擬似粘性モデルを用いたプラズマシンセティックジェット アクチュエータの設置位置最適化*

土 田 忠 雄^{*1}, 小河原 加久治^{*2}

Study on Optimum Location of Plasma Synthetic Jet Actuator Using Pseudo Viscosity Model

Tadao UEDA and Kakuji OGAWARA^{*3}

^{*3} Department Mechanical Engineering, Yamaguchi University,
2-16-1 Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi, 755-8611 Japan

This paper presents investigation of optimum location of plasma synthetic jet actuator (PSJA) that is an electric device designed for flow control around an airfoil using electrohydrodynamic (EHD) effect. New turbulence model, that is, "pseudo viscosity model" is proposed to describe effect of PSJA in N-S simulation, which is aimed to achieve low computational cost. Computational result qualitatively agrees with experimental one about wake velocity profile of wing. Next, separation delay control with another type of PSJA is simulated. Knowledge obtained from present simulations about optimum location of PSJA also agrees with it obtained from experiments stretch several years.

Key Words: Computational Fluid Dynamics, Flow Control, Optimum Design, Aeronautical Engineering, Plasma Synthetic Jet Actuator, Pseudo Viscosity Model

1. 結 言

省エネルギー問題に関連し、流体制御によって表面摩擦抗力の低減を図る試みは重要である。また、翼の揚力の増大に寄与する新しい流体制御手法の確立は、今後の航空技術の進歩のために欠かせない課題といえる。著者らはそれらの一環として、プラズマシンセティックジェットアクチュエータ(Plasma Synthetic Jet Actuator, PSJA)を用いた翼周りの流体制御技術に関する研究を行っている⁽¹⁾。PSJAは絶縁体を挟んだ電極間に交流電圧を印加することによってその近傍に質量流入ゼロの噴流を誘起する電氣的な表面摩擦抗力低減デバイスである。このような電気流体力学(Electrohydrodynamic, EHD)効果はクーロン力、誘電力、イオン風の影響などに分類される。PSJAのメカニズムは厳密には解明されていないが、誘電力が支配的であると考えられている⁽²⁾⁽³⁾。以下、主に誘電力を利用したEHDデバイスをまとめてPSJAと表記する。

PSJAは電氣的デバイスであるが故に①マイクロ化が可能である、②可動部をもたないため機械的な劣化が

ない、③ON-OFF制御が容易である、という利点がある。このような理由からPSJAは航空工学の分野で翼面はく離制御への応用が期待されており、これまでに①壁面摩擦抗力の低減⁽²⁾、②翼の形状抗力の低減⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾、③翼の揚力の増大⁽⁴⁾⁽⁵⁾、④はく離の遅延⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾への寄与が風洞実験で確かめられている。しかし、PSJAの翼周りの流れ制御に関する研究が報告されたのは2002年以降であり、今もなお、発展途上の流体制御デバイスであるといえる。PSJAを用いたはく離制御に関する研究がいくつか報告されているものの⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾、PSJAの設置位置や個数についての最適条件は報告されていない。その設置位置によってはその稼働によって翼の形状抗力が増大するとの報告⁽²⁾もあり、PSJAがエネルギーを消費するアクティブな流体制御デバイスであることを考慮すると、今後は設置条件の最適化問題が重要であるといえる。

一方、PSJAの設置位置の変更に伴う翼モデルの製作コストや電磁ノイズによる計測機器の誤作動、オゾンの発生といった問題から、実験にはいくつかの難点もあり、PSJAの効果を取り入れた数値シミュレーションが期待されている。しかしながら、電界の方程式を扱う直接的な計算⁽⁷⁾は電極の空間スケールと翼の空間スケールが異なるために難しく、これまでははく離の遅延を再現したという報告はない。著者らはPSJAの設置条件に関する最適化問題に応用するためにその効果をモデル化した実

