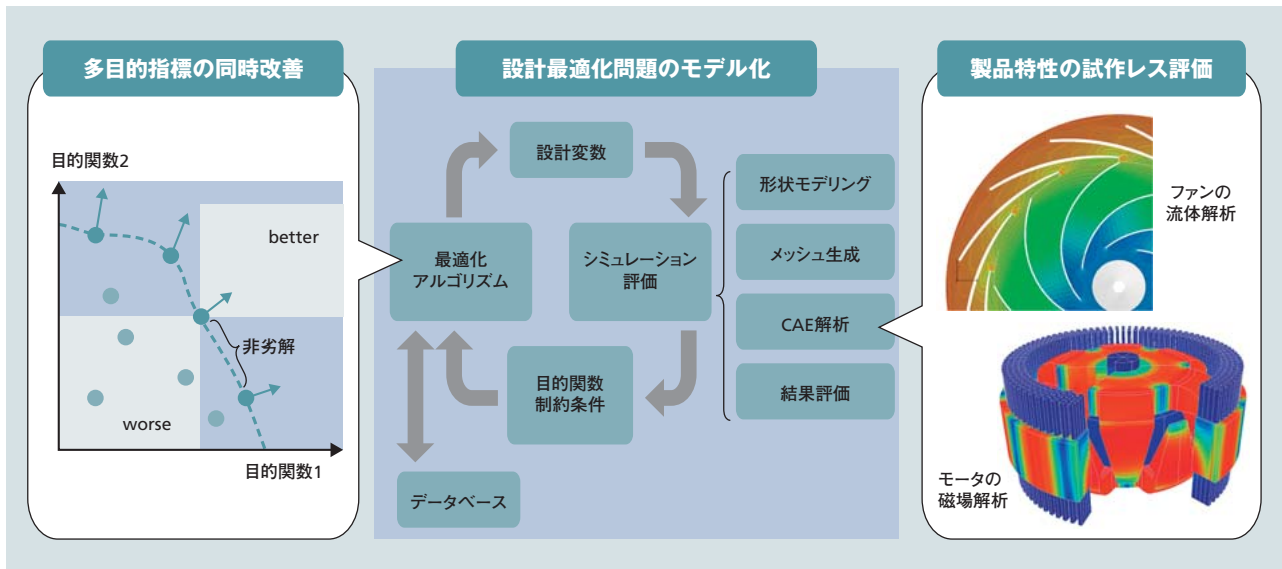


知的モノづくりを実現する最適設計技術

Design Optimization Technology that Realizes Intelligent "Monozukuri"

杉村 和之 Kazuyuki Sugimura

北村 正司 Masashi Kitamura



注:略語説明 CAE (Computer-aided Engineering)

図1 シミュレーションを活用した最適設計のフレームワーク

現象や製品の特性を踏まえて設計問題(設計空間)を定義し、適切な最適化アルゴリズムとシミュレーション手法を選択すれば、効率的な最適設計が実現できる。

各種の計算科学シミュレーション技術が発達し、現象解明や製品性能予測に役立てられるようになった。このようなシミュレーション技術をより直接的に製品設計に生かすためには、所定の性能を得るための条件を見いだすという逆問題を解かなければならない。近年、このための方法論として最適設計技術に注目が集まっている。

計算科学シミュレーションが物理現象のモデル化であるとするならば、最適設計は設計者の思想や試行錯誤のプロセスのモデル化(メタモデル化)であると言える。最適設計を実現するためには、シミュレーション技術のほか、設計問題のモデル化、最適化アルゴリズム、近似モデル、データ分析など、分野を横断する幅広い技術に関する知識とバランスのよい運用が求められる。

日立グループは、産学連携などを通じて開発した最適設計技術を基礎に、幅広い製品群で蓄積した知識やノウハウを融合させ、さまざまな製品の最適設計に取り組んでいる。

1. はじめに

製品設計においては、設計変数を振り、さまざまな制約条件を満足させながら、製品特性(目的関数)を最適化することが求められる。近年、各種のシミュレーション技術が成熟し、従来の試作をシミュレーションに置き換えて製品開発を進めることが一般化した。さらには、設計者自身が実施していた改善策提案と検証という反復プロセスを最適化アルゴリズムに代替させることで、シミュレーションベースの最適設計が実施可能となってきた。

