

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06888

研究課題名(和文)主流乱れを受ける超音速機の着陸降下時における空力操舵計画に対する時系列的最適化

研究課題名(英文)Time series aerodynamic control optimization for landing approach for supersonic aircraft subjected to unexpected turbulence

研究代表者

金崎 雅博 (Kanazaki, Masahiro)

首都大学東京・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号：10392838

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：超音速旅客機の空力・飛行力学連成計算と、最適化技術との統合を行い、離着陸時の空力・推進制御の最適設計を実施した。サンプリングによる空力推定により、実用的な時間内に最適化法を適用し、解を求めることができる。本研究では、エレベータと推力による制御を入力として、超音速旅客機着陸経路のコスト関数最小化、最大加速度の最小化を進化計算を用いて解いた。また、運動計算においてマイクロバーストの評価を加えることで、予期しない突風に対する特徴の把握を行った。設計の結果、コスト関数を最小化するために機体の迎角変化がマイクロバーストを考慮しない時と比べて大きくなることなどが理解された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

計算機の進歩により、シミュレーション技術の実問題への適用が進んでいるが、現実の問題は多分野融合となる。多分野融合シミュレーションに基づく最適設計を行うためには、そのシミュレーション手法の効率化が必須である。本研究で開発した設計手法はこの問題を解決しており、航空機設計に限らず広く応用できるものと考えている。

先述の設計手法を用いて、一般には計算コストの高い空力・飛行力学連成計算を最適化法に組み入れることができる程度に効率化し、実際に超音速旅客機着陸時の最適操舵・推力制御問題を解き、外乱流の影響も考察した。また、前進翼など、多様なコンセプトに適用先を広げられ、汎用的な手法であることも同時に示した。

研究成果の概要(英文)：The coupled aerodynamics-flight dynamics simulation was integrated with optimization techniques to design the optimal aerodynamic and propulsion control for takeoff and landing for a supersonic aircraft. Due to the efficient evaluation, the flight simulation allows us to apply optimization methods and find the solution in a practical time. In this study, the cost function minimization and maximum acceleration minimization of the supersonic aircraft landing path are solved using evolutionary calculations with elevator and thrust control as inputs. In addition, the evaluation of microbursts effect was added to the flight calculations to understand the characteristics against unexpected wind gusts. As a result of the design, it is understood that the change in the angle of attack of the fuselage is larger than when the microburst is not taken into account in order to minimize the cost function.

研究分野：航空宇宙工学，最適化，進化計算，数値流体力学

キーワード：超音速旅客機 空気力学 空力 飛行力学連成計算 進化計算

1. 研究開始当初の背景

近年、小型の超音速輸送機(Supersonic Transport: SST)の再度の実現に向けた動きが内外で活発あり、国際民間航空機関(ICAO)に設置されている Supersonic Task Group (SSTG)では、旅客用 SST のためのソニックブーム規制基準などが議論されている。我が国では 2015 年 8 月宇宙航空研究開発機構(JAXA)による低ソニックブーム設計概念実証 D-SEND プロジェクトにおいて、実証機の飛行試験が成功したことをはじめとし、国際的な基準策定をリードできる多くの研究がある。米国でも SST 研究は近年活発であり、NASA によって SST に関する性能指標 $N+1 \sim N+3$ が順次示され、それらを指針としてベンチャー企業を含む航空機メーカーや大学などが研究に取り組んでいる。こうした国内外での取り組みの多くは、超音速飛行時における燃費低減とソニックブーム緩和を対象としている。一方、離着陸の空力性能・環境性能・安全性などの検討も、社会に受け入れられる SST 実現には必要な研究項目である。また、航空機が着陸時に重大な影響を受けるマイクロバーストなどの主流乱れが、複雑な流れを示す SST の低速高迎角空力と飛行の関係に関する研究は、実機データもある既存の遷音速旅客機に比べて乏しい。