* 原稿受付 2004年3月22日。

^{*1} 正員、山口大学大学院理工学研究科(〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)。

^{*2} 正員、山口大学工学部。

E-mail: ogawara@yamaguchi-u.ac.jp

用的な計算手法を提案している⁽⁸⁾⁽⁹⁾が、これまで翼後流速度分布への影響を再現するにとどまっている。

本報告では、数値シミュレーションを用いた PSJA の設置位置最適化に関する取組みを述べる。まず、著者らの提案する“擬似粘性モデル”を用いた実用的な計算手法により、PSJA による翼後流速度分布への影響を定性的に再現する。次に提案手法を用いて別のタイプの PSJA による翼面はく離制御を定性的に再現すると共に、提案手法を用いた PSJA の最適位置設計の可能性について議論する。

2. PSJAについて

著者ら⁽¹⁾は図 1 に示すような電極をもった PSJA を NACA0012 翼の上面側に取付け、この PSJA が翼後流に与える影響を $U_\infty=5\text{m/s}$, $Re=20,000$ の風洞実験で調べて報告した。電極として直径 1mm のニクロムメッキ線の先端と直径 4mm の穴を開けた厚さ $50\mu\text{m}$ のアルミニウムテープを用いた。この電極間に 750V, 1.0kHz 程度の電圧を加えて放電が開始されると、中心の陽極から放射状に青紫色の発光を伴う数本の放電路が観察され、それと同時に三次元的な渦が誘起される。この電極は針状とワッシャー状の電極によって構成されるため、N-W 型電極と表記する。

別の PSJA の例として、Corke ら⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾が翼面はく離制御の実験に用いている電極を図 2 に示す。この電極は 2 本の細いストリップ(金属の薄板)で構成され、固体の絶縁体で隔てられる。ストリップには例えばアルミニウムテープが用いられ、絶縁体にはカプトン(Kapton)テープが用いられる。図 2 のように電極を x 軸に対して非対称に配置することが特徴である。この電極に 1.0kV, 1.0kHz 程度の電圧を印加すると、図の配置では壁面付近で右側に向かう、特定の方向性をもった噴流が誘起される。このとき、この誘起噴流が主流の方向と一致するように電極を配置すると摩擦抗力が低減し、逆だと抗力が増大する。この電極を、以下 S-S 型電極と表記する。

PSJA は N-W 型電極のように三次元的で特定の方向性をもたないタイプのものと S-S 型電極のように二次元的で特定の方向性を有するタイプに分類される。いずれの電極についても主流が静止しているときには誘起した流れを線香の煙などで可視化することが可能である。ただし、その流速はたかだか数 cm/sec 程度のオーダーであるため、風洞実験のように主流の流速が大きい場合には PSJA が誘起した流れを観察することは困難である。

3. N-W 型 PSJA の効果を取り入れた数値実験

3.1 擬似粘性モデルの提案 著者らはこれまでに

Fig.1 N-W type electrode

Fig.2 S-S type electrode

PSJA の影響を N-S 方程式に与えるための乱流モデルとして“擬似粘性渦子モデル”を提案⁽⁸⁾⁽⁹⁾し、その手法が主流に対する PSJA の効果を再現するために有効であるとの見解を述べた。同モデルではラグランジュ的手法を取入れているが、本論文ではそれより簡便な手法でありながら、かつ、より良好な計算結果が認められる“擬似粘性モデル”を提案する。本節以降、諸量は PSJA が取付けられた翼の翼弦長と一様流速で無次元化して表記する。

提案手法では PSJA の近傍において、N-S 方程式の動粘性係数 ν を次の ν' で置換えることで PSJA の効果を与える。

$$\nu' = \nu + \nu_i - \nu_p \quad \dots\dots(1)$$

ここで ν_i は乱流による動粘性係数であり、乱流の渦粘性モデルによって与えられる。 ν_p は PSJA の効果の流れ場に与えるために導入されたモデル量である。 ν_p を擬

似動粘性係数と呼び、式(1)を用いた乱流モデルを擬似粘性モデルと呼ぶ。

擬似粘性モデルは、乱流が表面摩擦抗力を増加させるのに対し、PSJA が表面摩擦抗力低減デバイスの 1 種であることを式の上で表現している。PSJA が電気的なデバイスであることは、このモデルを適用する条件ではない。言い換えると、検定により ν_p の分布を正しく与えることができれば、擬似粘性モデルは PSJA に限らず様々な表面摩擦抗力低減デバイスに適用することができると考えられる。

