

低 Re 数での連結円弧翼型の空力特性における最大キャンバー位置の影響

伊丹達生¹⁾, 大竹智久²⁾, 村松旦典²⁾, 本橋龍郎²⁾

1) 東北大学院, 2) 日本大学理工学部

Influence of Maximum Camber Position on the Aerodynamic Characteristics of Contact Circular Arc Airfoil at Low Reynolds Number

by

Tatsuo Itami, Tomohisa Ohtake, Akinori Muramatsu and Tatsuo Motohashi

ABSTRACT

A contact circular arc airfoil was shaped from two circular arc airfoils with different radius of curvature. We carried out two-dimensional numerical simulation in order to clarify influences of maximum camber position on aerodynamic characteristics of the airfoil at Reynolds number of 40,000. The move of the maximum camber position brought about a change of flow field with vortices structure around the airfoil, and changes of the aerodynamic characteristics of the airfoil were observed with this flow field changing. Maximum lift to drag ratio also show a maximum value when the maximum camber position has a near by 30% chord length of the airfoil.

1. はじめに

昨今、災害現場の映像収集や環境観測などを目的とした MAV (Micro Air Vehicles) が注目されている。このクラスの航空機は、翼弦長 c を基準とするレイノルズ数が一般の航空機と比べて小さくなるため、概ね $10^4 \sim 10^5$ のオーダー程の低いレイノルズ数領域で飛行することになる。このような低いレイノルズ数領域で使用される翼の設計・製作を行う場合、翼型の空力特性データが高いレイノルズ数領域でのデータに比べて少ないことが問題となる。

岡本¹⁾は翼弦長を基準としたレイノルズ数 $Re = 1,600$ から $10,000$ における低いレイノルズ数領域において様々な翼型を用いた風洞実験を行い、薄翼の中でも特に円弧翼型が他の翼型に比べて良好な空力特性が得られることを報告している。この点に着目し晝間ら^{2,3)}は、翼弦長が 150 mm 、飛行速度が約 4 m/s の MAV の製作を想定した $Re = 40,000$ における円弧翼型 (翼厚比 $t/c = 1\%$) におけるキャンバー強さと空力特性の関連性について2次元数値計算を用いて調査した。また、大山ら⁴⁾は、低いレイノルズ数領域で使用する翼型について揚抗比の最大化を目的とした最適化を行った結果、その翼型は前縁から 30% 翼弦付近に最大キャンバー位置を持つ翼厚比が薄い翼型となる事を示している。したがって、円弧翼型においても最大キャンバー位置を変化させることで揚抗比が向上すると予測できる。

以上のような背景から、本研究では円弧翼型の最大キャンバー位置を翼弦方向に変化させた際の空力特性の変化を調査するため、2つの円弧を最大キャンバー位置で連結させた連結円弧翼型を定義し、その翼型まわりの2次元数値計算を行った。その結果により得られた翼型まわりの流れ場から、最大キャンバー位置と空力特性の関連性について考察したので報告する。

2. 解析対象翼型

Fig.1 に連結円弧翼型の断面形状の概略図を示す。この翼型は、曲率半径 R_1, R_2 をもつ2つの円弧を最大キャンバー位置 MCP (Maximum Camber Position) で接するように連結させている。翼厚比は翼弦長の 1% とし、最大キャンバーは翼弦長の 6% とした。なお、前縁・後縁部は半円形状である。

3. 計算手法

3-1) 支配方程式

支配方程式は、無次元化された連続の式と2次元非圧縮性 NS 方程式である。

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{V} \quad (2)$$

解法には MAC 法を採用し、時間項の積分には二次精度ルンゲ・クッタ法、移流項には3次精度 K-K スキーム、その他の項には中心差分を用いた。

3-2) 計算格子

Fig.2 に計算格子の概略図を示す。格子のトポロジーには O 型格子を適用した。翼表面から外部境界までの距離は翼弦長の 10 倍であり、格子数は周方向に 360 点、放射方向に 100 点とした。翼表面付近の最小格子幅は、境界層による影響を考慮するため周方向・放射方向ともに 10^{-4} のオーダー⁵⁾となるように設定した。

