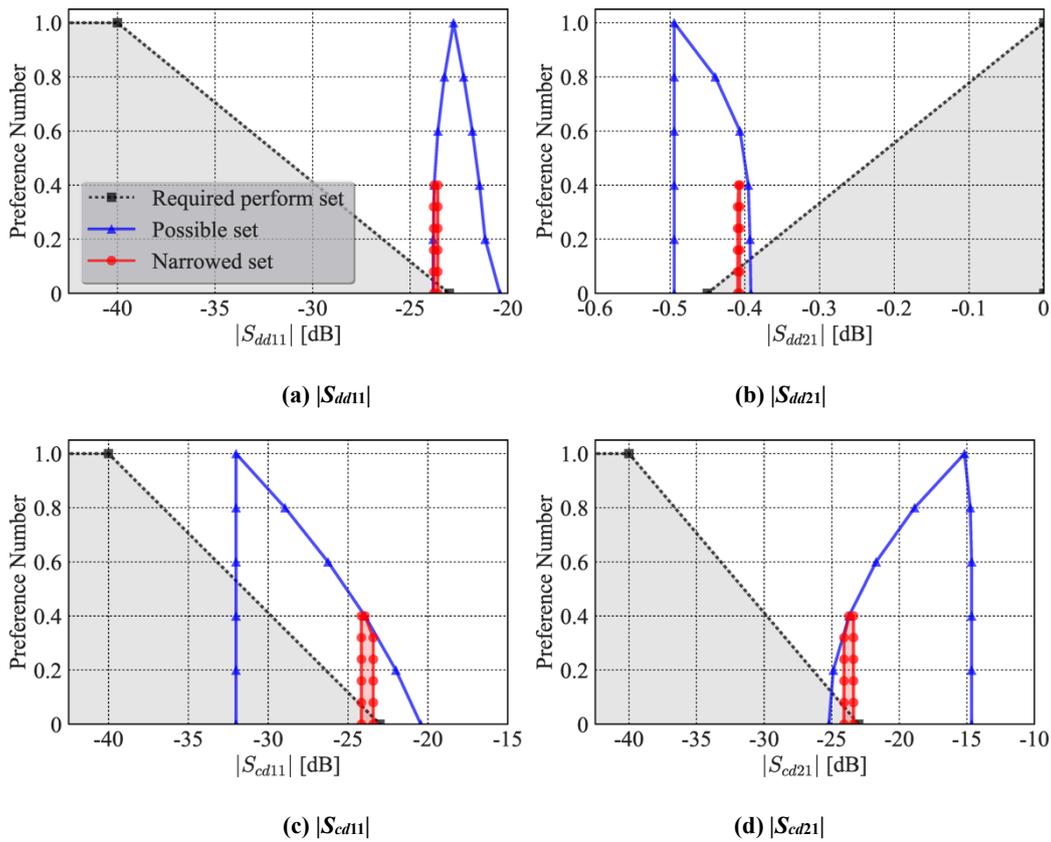


図 5 要求性能の可能性分布と PSD による絞り込み結果

本項の検討例では設計変数の数が 2 であるため、等高線等で図示した 2 次元平面マップから 4 つの要求性能を満足する共通集合領域を求めることができる。PSD 手法の有用性を示すために、得られた応答曲面から算出した 4 つの要求性能を満足する共通集合領域と、PSD により絞り込まれた領域を比較した結果を図 6 に示す。PSD 手法は、すべての要求性能を満足する共通集合領域の中で設計変数 l_s 、 l_c が小さな値の領域を範囲解として求めていることがわかる。これは要求性能の選好度数が高く、そして高密度化の観点から l_s 、 l_c が小さい条件を選好度が高くなるような選好度設定（設計者の意図）を反映した範囲解を絞り込むことに成功したこと意味する。設計変数が増えた場合には図的解法は困難であるので、より多変数の場合には PSD 手法が有用であると考えられる。

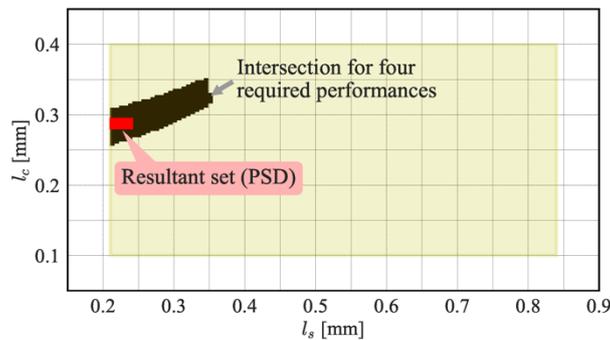


図 6 4 要求性能の共通集合領域と PSD により得られた範囲解の比較

最後に得られた範囲解の妥当性の検証を行った。得られた範囲解条件について FDTD 解析により求めた特性の最大値、最小値範囲（図中の塗りつぶし領域）と、範囲解の組み合わせの一例($L_c = 0.23$ mm, $L_s = 0.29$ mm)の結果(図中の実線: Meander optimized by PSD)を図7に示す。また、比較のためにミアンダ遅延線がない場合(図2(a)の不等長配線モデル)の結果(図中の破線: Original)もあわせて示す。不等長の結果に対して、PSDにより得られた範囲解の組み合わせでは $|S_{cd11}|$ が要求性能を満足する範囲内で劣化しているが、簡単な解析により、試行錯誤をすることなく、トレードオフ関係にある反射、伝送損失、モード変換のすべての要求性能を満足する結果となり、小型で良好な特性となるミアンダ遅延線的设计変数の範囲を簡便に得ることができていることが確認できる。本項での紹介では省略するが、設計者が制御できない不確定要素が存在するモデルとして、基板厚みや比誘電率に偏差が存在する場合の屈曲差動伝送線路についても検討を行い、PSD手法の適用可能性を示している[7]。

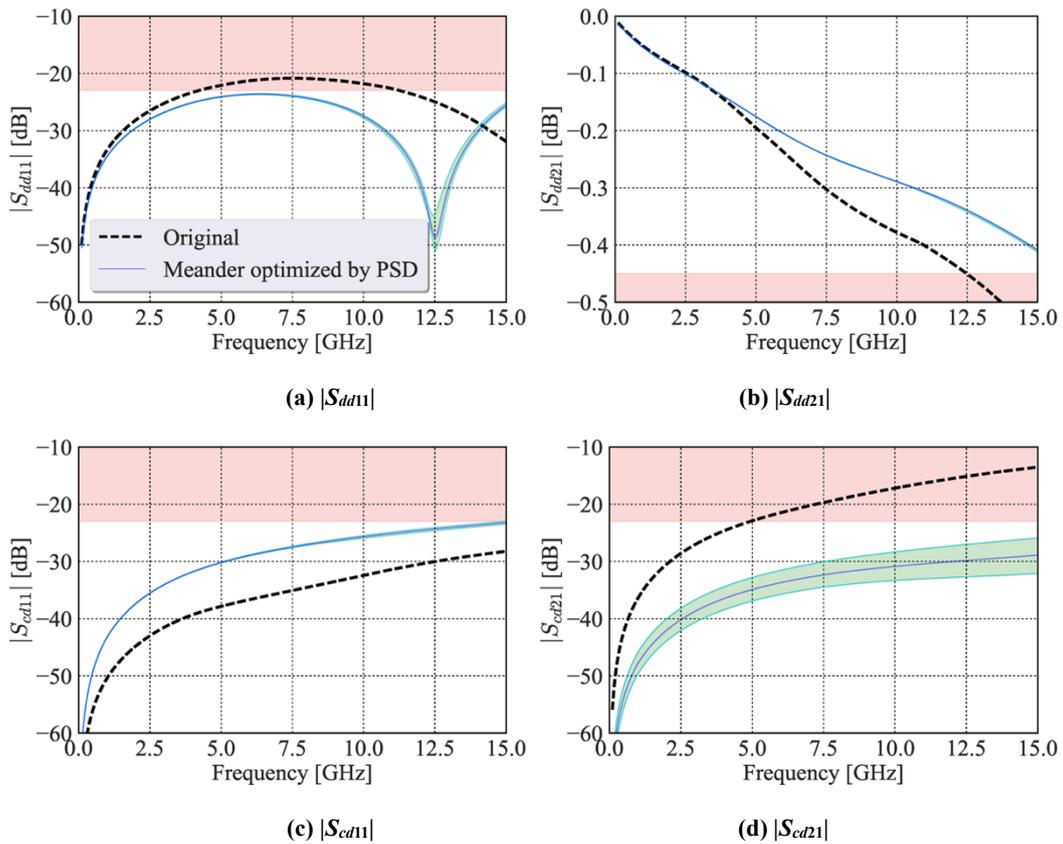


図7 要求性能に関する設計変数の範囲解の検証

3.6.5 まとめ

本項では PSD 手法を用いた差動伝送線路の設計例について紹介した。PSD ではピンポイントの値ではなくセットとして設計変数が与えられることが大きな特徴であり、範囲解を得ることは、設計変数のバラツキの許容範囲を評価することにもなり、実用的な面から有益である。紹介例は単純なモデルであるが、様々なモデルへの適用が考えられ、電磁ノイズ問題を含めた電気電子機器設計で試行錯誤が繰り返され

