

jh210053-NAH

## 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

旧来の設計論からは得られない、分散流体制御デバイスの存在を前提とした高性能な空力形状の実現を目指し、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ている。本課題では、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とともに、これを用いた流体制御デバイスの空力制御効果向上を目的とし研究を行った。研究は制約付き問題への対応、解探索の高効率化および流体情報を利用した設計手法の調査について行われ、これらの知見を用いて上記の統合最適設計を行い研究により得られた手法の評価を行った。今年度は多変数問題の解探索法において、解空間の特徴を維持した変数サブセットを抽出し、少変数で問題を表現する手法が提案され、これにより表面の自由変形と任意の流体制御デバイスの統合最適化が可能となった。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同研究を実施した拠点名

北海道大学

#### (2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

#### (3) 参加研究者の役割分担

松野隆（鳥取大学）統括・応用手法検討

金崎雅博（東京都立大学）最適化手法

棟朝雅晴（北海道大学）情報システム

村上桂一（JAXA）：空力計算法

林謙司（JAXA）：空力計算法

福嶋祐貴（鳥取大学）：空力制御解析

岡田慎太郎（鳥取大学）：最適化計算

南角卓弥（鳥取大学）：最適化計算

山田祐輔（東京都立大学）流体情報分析

小林大介（東京都立大学）体積力モデル

できるという、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でも同様であるが、産業的実用化に向けては適用手法・設計手法が未開拓な点が課題となっている。申請者らは、この課題に対して、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っている。

これまでの研究により、研究基盤構築と最適設計手法を確立し、統合最適化アプローチの有効性を可能性実証のレベルで示すことができた。しかし同時に、安定かつ高効率な設計のためにはいくつかの課題があることがわかった。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あり、これは設計問題に制約が存在する場合、および設計変数が多次元でかつ独立性でない場合に問題となる。また、低次元の流体場情報を設計に活用することで解探索・評価の効率が上がる可能性が見いだされた。既存の最適設計手法では設計過程に得られた情報のほとんどを捨て去っている点の非効率さが指摘されて

### 2. 研究の目的と意義

プラズマアクチュエータ (PA) は、誘電体バリア放電で生成されたプラズマの移動によって平滑な物体表面から壁面噴流が生成

いる。

今年度は、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とともに、これを用いた空力制御効果向上を目的とし研究を行った。本申請課題の基礎研究・基盤的研究としての意義は、超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・実証そのものにあり、これにより、幅広い分野に存在する同種の設計問題への貢献が可能であると考えている。また、工学的観点からは、流体が関わるものづくりにおいて、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向上に資する手法となりうると期待している。

### 3. 当拠点公募型研究として実施した意義

本研究の先行研究は、これまで 2016 年度から 2020 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いただき、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。本研究はこれらを基盤として実施するため、公募型共同研究により提供される計算資源が必要不可欠であった。特に、小・中規模 (<500 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の双方を効率よく実施することは貴拠点の資源および知見なくしては不可能であった。

### 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

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、(1) 分散型プラズマアクチュエータの特性解析, (2) 最適化・設計手法の汎用化および高度化, (3) 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。分散型プラズマアクチ

ュエータの特性解析については、LES (Large Eddy Simulation) により、壁面近傍の流体場を解像しつつ、最適化に十分な速度での計算が可能か評価した。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および改善期待量を示す指標を多次元化 (EHVI) し、ベンチマーク関数での有効性実証と、実問題への適用・評価を行った。直接 GA 法についても解探索手法として検討し、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・ベンチマークを行った。またニューラルネットや流れのトポロジーの文字列化による分析法の検討を行い、設計時に流体場情報を利用する手法を検討した。

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 の駆動条件をパラメータとして空力最適化を行い、本手法のフィージビリティを調査した。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 (NURBS) を導入し、多数の (10-100 点) コントロールポイントを用いた最適設計を試行し、設計効率と最適化性能に関する問題点を抽出した。