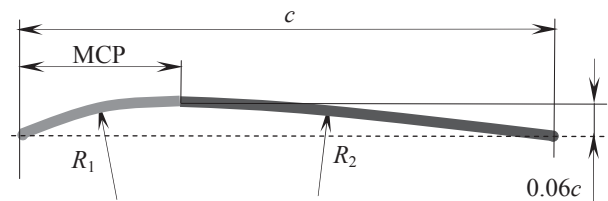


Fig.1 Schematic diagram of Contact Circular Arc Airfoil.

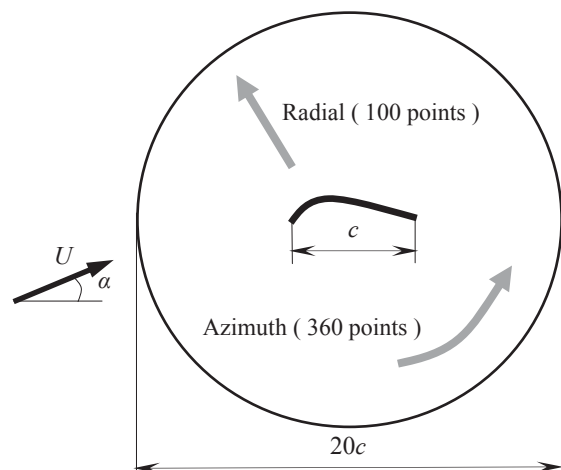


Fig.2 Computational domain.

3-3) 計算条件

計算に用いたレイノルズ数は、晝間らの計算結果と比較するため $Re = 40,000$ とした。最大キャンバー位置は $MCP = 0.2c$ から $0.8c$ まで $0.1c$ 刻みで変化、迎え角 α は -5.0 deg から 15.0 deg まで変化させた。

各境界での境界条件は、速度に関しては内部境界（翼面上）ではすべりなし条件、外部境界では流入面に対して一様流条件、流出面に対して 0 次外挿である。圧力に関しては内部・外部境界ともにノイマン条件である。

4. 結果・考察

Fig.3 に本研究の計算により得られた最大キャンバー位置ごとの揚力係数、抗力係数、縦揺れモーメント係数、揚抗比および極曲線の変化を示す。それぞれの値は、流れ場が安定したと判断できる無次元時間 30 から 60 での時間平均値である。翼型まわりの流れ場に対する 2 次元数値計算を行う際には、翼面上に大規模な剥離を伴う流れ場が現れるような高い迎え角の場合、翼面上の渦構造が実際の流れ場よりも強く評価されてしまう傾向がある。そのため、計算結果から求められる空力特性は、同一条件での実験結果と比べて大幅に乖離してしまう^{3,6)}。円弧翼型を用いた風洞実験結果と数値計算結果との比較³⁾では、迎え角がおおよそ -5.0 deg から 10.0 deg の範囲で数値計算結果と実験結果が良い一致を示すことで計算の妥当性が確認されているため、本報告でも同様の迎え角範囲において妥当な計算結果が得られていると判断した。

4-1) 最大キャンバー位置と空力特性の関連性

最大キャンバー位置 MCP による揚力係数 C_l の違いは他の空力特性の計算結果と比べてあまり観察されない。迎え角 -2 deg 付近から 7 deg までの範囲に着目すると、最大キャンバー位置の違いにより揚力係数の値が変化している様子が観察できる。このときの揚力係数の増加量は、 $MCP = 0.2c$ に対して $MCP = 0.8c$ で最大約 0.2 となる。また、この迎え角範囲では局所的に揚力傾斜が増加することで揚力曲線が不連続となり、最大キャンバー位置の違いにより不連続箇所が現れる迎え角および揚力傾斜の増加量が変化していることも観察できる。