てきた分野では有効な設計法になり得ると考えられる。

<参考文献>

- (1) 石川 晴雄, 多目的最適化設計 -セットベース設計手法による多目的満足化-, コロナ, 2010.
- (2) 石川 晴雄, 萱野 良樹, 佐々木 直子, 福永 泰大, セットベース設計 実践ガイド, 森北出版, 2019.
- (3) Y. Kayano, Y. Kami, H. Ishikawa, F. Xiao and H. Inoue, “A Study on Design of Differential-Paired Lines with meander Delay Line by Preference Set-based Design method” , Proc. APEMC 2018, pp.536-541, May 2018.
- (4) S. Hall, G.W. Hall, and J.A. McCall, High-Speed Digital System Design: A Handbook of Interconnect Theory and Design Practices, John Wiley & Sons, INC., New York, 2000.
- (5) R.H. Myers, D.C. Montgomery and C.M. Anderson-Cook, Response Surface Methodology –Process and Product Optimization Using Designed Experiments, Wiley, 2008.
- (6) 萱野良樹, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, 井上浩, “選好度付きセットベースデザイン手法を用いた伝送線路型フィルタの設計法” , 信学論 B, vol.J102-B, no.3, pp.237-247, Mar. 2019.
- (7) 萱野良樹, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, 井上浩, “選好度付セットベースデザイン手法の屈曲差動伝送線路設計への適用” , 信学論 C, vol.J101-C, no.5, pp.233-244, May 2018.

選好度付きセットベース手法を用いた 差動伝送線路の多目的満足化設計

⇨ – 第3回セットベース設計手法に関する調査研究分科会 –

萱野 良樹 – 電気通信大学大学院情報理工学研究科 –

2023年1月16日（月）

- 1 研究分野紹介：環境電磁工学
- 2 背景：ポイントベース設計 vs. セットベース設計
- 3 選好度付きセットベースデザイン（PSD）手法
- 4 電気系への応用
- 5 適用例のご紹介：等長配線用ミアンダ遅延線の設計
- 6 おわりに

1 研究分野紹介：環境電磁工学

2 背景：ポイントベース設計 vs. セットベース設計

3 選好度付きセットベースデザイン（PSD）手法

4 電気系への応用

5 適用例のご紹介：等長配線用ミアンダ遅延線の設計

6 おわりに

研究室の研究テーマの背景：安全安心な電磁環境

- 電子機器は**不要電磁波を放射**し、**他の機器を妨害**する可能性
- 様々な機器が動作している**電磁環境**で機器が共存するには...
機器は**所望の機能が得られる**だけでなく、**電磁環境両立性 (Electromagnetic Compatibility: EMC)**を満たすことが必要

今日の日常生活での電磁波による障害

- 電話，ラジオ，TV 等に入る雑音
- 家電機器，デジタル機器の誤動作
- 生命・安全に関わる誤動作 (医療機器，工作機械，航空機)



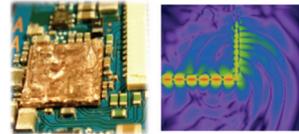
【研究室の大目標：EMC 問題の解決】

- 安全安心な電磁環境を実現するための技術の確立
- 高品質な電子情報化社会の確立への貢献

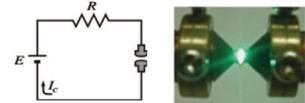
【不要電磁波・雑音防止及び対策技術】

- 電子機器からの不要電磁波放射とその抑制
 - 高周波信号の伝搬・放射の解析
 - 電磁シールドの開発・最適設計
- 障害フリー電気接点の開発
 - 電気自動車用（直流高電圧・大電流）

高速信号配線のコーナーでの電磁放射



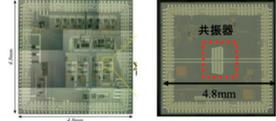
スイッチを開いた時のアーク放電



【電磁現象の新しい利用】

- 信号処理デバイスや機能回路の開発・設計
- 電磁波領域での透明マント!?

電圧制御発振器 周期構造による遅延デバイス



どのような差動配線が望ましい？

→ 信号品質で良しされるルールは電磁放射対策でも良いのか？
相反するルールなのか？

<p>Gap広い/GND近い</p> <p>$Z_{diff} = 95 \Omega$</p>	<p>Gap狭い/GND遠い</p> <p>$Z_{diff} = 98 \Omega$</p>	<p>送信端付近でミアンダ</p>	<p>受信端付近でミアンダ</p>
<p>・ 差動間隔が広くてもGNDが近い方が良いのか？ GNDが遠くても間隔が狭い方が良いのか？ ・ Z_{diff}を指定値に近づけるのを優先するのか？ 差動の結合を強めるのを優先するのか？</p>		<p>・ 等長化するために間隔を崩すならば線路のどの位置が良いのか？</p>	
<p>アコーディオン</p>	<p>トロンボーン</p>	<p>等長配線を優先</p>	<p>差動間隔を優先</p>
<p>・ 間隔さえとれば曲げ回数は多くても良いのか？ 曲げ回数を極力少なくすべきか？</p>		<p>・ 差動間隔を崩しても等長を優先するか？ 等長を妥協して差動間隔を優先するか？</p>	

研究のねらい

単なる過去の経験だけでなく、理論的に根拠のある設計指針の確立

- 1 研究分野紹介：環境電磁工学
- 2 背景：ポイントベース設計 vs. セットベース設計
- 3 選好度付きセットベースデザイン（PSD）手法
- 4 電気系への応用
- 5 適用例のご紹介：等長配線用ミアンダ遅延線の設計
- 6 おわりに

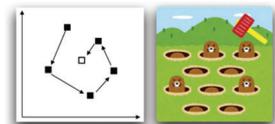
背景：電気電子機器の設計

設計問題

- 高性能で**背反的な性質**を含む多種多様な要求
- 物理的構造，規格等も同時に満足するための**協調設計**
- 回路素子，物理的寸法と配置など多くの**不確定パラメータ**
- 複数の要求性能を同時に満足する多くの設計変数の決定
⇒ 広い意味での**多目的最適化問題**

従来の設計手法（ポイントベース設計）

- パラメータを変化させて，性能をチェック
- “勘と希望的観測による**試行錯誤的な**” 最良/最適値の決定
 - 収束解が得られる保証がない（モグラたたき）
 - 不幸な場合，解がないことすら知らずに...
- 不確実性の表現が難しい
- 上流過程での最適解は，下流過程での最適性を保証しない
- なぜそのポイント値なのかが論理的にはわかりにくい



モチベーション

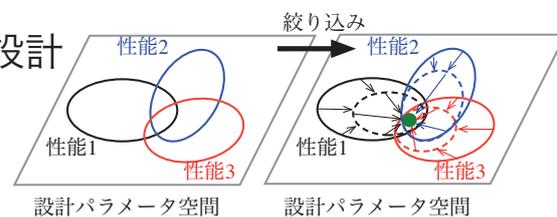
- 多種多様な性能要件を満たした上で低コストの製品を短期間で開発
- “解析による試行錯誤的な手法” からの脱却
⇒ “合成を行う設計手法” の確立

セットベース設計

- 1995 年に機械工学分野で提唱 †
- 設計変数と要求性能を **範囲** で表現
- トレードオフ特性を把握
- 複数の性能を満足するように設計変数の範囲を絞込

The Second Toyota Paradox: How Delaying Decisions Can Make Better Cars Faster

Allen Ward • Jeffrey K. Liker • John J. Cristiano • Durward K. Sobek II



† A. Ward, J.K. Liker, J.J. Cristiano and D.K. Sobek, “The second Toyota paradox: how delaying decisions can make better cars faster”, *Sloan management review*, pp.43–61, 1995.

