

品質工学とセットベース設計を融合した 品質工学ツールAdvance/JIANTの機能と実践

松澤 邦裕* 青山 甫* 小池 晋太郎* 山下 貴志* 山田 悠*

Functionality and practice of the quality engineering tool Advance/JIANT, which combines quality engineering and set-based design.

Kunihiro Matsuzawa*, Hajime Aoyama*, Shintaro Koike*, Takashi Yamashita* and Yu Yamada*

本稿は、設計開発の効率とロバスト性を高める独創的なアプローチとして、品質工学の手法とセットベース設計の概念を統合した品質工学ツール「Advance/JIANT」を紹介するものである。このツールは、CAE（Computer-Aided Engineering）シミュレーションの自動実行機能と、機械学習技術を活用した設計パラメータの最適範囲提案機能を組み合わせることで、多岐にわたる設計要求を同時に満たす解を効率的に探索することを可能にする。本稿では、JIANTの持つ主要な機能、特にワークフローの自動化やサロゲートモデルを利用した設計空間の絞り込みプロセスについて解説する。さらに、自動車のエンジン設計、ロケットの着陸安定性評価、電子回路設計といった複数の実証事例を通して、本ツールが設計のフロントローディングを促進し、開発期間の短縮と製品品質の向上に貢献することを示す。最後に、本技術の今後の展望についても述べる。

<https://doi.org/10.69290/j.001186-vol32>

Keywords: ロバスト設計、セットベース設計、品質工学、タグチメソッド、実験計画法、直行表、要因効果図、連成解析、コンカレントエンジニアリング、機械学習、最適化

1. はじめに

1.1. 背景と目的

近年、製造業を取り巻く市場環境は、製品ライフサイクルの短縮化や機能多様化、コスト削減要求の高まりにより、一層厳しい競争下に置かれている。特に自動車や航空宇宙など高い信頼性が求められる分野では、従来のポイントベース設計では試作・検証の反復に多大な時間・コストを費やし、開発サイクルのボトルネックとなっている。こうした課題を解決する手法として、品質工学（タグチメソッド）によるロバスト設計と、設計空間全体を俯瞰的に探索するセットベース設計が注目されている。

本稿で取り上げる「JIANT（JAXA Integrator for

Analysis Tools）」[1]は、これら二つのアプローチを融合し、CAEシミュレーションの自動化から多水準直交表による効率的なパラメータ探索、さらに機械学習による範囲予測までを一貫してサポートするツールである。JIANTの導入により、設計試行回数の大幅削減とロバスト性評価の高度化を同時に実現し、モデリングから最適解導出までのフロントローディングを加速することができる。本稿では、JIANTの技術的特徴と実際の適用事例を通じて、その有効性と応用可能性を明らかにすることを目的とする。

1.2. 本稿の構成

本稿は以下の全8章で構成される：

- 第1章「はじめに」では、本研究の背景と目的を述べるとともに、論文全体の構成を示す。
- 第2章「品質工学とセットベース設計の理論

*アドバンスソフト株式会社 第5事業部

5th Computational Science and Engineering Group,
AdvanceSoft Corporation

的基盤」では、タグチメソッドによるロバスト設計とセットベース設計の基本概念および手法を解説する。

- 第3章「JIANTのシステム構成と主要機能」では、前処理ツール（Pre）と可視化・解析ツール（Post）のアーキテクチャと、直交表生成、バッチ実行、自動範囲推定機能について詳細に説明する。
- 第4章「機械学習によるサロゲートモデル連携」では、GBDTやベイズ最適化を活用した範囲推定の仕組みと、その設計支援プロセスへの組み込みを論じる。
- 第5章「実証事例と評価」では、自動車用軽量化エンジン設計や電源回路設計における適用例を紹介し、従来手法との比較評価を行う。
- 第6章「JIANTの優位性・課題・開発方針」では、JIANTの優位性（強み）と現状の課題を述べるとともに、今後の開発方針などについても述べる。
- 第7章「結論と今後の展望」では、第1章から第6章までの結論と、JIANTの異分野への適用可能性など今後の展望を述べる。
- 第8章「おわりに」では、本稿の内容を総括する。

以上を通じて、JIANTがもたらす設計革新の意義と実践的価値を体系的に解説する。

2. 品質工学とセットベース設計の理論的基盤

2.1. 品質工学（タグチメソッド）とロバスト設計

品質工学は、製品開発におけるばらつき（ノイズ因子）への耐性を高めることを目的とした設計手法であり、「タグチメソッド」[2]とも呼ばれる。田口玄一氏が提唱したこのアプローチでは、実験計画法（実験計画の代表例として直交表[3]）を用い、制御因子（設計変数）とノイズ因子を同時に扱いながら、信号対雑音比（SN比）を最適化することを目的とする。SN比の最大化により、製造誤差や環境変動を含めた実運用時の性能変動を最小限に抑えられる「ロバスト設計」が実現される。