抗力係数 C_d については、最大キャンバー位置によらず迎え角 -5.0 deg から 0.0 deg ではほぼ同じ値を示している。 $MCP = 0.8c$ の場合には迎え角 -0.4 deg 付近で最小抗力係数 $C_{d \min}$ を示し、 $MCP < 0.8c$ (最大キャンバー位置が前縁側へ移動) の範囲では MCP の減少に伴い $C_{d \min}$ の減少および $C_{d \min}$ となる迎え角 $\alpha_{C_{d \min}}$ の増加が確認でき、最大キャンバー位置が最も前縁側となる $MCP = 0.2c$ では、 $C_{d \min} = 0.0261$ 、 $\alpha_{C_{d \min}} = 1.0 \text{ deg}$ となる。それぞれの最大キャンバー位置での抗力係数の変化は、迎え角が $\alpha_{C_{d \min}}$ より大きくなると放物線状の増加を示すが、 $MCP = 0.2c$ の場合についてはこの関係に当てはまらず、迎え角 7 deg 付近で迎え角に対して不連続な抗力係数の増加を示す特異な変化が現れている。

縦揺れモーメント係数 $C_{m \ c/4}$ は、最大キャンバー位置や迎え角の変化によらず常に頭下げの特性を示している。最大キャンバー位置が前縁に近いほど縦揺れモーメント係数は小さくなり、一定値に近づく ($MCP = 0.2c$ では $C_{m \ c/4} = -0.09$)。それに対して、最大キャンバー位置が後縁に近づくほど迎え角の変化に対して縦揺れモーメント係数が下に凸形状の変化となり、 $MCP = 0.8c$ のとき迎え角 1 deg で $C_{m \ c/4} = -0.20$ を示す。

揚抗比に関しては最大キャンバー位置が前縁に近づけるほど、より高い揚抗比が得られるわけではないことがわかる。Fig.4 に最大キャンバー位置に対する最大揚抗比の変化を示す。 $MCP = 0.0c$ および $1.0c$ は、連結円弧翼型の形状の

定義から、翼型を平板翼として数値計算を行った際の最大揚抗比である。この結果から、 $MCP = 0.3c$ のときに最大揚抗比の変化はピーク値を示し、その値は 28.4 となる。また、最大キャンバー位置と最大揚抗比の関係は、おおよそ図中に示した曲線で近似できることが分かる。

4-2) 流れ場・圧力分布の変化

最大キャンバー位置の違いが流れ場に与える影響を考察するため、翼型まわりおよび翼面上の圧力分布の変化を議論する。Fig.5 に翼型まわりの圧力コンター図（瞬時値）を、Fig.6 に翼面上の圧力分布（時間平均値）を示す。各図とも $MCP = 0.5c$ を基準として最大キャンバー位置が前縁側に位置する場合および後縁側に位置する場合の代表例を示している。

翼型まわりの圧力場 (Fig.5) を見てみると、最大キャンバー位置の違いにより異なった渦構造を持つ流れ場が翼面上に現れることが分かる。迎え角 3 deg を例にとると、 $MCP = 0.2c$ では渦が翼の上下両面に現れるが、 $MCP = 0.5c$ では後縁付近の後流内でのみ渦が観察でき、 $MCP = 0.8c$ になると翼上面の前縁付近で剥離泡に伴う弱い渦、後縁付近で比較的強い渦の発生が観察できる。

