

LESによる石井翼 (Re=23,000) の空力特性評価

野々村拓¹, 小嶋亮次², 安養寺正之¹, 大山聖¹, 藤井孝藏¹

1. 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所, 2. 東京大学大学院

Aerodynamic Characteristics of Ishii Airfoil (Re=23,000) using LES

by

Taku Nonomura, Ryoji Kojima, Masayuki Anyoji, Akira Oyama and Kozo Fujii

ABSTRACT

In this study, aerodynamic characteristics of Ishii airfoil at Reynolds number 23,000 are evaluated by large-eddy simulation. For the computational analysis, sixth-order compact scheme for spatial differencing and second-order backward differencing for temporal integration are adopted. The results show that flow around Ishii airfoil has trailing edge separation at low angles of attack, it has leading edge separation and reattachment at medium angles of attack, and it has only leading edge separation at high angle of attack. This characteristic is almost the same as that of NACA0012 which is previously studied. However, the airfoil characteristics of Ishii airfoil are much better than those of NACA0012. This is because of both enhancement in lift by pressure side camber and reduction in drag by pressure side shape.

1. はじめに

現在, JAXA の研究者を中心に火星探査飛行機の成立性が議論されている。¹⁾火星での飛行は, 密度が地球の 1/100 程度しかないことから, 低レイノルズ数条件となり, その空力設計は従来のものと大きく異なる。このため, 火星上での条件を模擬した低レイノルズ数での空力特性を把握することが重要になる。

低レイノルズ数領域での翼面上の流れ特性には, 層流剥離が起きやすいために高い迎角条件において高い揚力係数 C_L を得にくいという問題がある。²⁻⁵⁾それに加え, その剥離流が遷移できる程の高いレイノルズ数になると, 剥離した流れが翼面上に再付着し, 結果として剥離泡を形成する場合がある。この剥離泡は, 流れの非定常性を生む原因となることや, 揚力などの空力特性に影響を与えることが広く知られている。そのため, 剥離泡が存在するレイノルズ数領域での翼型設計には, 剥離泡の挙動を含む非定常流れ場の評価は必要不可欠である²⁻⁵⁾。

高レイノルズ数では剥離泡は, 迎角を増すごとに剥離泡の長さ(剥離点から再付着点までの距離)が減少する"Short Bubble"と, その逆の"Long Bubble"の2種類に分別されるが, 低レイノルズ数では, これらの特徴は曖昧となる。近年, 低レイノルズ数域での前縁半径と翼厚の大きい NACA0012 や SD7003 といった翼型上の剥離泡の挙動を Direct-Numerical Simulation(DNS)や Large-Eddy Simulation(LES)を用いた解析結果が報告されている⁶⁻⁸⁾。我々のグループでも LES を用いて厚翼(NACA0012)や薄翼(NACA0002)の非定常流れ場を解析し, その空力特性を明らかにしてきた^{9,10)}。厚翼では, 低迎角で後縁剥離, 迎角を上げていくと剥離点徐徐に前に移動し, 前縁剥離-遷移-再付着する流れ場となり, その後失速に至る。一方で薄翼では, 低迎角では付着流れであり, 迎角を上げると 3 度程度で剥離するが, 剥離点が前縁に固定され, 前縁剥離-遷移-再付着流れ場となる。この際, 剥離泡はその長さが迎角にもなって長くなり, この剥離泡のバースト後失速に至る。これら一連の研究より, 基本的な対称翼の特性が明らかになってきた。

しかしながら, 低レイノルズ数では

- 1) 前縁がとがっていること(剥離点を固定しレイノルズ数依存性を減らす)
- 2) 翼上面がフラットである(剥離領域を小さくする)
- 3) 翼下面でのキャンバが強い(翼下面での揚力を稼ぐ)

といった特性が重要であることが知られている¹⁻²⁾。大山ら¹¹⁾は火星大気環境において迎角を 2[deg]に固定し, 二次元翼型周りの流れを Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS)方程式によって数値解析し, C_L 最大, 抗力係数 C_D 最小を目的関数とした二次元翼型の最適化進化計算を行なった。大山らの結果からも上記の翼型形状特性の一部が低レイノルズ数で良いことが得られている¹¹⁾。

このような翼型形状をもち, 低レイノルズ数で性能の良いものとして, 石井翼が挙げられる。この翼は前述の,

- 2) 翼上面がフラットである(剥離領域を小さくする)
- 3) 翼下面でのキャンバが強い(翼下面での揚力を稼ぐ)

