

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656520

研究課題名(和文) 宇宙から地球上の全ての地点に着陸できるモーフィング宇宙輸送システムの研究

研究課題名(英文) Feasibility Study on Morphing Space Transportation System with Global Access on Earth from Space

研究代表者

麻生 茂 (ASO, Shigeru)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40150495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、宇宙から地球上の全ての地点に着陸するために、あらゆる飛行状態に対して順次最適な機体形状を取ることができるモーフィング機能(形状変更機能)を備えた宇宙輸送システムについての研究である。

著者らが開発した三角形胴体断面の主翼付き機体をベースラインの形状とし、極超音速域では平面形状としては、デルタ翼形状で、かつ新たに考案したウエーブライダー形状が高い揚抗比を有し、亜音速域ではストレーキ形状や胴体の角部を鋭くしたほうがより高い揚力係数を持つことができ、より広い領域をカバーできる宇宙輸送システムの実現性を明らかにした。これらの成果は国内外の学会で発表され、高い評価を受けた。

研究成果の概要(英文)：A new concept of space transportation system, whose configuration changes in order to realize suitable aerodynamic performance in each flight condition, has been proposed by authors. In our previous studies on fully RLV, the present authors discovered a vehicle, whose fuselage has cross section of triangle, has high aerodynamic characteristics in subsonic flight regime. By using the configuration as base line model the present authors aim to apply morphing technique to all flight regimes, so called Morphing RLV. In hypersonic flight condition delta wing based, wave rider configuration has been proved to have higher aerodynamic characteristics and in subsonic flight condition base line configuration with strake or sharp corner at cross section of fuselage has been proved to have higher aerodynamic characteristics. Those results have been explained in the several domestic and international symposium and highly evaluated.

研究分野：航空宇宙流体力学

キーワード：宇宙往還機 送システム モーフィング機構 再突入力学 宇宙輸送システム ウエーブライダー 再使用型宇宙輸

### 1. 研究開始当初の背景

再使用型宇宙往還機にとって揚抗比  $L/D$  や揚力係数  $CL$  などの空力特性は重要なパラメーターである。高い揚抗比で飛行する機体はダウンレンジ・クロスレンジ特性に優れ、より広範囲へ飛行することができる。また、着陸時において、高い揚力係数を持つ機体は着陸速度を下げることができるので安全性が増すだけでなく、必要な滑走路長が短くなり、利用できる滑走路・空港の選択肢を広げることができる。

しかし、空力特性は機体形状と飛行条件（マッハ数や高度）に依存するので、再突入時の極超音速から着陸時の低亜音速まで幅広い飛行速度領域を飛行する宇宙往還機に関して、再突入時を考慮して設計された従来のスペースシャトルのような単一の機体形状は、すべての飛行領域で適している形状であるとは言えない。

もし、あらゆる飛行条件に応じて順次最適な機体形状を取ることができるようなモーフィング機能(形状変更機能)を備えた機体があれば、広いダウンレンジ、クロスレンジを有する宇宙輸送システムができるが、そのような機体は存在しないので、そのようなモーフィング宇宙輸送システムについて検討する必要性があった。

### 2. 研究の目的

本研究では、あらゆる飛行状態に対して順次最適な機体形状を取ることができるモーフィング機能(形状変更機能)を備えた有人宇宙輸送システムに挑戦する。これにより、過酷な空力加熱を低減させ、地球上のいかなる滑走路にも着陸できる高い信頼性を備えた我が国独自の宇宙輸送システムを実現することができる。具体的には、形状変更が可能な範囲内で、極超音速領域、超音速領域、亜音速領域と飛行条件ごとに最適な形状を見出し、その空力性能を明らかにすることである。このコンセプトを図1に示す。

この研究により、あらゆる飛行状態に対して順次最適な機体形状を取ることができるようなモーフィング機能(形状変更機能)を備えた有人宇宙輸送システムを実現することを最終目標とした。

