

アルゴリズムックデザインによる高性能・高信頼性な 三菱重工の製品群

MHI's High-Performance and High-Reliability Products Enabled by Algorithmic Design



ダサディカリ キングシュク^{*1} 田中 泰爾^{*2}
Kingshuk Dasadhikari Taiji Tanaka

磯田 北斗^{*1} 木村 泰徳^{*1}
Hokuto Isoda Yasunori Kimura

桑村 祥弘^{*3} 秋田谷 洋人^{*4}
Yoshihiro Kuwamura Hiroto Akitaya

三菱重工業株式会社は、その長い歴史を通じて、高性能で信頼される製品を 30 の事業領域にわたって世の中に提供してきた。各製品の成熟化が進み、グローバルな競争が激化する現代において、製品価値をさらに向上させるためには、これらの独立した事業の強みを相互に共有する統一された設計プラットフォームが不可欠である。しかし、これまでは、製品間の形状定義やモデル生成方法の違いにより、このようなプラットフォームの実現は困難であった。この課題に対応するため、柔軟な形状定義アルゴリズムにより、3D 形状を生成し、解析と連携しながら、製品形状を最適化するアルゴリズムックデザイン技術を開発し、インフラ、エネルギー、輸送分野における製品価値の向上につなげている。本報では、このプラットフォームの利点と導入事例を紹介する。

1. はじめに

長い歴史を持ち、30 の事業領域を有するコングロマリットである三菱重工業株式会社(以下、当社は)、数千に及ぶ製品開発のノウハウと実績を有している⁽¹⁾。そこで、これらの製品間で開発プロセスを共有・標準化することに加え、複数の技術分野をまたぎ、より広範なコンポーネントに対応可能な最適設計プロセスにより、さらなる製品価値向上を目指した取組みが進められている。

近年、当社は図 1 に示すように、共有技術基盤の確立や Innovative Total Optimization (ITO)⁽¹⁾などの取組みを通じて、このような横断的な連携を推進している。しかし、製品開発プロセスでは、製品間の形状定義やモデル生成方法の違いが問題となり、市販の設計プラットフォームのみで当社の幅広い製品群をカバーすることは困難であった。設計プラットフォームへの要求事項としては、以下の項目が挙げられる。

- ・ 長年にわたって妥当性が検証されてきた社内外の解析ツールの統合
- ・ 製品の種類や複雑さに関わらず、柔軟な形状定義と 3D モデル生成
- ・ 流体力学、熱力学、構造力学、振動力学など、複数の力学モデルを用いた解析
- ・ 製品開発工程に適合し、数ヶ月程度で設計検討が完了すること

これらの課題を克服するため、アルゴリズムックデザインを活用した設計プラットフォームを開発した。アルゴリズムックデザインはもともと建築分野向けに開発されたもので、ユーザー定義のアルゴリズムにより、点データ(0D)からボリューム(3D)までの形状データを忠実に再現し、ラベリングによって、3D モデルデータを解析ツールの入力形式に変換する(図 2)。アルゴリズム設計ワークフローの開発には、Robert McNeel & Associates 社によって開発された Rhinoceros/Grasshopper

*1 総合研究所 流体研究部

*2 総合研究所 流体研究部 博士(工学)

*3 総合研究所 エナジー研究推進部 主席研究員 技術士(機械)

*4 技術戦略推進室 先進デザインセンター

環境⁽²⁾を使用している。

本プラットフォームは、ターボ機械、船舶、ドローンなど幅広い製品に適用可能であり、複数の力学モデルを用いた解析プロセスとの連携も可能となる。次章以降では、当社の設計プロセスへの代表的な適用例を示す。

