

表面摩擦抵抗分布の計測

栗田 充, 飯島秀俊
宇宙航空研究開発機構

Measurement of Skin Friction Distribution

by
Mitsuru Kurita, Hidetoshi Iijima
Japan Aerospace Exploration Agency

ABSTRACT

This paper describes a method to measure skin friction distributions on wind tunnel test model. Skin friction is one of the major sources of airplane drag. Two optical measurement methods are described in this paper. One method measures the thickness and tracks the movement of luminescent oil flowing along the test model surface, which shows qualitative skin friction distribution on the model. Another method measures quantitatively local skin friction. The two optical measurement methods are combined then quantitative skin friction distribution is measured. To demonstrate its validity, the method has been applied to an incompressible flow around a vortex generator on a flat plate. As a result, the method measured successfully quantitative skin friction distribution of the flow around the vortex generator.

1. はじめに

空気抵抗を低減させ、燃費の良い航空機を開発する技術の獲得は、我が国の航空機開発における国際競争力確保において重要である。原油価格が高騰し環境への意識が高まる中、空気抵抗低減技術は益々重要な意味を持つ。

これからの航空機の機体設計は、従来のトータルの空気抵抗での評価ではなく、各抵抗成分(Profile Drag, Induced Drag, Wave Drag)の発生をコントロールする周到な設計技術が必須になると考えられる。旅客機は、全抵抗の内、表面摩擦抵抗の占める割合が最も高い。そのため、最も低減を効率良く下げる方法のひとつは表面摩擦抵抗を低減させることである。

表面摩擦抵抗を低減させるためには、まずは表面摩擦抵抗を調べるための計測技術が必要である。しかし、表面摩擦抵抗は風洞計測の中で最も難しい計測項目のひとつであり、世界的に見ても計測技術が成熟しているとは言えない。

本研究は、表面摩擦抵抗の分布を定量的に面で計測する手法の開発を目的としている。表面摩擦抵抗を面で計測できれば、どこにどれだけの摩擦抵抗が分布しているかが一目で分かる。そのため、流れ場を詳細に解析することができ、設計を有利に進めることに役立つ。ここでは、オイルフロー法を基礎技術とし、油膜法に optical flow 画像処理技術を組み合わせ、さらに干渉法を組み合わせることで、詳細な表面摩擦抵抗の分布を定量的に面計測する手法について述べる。

2. 計測手法

本研究はオイルフロー法に基づく油膜法と干渉法を組合せる。本研究の手法の概要を第1図に示す。

油膜法は模型表面にオイルを塗布し、その流れを観察する手法である。複雑な流れ場でも適用できるが、油膜法のみでは表面摩擦抵抗の定量値を得ることは困難である。そこで、まず、油膜法は定性的な表面摩擦抵抗の分布のみを求めることとし、別の手法を組み合わせることで定量値に変換することを考える。

干渉法は模型表面にオイルを薄く塗布し、時間とともに変化するオイル厚みを光学的に計測する手法である。複雑な流れ場には適用しにくいだが、表面摩擦抵抗を定量的に計測できる。

そこで、本研究では油膜法に干渉法を組み合わせ、油膜法で得た定性的な表面摩擦抵抗分布を干渉法で定量化する

ことで、最終的に定量的な表面摩擦抵抗の分布を計測する方法を試みる。

3. 実験装置

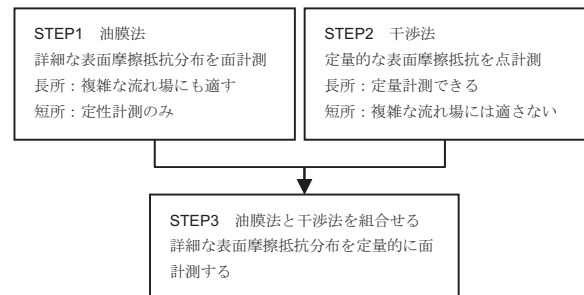
3-1 風洞

風洞は JAXA の研究用の低速風洞を使用した。吹き出し口は 304 mm×304 mm である。テストセクションの周りは防音用の小屋になっており本研究では暗室として利用する。

3-2 模型

模型は第2図に示す幅 304 mm×長さ約 800 mm×厚み 10 mm の平板である。材質はアルミ合金であり、先端断面は半円形になっている。境界層を乱流に遷移させるため、平板模型の前縁部にディスク型及びカーボランダムによるラフネスを設置している。平板模型は風洞の左右の黒色の側壁により水平に支えられており、模型の上下は解放されている。