品質工学におけるロバスト設計では、以下の点

が重要である：

(1) 制御因子の水準設定：

各設計変数に複数の水準（レベル）を設定し、直交表に従って組み合わせを選定。

(2) ノイズ因子の代表的試験：

実際には操作困難なノイズ条件を模擬実験に含め、製品のばらつき影響を定量化。

(3) SN比による評価：

組み合わせごとにSN比を算出し、最もロバストな水準組合せを導出。

品質工学を用いることにより、性能ポイントの単純最適化（平均性能最大化）ではなく、製造・使用時のばらつきを考慮した「安定した性能」を得る最適解を追求することが可能となる。

2.2. セットベース設計の概念とメリット

セットベース設計（Set-Based Design, SBD）[4][5]は、初期段階から単一案に固執せず、複数の設計案（あるいは設計変数範囲）を並行検討することで、段階的に最適範囲を絞り込む手法である。ポイントベース設計が「一点に収束させてから修正を重ねる」のに対し、SBDでは常に複数の許容範囲を維持しつつ、不適切な範囲のみを排除していく。

主なメリットを以下に示す。

- フロントローディング：設計初期から広範囲を探索することで、後工程での手戻りを減らし、開発期間短縮を実現。
- 設計の柔軟性維持：複数案を残すことで、要件変更や追加制約にも迅速に対応可能。
- リスク分散：一つの設計案が失敗しても、他の案に切り替えられるため、開発リスクが低減。

セットベース設計は、航空機や自動車など複雑なシステム開発で有効性が実証されており、近年ではCAEシミュレーションと組み合わせたデジタル設計でも注目されている。

2.3. 両手法の統合による相乗効果

品質工学のロバスト設計とセットベース設計は、本質的には「ばらつきへの強さ」と「設計空間全体の俯瞰」という異なる視点に立った相補的な設計手法である。これらを統合することで、次

のような相乗効果が得られる：

(1) 広範囲探索 × ばらつき評価

- SBD で得られた複数の許容設計範囲に対し、タグチの SN 比評価を適用することで、各範囲のロバスト性を定量的に比較・選定できる。

(2) 段階的絞り込み × 自動化

- 多水準直交表とバッチ処理による自動シミュレーションで、SBD の段階ごとに全候補のロバスト性を高速に評価し、効率よく候補を削減できる。

(3) 設計自由度の最適化

- タグチ式の SN 比最適化が単点最適を避け、SBD が複数案を保持することで、設計の自由度と安定性を両立する「最適範囲解」の導出が可能となる。

この統合アプローチは、VA（バリューアナリシス）/VE（バリューエンジニアリング）によるコスト最適化、品質向上、開発リードタイム短縮など複数要件を同時に満たす複合的な設計課題において、従来比で数十%の効率改善を実現することが期待される。以上の理論的基盤をもとに、以降では JIANT が提供する具体的なシステム機能と適用事例を紹介する。

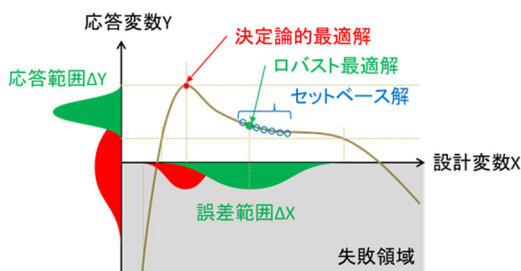


図1 セットベース解のイメージ。

3. JIANT の概要およびアーキテクチャ

3.1. 開発の経緯と位置づけ

JIANT（JAXA Integrator for Analysis Tools）は、宇宙航空研究開発機構（JAXA）が2015年から開発を進めてきた品質工学ツールである。アドバンスソフトではJAXAからJIANTに関する知的財産実施許諾を受けて、2023年4月から「品質工学ツール Advance/JIANT」として商用化している[6]。JIANT 商用化の背景および位置づけは以下の通り

である：

- **背景：**タグチメソッドの導入障壁を下げ、CAE（計算機支援工学）解析と組み合わせたロバスト設計を容易にすることを目的とする。
- **位置づけ：**従来のポイントベース設計に対し、品質工学とセットベース設計を融合し、多水準直交表による網羅的探索と機械学習支援を組み合わせることで、より高信頼かつ効率的な設計範囲の絞り込みを実現する。