次に、式(1)の ν_i について検討する。本計算では、著者らが報告した $Re=20,000$ における翼周流れ制御の風洞実験の再現を試みる。この $Re=20,000$ は比較的低レイノルズ数であるため、渦粘性モデルを適用することにより翼面上、特に前縁付近では ν_i を過剰に見積もることも予想される。そのため、本研究では $\nu + \nu_i = 5.0 \times 10^{-5}$ を与え、これを一定値として計算を行った。

ν_p は有限要素法に用いる各要素の図心と PSJA の設置点との距離 d に従って要素ごとに式(2)で与えた。

$$\begin{cases} \nu_p = 0 & (d > R_p) \\ \nu_p = C_\nu \{1 - (d/R_p)^2\} & (d \leq R_p) \end{cases} \dots (2)$$

ここで R_p は PSJA の効果が及ぶ範囲を決定するモデル定数であり、 C_ν は ν_p の最大値を与えるモデル定数である。 C_ν の値によっては PSJA の近傍で ν' が負になることも考えられる。その場合、PSJA が流体に与える慣性力が粘性による摩擦抗力を上回ったと考えることにし、 ν' が負になることを許可した。ただし、受動的な抵抗低減デバイスではその性質上、 ν' が負になることは許可されない。本研究では $R_p=0.06$ 、 $C_\nu=7.5 \times 10^{-5}$ を用いた。これらのモデル定数の値は予備計算の結果を基に選ばれている。

図 3 に迎角が $\alpha=7^\circ$ の NACA0012 翼の上面側 7%chord に PSJA を取付けた場合の ν_p の分布を示す。実際に ν_p が値をもつのは流れ場全体のうちのごくわずかな要素だけである。さらに式(2)は時間に依らないため、 ν_p は数値シミュレーションの最初に求めておけば更新の必要がない。そのため擬似粘性モデルは PSJA の効果を計算するために必要な計算コストが小さく済み、実用上の大きな利点といえる。

3.2 計算条件 著者らは N-W 型の PSJA を NACA0012 翼の 7%chord の位置に取付け、翼周流れ制御の数値実験を行った。翼の概要を図 4 に示す。N-W 型電極の形状は三次元的であるが、風洞実験の結果ではスパン方向に対しておよそ $\pm 30\text{mm}$ の幅で定

Fig.3 ν_p distribution

Fig.4 NACA0012 airfoil with N-W type PSJA

Fig.5 Computational model of NACA0012 airfoil

性的に一樣な後流速度分布が得られている。そのため、本計算では簡単に二次元空間で計算を行った。

翼の形状モデルを図 5 に示す。翼弦長 L と一樣流速 U_∞ を代表スケールとしたレイノルズ数は、比較的风洞実験に合わせて $Re=20,000$ とした。計算領域は $-1.5 < x < 6.0$ 、 $-2.0 < y < 2.0$ の範囲を対象とした。翼面上の節点は 80 点であり、翼面とそれに隣接する点の法線方向の距離は 0.01 程度である。この要素分割は翼周りの数値解析としては非常に粗いものであるが、擬似粘性モデルを用いて PSJA の効果を再現するには十分であることが計算結果から示される。

境界条件は流速について流入境界で $\mathbf{u} = (U_\infty, 0)$ の一樣流入条件、翼面上でノン・スリップ条件、 y 軸方向の遠方と流出境界で法線方向微分ゼロのノイマン型条件を課した。圧力は流出境界で $p=0$ を与え、その他で法

線方向微分ゼロのノイマン型条件を課した。

3.3 計算手順 PSJA の影響を取入れたレイノルズ方程式(3)と連続の式(4)を基礎方程式として流れ場の流速 u および圧力 p を求める。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu' \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad \dots\dots(3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots(4)$$

ただし、式(3)の ν' は式(1)による。

離散化には移流項に Streamline-upwind 法⁽¹¹⁾を適用した有限要素法を用いた。また流速修正法⁽¹²⁾のアルゴリズムを使用し、圧力のポアソン方程式は ICCG 法を用いて解いた。本計算での流れ場の計算手順を図 6 に示す。ただし、 $\tilde{u}$ は流速修正法で導入される中間流速である。

