

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 31 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360381

研究課題名(和文)火星探査飛行機用低レイノルズ数、高マッハ数プロペラの研究

研究課題名(英文) A study on a Mars airplane propeller operating at a low Reynolds number and a high Mach number

研究代表者

砂田 茂 (Sunada, Shigeru)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70343415

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円、(間接経費) 3,630,000円

研究成果の概要(和文)：低レイノルズ数(10の3乗のオーダー)、高マッハ数(翼端で0.5程度)で作動するプロペラ性能を、3つの風洞を用いた実験、数値計算による解析によって調べ、その設計法を検討した。主な得られた知見は以下の通りである。(1)高レイノルズ数で用いられるブレード形状設計方法が、当該レイノルズ数でも有効である。(2)当該レイノルズ数で高い最大揚抗比を持つ翼型を提案した。(3)低レイノルズ数における翼型性能に対するマッハ数の効果は、プラントルグラウート則で評価される効果よりも小さい。(4)低レイノルズ数で高効率を有するプロペラブレードのアスペクト比は、高レイノルズ数においてよりも小さい。

研究成果の概要(英文)：In order to develop a propeller of a Mars airplane, the characteristics of a propeller operating at a Reynolds number with the order of 1000 and a high Mach number (Mach number at tip is about 0.5) were investigated by experiments at three wind tunnels and CFD analysis. The followings have been made clear. (1) A method used for designing a propeller at a high Reynolds number, that is a method proposed by Adkins and Liebeck, is available at the present Reynolds number. (2) We proposed an airfoil shape with a high maximum lift-drag ratio. (3) An effect of compressibility on the characteristics of an airfoil is smaller with the decrease of Reynolds number. (4) Aspect ratio of a blade is smaller with the decrease of Reynolds number. (5) There is possibility that characteristics of a propeller can be improved by the variations of a sweepback angle and a dihedral angle. This is because position of vortices on the upper surface is affected by the variations of these angles.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：火星飛行機 プロペラ 低レイノルズ数 高マッハ数 前縁渦

1. 研究開始当初の背景

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所を中心に、火星用探査用飛行機の開発の詳細の検討が進められていた。推進器としてはプロペラが採用される。地球と火星とでは、表1の様に物性値が異なる。想定されている、質量3.5kg、スパン2.5m程度の固定翼機が地球、火星において同一の揚力係数で飛行した場合、これら物性値の差からプロペラの翼端でのレイノルズ数(Re)、マッハ数(M)は表2の様になる。火星でのプロペラは低レイノルズ数、高マッハ数で作動することになる。

表1 火星、地球での物性値の比較

	地球	火星
大気密度	1.2(kg/m ³)	0.012(kg/m ³)
重力加速度	9.8(m/s ²)	3.7(m/s ²)
粘性係数	1.8x10 ⁻⁵ (kg/ms)	1.36x10 ⁻⁵ (kg/ms)
音速	340(m/s)	220(m/s)

表2 火星、地球でのレイノルズ数、マッハ数の比較

	地球	火星
レイノルズ数	1.3x10 ⁵	3x10 ⁴
マッハ数	0.05	0.5

低レイノルズ数での回転翼の研究は、回転翼MAV (Micro Air Vehicle) 機の研究として、行われてきただけで、その数は極めて少ない。また、これまでの研究は低レイノルズ数、低マッハ数での研究であり、圧縮性の影響は含まれていない。また、当該低レイノルズ数における羽ばたき翼の研究は昆虫の飛行の研究として盛んに行われてきた。しかし、与えられた形状の翼が与えられた羽ばたき運動をする際の空気力評価が行われてきただけで、羽ばたき翼を設計する研究は行われていなかった(現在も行われていない)。

2. 研究の目的

低レイノルズ数、0.5以下のマッハ数で作動するプロペラの性能把握を、風洞試験とCFDを用いて行った。検討対象となるプロペラは、10⁵以上のレイノルズ数でその有効性が確認されているAdkins・Liebeckの方法¹を用いて設計したものである。検討の結果、低レイノルズ数、0.5以下のマッハ数で作動するプロペラの設計指針を明らかにした。本研究では、火星探査用飛行機プロペラだけでなく、高高度無人機用プロペラ等、低レイノルズ数で作動するプロペラの設計に役立つ成果を得ることを目指した。