平板模型の上面側に、高さ 15 mm×長さ 60 mm×厚さ 0.3 mm のボルテックスジェネレータを設置する。主流方向に対するボルテックスジェネレータの横滑り角は 20 deg である。ボルテックスジェネレータは渦を発生させることで境界層内の流れと外側の流れを混合させて流れの剥離を抑えるために使うデバイスである¹⁻³⁾。航空機では翼の失速を抑えるための重要なデバイスとして使われている。しかし、ボルテックスジェネレータは抵抗を増加させる。そのため、ボルテックスジェネレータまわりの流れ場を調べ抵抗の発生具合を調べることは航空機の抵抗を低減させるうえで重要である。



第1図 計測手法の概要

風速は 31 m/s とした。模型前縁からボルテックスジェネレータ設置位置の距離で算出した主流のレイノルズ数は $Re_x = 7.8 \times 10^5$ である。

3-3 光学計測システム

3-3-1 油膜法の光学計測システム

油膜法の光学計測システムを第3図(a)に示す。計測システムはオイルを励起して発光させるための光源とオイルの発光を計測するためのカメラで構成される。

光源は浜松ホトニクス社の青色 LED である。LED の発光波長の中心は 470 nm である。カメラは Allied Vision Technologies 社の Prosilica GX6600 モノクロカメラを使用する。ピクセル数は 6576×4384 である。カメラの解像度は高いが、油膜法ではフレームレートを優先させるために、4 ピクセルのビニングを行い、階調 8 bit、フレームレート 10 fps で計測をしている。焦点距離 50 mm のカメラレンズを使用し、しぼりは 5.6 とした。また、レンズには 530 nm 短波長カットフィルタと 750 nm 長波長カットフィルタを重ねて設置することでオイルの発光以外の光の入射を低減させている。

本手法はカメラからの大容量データを高速に記録する必要がある。カメラは 2 本の LAN ケーブルでデータを転送できる。そこで、PC にはデータの高速転送用に Intel 社のダブルポート LAN ボードを搭載させ、データの高速記録用に OCZ 社の SSD ボードを搭載させている。また、カメラ制御ソフトは Norpix 社の StreamPix6 を使用した。オイルの発光強度を強くさせるために、平板模型表面に薄い白色のシートを貼っている。

3-3-2 干渉法の光学計測システム

干渉法の光学計測システムを第3図(b)に示す。計測システムは干渉縞を発生させるための光源と干渉縞を計測するためのカメラで構成される。

光源は発光波長約 590 nm の低圧ナトリウムランプを使用し、模型の広範囲を照射できるように反射板を風洞上に設置している。

カメラは油膜法と同じ GX6600 モノクロカメラである。干渉法は、高い空間解像度が計測精度を確保するために有利である。そのため、ビニングは行わず 6576×4384 の最大ピクセル数で計測している。一方で、フレームレートは遅くともよいので、階調は 14bit とする。接写リングを介した焦点距離 105mm レンズに低圧ナトリウムランプの発光波長と同じ 590nm のバンドパスフィルタを設置して撮影を行う。レンズのしぼりは 11 である。

模型表面はアルミ合金の持つ酸化被膜のために、無垢のままでは明確な干渉縞を得ることは難しい。そのため、模型表面に模型に約 70 μm 厚のカプトンテープを貼ることでより明確な干渉縞が得られるようにしている。