3.4 3 節の計算結果と考察 著者ら⁽¹⁾の風洞実験によって得られた $\alpha=7^\circ$ と $\alpha=10^\circ$ の翼後流速欠損分布を図 7 に示す。また、擬似粘性モデルを適用して計算した数値シミュレーションの結果を図 8 に示す。実験結果、計算結果のいずれも $x=3.3$ における分布を時間平均値で示している。各々、●印は PSJA が作動していないとき(オフ)の流れ、○印のプロットは PSJA を作動させたとき(オン)の流れである。図の縦軸はそれぞれ PSJA がオフの場合の最大速度欠損値で正規化している。また横軸は PSJA オフの場合に横軸が 0 となる位置を $y'=0$ としており、PSJA オフの場合の半値幅 $b_{1/2}$ で整理している。

まず図 7(a)に示された $\alpha=7^\circ$ における風洞実験の結果に注目すると、PSJA の影響として大まかに次の 3 つの特徴が見られる。

- ① $y>0$ の側、すなわち PSJA が取付けられた側では速度欠損が減少している。
- ② 速度欠損が最大となる位置が $y<0$ の方向にずれている。
- ③ 速度欠損の最大値が減少しており、全体で約 29% の抵抗低減が見られる。

これらの結果は全て、PSJA によって翼の上面側の壁面摩擦抗力が低減していることに起因するものと考えられる。

この実験結果を基に $\alpha=7^\circ$ の計算結果の考察を行う。図 8(a)に注目すると、実験結果である図 7(a)と定性的に一致しており、上に挙げた PSJA の 3 つの影響が全て再現されていることが分かる。このことから、本研究の提案する擬似粘性モデルによって PSJA が主流に与え

Fig.6 Flowchart for N-W type PSJA

る影響を定性的に正しく計算することができたと考えられ、その妥当性がまずは示された。

次に迎角が $\alpha=10^\circ$ の場合について考察を行う。図 7(b)に示された風洞実験の後流速欠損分布では $\alpha=7^\circ$ の場合と一転し、PSJA の影響として次のような特徴が見られる。

- ① PSJA が翼後流に与える影響は $\alpha=7^\circ$ の場合に比べて小さい。
- ② 速度欠損値が最大となる位置は変化しない。
- ③ 最大速度欠損値は増加する。

これらは翼面で生じたはく離によって後流に大きな渦が形成されて支配的となり、PSJA が 7%chord の位置で流れに与えた影響が後流にまで及びにくくなったためと理由付けられる。

このような実験結果を踏まえて図 8(b)に示される $\alpha=10^\circ$ の計算結果に注目する。PSJA による後流速欠損分布の変化は図 7(b)の実験結果と定性的によく一致しており、上で述べた 3 つの特徴を全て再現している。

このように、 $\alpha=7^\circ$ と $\alpha=10^\circ$ では風洞実験で後流に見られた PSJA の影響が大きく異なっているにも関わらず、いずれの場合においても数値シミュレーションの結果は風洞実験と定性的な一致を見せた。このことから、著者らが提案する擬似粘性モデルによって PSJA が主流に与える影響を定性的に正しく計算することができたと考えられ、その妥当性が示されたといえる。また前に触れたように、擬似粘性モデルは新たに生じる計算コスト

Fig.7 Experimental results on wake velocity defect profiles

Fig.8 Computational results on wake velocity defect profiles

が小さいという利点が挙げられる。したがって擬似粘性モデルは、PSJA の設置条件に関する最適化問題への応用に有益な計算手法であると期待される。

4. S-S型PSJAの効果を取入れた数値実験

4.1 計算方法 Post⁴⁾がS-S型PSJAを用いて行った翼面はく離の遅延実験の再現を試みる。特定の方向性を有するS-S型PSJAの効果を表現するため、ここでは式(2)の代わりに次の式(5)を用いることでS-S型PSJAと同様に擬似粘性モデルに方向性を与えた。

$$\begin{cases} \nu_p = 0 & (d > R_p) \\ \nu_p = C_v \left\{ 1 - (d/R_p)^2 \right\} (\mathbf{u} \cdot \mathbf{J}) / |\mathbf{u}| & (d \leq R_p) \end{cases} \dots (5)$$