### 5. 今年度の研究成果の詳細

本研究は以下に示す①-④の基盤的要素について研究開発を行った。

#### ① 高効率大域的最適設計における制約処理に関する検討

本年度は、Kriging 法に基づく解探索法、Efficient Global Optimization (EGO) の制約条件処理法の開発を引き続き実施した。既存の制約満足確率を与える手法を整理しつつコーディングが終了し、次に数学ベンチマーク問題を解き、各手法のメリット・デメリットを明らかにしている。本手法では、Kriging 法に

よる近似関数で最良と予測される値の探索ではなく、近似関数最良値の「改善期待値 (Expected Hypervolume Improvement (EHVI))」を最大化することで最適化を進める。制約条件がある問題においては、同じく近似関数の推定に基づき、制約満足確率関数を仮定し、それを改善期待値に乗じた式の最大化を行う。この制約満足確率は解の取得に影響を与える。本研究では図 1 に示す Schonlau らによって提案されたベイズ最適化における制約条件処理の代表的手法である Possibility of Feasible, Bagehri らにより提案された手法, Tutum らにより提案された手法, これら 3 つを選び、制約満足確率関数として実装した。

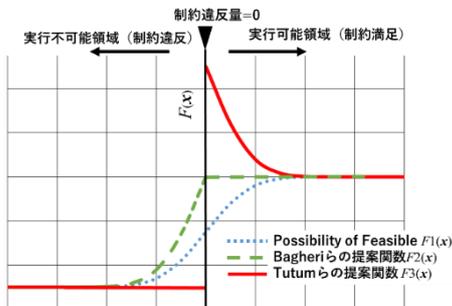


図 1 制約条件の近似関数から定義する「制約満足確率」の例

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

本年度はノンパラメトリックな形状定義手法の設計変数に対して、最適化ループ中に設計変数の感度を評価し、設計が進むにつれ重要な変数のみが残るように設計空間を縮退させる手法を開発・評価した。

まず、応用対象である流体制御デバイスの空力制御効果統合最適化における変数感度の予備調査を行った。NURBS 曲線による形状定義を用い、形状の設計変数を種々変更し、空気抵抗最小化・物体内包面積の最大化の多目的最適化問題における効率及び探索性能を調べた結果、探索範囲が制御点数に強く依存する一方、設計変数の増加に伴い解探索効

率が落ち、パレート面上の解分布が悪化することが確認された。

このように、設計変数が多次元かつ独立性が低い場合には計算コストが増大し解探索効率が低下する。この問題は一般に「次元の呪い」と呼ばれる。これを回避するためには、問題の特徴を記述するパラメータを選び、その組み合わせによる設計を行うことで設計空間の縮約を行う必要がある。本研究では、目的関数に対する設計変数の寄与度を解析する ANOVA と、赤池情報量基準 (AIC) による設計変数セットのデータ適合度評価を応用した設計空間の縮約手法を提案し、最適設計問題を用いて性能を検証した。

提案した設計空間縮約法では、実験計画法にて入力に対する応答を得て、そのサンプル群から ANOVA により目的関数に対する設計変数の寄与度を解析する。累積寄与率が高い設計変数の組み合わせ (変数サブセット) を複数抽出し、これらの変数サブセットについて、抽出した変数のみを用いた Kriging 法による“近似”応答曲面を計算する。そして、変数サブセットの近似応答曲面について AIC を計算し、母データに対する適合度を評価する。このうち AIC が最も小さい変数サブセットを、設計問題を表現する最良モデルと考えて最適設計に用いる。図 2 に設計空間縮約法のフローチャートを示す。

