

jh240045

## 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

本研究では、流体制御デバイスと物体形状の統合最適設計を対象に、制約付き多目的最適化手法および高自由度形状に対する設計変数縮約手法の開発と評価を行った。特に、直接交配と局所交配を組み合わせたハイブリッド戦略による新たな制約処理法（CMOEA/D-HX-DMA）について、数学問題および空力応用におけるロバストな性能を確認した。また、低速ブラフボディに対する 2 次元フェアリングの EGO 最適設計では、抗力係数の大幅な低減を達成し、設計自動化の有効性を実証した。一方、商用車を想定した三次元形状への適用については、設計フロー構築と初期検討までを進めるにとどまり、大規模リソースを活用した最適設計には至らなかった。本年度は人的リソースの制約やスケジュール調整の難航もあり、当初想定した進捗には達しなかったが、今後の設計探索の本格展開に向けた基盤構築は達成できたと考える。

### 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) 参加研究者一覧と役割分担

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  
高木大成（東京都立大学）：空力計算  
中川巧（鳥取大学）：最適化計算  
友川健吾（鳥取大学） 空力計算  
大戎優樹（鳥取大学） 空力解析  
井藤壮梧（鳥取大学） 最適化計算  
長川稜希（東京都立大学） 最適化  
中村太一（東京都立大学） 最適化

### 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 2023 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加した共同研究 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。2022-23 年度研究 (jh220061/jh230063) 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

### 5.1 二次元プラフボディに対する統合最適設計に対する最適設計手法の検討

本研究では、制約付き多目的最適化問題において解の多様性とロバスト性を両立させることを目的とし、CMOEA/D (Constrained Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition) に対する新たなハイブリッド戦略の導入を行った。具体的には、従来の直接交配法 (Direct Mating: DM) の限界であった後期世代における多様性喪失を克服するため、局所交配法 (Local Mating: LM) との統合手法 CMOEA/D-HX-DMA を提案した。

本手法では、探索段階に応じて親個体の選択方式を切り替える枠組みを導入し、DM にはシミュレートッドバイナリ交叉 (SBX)、LM には差分進化 (DE) を適用することで、収束性と探索性のバランスを高めている (図 1)。これにより、初期集団依存性の低減および最終世代での高品質な非支配解獲得が可能となった。

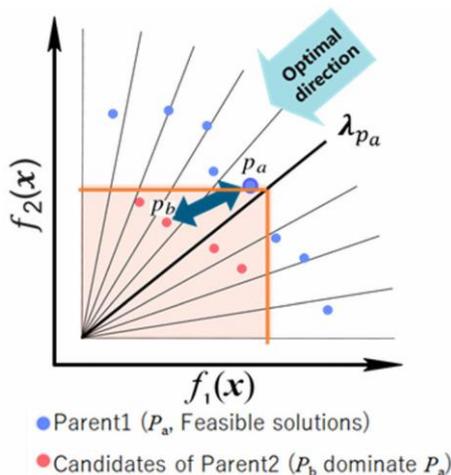


図 1 : CMOEA/D-HX-DMA における交配戦略の概念図 [Kanazaki & Toyoda, 2025]

本手法を用いて、3 つの数学的ベンチマーク問

題 (OSY, TNK, mCDTLZ) および 2 つの実問題 (梁溶接問題、ハイブリッドロケットエンジン設計) に対する性能評価を実施した。40 試行にわたる計算結果に基づき、平均ハイパーボリューム (Hypervolume)、IGD (Inverted Generational Distance)、およびそれらの標準偏差を指標として比較を行った。

その結果、提案手法はすべての問題において既存の CMOEA/D や CMOEA/D-DMA よりも優れた性能を示し、特に CMOEA/D-HX-DMA では、ハイパーボリュームの平均値が有意に高く、標準偏差も小さいことから、初期集団依存性の低減効果も確認された (図 2, 図 3)。

