

jh230063

## 流体制御デバイスと物体形状の統合最適設計における 効率的解探索手法の検討

松野 隆（鳥取大学）

### 概要

物体の物理形状とプラズマアクチュエータを統合した空力最適化による空力制御効果の最大化コンセプトの実証を目的として研究を行った。本課題では最適設計手法のロバスト化・高効率化に重点を置き、制約付き最適設計問題への対応と多変数を用いた空力最適化問題に対する設計空間の縮約法の開発と性能評価および機械学習の成果活用について研究を行った。今年度は制約付き多目的進化アルゴリズムの制約処理方法を効率化するため、指向性交配と局所交配を組み合わせた手法を提案し数学問題および実問題を対象に検証を行った。設計空間縮約方法については、多変数の予備計算から特定の特徴量を抽出して設計探索に利用する手法の検討を行った。また、EGO 法を対象に GPT-4 との協業により既存コードのリファクタリングと制約処理の改善を図り、既存手法と同等またはそれ以上の性能を持つコード生成が可能であることを確認した。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

北海道大学 情報基盤センター  
名古屋大学 情報基盤センター  
京都大学 学術情報メディアセンター

#### (2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

#### (3) 共同研究分野 (HPCI 資源利用課題のみ)

超大規模数値計算系応用分野

#### (4) 参加研究者の役割分担

松野隆（鳥取大学） 統括・手法提案開発  
金崎雅博（東京都立大学） 最適化手法開発  
棟朝雅晴（北海道大学） 情報システム設計  
高橋孝（JAXA）：空力計算基盤構築  
林謙司（JAXA）：空力計算基盤構築  
西村大生（鳥取大学）：最適化計算

秦力也（鳥取大学）：空力制御効果解析

### 2. 研究の目的と意義

プラズマアクチュエータ (PA) は誘電体バリア放電により生成されるプラズマの移動を利用して平滑な物体表面から壁面噴流を生成するという、非常に応用価値の高い特徴を持つ流体制御デバイスである。一方、他の流体制御デバイスと同様、産業的実用化に向けて適用手法・設計手法が未開拓な点が課題となっている。本研究では、この課題に対し、物体の物理形状と多数のプラズマアクチュエータを統合した空力最適化アプローチを提案し、その実現に向けて研究を行う。

研究の過程で、安定かつ高効率な設計のためにはいくつかの課題が存在することが明らかになった。一つはメタヒューリスティクスの解探索効率が低下する点で、これは設計問題に制約が存在する場合や、設計変数が多

次元でかつ独立性を持たない場合に問題となる。本研究課題では、新たな解探索手法の適用により上記の課題を解決し、流体制御デバイスの統合最適設計手法を発展させる。さらに、これを用いた高性能な流体制御デバイスの設計実現を目的とした。

本研究課題の基礎研究・基盤的研究としての意義は、大規模数値計算を見据えたロバストで効率的な解探索手法の提案・実証にあり、これにより同種の設計問題が存在する幅広い分野への貢献が期待される。工学的観点からは、本研究課題により実施する最適設計コンセプトはプラズマアクチュエータ研究に関してブレイクスルーが期待されるものである。物体形状と流体制御デバイスを統合して最適化する手法は独自のもので、流体が関わる製品設計において、機能面からの要求と流体力学的性能を高いレベルで両立可能とし、機械設計における自由度の飛躍的向上に資するものと期待される。

### 3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義

本研究およびそれに関連する研究は、2016年度から2022年度までのJHPCN公募型共同研究ならびに萌芽型共同研究に採択されてきた。解析プラットフォームの構築をはじめとする知見や課題の発見は、公募型共同研究の支援無くしては得られないものであった。本共同研究により、流体制御・空力解析の課題解決のため、数値解析・進化計算/最適設計法・データマイニングおよび情報システム設計の各分野を横断する体制が構築され、本課題に取り組むことが可能となった。本研究では小規模(<100 cores)の計算を大量に実施するテーマと、大規模な非定常計算を行うテーマが存在し、これらを効率的に実施することは拠点の資源利用無くしては不可能である。基盤的技術の開発・実証を主目的とする本研究は、公募型共同研究への応募が研