翼面上の圧力分布 (Fig.6 左図) は、最大キャンバー位置を変化させても大きく変化しない。圧力分布の変化から翼上面における剥離泡の形成が考えられる領域 (Fig.6 中の斜線部で示した領域) は最大キャンバー位置の変化に依存して大きさを変えるが、翼面上の圧力分布形状を極端に変化させてはいない。最大キャンバー位置が変化しても翼型の上・下面の圧力分布の総和が大きく変化しないため、揚力係数も大きく変化していないと考えられる。Fig.6 の右図から、最大キャンバー位置が前縁側に位置すると圧力に起因した局所的な空気が、より強く推力方向に作用することが分かる。そのため、最大キャンバー位置の変化に伴い抗力係数が増減していると考えられる。

4-3) 翼面上の剥離泡の挙動

Fig.7 に、各最大キャンバー位置における翼面上で観察される剥離泡の挙動を示す。各図中の縦軸は前縁からの翼弦位置を示しており、プラス側が上面側、マイナス側が下面側での剥離点および再付着点を表している。基準となる $MCP = 0.5c$ では、迎え角が 2 deg から 3 deg にかけて翼の上下面ともに剥離泡が存在していないことが分かる。このような翼面上に剥離泡が存在しない迎え角の範囲は、 $MCP = 0.2c$ 以外の計算結果で確認できる。また、この迎え角の範囲の大きさは、最大キャンバー位置が前縁方向へ移動すると広く、後縁側へ移動すると狭くなる変化を示している。しかし $MCP = 0.2c$ では、翼面上に剥離泡が存在しない迎え角が無くなり、常にどちらかの翼面上に剥離泡が形成され、迎え角 4 deg から 5 deg の範囲では翼の上下面に同時に剥離泡が形成されている。また、迎え角 4 deg から 8 deg の範囲で、翼上面側での剥離点がほぼ 20%翼弦位置に現れている、つまり最大キャンバー位置の直後で境界層の剥離が発生していることも他のケースと異なっている。

剥離泡の大きさの変化について見てみると、 $MCP = 0.3c$ と $0.5c$ では、翼上面側の再付着点が迎え角の増加とともにほぼ線形的に後縁側へと移動し、 $MCP = 0.5c$ では迎え角 10 deg で翼弦の 60%ほどの大きさを持つ剥離泡が形成されていることが確認できる。同様に $MCP = 0.8c$ でも再付着点が線形的に増加していくが、迎え角が約 6 deg 付近でその増加は頭打ちとなり、その後迎え角 9 deg に至るまで再付着点が 10%ほど減少する傾向が現れる。また、このときの翼面上での再付着点は、最大キャンバー位置 ($MCP = 0.8c$) の手前となっている。それに対し $MCP = 0.3c$ と $0.5c$