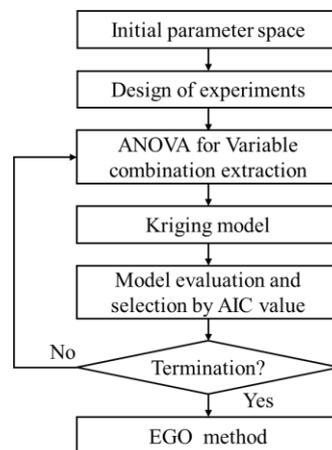


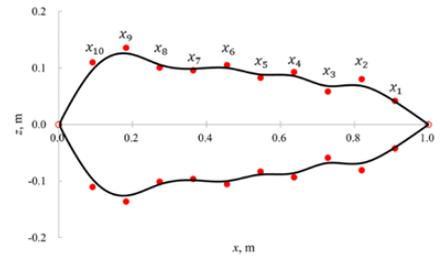
図 2 変数選択とモデル評価による設計空間縮約方法の概要

本手法を用いて、ベンチマーク関数について設計空間の縮約を行った結果、ANOVAにより意図通り寄与率の高い変数が抽出できること、また寄与度が極端に小さい変数数を多く含むとAICが大きくなることを示した。

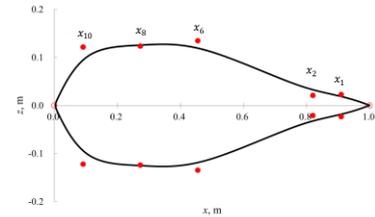
次に、NURBS 曲線による形状定義を用いた多パラメータの抗力最小化・内包面積最大化の多目的最適化問題に本手法を適用した。流体計算にはJAXAが開発したFaSTARを使用した。支配方程式は定常3次元圧縮性RANSで、乱流モデルにはSA-noft2-Rを用いた。計算条件は一様流マッハ数0.2、レイノルズ数 $4.5 \times 10^6$ （全長基準）であり、計算格子は約10万点である。

図3(a)に例を示す10変数により形状を定義する初期問題に対し、設計空間を縮約した結果、5変数によって累積寄与率0.90となる変数サブセットが選択された。この時選択された変数は物体の前縁部と後縁部に集中しており、空力的に感度が高いことが知られている点が適切に選択されている（図3(b)）。

選択された変数サブセットの形状を対象に、EGO法を用いて合計150点の計算を行い、オリジナルの設計問題の結果と比較した結果を示す。図4はそれぞれの場合の追加サンプルによるHypervolumeの増加履歴を示している。Hypervolumeはパレート最適解のカバー率を表している。設計空間縮約により得られた5変数のセットが赤線、オリジナルの10変数の場合の結果が青線で示されている。図よりパラメータ数の違いにより探索効率に明確な差が出ていることが分かる。5変数の場合には少試行数でもパレート解探索が効率的に行われており、また最終的な最適解のカバレッジも高いことが分かった。



(a) オリジナル, 10 変数



(b) 縮約法により削減後, 5 変数

図3 設計空間縮約による変数サブセットと表現される物体形状の例

次に、形状定義に加えて、流体制御デバイスの設計を含めた統合最適設計に本手法を適用した。なお流体制御デバイスの誘起流れは、デバイス設置位置に体積力を導入することで模擬し、この設置位置と体積力の大きさを設計変数とした。

ここでは、形状定義に関する5変数と流体制御デバイス(PA)に関する2変数の計7変数で統合最適化を行った結果を示す。LHS法により設計空間全体に分布された初期サンプルを50点用意し、EGO法を用いて追加サンプルを120点取得した。図5に最適化結果の散布図を示す。この図には、同最適化で取得した形状において体積力を導入しない場合の計算結果(青プロット)も載せている。最適方向は図の左上向きである。トレードオフの関係にある2目的に対して解探索ができていることがわかる。また、流体制御デバイスの存在を前提とした形状であるため、体積力を導入しない場合にはほとんどのケースで解が悪化しており、意図した設計がなされていることが分かる。

ここで図中 Sample A のマッハ数分布を図

6 に示す。Sample A は、体積力導入によって抵抗係数が最も改善された解であり、同形状でもデバイスなしでは剥離位置が有意に前方に存在することがわかる。また、デバイス位置は一般に選択される前縁部分や剥離点ではなく、圧力勾配が負になる位置が選ばれており興味深い。