モデル定数 R_p と C_v は3節と同じく $R_p = 0.06$, $C_v = 7.5 \times 10^{-5}$ を用いた。式(2)と比較すると、式(5)では新たにベクトル $\mathbf{u}$ とベクトル $\mathbf{J}$ を導入して ν_p を決定している。ただし $\mathbf{u}$ は各要素における流速ベクトル、 $\mathbf{J}$ はPSJAの方向性を与えるための単位ベクトルを表す。ここではベクトル $\mathbf{J}$ としてPSJA取付け位置での単位接線ベクトル(x方

向成分は正)を与えることにする。式(5)では流速ベクトル $\mathbf{u}$ の方向によって、要素に与えられる ν_p の大きさが左右される。さらには $\mathbf{u}$ の方向と $\mathbf{J}$ の方向が大きく異なれば、 $\mathbf{u}$ と $\mathbf{J}$ の内積が負となるため、 ν_p が負になることも有り得る。負の ν_p は、式(1)より表面摩擦抗力の増加に寄与する。式(2)では流れの向きに関係なく摩擦抗力を低減させるのに対し、式(5)ではPSJA近傍で逆流が生じた場合に逆流を妨げる効果を流れ場に加え、S-S型PSJAのもつ方向性を再現する。

本節では、 ν_p を与える式(5)の右辺のうち、 $C_v \{ 1 - (d/R_p)^2 \}$ の部分は時刻に依存しない。したがって、あらかじめそれを求めておき、 $(\mathbf{u} \cdot \mathbf{J}) / |\mathbf{u}|$ の部分を時刻ごとに計算して ν_p を求める。基礎方程式や離散化、境界条件などは3節と同じである。計算のフローチャートを図9に示す。

本節ではまずは3節と同様に7%chordの上面側にPSJAを取付けたNACA0012翼を想定し、レイノルズ数は $Re = 20,000$ とした。迎角は $\alpha = 8^\circ$ を対象とした。用いた有限要素分割の翼面上の節点数は190点、翼面とそれに隣接する節点との距離は0.003程度である。計算領

域は $-1.0 < x < 4.0$, $-1.75 < y < 1.75$ の範囲とした。

4.2 4節の計算結果と考察 数値シミュレーションによって得られた $\alpha=8^\circ$ の NACA0012 翼周りの平均流線を図 10 に示す。(a)は PSJA が非作動の場合(オフ), (b)は PSJA が作動している場合(オン)の流線を描いている。はく離点の位置と、作動した PSJA の位置をそれぞれ黒と白の矢印で示した。(a)と(b)を比較すると、(b)では擬似粘性の影響によって、はく離点が明らかに下流側に後退しているのが分かる。本計算におけるはく離点の位置は、PSJA がオフの場合に約 16%chord、オンの場合に約 27%chord であった。また、はく離点の後退と共に、時間平均のはく離泡厚が PSJA オンのときに縮小していることも明らかである。

Post ら⁽⁴⁾は NACA663-018 翼の前縁と最大翼厚位置 (50%chord) で S-S 型の PSJA を同時に作動させ、 $Re=79,000$ および $158,000$, 迎角 16° 以下の条件ではく離を抑制する風洞実験を行った。その結果、①前縁付近のはく離点が後退し、②後流の幅が狭くなる様子を可視化で示している。翼の形状や迎角は異なるものの、本研究の数値シミュレーションで得られた結果は可視化実験で得られた知見と定性的に一致する。

図 11 は 9.5%chord, すなわち PSJA の設置位置のやや下流における翼面境界層内の速度分布である。ただし、横軸を接線方向流速、縦軸を法線方向の距離としている。与えられた擬似粘性の効果により、壁面近傍の流れが加速され、はく離の遅延に寄与の様子が示されている。図に示される速度分布への影響は、Hultgren ら⁽¹²⁾が平面に PSJA を設置し、計測したものと定性的によく一致している。すなわち、擬似粘性モデルによる計算は、境界層内の速度分布への影響も適切に再現できていることが分かる。