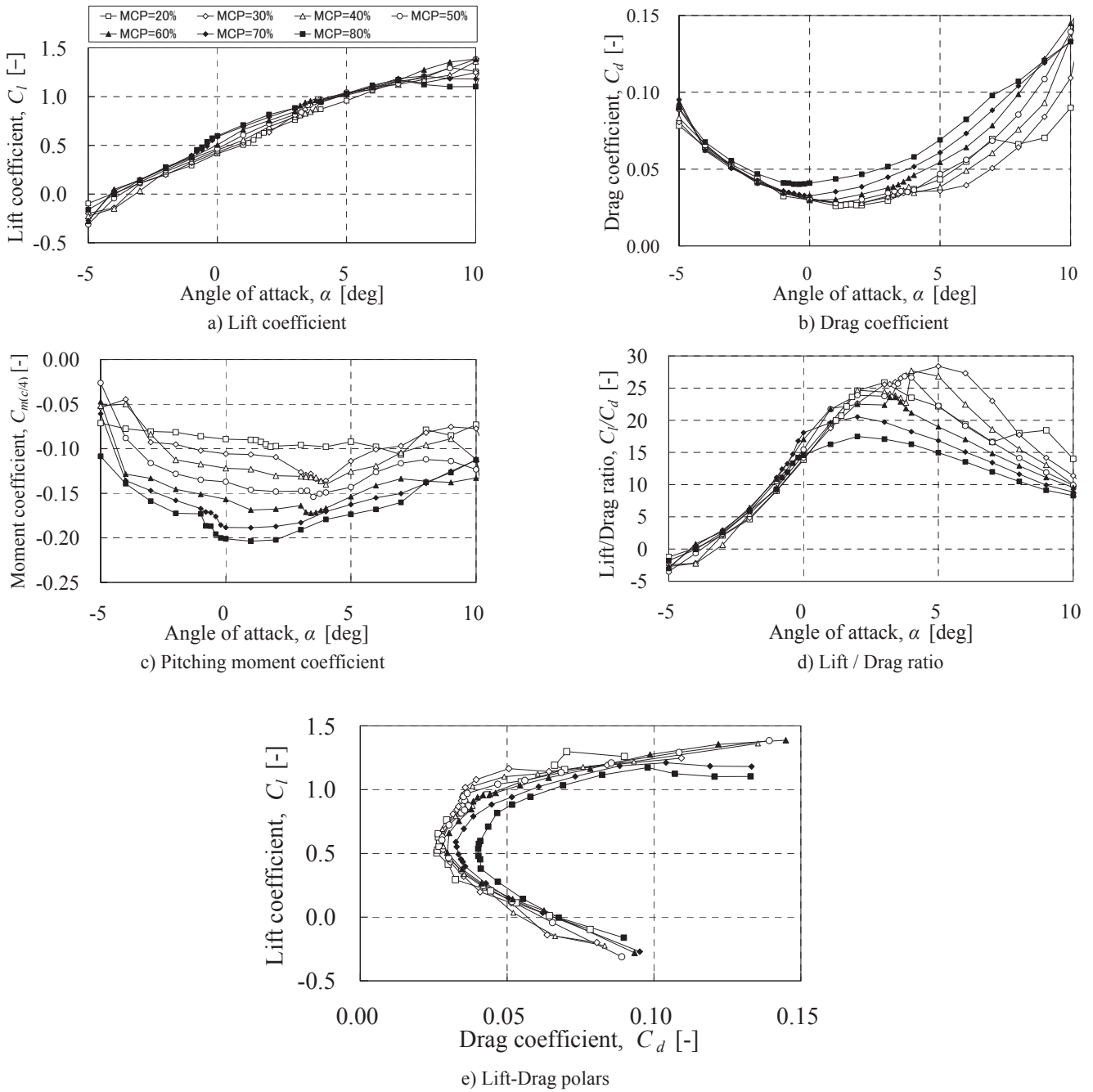


Fig.3 Aerodynamic characteristics of the airfoil at $Re = 40,000$.

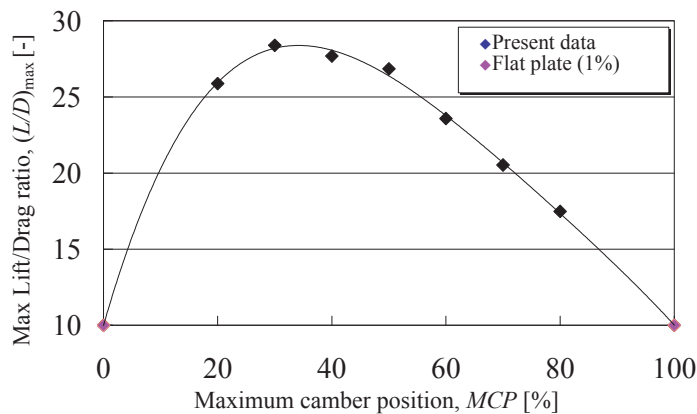


Fig.4 Distribution of $(L/D)_{max}$ varied maximum camber position.