SST の離着陸時の低速高迎角特性について、国内では低速飛行をする際の揚力確保に関連し、村山ら (Murayama, M., et al, AIAAJ, pp. 1305-1312, Vol.39, 2001.) によりデルタ翼における渦崩壊による揚力の変化が数値的に行われた。また、超音速翼のための高揚力デバイスとして前縁フラップ装用時の空力特性 (Rinoie, K., et al., J Aircraft, Vol. 41, No. 4, pp. 829-838, 2004.) の調査がされた。これらの検討は、機体が動かない静的な条件を主な対象としている。飛行経路上における空力特性を斟酌するために、空力-飛行力学連成の利用が考えられる。しかしながら、最適な条件を見つけるためには、評価回数を増やす必要があるが、一般に多分野融合評価は高コストであり、効率化が必要である。

2. 研究の目的

航空機の実用化と安全性に大きく関係する SST の着陸降下時操舵に関わる空力的研究は、基礎的な低速空力研究に止まっている。そこで本申請研究では、SST 降下時での時系列的空力操舵に空力-飛行力学連成計算と最適化法の適用を行い、主流乱れも考慮したリスク低減への応用を目的とした。具体的には、「高精度数値流体力学による空力データベースの効率的構築」と「空力-運動連成計算による SST 降下経路計算と時系列的評価」をもとに、研究目的である「SST 降下時における気流外乱の影響に関する知見の取得」と、「時系列的な空力操舵に対する最適化法の実運用」を達成し、新規機体の成立性検討に有用な手法とする。

3. 研究の方法

目的遂行のために、下記の内容を実施し、SST の実用化提案に役立つ手法とすることを目指した。

- (a). SST 形状の低速高迎角飛行に対する高精度 CFD による空力データベース構築
 - (b). 空力データベースに基づく空力モデル (近似関数) の構築
 - (c). 空力モデルに基づく超音速輸送機の着陸時降下経路の空力-飛行力学連成計算
 - (d). 降下経路計算と舵面の時系列的空力最適制御と主流乱れの影響性検討
- (a)と(b)については、RANS 計算に基づき行うこととし超音速機形状として、50 人乗り超音速ビジネスジェットのコンセプトモデルを用いた。(c)については、申請者らが開発した高効率空力飛行連成計算を援用することとし、(d)において、進化計算法を用いることとした。また、(d)においては、運動計算中で主流乱れに関わる評価を行った。