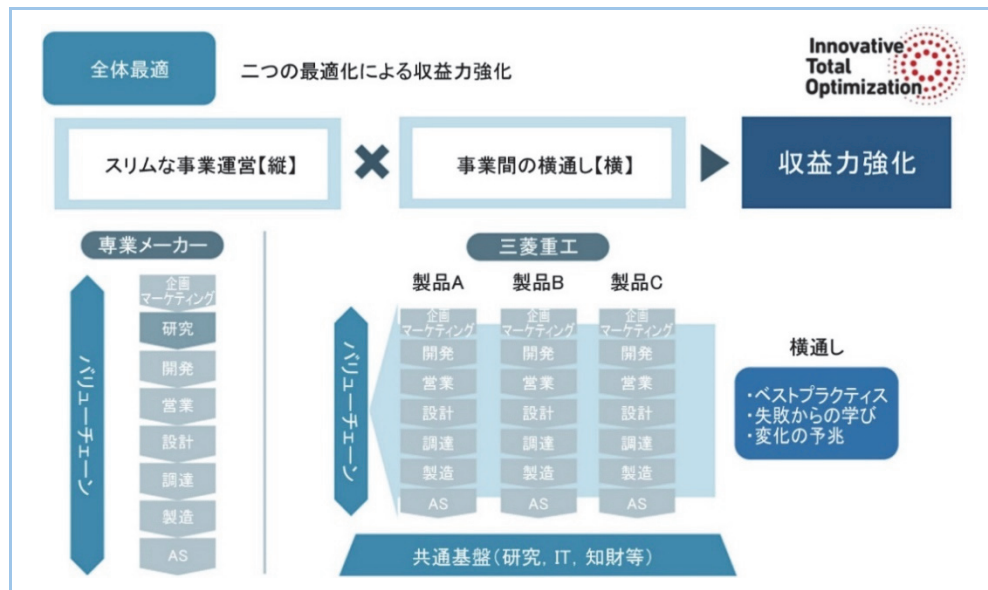


図1 ITO が提供する製品価値の向上

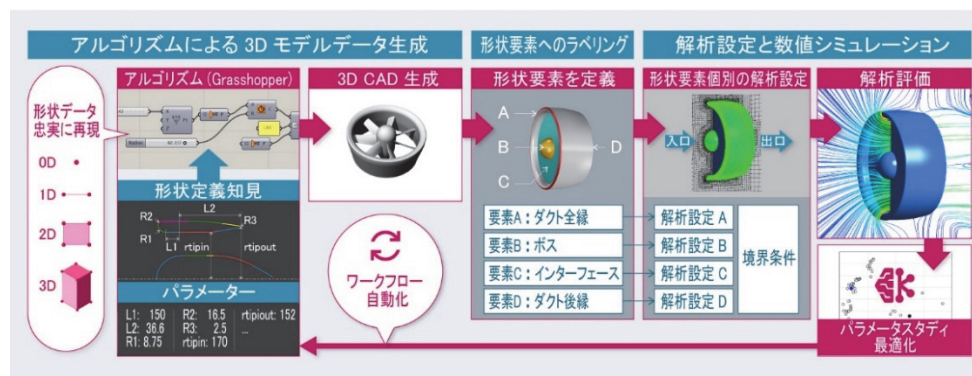


図2 アルゴリズムックデザインのワークフロー

2. 人手を要する複雑な製品形状定義の自動化

船型は3次元的な自由曲面で構成され、その定義は複雑である。

当社の従来手法では、自由曲面を定義する大量の制御点の位置を手作業で調整することで船型形状を生成していたため、形状モデリングに多くの時間を要しており、これが限られた開発期間におけるCFD解析による形状最適化の検討ケース数の制約となってきた。この課題を解決するために、船型向けアルゴリズムックデザインを用いた船型モデル生成プロセスを構築した。

開発したプロセスでは、船長・幅・喫水などの船体の主要寸法に加え、船首や船尾などの形状を代表する数十程度のパラメータで船型を定義した(図3)。当社の設計知見を織り込むことで、船体の排水量などの設計要目を満たした船型を生成することが可能になった。