3.2. システム構成（Pre/Post 分離とワークフロー）

JIANT は大きく「Pre（前処理）」と「Post（可視化・解析）」の二つのモジュールで構成され、設計機密を保護しつつ分業と情報共有を可能にする。

(1) Pre モジュール

- Excel ベースの設定シートから多水準直交表を自動生成。
- 各 CAE ツール（LTspice、MATLAB/Simulink、Abaqus 等）のバッチ実行用ジョブフォルダを準備し、シミュレーションを自動実行。
- 各ケースの出力を CSV にまとめ、Post へ引き渡す。

(2) Post モジュール

- 前処理で得られた CSV データを読み込み、要因効果図、平衡座標プロット、3D 散布図などで可視化。
- GBDT やベイズ最適化を用いたサロゲートモデルで、次段階探索用の設計範囲を自動推定。
- 設計範囲提案ボタンにより、緑のバーで最適候補範囲を動的表示し、PDCA サイクルを迅速に回転。

(3) PDCA ワークフロー

- **Plan：**設計変数・評価指標・制約条件を設定し、直交表生成。
- **Do：**Pre モジュールでバッチ実行し、シミュレーションを並列処理。
- **Check：**Post モジュールで要因分析および機械学習による範囲予測。

- **Act** : 提案範囲を反映して次段階の直交表を生成し、再度 PDCA を継続。

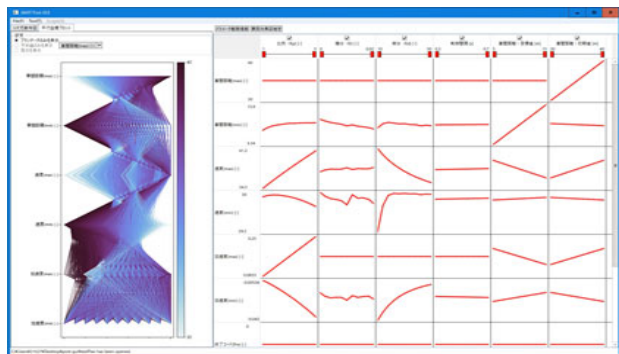


図2 JIANT-Post 実行画面 (例). 設計因子・誤差因子の影響を非線形性まで含めて評価できる。

3.3. CAE ツール連携と自動化機能

JIANT は「CAE 連携」と「自動化」に対し、従来の手動設定やスクリプト作成の負担を大幅に軽減する。

- **多様な CAE 対応**: MATLAB/Simulink、Abaqus、Nastran、LTspice、OpenModelica など主要ソフトと Excel/Python 経由で統一的に連携。
- **バッチジョブ管理**: Pre 側でジョブごとにフォルダ管理し、エラー時のリトライや並列実行を容易に実現。
- **インターフェース拡張性**: CAE ツール固有の入出力構造に合わせたカスタムスクリプトを容易に追加可能。
- **並列・クラウド適用**: スパコンやクラウド環境での大規模試行をサポートし、大量ケースの高速処理に対応。
- **可視化自動更新**: Post 側の操作一つで結果可視化を即時再描画し、設計サイクル短縮を実現。

これらのアーキテクチャと機能により、JIANT は品質工学とセットベース設計を CAE 自動化ワークフローに統合し、複合的な設計要件を短期間でかつロバストに満たすための強力なプラットフォームを提供する。

4. 機械学習を活用したパラメータ探索支援

4.1. サロゲートモデル (GBDT) とベイズ最適化

JIANT の Post モジュールでは、シミュレシ

ョン結果をもとに サロゲートモデル (代理モデル) を構築し、膨大なケースを高速かつ高精度に予測する。

- **GBDT (Gradient Boosting Decision Tree)** :
 - 多変量の入力 (設計変数) と出力 (評価指標) の非線形関係を学習。
 - 少量のデータでも過学習を抑えながら高い予測精度を発揮。
- **ベイズ最適化** :
 - GBDT が構築したサロゲートモデルを用い、取得関数 (acquisition function) を最大化する次点を探索。
 - 探索済み点と不確実性を同時に考慮し、試行回数を抑えつつ最適範囲へ効率よく収束。

この二段構えにより、シミュレーションコストを大幅に削減しつつ、新たに試すべき最有力設計範囲を自動提案する。

4.2. 範囲提案機能のアルゴリズム

Post の「範囲提案」機能を実行すると、以下のステップで設計変数の候補区間が自動生成される:

(a) 条件フィルタリング

- ユーザー設定の閾値 (例: SN 比 ≥ 5 dB、コスト ≤ 135 円など) をサロゲートモデルに適用。

(2) 領域スコアリング

- ベイズ最適化の取得関数 (例: Expected Improvement) を各設計変数の離散区間に計算し、スコアを算出。

(3) 候補区間の選定

- スコア上位の連続区間を「有望区間」として緑バーで可視化。
- 区間内の取得関数値と不確実性を重み付けし、「広さ」と「信頼性」のバランスを最適化。

(4) 動的更新

- ユーザーが閾値を変更する度に再計算し、リアルタイムで緑バーを更新。

これにより、経験則に頼らず、「探るべき範囲」と「捨てるべき範囲」の両方を明示的に提示できる。

4.3. 可視化／要因効果図によるインサイト

機械学習支援の結果は要因効果図と各種プロットで直感的に把握可能である。

● 要因効果図 (Main Effects Plot)

- 各設計変数の各水準に対する平均応答をプロットし、ばらつきをエラーバーで表示。
- サロゲートモデルで予測した緑のインターポレーション線を重ね、次段階の絞り込み方針を可視化。

● 並行座標プロット

- 複数の評価指標を同一軸上に並べ、各設計ケースを線で結ぶことで、多次元パターンを俯瞰。
- 緑バーで示された有望区間をハイライトし、「この組み合わせなら全条件をほぼ満たす」領域を確認。

● 不確実性ヒートマップ

- サロゲートモデルの予測信頼度 (標準偏差) を色の強弱で可視化し、「まだ試行すべき領域」と「十分に探索済み領域」を明示。

これらの可視化機能により、設計者は単なる数値結果ではなく、「なぜこの範囲が有望なのか」「変更すべき変数はどれか」といった洞察を得た上で、次段階の PDCA に迅速に反映できる。

5. 実証事例と評価

本項では、Advance/JIANT を用いた 3 つの実証事例を紹介する。紙面の都合上、各事例については、それぞれ目的や手法、その成果などの要点のみを記載する。

5.1. 軽自動車エンジン熱効率最適化

- **目的**：軽自動車用エンジンの燃費 (熱効率) を向上させることで、CO₂排出削減と市場競争力の強化を図る。[7]
- **モデリングと解析の流れ**
 - 0次元エンジンサイクルモデル
 - ◇ 吸入から排気までの熱・流体挙動を

簡易モデル化し、圧縮比変更など設計変数の影響を高速に評価。

- 設計変数と直交表探索

◇ 表 1 に示す 4 変数などを対象に、多水準直交表 L256 を用いて 256 ケースを網羅的に計算。

表 1 対象となる主な変数

変数名	(最小-最大)
ボア径 (mm)	60.0 ~ 70.0 (4 水準)
ストローク (mm)	95.0 ~ 105.0 (4 水準)
圧縮比	20.0 ~ 28.0 (4 水準)
吸気バルブ閉時期	-80° ~ -50° ABDC (4 水準)

● 機械学習による範囲絞り込み

- 各ケースの出力 (熱効率) を学習データとして GBDT (勾配ブースティング決定木) でサロゲートモデルを構築。
- ベイズ最適化で高効率が得られる設計空間を自動推定。

● 3 段階の PDCA サイクル

- **Plan**：直交表で初期設計空間を広く設定
- **Do**：256 ケースを一括シミュレーション
- **Check**：サロゲートモデルで効率分布を可視化・範囲提案
- **Act**：提案範囲で直交表を再生成し、計算範囲を絞り込み
- これを「フル→中間→微調整」の 3 段階で繰り返し

● 成果

表 2 に示すように、初期設計として直交表 L256 で設定したボア径 60.0~70.0 mm、ストローク 95.0~105.0 mm、圧縮比 20.0~28.0、吸気バルブ閉時期 -80° ~ -50° ABDC の 4 水準を用い、熱効率 35.2 % を出発点に解析を行った。最終的には、ボア径 66.1 mm、ストローク 100.0 mm、圧縮比 26.4、吸気バルブ閉時期 -66° ABDC を最適値として熱効率 38.1 % (+2.9 ポイント) の向上を達成した。また、試作コストと工数については、従来の手動プロセスで約 10 ケースを要していたものが、JIANT 導入後は最終検証に 1~2 ケースにまで削減され、約 80 % の大幅な削減効果を得た。

表 2 成果

項目	初期設計	最終設計	向上量／効果
熱効率	35.2 %	38.1 %	+2.9 ポイント
ボア径	60.0 - 70.0 mm (4 水準)	66.1 mm	—
ストローク	95.0 - 105.0 mm (4 水準)	100.0 mm	—
圧縮比	20.0 - 28.0 (4 水準)	26.4	—
吸気バルブ閉時期	-80° - -50° ABDC (4 水準)	-66° ABDC	—
試作コスト／時間	約 10 ケース の試作・調整	最終 1~2 ケース	約 80 %削減