3. 研究の方法

(1) Adkins・Liebeckの方法でのプロペラ設計

Adkins・Liebeckの方法によってプロペラを設計する際、翼型形状を与える仮定する必要がある。本研究においては、図1に示す2つの翼型を用いた。図1(a)は文献2において

レイノルズ数10⁴で高い最大揚抗比を示す翼型である。図1(b)の翼型は、図1(a)の翼型をベースに、後縁を厚くして抗力を低下させる⁴と同時に圧力面に窪みを持たせることでキャンバを増やし、揚力の向上を狙った形状である。東北大学での測定によって、Re=4×10³において、図1(b)の翼型の最大揚抗比は、図1(a)に比べ50%高いことが分かった。

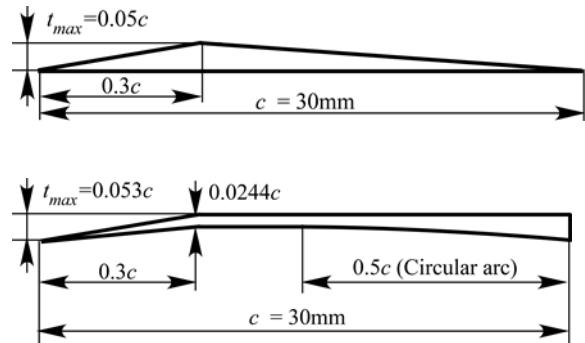


図1 プロペラの翼型

(a)文献2において示されたレイノルズ数10⁴で高い最大揚抗比を示す翼型、(b)(a)を参考に最大揚抗比を高めた翼型³

(2) 風洞試験

風洞試験には3つの風洞を用いた。東北大学の火星大気風洞、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の惑星環境風洞、大阪大学の通常の風洞である。1、2番目の風洞では、風洞の内部の空気が閉空間内にあるので、標準大気から大きく密度を下げる事が可能である。1番目の風洞は測定部が小さいが、風洞内の大気をCO₂に変えることで高マッハ数での測定が可能である。2番目の風洞は測定部が大きい、風洞内大気を変えることができず、高マッハ数での測定ができない。これらのことを考慮し、3つの風洞を以下の目的で使用した。

[東北大学の火星大気風洞]大きな測定部を必要としない固定2次元翼について、低レイノルズ数、広いマッハ数での空気力測定を行った。プロペラの設計に使用する翼型データの取得、及び低レイノルズ数での圧縮性の効果を明らかにするために用いた。

[宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の惑星環境風洞]広い測定部を有する風洞であるので、低レイノルズ数で作動する回転翼に働く空気力の測定を行った。この風洞はサイズが大きく、例えば閉鎖空間内の圧力を大気圧の5%まで下げるために、数時間を要する。このため、実験に多くの時間を要する。

[大阪大学の通常の風洞]当該レイノルズ数まで、レイノルズ数を下げることができない。しかし、閉鎖空間内の圧力を下げることができないので、上記惑星環境風洞での実験の様に多くの時間を要しない。そこで、当該レイノルズ数よりも高いレイノルズ数で試験を行

った。惑星環境風洞での結果と比較してプロペラ性能に対するレイノルズ数効果が小さいことが明らかになれば、多くの測定時間を要しない本風洞で試験を行うことが可能になる。

(3) CFD 解析

宇宙航空研究開発機構で開発された FaSTAR も用いたが、ほとんどのプロペラ性能解析は市販ソフト ANSYS CFX を用いて行った。

4. 研究成果

低レイノルズ数、高マッハ数で作動するプロペラ性能について、得られた知見は以下の様にまとめることができる。

(1) 10 の 5 乗のオーダのレイノルズ数で有効性が示されているプロペラ設計法である、Adkins-Liebeck の方法は、10 の 3 乗のオーダでのプロペラ設計においても有効である。