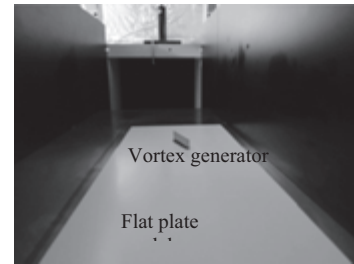
3-4 オイル

本研究で使用するオイルは信越シリコン社のシリコンオイルである。各々用途に応じて異なる粘度のオイルを使用している。

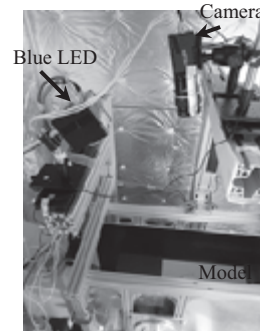
3-4-1 油膜法のオイル

油膜法で使用するオイルは信越シリコン社のシリコンオイル KF-96-200cs である。シリコンオイルは透明なので蛍光インクを混ぜることで発光させる。

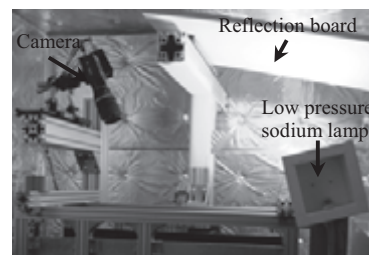
オイルは模型表面に薄く塗る。これは、後に述べるが、オイル厚みとオイル発光強度の関係が出来る限り線形な範囲にオイルの厚みを制限するためである。本研究では、まず、オイルをスポイドで模型表面に少量たらし、これをスポンジで軽くたたかすことで薄くのばしている。



第2図 平板模型とボルテックスジェネレータ

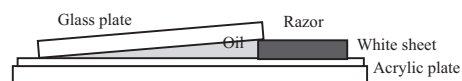


(a) 油膜法



(b) 干渉法

第3図 計測システム



第4図 オイル厚みと発光強度の計測

3-4-2 油膜法のオイル厚みの計測

油膜法のオイル厚みをオイル発光強度から計測する。第4図に示すように、平板模型に貼ったものと同じ白色シートを貼ったアクリル板の上に 30 mm 角のガラス板を置き、そのガラス板の一端に厚さ 0.1 mm のカミソリ刃を挟ませた装置を作る。風洞試験で使用するオイルを下側の板に塗布し、その上からガラス板を押しつけてテープで固定することにより、板の隙間にくさび型のオイル溜まりを作る。第3図の計測システムをこの装置に適用することにより、オイル厚みと発光強度の関係を得る。

3-4-3 干渉法のオイル

干渉法で使用するオイルは信越シリコン社の透明なシリコンオイル KF-96-50cs である。干渉縞はオイル厚みが薄くないと観測できない。そのため、オイルは模型表面に小型のヘラで微量のみを局所的に塗布する。

3-5 通常のオイルフロー

本手法の妥当性を確認するため、ボルテックスジェネレータまわりの流れに対して通常のオイルフローもあわせて実施する。オイルは二酸化チタンをオレイン酸でねったものを信越シリコン社のシリコンオイル KF-96-10cs で溶いてつくる。オイルの塗り方は油膜法の方法と同じであり、

スポンジで軽くたたくことで模型表面に薄くのばしている。なお、模型表面は白い酸化チタンとのコントラストを良くするために黒色のシートを貼っている。

3-6 データ処理手法

3-6-1 油膜法

本研究は前後の画像フレームから画像上の物体の動きを検出する optical flow により模型表面に塗布したオイルの動きをとらえることで表面摩擦抵抗の分布を計測する^{4,8)}。

本研究では以下の仮定を行う。仮定 1)から 9)はオイルフローと計測に関する仮定であり、仮定 10)から 12)は optical flow に関する仮定である。

- 1) オイルの流れは遅い粘性流れである。
- 2) オイルの厚みは薄い。
- 3) オイルの発光強度はオイルの厚みに比例する。
- 4) 摩擦力は空気とオイルとの境界面で共に等しい。
- 5) 摩擦力によるオイル層内のオイルの速度はオイル厚みに比例する。
- 6) 模型表面でオイルは動かない。
- 7) 空気とオイルとの境界面におけるオイル表面の速度は、オイル表面における主流境界層の速度と等しい。
- 8) 計測されるオイル速度は、オイル厚み内における平均速度である。
- 9) オイルは、空間的に一様で時間的に変動のない光源により照射されている。
- 10) 前フレームで注目している点が次のフレームで別の位置に移動したとき、移動前後で発光強度が同じである。
- 11) 画像の各点の速度ベクトルは滑らかにしか変化しない。
- 12) 模型表面とカメラのCCD面は平行に設置されている。