従来ツール及びアルゴリズムックデザインに関し、船型モデリングによる時間とCFD解析結果の比較を図4に示す。船型形状の作成にかかる時間は従来比で約80%削減可能となった。また、CFD解析結果を見ると、波高分布の特徴(船首・船尾の造波の高さ及び分布形状、船首造波の角度など)に顕著な差異は見られず、従来ツールの代替が可能となる目途を得た。

以上から、アルゴリズムックデザインにより、推進性能を最大化する船型形状を、より広範囲かつ短時間で探索可能となる見込みを得た。

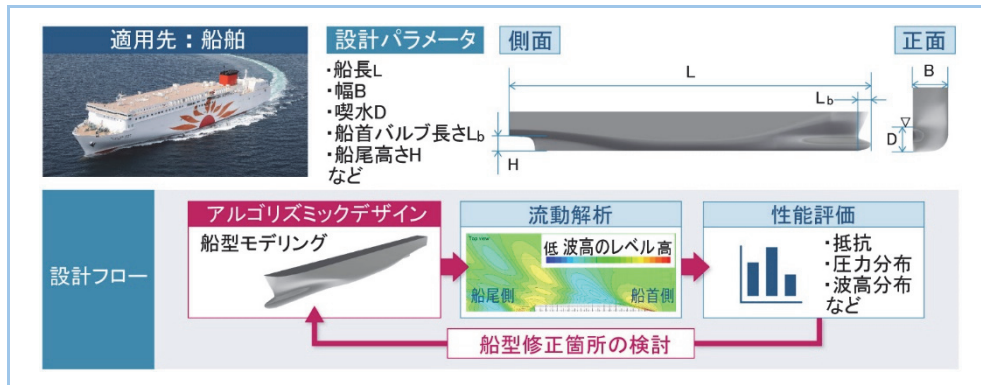


図3 アルゴリズムックデザインによる船体の迅速な形状定義

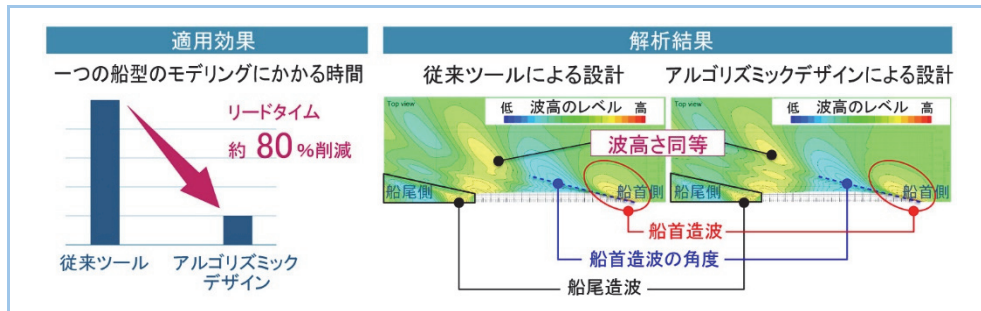


図4 アルゴリズムックデザインによる船型設計のリードタイム短縮

3. 複数部品の総合的な効率向上

ターボ機械(発電用ガスタービン、蒸気タービン、航空エンジン、産業用遠心圧縮機など)において、回転部品と静止部品間の隙間からの漏れに伴う効率低下を防ぐ方策の1つに、ハニカムラビリンスシールがある。ハニカムラビリンスシールは、ラビリンスシールとそれに対向して設置されるハニカムランドから構成される。ハニカムランドは厳密なクリアランス制御、軽量化、及び運転中の摩耗に対する高い耐久性を目的として採用されている。

ハニカムランドはその形状の複雑さからモデリングに時間を要し、空力性能向上の観点から、ラビリンスシールと同時に形状を最適化した例⁽³⁾は限られていたが、社内製品の先行事例⁽⁴⁾をアルゴリズムックデザインとして一般化した上で他製品へ展開した。ラビリンスシールとハニカムランドの形状の両方をパラメトリックに定義し、膨大な形状案に対してCFD解析を実施し、最適形状を明らかにした(図5)。