究推進に必須である。

### 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

本研究は、参加メンバーが研究分担者として参画した共同研究 jh160032/jh170047「高速 CFD コードを用いた次世代空力応用研究プラットフォーム構築に向けた実証研究」を基盤とし、上記共同研究において構築された数値流体力学プラットフォームを利用し実施した。上記共同研究では、旅客機・火星探査航空機や再突入カプセルについて形状最適化や時系列モード解析の枠組みを構築し有用性を示した。PA による流体制御機構の研究では、高速流体計算に適用可能な PA 数値モデルを構築するとともに、PA の空力制御性能予測とその最大化を行い、最適設置位置予測を行った。

その後、2018-2019 年度の共同研究 jh180079/jh190076、および 2020 年度萌芽研究 EX20105 において、最適化・設計手法の汎用化および高度化と形状・流体制御デバイス統合最適設計手法に関する技術開発について研究を推進した。最適化・設計手法の汎用化および高度化については、最適解を得るまでの時間を大幅に短縮するため、解探索の並列化およびサンプル取得の投機的実行手法等を実装し、実際の設計問題に適用・評価した。また直接 GA 法の制約条件付き多目的問題に対する個体の交配手法を提案・ベンチマークし、実問題への適用を目指せる段階に至っている。また設計時に流体場情報を利用する手法についても提案を行った。

形状・流体制御デバイス統合最適設計手法については、2次元ブラフボディ形状を対象に、物体形状と多数 PA の駆動条件を統合した設計変数として空力最適化を行い可能性を調査した。その結果、統合最適設計により個別設計よりも空力的に優れた解の探索に成功した。その後、物体形状の自由度を増すためにスプライン曲線を導入し、多数のコン

トロールポイントを用いた最適設計を行いその際の課題を抽出した。継続する 2021 年度研究 jh210053 では多自由度の設計における解探索の不可能性を解決するために、変数縮約に AIC を用いる手法を提案した。また近似曲面を用いる最適設計手法 (EGO 法) においても、直接 GA 法と同様に制約条件付き問題を効率的に解くため、制約満足確率をペナルティとする解探索手法を提案・実装し、解評価に時間のかかる大規模計算を対象とした制約付き問題についても最適設計を可能とする足がかりを得た。2022 年度研究 (jh220061) では、制約条件付き多目的問題に対する最適設計手法の検討と実問題を用いた性能調査について実問題への適用を実現し、翼型設計の全自動化を行うための基盤構築を行った。最適設計における高自由度の物体形状定義法と、その効率的な解探索手法については、効率検証の際に発見された高い形状自由度のモデルに対する自動格子生成の問題や、変数縮約時の最適サブセット取得についての課題について検討した。

5. 今年度の研究成果の詳細

① 制約条件付き多目的問題に対する最適設計手法の検討と実問題を用いた性能調査

制約付き多目的進化アルゴリズム (Constrained Multi-Objective Evolutionary Algorithm, CMOEA/D) の制約処理方法を効率化するため、指向性交配 (Directional Mating, DM) と局所交配 (Local Mating, LM) を組み合わせた新しい手法 CMOEA/D-DMA-LM を提案した。図 1(a) に示す通り、DM は制約境界にある制約違反解のうち、目的関数値が優れたものを用いる。これに加えて探索終盤において、選択すべき有望解の減少緩和を目的として、その世代でのパレート解の近傍探索を通じて、多様性を維持する機構となる LM (図 1(b)) を導入した。

性能評価においては、数学問題の他、実問

題である梁溶接問題を例に取り上げ性能検証を行った。初期値の依存性を含めた調査を行うため、20 試行を行い、Hypervolume の世代履歴の平均と合わせて分散値も観察した。調査の結果、数学問題・実問題共に、Hypervolume の平均値について、提案法は良好に改善をみた。図 2 に梁溶接問題の探索履歴を示す。分散値の履歴は、提案法は数学問題においては既存手法と同程度の結果となったが、一方で実問題においては既存手法のほうが小さい値で推移した。これは、初期値の依存性を早期に解消する指標でもあることから、今後の改良が必要であることが分かった。