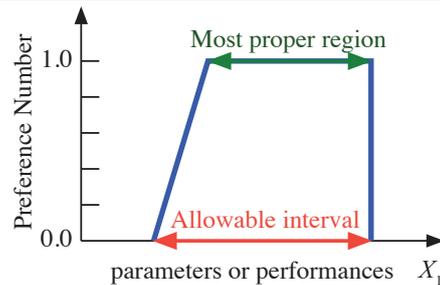
- 1 研究分野紹介：環境電磁工学
- 2 背景：ポイントベース設計 vs. セットベース設計
- 3 選好度付きセットベースデザイン (PSD) 手法
- 4 電気系への応用
- 5 適用例のご紹介：等長配線用ミアンダ遅延線の設計
- 6 おわりに

特徴

- 選好度 (Preference) と称する概念を導入
- 複数性能を満足する設計変数集合を決定する過程を定量的に評価

選好度

- セットと選好度数 (0~1) を用いて設計者の意図を反映
- 設計の好ましさとロバスト性を定量的に評価可能



† 石川晴雄, 多目的最適化設計 -セットベース設計手法による多目的満足化-, コロナ, 2010.
‡ 石川晴雄, 萱野良樹, 佐々木直子, 福永泰大, セットベース設計実践ガイド, 森北出版, 2019.

PSD 手法のフローチャート

メタモデル

- 設計変数と性能の関係を表すモデル (式)
- 少ない初期データから要求性能を満たす設計変数の探索に利用

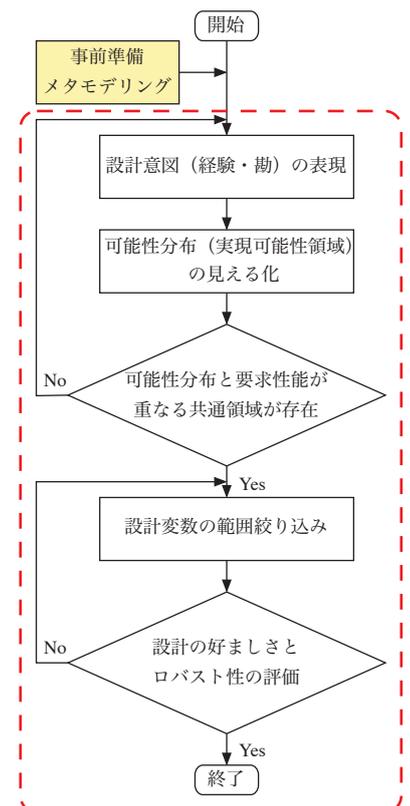
Response Surface Methodology* の利用

- 初期データの算出: 実験, シミュレーション, 理論計算
- 今回ご紹介する設計では, 1次項, 2次項, 交互項の和で表される2次多項式を利用

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i,j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j$$

x_i, x_j : 設計変数が対応, y : 要求性能

* R.H. Myers, D.C. Montgomery and C.M. Anderson-Cook, Response surface methodology -process and product optimization using designed experiments, Wiley, 2008.

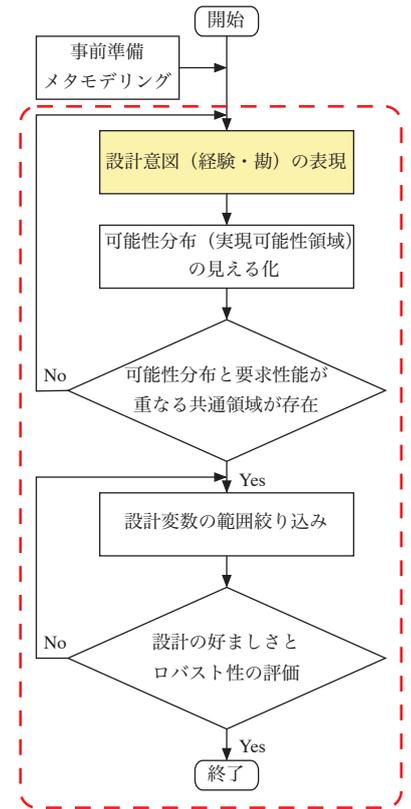
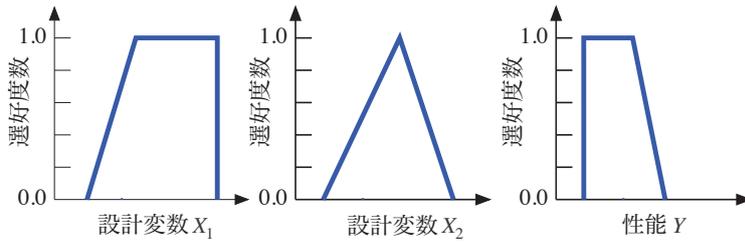


PSD 手法のフローチャート

選好度の設定

ここでは例として

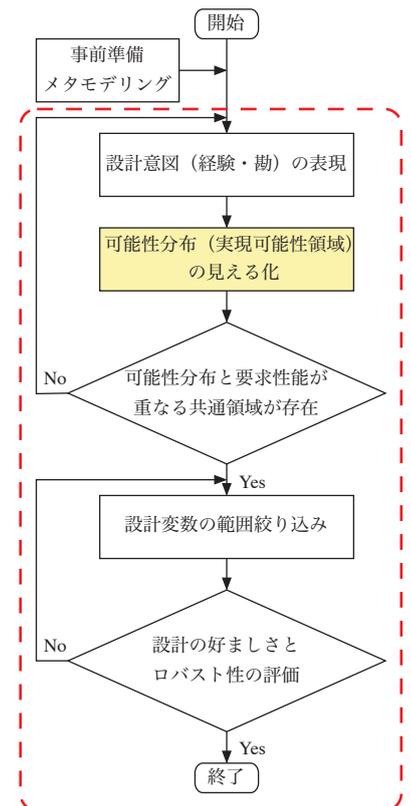
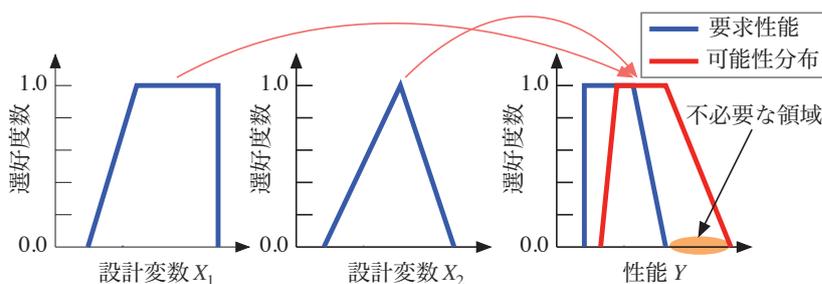
- 2つの設計変数 X_1 , X_2
- 一つの要求性能 Y



PSD 手法のフローチャート

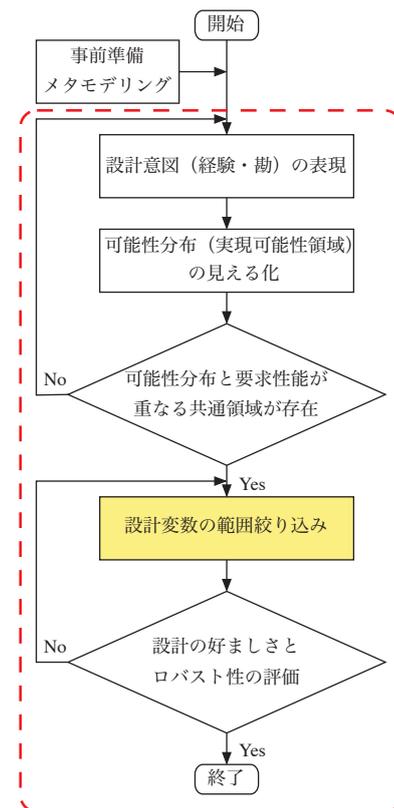
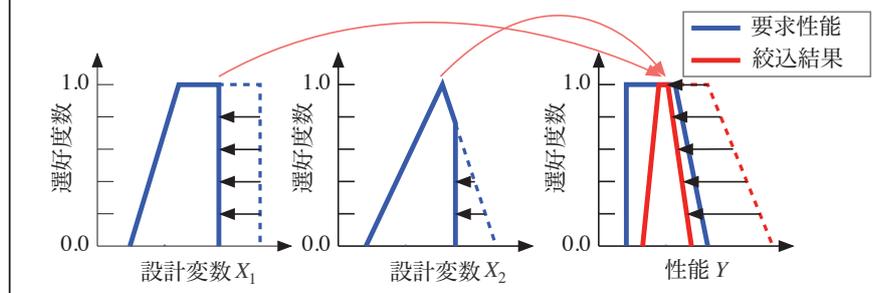
可能性分布の算出