しかし、最適設計の本質は、あくまで定式化した数理モデルを計算機が解くものであるから、モデル化のよしあしが設計の成否を分ける。すなわち、製品特性や現象特性に関する深い洞察を基に、設計課題を適切な最適化問題として定式化することに設計者は頭を悩ませる必要がある。そのうえで、設計問題ごとに適した最適化手法を選択・実行し、結果を解釈することが求められる。

ここでは、最適設計手法の現状、上記のような視点に基づいて実施したファンとモータの最適設計事例、および最適設計の今後の方向性について述べる。

2. 最適設計手法

最適設計は、設計問題を図1中央の図に示すようなフレームワークとしてとらえ直すところから始まる。すなわち、まず検討したい設計変数を定め、次に最適化したい目的関数や考慮したい制約条件を定義し、これらの応答関係をシミュレーションによって予測する。このような設計変数探索空間を「設計空間」と呼ぶ。設計空間を網羅的に探索することで最適解が求められるのは自明であるが、このようなアプローチは設計変数の数が増えた場合、すぐに実行不可能となる。そこで、いかに探索回数を減らして最適解を見いだすかが、最適化アルゴリズムの役割となる。

実際の設計においては、設計目標が一つの場合もあるが、複数の場合も多い。そのような場合でも、対応できるように多目的遺伝的アルゴリズムを開発している¹⁾。単目的最適化の場合は、着目する目的関数そのものを最大化または最小化すればよいが、多目的最適化の場合は、図1の左(2目的関数の最大化の例)に示すように、非劣解(互いに優劣をつけられないトレードオフ関係にある最適解集合)を、多様性を保ちながら最適な方向へ前進させていかなければならない。このような場合には、着目する解を支配している解(すべての目的関数が優れているような解)の個数を数えて順位づけを行い、順位の値を目的関数に設定し直すことで単目的最小化問題に変換して解くことができる。このような目的関数の数のほか、設計空間の非線形性の強さなどを考慮し、非線形計画法、焼きなまし法、多目的遺伝的アルゴリズムなど、使用する最適化アルゴリズムを切り替える。

シミュレーションのプロセスは、設計問題ごとの現象をよく理解して構築する必要があり、当該分野の知識が欠かせない。例えば、流体現象が中心となるファン設計においては、性能のよしあしと流れのメカニズムの相関を考慮した問題定義が重要である。また流体は非線形性の強い現象であるため、結果を容易には予測しがたく、事前に設計パターンを推測することが難しい。これについては、計算結果から後处理的に設計パターンや法則を得るようなアプローチが求められる。

一方で電磁場が中心となるモータ設計においては、最適化問題の構築に関する留意点は流体分野と同様であるが、シミュレーション精度が比較的高く、現象も線形・対称的に記述される特徴がある。そこで、このような特徴を生かした簡潔なモデル化と効率的な最適化が求められる。

また近年では、最適化探索のすべてをシミュレーションで実施するのではなく、少数のシミュレーション結果から近似モデルを構築し、それをを用いて高速に最適化を実施することも多い。最適化設計における必要な計算量を10分の1から100万分の1というオーダーで低減させることができる。

3. ファンの最適設計事例

3.1 掃除機用ファンの最適設計問題の定式化

家庭用電気掃除機においては、消費電力の上限が決まっており、吸込み力を向上させるためにファンの効率を向上する必要がある。一方で掃除機は、集塵(じん)量が増すにつれて風量が低下していくため、低風量域でもファンを安定運転させなければならない。このような複数の設計要求を同時に満たさなければならないため、多目的最適化が求められる。

単純には、複数の風量点のファン性能を流体シミュレーションで予測し、多目的最適化を行えばよいが、できる限り計算量を減らすことを目的とし、安定運転されるファンの内部流れは一様性が高いという流体力学的な考察に基づく設計仮説を立てた。すなわち、設計点風量において一様な流れ場を確保すれば、流量が変化した場合でも流れの剥(はく)離などの不安定現象発生に対する安全性のマージンが大きいと考えたのである。この仮説を定式化に反映させ、設計点風量における流体シミュレーションのみを用いて、効率と動作安定性(流れの一様性)を同時に最適化した²⁾。設計変数としては、ファンの子午面や羽根の反りなどを定義した。

この設計対象となった掃除機用ファンは直径90 mmで、回転数が4万4,000 min^{-1} という小型高速回転機械であるため、内部流れの実験的な観測が困難である。そこでシミュレーション結果から、設計問題の背後に潜むファン形状—流れ—性能の相関性を設計法則として解明するために、決定木に代表されるようなデータマイニング手法を適用し、性能改善の方針を示す設計法則を抽出することを試みた。