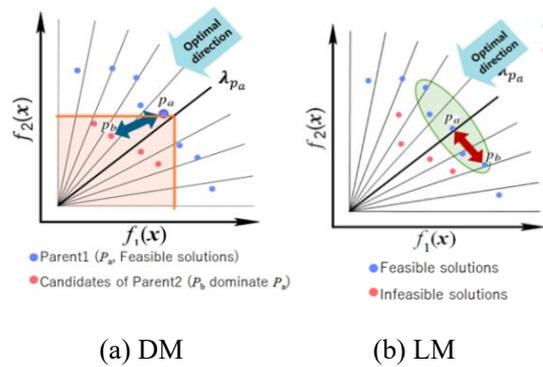


図 1 DM と LM の解選択概念図

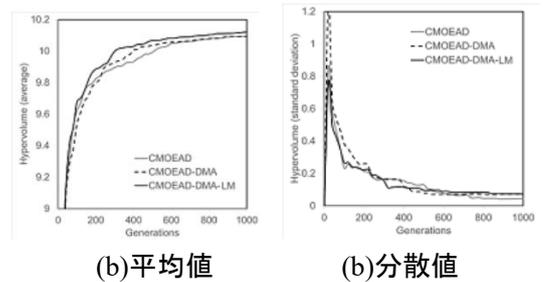


図 2 梁溶接問題の探索結果: Hypervolume

② 最適設計における高い自由度の物体形状定義法と、その効率的な解探索手法の提案

CFD を基盤とした最適設計は設計変数が多次元の場合、計算コストが増大し解探索効率が極端に低下する「次元の呪い」が課題となる。本研究では、設計空間を適切に表現する変数を抽出・縮約して多変数の空力最適化

を容易にすることを目的とし、分散分析 (Analysis of Variance : ANOVA) と赤池情報量基準 (AIC) を用いた設計空間を縮約する方法を提案・開発した。2022 年度には、提案した設計空間縮約手法を多自由度のブラフボディ形状の多目的最適化問題に適用しその有効性を調査した。その結果、適切な変数削減が可能でありコンセプトの有効性を実証できたものの、いくつかの課題が新たに明らかになった。

今年度はこれを踏まえ、まず設計ワークフロー全体を見直し、多サンプルの効率的な評価を行う上で障壁となっている点の改善を行った。特に形状モデル生成の自動化については、これまで自動モデル生成ができなかった図3に示すような凹面を持つ複雑形状を含む任意の形状に対して、形状を定義するスプライン曲線から面情報を計算し、メッシュ作成に必要なモデルを出力するプログラムを作成した。

次に、設計変数の増加に伴う提案手法の効率低下について検討を行った。提案した変数削減法はまず削減前の設計変数によって形成される設計空間全体の情報を必要とする。すなわち設計変数の増加とともに、必要となる初期サンプル数と、モデル評価のための kriging 生成の負荷が急激に増加する。このため本手法を三次元形状に適用する際には、変数削減を実施する前に既に過大な計算負荷が生じる。これに対応するため、今年度は計算対象の解の特性を利用した変数削減方法について検討した。本研究では、解析対象の例として、ブラフボディ形状の角部形状を自由に変化させ、剥離抑制と抗力低減が実現する形状を数値解析と実験計画法を組み合わせ探索し、この結果を用いて設計に重要な特徴量を抽出した。

本試行には設計対象としてアスペクト比 1.0 の二次元角柱を選んだ。この二次元断面の前方角部に任意の突起形状を設置し、剥離

抑制による抗力低減を意図する。設置する突起形状は Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS) により定義し、形状は 6 制御点により決定される (図 3 参照)。本試験では計算負荷を考慮に入れて進化計算による探索は行わず、制御点の組合せを Latin Hypercube Sampling (LHS) により 500 サンプル取得し、これを設計空間に配置してその性能情報を得た。