一方、非劣解のなかには、体積力の導入により抵抗係数が悪化したケースもあった。図 5 の Sample B がその一例であり、同サンプルのマッハ数分布を図 7 に示す。Sample B では体積力導入が無い場合でも流れの剥離が生じていないことがわかる。このような場合には体積力は不要、あるいは微小で良いことは容易に理解できる。実際には抵抗係数悪化量は極めて少なく、エネルギー効率の面では問題があるが、これは今回の設計問題の目的関数に含まれていないため、解探索および統合最適設計自体の問題を示すものではない。

なお本研究では、上記の通り、小規模な計算を 1000 ジョブ等のオーダで実行する必要があった。スパコンで想定される計算規模に比べ小さいジョブを多数実行する際には、ジョブ同時実行制限数等に制約があり、当初は効率的な計算が難しかった。これについて、北海道大学の HPC システム運用担当者様よりアドバイスをいただいた結果、大規模計算用のリソースグループでのバックフィル機能を活用することによって効率的に実行することができた。

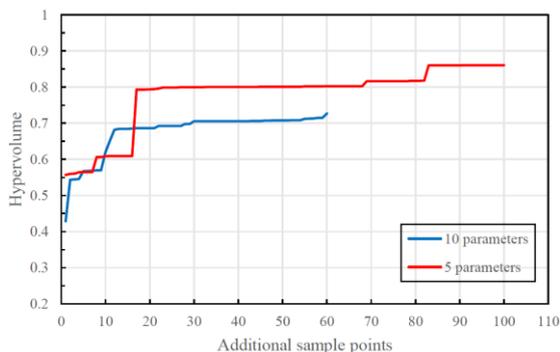


図 4 変数削減による EGO 法追加サンプルに関する Hypervolume の履歴

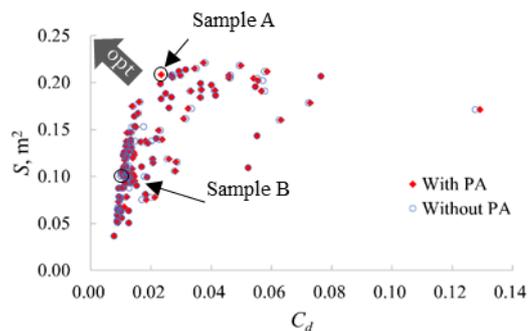


図 5 最適化計算により得た解の散布図

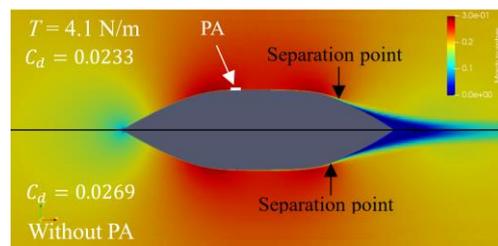


図 6 非劣解 Sample A のマッハ数分布

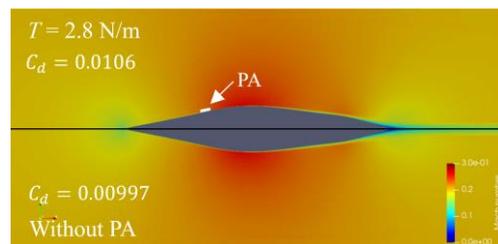


図 7 非劣解 Sample B のマッハ数分布

### ③ 設計過程の流体場情報を用いた解評価手法の検討

流れのトポロジー分析情報を最適設計の個体評価に用い、多目的問題における非劣解のクラスタリングと流れの特徴抽出に利用できるか調査を行った。本年度は特徴抽出方法の提案には至らなかったが、多数の流体制御デバイスを適用した流れ場の解評価のサンプルとなる高精度流体解析の予備計算を実施した。対象となる流体問題には、流体制御デバイスの位置により効果が大きく変化する対象として後退翼の境界層遷移制御を選択した。②と同じく数値解析ソルバには FaSTAR を用い、図 8 に示す RANS 計算では半裁模型に対して 2700 万点、図 9 に示す LES 計算では翼幅 10% の無限後退翼モデルに対