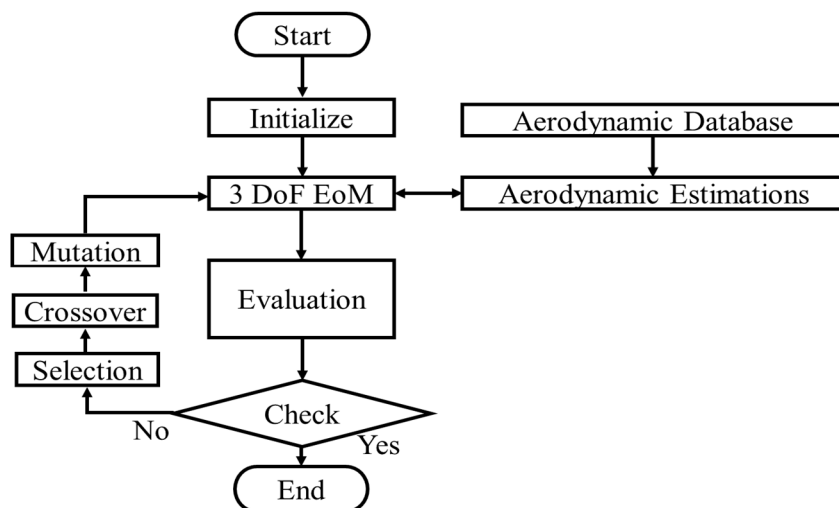
4. 研究成果

超音速旅客機の空力-飛行力学連成計算と、最適化技術との統合を行い、離着陸時の空力・推進制御の最適設計を実施した。手法の流れを第 1 図に示す

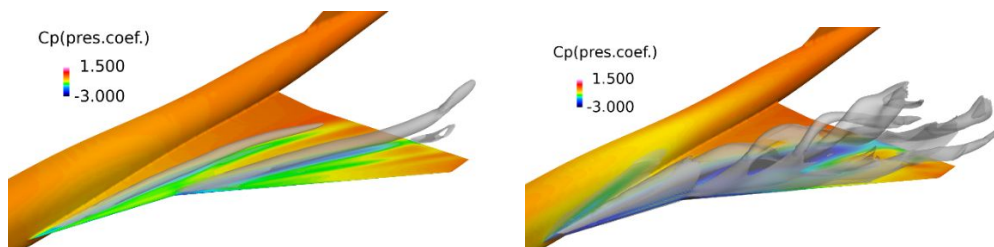
まずは、非構造格子に基づく CFD を用いて、離着陸時に考えられる空力について、迎角、マッハ数をサンプリングし、対応する空力係数を取得し、空力データベースとした。第 2 図に CFD の実施例を示す。高迎角時に見られる前縁剥離渦が観察された。

次に、大域的最適化法への適合性を高めるために、運動計算中に時間ステップごと与えられる航空機の数値、迎角に対して、CFD による空力データベースから最尤推定を行い、空力の項に反映させることとし、高速な空力-飛行力学連成計算を実施した。フラップとエレベータ舵角、推力については、運動計算で反映することとし、これらを設計変数として定義し、時系列的な評価を行う。構築した空力-飛行力学連成評価は、ひとケース 1 分程度で済むため、進化計算などの大域的最適化法を用い、実用的な期間で解を求めることができる。

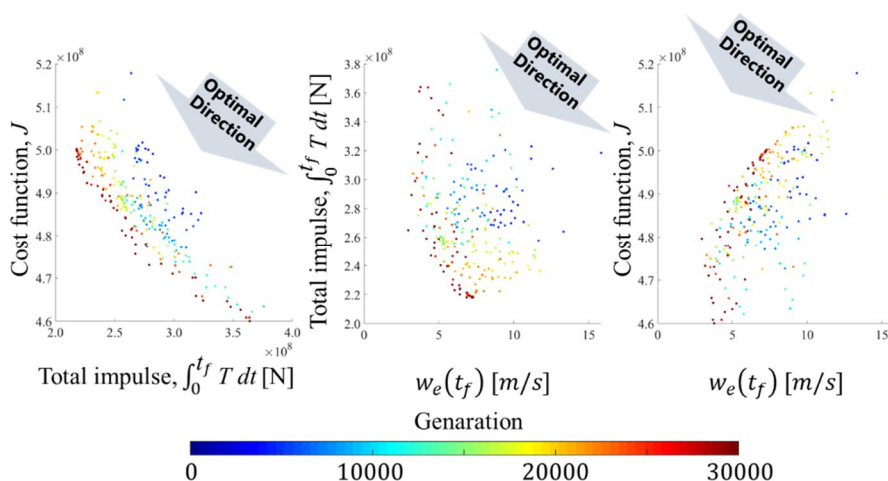
最後に、フラップ角は固定とし、1秒間を5セグメントに分け、エレベータと推力による制御を入力として、超音速旅客機着陸経路のコスト関数最小化、最大加速度の最小化を Constrained NSGA-II を用いて解いた。解は第3図に示す通り大域解として求められ、ふたつの目的関数には相反する関係があることが分かった。また、それぞれの目的関数に関して優秀な解の飛行や制御の特徴を第4図の通りに示すことができた。ここまで構築した設計システムに、運動計算においてマイクロバーストの評価を加えることで、予期しない突風に対する特徴の把握を行った。第5図に示す通り設計の結果、ふたつの目的関数間の相反関係は、マイクロバーストを考慮しない時と同程度であること、第6図に示す通りコスト関数を最小化するために機体の姿勢角変化がマイクロバーストを考慮しない時と比べて大きくなることなどが理解された。本手法は、形状や飛行条件に対して汎用化が可能であり、今後航空機概念への適用を進める。