(2) Adkins-Liebeck の方法では翼型データが必須であり、最大揚抗比の大きな翼型がプロペラの効率を高める。10 の 3~4 乗のレイノルズ数で高い揚抗比を有する翼型として、図 1 (a) に示す三角形翼型が知られていた。当該レイノルズ数において、このような前縁が尖った翼型では前縁渦が存在する。その翼型をベースに (i) 後縁を厚くし、三角形を台形にし、(ii) 翼下面を削り、キャンバを増加した翼型を提案した。この翼型はベースの三角翼型よりも高い最大揚抗比を持つことが確かめられた。また、東北大学のグループによる風洞試験によって、低レイノルズ数における翼型性能に対するマッハ数の効果は、高レイノルズ数で良く知られるプラントルグロワート則で評価される効果よりも小さいことが分かった。

(3) 上記の様な前縁が尖った翼型をプロペラに採用した場合、翼前縁に安定な渦が存在し、プロペラ性能に大きく影響する。さらに、後退角、上反角のコントロールによって、前縁剥離渦から繋がるトレーリングボルテクスも翼上面に存在させることができる。前縁渦だけでなくトレーリングボルテクスも翼上面に存在することで、翼上面の負圧が下がることによる発生推力増大の可能性を示した。

(4) 本研究で使用したプロペラは、レイノルズ数が 10 の 3 乗のオーダで設計したものである。このプロペラを 10 の 4 乗のオーダで使用しても、推力係数、パワ係数、効率に大きな差は見られなかった。10 の 3 乗のレイノルズ数での試験をするために、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の惑星環境風洞の様な特殊風洞を使用する必要は低いと思われる。ただし、10 の 3 乗のレイノルズ数での試験結果にはバラツキが見られるので、この事実を確実なものにするために、より精度の高い測定が必要である。

(4) 最大効率が得られるプロペラブレードのアスペクト比には最適値が存在する。アス

ペクト比が大きいことによる誘導抵抗減少と、アスペクト比が小さい(コード長が大きい)ことによるレイノルズ数増加による形状抵抗減少のトレードオフによる。この結果、レイノルズ数が低下すると、最適なブレードアスペクト比も低下する。

(5) プロペラを主翼に取り付けた際の、主翼の特性を測定した。なお、プロペラ性能に対するプロペラと主翼の干渉の効果は無視した。その結果、プロペラを翼端に取り付け主翼全体を吹き上げの中に位置させることで、主翼性能の向上、すなわち揚力係数の増加、抗力係数の減少を確認した。

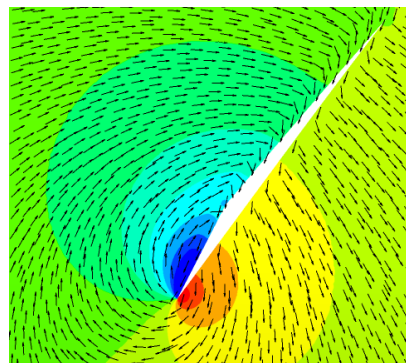
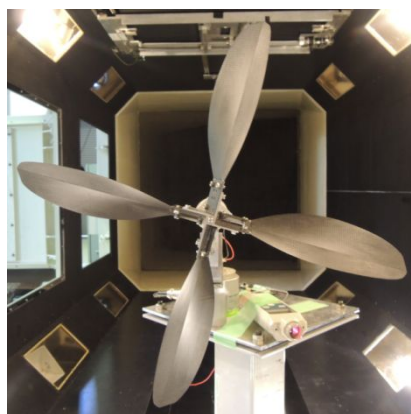
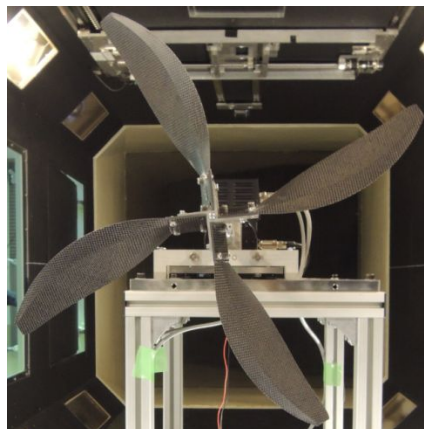