3.2 最適設計結果と設計法則抽出

ファン効率と安定性指標である流れの一様性について同時最適化した結果を図2に示す。効率と安定性にはトレードオフ関係が存在することが判明し、その限界ラインが明確になった。一方で、図3は得られた非劣解集合の中から、性能と安定性のバランスが取れた設計案について、実験的に性能検証を行った結果を示している。単純に設計点効率だけを追求した単目的最適設計では、低風量域で流れが剥離・失速したのに対して、多目的最適設計の結果は失速の抑制と効率の改善を両立した。この結果は、設計仮説の妥当性と、そのような考察に基づいた設計問題の定式化の重要性を示すとともに、多目的最適化の有効性を示したものである。

また、図2には、最適化過程で得た約400のシミュレーション結果に決定木分析を適用して得られた各目的関数の改善法則を併記している。各法則が示すファン形状の変化と、その結果生じる流れとの関係を類推することによって、効率改善には羽根車の入口スロート部の摩擦損失が、安定性改善に

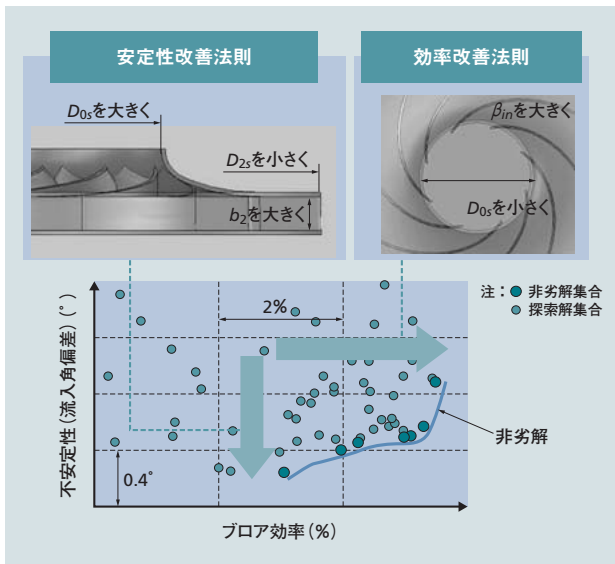


図2 ファンの最適設計結果と改善法則の抽出

右下に向かって最適化を進行させ、非劣解集合を得た。D_{0s}はファン入口径、D_{2s}はファン出口外径(上図で上側の外径)、b₂はファン出口高さ、β_mはファン入口における羽根角度をそれぞれ示す。

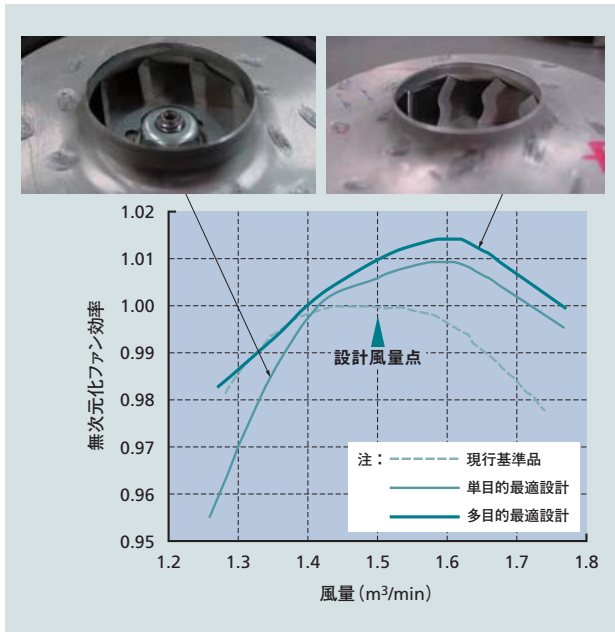


図3 多目的最適設計結果の検証

多目的最適設計されたファンは、低風量域での失速を抑制しつつ、設計点の性能を改善できる。

は羽根車に後続するディフューザとの寸法取り合いが重要であるという有意義な知見を見いだすことができた。

4. モータの最適設計事例

4.1 電磁サスペンション用円筒リニアモータの形状最適化

電磁式のサスペンションは、メンテナンス性と制御性で優れ、従来の油圧方式の代替として注目されている。この装置に用いるリニアアクチュエータとしては、リニアモータによる直動方式と回転型モータとギアを組み合わせた回転・直動変換方式がある。前者では、機構が簡単であることから、装置の信頼

