別　紙　２

２０１９年度北海道大学情報基盤センター萌芽型共同研究成果報告書

１．研 究 類 型　　Ａ）計算資源利用型

２．研 究 課 題 名　　大規模計算資源を援用した有翼式宇宙往還機の実用的な空力・飛行・推進統合設計

３．研 究 期 間　　2019 年　5 月　10 日　～　　2020 年　3 月　31 日

４．研究代表者

氏　　名	所属機関・部局名	職　　名	備　　考
金崎　雅博	首都大学東京大学院システムデザイン研究科	准教授	

５．研究分担者

氏　　名	所属機関・部局名	職　　名	備　　考
渡邉真也	室蘭工業大学　情報電子工学系専攻	准教授	
棟朝雅晴	北海道大学　情報基盤センター	教授	
米本浩一	東京理科大学理工学部	教授	
藤川貴弘	東京理科大学理工学部	助教	
千葉一永	電気通信大学大学院　情報理工学研究科	教授	
葛西洋介	首都大学東京大学院システムデザイン研究科	博士前期課程１年	
吉田慎之介	首都大学東京大学院システムデザイン研究科	博士前期課程１年	
杉本純一	九州工業大学大学院　工学研究院	博士前期課程２年	
渕上壮太	九州工業大学大学院　工学研究院	博士前期課程１年	
高橋孝	宇宙航空研究開発機構	研究員	
林謙司	宇宙航空研究開発機構	SE	

６．共同研究の成果

下欄には，当該研究期間内に実施した共同研究の成果について，その具体的内容，意義，重要性等を，共同研究申請書に記載した「研究目的」と「研究計画・方法」に照らし，800 字～1,000 字で，できるだけ分かりやすく記載願います。文章の他に，研究成果を端的に表す図表を貼り付けても構いません。なお、研究成果の論文・学会発表等を行った実績（発表等の予定を含む。）があれば、あわせて記載して下さい。

分野横断的な研究グループにより，計算工学・設計工学の技術を活用して，翼を用いた Two-stage to Orbit (TSTO)による低コスト再利用型宇宙輸送の実用化に必要な計算技術の研究開発を実施した．本年度の取り組みにおいては，特に空力と飛行計算法，および最適設計法を統合し，実用に役立つ枠組みとした．具体的には，TSTO 分離時の飛行経路とその空力変化を考慮した多点における空力形状設計と，時系列的な影響を考慮した空力形状や空力制御の最適設計を念頭においた計算コード開発を行った．

重合格子法による多体空力評価

運動方程式の外力項となる重合格子法の本問題に対する適用性・可用性を調査した．重合格子法においては，分離時の空力特性取得において，局所的な格子を移動させることで計算を行うことができるため，空力計算の効率化につなげられることができる．図 1 にオービタとブースタに対して形成した格子を示す．ブースタ周りに遠方まで広がる全体的な背景格子を，オービタの周りにはブースタ周りの空間解像度に合わせた局所的な格子を作成し，格子間の情報交換を行うこととした．比較として，TSTO 全体を単一物体と見なし，単一の格子と見なしたケースも実施した．流れ場の比較を図 2 に示す．この結果より，重合格子法と単一の格子ではほぼ同じ流れ場を取得できていることが確認できた．

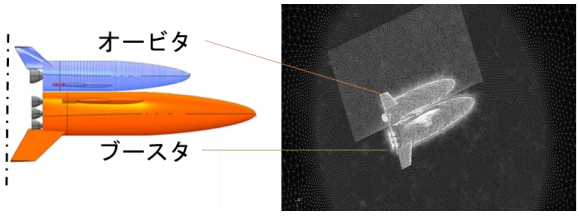

図1　検討するTSTOの構成と重合格子

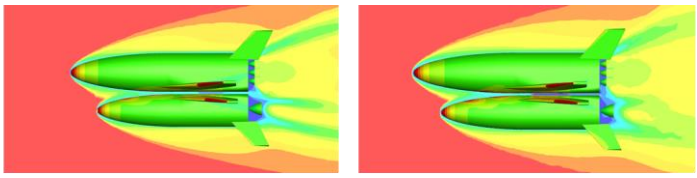

図2　得られた流れ場（左:TSTO全体に対して一つの格子を形成したケース，右:重合格子によるケース）

新たな EMO アルゴリズムの提案

TSTO の空力と制御最適化において，大域的探索手法である進化計算を用いることとする．空力評価，空力―運動連成評価は計算コストが高いことから，最適化アルゴリズムにおいても多数目的問題に強い MOEA/D の改良を実施した．MOEA/D においては，多目的問題を部分問題に分解する仕組みを持つが，解の分布によってはその分解を適切に行うことが難しい．そこで，図 3 に示す Estimation of distribution による分布推定に基づく新規個体の生成を，これまでの交叉法と併用するアルゴリズム MOEA/D-CED を開発した．表 1 にベンチマーク問題に対して得られた Inverted Generational Distance の，既存手法との比較を示す．この図より，殆どの問題に対して本申請研究による結果が良好な非劣解集合を得られることが分かった．さらにこの手法と空力評価を組み合わせ，空力形状最適化などにも用いることを検討した．

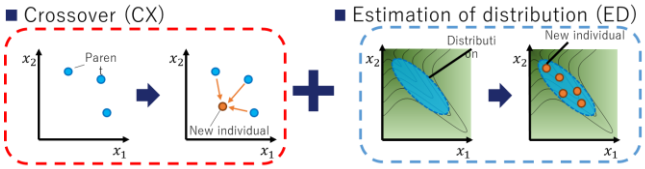

図3　交叉法と分布推定法を組み合わせた子個体生成の概念.