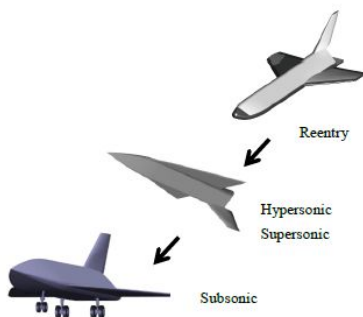


図1 モーフィングコンセプト

### 3. 研究の方法

ベースライン形状として、高い揚抗比を有する三角形胴体断面の主翼付き機体を選定し、機体形状を軌道上から超音速域までの機体形状とした。

極超音速・超音速飛行時において空力加熱の影響が小さくなるマッハ数まで減速すると、高い揚抗比  $L/D$  で飛行する形状にモーフィングする。すなわち、造波抵抗を低減するためにノーズをシャープにし、翼は大後退角のデルタ翼とする。また、圧縮揚力の効果を得て  $L/D$  を向上させることを目的として、機体を反転させて高翼形態となり、翼は機体先端から発生する衝撃波に沿う形が有効であると考えている。さらに、飛行マッハ数の変化に応じて風圧中心位置が移動するが、トリムを取るために舵角を大きくとらなければならないことも想定される。それを解消する方法として、翼を前後移動させるモーフィングも有効であると考えている。

このようなモーフィング宇宙輸送システムのコンセプトにおいて、本研究では、有望と考えられる様々なモデルについて実験的及び数値的研究を行った。

### 4. 研究成果

#### 4.1 亜音速域でのモーフィング形状の検討

今回のベース形状として用いた三角形断面胴体の Wing-Body 模型のベースライン形状 (normal とも称す) を改めて図2(a)に示すが、この模型に亜音速飛行時の空力特性向上が期待される胴体角部を鋭角化する部品を装着した sharp-edge 形状(図2(b))、およびストレーキ<sup>4)</sup>から発生する渦により揚力増加を期待してストレーキを装着した strake 形状(図2(c))の2種類の模型を用いて亜音速域において風洞試験を行った。条件は、主流マッハ数 0.3, 0.9、胴体長を基準としたレイノルズ数はマッハ数 0.3 では  $3.2 \times 10^6$  である。

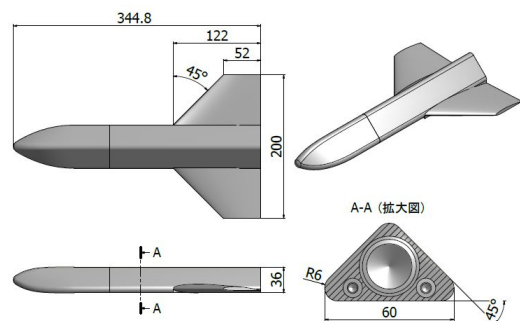


図2(a) normal 形状 (単位 mm)

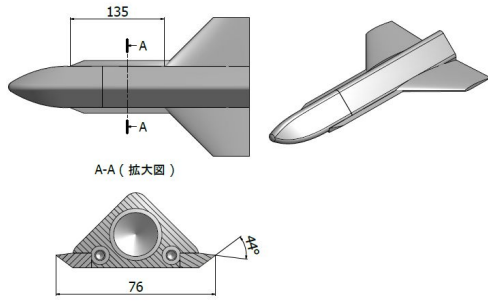


図 2 (b) sharp-edge 形状

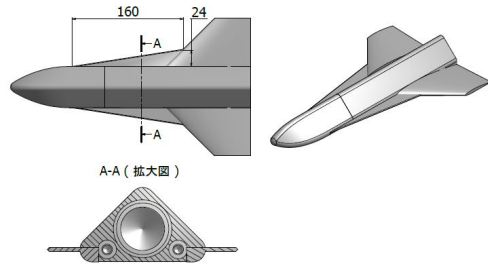


図 2(c) strake 形状

図 3(a) ~ (b) にマッハ数 0.3 の揚力係数，揚抗比の比較を示す．無次元化の際の代表面積は normal 形状の上面投影面積とした．

マッハ数 0.3 において，図 3(a) から揚力係数は sharp-edge 形状，strake 形状ともに normal 形状より増加した． $C_{Lmax}$  時の迎角はあまり変わらず，揚力傾斜が増加していることがわかる．strake 形状はストレーキから発生した渦の効果と投影面積の増加により揚力係数が増加し，sharp-edge 形状では normal 形状より強い胴体剥離渦が発生し揚力係数が増加したと考えられる．一方，図 3(c) から揚抗比は sharp-edge 形状では  $C_L$  値が大きい時つまり高迎角においては normal 形状よりも増加するが， $C_L$  値が小さい時つまり低迎角において normal 形状よりも若干減少する結果となった．strake 形状でも高迎角では揚抗比は増加するが， $C_L$  値が小さい時は normal より著しく減少する．