図6に示す最適形状の漏れ流量は、ベース形状と比べ21.7%低減されている。最適形状は、フィン厚さがシールクリアランスの約5倍、フィン厚さよりやや小さいハニカムセル幅、傾斜したセルといった特徴を持つ。

本設計による漏れ低減メカニズムは以下の3点で説明できる。

- ・ フィンの厚さを拡大することで、フィンごとの縮流回数を2倍以上確保する。
- ・ ハニカムサイズを拡大することで、縮流間の距離を増やし、下流のフィンに至るまでに、上流のフィンからの漏れジェットが減速するのに十分な距離を確保する。
- ・ ハニカムセルの傾斜により、セル内で漏れ流れを捕捉し、かつ、セル下流で剥離を起こして、縮流を拡大する。

このように、複数部品の形状を漏れ流れ低減の観点から最適化し、高効率化を実現した。

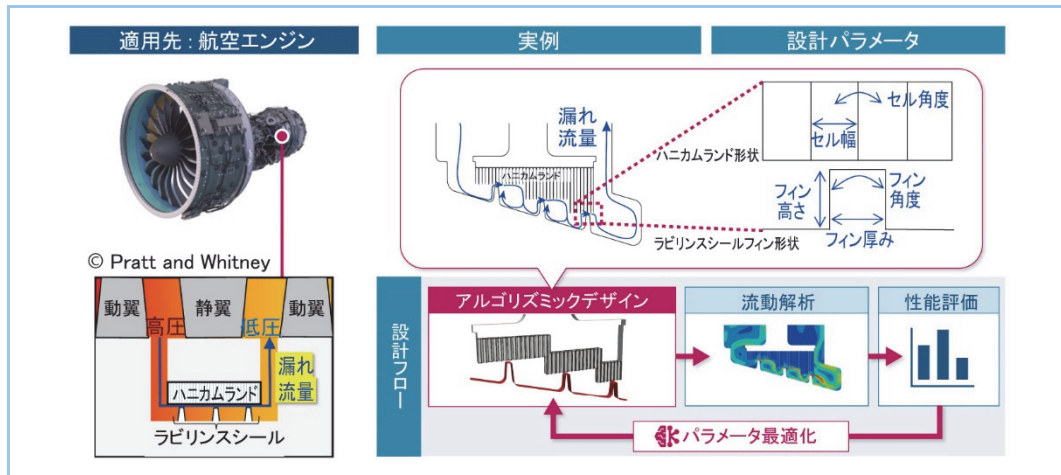


図5 アルゴリズムックデザインによるラビリンスシールフィン形状とハニカムランド形状の同時最適化

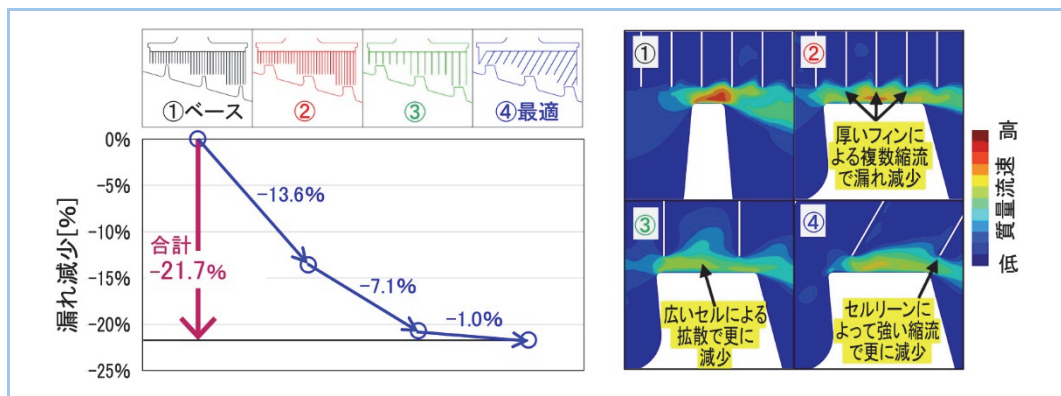


図6 同時最適化形状の漏れ低減メカニズム

4. 軸流タービンの翼・排気室形状の空力・翼振動強度評価

船用過給機業界では、新燃料採用時の経済性志向の高まりなどを背景に性能競争が激化しており、翼などの回転部品だけでなく複雑 3 次元形状を有する静止部品の改良も重要となっている。また、実製品の導入にあたっては、作動範囲内のすべての共振点において振動強度などの構造要件を満たす必要があり、設定されたクライテリアを満足することが目標となる。