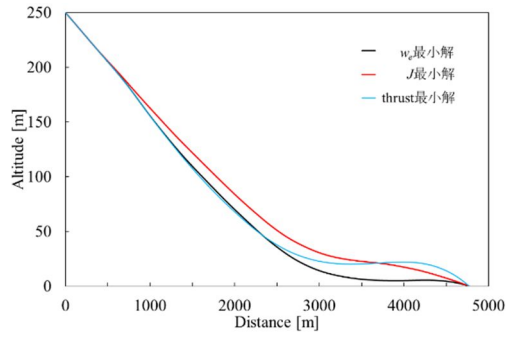
第1図構築した飛行・空力操舵最適設計手法



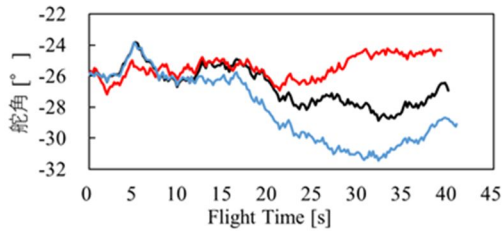
第2図 CFD で取得した超音速機周りの流れ場



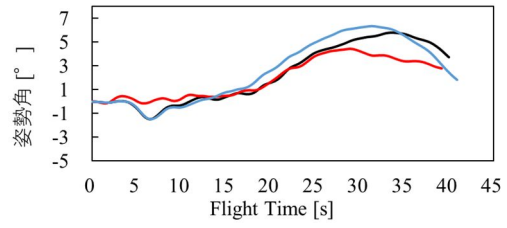
第3図 マイクロバーストを考慮しないときの多目的最適化結果



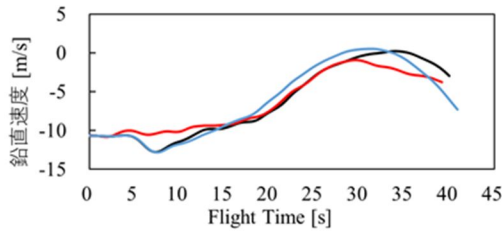
(a) 着陸飛行経路



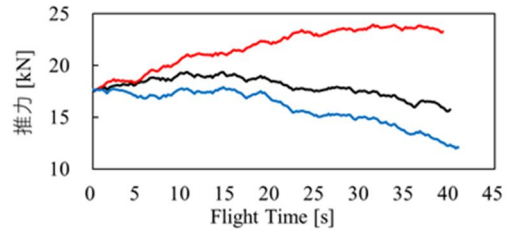
(b) エレベータ舵角



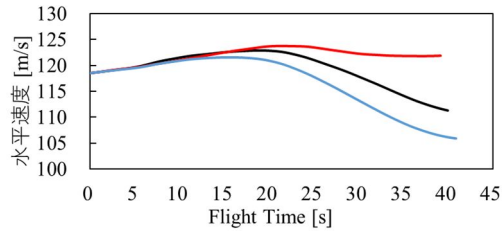
(c) 姿勢角



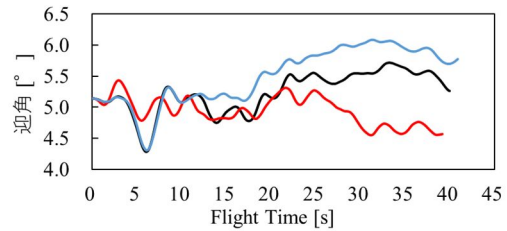
(d) 鉛直速度



(e) 推力

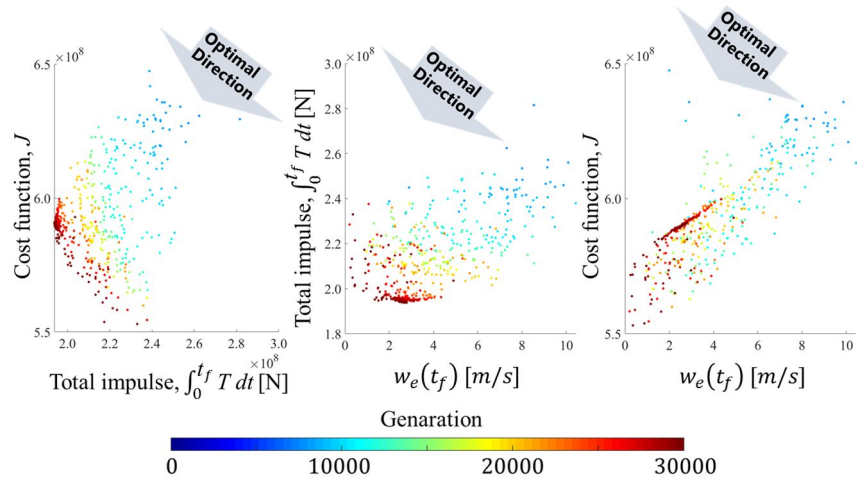


(f) 水平速度

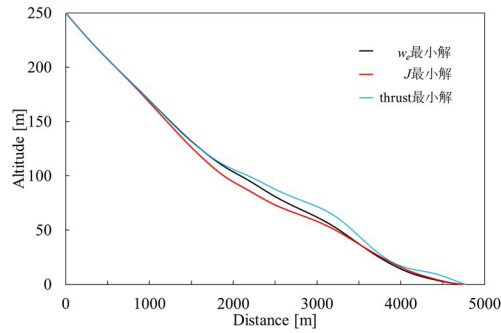


(g) 迎角

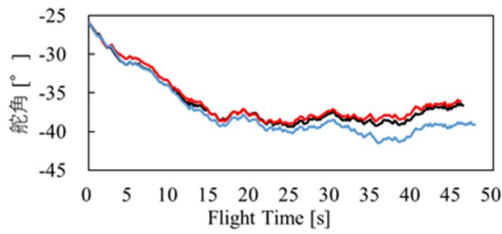
第4図 マイクロバーストを考慮しない時の各目的関数最小となる着陸飛行経路と各種飛行パラメータ時間履歴