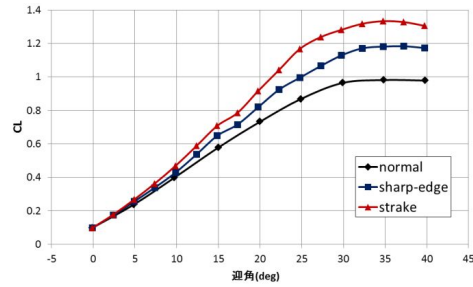


図 3(a) 揚力係数の比較，マッハ数 0.3

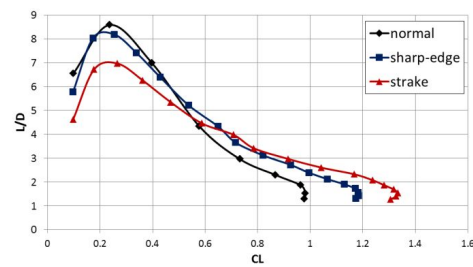


図 3 (b)  $C_L$  に対する揚抗比の比較，マッハ数 0.3

#### 4.2 極超音速域でのモーフィング形状の検討

極超音速域でのモーフィング形状の検討は主に数値計算によって行った。支配方程式は 3 次元 Euler 方程式を用いた。対流項は MUSCL 内挿を用いて高次精度化している AUSM-DV スキーム、時間積分は Euler 陽解法を用いた。各計算モデルの計算格子は約 100 万点の半裁モデルを用いた。今回はモデルの base 面を考慮しない forebody のみの計算を行った。

気流条件は今後風洞試験を行うことを想定してマッハ 4 とした。

##### 4.2.1 高翼形態・低翼形態の検討

圧縮揚力とは翼とその下に存在する物体 (円錐等) の圧縮衝撃波干渉による翼下面の圧力上昇によってもたらされる揚力である。圧縮揚力の効果を得るには衝撃波や圧縮波を発生させる物体が翼下面になければならないと考え、高翼形態と低翼形態の比較および検討を行った。

計算モデルを図 4 に示す。ノーズ先端高さは胴体高さの中央に位置し、翼は対称翼型の

デルタ翼としているので迎角を正負に取ることで高翼形態・低翼形態のモデルを模擬できる。また、図中のSは上面投影面積を表している。モデルのサイズは風洞試験を考慮した大きさとしている。

$C_L$ に対するL/Dの変化を図5に示す。なお、凡例の  $\nabla$  は高翼形態、 $\Delta$  は低翼形態を表している。

揚抗比L/Dに関しては高翼形態の方が高い結果となり、反転したほうがよりよい空力特性が得られることが明らかとなった。

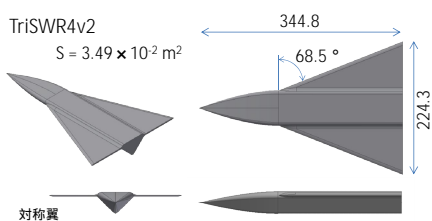


図4 計算モデル

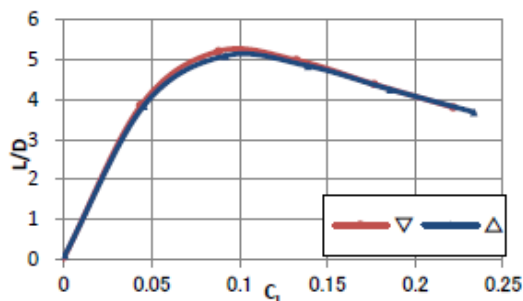


図5 揚力係数  $C_L$  に対する揚抗比 L/D の変化

#### 4.2.2 ノーズ、翼の平面形の検討

ここまでの結果から超音速飛行でL/Dが高い形状として高翼形態、下反角なしの水平な翼が考えられる。ここではノーズの形と翼の平面形について検討を行った。対象モデルはTriSWR4v2(図4)とTriSWR5(図6(a))、TriSWR7v2(図6(b))である。

TriSWR5はTriSWR4v2からノーズ形状を変えており、ノーズ形状による揚抗特性、ピッチングモーメント特性の変化を明らかにすることを目的としている。

ノーズの先端位置に関して、TriSWR4v2と

TriSWR5を比べてみると、図7に示すように、TriSWR4v2の方が最大L/Dが大きい。図8に迎角5°の正面から見た圧力分布の比較を示している。TriSWR4v2に比べてTriSWR5のノーズ先端が高圧になっている。

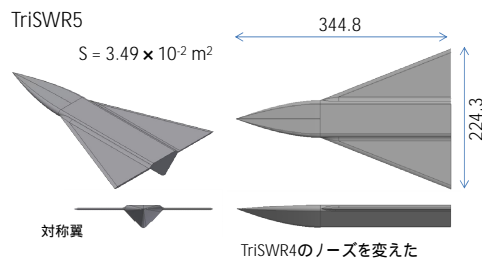


図6(a) 計算モデル(ノーズ変化)