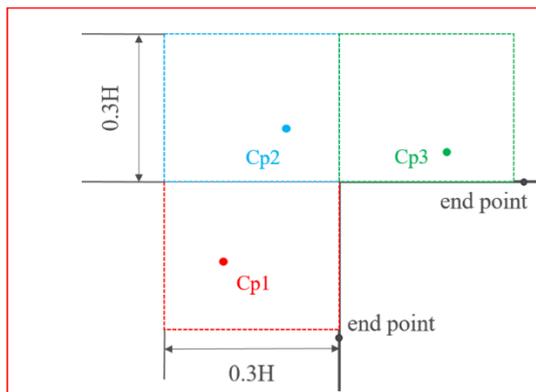


図 3 二次元角柱角部の突起設計の制御点

数値解析には JAXA の高速 CFD ソルバ FaSTAR を用い、定常 3 次元圧縮性レイノルズ平均 Navier-Stokes 方程式を解いた。離散化にはセル中心有限体積法を、乱流モデルには Spalart-Allmaras-noft2-R モデルを使用した。一様流は 20 m/s,  $Re=1 \times 10^5$  にて計算を行った。

計算結果から、主要な特徴量として前方への突出し長さ ( $x/H$ )・横方向への張出し長さ ( $z/H$ )・フェアリング先端の曲率 ( $x\_curv$ ) および側面の曲率 ( $z\_curv$ ) が抽出された。図4にこれらの特徴量と抵抗係数に関する散布図行列を示す。このうち、一例として、図5はフェアリング先端の曲率  $x\_curv$  と  $C_d$  の相関のうち、抗力が低減している ( $C_d=1.0$  未滿) サンプルを抽出したものを示す。 $C_d$  が低減するサンプルは曲率 90 未滿にしか存在しなかった。これらのサンプル中の最大曲率形状と最小曲率形状を図6に示す。本試験では、抗力低減が実現するサンプル内では最大曲

率は 83.7 であり、最小曲率は 11.5 と、比較的広い値を示した。これらが同様の抵抗低減効果を持つことから、フェアリング先端形状は閾値は重要であるが、最適値については他の特徴量に比べ鈍感な特性を持つことがわかった。

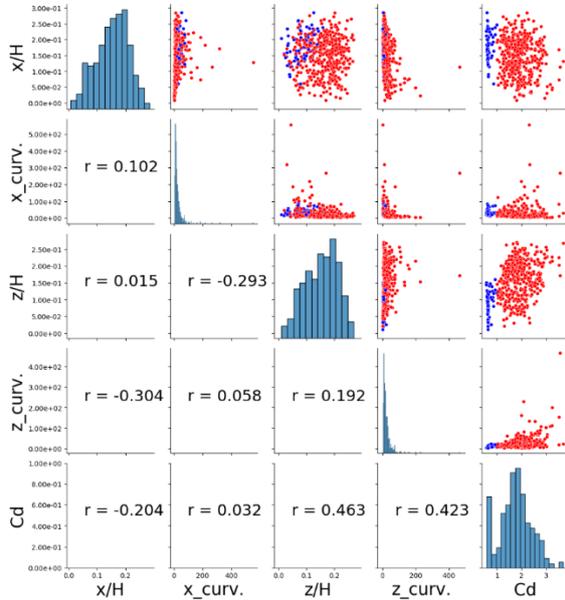


図 4 二次元角柱に設置した突起の特徴量と抵抗係数に関する散布図行列

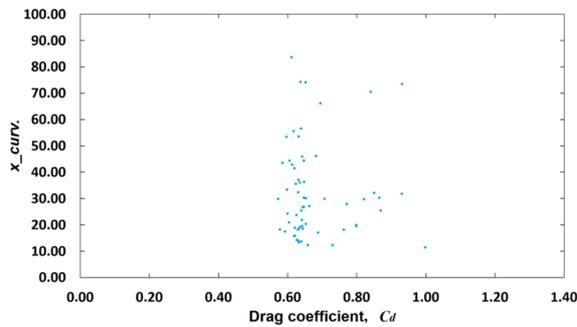
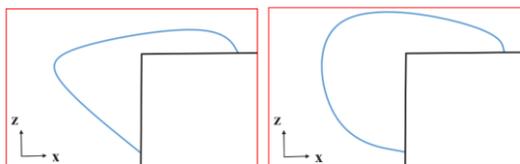