表1　ベンチマーク問題による性能検証（評価はIGD+による）

Problem	Non-separable	MO-CMA-ES (only ED)	MOEA/D† (only CX)	MOEA/D-CED (CX + ED)
WFG1	×	1.5509	1.4455	**1.4304**
WFG2	○	0.78171	0.37664	**0.36100**
WFG3	○	0.81257	0.48823	**0.48131**
WFG4	×	0.57191	0.27303	**0.24220**
WFG5	×	0.26670	**0.12360**	0.13285
WFG6	○	0.14009	0.15722	**0.13629**
WFG7	×	0.77179	0.38612	**0.36960**
WFG8	○	0.87724	0.27052	**0.23419**
WFG9	○	0.22347	0.13511	**0.11256**

飛行経路に対するブースタ形状最適化

MOEA/D を用いて，ブースタ形状の空力最適化を行った．飛行経路に対する主流条件を網羅できる３つの速度域における空力性能のほか，耐加熱性と重量を目的関数とした．形状自由度を高くすることにより，

（研究成果のつづき）

多様な形状をパレート解（図 4 上）として取得し，傾向の分析を行うことができた．これらの形状に基づいて，分担者らの既存研究により，機体対称面部にスパン方向の不連続形状（図 4 下）を与えたときに，低速飛行時の性能向上を図ることができる，と言う仮説の実証も行った．この実証にあたっては，低速度での空力性能の優良解 3 つと，不良解 3 つを選択し，形状定義と空力評価を改めて実施した．その結果，不良解において，揚力の改善が見られた一方で，優良解において揚力の低下が見られた．不良解での改善は図 6 のような空力計算の可視化によって解明され，目的関数間の相反関係を緩和する効果が期待されることから，今後の設計空間の再定義などに有益な情報が得られたと言える．

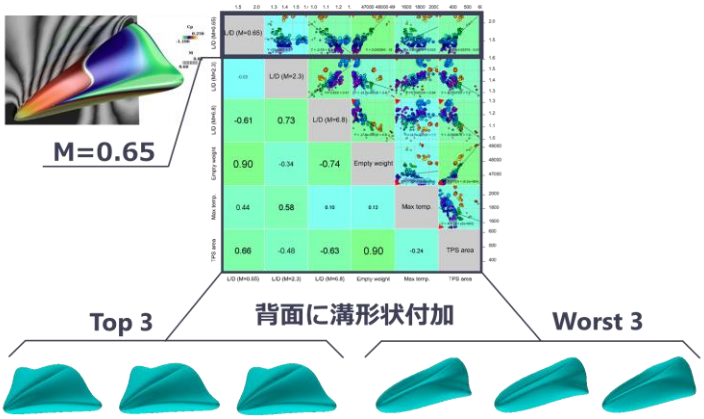

図4　得られた解集合のプロット（上）及び，優良解周りの圧力分布．代表解に対するスパン方向不連続付与形状．

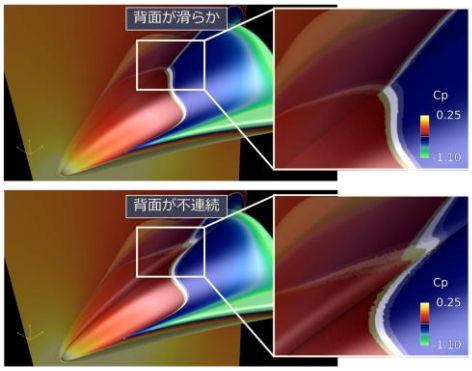

図6　不連続を付与した形状としていない形状の背面の流れ場比較．

論文発表成果一覧 (下線は代表者および分担者)

[1] Hatta, T., Sawahara, M., and Chiba, K., “Many-objective Multidisciplinary Evolutionary Design for Hybrid-wing-body-type Flyback Booster on an Entirely Automated System,” EUROGEN, Guimaraes, Portugal, 12-14 September, 2019.

[2] Hatta, T., Sawahara, M., Chiba, K., and Obayashi, S., “Fully Automated Optimum Design under an External Computer Environment,” 16th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, Japan, 6-8 November, 2019.

[3] Chiba, K., Hatta, T., and Kanazaki, M., “Hypothesis Verification for Designing Flyback Booster by Analysis of Variance Visualized on Triangular Matrix Representations,” The 5th International Conference on Data Mining and Big Data, Belgrade, Serbia, 14-20 July, 2020 (accepted)

[4] Chiba, K., Sawahara, M., and Kanazaki, M., “A Wholly Automated Optimization System Regardless of Computing Platforms for Evaluating Aero/aerothermodynamic Performance,” 14th World Congress on Computational Mechanics, Paris, France, 19-24 July, 2020 (accepted)

[5] Osawa, R., Watanabe, S., Hiroyasu, T., and Hiwa, S., "Performance Study of Double-Niched Evolutionary Algorithm on Multiobjective Knapsack Problems",2019 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI2019)，pp. 1793 - 1801)，Xiamen, December, 2019.

[6] Miyamoto, M, and Watanabe, S., "A New Approach to Generate Solutions Combining Crossover and Estimation of Distribution Operators for EMO Algorithm," 2019 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI2019)，pp. 2088 - 2095，Xiamen, December, 2019.

[7] 吉田慎之介，金崎雅博，「極超音速域の鈍頭物体二体問題に対する非構造重合格子法の適用」，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，1D09(JSASS-2019-2068-A)，東京，2019 年 7 月．