

ゆっくり飛ぶための翼

Airfoils for slow flight

佐々木 悠誠^{1,2}, 武田 彩音^{1,3}, 山谷 美楠^{1,4}
SASAKI Yusei^{1,2}, TAKEDA Ayane^{1,3}, YAMAYA Mihoro^{1,4}

東北大学「科学者の卵養成講座」¹, 宮城県仙台第二高等学校²

秋田県立秋田高等学校³, 仙台市立仙台青陵中等教育学校⁴

EGGS, Tohoku University¹, Sendai Daini Senior High School²,
Akita Senior High School³, Sendai Seiryō Secondary Education School⁴

Corresponding Author's e-mail: yusei.sasaki.x5@sci-eggs.net

(Received: 29 March 2024; Accepted: 21 March 2025; Released: 29 October 2025)

[要約]

動力飛行機に利用している主な翼は、高レイノルズ(Re)数での飛行、即ち、高速での飛行を想定している。しかし、プラズマアクチュエータと呼ばれる、飛行性能を向上させる機器を用いる際や、火星飛行機での飛行に関しては、低速で飛行したほうが効果が高まる。そこでレイノルズ数 $Re=20000$ の飛行に適した翼を簡易的な翼形状解析ソフトウェアを用いて設計し、3D プリンタで作製した翼模型とハンドランチグライダーで実績のある石井翼に対して風洞実験を実施した。その結果、製作した翼の一つに、設計時の予測と風洞実験とで空力性能に大きな差が生じた。実際の低 Re 飛行では、簡易的な解析では捉えることのできない翼の上面に発生する渦が重要な役割を果たすと考えられる。

[キーワード] 低レイノルズ数, キャンバ, 石井翼, 空力性能, 渦生成

Low Reynolds Number, Camber, Ishii Airfoil, Aerodynamic Performance, Vortex Generation

1. はじめに

現在使われている動力飛行機の多くは高速で飛行しているが、そのような航空機に用いられている翼は、低速での飛行には不向きである。低速飛行が必要な航空機の例として、火星飛行機やソーラー飛行機などがあげられる。また、プラズマアクチュエータを用いる際には、低速飛行用の翼の方が好ましい。我々は低速飛行に最も適した翼形を追求するため、ハンドランチグライダーに適した翼として知られている石井翼(小池・石井, 2009)の性能を風洞計測で確認し、低速で高い空力性能が得られる原理を考察した。本研究における低速飛行は、火星飛行機への応用も考慮し、火星飛行機の巡航レイノルズ数 Re が 10^4 のオーダーであること(大野, 2020)に合わせ、 $Re=20000$ と設定して風洞実験等を行った。その考察をもとに、簡易的な翼型設計ソフトである xfoil(Drela, 1989)をベースに開発された xflr5 (<http://www.xflr5.tech>)を用いて3つの翼型を設計し、 Re 数 20000 に最も適した翼型の条件を考察した。

2. 実験方法

まず、xflr5 で設計・作成した3つの翼と石井翼の解析を行った。作成した3つの翼と石井翼の形状を図1に示す。

解析では揚力(以下 L とする), 抗力(以下 D とする), L/D の値を縦軸, 翼の迎角を横軸として、迎角を 0.5° ずつ変化させた際の L , D , L/D の値の変化を図2に示す。本研究では石井翼よりも性能の良い翼を作ることを目的としている。ここで

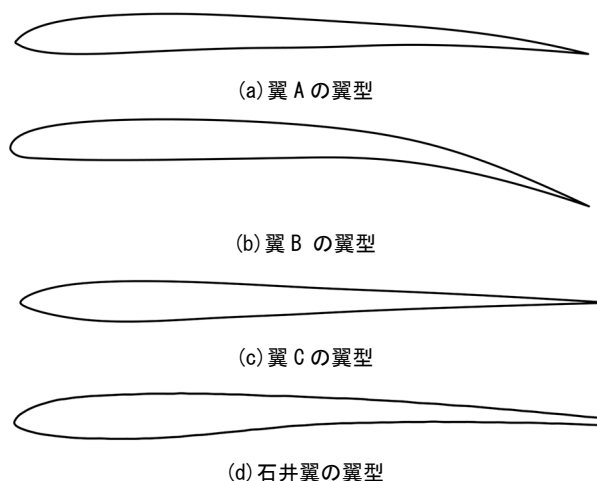
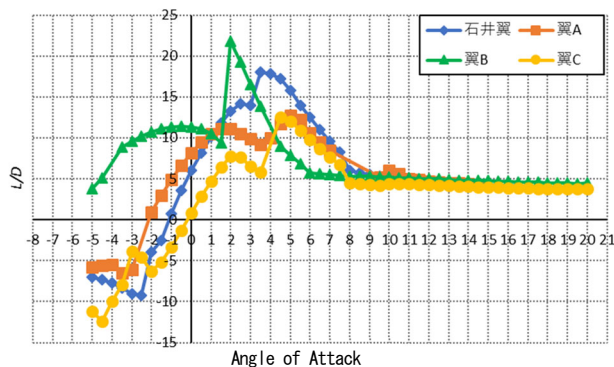