性を確保しやすいが、モータの体格が比較的大きくなる課題がある。また、推力脈動の低減に関しても改善が必要である。

そこで、推力脈動低減の観点で有利な、新方式の磁気回路による円筒リニアモータを提案し、このモータを最適設計して、その性能を限界まで引き出すことにした³⁾。

新方式円筒リニアモータの断面構成を図4に示す。磁石ピッチτ_pとコイルピッチτ_sの比τ_p/τ_sは $\frac{9}{8}$ である(従来モータではτ_p/τ_sは $\frac{3}{2}$ ないし $\frac{3}{4}$)。事前の考察によれば、τ_p/τ_sを1に近い値にすることで、推力脈動の振幅を相対的に小さく抑えられることがわかっており、上記τ_p/τ_sの選択はこの結果を踏まえたものである。

最適化計算にあたって、モータ胴部と端効果補正用の補助磁極に関係する寸法を設計変数とし、推力波形に含まれる低次脈動振幅の二乗和の平方根と平均推力の比を目的関数とした。これを最小化することにより、推力の最大化と推力脈動の平坦(たん)化を図った。上記最適設計による試作円筒リニアモータの特性試験結果と外観を図5に示す。ストロークの全範囲で期待どおりの平坦な推力波形が得られることがわかる。

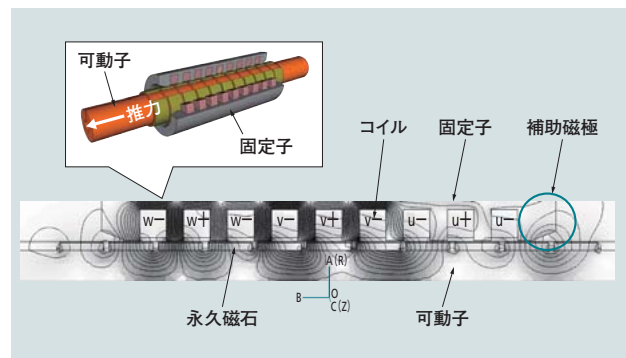


図4 新方式円筒リニアモータの構成

油圧方式に代わる電磁式のサスペンションに用いられる。

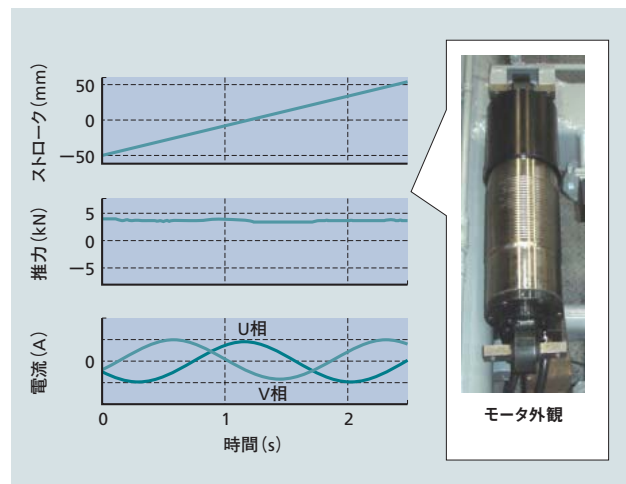


図5 円筒リニアモータの特性試験結果と外観

平均推力を増加させつつ推力脈動を低減することができた。

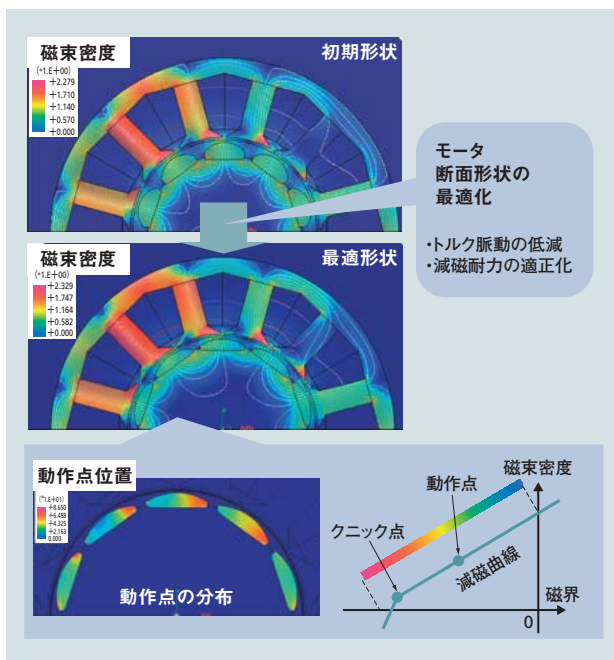


図6 減磁耐力を勘案した表面磁石モータの形状最適化
高価な希土類焼結磁石の使用量を削減した設計が可能となる。

この事例は、単に最適化問題を定式化して解くのではなく、電気機械レベルでの事前考察とコンセプトの策定が重要であることを示すものである。

4.2 減磁耐力を勘案した表面磁石モータの形状最適化

高価な希土類焼結磁石を適用したモータにおいては、磁石が減磁することなく、可能な限り磁石使用量を削減した設計が低コスト化の観点から重要である。

図6は、表面磁石モータを対象に、所定の減磁耐力を確保したうえで磁石の使用量を限界まで切り詰めながら、トルク脈動の低減とトルクの増大を図った例である。最適化計算では、磁石やコアの断面形状に関係する寸法を設計変数に選び、回転子に起因する低次高調波起磁力の二乗和の平方根と基本波起磁力の比を目的関数として、これを最小化した。この際、磁石の減磁曲線上における動作点に制約条件を課して、クニック点(動作点がこの点より下方に来た場合に非可逆減磁)に対して一定の設計マージンを設けるようにした。起磁力の算出には、モータの空隙(げき)における磁束密度の正則性を利用する手法⁹⁾を利用した。同図中段に示すように、最適形状では初期形状と比較して磁石の量が削減されている。

執筆者紹介



杉村 和之

1996年日立製作所入社、機械研究所 高度設計シミュレーションセンタ 所属
現在、設計探査・最適化の基盤技術の研究開発に従事