といった形状特性をもっていると考えられる。しかしながら, これまでの実験計測では, 性能が良いことは分かっているが, 何故性能が良いのかといったことには未だ答えられておらず, 剥離泡の挙動を含めた非定常流れ場の特性も十分に明らかになっていない。

そこで本研究では, 低レイノルズ数で性能が良い火星探査飛行機の翼型として検討されている石井翼を対象に, 3次元の LES 計算を行いその非定常流れ場を明らかにするとともに, この翼型の空力性能が良い理由を明らかにしていく。

2. 解析対象

本研究では, 石井翼型まわりの流れ場特性を解析した。一樣流速度は問題の簡単化のために圧縮性を無視できる範囲内で, 計算効率を考えマッハ数 0.2 とした。レイノルズ数は, 過去の他の翼型の数値計算, 同じ翼型の実験と合わせ, 23,000 とした。迎角 α を 0~9[deg]まで 1[deg]おきに変化させて LES 解析を行なった。この際流れに乱れがない理想的な条件とした。本研究で用いた翼形状を図 1 に, 解析したケースおよび比較したケースの一樣流条件および迎角 α の条件を表 1, 2 それぞれにまとめる。

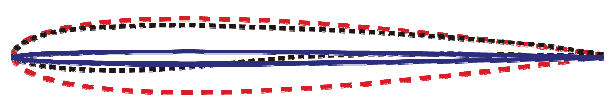


図1 翼形状. 点線: 石井翼, 破線: NACA0012, 実線 NACA0002

表1 一様流の条件

マッハ数	レイノルズ数	一様乱れ
0.2	23,000	なし

表2 迎角の条件

翼形状	迎角
石井翼	0.0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0 8.0, 9.0

3. 解析手法

ISAS/JAXA で開発された流体解析ソルバーLANS3D¹²⁾を用いて、3次元 LES 解析を行なった。以下に計算手法の詳細を示す。

3次元定常圧縮性 Navier-Stokes 方程式を支配方程式として解析を行った。支配方程式は、一様流速と翼のコード長 c によって無次元化を行っている。空間差分には6次精度コンパクト差分法¹³⁾を、数値安定性のための10次精度3重対角フィルター¹⁴⁾(フィルター係数0.495)と合わせて用いた。乱流解析には、この3重対角フィルターが最小格子幅以下での乱流のエネルギ散逸を模擬できるとし、サブグリッドスケールモデルを用いない陰的なLESを行った。また、時間積分は2次精度後退差分をADI-SGS法¹⁵⁾内部反復3回¹⁶⁾で収束させている。境界条件として、スパン方向は周期境界としてある。比較対象の計算結果の一部はRANS計算であるが、この計算手法は文献を参考にされた。

計算手順は以下のようにした。2次元流れ場を前もって計算しておき、それを3次元に拡張して初期解とし、十分流れを発達させるために、無次元時間幅 $\Delta t = 3.2 \times 10^{-4}$ で10万ステップ計算した後、さらに同じ Δt で10万ステップ計算を行った。また、後で議論する平均解は、最後の10万ステップの時間方向、さらにはスパン方向の平均である。

3D-iLES ケースの計算に用いた翼型周りのCトポロジーの格子を図2に示す。スパン方向には、コード長の20%長さをとっている。別途ほぼ同様の流れ場となるNACA0012のLES解析の際に、スパン長の影響を調べているが、20%スパン長で定性的/定量的議論が可能である¹⁰⁾。格子点数の詳細を表3に示す。また、本計算格子を用いて、 $\alpha = 6.0^\circ$ の条件で3次元LES解析を行い、その結果を時間方向、スパン方向に平均した解から算出される壁座標に基づいた、コード長方向の格子幅分布を図3に示す。図3より、本解析での計算格子は