図1 翼A, 翼B, 翼C, 石井翼の断面形状。

「性能が良い」とは L の値は大きく、 D の値は小さい、つまり「 L/D の値が大きい」こととする。xflr5 での解析の結果では、3つの翼は石井翼の L/D を上回っていた。

以後は、xflr5 の解析から得られた値を予測値とする。次に、実際に風洞を用いて実験を行った。石井翼では迎角を -5° から 20° の範囲で 1° ずつ変化させ、翼Aと翼B, 翼Cでは、迎角を -7° から 20° の範囲で 1° ずつ変化させて計測を行った。

図2 xflr5で解析した各翼の L/D 。

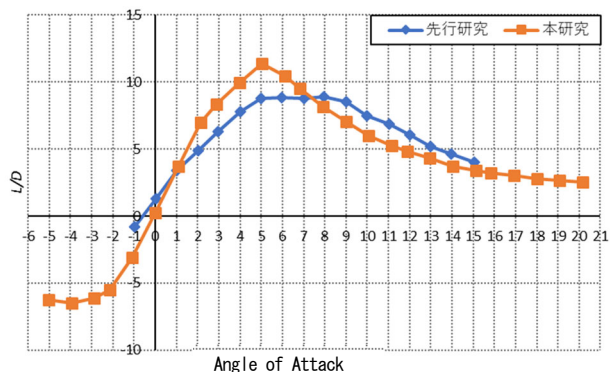
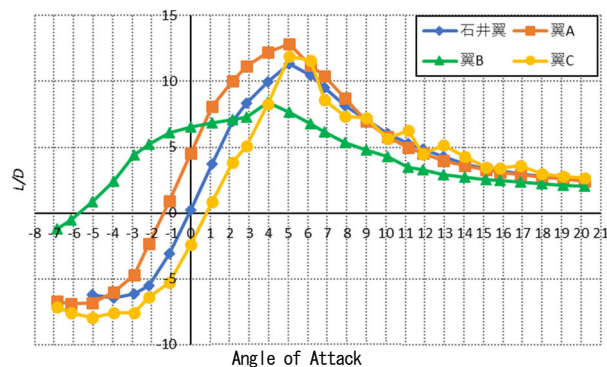
迎角を 1° ずつ変化させた際の L と D のデータは、風によって値にばらつきが生じるため、それらの平均の値をとった。データはxflr5での解析のグラフと同じように、 L 、 D 、 L/D の値を縦軸とし、 1° ずつ変化させた迎角を横軸として表した。最後に、風洞実験から得られたデータをもとに考察を行い、さらに詳しく調べるために、二次元の流体コードを用いて各翼型周辺の圧力分布及び流れの精密な計算を行った。

3. 結果と考察

まず、石井翼について、図3で示すように、先行研究(小池・石井, 2009)における風洞実験の結果と我々が行った風洞実験の L/D は概ね一致していた。

次に、石井翼、翼A、翼B、翼Cの L/D を風洞計測した結果を図4に示す。石井翼と本研究で設計した3つの翼それぞれの L/D を比較すると、翼Aは大きく、翼Bは小さく、翼Cは翼Aの結果と近い値をとることがわかる。