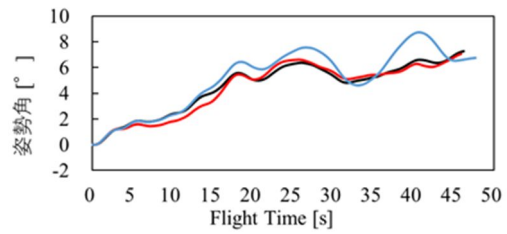
第5図 マイクロバーストを考慮したときの多目的最適化結果



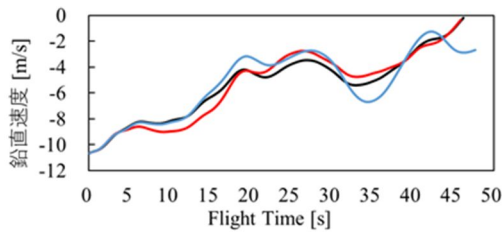
(a) 着陸飛行経路



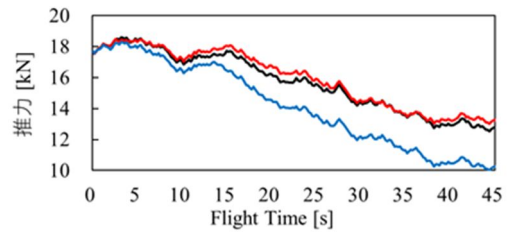
(b) エレベータ舵角



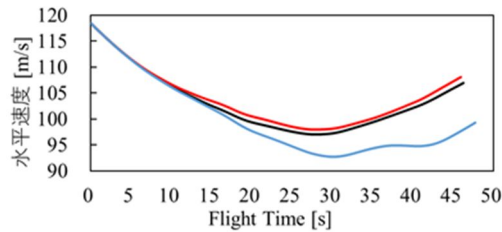
(c) 姿勢角



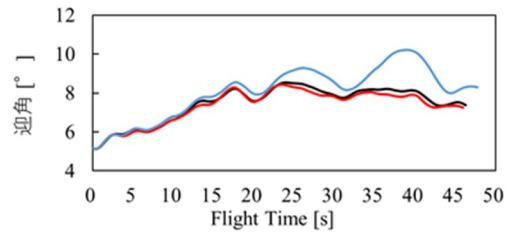
(d) 鉛直速度



(e) 推力



(f) 水平速度



(g) 迎角

第6図 マイクロバーストを考慮しないときの多目的最適化結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Othama, N., and Kanazaki	4. 巻 58
2. 論文標題 Development of Multiobjective Trajectory-Optimization Method and Its Application to Improve Aircraft Landing	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Aerospace Science & Technology	6. 最初と最後の頁 166-177
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.08.019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanazaki, M., and Saisyo, R.	4. 巻 0
2. 論文標題 Genetic Algorithm Applied to the Time-Series Landing Flight Path and Control Optimization of a Supersonic Transport	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The ACM International Conference Proceeding Series (ICPS)	6. 最初と最後の頁 19-24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3325773.3325789	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 金崎雅博，本間寛教，山田祐輔
2. 発表標題 SST着陸経路計算・最適設計のための空力 飛行力学連成計算について
3. 学会等名 第56回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kanazaki, M. and Saisho, R.
2. 発表標題 Genetic Algorithm Applied to the Time-Series Landing Flight Path and Control Optimization of a Supersonic Transport
3. 学会等名 2019 3rd International Conference on Intelligent Systems, Metaheuristics & Swarm Intelligence (ISMSI 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩藤碩哉, 金崎雅博, 藤川貴弘, 米本浩一
2. 発表標題 「有翼ロケットにおける構成要素の組み合わせに対するオービタ・ブースタ抗力推算モデルの提案」
3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Numerical Simulation of Supersonic/Hypersonic Flow for TSTO's Staging Separation
2. 発表標題 Iwafuji, H., Kanazaki, M., Fujikawa, T. and Yonemoto, K.