図 12 は翼面圧力分布を示している。圧力のピークが小さくなっているが、翼周りの法線方向に対する要素分割の粗さが最大の理由である。PSJA による圧力分布の変化に注目すると、25%chord より前縁側では、PSJA オンの場合の負圧が大きくなる。また、後縁に近づくとき圧力の関係が逆転し、PSJA オフの場合に負圧が大きくなる。このような大まかな特徴は、Post ら⁽⁴⁾⁽⁵⁾が他の翼型の前縁に PSJA を取付けて行った実験と定性的に一致する。なお、計算結果から得た揚力係数は PSJA によって数%の増加が見られる。これは実験に比べて増加のオーダーが小さいが、計算の精度を上げることでいくらか改善されるであろうと考える。

ここまでの結果から、前縁の近くに設置された S-S 型 PSJA の影響を擬似粘性モデルで定性的に再現できることを示した。しかしながら、式(5)で新たに導入されたベ

クトル $\mathbf{J}$ が PSJA の方向性を表現できているか否かは、まだ定かではない。これについて議論をするため、さらに 2

Fig.9 Flowchart for S-S type PSJA

個の PSJA を追加し、合計 3 箇所に PSJA を取付けることを想定した数値シミュレーションを行った。PSJA の取付け位置は 7%chord, 30%chord, 60%chord とした。それぞれの取付け位置を中心として半径 $R_p=0.06$ の範囲内に入る要素では、式(5)により擬似動粘性係数 ν_p を計算する。擬似粘性モデルに方向性を与えるベクトル $\mathbf{J}$ の方向は PSJA ごとに定め、それぞれの位置で翼の接線方向 (x 方向成分は正)とした。

計算結果の平均流線を図 13(a)に示す。3 つの PSJA の設置位置を矢印で示している。はく離点の位置は 27%chord であり、PSJA を 7%chord にだけ取付けた図 10(b)の流れ場と違いは見られなかった。これについては最後に考察を述べる。ここで注目したいのは逆流領域である 30%と 60%に設置された PSJA の効果である。流線に注目すると、いずれの位置においても図 10 では見られなかった新たな渦が形成されている。渦の様子を詳しく知るため、逆流領域における壁面付近の流速ベクトルを図 13(b)に示す。渦は反時計方向の回転をもっており、壁面の近傍では逆流に逆らうような主流方向の噴流が観察される。図らずも、この渦の様子は、図 2 に描いた S-S 型電極が誘起する流れ場の様子と共通点が見

られる。図 13(c)には 30%chord における流速分布を示す。PSJA オフの流れでは壁面近くの流速が負を示しており、逆流が生じている。それに対し、擬似粘性を与えた PSJA オン流れでは、壁面近傍の流速は主流方向に加速されており、逆流を防ぐように作用している。また、壁面からやや離れた位置においても、全体として流速は主流方向に加速されていることが分かる。これらの結果から、式(5)で新たに導入したベクトル $\mathbf{J}$ が方向性のある PSJA の再現に有効に寄与することが確認された。

最後に、擬似粘性モデルを使って PSJA の最適な設置位置を模索することの可能性を議論する。Corke らの研究グループでは、2002 年⁽³⁾に NACA0009 翼の 75% chord の位置に方向性を有する S-S 型の PSJA を設置し、流れ制御を行っている。しかしながら、それによってはいく離を遅延したとの報告はなく、翼の形状抗力については増大が認められている。一方、2004 年に報告⁽⁴⁾した実験では、NACA0015 翼の前縁に S-S 型の PSJA を取付け、流れ制御を試みた。その結果、はいく離の遅延が認められ、形状抗力は低減されている。これらの比較より、PSJA は後縁近くよりも前縁近くに取付けるべきであるという知見が得られる。また、2003 年の報告⁽⁴⁾では NACA66₃-018 翼の前縁と逆流領域である 50%chord の 2 箇所に PSJA を取付けて風洞実験を行い、はいく離の遅延に成功している。ただし、先に述べた 2004 年の報告では PSJA は前縁のみに取付けられており、逆流領域には PSJA が設置されていない。これについて Corke らは理由を述べていないが、逆流領域に設置された PSJA があまり効果を発揮しないことが確かめられたのだろうと思われる。