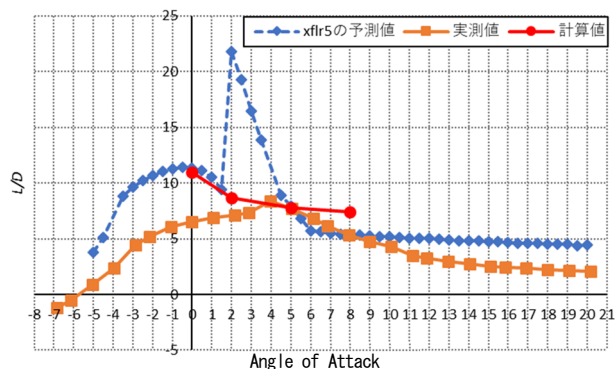
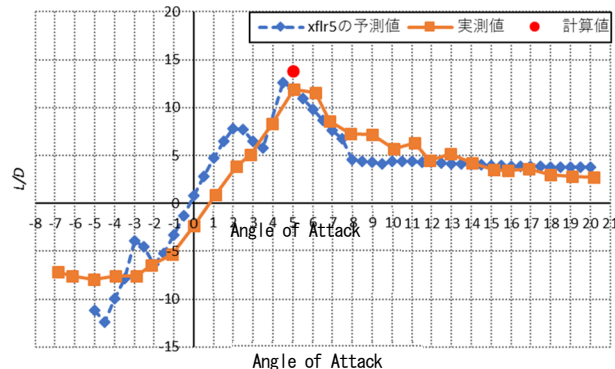
ここで、翼Bの L/D のピーク付近での実測値が、xflr5の予測値を大幅に下回っていたため、xflr5の予測値と実測値に大きな差が生じた部分について、二次元の流体シミュレーションを用いて精密な計算解析を行った。その結果を図5中の赤線で示すが、実測値と計算値とが近い値をとっていることがわかる。同様に、翼Cについても L/D のピーク付近の1点において同様に精密な計算解析を行ったところ、図6のような結果が得られ、翼Cはxflr5の予測値、実測値、計算値が概ね同じ値をとっていることがわかる。したがって、翼Bに

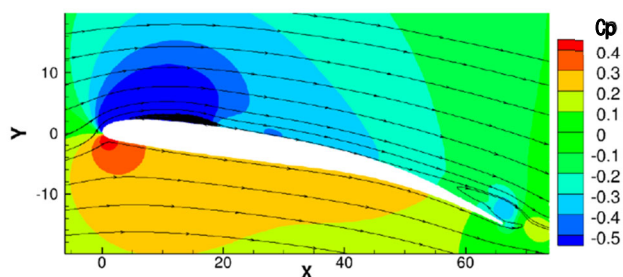
図3 石井翼の L/D 。図4 風洞実験で計測した各翼の L/D の比較。

のみ xflr5 での予測が困難な現象が発生していると考えられる。

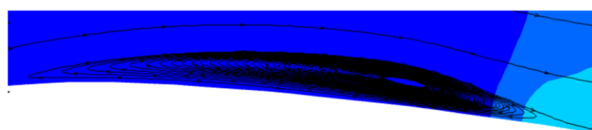
図1に示した翼Bと翼Cの翼型を比較すると、大きく異なる点として挙げられるのは大きなキャンバ(反り)の有無である。このことから翼Bでは、大きなキャンバを持った翼に特有の渦が翼面上に発生しているのではないかと考えられる。このことを確かめるために、計算機シミュレーションにて翼付近の空気の流れを調べた。翼B、翼Cにおいて、翼付近の圧力分布と空気の流れの速度ベクトルを計算した結果を図7に示す。

図7より、翼Bでは翼上面の後端に渦が発生しているが、翼Cでは渦の発生は確認できない。xflr5での翼型設計時に行った簡易的な予測では、飛行性能に大きな影響を与える渦の

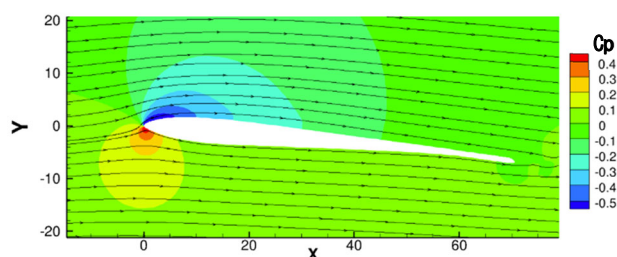
図5 翼Bの L/D 。図6 翼Cの L/D 。



(a) 翼 B 周辺の圧力係数と流線



(b) 翼 B 周辺の空気の流れの前縁付近の翼上面拡大図



(c) 翼 C 周辺の圧力係数と流線

図 7 翼 B, 翼 C の翼周辺の空気の流れのシミュレーション

発生が考慮できないと考えられる。

また図 4 より、迎角が -4° から 8° の範囲において翼 A は石井翼よりも実測値の L/D が大きいということがわかった。これにより、石井翼よりも性能が良い翼が開発できる可能性を示す一例であると考えられる。