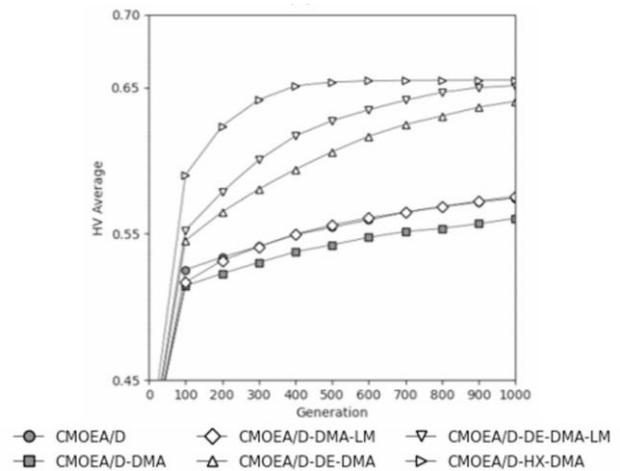


図 2 : ハイパーボリュームの平均値の推移 : mCDTLZ 問題に対する 40 試行の結果

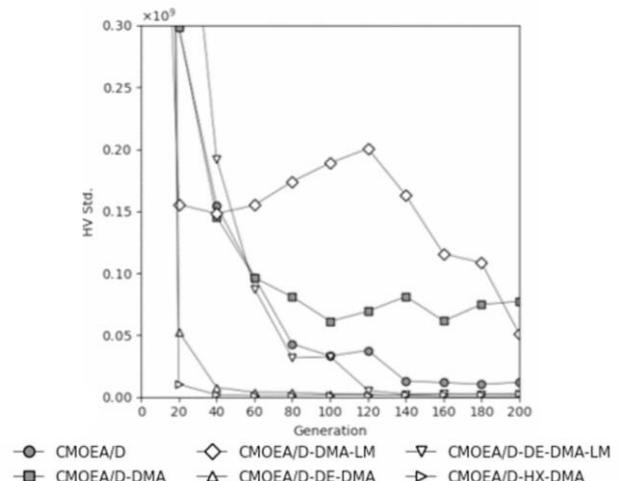


図 3 : IGD の平均値と標準偏差 : Hybrid Rocket Engine Design 問題 (いずれも [Kanazaki & Toyoda, 2025] より)

また、ハイブリッドロケットエンジンの設計問題では、設計変数が燃料長さ・流量・燃焼時間等を含む 6 変数の多分野連成最適化問題を対象とし、最大到達高度と初期全質量の最小化を目的とした。提案手法は、限られた試行数でも有意な最適解分布を得ることに成功し、提案した手法の制約付き多目的最適化問題への高い適用性と探索効率を示した。

## 5.2 二次元ブラフボディに対する統合最適設計と自動化

本研究では、物体形状と付加的な流体制御デバイスを統合的に設計する手法として、2 次元ブラフボディを対象とした効率的最適化ワークフローを開発・実証した。具体的には、剥離抑制を目的とした前方角部フェアリングの形状を、昨年度までの成果をもとに特徴形状を表現できるよう事前に設計変数空間の縮約を行い、NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) で定義される 3 制御点の 2 次元座標の計 6 変数により表現し、これについての最適設計を行った。形状定義と格子生成には昨年度までに開発した 2 次元の自動モデル生成手法を用いた。本手法のロバストネスとデバイスの最適化の両目的から、制御点の定義域を種々変更し、大スケールから小スケールまで種々の制約条件における設計試験を行った。

最適化アルゴリズムは、サロゲートモデルに基づく Efficient Global Optimization (EGO) を採用し、各条件ごとに LHS による初期サンプル 50 点をもとに、サンプルを Expected Improvement を指標に追加し、設計空間を探索した。その結果、いずれのスケールにおいても装着なし時の抗力係数を下回るデバイス形状が探索された。デバイス設置時は、図 4 に示す通り、最適設計により側面での大規模剥離が抑制されており、流れ場の可視化結果とも整合する。また図 5 に示す通り、単純に大スケールのフェアリングを縮小した場合に比べて、最適設計を行った場合には 0.6x 以下のどの条件においても抗力低減効果の高いデバイスが設計されていることがわかる。

本手法は形状パラメータの設計自由度を保ちつつ、少ない評価回数で有効な解を得られる点の特徴であり、将来的な三次元設計への拡張も見据えた汎用的な設計支援基盤として有用である。

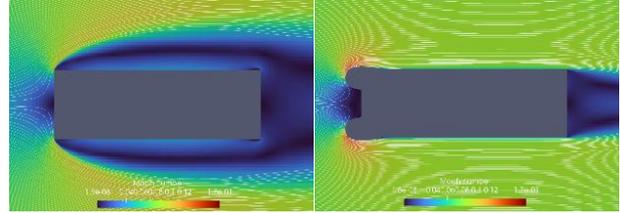


図 4：二次元ブラフボディの形状と流れ場の比較 (左：原形状、右：最適フェアリング装着時、流線表示)