従来の設計では、3D モデル作成などの手作業がボトルネックとなり、十分な形状最適化に取り組めていなかったことから、船用過給機用軸流タービンの動翼と排気室にアルゴリズムックデザインを適用した。具体的には、効率改善ニーズが高い低負荷条件の全体効率向上のために動翼スロート分布とディフューザ部形状を、また、高次モードの振動応力最小化のために静翼形状をそれぞれ最適化した(図 7)。

図 8 に最適化結果の概略を示す。低負荷条件の全体効率はベースケースに対して 0.49% 向上した。本事例では、動翼のスロート分布を W 型にして端壁部の流速を増加させることで剥離を抑制し、面積比拡大されたディフューザ内における均一な減速を可能にした。これによりディフューザ部における静圧回復量が最大化され、全体効率向上に繋がった⁽⁵⁾。また、振動強度面では、静翼の背側リーンと逆バウ化により励振力を抑制し、問題となっていた振動モードの振動応力を最大 78% 低減した。これは、静翼の中間翼高さにて流出角が増加しメタル角とのギャップが拡大した上、ピークマッハ数が低減したことで、主要な励振源である衝撃波や後流が抑制されたためである。

このように、アルゴリズムックデザインによって生成した膨大な形状案に対して空力性能と振動強度を同時に評価することで、高効率と高信頼性を両立させた製品を迅速に設計することが可能となった。