して 6400 万点のグリッドを用いた RANS 計算では、流体制御デバイスの設置位置および誘起流の方向による、境界層内の横流れ速度の変化をパラメトリックに調べた。LES 計算ではその中の一つの条件を選択し、横流れ緩和時の遷移遅延効果が予測できるかを検証した。図 9 にはベース流れと体積力ソースを付与した場合の 2 ケースにの流れ方向表面摩擦分布を示す。RANS により予測された横流れ緩和条件を用いた計算で、意図通り乱流遷移の後方への遅延が生じている。なおこれらの解析結果は風洞試験と良い一致を示した。(流体問題に依存するが) 低解像度計算による最適設計の有効性と、最適設計の個体の持つ流体情報の利用可能性が示唆されたと考えており、今後データセットを用いた流れの特性の抽出と、それを用いた非劣解のクラスタリングについて検討する。

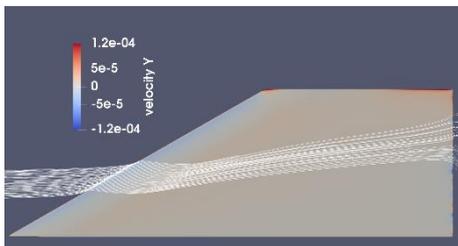


図 8 流体制御デバイス駆動時の後退翼 RANS 解析結果：境界層内流れの偏向

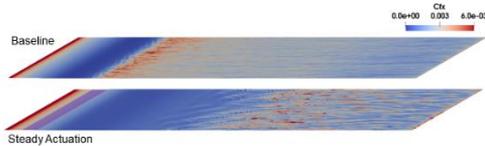


図 9 後退翼面上の表面摩擦係数分布：流体制御デバイスによる遷移遅延効果

#### ④ 深層学習による非定常数値流体力学の収束性向上に関する研究

これまでの研究の知見から、最適設計に高精度な数値流体力学を用いる際にはそのコストが本研究の目的達成に対し致命的となりうるということが明らかになってきた。一方で、

CFD に基づく結果は、物理量の種類、時空間離散化などの程度により大規模データであるので、深層学習にもとづく手法により分析・予測が可能となるものと期待できる。

そこで、本年度の研究において、CFD の初期値を深層学習で予測し、解の取得を低コスト化する手法(図 10)を検討した。具体的には、幾つかの代表サンプルとしての CFD 結果を用い、予測モデルの作成を行い、深層学習による時系列予測を行った結果を初期値とした CFD を行う。初期値が既に収束解に近づいていれば、一様流から開始する一般的な CFD に比べて解の収束性向上が期待できる。これは、機能的推論である機械学習の結果を、演繹的推論に基づく CFD で補間する手法と言い換えることができる。

構築した手法に基づき、NACA2412 翼型を対象に、具体的に CFD を実施した。学習データは同翼型の迎角を変更したものであり、高精度 CFD の既存のデータに無い迎角の空力を取得する需要を想定している。図 11 に取得した瞬時場を示す。同時刻において、流れの大域構造は取得できたものの、渦の発生など準定常現象に対して予測精度が十分ではない。今後は本着想に対して、学習器の再定義や、パラメータチューニングを通し、形状を変更した時の予測が可能となるよう研究を進める。