- 設計変数の初期範囲の組み合わせで生じる性能の範囲の計算



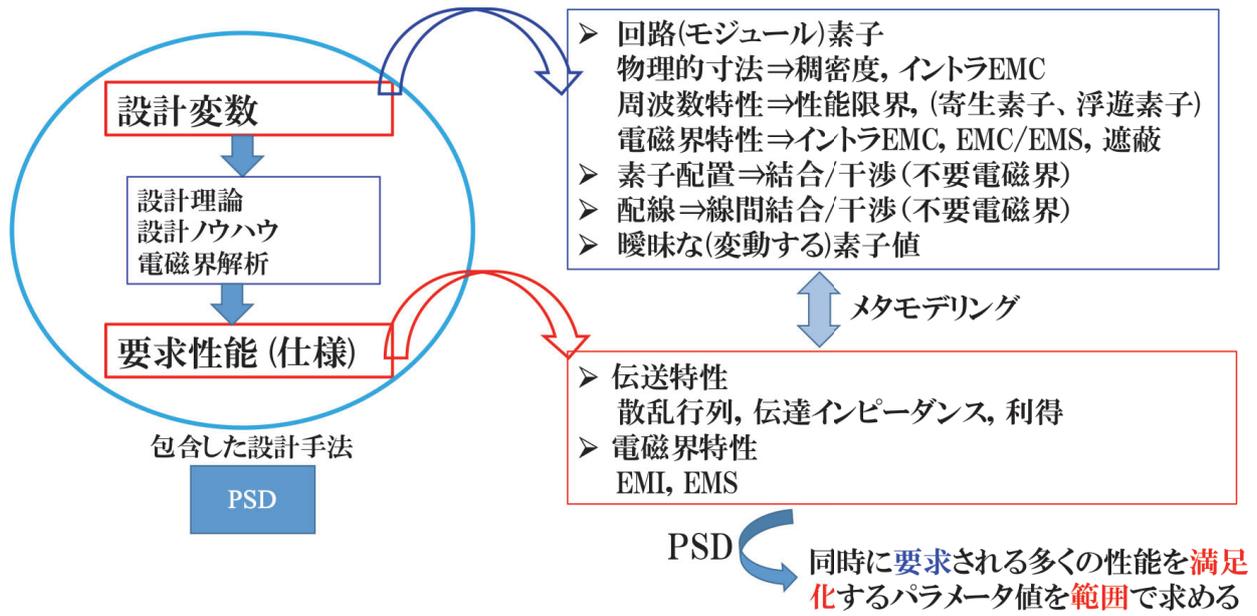
絞込

■ 選好度を考慮して絞り込み



- 1 研究分野紹介：環境電磁工学
- 2 背景：ポイントベース設計 vs. セットベース設計
- 3 選好度付きセットベースデザイン (PSD) 手法
- 4 電気系への応用
- 5 適用例のご紹介：等長配線用ミアンダ遅延線の設計
- 6 おわりに

環境電磁工学分野での PSD 手法の展開

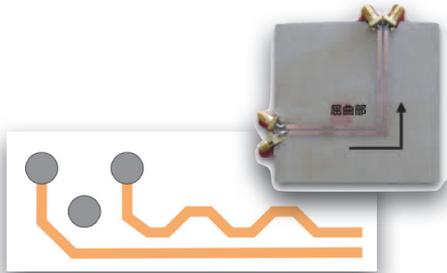


トレードオフ関係, 制約の多いノイズ対策に対して多目的満足化手法である PSD 手法は相性が良い

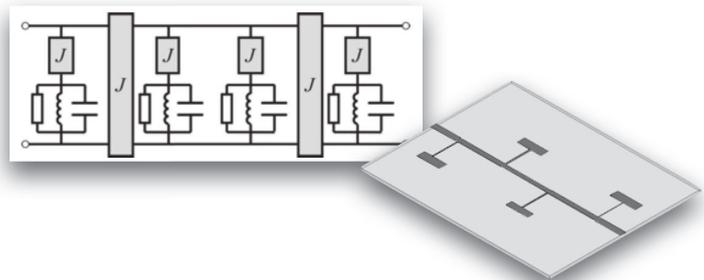
これまでの電気系への PSD 手法の適用事例

→ 赤字文字は本日ご紹介するトピックス

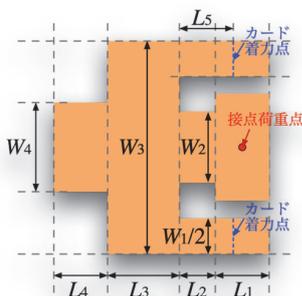
高速信号配線・電源系



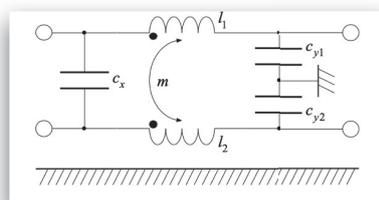
フィルタ・分散遅延デバイス



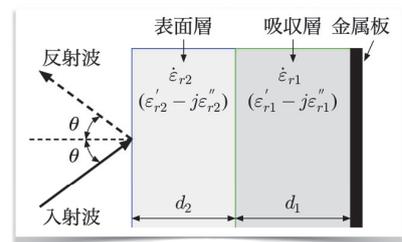
機構部品



EMIフィルタ

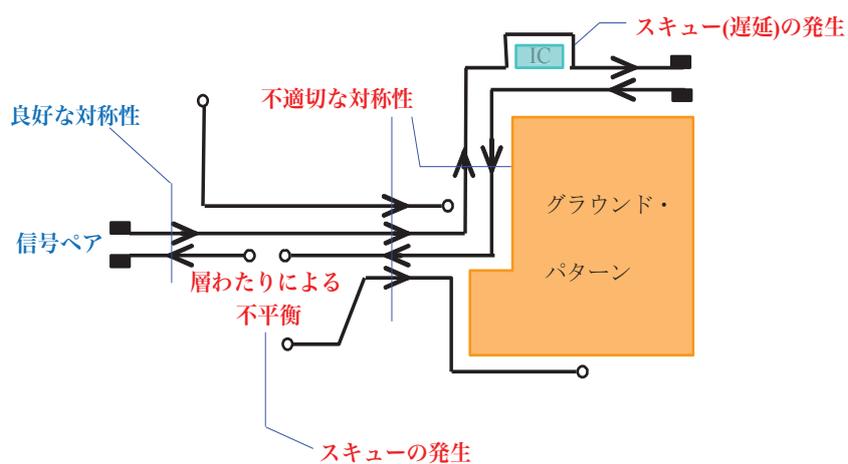


電波吸収体



- 1 研究分野紹介：環境電磁工学
- 2 背景：ポイントベース設計 vs. セットベース設計
- 3 選好度付きセットベースデザイン（PSD）手法
- 4 電気系への応用
- 5 適用例のご紹介：等長配線用ミアンダ遅延線の設計
- 6 おわりに

差動伝送線路の問題点（幾何学的非対称・不平衡問題）



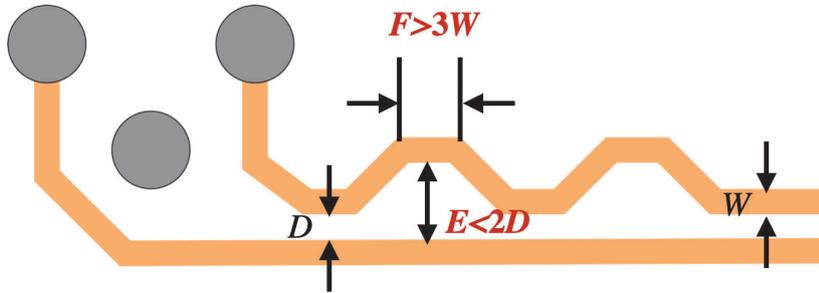
【LVDS オーナーズマニュアルを参考に作成】

- 伝送信号の劣化（Signal Integrity: SI の劣化）
- 放射 EMI の増加
- SI, EMI 両観点からの設計のトレードオフ, 実装上の制約等, 多数の設計変数と要求性能 ⇒ PSD