図 2 後退角・上反角のないブレード
(a) 測定に用いたプロペラ、(b) スパン方向 80%位置での圧力・流速分布

(a)



(b)

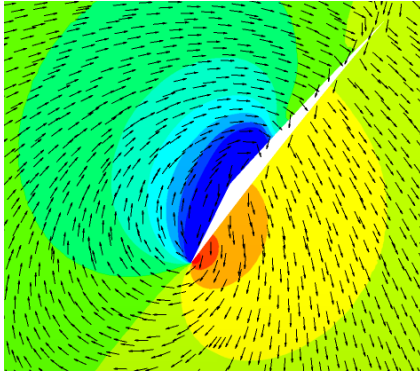
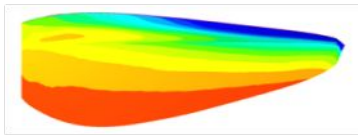


図3 後退角・上反角を有するブレード
(a)測定に用いたプロペラ、(b)スパン方向
80%位置での圧力・流速分布

(a)



(b)

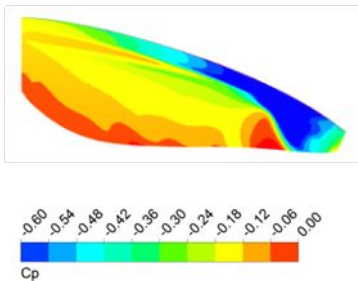


図4 翼上面の圧力分布
(a)後退角・上反角のないブレード、(b)後
退角・上反角を有するブレード

参考文献

- [1]Adkins , C. N., and Liebeck, R. H. : Design of Optimum Propellers , Journal of Propulsion and Power , Vol.10 , No.5 (1994), 676 - 672.
 [2]Azuma, A. “The Biokinetics of Flying Aand Swimming, Second Edition (AIAA Education Series),” American Institute of Aeronautics and Astronautics (2006).
 [3]米澤宏一、後藤雄大、砂田茂、林田高志、諏訪哲也、酒井宣明、永井大樹、浅井圭介、辻本良信、火星探査飛行機用プロペラ開発のための翼型に関する研究、日本航空宇宙学会論文集、査読有、第62巻1号、24-30(2014).
 [4]木村健太郎、岡本正人、低レイノルズ数における三角形翼型の空力特性、第43回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2011 講演集 ,1D10, (2011)

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 5 件)

米澤宏一、後藤雄大、砂田茂、林田高志、諏訪哲也、酒井宣明、永井大樹、浅井圭介、辻本良信、火星探査飛行機用プロペラ開発のための翼型に関する研究、日本航空宇宙学会論文集、査読有、第62巻1号、24-30(2014).

砂田茂、米澤宏一、火星飛行機用プロペラの研究・開発(解説)、ターボ機械協会誌、査読無、11月号、692-698(2013).

Sunada,S. and Tsuji,K., Advantages of an ornithopter versus an airplane with a propeller. Trans. Japan Society of Aeronautical and Space Sciences. 査読有、56, 5, 277-285(2013).

Sunada S., Advantages of an ornithopter against an airplane with a propeller. Advances in Science and Technology, 査読無、84, 66-71 (2013)

Tajima,H., Sunada,S., Tokutake,H., Okamoto,M. and Okamoto,M., Flight Stability of an Airplane on Mars. Trans. Japan Society of Aeronautical and Space Sciences. 査読有、54, 185, 205-211 (2011).

〔学会発表〕(計 17 件)

Matsumoto,S., Yonezawa,K., Terasaki,S., Sunada,S., Fukumoto,Y., Abe,K. and Ide,A., Interference between a main wing and a propeller of the Mars airplane. Asian Joint Conference on Propulsion and Power (2014年3月5日、韓国済州島).