本研究では、画像ピクセル位置 (x, y) における x 方向のオイルの速度成分を $u_{x,y}$ 、 y 方向のオイルの速度成分を $v_{x,y}$ 、オイルの粘性係数を μ 、オイル厚みを $z_{x,y}$ として、画像ピクセル位置 (x, y) における x 方向の摩擦力成分 $\tau_{x,x,y}$ 及び y 方向の摩擦力成分 $\tau_{y,x,y}$ を式(1)及び式(2)から求める。

$$x \text{ 方向の摩擦力成分: } \tau_{x,x,y} = \mu \frac{\partial u_{x,y}}{\partial z_{x,y}} \quad (1)$$

$$y \text{ 方向の摩擦力成分: } \tau_{y,x,y} = \mu \frac{\partial v_{x,y}}{\partial z_{x,y}} \quad (2)$$

まず、画像ピクセル位置 (x, y) におけるオイル速度成分 $u_{x,y}$ 、 $v_{x,y}$ を求める。Optical flow に関する仮定 10)から発光強度を I 、時間を t として次式を得る。

$$I(x+dx, y+dy, t+dt) = I(x, y, t) \quad (3)$$

時間変化と空間的变化が小さいとしてテイラー展開し、2次以上のオーダーを無視することで次式を得る。

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (4)$$

ここに、 I_x, I_y, I_t はそれぞれ画像の x 方向、 y 方向、時間 t における偏微分である。また、 $u = \frac{\partial x}{\partial t}$ と $v = \frac{\partial y}{\partial t}$ は画像 x 方向と y 方向の速度ベクトル成分であり、これらが optical flow で求めるべきオイルの速度となる。なお、仮定 10)がオイルフローで完全に成立することは難しいが、撮影のフレームレートをオイルの動きに対して十分速くすることで近い値が得られると考えた。

速度成分 u と v を得るためには、仮定 11)の滑らかさの拘束から式(5)の評価関数を定義し、これを最小化することにより、式(6)及び式(7)を得る。⁸⁾

$$C = \sum_x \sum_y \left\{ (I_x u + I_y v + I_t)^2 + \lambda (u_x^2 + u_y^2 + v_x^2 + v_y^2) \right\} \quad (5)$$

ここで、 u_x, u_y, v_x, v_y はそれぞれ速度ベクトルの x 方向、 y 方向の偏微分であり、 $u_{x,y}, v_{x,y}$ は画像ピクセル位置 (x, y) における速度 u, v の平均値である。なお、式(5)の λ は第1項と第2項のバランスをとるための重みであり、本研究では $\lambda=1$ としている。

$$u_{x,y} = \overline{u_{x,y}} - I_x \frac{\overline{I_x u_{x,y} + I_y v_{x,y} + I_t}}{4\lambda + I_x^2 + I_y^2} \quad (6)$$

$$v_{x,y} = \overline{v_{x,y}} - I_y \frac{\overline{I_x u_{x,y} + I_y v_{x,y} + I_t}}{4\lambda + I_x^2 + I_y^2} \quad (7)$$

$$\overline{u_{x,y}} = \frac{1}{4} (u_{x+1,y} + u_{x-1,y} + u_{x,y+1} + u_{x,y-1}) \quad (8)$$

$$\overline{v_{x,y}} = \frac{1}{4} (v_{x+1,y} + v_{x-1,y} + v_{x,y+1} + v_{x,y-1}) \quad (9)$$

本研究では、初期値を、 $\overline{u_{x,y}}^{(0)} = 0, \overline{v_{x,y}}^{(0)} = 0$ とし、式(10)と式(11)の繰り返し漸近法で $u_{x,y}$ と $v_{x,y}$ の値を求める。

$$u_{x,y}^{(k+1)} = \overline{u_{x,y}}^{(k)} - I_x \frac{\overline{I_x u_{x,y}^{(k)} + I_y v_{x,y}^{(k)} + I_t}}{4\lambda + I_x^2 + I_y^2}, k = 0, 1, \dots \quad (10)$$

$$v_{x,y}^{(k+1)} = \overline{v_{x,y}}^{(k)} - I_y \frac{\overline{I_x u_{x,y}^{(k)} + I_y v_{x,y}^{(k)} + I_t}}{4\lambda + I_x^2 + I_y^2}, k = 0, 1, \dots \quad (11)$$

画像ピクセル位置 (x, y) における速度 $u_{x,y}$ と $v_{x,y}$ は全ての計測画像の前フレームと後フレームのペアで同様に算出され、最後にそれらの平均値を求める。なお、Optical flow の計算終了条件は、 u と v の両方で反復間の計算値の違いが0.01%以下の収束または最大反復回数500回とした。