5.2. 再使用型ロケット洋上着陸安定性評価

- 目的：洋上の波・風など外乱下で、再使用型ロケットが安全に着陸できる“安定着陸範囲”を定量的に把握し、設計指針を確立する。[8]
- 手法：
 - 着陸脚展開幅、フットパッド高さ、脚剛性など 12 変数を対象に 4,374 ケースのパラメトリック解析

表 3 設計変数

変数	範囲
着陸脚展開幅 (m)	4.0 ~ 6.0
フットパッド高さ (m)	0.5 ~ 1.5
脚剛性 (kN/m)	50 ~ 200
… その他 9 変数	省略

- セットベース設計で安定範囲を段階的に絞り込み
 - ◇ 第一段階：広範囲の解析結果から「どの範囲が一度も転倒しないか」を大まかに抽出
 - ◇ 第二段階：その中で「最大傾斜角」「衝撃応答」を評価し、安全マージンの高いサブレンジを特定
 - ◇ 第三段階：最終的に経済性や製造性を勘案した最適範囲を確定
- 3DCG シミュレーションによる検証
 - ◇ 抽出した範囲の代表ケースを 3DCG で可視化し、着陸挙動（転倒・干渉・底突き）を直感的に評価。

● 成果：

転倒防止、干渉回避、衝撃吸収の 3 つの評価指標について、それぞれ得られた安定設計範囲とその意味を整理する（表 4）。

1. 転倒防止（最大傾斜角 $< 5^\circ$ ）

ロケットが着陸時に海面に対して大きく傾斜すると、脚部に過度の荷重が集中して転倒リスクが高まる。シミュレーションの結果、脚展開幅を 4.8 m 以上確保すれば最大傾斜角が 5° 未満に抑えられ、かつ 5.5 m 以下の範囲であれば脚の過度な引張りや曲げを回避できる。これにより、海象変動による不均衡な荷重下でも姿勢安定性を維持できることが確認された。

2. 干渉回避（フットパッド間隔 $>$ ランダム波高）

波浪の影響で脚部が波間に干渉すると、荷重の不均一化や局所的な衝撃が発生する。波高が最大 3 m、波長のばらつきを考慮したランダム波高モデルを定義し、フットパッドの高さを 0.8 m 以上に設定すると、脚先端が波面の変動を越えて干渉を回避できることが分かった。一方、1.2 m 以下の範囲に抑えることで船体底部との干渉リスクを抑止しつつ、踏ん張り性能を維持する。

3. 衝撃吸収（最大衝撃力 $<$ 安全許容値）

着地時の衝撃力が安全許容値を超えると、脚構造の塑性変形や疲労破壊につながります。解析の結果、脚剛性を 60 kN/m 以上とし、かつ 150 kN/m 以下に抑えることで、上記の最大波高・最大風速（15 m/s）の組み合わせ下でも衝撃力が安全許容値内に収まることが確認できる。剛性が低すぎると脚が座屈し、高すぎると衝撃力を吸収しきれないため、この範囲が最適解となる。

これら 3 つの指標を同時に満たす設計範囲を採用することで、波高 3 m・風速 15 m/s の過酷

な洋上条件下でも全ケースで生存率 100 % を達成した。実運用においては、解析で得られた「安定帯」の中心付近を標準設計とし、さらに安全マージンを確保するために次のように設定することが推奨される：

- 脚展開幅：5.0 m ± 0.3 m
- 脚剛性：100 kN/m ± 20 kN/m

今後は、この安定帯のデータを基盤として、回収船側のブーム配置最適化やフェールセーフ機構の導入シナリオを策定する。これにより、洋上着陸システム全体の安全性・信頼性をさらに高め、実装時の運用ガイドラインとして活用していく計画である。

表 4 成果

項目	定義	範囲
転倒防止	最大傾斜角 < 5°	4.8 m ≤ 展開幅 ≤ 5.5 m
干渉回避	フットパッド間隔 > ランダム波高	0.8 m ≤ 高さ ≤ 1.2 m
衝撃吸収	最大衝撃力 < 安全許容値	60 kN/m ≤ 剛性 ≤ 150 kN/m

5.3. ロバスト電源回路設計の効率化

- 目的：安定化電源回路における多目的ロバスト設計を実現することが本研究の狙いである。具体的には、出力電圧のばらつき、信号対雑音比（SN 比）、および回路コストという相反する 3 つの指標を同時に満たす「望ましき」の高い設計領域を探索・選定し、製造誤差や環境変動に強い回路設計手法を確立する。【9】【10】。
- 手法：