Yonezawa,K., Fukumoto,Y., Matsumoto S., Sunada,S., Anyoji,M., Influence of Blade Skew on Propeller Performance in Low-Reynolds Number Flows. Asian Joint Conference on Propulsion and Power (2014年3月5日、韓国済州島).

野玉達郎、砂田茂、プロペラによるバッテリー充電に関する検討、日本航空宇宙学会中部関西支部連合講演会(2013年10月25日、大阪)

砂田茂、米澤宏一、火星飛行機用プロペラ周りの前縁剥離渦について、日本航空宇宙学会宇宙科学技術連合講演会(2013年10月9日、米子)

Yonezawa,K., Goto,Y., Hayashida,T., Sunada,S., Anyoji, M. and Tsujimoto, Y., Experimental and Numerical Investigations of Three-Dimensional Flows around Propellers in Low-Reynolds Number Flows. 29th International symposium on space technology and science (2013年6月2日、名古屋)

林田高志、後藤雄大、砂田茂、米澤宏一、諏訪哲也、酒井宣明、永井大樹、浅井圭介、辻本良信、火星飛行機用プロペラの

高効率化のための平面形に関する研究、宇宙航行の力学シンポジウム(2012年12月13日、神奈川)

後藤雄大、林田高志、米澤宏一、砂田茂、酒井宣明、永井大樹、浅井圭介、辻本良信、火星飛行機用プロペラの高効率化のための翼型に関する研究、宇宙航行の力学シンポジウム(2012年12月13日、神奈川)

米澤宏一、後藤雄大、林田高志、砂田茂、安養寺正之、辻本良信、火星飛行機用プロペラの性能に及ぼす三次元流れの効果、日本航空宇宙学会宇宙科学技術連合講演会(2012年11月20日、別府)

林田高志、砂田茂、米澤宏一、後藤雄大、安養寺正之、辻本良信、火星飛行機用プロペラの研究、日本航空宇宙学会第50回飛行機シンポジウム(2012年11月5日、新潟)

南部太介、橋本敦、砂田茂、佐藤哲也、移動格子法による低Re数用Propeller流れの数値解析、第44回流体力学講演会 / 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム(2012年7月5日、富山)

Sunada,S., Advantages of an Ornithopter against an Airplane with a Propeller. 4th International conference on Smart materials, structures and systems(2012年6月10日、イタリア)

Sunada,S. and Tsuji,K., Advantages of a flapping wing over a propeller. 50th AIAA Aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition(2012年1月11日、米国 Nashville)

福本裕司、林田高志、後藤雄大、砂田茂、米澤宏一、辻本良信、火星飛行機用プロペラの振り試験、日本航空宇宙学会関西支部講演会(2011年11月25日、神戸) 後藤雄大、米澤宏一、砂田茂、林田高志、辻本良信、火星飛行機のプロペラ設計、日本航空宇宙学会宇宙科学技術連合講演会(2011年11月17日、神戸)

Hayashida,T., Sunada,S., Ishida,R., Kaneko,K., Suwa,T., Nagai,H., Asai,K., Goto,Y., Yonezawa,K. and Tsujimoto,Y., Design of A Propeller of An Airplane on Mars. Eighth International Conference on Flow Dynamics(2011年11月9日、仙台). 林田高志、火星飛行機のプロペラの設計、日本航空宇宙学会第49回飛行機シンポジウム(2011年10月26日、金沢)

砂田茂、辻和樹、プロペラ機に対する羽ばたき機の優位性、日本流体力学会年会(2011年9月8日、東京)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者 砂田 茂 (SUNADA Shigeru)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 70343415

(2)研究分担者 米澤 宏一 (YONEZAWA

Koichi)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号: 00362640

石田 良平 (ISHIDA Ryohei)

大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30145817

野中 聡 (NONAKA Satoshi)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・

准教授

研究者番号: 40332150

橋本 敦 (HASHIMOTO Atsushi)

宇宙航空研究開発機構・航空本部・研究員

研究者番号: 30462899

(3)連携研究者 坂上 昇史 (SAKAUE Shoji)

大阪府立大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 70244655

浅井 圭介 (ASAI Keisuke)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 40358669