屈曲差動伝送線路の位相補償用ミアンダ配線の PSD を用いた設計

動機

- 屈曲差動伝送線路の位相補償用ミアンダ配線の多目的設計の簡便化



要求性能

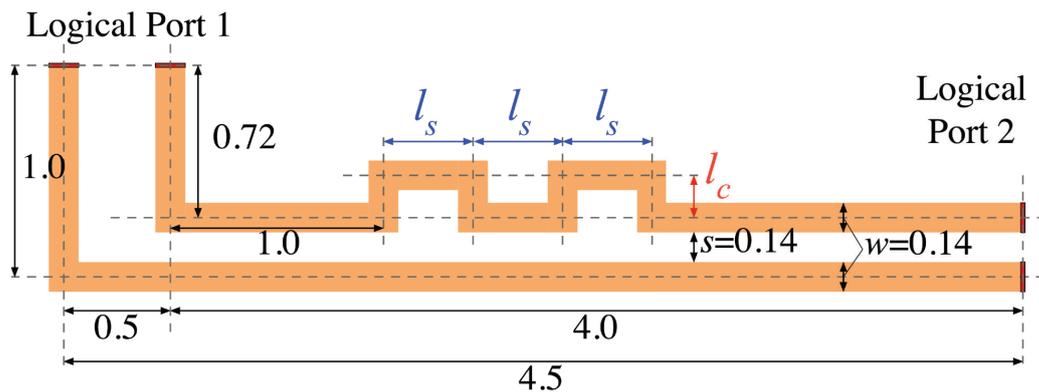
- 反射
- 伝送損失
- モード変換
- 電磁放射

ガイドラインの一例：蛇行部での結合をふせぐ

目的

- 小型化を含めた多目的要求のミアンダ配線について、PSD による設計の提案とその有効性の実証

検討に用いたミアンダ配線モデル



設計変数

- ミアンダ間の結合量に関する l_s
- 位相補償量に関する l_c

[メタモデリングのための初期条件]

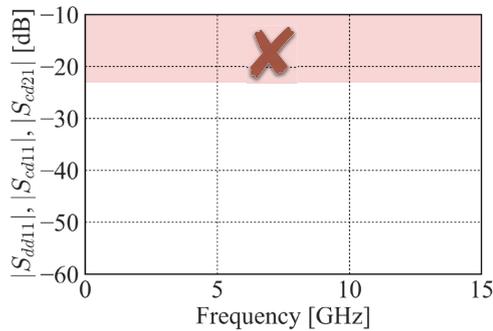
水準	l_s [mm]	l_c [mm]
1	0.21	0.1
2	0.42	0.2
3	0.84	0.4

- 誘電体の比誘電率 $\epsilon_r = 4.4$
- 誘電体の厚み $h = 0.1\text{mm}$
- 線路幅 $w_l = 0.14\text{mm}$
- 差動線路間隔 $s = 0.14\text{mm}$

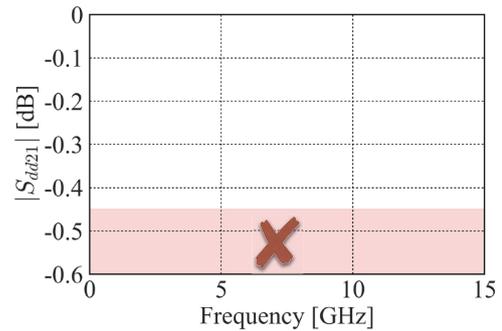
着目した仕様及び選好度の設定

要求性能 (SI中心)

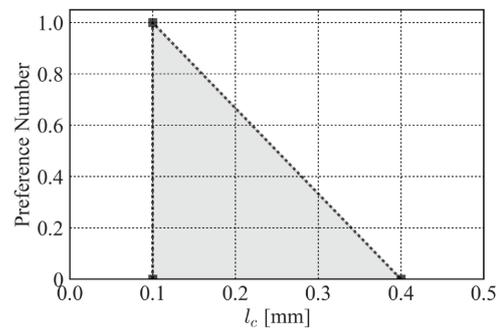
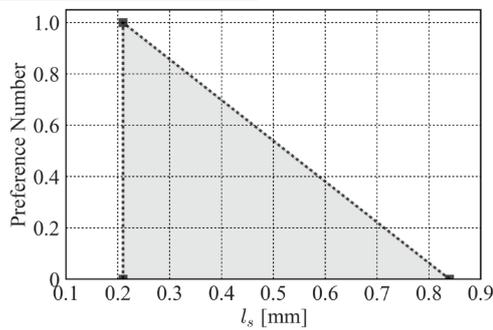
$|S_{dd11}|, |S_{cd11}|, |S_{cd21}|$ の最大値 $< -23\text{dB}$