$$\Delta \xi^+ < 25, \Delta \eta^+ < 3, \Delta \zeta^+ < 15$$

を保っており、乱流解析には十分な格子と判断する。

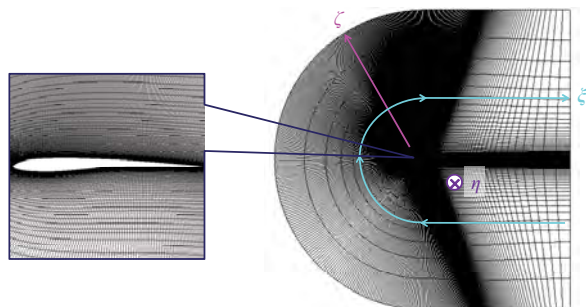


図2 計算格子

表3 計算格子点数

ξ	η	ζ
615	200	101

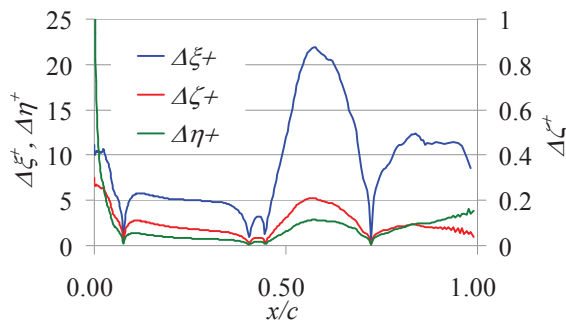


図3 格子幅の分布

4. 石井翼まわりのLES結果

4.1 石井翼周りの瞬間流れ場

LESによる計算結果の瞬間場における、速度勾配テンソルの第二不変量(Q値)の等値面をx方向渦度で色付けたものと、背景にx方向速度分布を表示した鳥瞰図を図4に迎角毎に示す。

図4の $\alpha = 0.0 \sim 3.0[\text{deg}]$ のケースにおいて、背面のx方向速度分布および渦構造(Q値)から、前縁付近では付着、後縁で迎角により一部剥離を起こして2次元渦を生成している。後縁での剥離は図からはわかりづらいが、後で平均場を用いて詳細に議論する。これらのケースでは迎角を大きくすることで後縁剥離の位置が前方に若干ながら移動している。また、上記で説明したスパン方向に軸を持つ2次元渦は剥離が見られる計算ケースの全てにおいて確認されるが、これは剥離せん断層内の速度勾配を起因としたKelvin-Helmholtz Instability(K-H不安定性)によって発生している。

次に、 $\alpha = 4.0 \sim 8.0[\text{deg}]$ では、背面のx方向速度分布から翼の最大キャンバ位置よりも前縁側で流れが剥離している。また、剥離せん断層の内側には低速の死水領域が形成されている。さらに、等値面を見ると、後縁手前にて剥離せん断層内からスパン-z方向に軸を持った渦が周期的に生成、放出されている。この渦は後縁付近において崩壊し、+xと-x方向に軸を持った渦(それぞれ赤色と青色)が繋がったようなヘアピン状の渦が形成される。背面のx方向速度分布から、これらのケースではヘアピン状の渦が発生する場所付近から後縁にかけて、剥離せん断層が消滅している。これは、上記に示した2次元渦が周期的に発生し、結果としてヘアピン状の渦が翼面上に絶えず存在することで、剥離流が再付着していると考えられる。剥離、再付着位置に関しては次の節の平均場で詳しく述べるが、 $\alpha = 4.0 \sim 8.0[\text{deg}]$ のケースでは、剥離→遷移→再付着する流れ場となる。

最後に $\alpha = 9.0[\text{deg}]$ のケースに関してだが、迎角の増加によって前縁からの剥離せん断層の角度が増し、翼面から離れている。低い迎角の結果と同様に、剥離せん断層の途中から発生した2次元渦が崩壊して縦渦を生ずるが、巻きこまれた縦渦が翼面上を移流することで剥離を抑えられた $\alpha = 4.0 \sim 8.0[\text{deg}]$ のケースとは異なり、 $\alpha = 9.0[\text{deg}]$ のケースでは3次元縦渦が翼面から離れる方向に伸びていくと共に、翼面付近では流れ方向とは逆向き流れが存在している。これも同様に後の平均場にて示すが、このケースでは剥離した流れが再付着しない前縁失速型の流れ場となる。

このような翼上面流れ場の遷移は、過去の研究⁽⁹⁻¹⁰⁾でNACA0012翼で見られた流れ場パターンと全く同様である。上記では石井翼の翼下面流れ場は議論していないが、全ての迎角で付着しており、これも過去の研究でNACA0012翼で見られた流れ場パターンと全く同様である。

4.2 石井翼周りの平均流れ場

LES 解析によって得られた解を時間方向、スパン方向に平均した解(以下、平均解)の議論および比較検討を行う。

平均解の x 方向速度分布と断面内流線(黒線：外部流，白線：循環流)を迎角毎に図 5 に示す。瞬間場での議論と同様， $\alpha=0.0\sim 3.0$ [deg]では後縁付近から剥離する後縁剥離流れとなっている。 $\alpha=4.0\sim 8.0$ [deg]では，崩壊して形成された 3 次元的な渦が翼面に沿って移流していたが，平均場では結果として，剥離流が翼面に再付着している。また，剥離せん断層からは 2 次元的な渦が周期的に放出されるが，平均場では剥離せん断層と再付着する流線の内側に閉じた循環領域が形成されている。これが剥離泡である。