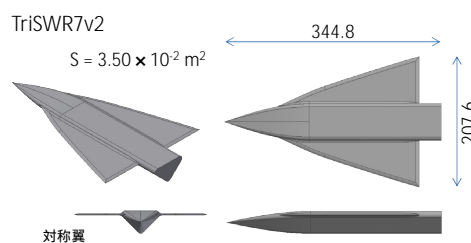


図6(b)計算モデル(衝撃波に沿うように設計した翼)

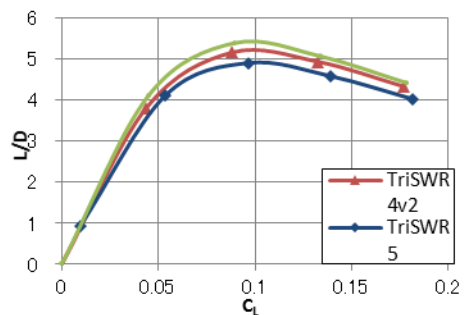


図7 揚力係数  $C_L$  に対する揚抗比 L/D の変化

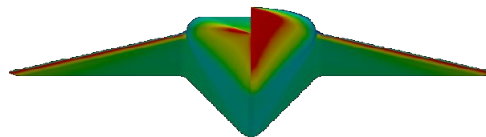


図8 圧力分布の比較、 $\alpha = 5\text{deg}$

このような検討を行い、現時点でのモーフィング宇宙輸送システムの形態として図9にモーフィング宇宙輸送システムの形態を得た。

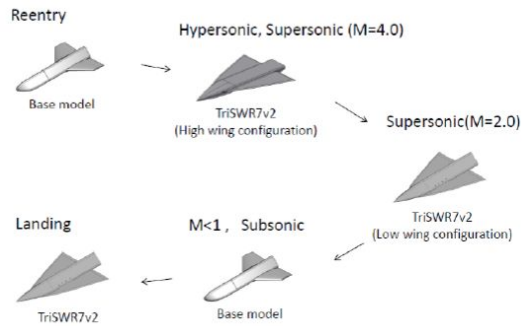


図 9 現時点でのモーフィング宇宙輸送システムの形態

#### 4.4 まとめ

あらゆる飛行状態に対して順次最適な機体形状を取ることができるようなモーフィング機能(形状変更機能)を備えた有人宇宙輸送システムを提案し、その実現に向けて、形状変更が可能な範囲内で、極超音速領域、超音速領域、亜音速領域と飛行条件ごとに最適な形状を見出し、その空力性能を明らかにした。

これらの成果は世界的に権威のある国際学会、日本航空宇宙学会の学術講演会等で発表し高く評価された。また、2015年4月16日に開催された日本航空宇宙学会第46期年会講演会においてオーガナイズドセッション(構造部門、飛行力学部門、航空機設計部門、材料部門、空力部門共催)において「モーフィング技術の宇宙往還機への適応可能性についての考察」と題する招待講演を行い、高い評価を得た。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計9件)

宮原孝輔、麻生 茂、谷 泰寛、柳瀬匡甫、高橋正隆、Laugeois Benjamin、稲谷芳文：モーフィング宇宙輸送システムに向けての基礎研究について、第56回宇宙科学技術連合講演会講演論文集、査読なし、2012年。

柳瀬匡甫、宮原孝輔、森下和彦、谷 泰寛、麻生 茂：モーフィング機能を有した宇宙往還機の空力特性改善の研究、平成24年度宇宙航行の力学シンポジウム講演集、査読なし、2012年。

麻生 茂、谷 泰寛、宮原孝輔：モーフィング機能を有する宇宙輸送システムにむけての空気力学的研究、第57回宇宙科学技術連合講演会講演集、査読なし、CD-ROM、2013

Shigeru Aso, Yasuhiro Tani and Kosuke Miyahara: Aerodynamic Study of Morphing Fully Reusable Launch Vehicle for Wider Cross Range and Down Range, Proceedings of 6th KAIST-Kyushu University Symposium on Aerospace Engineering, 査読なし、2013

宮原孝輔、麻生 茂、谷 泰寛、壁谷祐助、大山 翔、山岸恭輔、稲谷芳文：モーフィング宇宙輸送システムに向けた機体形状の空気力学的研究、平成25年度宇宙航行の力学シンポジウム講演集、査読なし、2014

麻生 茂、谷 泰寛、宮原孝輔：モーフィング宇宙往還機にむけての空気力学的考察、平成25年度航空宇宙空力シンポジウム講演集、査読なし、2014.