$|S_{dd21}|$ の最小値 $> -0.45\text{dB}$



設計変数の選好度設定: 小さいほど選好度が高い



応答曲面作成のための初期データ

↪ FDTD 法を用いて計算

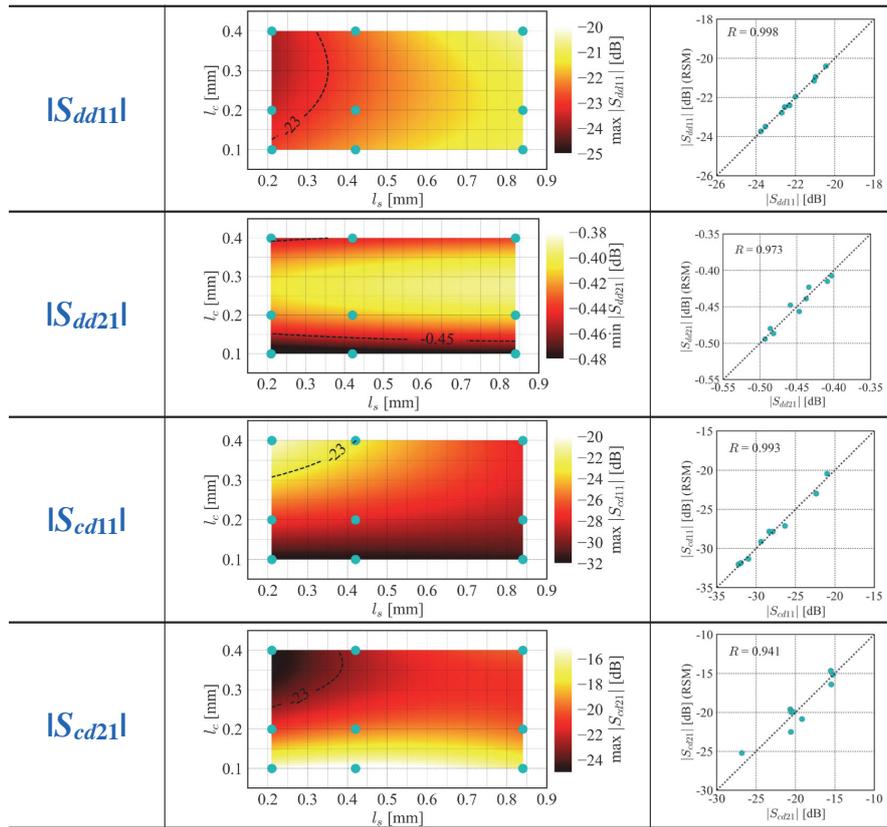
設計変数

性能

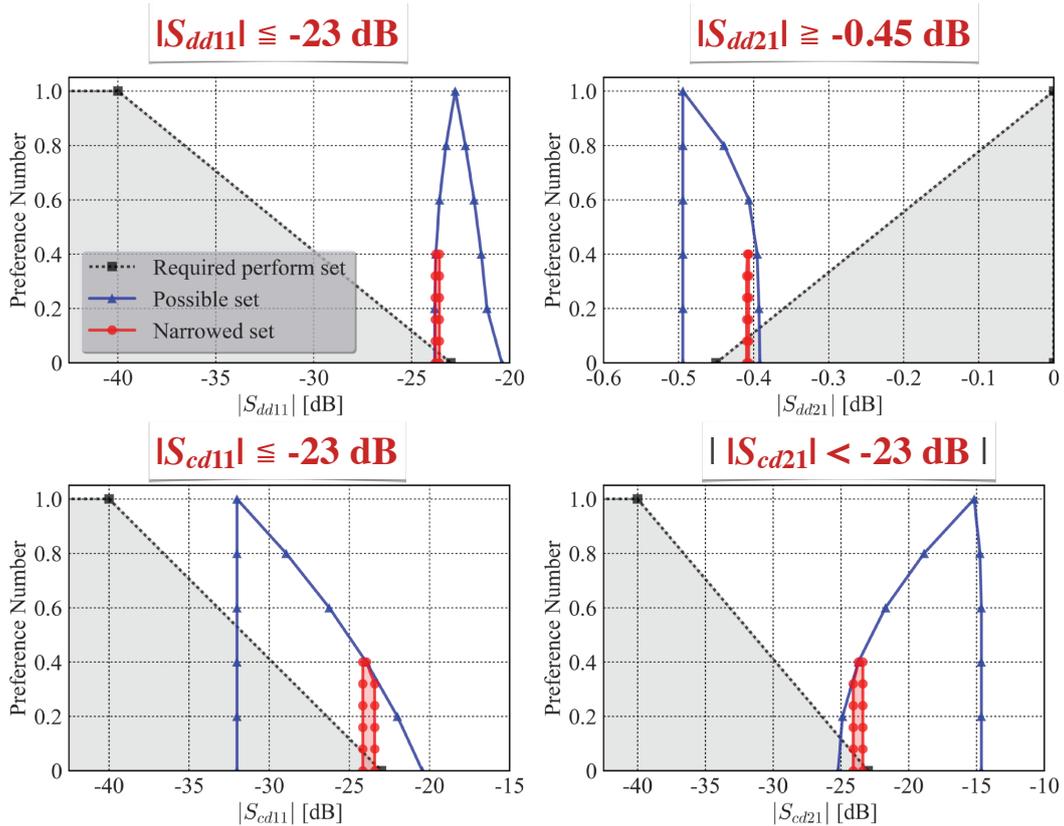
No	l_s [mm]	l_c [mm]	$ S_{dd11} $ [dB]	$ S_{dd21} $ [dB]	$ S_{cd11} $ [dB]	$ S_{cd21} $ [dB]
1		0.1	-22.7	-0.49	-32.2	-15.2
2	0.21	0.2	-23.5	-0.43	-26.3	-19.2
3		0.4	-23.8	-0.45	-21.0	-26.8
4		0.1	-22.0	-0.48	-31.9	-15.5
5	0.42	0.2	-22.5	-0.41	-28.3	-20.7
6		0.4	-22.3	-0.46	-22.4	-20.6
7		0.1	-21.0	-0.49	-31.0	-15.5
8	0.84	0.2	-21.1	-0.40	-29.4	-20.6
9		0.4	-20.5	-0.44	-27.9	-20.3

➔ $y = \beta_{20} \cdot l_s^2 + \beta_{10} \cdot l_s + \beta_{02} \cdot l_c^2 + \beta_{01} \cdot l_c + \beta_{11} \cdot l_s \cdot l_c + \beta_{00}$