最後に， $\alpha=9.0$ [deg]では，剥離した流れが再付着することなく後縁を通りすぎ，前縁型の失速を起こしている。また剥離流の内側には翼面全体に渡って循環領域が形成され，翼面に沿って流れが逆流している。平均場に関しても，その特性は NACA0012 のそれとほぼ同様である。剥離形態を表にまとめる。

次に平均場から得られた C_f を基に作成した剥離再付着点位置を図 6 に示す。 $\alpha=0.0$ [deg]では付着流れとなっている。また $\alpha=1.0\sim 3.0$ [deg]で後縁剥離を起こしており，迎角が大きくなるにつれて一気に剥離点が前方に移動することがわかる。 $\alpha=4.0\sim 8.0$ [deg]において剥離点が最大化キャンバ位置よりも前方に存在する前縁剥離となり，迎角が上がるにつれて剥離点は少しずつではあるがさらに前方に移動する。剥離した流れは後縁で再付着する。再付着する点は， $\alpha=4.0\sim 5.0$ [deg]では前方に移動するが， $\alpha=7.0\sim 8.0$ [deg]では後方に移動する。このことからこの剥離泡を Short Bubble, Long Bubble に特徴づけることは難しい。最後に $\alpha=9.0$ [deg]では再付着することなく，剥がれた流れ場となる。平均場で得られた流れ場も，迎角が上がるに連れて，後縁剥離，前縁剥離再付着，前縁剥離と変化する流れ場になっており，NACA0012 と同様の流れ場構造といえる。

4.3 石井翼周りの空力係数

平均場から得られた C_p 分布を図 7 に示す。 $\alpha=0.0\sim 3.0$ [deg]では，上面の圧力分布は前縁付近で負圧のピークが観察され，その後なだらかに負圧が弱まっていく。一方下面では，後縁側で正圧が上昇している。これは後述する高迎角でも同様であり，下面後縁側のキャンバによるものである。

一方 $\alpha=4.0\sim 8.0$ [deg]では，上面の圧力分布は前縁付近で負圧のピークが観察されるのは変わらないが，その後流れ場の考察で議論した剥離泡の部分でフラットな圧力分布が得られており，乱流遷移，再付着する部分で急激に負圧が小さくなる。下面の圧力分布は後縁側のキャンバ部分で正圧を稼いでおり，低迎角と同様の特性を持っている。

$\alpha=9.0$ [deg]では，流れ場としては失速した状態であり，上面の圧力分布は前縁部分を除き全体的にフラットな分布となっている。

次に， C_L ， C_D ，揚抗比 L/D 分布を図 8, 9, 10 にそれぞれ示す。図 8 より， C_L は迎角に対しおおよそ線形に増えていくが，流れ場の特徴が変わる $\alpha=0.0\sim 3.0$ [deg]において若干の傾きの変化が見られる。図 9 より， C_D は迎角に対しおおよそ，2 乗で増えており，一般的な翼型の抵抗特性と同様である。図 10 より， L/D 分布より， L/D 最大は $\alpha=4.0$ [deg]で 18 程度をとっている。この値は 対称翼と比較すると非常に高い値である。一般的な高レイノルズ数流れに比べ高い迎角で L/D 最大となる。これは過去の研究で議論されており，粘性抵抗が大きいため，高迎角を取って圧力抵抗を一部大きくなったとしても大きな揚力を取るメリットが大きいためである。