次に、オイルの厚みを求める。仮定 6)及び仮定 9)から、画像のピクセル位置 (x, y) におけるオイル発光強度 I を、発光物質特性に関する係数 a 、励起光源強度 I_{ex} 及びオイル厚み z により式(12)で表す。つまり、オイル発光強度はオイル厚みを示す。なお、発光強度も全ての計測画像枚数の平均値を使う。

$$I_{x,y} = a I_{ex} x y z_{x,y} \quad (12)$$

最後に、式(1)と式(2)から、optical flow で求めたオイルの速度 $u_{x,y}, v_{x,y}$ (式 10 及び 11)をオイルの厚みと直結する発光強度 $I_{x,y}$ (式 12)で割り算することで摩擦力を求める。なお、油膜法の発光物質特性に関する係数 a 、励起光源強度 I_{ex} 及びオイルの粘性係数 μ は一定値($=1$)として扱う。また、本計測システムにおいて、隣り合う画像ピクセル間におけるLED励起光の空間的变化は小さく、カメラのフレームレートを速くすることで前後フレーム間の励起光の時間的变化も小さくなるとみなした。

画像は通風開始前から計測を始めているが、データ処理には気流速度が静定した250枚目からボルテックスジェネレータまわりにオイルが十分存在する500枚目までの画像のみを使用している。

3-6-2 干渉法

模型表面に塗布されたオイルは表面摩擦力によって流され、オイル厚みは時間とともに減少していく。この現象を利用して表面摩擦抵抗係数 C_f を次式から算出する。^{9,10)}

$$C_f = \frac{\tau_w}{q_\infty} = \frac{(2n_0/\lambda) \cos(\theta_r) (\Delta s_{n+1} - \Delta s_n)}{\int_{t_n}^{t_{n+1}} (q_\infty/\mu) dt} \quad (13)$$

ここで、 τ_w は表面摩擦力、 n_0 はオイル屈折率、 θ_r はオイル屈折角、 λ は光源の波長、 Δs は干渉縞の間隔、 q_∞ は主流動圧、 μ はオイルの粘性係数である。添え字 $n, n+1$ は、計測の順番を示しており、計測時刻 t と Δs が対応する。

オイル粘性係数は温度によって変化するため、本研究ではオイル温度を気流温度と等しいと仮定してオイル粘性係数を補正している。

4. 結果

4-1 通常のオイルフロー

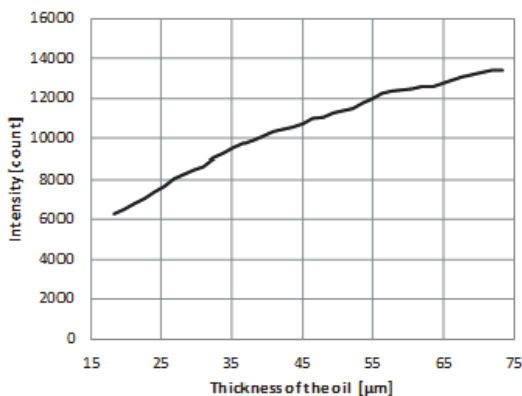
第5図に通常のオイルフローによるボルテックスジェネレータまわりの流れの可視化写真を示す。

まず、ボルテックスジェネレータ上流側で、流れが左右に分かれている。

次に、ボルテックスジェネレータ右側では下流から見て左回りの渦が発生している。また、ボルテックスジェネレータ下流側で下流に向かって広がる形のオイルパターンとなるのは、ボルテックスジェネレータ下流側で下



第5図 通常のオイルフローによるボルテックスジェネレータまわりの流れの可視化



第6図 オイル厚みと発光強度の関係

流から見て右回りの渦が先ほどの左回りの渦のとりに生じるためではないかと考えられる。

最後に、ボルテックスジェネレータ左側ではボルテックスジェネレータ前縁から回り込む流れと、その流れがボルテックスジェネレータにぶつかり下流から見て左回りの渦を発生させている様子が分かる。