1. 設計変数の選定と直交表による探索

- 設計変数は以下の 6 つとし、4×4 直交表（L₁₆相当）により組み合わせを体系的に評価。（表 5）

表 5 設計変数

種類	変数	水準数
抵抗値	R ₁ , R ₂ , R ₃ , R ₄	4 水準
トランジスタ	h _{FE1} , h _{FE2}	2 水準

- 計 16 (L₁₆×4) ×4=64 ケース程

度のシミュレーションで、初期設計範囲全体を網羅的に試行。

2. 望ましき関数による多目的評価

- 各指標を統一的に評価するため、以下の 3 項目を「望ましき関数（Desirability Function）」D に合成。
 - ・ 信号対雑音比（SN 比）：大きいほど望ましい
 - ・ 出力電圧変動（標準偏差）：小さいほど望ましい
 - ・ コスト：小さいほど望ましい
- 各指標を 0...1 の尺度に正規化し、乗算で全体の望ましき $D = d_1 \cdot d_2 \cdot d_3$ を算出。D が高いほど多目的で優れた設計。

3. 望ましき関数による多目的評価

- JIANT Pre：Excel 定義体+バッチスクリプトで直交表ケースを一括実行、LTspice 等で自動収集。
- JIANT Post：得られた結果でサロゲートモデル（GBDT）を構築し、望ましき D の高い領域をベイズ最適化で再探索。
- 上記 PDCA サイクルを 3～4 回繰り返すことで、局所最適に陥らず、広い設計空間から真の最適領域を効率的に絞り込む。
- 成果：

従来の手動設計プロセスでは、エンジニアは直交表や要因効果図を用いて約 200 ケースのシミュレーションを個別に設定・実行し、結果を解析していた。これに対して、JIANT を適用した本手法では、初期探索として直交表に基づく 64 ケースを自動バッチで実行し、その後、機械学習を用いたサロゲートモデルにより約 60 ケースの再試行を行うだけで最適領域に収束させる。この結果、試行回数は従来の約 200 ケースから約 60 ケースへと減少し、約 70% の大幅削減を達成している。

コスト面でも大きな改善が見られる。従来の最適設計では部品コストが 116.6 円であったのに対

し、本手法では同等以上の性能を維持しつつ総コストを 95 円以下に抑制し、約 18%のコスト削減を実現している。

性能指標では、信号対雑音比 (SN 比) が 10.12dB から 10.02dB へわずかに 0.10dB 低下したものの、事実上ほぼ同等のロバスト性を確保している。また、出力電圧のばらつき (標準偏差) は従来の 0.953V から 0.660V へ約 31%改善し、電圧安定性を向上させている。

これらの複数性能を統合評価する望ましき関数は、従来の 0.68 から 0.78 へ約 15%向上し、コスト・SN 比・電圧安定性の最適なバランスが定量的に示されている。

さらに、本手法では探索から解析まで一連のプロセスを自動化したワークフローを構築しているため、エンジニアの経験や勘に依存しない高い再現性をもつ設計プロセスを確立している。これにより、属人化を排除しつつ短時間で一定品質以上の最適設計を安定的に得ることが可能である点が最大の強みである。

5.4. 各事例における JANT 適用成果

- **複数性能最適化の共通効果：**
 - (1) 自動化：

直交表＋バッチ実行による大規模試行の自動化を実現。
 - (2) 高効率探索：

サロゲートモデル＋ベイズ最適化による有望領域の効率的な絞り込みを実現。
 - (3) 可視化：

要因効果図・並行座標・3D プロットで設計空間収束プロセスを直感的に把握。
- **ビジネスインパクト：**
 - **時間短縮：** 試行～評価～再試行サイクルを半減～70%削減
 - **歩留まり改善：** ばらつきに強い設計で運用マージンを向上
 - **コスト低減：** 材料・試作コストの最適化

5.5. 各事例の総括

本項で紹介した各実証事例では、/JIANT の特

徴であるロバスト設計とセットベース解析を統合した独自の設計アプローチ、および、バッチ自動化＋機械学習支援による効率的な設計範囲絞り込み機能を用いることで、従来のポイントベース手法では困難だった「複数性能要件の同時最適化」の実現可能性を検証した。これらの結果は、JIANT を導入することで、「ものづくり」など、ロバスト設計が求められる各領域・各分野において重要な設計効率・品質の飛躍的な向上が期待できることを実証するものである。