日本機械学会会員、ターボ機械協会会員

この事例では、磁石材料の特性を勘案した最適設計について触れたが、モータ設計においては、このほかにも熱、機械強度など多面的な切り口での最適設計が重要である。

5. おわりに

ここでは、最適設計技術の現状について、ファンとモータの具体的な最適設計事例を交えて述べた。

最適化技術、シミュレーション技術、そしてそれらを支える計算機能力の発展により、今後も最適設計技術を適用可能な製品範囲が拡大していくと思われる。現象論に基づいた設計問題のモデル化が最も重要であることは今後も変わらないものの、シミュレーション利用の最適設計のあり方には新しいパラダイムも生まれようとしている。その中から以下の2点を今後の方向性として挙げ、本稿を閉じることとしたい。

一つは、モノのばらつきや環境条件など、不確実な事象までも計算機上のモデルとして表現し、設計段階でこのような不確実性に対するロバスト性や信頼性を考慮した予防的最適設計を行うという方向性である。決定論的な最適設計から確率論的な最適設計へと進む流れであると言える。

もう一つは、全体俯瞰(ふかん)的な設計知見を得るための技術開発である。得られた最適解を単純に提示するだけではなく、その導出過程で得られたデータを有効に活用しながら、背後に潜む設計法則や、矛盾する設計課題を同時に解決する仕掛けを発見するための分析技術であり、統計やデータマイニングといった異分野の技術導入が必要である。

このようにシミュレーションを活用した最適設計は、従来の計算科学から、より情報科学的な色彩を帯びたパラダイムへと移行し、設計者は設計課題の高度な定式化や、多様な観点での結果分析など、付加価値の高い設計作業に力を注いでいく必要があると考える。

参考文献

- 1) S. Obayashi, et al.:Multi-Objective Design Exploration for Aerodynamic Configurations, AIAA 2005-4666(2005)
- 2) K. Sugimura, et al.:Multi-objective Design Exploration of a Centrifugal Impeller Accompanied with a Vaned Diffuser, ASME FEDSM2007-37502(2007)
- 3) 北村, 外:永久磁石式円筒リニアモータにおける磁気回路の最適設計, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料 SA-07-29/RM-07-29(2007)
- 4) M. Kitamura, et al.:Motor design approach utilizing regularity of 2-dimensional magnetic field, IEEE Trans. on Magn., Vol.39, No.3, pp.1464-1467(2003)



北村 正司

1980年日立製作所入社、日立研究所 情報制御研究センタ モータイノベーションセンタ 所属
現在、回転機、電磁界数値解析の研究開発に従事
工学博士
電気学会会員、日本物理学会会員