翼 A, 翼 B, 翼 C, 石井翼で設計時の予測値と計測結果をそれぞれ比較すると、翼 B において予測値と実際の計測結果の食い違いがおおきい。翼 B は迎角が 4° 以下では全体的に値が予測値から大きく外れており、特に迎角が 2° から 4° の範囲において設計時の予測値と実測値が大きく異なっている。その一方で、翼 A や翼 C では設計時の予測値と実測値の間で翼 B ほど大きく異なっている領域はない。このような翼 A, 翼 C と翼 B との翼形を比較すると、翼 A と翼 C ではキャンバが比較的小さく、翼の前縁と後縁の高さがほとんど同じ形状となっている。また、2つの翼はどちらも迎角が -7° から 20° の範囲での L/D の最大値が 10 以上であり、石井翼と同等またはそれ以上の値が出ている。一方で、翼 B では翼の後縁が前縁よりも下がっており、迎角が -7° から 20° の範囲での L/D の最大値が 10 以下と石井翼を下回る結果となった。この比較より、翼 A や翼 C のようにキャンバをつけすぎず翼の前縁と後縁をほとんど同じ高さにする構造のほうが、翼 B のようにキャン

バを大きくして翼の後縁を下げる構造よりも、翼の性能が良くなる傾向がある。また翼 A は翼 C より実測値の L/D が大きく、形状が上下対称な翼 C より、キャンバが大きすぎず、小さすぎず、適当な大きさで緩やかについているほうが性能が高いことがわかる。

翼 B の異常値についての考察では、設計時に用いたソフトウェア xflr5 についての検討もできた。翼 B の設計時の予測値には迎角が 2° から 4° の範囲で実測値よりもはるかに大きい異常値が出ていて、これは翼上面に発生した渦によるものと推測された。翼 B のようにキャンバが大きいと、渦が発生するなど翼の周辺の空気の流れが複雑になる。このような場合では、xflr5 ではこの複雑化した翼周辺の空気の流れを正確に予測できないと考えられ、キャンバが大きい翼では計算結果に異常値が出やすい傾向にあると考えられる。

4. 結論

本論文は、低 Re 数である $Re=20000$ という条件下で空気力学性能の良い翼の開発を目的として実施した。石井翼を基準に 3 つの翼を設計・作成し、それぞれ設計ソフトによる予測値、実験での実測値、高度なシミュレーションによる計算値の 3 つの値を迎角ごとに出して、それらと翼形を比較しながら考察を行った。

緩やかなキャンバを持つ翼 A は石井翼より L/D が大きくなる範囲が広く、 L/D の最大値も石井翼よりも大きくなった。また予測値、実測値、計算値に大きな相違はなかった。大きなキャンバを持った翼 B は迎角が 2° 以上の範囲では石井翼より L/D が小さく、 L/D の最大値も石井翼より小さくなった。また、迎角が 2° から 4° の範囲では予測値が実測値より異常に大きい数値が出ており、翼表面で渦が発生したためと推測されこのような場合には予測用に用いた簡易的なシミュレーションでは対応出来ないことが示唆された。形状が上下対称な翼 C は石井翼と L/D で大きな差はなく、 L/D の最大値も石井翼と同じような大きさになっていた。予測値、実測値、計算値に相違はあまりなく、3 つの翼の中で最も予測と実験と計算上の数値に相違がなかった。これらをまとめて考えられることとしては、石井翼よりも翼 A のほうが性能が良いこと、キャンバの大きさが L/D の大きさに関係している可能性があること、キャンバを大きくすると予測値での異常値が見られる傾向があることである。

本研究により、作成された翼 A は Re 数が 20000 であるとき、石井翼より高い性能が得られた。つまり、 $Re=20000$ といった低 Re 数の飛行においては石井翼よりも適した翼形があり得ることを示しており、今後も低 Re 数専用の翼形の開発が求められる。本研究では、時間や資材などの点で作成できた翼形は 3 つだったが、キャンバの大きさと性能の良さを表す L/D に何らかの関係性があることが考えられた。今後、 L/D の値とキャンバの大きさとの関係や、 L/D が最も大きくなるキャンバの形状など検討していく必要がある。

謝辞

本研究は東北大学「科学者の卵養成講座」(JST 次世代科学技術チャレンジプログラム、三菱みらい育成財団)、東北大学工学研究科大西研究室の大西直文教授、桜井まほろさん、中村悠斗さん、前田黎さんのご支援のもと実施されました。この場をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

大野晴之 (2020) 火星探査航空機の主翼翼型の非定常空力特性に関する研究. Kyushu University Institutional Repository.

小池勝, 石井満 (2009) ハンドランチグライダーの空力性能. 日本航空宇宙学会論文集 Vol.57, 166-174.

André Deperrois (2013) <http://www.xflr5.tech> (2024年3月25日参照).

H. Le, P. Moin, An improvement of Fractional step methods for the incompressible Navier-Stokes equations, J. Comp. Phys. 92 (1991) 369–379.

Mark Drela (1989) XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils. Low Reynolds Number Aerodynamics, Lecture Notes in Engineering 54, 1-12.