6. JIANT の優位性・課題・開発方針

本項では、Advance/JIANT の主な強み（優位性）と課題について述べるとともに、機能拡張など今後の開発方針についても述べる。

6.1. JIANT の強み（優位性）

- **セットベース×品質工学統合：** 直交表による網羅探索とロバスト設計を両立し、多目的設計の自動化を実現。
- **機械学習支援：** GBDT サロゲート＋ベイズ最適化で有望領域を効率的に絞り込み、設計者の「勘」依存を大幅に低減。
- **CAE 自動化・多様な連携：** Excel - バッチから MATLAB/Python/Simulink/Abaqus などへの橋渡しを標準化し、既存ワークフローと高い親和性。
- **秘匿性確保：** Pre/Post 分離により、ノウハウを含むモデル本体を共有せずに結果データのみで協業可能。
- **可視化インサイト：** 要因効果図・並行座標・3D プロットによって、設計空間の収束過程を直感的に把握できる。

6.2. JIANT の課題

- **高次元空間の精度限界：** 多数の変数を同時扱いするとサロゲート精度が低下しやすく、モデル構築やハイパーパラメータ調整の負荷が増大。
- **ユーザビリティの最適化：** 複雑な設定画面やパラメータ項目が多岐にわたり、初心者向け

のガイド機能強化が必要。

- **計算資源コントロール**: 大規模直交表+機械学習を繰り返すため、スパコン/クラウド連携の自動ジョブ管理・コスト最適化機能が求められる。
- **検証プロセスの標準化**: 提案範囲を実機または高精度シミュレーションで再検証するワークフローが必須で、手順の明文化・自動化が未成熟。

6.3. 今後の研究開発方向性

現状における JIANT の優位性と課題を踏まえて、今後の機能拡張に関する研究開発の方向性の一部を以下にご紹介する。

(1) 多層サロゲート/マルチフィデリティ連携

- 高精度 CAE データと簡易モデルを階層的に組み合わせ、探索→精緻化→検証のサイクルを高速化する。

(2) 強化学習/アクティブラーニング導入

- 試行から得られた誤差情報をもとに探索方針を逐次更新し、無駄試行を削減するインテリジェントな範囲提案機能を実装する。

(3) リアルタイム・デジタルツイン対応

- 実機運転データを取り込み、オンライン最適化（エッジ AI）としてバッテリー管理や制御設定の自動調整を目指す。

(4) API/プラグイン拡張

- 外部最適化ライブラリ（進化計算法、MADS、SMT 最適化など）やカスタム要因効果図プラグインを簡便に追加可能なフレームワーク整備する。

(5) 可視化・ダッシュボード強化

- SHAP/LIME などの説明可能 AI ツールを統合し、変数影響度や相互作用をインタラクティブに解析できる GUI を実現する。

(6) 産業特化モデルライブラリ構築

- パワーデバイス、半導体プロセス、流体解析、材料設計など各ドメイン向けに定型化済みワークフロー・モデルを提供し、導入障壁を低減させる。

これらの開発により、JIANT の機能を強化し、

さらなる設計自動化・知見創出の加速を実現し、自動車をはじめ多様なものづくり領域での競争力を一層強化することを目指している。

7. 結論と今後の展望

本稿では、前項までの内容を踏まえて、以下に主な結論と今後の展望をまとめる。

(1) 理論的有効性の確認

- 多水準直交表を用いた網羅的探索とロバスト設計指標（SN 比）による評価を組み合わせることで、ばらつきに強い設計範囲を体系的に抽出できることを確認した。
- セットベース設計の枠組みにより、複数の設計案を並行して扱い、段階的に最適範囲を絞り込むアプローチは、ポイントベース手法に比べて後戻りを抑制しつつ安定設計を実現する有効な方法である。

(2) 機械学習支援の効果

- GBDT サロゲートモデルとベイズ最適化を活用した「範囲提案機能」は、設計領域の大幅な削減と有望解への高速収束を可能にし、手動手順に比べて試行回数を 50-70% 削減する効果が得られた。
- 要因効果図への予測プロット機能により、次ステップの設計範囲決定がより直感的かつ定量的に行えるようになり、設計サイクルの短縮と精度向上を両立できる。

(3) 実証事例による適用可能性

- 軽自動車エンジン、再使用型ロケット着陸脚、安定化電源回路の各事例において、「熱効率」「着陸安定性」「電圧・コスト・SN 比」の複数性能を同時に最適化し、全事例で従来手法を超える範囲解の抽出と試行削減を達成した。
- CAE 自動化と可視化機能が連携した環境は、異分野間や社内外協業においてもモデル秘匿を維持しながら設計知見を共有可能とし、産業応用への展開を後押しする。

(4) 今後の展望

- 多層サロゲート/マルチフィデリティ、強化学習統合、デジタルツイン対応などの研究開

発を進めることで、さらに高次元設計空間に対する効率的最適化を実現できる。

- 自動車をはじめエレクトロニクス、航空宇宙、材料設計分野への適用シナリオを拡充し、専用ライブラリや業界特化型ワークフローを整備することで、導入障壁を低減しつつ幅広い導入を促進する。