図 5 フェアリング先端曲率と  $C_d$  の相関 (抗力低減サンプルのみ抽出)



(a) 最大曲率 (b) 最小曲率

図 6 抗力低減形状に関する、フェアリング先端曲率による形状の違い

他の特徴量に関する抵抗低減の指標としては、前方への突出し長さ ( $x/H$ ) は角柱辺長  $H$  の 5% 以上の長さが必要であり、長くすることで  $C_d$  が低減する傾向を示す。また、 $C_d$  低減のためには横方向への張出し長さ ( $z/H$ ) は 15% 以下に抑えることが必要であり、上記の通りフェアリング先端の曲率 ( $x\_curv$ ) は 90 未満、側面の曲率 ( $z\_curv$ ) は 25 未満で急な曲率が有効であることが示された。図 7 に示すのは上記条件を満足した最小抵抗となる突起形状を持つ角柱と、条件が満足されていない形状の突起を持つ角柱の周りの流れを示している。ある程度横方向へ張り出ししていても、突起側面の曲率が小さい場合には流れの剥離が遅延され、後方の剥離後流が大幅に縮小されることが図から分かる。

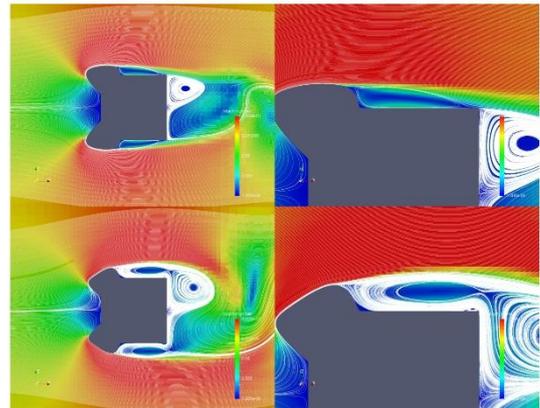


図 7 突起を持つ角柱周りの流れ：  
(上) 最小抵抗となる突起形状  
(下) 抗力低減条件を満足しない突起形状

今後、これらの特徴量を制御点位置の変数の組み合わせによって表現し、設計探索に利用することで、少ない変数で設計探索を行うことを検討している。このためには、上記の特徴量が表現できる式を GP 等を用いて求め、特徴量による設計探索結果を形状に逆変換することで、少ない特徴量を変数に用いた設計探索を実現する方法が考えられている。また、現状では特徴量抽出は相関行列を用いて手動で行っているが、これを自動化し、初期

サンプルを求めれば特徴量による設計探査が統一した基準で行える環境を構築し本手法の有効性を検討する。

### ③LLM を用いた創発的アプローチによる最適化コード開発に関する研究

本研究では近年飛躍的に進歩がしている機械学習分野の成果を空力設計に取り入れるための検討を行っている。当初計画とはやや異なるアプローチであるが、本年度は大規模言語モデル (LLM) による生成物の「創発性」に着目し、生産性の向上に加えて、より複雑で革新的な問題に対する解決策が生み出される可能性がある LLM を援用したコーディングについて可能性調査を行った。

本研究では、①②のサブテーマで利用している Kriging 法に基づく進化計算である EGO 法（ここでは Surrogate model Assisted EA (SA-EA) と呼ぶ）を対象に、GPT-4 と協業しながら既存コードのリファクタリングと制約処理に関して創発的アイデアを獲得・検証した。