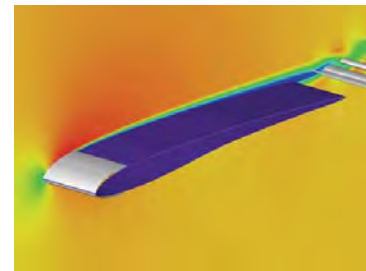
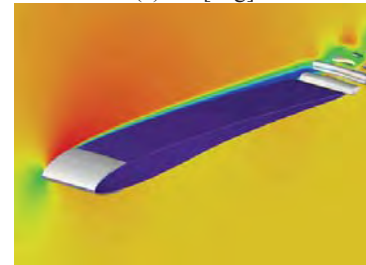
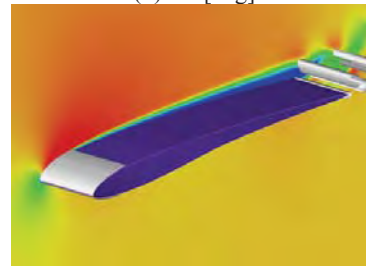
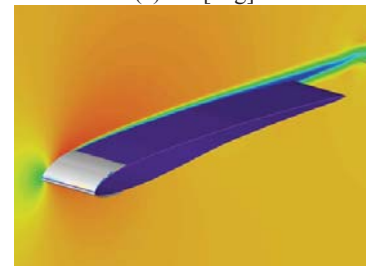
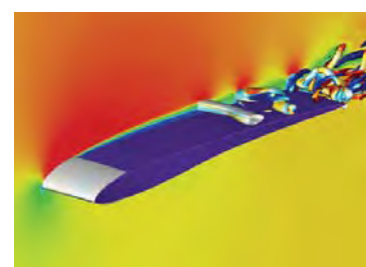
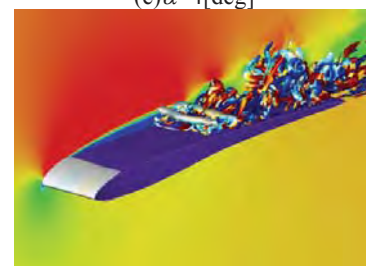
(a) $\alpha=0$ [deg](b) $\alpha=1$ [deg](c) $\alpha=2$ [deg](d) $\alpha=3$ [deg](e) $\alpha=4$ [deg](f) $\alpha=5$ [deg]