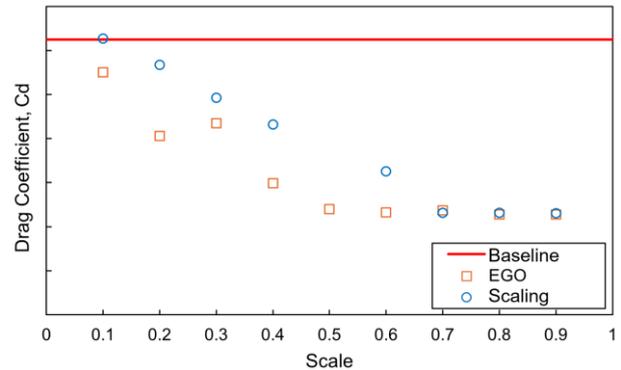


図 5：二次元ブラフボディのデバイススケールと抵抗低減効果の関係

## 5.3 三次元ブラフボディへの拡張に向けた検討

2 次元で得られた成果をもとに、三次元ブラフボディへの拡張を試みた。本年度は、商用車後端形状を模擬した簡易三次元モデルを作成し、剥離抑制を目的としたフェアリングの設計に取り組んだ。図 6 にその形状例を示す。なお当初は、2 次元と同様に自動メッシュ生成・評価を伴う完全自動化を目指したが、フェアリング形状の複雑化に伴い、既存ツールでは安定したメッシュ作成が困難であることが判明した。これに対応すべく、商用ソフト (Pointwise) による手動介入を併用しつつ、形状出力と流れ場評価を段階的に実施した。

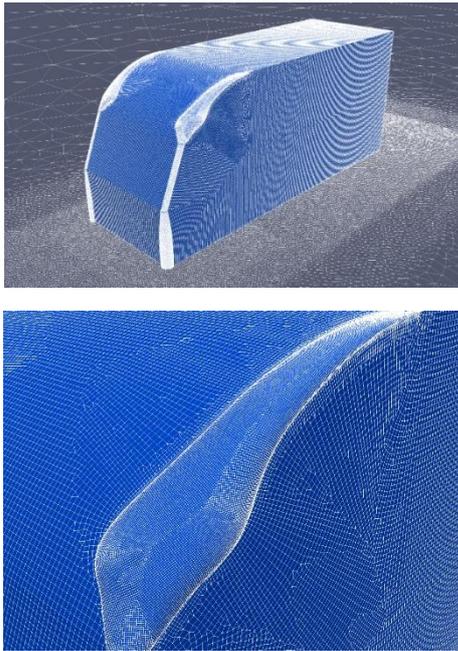


図 6：三次元ブラフボディの表面格子  
(上：全体、下：フェアリング部拡大)

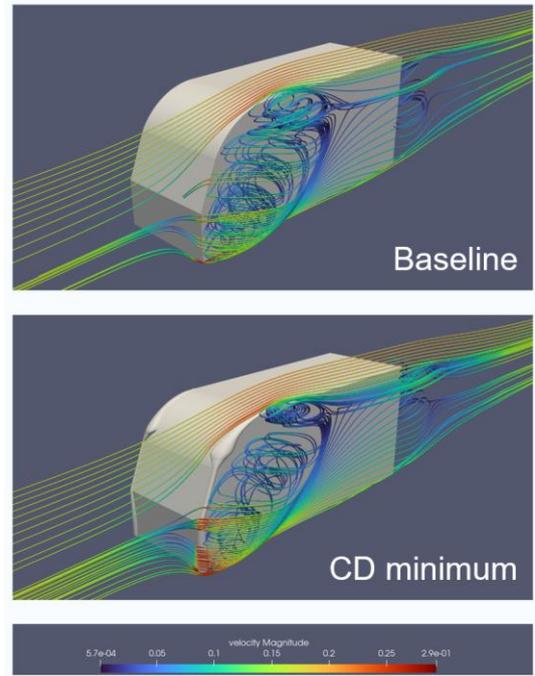


図 8：三次元フェアリングつきブラフボディ周りの流れ  
(上：Baseline、下：Cd 最小形状)