4-2 油膜法のオイル厚さと発光強度の関係

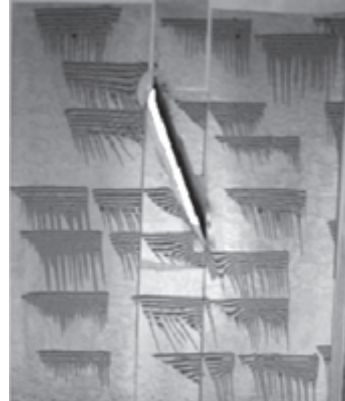
第6図にオイル厚さと発光強度の関係を示す。カメラは14 bit で計測している。オイル厚みと発光強度はなだらかな曲線を描くが、40 μm 程度までの薄い範囲ではほぼ線形な関係を示す。そこで、本研究ではオイル厚みの上限を40 μm として計測を行った。

4-3 表面摩擦抵抗分布の計測

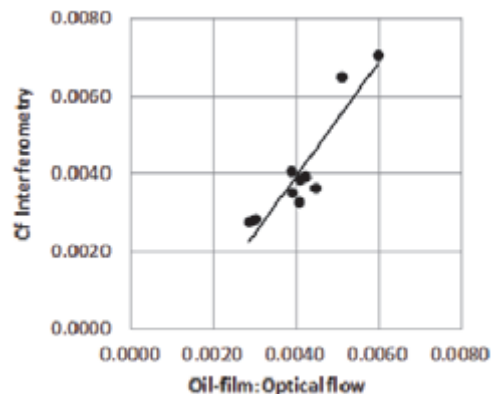
油膜法で得た定性的な表面摩擦抵抗分布に干渉法で得られる定量値を組み合わせることで、定量的な表面摩擦抵抗分布を得る。

まず、干渉法により、局所位置における表面摩擦抵抗の定量値を計測する。第7図に干渉法によるボルテックスジェネレータまわりの計測の様子を示す。

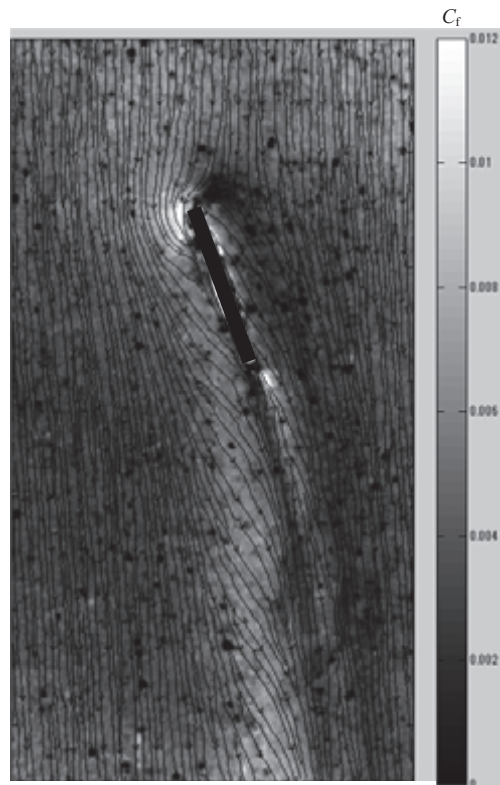
次に、面計測を行う。油膜法で得た値と干渉法で計測した表面摩擦抵抗係数 C_f の関係を第8図に示す。バラつきは



第7図 干渉法によるボルテックスジェネレータまわりの表面摩擦抵抗計測



第8図 油膜法で得た値と干渉法で計測した C_f の関係



第9図 表面摩擦抵抗の分布

あるものの両者は相関を持つ。そこで、第 8 図から近似直線を求め較正式を得る。

最後に、第 8 図で得た較正式により油膜法で得た値を定量化したものを第 9 図に示す。第 9 図からは、ボルテックスジェネレータ前縁で加速して回り込む流れにより大きな表面摩擦抵抗が生じている様子が明確に分かる。また、ボルテックスジェネレータの下流側には境界層内の流れに外側の強い流れを混合させた渦によって大きな表面摩擦抵抗を持つ領域が広範囲に分布していることが分かる。なお、図中に点状に見える模様はノイズであり、原因はオイルに付着したほこりである。

第 9 図から表面摩擦抵抗の方向を確認する。まず、ボルテックスジェネレータ上流部で、流れが左右に分かれている様子が分かる。

次に、ボルテックスジェネレータ右側では下流側から見て左回りの渦が発生している。さらに、ボルテックスジェネレータ下流あたりで、先ほどの左回りの渦のとなりに、下流側から見て右回りの渦が生じることで、表面摩擦抵抗が下流に向かって広がる形のパターンになっていることが確認できる。