図 4 瞬間流れ場，背景：速度分布，等値面：速度勾配テンソルの第 2 不変量

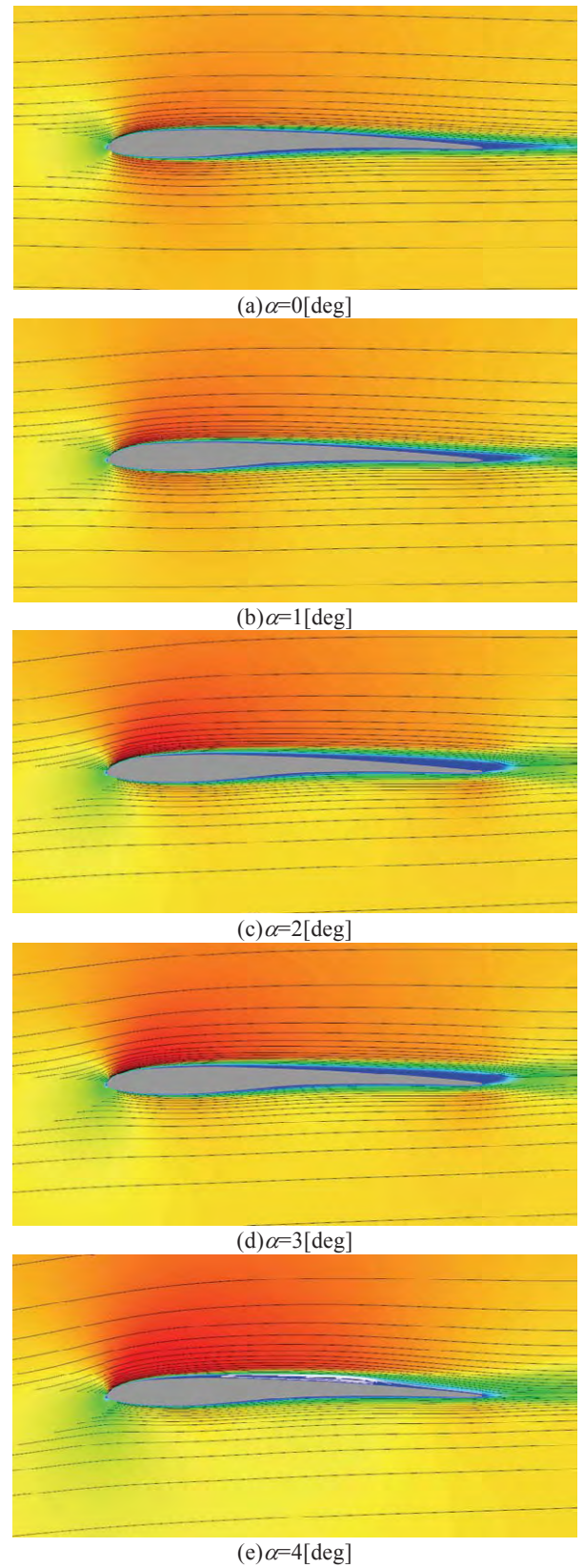
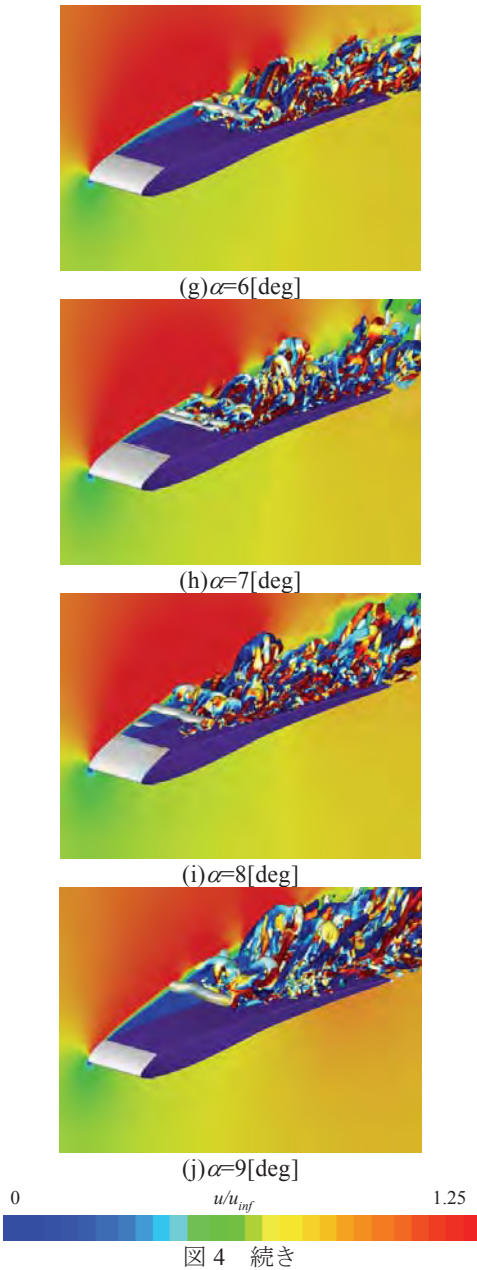
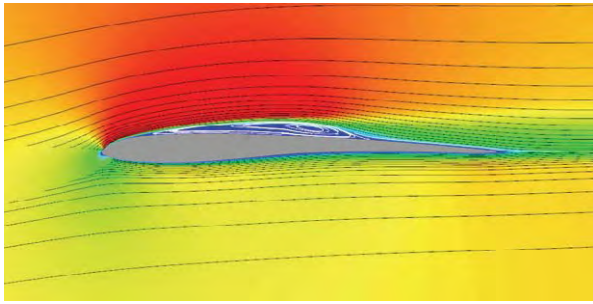
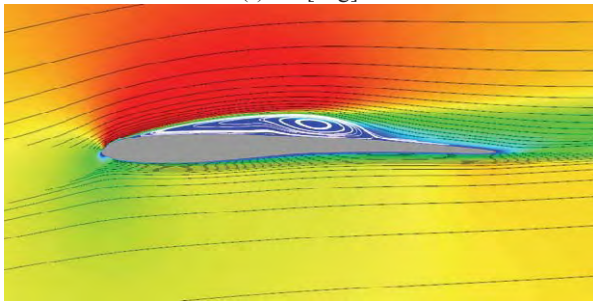


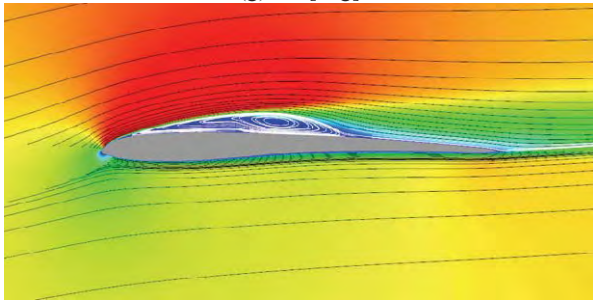
図5 平均流れ場，背景：速度分布，黒線：付着流れの流線，白線：循環流れの流線



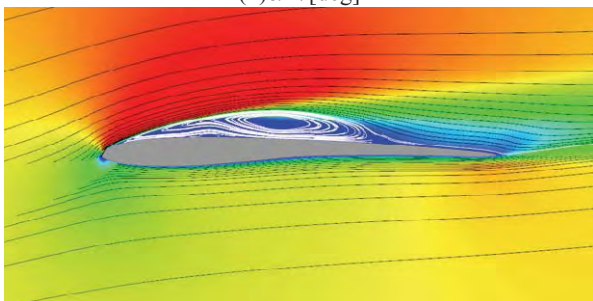
(f) $\alpha=5$ [deg]