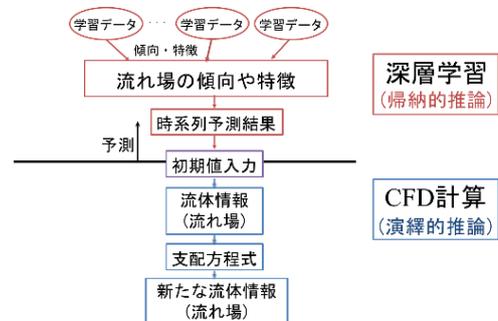


図 10 提案する CFD の流れ：「学習データ」は CFD により取得する

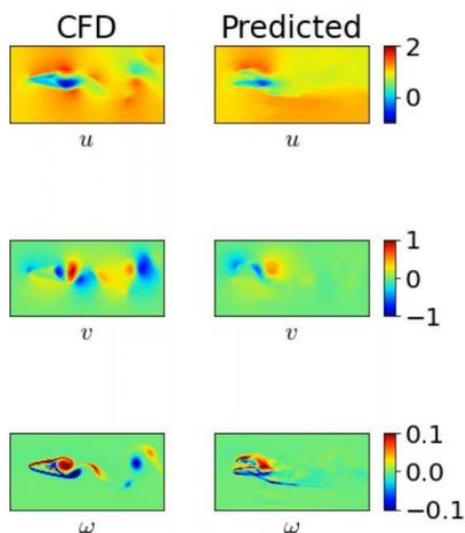


図 11 得られた瞬時場と同条件（迎角 15 度）における CFD による結果との比較

## 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

今年度の計画では、制約条件付き多目的問題に対する最適設計手法の検討に関しては、実問題における性能調査を行い、手法の有効性を検討・実証する計画であった。手法の提案と実装、評価は行ったが統合最適設計自体には適用するに至っておらず、計画に対し遅れが生じている。

物体形状の高自由度化と効率的解探索手法の提案に関しては、設計変数の感度を評価し、設計ループが進むにつれ重要な変数のみが残るように、設計空間を縮退させる手法の提案・実装・評価を計画していた。これに対して本年度は設計空間の縮約手法と実問題における評価、ならびに高効率な統合最適設計を達成しており、概ね計画通りに研究を進めることができたと考える。

設計過程の流体場情報の利用に関しては、多目的問題における非劣解のクラスタリングと流れの特徴抽出に計算された個体の流体情報が利用できるか調査し、また、非定常流れのトポロジー分析を行い、最適設計における計算手法・規模の妥当性を評価できるか検討する計画であったが、今年度は基礎データの蓄積にとどまっており、流れ場のクラス

タリングは行えていない。手法の有効性を含め、来年度に流体情報の利用手法については再検討を行う予定である。

また、深層学習による非定常数値流体力学の収束性向上に関しては、上記と関連して流体計算の規模（時間・空間解像度）の問題で得られる流体情報に制約があった。本テーマは直接申請時の計画には含まれていないが、上記の流体場情報利用と関連し、新しい空力設計手法の一つとして予備的知見を得ることができた。

## 7. 研究業績一覧

（発表予定も含む。投稿中・投稿予定は含まない）

- (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）
  - [1] Y. Yamada and M. Kanazaki, ‘Time Series Prediction of Flow Field around a Two-Dimensional Cylinder Using Auto-encoder and LSTM,’ International Conference on Optimization and Learning (OLA’2021), 2021.
  - [2] Y. Miwa, I. Yoshimi, T. Matsuno and D. Kwak, ‘Boundary-Layer Transition Control by Plasma Crossflow Reduction in Swept Wing’, Proceedings of APISAT 2021, P00369, 2021.
- (3) 国際会議発表（査読なし）
  - [3] I. Yoshimi, Y. Miwa and T. Matsuno, ‘Control of boundary-layer transition using plasma actuator with serrated electrode based on discrete roughness elements technique’, JSMME 2021, 2021.
- (4) 国内会議発表（査読なし）
  - [4] 小林大介, 古田洋大, 金崎雅博, ‘体積力モデルによる超音速前進翼の最適高揚力流れの検討’第 53 回流体力学講演会／第 39 回航空宇宙数値シミュレー

ン技術シンポジウム 2021, 2B12, 2021 年 7 月.

[5] 岡田慎太郎, 松野隆, 金崎雅博, 多自由度を有する物理形状定義手法の空力制御デバイス・形状統合最適化への適用, 日本機械学会 2021 年度年次大会, 2021 年 9 月.

[6] 福嶋祐貴, 三輪祐登, 松野隆, 後退翼境界層の横流れ抑制に関する数値解析, 第 59 回飛行機シンポジウム, 2021 年 11 月.

[7] 吉見郁哉, 三輪祐登, 福嶋裕貴, 秦力也, 松野隆, 無擾乱プラズマアクチュエータによる後退翼境界層の横流れ遷移制御, 第 54 回流体力学講演会/第 40 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2022 年 6 月.

(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)