数値計算のためのコーディングでは、計算手順を段階的に説明する思考連鎖 (chain-of-thought: CoT) に基づくプロンプトが必要である。その中で、計算を行うための各種条件を指定する "Directional Stimulus Prompting" は、ユーザーが自然と与えていくものになるが、そのためには作成したいコードの機能要求を明らかにしておく必要がある。さらに、すでにユーザー側でコードスニペットがある場合は、"Template Based Generation" といったプロンプトを意識するとよいと思われる。コーディング用のプロンプトは実装する機能の詳細を含む必要があり、特定のアルゴリズムの実装を求める場合、そのアルゴリズムの概念的な説明だけでなく、入出力形式、性能要件・目標、それに関わる周辺関数・サブルーチンへの対応などの詳細を含めることが、有効性を高めるための戦略であると

言える。さらに、反復試行を通じてプロンプトを微調整することも必須である。この過程では "Question Refinement Pattern" が用いられることになるが、特定のキーワードや表現が AI の応答にどのように影響するかを理解することが必要である。

本検討では、SA-EA の実装を進めるにあたり、既存コードの仕様を整理し、GPT-4 に与える機能要求を整えた。コンセプト実証と同時に本課題研究にも活用できるコードとするために、既存の機械学習ライブラリや既存コードそのものは与えないこととした。

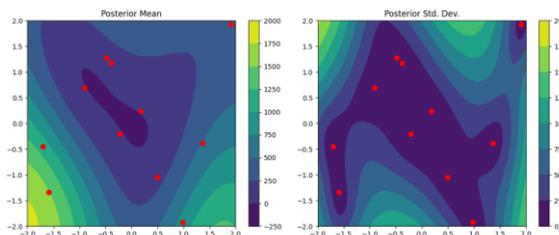
本検討でのコードのリファクタリングは従来コードの手法をベースに実施し、結果の可視化の機能も追加した。また、新手法検討においては、制約付き問題に対する獲得関数の改善、特に制約満足確率の諸問題解決に焦点を当てた。実際の GPT との協業手順や与えた情報等については文献 (4)-2 に記載されているので参照されたい。

このようにして GPT によって生成・リファクタリングを行ったコードについて、Rosenbrock 関数の最小化問題を解いた結果を示し、本コンセプトの有効性を評価した。本問題では、初期サンプルを Latin hypercube sampling で 10 点求め、10 回追加サンプリングを行う。初期サンプリングの依存性を平均化して評価するため、この試行を 10 回行う。評価においては、関数  $f_{ros}$  の最小値の各施行で得られた平均  $\bar{f}_{min}$  と標準偏差  $\bar{f}_{std}$  を用いる。この関数  $f_{ros}$  は最小値が 0、最大値は 103 オーダーをとる。別名 banana function と呼ばれ、 $(x_1, x_2)$  面内に曲線状に値が小さい領域がある。テスト関数として解く最適化アルゴリズムが有用であると言えるには、少なくともこの曲線上の領域を抑えられることが最低条件となる。さらに、この関数値が小さい領域内で真に最小値 0 をとる点は  $(x_1, x_2) = (1.0, 1.0)$  となることから、この点と追加サンプリングで得られたサンプル点の距離の