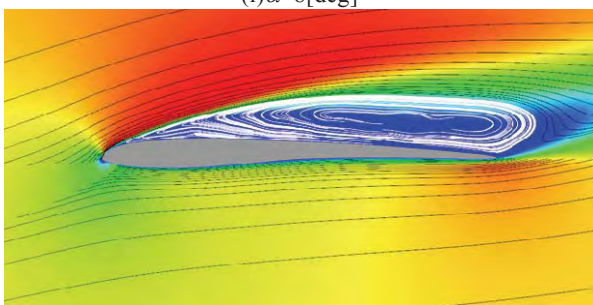
(g) $\alpha=6$ [deg]



(h) $\alpha=7$ [deg]



(i) $\alpha=8$ [deg]



(j) $\alpha=9$ [deg]

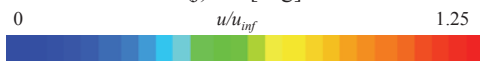


図5 続き

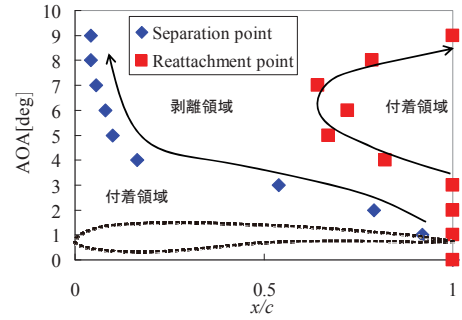
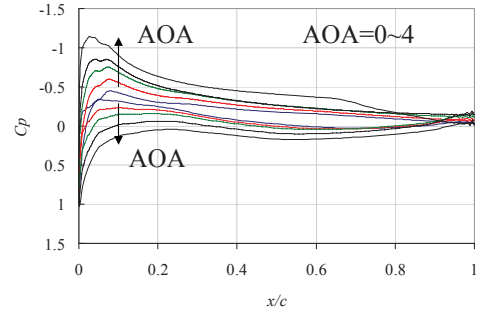
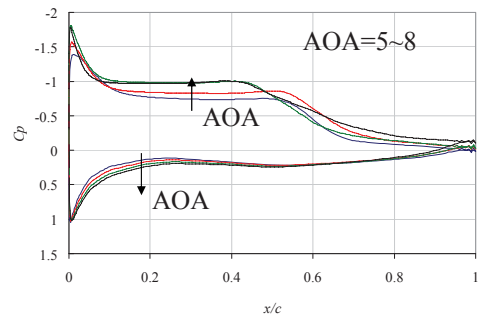


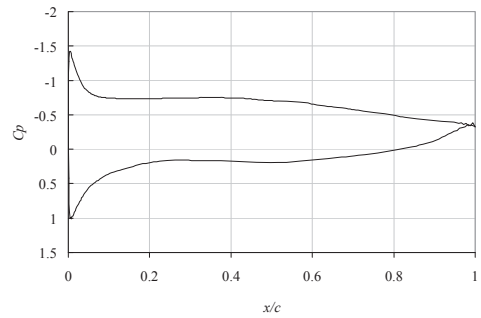
図6 石井翼まわりの流れ場の剥離点, 再付着点位置



(a) $\alpha=0.0\sim 4.0$ [deg]



(a) $\alpha=5.0\sim 8.0$ [deg]



(c) $\alpha=9.0$ [deg]

図7 石井翼周りの C_p 分布

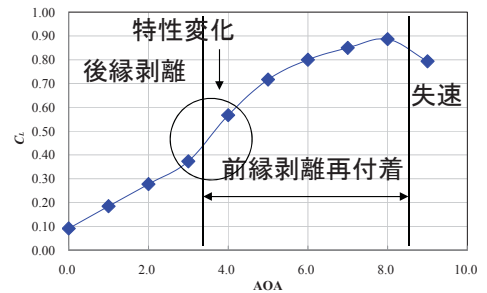
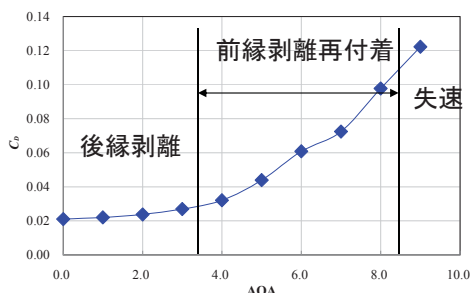
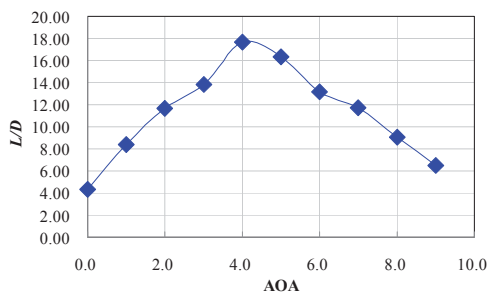