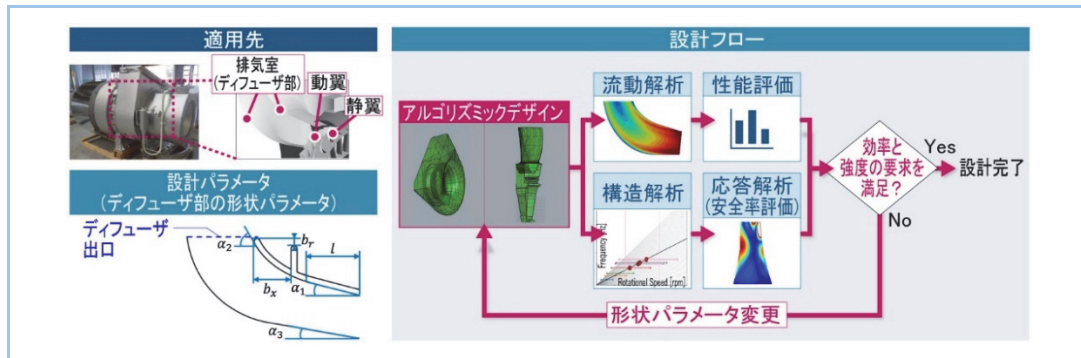


図7 アルゴリズムックデザインによる船用過給機用タービン及び排気ディフューザの同時最適化

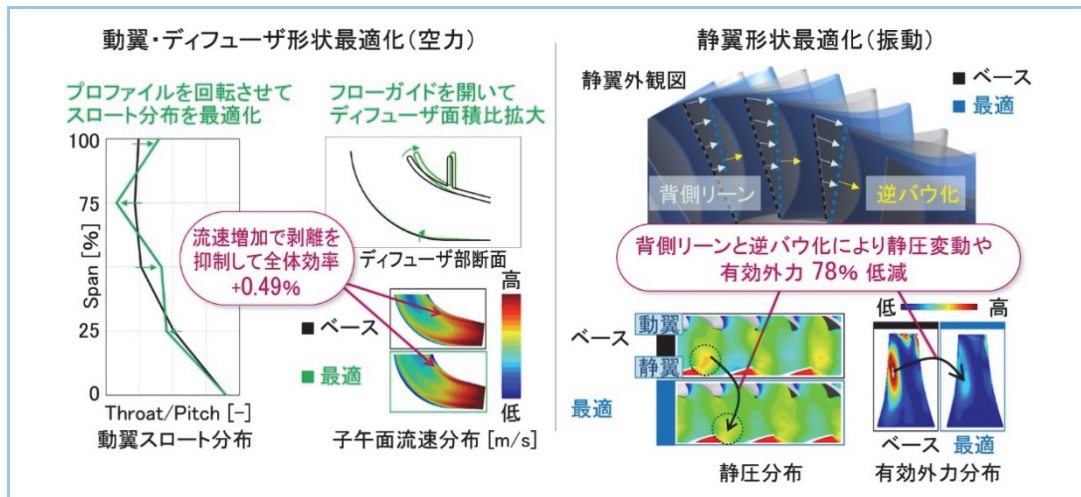


図8 空力・振動強度の同時最適化結果

5. 新製品のアジャイル開発への適用

市場環境が急速に変化する今日においては、市場ニーズに素早く柔軟に対応した新製品・技術開発が求められており、仮説検証サイクルを小さく早く回すアジャイル型の製品開発プロセスの導入が重要となっている。

当社では新規製品として作業用ドローンを対象に、鉄塔や橋梁などで人が行う高所作業を補助/代替することを目的に、コンパクトかつ高推力で安全性の高い機体コンセプトとして、ファンをダクトで覆ったダクトドファンを採用した推進器形態を提案し、その PoC (Proof of Concept) のための研究開発を行っている。本ドローンは、空中に静止する無風ホバリング条件のほか、横風ホバリング条件、降下条件など複数条件で運転される。そこで、設計パラメータに基づき、アルゴリズムックデザインによってダクト形状を生成し、複数条件で CFD 解析して性能を評価するといったプロセスを構築し、形状最適化することでロバストに性能が高いダクト形状を得た(図 9)。

最適化後の形状は、初期形状に対し横風条件で受ける横力を 13% 低減しつつ、無風条件で推力が 1% 増加した。特に顕著な改善が見られた横風条件の流れ場の比較を図 10 に示す。初期形状ではダクトリップ部で強い負圧領域があり、ここで急激な加速を行ったあと、急激な減速に転じるため流速分布に示すようにリップ内周側で剥離が生じていたことが分かる。これにより横向きの抗力が発生し、横力が増加している。一方、最適化後では、厚いダクトリップにより曲率が低下し、局所的な負圧領域が縮小したことで流れの加減速が緩和され剥離領域が消滅した。これにより横力が大幅に低減したと考えられる⁽⁶⁾。本形状コンセプトをもとにプロトタイプ機を試作し、屋外飛行試験を実施した結果、安定した飛行が確認されコンセプトの成立性を確認した。