最後に、ボルテックスジェネレータ左側ではボルテックスジェネレータ前縁から急激に回り込む流れが明確に観測できる。その流れはボルテックスジェネレータにぶつかり下流から見て左回りの渦を発生させている。

上述した表面摩擦抵抗の方向は第 5 図に示した通常のオイルフローによる可視化結果と良く一致する。

本手法はどこにどれだけの表面摩擦抵抗が発生しているかが一目で分かることが最大の利点である。ここでは見やすくするため線の数を少なくして表示しているが、第 9 図の表面摩擦抵抗のベクトルは全ピクセルで算出されるため詳細な流れ場診断が可能なので、渦や剥離を伴う複雑な流れ場にも適用できる。また、表面摩擦抵抗の方向を数値情報として得られることも従来のオイルフローと大きく異なる利点である。これらの利点から本手法は空力デバイスの評価や CFD の妥当性評価等に役立つ。

今後、本手法の改良すべき点としては、透視投影¹¹⁾等を加えることによってカメラ設定の自由度を確保するとともに 3 次元模型への適用を可能にすること等があげられる。

5. 結論

本研究は表面摩擦抵抗の分布を定量的に面計測する手法を開発した。風洞実験の結果、詳細な表面摩擦抵抗の分布の定量計測に成功した。本手法はどこにどれだけの表面摩擦抵抗が発生しているかが一目で分かることが最大の利点である。また、剥離を伴う複雑な流れ場に対しても適用でき、表面摩擦抵抗の方向を数値情報として得られることも従来のオイルフローと大きく異なる利点である。

今後、3 次元模型への適用に向け、技術的課題の解決を行っていく予定である。

謝辞

本研究の遂行において多大なご協力をいただいた、JAXA の満尾和徳氏、中北和之氏、小池俊輔氏、安養寺正之氏、浜本 滋氏、立花繁氏、風洞技術開発センター及び空力技術研究グループ、慶應義塾大学の Henny Bottini 氏、深瀧康二教授に感謝します。

The stay of Henny Bottini in JAXA/Keio University has been supported by the Erasmus Mundus EASED programme (Grant No. 2012-5538/004-001) coordinated by CentraleSupélec.

参考文献

- 1) 伊藤靖, 村山光宏, 山本一臣, 小池俊輔, 楠瀬一洋, 田中健太郎: 遷音速翼の後退角とボルテックスジェネレータ効果, 第52回飛行機シンポジウム講演集, 2014.
- 2) 小池俊輔, 伊藤靖, 楠瀬一洋, 中島努, 佐藤衛, 神田宏, 村山光宏, 中北和之, 山本一臣: 遷音速二次元翼に対する Vortex Generator 効果, JAXA-RR-14-002.
- 3) 加藤裕之, 松本学, 鳥居薫: 層流境界層内における縦渦による伝熱促進, 関東学生会第29回学生員卒業研究発表講演前刷集, 1990, pp. 133-134.
- 4) Liu, T., Montefort, J., Woodiga, S., Merati, P. and Shen, L.: Global Luminescent Oil-Film Skin-Friction Meter, AIAA Journal, Vol. 46, No. 2, 2008, pp. 476-485.
- 5) Liu, T. and Sullivan, P.: Luminescent Oil-Film Skin-Friction Meter, AIAA Paper-97-2216, 1997.
- 6) Horn, B. and Schunck, B.: Determining Optical Flow, Artificial Intelligence 17, 1981, pp. 185-203.
- 7) 角田智哉: 蛍光油膜による摩擦応力分布のイメージング技術の開発, 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻修士論文, 2010.
- 8) 徐剛, 辻三郎: 3次元ビジョン, 共立出版, 2004.
- 9) 飯島秀俊, 栗田充, 満尾和徳, Henny Bottini, 深瀧 康二: オイルを用いた表面摩擦抵抗計測について, 日本航空宇宙学会北部支部2015年講演会, 2015.
- 10) Bottini, H., Kurita M., Iijima, H., Fukagata, K.: Effects of Wall Temperature on Low-Speed Skin-Friction Measurements by Oil-Film Interferometry, D26, 46th JSASS Annual General Meeting, 2015.
- 11) 佐藤淳: コンピュータビジョン, コロナ社, 2005.