図8 石井翼の C_L

図9 石井翼の C_L 図10 石井翼の C_L

5. 結言

本論文では、石井翼まわりの流れの LES 解析を行い、流れ場の詳細を明らかにするとともに、その結果を他の翼型と比較してその高い空力特性の理由を議論した。

流れ場の特性は迎角を上げるに従い後縁剥離、前縁剥離再付着、前縁剥離となり、厚翼の流れ場と全く同一のものとなった。一方で、空力係数で比較すると一般的な厚翼よりも性能が非常に高いことが分かった。これは下面キャンバに起因していることが明らかになった。これらの結果は低レイノルズ数での翼型設計には、下面の形状が大きく影響を与えることを示唆している。本知見から今後最適な翼型設計の際に注意して下面の形状を選ぶ必要があることが明らかとなった。

謝辞

数値解析には JAXA の JSS を用いた。ここに記して謝意を表す。火星探査航空機 WG 空力班のメンバには本研究に対し貴重なコメントを頂いた。

参考文献

- 1) <http://flab.eng.isas.jaxa.jp/meav/>.
- 2) Schmitz, F. W., "Aerodynamics of the Model Airplane Part1," RSIC-721, 1967.
- 3) Schmitz, F. W., "The Aerodynamics of Small Reynolds Number," NASA TM-51, 1980.
- 4) 李家賢一, "翼型上に生ずる層流剥離泡" ながれ 22, 15-22, 2003.
- 5) Lissaman, P. B. S., "Low-Reynolds-number Airfoils," Annual Review in Fluid Mechanics," pp.223-239, 1983.
- 6) Shan H, Jiang L, Liu C., "Direct numerical simulation of flow separation around a NACA 0012 airfoil," Computers & Fluids 34, 1096-1114, 2005.
- 7) Galbraith, M. C., & Visbal, M. R., "Implicit Large Eddy Simulation of Low-Reynolds-Number Transitional Flow Past the SD7003 Airfoil," AIAA paper 2010-4737, 2010.
- 8) 中江雄亮, 本橋龍郎, 小紫誠子, 桑原邦郎, "低レイノルズ数領域における NACA0012 翼型周りの 3 次元流れのシミュレーション," 数理解析研究所講究録, 1539 巻, pp. 157-164, 2007.
- 9) R. Kojima, T. Nonomura, A. Oyama, and K. Fujii, "Large-Eddy Simulation of the flow over a Thin Airfoil at Low

Reynolds Number," ICCFD6, 2010.

- 10) 小嶋亮次, 野々村拓, 大山聖, 藤井孝藏, "低レイノルズ数における厚翼と薄翼周り流れの iLES 解析による特性比較," 第 24 回数値流体力学シンポジウム, 2010.
- 11) Akira Oyama, and Kozo Fujii, "A Study on Airfoil Design for Future Mars Airplane," AIAA Paper 2006-1484, 2006.
- 12) K. Fujii, and S. Obayashi, "High-resolution upwind scheme for vortical-flow simulations" Journal of Aircraft, Vol. 26, pp 1123-1129, 1989.
- 13) Lele, S.K., "Compact Finite Difference Scheme with Spectral-Like Resolution," Journal of Computational Physics, Vol. 103, pp. 16-22, 1992.
- 14) Gaitonde, D. V. and Visbal, R. M., "Pade Type Higher-Order Boundary Filters for the Navier-Stokes Equations," AIAA Journal, Vol. 38, No. 11, p. 2103-2112, 2000.
- 15) 藤井孝藏, "有限体積法の最前線—高速気流計算法の最近の動向", 日本計算工学会誌, 第 3 巻, 第 3 号, p. 158-166, 1998.
- 16) Chakravarthy, S. R., "Relaxation Methods for Unfactored Implicit Upwind Schemes," AIAA Paper 84-0165, 1984.