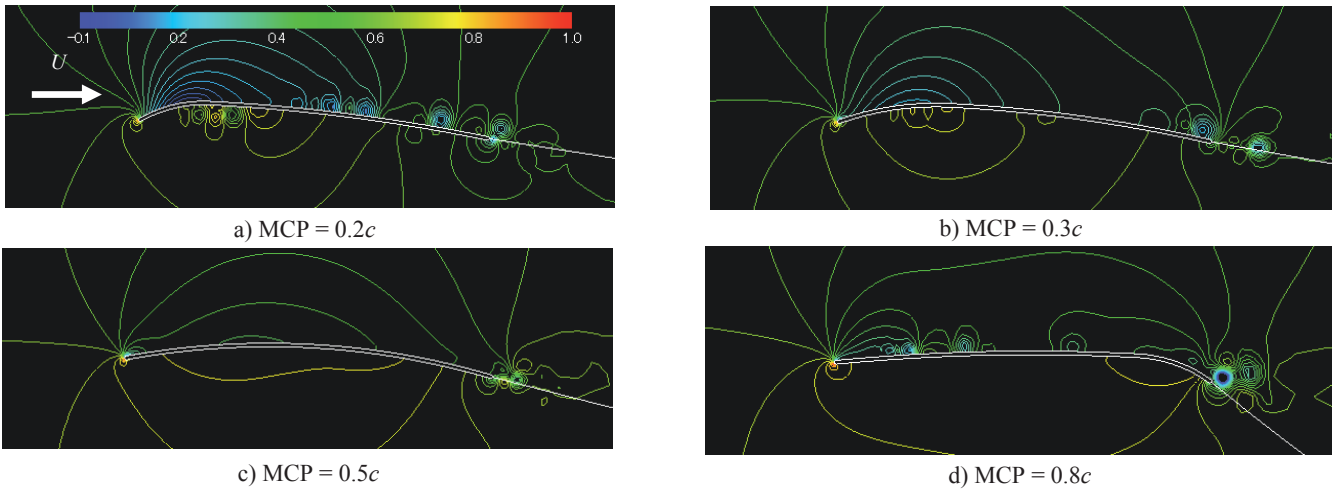


Fig.5 Instantaneous pressure contours around the airfoil ($\alpha = 3.0$ deg, $Re = 40,000$).