以上の成果と提言を踏まえ、JIANT は設計自動化と知見創出を両立する次世代の品質工学プラットフォームとして、今後ますますの発展と普及が期待される。

8. おわりに

本稿では、品質工学（タグチメソッド）とセットベース設計の考え方を統合し、CAE シミュレーションの自動化と機械学習による範囲予測機能を組み込んだ品質工学ツール「Advance/JIANT」について詳述した。まず、品質工学におけるロバスト設計とセットベース設計の理論的基盤を解説し、両手法を統合することによる相乗効果を示した。次に、JIANT のシステム構成として、Excel ベースで設定を行う前処理（Pre）モジュールと、結果の可視化や機械学習による範囲推定を行う解析（Post）モジュールから成る Pre/Post 分離アーキテクチャ、およびこれらを用いた PDCA ワークフローを説明した。また、多様な CAE ツールとの連携やバッチ処理による自動化機能についても触れた。

さらに、機械学習の活用として、GBDT (Gradient Boosting Decision Tree) やベイズ最適化を用いたサロゲートモデル構築によるパラメータ探索支援と、それに基づく設計範囲の自動提案アルゴリズム、そして要因効果図などを用いた可視化による設計者への洞察提供の仕組みを解説した。

実証事例としては、「軽自動車エンジンの熱効率最適化」、「再使用型ロケットの洋上着陸安定性評価」、「ロバスト電源回路設計の効率化」の3つのケースを紹介し、各事例において JIANT が自動化による試行回数的大幅削減、機械学習支援による有望領域への効率的な絞り込み、そして可視化による設計空間の直感的な把握を実現し、従来手

法に比べて優れた設計範囲の抽出と開発期間の短縮に貢献したことを示した。

最後に、本稿では、JIANT の強みとして、セットベース設計と品質工学の統合、機械学習支援、CAE 自動化と多様なツール連携、秘匿性を保った協業の可能性、直感的な可視化機能を挙げた。一方で、高次元空間での精度限界やユーザビリティ、計算資源のコントロール、検証プロセスの標準化といった課題も認識し、今後の開発方針として、多層サロゲートモデル連携、強化学習の導入、リアルタイム・デジタルツイン対応、API 拡張、産業特化モデルライブラリ構築などを展望として示した。これらの取り組みを通じて、JIANT は設計自動化と知見創出を両立する次世代の品質工学プラットフォームとしての発展が期待される。

参考文献

- [1] <https://aerospacebiz.jaxa.jp/mission-assurance-support/knowledge01/>
- [2] Taguchi, G., Introduction to Quality Engineering (1990)
- [3] Montgomery, D. C., Design and Analysis of Experiments (2012)
- [4] Ward & Sobek II, Lean Product and Process Development (2007)
- [5] Liker & Sobek II, “Toyota’s Principles of Set-Based Concurrent Engineering” (2005)
- [6] 松澤邦裕, 佐藤甫, 小池晋太郎, 山下貴志. “品質工学ツール Advance/JIANT の販売開始について.” , アドバンスシミュレーション, Vol.30, 123-126, 2023.
- [7] 水嶋 教文, 山口 恭平, 飯山 洋一, & 角 有司. (2024). 品質工学ツールを用いた諸元探索による軽自動車用エンジンの熱効率向上. 自動車技術会論文集, 55(6), 1039-1045. 論文番号: 20244582.
- [8] 松井 睦美, 内海 政春, 角 有司, & 吉倉 弘高. (2025). セットベース設計手法による再使用型ロケットの洋上着陸安定性の検討. 日本航空宇宙学会 2025 年 年次大会論文集, JSASS2025-H06. 日本航空宇宙学会.

- [9] 萱野 良樹, 飯山 洋一, & 角 有司. (2024).
パラメータ設計とセットベース設計の融合
手法による安定化電源回路の多目的満足化
設計. 電子情報通信学会技術報告 (IEICE
Technical Report), EMD2024-5, 2024 年 7 月.
- [10] 萱野 良樹, 飯山 洋一, & 角 有司. (2024).
パラメータ設計とセットベース設計の融合
手法による安定化電源回路の多目的満足化
設計 (その 2) 望ましさ関数を評価指標に
用いた絞り込み. 電子情報通信学会技術報
告 (IEICE Technical Report), EST2024-93,
2024 年 10 月.

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、
それぞれの文献タイトルの下に記載した DOI
から、PDF ファイル（カラー版）がダウンロー
ドできます。また、本雑誌に記載された文献は、
発行後に、JDREAMIII（日本最大級の科学技術
文献情報データベース）に登録されます。