このような新規製品の開発においては、仮説検証サイクルを素早く回すことが重要であり、そのためにはアルゴリズムックデザインが有効であることを確認した。

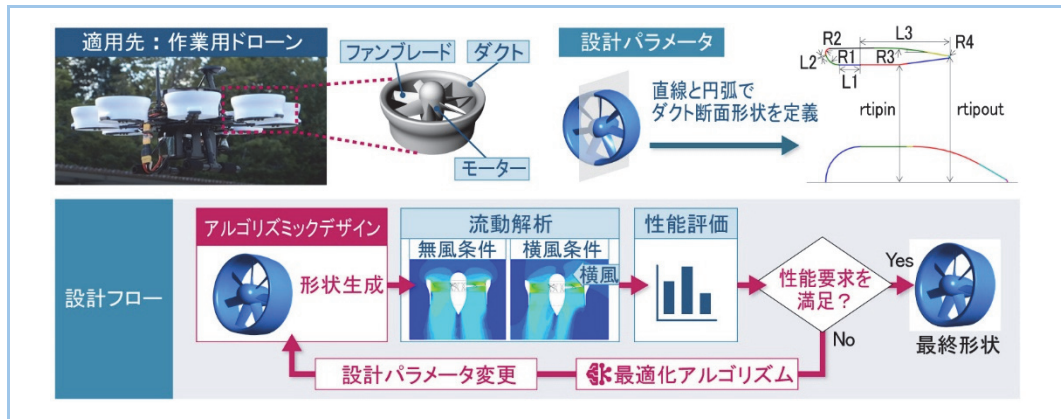


図9 アルゴリズムックデザインによる作業用ドローンのアジャイル開発

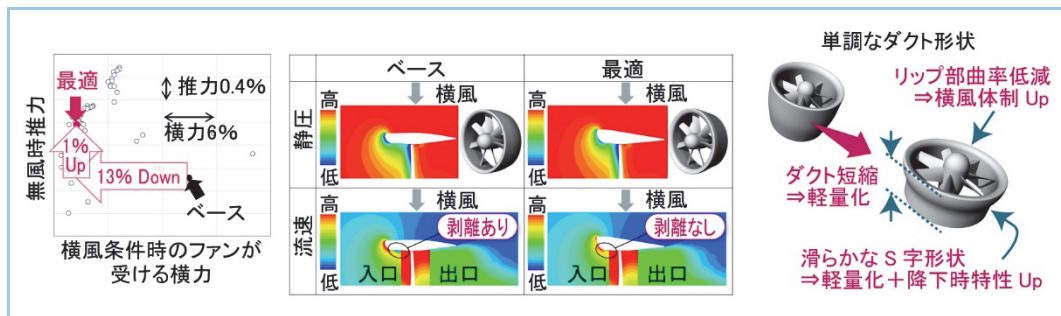


図10 複数の使用条件を想定して最適化された作業用ドローン向けダクトドファン

6. まとめ

アルゴリズムックデザインの導入により、インフラ、エネルギー、輸送の各製品において、製品開発期間内に製品価値を向上させることができた。また、複数の力学モデルを組み合わせ、複数の評価指標を同時に考慮して最適化することも可能となった。今後は、本技術を様々な製品開発に展開し、より多くの製品の強みを掛け合わせ、お客様に最大の価値を提供する高性能な製品を創出していく。

参考文献

- (1) 三菱重工業株式会社, 三菱重工の成長を加速させるイノベーションと最適化, <https://spectra.mhi.com/jp/accelerating-mhis-growth-through-innovation-and-optimization>
- (2) Robert McNeel & Associates, Rhino - Rhinoceros 3D, <https://www.rhino3d.com/>
- (3) Chougule, H. H. et al. Low Leakage Designs for Rotor Teeth and Honeycomb Lands in Labyrinth Seals, ASME Turbo Expo 2008, GT2008-51024
- (4) Kuwamura, Y. et al. Development of New High-Performance Labyrinth Seal Using Aerodynamic Approach, ASME Turbo Expo 2013, GT2013-94106
- (5) Dasadhikari, K. et al. Aerodynamic Optimization of an Axial Turbine Blade and Diffuser, ASME Turbo Expo 2024, GT2024-124695
- (6) Kuwamura, Y. et al. Optimal Shape Design of Ducted Fan Using Parametric Modeling CFD Analysis, Proceedings of the Fluids Engineering Conference 2024, OS07-26