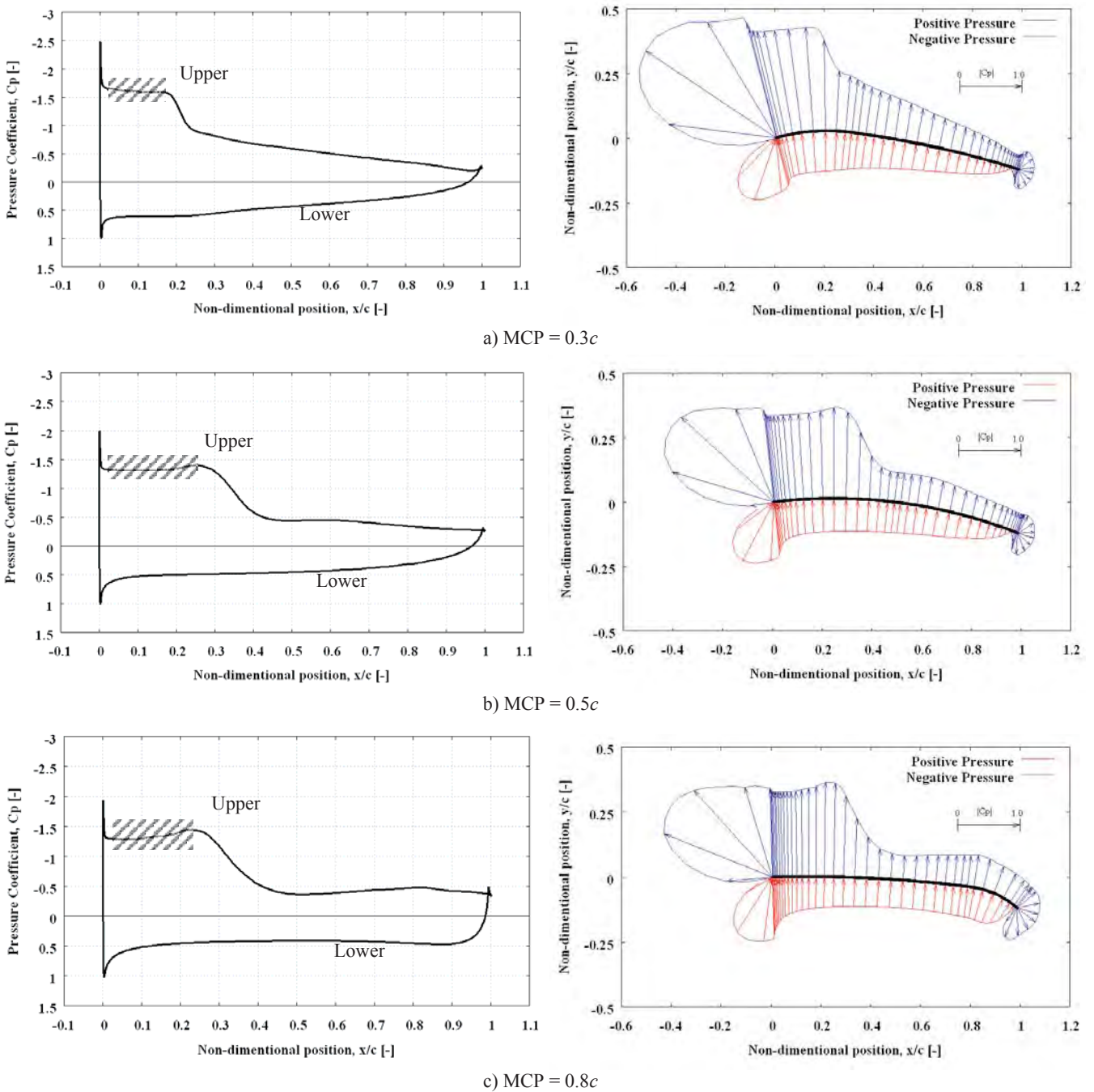


Fig.6 Time averaged pressure distributions on the airfoil ($\alpha = 7.0$ deg, $Re = 40,000$).