3. 学会等名 The 31st International Symposium on Shock Waves (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岸祐希, 北崎慎哉, 牧野好和, 金崎雅博
2. 発表標題 エンジンインテーク統合設計における超音速翼の空力干渉の影響
3. 学会等名 第30回数値流体力学シンポジウム2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Othman, N. and Kanazaki, M.
2. 発表標題 Trajectory and Aerodynamic Control Optimization of Civil Aircraft Descent Under Hazard Situations Based on High-Fidelity Aerodynamic Database
3. 学会等名 the 34th AIAA Applied Aerodynamics Conference, AIAA Aviation and Aeronautics Forum and Exposition 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kanazaki, M. and Othman, N.
2. 発表標題 Time-Series Optimization Methodology and Knowledge Discovery of Decend Trajectory for Civil Aircraft
3. 学会等名 IEEE Computational Intelligence Society (CIS), IEEE World Congress on Computational Intelligence (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Setoguchi, N, and Kanazaki, M.
2. 発表標題 Low-Speed and High Angle of Attack Aerodynamic Characteristics of Supersonic Business Jet with Forward Swept Wing
3. 学会等名 AIAA Scitech 2020 Forum, Orlando, FL (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kanazaki, M. and Saisho, R.
2. 発表標題 Genetic Algorithm Applied to the Time-Series Landing Flight Path and Control Optimization of a Supersonic Transport
3. 学会等名 2019 3rd International Conference on Intelligent Systems, Metaheuristics & Swarm Intelligence (ISMSI 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀬戸口直, 最所諒大, 金崎雅博
2. 発表標題 RANS評価に基づく空力 - 飛行連成計算による超音速旅客機の着陸飛行経路最適化
3. 学会等名 第57回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 最所諒大, 金崎雅博, 山田祐輔
2. 発表標題 RANS評価に基づく空力 - 飛行連成計算による超音速旅客機の着陸飛行経路最適化
3. 学会等名 第51回流体力学講演会 / 第37回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀬戸口直, 金崎雅博
2. 発表標題 前進翼を持つSSBJの縦方向運動に対する動的空力特性調査
3. 学会等名 第51回流体力学講演会 / 第37回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----