Shigeru Aso, Yasuhiro Tani and Kosuke Miyahara: Aerodynamic Study of Advanced Space Transportation System with Morphing Concept for Wider Cross Range and Down Range, Proceedings of 65th International Astronautical Congress, IAC-14,D2.P.11, 査読有、2014

麻生 茂、谷 泰寛、宮原孝輔、米倉混人：広いダウンレンジ・クロスレンジを有するモーフィング宇宙輸送システムに関する研究、第58回宇宙科学連合講演会講演集、査読なし、CD-ROM、2014

麻生 茂、谷 泰寛、大江健悟、多田洋史、水地壮登、山下雅人、森下和彦：サブスケールモーフィング宇宙往還機

飛行実証に向けた高性能ハイブリッドロケットの研究, 平成 26 年度 航空宇宙空力シンポジウム講演集, 査読なし, 2015.

〔学会発表〕(計 10 件)

宮原孝輔, 麻生 茂, 谷 泰寛, 柳瀬匡甫, 高橋正隆, Laugeois Benjamin, 稲谷芳文: モーフィング宇宙輸送システムに向けての基礎研究について, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会講演論文集, 2012 年 11 月 22 日(大分県別府市) .

柳瀬匡甫, 宮原孝輔, 森下和彦, 谷 泰寛, 麻生 茂: モーフィング機能を有した宇宙往還機の空力特性改善の研究, 平成 24 年度宇宙航行の力学シンポジウム講演集, 2012 年 12 月 14 日(神奈川県相模原市)

植松太郎, 森本直紀, 高橋正隆, 森下和彦, 谷 泰寛, 麻生 茂: 衝撃波干渉低減を考慮した TST0 型宇宙往還機に関する研究, 平成 24 年度宇宙航行の力学シンポジウム講演集, 2012 年 12 月 14 日(神奈川県相模原市)

麻生 茂, 谷 泰寛, 宮原孝輔: モーフィング機能を有する宇宙輸送システムにむけての空気力学的研究, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 2013 年 10 月 11 日(鳥取県米子市)

Shigeru Aso, Yasuhiro Tani and Kosuke Miyahara: Aerodynamic Study of Morphing Fully Reusable Launch Vehicle for Wider Cross Range and Down Range, 6th KAIST-Kyushu University Symposium on Aerospace Engineering, 2013 年 11 月 29 日(KAIST, Daejeon, Korea)

宮原孝輔, 麻生 茂, 谷 泰寛, 壁谷祐助, 大山 翔, 山岸恭輔, 稲谷芳文: モーフィング宇宙輸送システムに向けた機体形状の空気力学的研究, 平成 25 年度宇宙航

行の力学シンポジウム, 2013 年 12 月 6 日(神奈川県相模原市)

麻生 茂, 谷 泰寛, 宮原孝輔: モーフィング宇宙往還機にむけての空気力学的考察, 平成 25 年度航空宇宙空力シンポジウム, 2014 年 1 月 24 日(北海道登別市)

Shigeru Aso, Yasuhiro Tani and Kosuke Miyahara: Aerodynamic Study of Advanced Space Transportation System with Morphing Concept for Wider Cross Range and Down Range, 65th International Astronautical Congress, 2014 年 10 月 1 日(トロント市, カナダ)

麻生 茂, 谷 泰寛, 宮原孝輔, 米倉滉人: 広いダウンレンジ・クロスレンジを有する モーフィング宇宙輸送システムに関する研究, 第 58 回宇宙科学連合講演会, 2014 年 11 月 12 日(長崎県長崎市)

麻生 茂, 谷 泰寛, 大江健悟, 多田洋史, 水地壮登, 山下雅人, 森下和彦: サブスケールモーフィング宇宙往還機飛行実証に向けた高性能ハイブリッドロケットの研究, 平成 26 年度航空宇宙空力シンポジウム, 2015 年 1 月 23 日(鳥取県米子市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

[http://stl-www.aero.kyushu-u.ac.jp/research/index\\_r.htm#RLV](http://stl-www.aero.kyushu-u.ac.jp/research/index_r.htm#RLV)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

麻生 茂 (ASO, Shigeru)

九州大学大学院工学研究院・教授

研究者番号: 4 0 1 5 0 4 9 5

(2) 研究分担者

谷 泰寛 (TANI, Yasuhiro)

九州大学大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 8 0 3 8 0 5 7 5