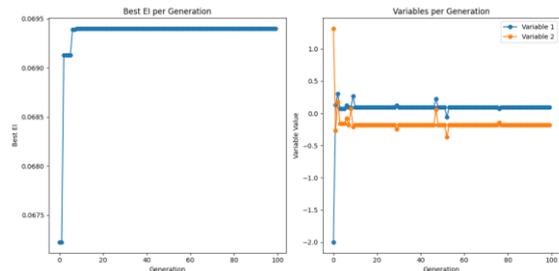
最小値  $d$  を用いた評価も行った。

制約条件がない問題として解いたところ、 $\bar{f}_{min}$  は 0.39,  $\bar{f}_{std}$  は 0.39 となった。 $f_{ros}$  が取りうる範囲から、探索はどの試行でもうまくいっているものと思われる。 $\bar{f}_{std}$  が大きめなのは、真の最小値を探索できた試行とそうでない試行があるためと考えられる。 $d$  の試行間平均  $dmin_{mean}$  は 0.33, 試行中で得られた最近点  $dmin_{min}$  は 0.126 となった。探索された真の解への最近点が仮に (0.9, 0.9) とすると距離は約 0.14, (0.7, 0.7) であれば約 0.42 であることを考えると、近いところを抑えてはいる。ただし、 $f_{ros}$  の最小点は関数値が小さな帯状の領域中のさらに限られた領域で勾配があり、最小点に向かう性質があり、進化計算や勾配ベースの方法でも相応のイタレーション数を必要とされることを考えると、現状の EI 値定義では、ある程度の限界があるものと考えられる。なお、ここで探索状況に関して可視化の機能を備える関数を実装している。実用上、工夫すべき点もあるが、例えば図 2 のような可視化ができる。

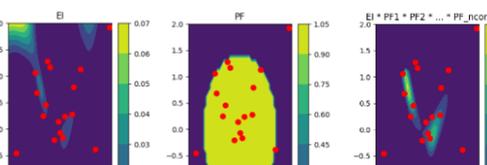
また、制約条件付き問題についても同様にテストし、本手法で提案されたいくつかの制約満足確率による制約違反解の探索についても、既存の手法と同等またはそれを超える性能を持つことが確認された (図 8)。



(a) 初期サンプルに対する事後分布



(b) EI 最大化の履歴



(c) EI, P,  $EI_{const}$  の可視化

図 8 一制約問題のサンプルを用いた可視化実装例

## 6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

本年度は、昨年度に引き続き制約条件付き多目的問題に対する最適設計手法および高い自由度の物体形状定義法と、その効率的な解探索手法の双方を統合し、流体制御デバイスの統合最適化問題に対して適用することを目指して、3つのサブテーマについて研究計画を立て研究を推進した。①制約条件付き多目的問題に対する最適設計手法の検討と実問題を用いた性能調査については、実問題への適用を実現するとともに、EGO への応用の準備が整った。制約違反解の活用方法については、引き続き実問題を用いて改良を行っていく。②最適設計における高い自由度の物体形状定義法と、その効率的な解探索手法の提案については、多変数の設計探索に向けて計算機利用手法や周辺のワークフローを整備した。整備と手法検討に注力した結果

主たる目標とする設計問題には未着手であり、計算機活用およびアウトプットについては計画通りの進捗が行えなかった。新しい設計変数縮約法については新しいサブテーマを立てて検討するべきかもしれない。③深層学習による数値流体力学の収束性向上に関する研究については、当初計画とは異なるアプローチでツールの開発に機械学習を活用する萌芽的な研究を行った。その成果として、研究に用いるツールの改善がなされたことは一つの成果である。上記したサブテーマについての研究を並行する必要はあるが、ここまで当初目標の統合最適設計の基盤は整ったと判断しており、今後、大規模な設計探索問題に着手することが可能になっていると考えている。

ーチによる最適化コード開発～Surrogate model assisted EA と制約付き問題の解法検討事例,” 進化計算シンポジウム 2023, P2-13, 2023.

- (5) 公開したライブラリなど
- (6) その他（特許，プレスリリース，著書等）

## 7. 研究業績

- (1) 学術論文（査読あり）
- (2) 国際会議プロシーディングス（査読あり）
- (3) 国際会議発表（査読なし）
  - 1. Kanazaki, M., and Imamura, T., "Cartesian Mesh based Computational Fluid Dynamics Applied to Zero-Thickness Corrugated Airfoil Optimization," 22nd Computational Fluids Conference, Cannes, France, April 2023.
  - 2. Kanazaki, M., and Toyoda, T., "Improved Solution Search Performance of Constrained MOEA/D Hybridizing Directional Mating and Local Mating," 2023 7th International Conference on Intelligent Systems, Metaheuristics & Swarm Intelligence (ISMSI 2023), April 2023.
- (4) 国内会議発表（査読なし）
  - 1. 西村大生, 二次元ブラフボディ前方に設置する空気抵抗低減デバイスの設計探索, 航空宇宙流体科学サマースクール 2023, 2023 年 9 月
  - 2. 金崎雅博, "GPT4 を用いた創発的アプロ