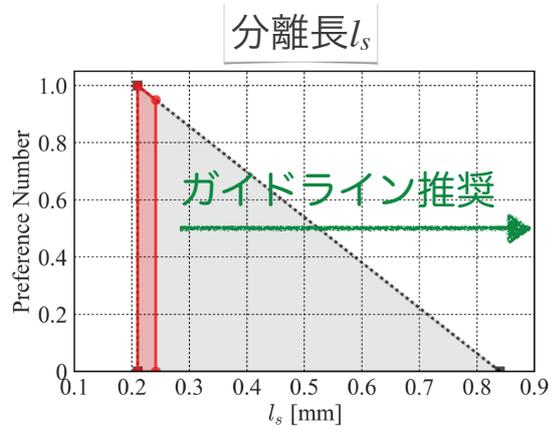
得られた応答曲面とその評価



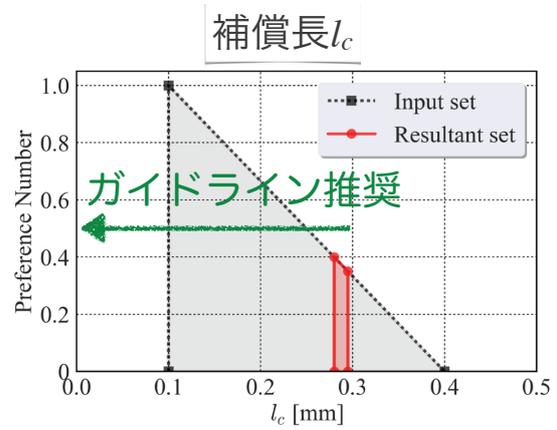
要求性能の絞り込み結果



設計変数の範囲解

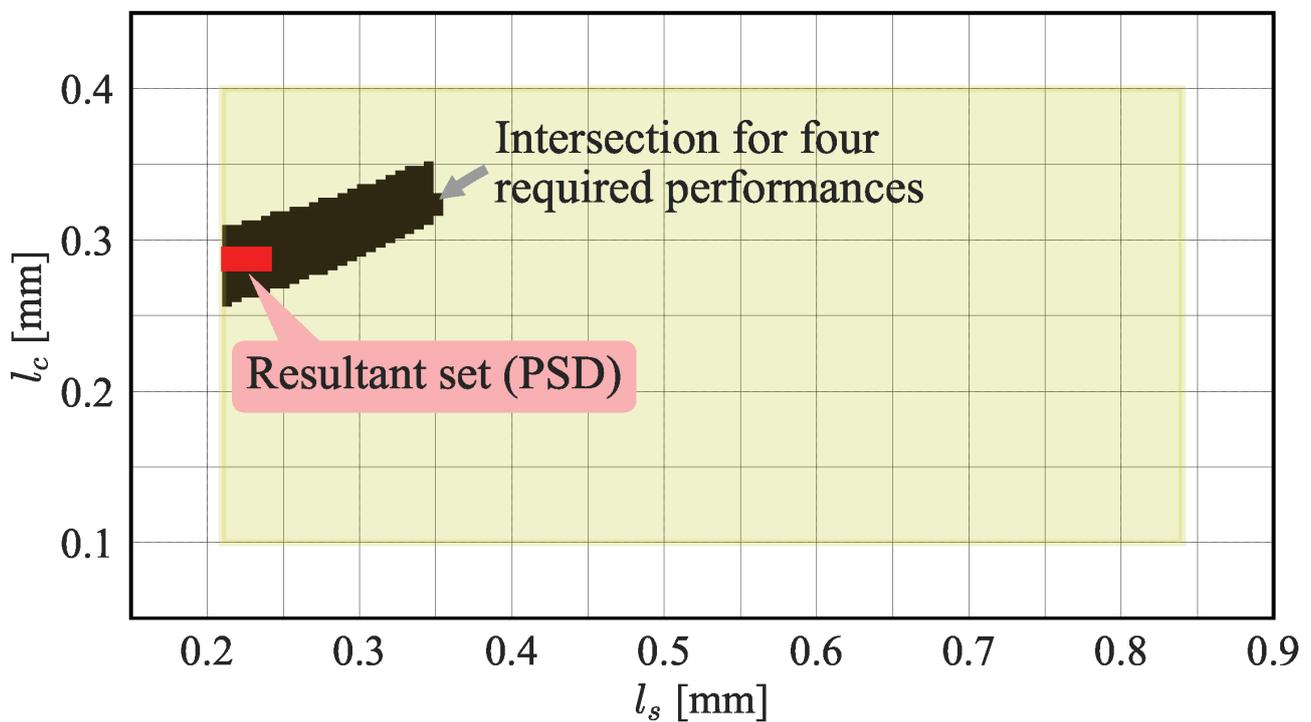


0.21 ~ 0.24mm

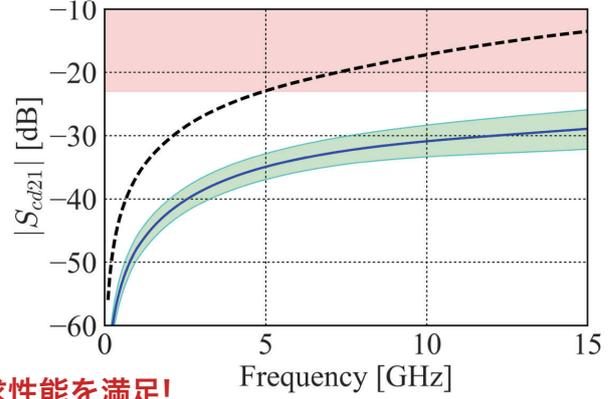
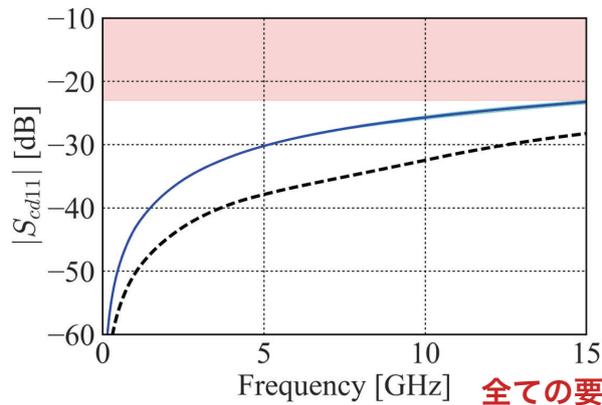
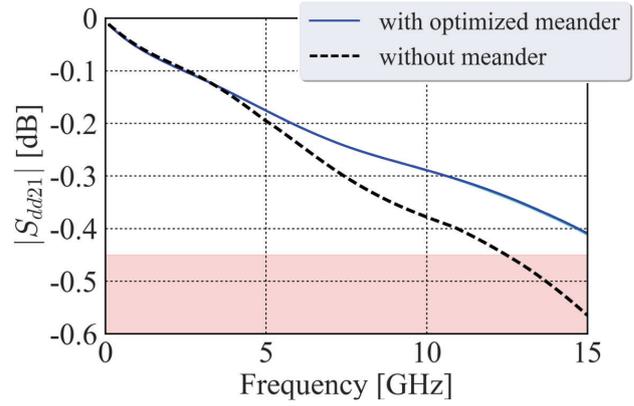
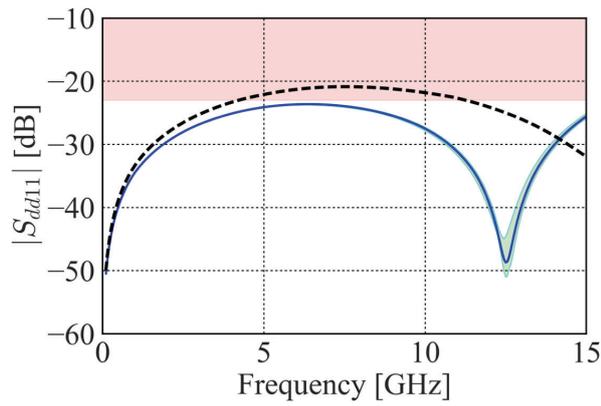


0.28 ~ 0.29mm

共通集合領域と PSD による範囲解の比較

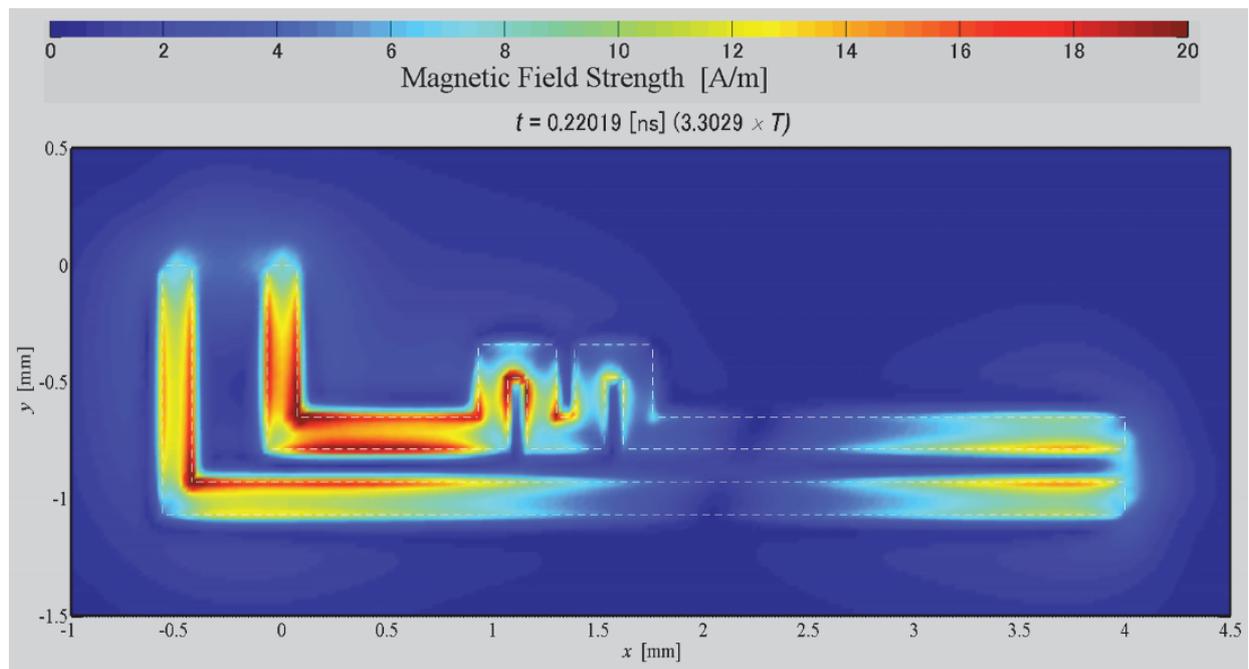


得られた範囲解の検証結果



全ての要求性能を満足!

15 GHz 正弦波で差動励振した場合の磁界分布



- トレードオフ関係にある反射，伝送損失，モード変換の全ての要求性能を満足する設計変数の範囲解
- 従来の設計ガイドラインとは異なる設計指針の獲得

関連する検証済みの適用例

- 放射特性を含む場合
- 基板材料にバラツキがある場合

- 1 研究分野紹介：環境電磁工学
- 2 背景：ポイントベース設計 vs. セットベース設計
- 3 選好度付きセットベースデザイン（PSD）手法
- 4 電気系への応用
- 5 適用例のご紹介：等長配線用ミアンダ遅延線の設計
- 6 おわりに

ご紹介した内容

“合成を行う設計手法”の確立を目指して、集合論的設計法である PSD 手法の電気系での単純な適用例を紹介

- 等長配線用ミアンダ遅延線

PSD による設計のメリット

- 試行錯誤を行うことなく設計可能・調整も不要
- 選好度を考慮しながら、ロバストな設計解を獲得可能
- 設計値が許容差設計を含む範囲解として得られる
- より複雑な設計では、さらに効果的であることが期待

7 付録：PSD の電気系への適用例リスト

PSD の電気系への適用例

→ 屈曲線路, 差動線路, メッシュシールド等の伝送線路関係

- [1] 長尾和哉, 川上雅士, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, “電気設計における PSD 手法適用の検討その 2”, 2015 年信学総大, B-4-56, p.346, Mar. 2015.
- [2] M. Kawakami, K. Nagao, H. Ishikawa, Y. Kami and F. Xiao, “Study on application of the preference set-based design method to layout of microstrip lines with required performances”, 信学技報, EMCJ2015-19, Jun. 2015.
- [3] 萱野良樹, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, 井上浩, “選好度付きセットベースデザイン手法の屈曲差動伝送線路設計への適用”, 信学技報, EMCJ2016-122, Mar. 2017.
- [4] Y. Kayano, Y. Kami, H. Ishikawa, F. Xiao and H. Inoue, “A study on design of bent differential-paired lines by preference set-based design method”, 信学技報, EMCJ2017-16, May 2017.
- [5] 萱野良樹, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, 井上浩, “選好度付セットベースデザイン手法の屈曲差動伝送線路設計への適用”, 信学論 C, Vol.J101-C, No.5, pp.233-244, May 2018.
- [6] 萱野良樹, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, 井上浩, “等長配線用ミアンダ遅延線をもつ差動伝送線路の PSD 手法による多目的設計に関する一検討”, 2018 年信学総大, B-4-33, p.282, Mar. 2018.
- [7] Y. Kayano, Y. Kami, H. Ishikawa, F. Xiao and H. Inoue, “A Study on Design of Differential-Paired Lines with Meander Delay Line by Preference Set-Based Design Method”, in *Proc. APEMC 2018*, pp.536-541, Singapore, May 2018.
- [8] K. Matsuishi, Y. Kayano, F. Xiao and Y. Kami, “Multi-Objective Design of Transmission Line Referenced to Meshed Ground Planes by Preference Set-based Design”, in *Proc. EMC Europe 2019*, pp.486-491, Barcelona, Sep. 2019.
など