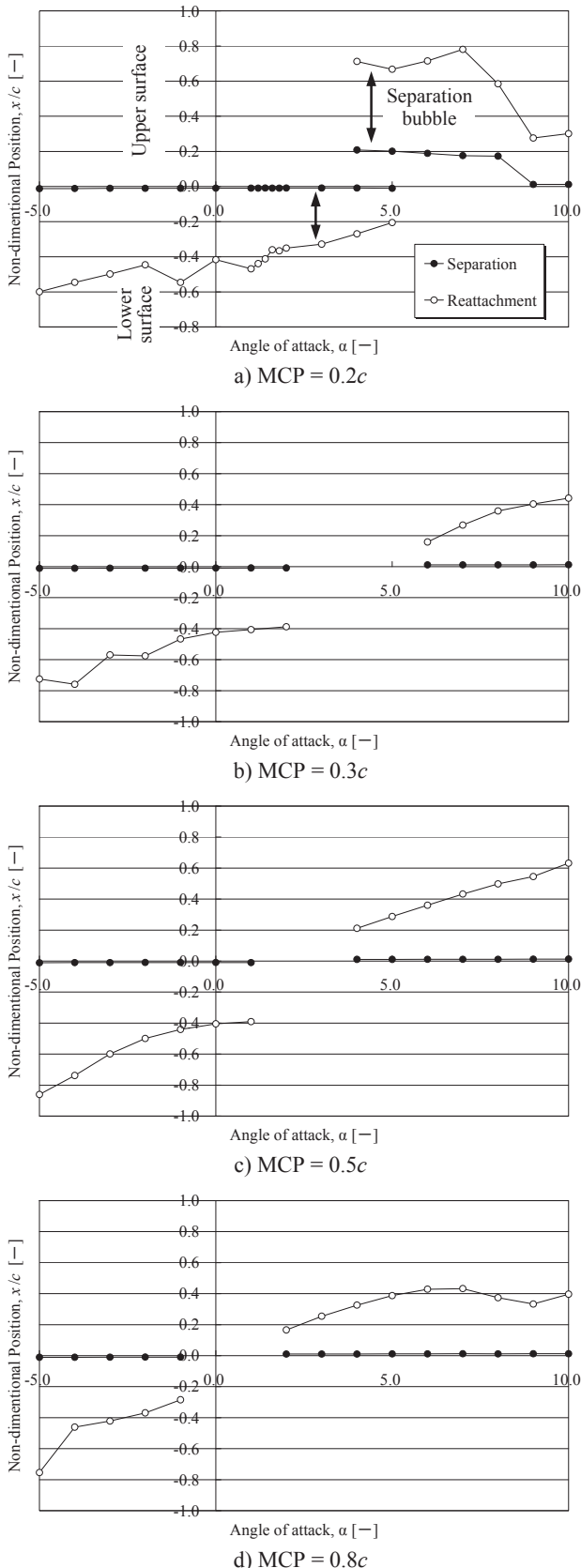


Fig.7 Distribution of separation bubble on the airfoil varied maximum camber position ($Re = 40,000$).

の場合では、迎え角の増加に伴い再付着点が最大キャンバー位置を超える流れ場となっている。一方、 $MCP = 0.2c$ の場合では、翼面上での剥離泡の大きさは迎え角の増加とともに翼弦の 50%から 60%の大きさを維持したのち、再付着点が急速に前縁側へと移動したことにより迎え角 9 deg では剥離泡の大きさが翼弦の約 30%程度まで縮小する。このような迎え角の変化に対する剥離泡の大きさ・発生位置の急激な変化が、 $MCP = 0.2c$ のときに観察された特異な抗力係数の変化に影響を与えていたと考えられる。

このように最大キャンバー位置の変化は、流れ場内の渦構造にも影響を与えるだけではなく、翼面上の剥離泡の発生位置や大きさの変化にも影響を与えていることが分かる。

5. むすび

本研究では低いレイノルズ数領域での代表例として、 $Re = 40,000$ における連結円弧翼型の最大キャンバー位置が空力特性に与える影響を調査するため2次元数値計算を行い、以下のような知見を得ることができた。

- ・ 最大キャンバー位置を前縁側に移動すると空力特性が向上し、後縁側に移動すると悪化する。
- ・ $MCP = 0.3c$ 付近で最も高い最大揚抗比が得られ、その値は約28となる。
- ・ 最大キャンバー位置の違いにより翼型まわりの流れ場には特徴的な渦構造を持つ変化が現れる。

参考文献

- 1) 岡本正人：“低レイノルズ数における定常・非定常翼型空力特性の実験的研究”，日本大学博士論文（2005）。
- 2) 晝間洋樹，大竹智久，本橋龍郎：“低レイノルズ数における円弧翼型の空力特性の解析”，第41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（2009），pp.51-54。
- 3) 晝間洋樹，大竹智久，本橋龍郎：“6%円弧翼型を用いた低い Re 数での空力特性と流れ場について”，第47回飛行機シンポジウム（2009），pp.194-198。
- 4) 大山聖，藤井孝蔵：“低レイノルズ数翼型の設計最適化”，日本流体力学会年会2004講演論文集（2004）。
- 5) 吉場裕一，大竹智久，本橋龍郎：“低 Re 数領域での翼特性と計算格子の関連性”，第21回数値流体力学シンポジウム（2007）。
- 6) 中江雄亮，大竹智久，村松旦典，本橋龍郎：“低レイノルズ数領域における翼の空力特性シミュレーション”，第42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（2010），pp.753-758。