本研究でも 75%chord の位置に擬似粘性を与え、擬似粘性モデルによって実験と同様の考察が成り立つかを確かめた。図 14(a)は PSJA オフの流れ場、(b)は PSJA オン流れ場について平均流線を描いている。各々、矢印でははいく離点の位置を示した。図(a)と(b)の比較から、75%chord に取付けられた PSJA の効果でははいく離点は後退しておらず、逆にわずかながらはいく離点が前縁に近づく。この結果は、逆流領域に取付けた PSJA がはいく離の遅延に寄与せず、逆にはいく離を促進する効果があることを示唆している。Corke らの実験で 75%chord に取付けた PSJA が形状抗力の増大に寄与していることを考慮すると、擬似粘性モデルによって得られた計算結果は妥当なものであると考えられる。

一方、図 10 のように PSJA を前縁近くの 7%chord に取付けた場合には、はいく離が遅延される様子が擬似粘性モデルで再現される。また、図 13 には 7%chord に加え、逆流領域に 2 つの PSJA を追加した場合の計算結

果を示した。図 13 と図 10(b)と比較すると、逆流領域に新たな渦が形成されているものの、はいく離点は共に 27%chord で変化しておらず、逆流領域に追加された PSJA がはいく離のさらなる遅延に貢献しない様子が分かる。

このように、PSJA の取付け位置について擬似粘性モデルを用いて得られた知見は、Corke らの実験と定性的に一致する。このことは、著者らが提案する擬似粘性モデルが PSJA をはじめとする摩擦抗力低減デバイスの設置位置に関する最適条件を模索するのに強力なツールとなる可能性を証明するものであると考える。本研究では PSJA の取付け位置に関して、はいく離点よりも上流側、翼では前縁の近くに PSJA を取付けるべきという見解を擬似粘性モデルによって得ることができた。

5. 結 言

PSJA の効果を小さい計算コストで N-S 方程式に取入れるための新しい乱流モデルとして、“擬似粘性モデル”を提案した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 擬似粘性モデルを提案し、N-W 型 PSJA が翼後流速分布に与える影響を定性的に再現した。
- 擬似粘性モデルにより、S-S 型 PSJA が翼面はいく離を遅延する様子を定性的に再現した。PSJA を通過した直後の境界層速度分布や、翼面の圧力分布も計算結果と実験結果で定性的な一致が見られた。
- 擬似粘性モデルを用いて得られた PSJA の適切な取付け位置に関する知見は、実験と定性的に一致した。
- はいく離を遅延するためには、はいく離点よりも上流側に PSJA を取付ける必要があるという見解が得られた。

参考文献

- (1) 小河原加久治・中谷直樹・佐伯壮一, 機論, 69-686, B(2003), 2237-2242.
- (2) J.R.Roth, D.M.Sherman and S.P.Wilkinson, AIAA Journal, 38-7,(2000), 1166-1172.
- (3) T.C.Corke et al., AIAA paper 2002-0350, (2002).
- (4) M.L.Post and T.C.Corke, AIAA paper 2003-1024, (2003).
- (5) M.L.Post and T.C.Corke, AIAA paper 2004-0841, (2004).
- (6) J.R.Roth et al., AIAA paper 2003-531, (2003).
- (7) D. Orlov, T.Corke and M.Post, Bulletin of the American Physical Society Fluid Dynamics Division Annual Meeting, Nov.(2002).
- (8) 上田忠雄・小河原加久治, 機論, 70-692, B(2004), 962-967.
- (9) 上田忠雄・小河原加久治, 機論, 70-696, B(2004), 1943-1948.
- (10) 有限要素法による流れのシミュレーション, 日本流体力学有限要素法研究委員会, シュプリンガーフェア

ラーク東京, (2001), 104-107.

- (11) 非圧縮流体解析, 数値流体力学編集委員会, 東京大学出版会, (1999), 198-201.
- (12) L.S.Hultgren and D.E.Ashpis, AIAA paper 2003-1025, (2003).

(a) PSJA OFF

(b) PSJA ON

Fig.10 Computed separation point with PSJA OFF and ON

Fig.11 Velocity profiles passed just PSJA

Fig.12 C_p profiles

(a) Stream lines

(b) Velocity field in backward flow region

(c) Velocity field at 30% chord

Fig.13 Effects of 3 places of PSJA

(a) PSJA OFF

(b) PSJA ON

Fig.14 Effect of PSJA placed at 75% chord