PSD の電気系への適用例

→ 集中定数/伝送線路型フィルタ関係

- [9] 川上雅士, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, “選好度付きセットベースデザイン (PSD) 手法のフィルタ設計への適用の検討”, 電学論 A, vol.136, no.10, pp.621-628, 2016.
- [10] 萱野良樹, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, 井上浩, “選好度付きセットベースデザイン手法を用いた伝送線路型フィルタの設計法に関する一検討”, 信学技報, EMCJ2017-60, Nov. 2017.
- [11] 萱野良樹, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, 井上浩, “選好度付きセットベースデザイン手法を用いた伝送線路型フィルタの設計法に関する一検討 (その 2) メタモデリングに実験計画法を用いた場合”, 信学技報, EMCJ2017-106, Mar. 2018.
- [12] 萱野良樹, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, 井上浩, “選好度付きセットベースデザイン手法を用いた伝送線路型フィルタの設計法に関する一検討 (その 3) フィルタ理論による設計との比較”, 信学技報, EMD2018-12, Jun. 2018.
- [13] 萱野良樹, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, 井上浩, “選好度付きセットベースデザイン手法を用いた伝送線路型フィルタの設計法”, 信学論 B, vol.J102-B, no.3, pp.237-247, Mar. 2019.
- [14] 萱野良樹, 上芳夫, 肖鳳超, “選好度付きセットベースデザイン手法を用いたフィルタ回路の設計 -ロバスト性の評価-", 信学技報, EMD2019-58, Feb. 2020.
- [15] 萱野良樹, 上芳夫, 肖鳳超, “選好度付きセットベース設計手法を用いたロバスト設計 -回路設計への適用-", 信学技報, EMD2020-7, Jul. 2020.
- [16] 萱野良樹, 上芳夫, 肖鳳超, “選好度付きセットベース設計手法を用いたロバスト設計 -回路設計への適用 (その 2) -”, 信学技報, EMD2021-10, Aug. 2021.

PSD の電気系への適用例

↪ EMI フィルタ関係

- [17] 川上雅士, 長尾和哉, 石川晴雄, 上芳夫, 肖鳳超, “電気設計における PSD 手法適用の検討 (その1)”, 2015 年信学総大, B-4-55, p.345, Mar. 2015.
- [18] 川上雅士, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, “選好度付セットベースデザイン (PSD) 手法を用いた EMI フィルタ設計手法の検討”, 信学技報, EMCJ2015-105, Jan. 2016.
- [19] 川上雅士, 石川晴雄, 上芳夫, 肖鳳超, “チョークコイルの寄生抵抗成分を考慮した PSD 手法による EMI フィルタの設計”, 2016 年信学総大, B-4-47, p.367, Mar. 2016.
- [20] 萱野良樹, 川上雅士, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, 井上浩, “選好度付きセットベースデザイン手法を用いた EMI フィルタの多目的設計に関する一検討”, 信学技報, EMD2018-14, Jul. 2018.
- [21] 萱野良樹, 川上雅士, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, 井上浩, “差動伝送線路用 EMI フィルタの PSD 手法による多目的設計に関する一検討”, 2018 年信学ソ大, BS-3-8, pp.S-50-S-51, Sep. 2018.
- [22] 萱野良樹, 川上雅士, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, 井上浩, “PSD 手法を用いた差動伝送線路用 EMI フィルタの多目的設計”, 信学技報, EST2018-77, Oct. 2018.
- [23] 萱野良樹, 川上雅士, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, 井上浩, “選好度付きセットベースデザイン手法を用いた EMI フィルタの多目的設計”, 信学論 C, vol.J102-C, no.5, pp.166-169, May 2019.
- [24] Y. Kayano, M. Kawakami, Y. Kami, H. Ishikawa, F. Xiao and H. Inoue, “Multi-Objective Design of EMI Filter for Differential Paired-Lines by Preference Set-based Design”, in Proc. EMC Sapporo and APEMC2019, pp.812-815, Sapporo, Jun. 2019.
- [25] 萱野良樹, 上芳夫, 肖鳳超, “減衰極をもつ差動信号用 EMI フィルタと PSD による設計”, 2020 年信学ソ大, B-4-20, p.196, Sep. 2020.
- [26] Y. Kayano, Y. Kami and F. Xiao, “EMI Filter with Attenuation Pole for Differential Paired-Lines and Its Design by PSD”, in Proc. EMC Europe 2020, #403, online, Sep. 2020.
- [27] B.D. Chinh, Y. Kayano, Y. Kami and F. Xiao, “Multi-Objective Design of EMI Filter by Preference Set-based Design Method and Polynomial Chaos Method”, 2022 年信学ソ大, B-4-6, p.176, Sep. 2022.

など

PSD の電気系への適用例

↪ デバイス (負遅延回路, 電源回路) 関係

- [28] 萱野良樹, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, 井上浩, “選好度付きセットベースデザイン手法の負の群遅延回路設計への適用”, 2017 年信学総大, B-4-22, p.300, Mar. 2017.
- [29] 萱野良樹, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, 井上浩, “選好度付きセットベースデザイン手法による負の群遅延特性を持つ SIR 型伝送線路構造の設計に関する一検討”, 信学技報, EMD2017-14, Jul. 2017.
- [30] 萱野良樹, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, 井上浩, “負の群遅延特性のための SIR 型スタブを持つ伝送線路の PSD 手法による設計”, 2017 年信学ソ大, B-4-1, p.204, Sep. 2017.
- [31] Y. Kayano, Y. Kami, H. Ishikawa, F. Xiao and H. Inoue, “Design of Transmission Line with Impedance Resonator for Negative Group Delay and Slope Characteristics by Preference Set-based Design Method”, in Proc. ICEP-IAAC 2018, pp.170-175, Mie, Apr. 2018.
- [32] 萱野良樹, 上芳夫, 石川晴雄, 肖鳳超, 井上浩, “選好度付きセットベース設計手法を用いた負の群遅延線路の設計法に関する一検討 -粒子群最適化手法との比較-”, 信学技報, EMD2019-10, Jun. 2019.
- [33] 小池健介, 萱野良樹, 肖鳳超, 上芳夫, “選好度付きセットベースデザイン手法を用いた安定化電源回路の最適設計と設計解のロバスト性の評価”, 2021 年信学総大, B-4-18, p.256, Mar. 2021.
- [34] 萱野良樹, 上芳夫, 肖鳳超, “選好度付きセットベース設計手法を用いたロバスト設計 - (その3) 安定化電源回路の多目的満足化設計への適用-”, 信学技報, EMD2022-9, Aug., 2022.

PSD の電気系への適用例

↳ 電波吸収体, PDN 関係

- [35] 上芳夫, 萱野良樹, 石川晴雄, 肖鳳超, “選好度付きセットベース設計手法について”, 信学技報, EMCJ2017-59, Nov. 2017.
 - [36] 萱野良樹, 上芳夫, 肖鳳超, “選好度付セットベースデザイン手法を用いた 2 層型電波吸収体の多目的満足化設計”, 信学論 C, vol.J103-C, no.5, pp.257-260, May 2020.
 - [37] 川上雅士, 萱野良樹, 石川晴雄, 上芳夫, 肖鳳超, “選好度付セットベース設計手法を用いた電源-GND プレーンへのデカップリングキャパシタの素子値決定手法の検討”, 2018 年信学総大, B-4-34, p.283, Mar. 2018.
 - [38] 川上雅士, 萱野良樹, 石川晴雄, 上芳夫, 肖鳳超, “メタモデリングに RBF 補間を用いた PSD 手法による電圧変動抑制のためのデカップリングキャパシタ実装の一検討”, 2019 年信学ソ大, B-4-52, p.249, Sep. 2019.
 - [39] 川上雅士, 萱野良樹, 肖鳳超, 上芳夫, 戸花照雄, 秋元浩平, 磯田陽次, “電源-グラウンドプレーン上に発生する電圧変動の近似式の一検討”, 信学論 C, vol.J103-C, no.5, pp.266-269, May 2020.
- など

PSD の電気系への適用例

↳ 機構部品関係

- [40] Y. Kayano, K. Miyanaga, H. Inoue and Y. Kami, “Application of the Preference Set-based Design Method to Cantilever for Electrical Contact”, *ICEC 2018*, pp.143-149, Oct. 2018.
- [41] 萱野良樹, 宮永和明, 井上浩, 上芳夫, “電気接点用片持ち梁の PSD による多目的最適化”, 信学技報, EMD2019-3, May 2019.
- [42] 萱野良樹, 宮永和明, 井上浩, “選好度付きセットベースデザイン手法を用いた電気接点用片持ち梁のロバスト設計”, 信学技報, EMD2020-7, Jul. 2020.
- [43] Y. Kayano, K. Miyanaga and H. Inoue, “Novel Multi-Objective Design Approach for Cantilever of Relay Contact using Preference Set-based Design Method”, *IEICE Trans. Electron. Vol.E103-C, no.12, pp.713-717, Dec. 2020.*