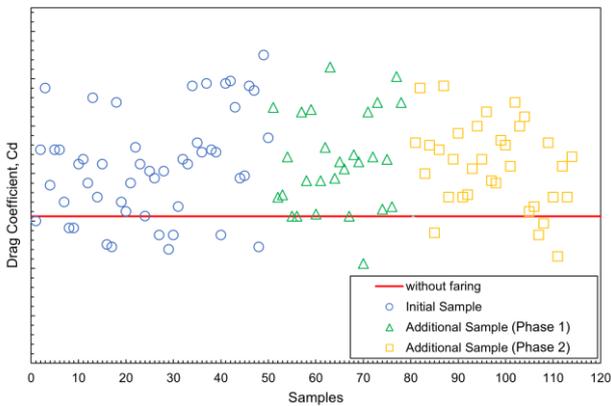


図 7：三次元フェアリングの最適化履歴

設計空間は、流体計算コストとのバランスを考慮して限定的に定義され、EGO に基づく段階的設計探査を試行した。図 7 は、最適化の過程で得られた抗力係数 (Cd) の履歴を示しており、初期サンプルに加えて 2 段階の追加サンプルを取得している。フェアリング装着により明確な Cd 低減が一部サンプルで確認されているものの、最適化としての収束には至っていない。

図 8 には、フェアリング装着の有無による三次元流れ場の比較を示す。Baseline 形状では後流における剥離領域が大きく、流れの回り込みが強い。これに対し、CD 最小となる形状では後流の整流化が進み、渦のスケールと強さの抑制が確認される。

また、プラズマアクチュエータ (PA) の設置位置についても、対象形状への概念的適用を検討したが、本年度は流体解析・適用効果の定量評価には至っていない。現時点では、モデル構築および評価システムの整備を主眼に置き、今後の本格的な最適化実行に向けた基盤形成を優先した段階である。

#### 5.4 大規模計算資源の活用状況と進捗の課題

本課題では、北海道大学・名古屋大学・京都大学の拠点リソースを計算資源として申請・確保していたが、今年度は大規模計算資源の本格的な活用には至らなかった。主な要因としては、以下が挙げられる：

- 三次元形状モデルの構築・評価に予想以上の時間と工数を要し、本格的な最適設計計算に至らなかったこと
- 実施体制の調整遅れや人的資源の制約により、

計画通りの並列化・実装が進まなかったこと  
特に後者については、研究代表者のマネジメント不足により研究計画に遅れが生じた。しかしながら、探索ワークフローの構築やツール群の整備は着実に進展しており、今後に向けた実問題での設計探査やスパコン利用に円滑に移行できる環境整備は行うことができた。

## 6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

本研究課題では、複雑な設計空間と制約条件を含む流体制御デバイス・物体形状の統合最適設計を対象に、手法開発・適用検討の両面から取り組んだ。以下に自己評価と今後の方針を記す。

### 6.1 自己評価

- **最適化手法の高度化**：ハイブリッド戦略を用いた CMOEA/D-HX-DMA の開発・検証により、CMOP に対する性能改善が達成され、査読論文として公表するに至った点は、当初計画に対して十分な成果と評価できる。
- **2次元問題への実装と成果取得**：EGO を活用した設計探査によって明確な抗力低減効果を得ることができ、実問題に対して自動設計のワークフローが確立した点は、応用展開に向け着実な成果を得られた。
- **3次元問題への展開準備**：形状モデル構築・評価環境の整備は進展したものの、最適化や PA 評価といった主要タスクには至らず、計画に対する進捗は限定的であった。
- **リソース活用とマネジメント面**：人的体制と進捗管理の不十分さにより、スパコン資源の有効活用が叶わなかった点は反省点として明確であり、今後の計画・実施体制の再設計が必要である。

### 6.2 今後の展望

- **三次元設計への本格展開**：今後は、今年度構築した 3D モデルと設計フローをベースに、制約付き設計問題としての実行および最適解の取得を目指す。
- **PA との統合設計**：物体形状と能動制御 (PA) を同時に最適化する枠組みの構築を進め、設

置位置・強度といった変数を含めた総合的な設計評価を行う。

- **高性能計算資源の実運用**：対象形状の複雑性や大規模性を活かす形で、拠点の提供するスパコン資源を用いた実行試験・性能評価を展開したい。
- **協働体制の再構築**：進捗停滞の反省を踏まえ、計画立案時点から実装・実行・可視化までのプロセスを明確化し、責任分担と進捗管理の強化を図る。
- **成果の発表と展開**：これまでに得られた成果の、特に最適設計に関する研究の発表や社会への公表が不十分であるため、成果の論文としての発表を図る。