

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2006 年度～2008 年度  
 課題番号：18760609  
 研究課題名 (和文) 機能性分子センサによる表面圧力・摩擦力分布同時計測システムの構築  
 研究課題名 (英文) Simultaneous measurement of Pressure and Skin friction using Molecular Sensors  
 研究代表者  
 藤松 信義 (FUJIMATSU NOBUYOSHI)  
 青山学院大学・理工学部・助教  
 研究者番号：70342623

## 研究成果の概要：

空気中や水中を移動する物体には流体力が作用する。その力は、圧力と摩擦力に分けることができる。これまでの計測方法は、計測対象に小さなセンサを埋め込んで計測していたので、測定点のみの計測であった。本研究で提案する機能性分子センサを用いた計測方法は、物体に働く圧力と摩擦力を同時に、しかも表面分布を計測できる方法である。表面に働く力の分布から、物体全体に働く合力が分かる。また、表面分布を調べれば物体周りの流れの様子を調べることもできる。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,800,000	0	1,800,000
2007 年度	1,100,000	0	1,100,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	180,000	3,680,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：機能性分子センサ, 空気力学, 画像処理

## 1. 研究開始当初の背景

機能性分子センサは酸素や熱による消光現象を利用した圧力・温度センサであり、感圧塗料や感温塗料と呼ばれて、これまでに多くの基本的性質や応用に関する研究が行われている。そして、塗料とバインダの組合せにより、センサの感度特性を変えることが可能であり、これまでに理論的研究およびセンサとしての可能性に関する実験的研究が行われている。しかし、従来の機能性分子センサでは表面摩擦力を計測することは出来なかった。

コーティング材料として用いられるゴムやゲルは、材料力学的特性について理論的・実験的に研究が行われている。その特性の一つに柔らかく、変形しやすいという性質がある。この性質を利用して、表面圧力分布と表面摩擦力の同時計測を試みる。図 1 に示すように、コーティング材に機能性分子センサを混入させて、模型表面に塗布する。励起光によりセンサが発する光(燐光)を CCD カメラで撮影する。無風時と通風時の輝度比から圧力・温度分布を計測できる。コーティング材の表面は外力(流体摩擦力)により変形する。

このときのコーティング材の変移量を CCD カメラで撮影することで、機能性分子センサによる表面圧力分布と表面摩擦力分布の同時計測が可能になると考えられる。

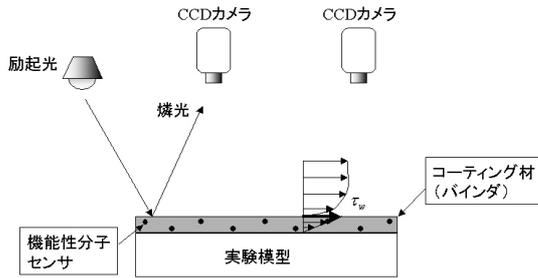


図 1 機能性分子センサによる表面圧力分布・摩擦力計測

## 2. 研究の目的

本研究では物体表面の圧力と表面摩擦力を同時計測可能な空気力計測システムの構築を目的とする。まず、コーティング材料の特性を調べて、材料単体での摩擦力計測を試みる。次に、圧力と摩擦力の同時計測を試みる。塗料とバインダの調合比による発光量、変形量の計測を行い、得られた計測結果からセンサの圧力感度・変形量の制御を行う。圧力感度・変形量の制御が可能となることによって、様々な流れ条件にフレキシブルに対応できる機能性分子センサの開発が可能となる。また、実用化を目指して行う機能性分子センサによる表面圧力分布・摩擦力同時計測では、天秤計測を用いずに、機能性分子センサのみで空気力計測を試みる。

## 3. 研究の方法

本研究で提案する摩擦力計測法は柔軟なコーティング材の変形に基づく。ポリマーゲルのような柔軟材料を物体表面に塗布する。その表面を流体が流れると、摩擦力によりコーティング材が変形する。このときせん断応力  $\tau_w$  は、既知のせん断弾性係数  $G'$  と厚み  $t$  を持つコーティング材の歪量  $\gamma$  から計測できる。物体表面に作用する  $\tau_w$  は  $\gamma$  に関するフックの法則から決定できる。

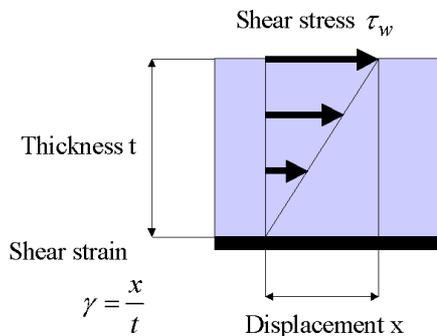
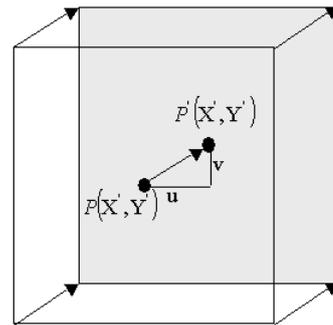


図 2 せん断力によるコーティング材の変形測定原理を図 2 に示す。壁面変位はせん断

応力に比例する。せん断弾性係数と厚みによって変位量を制御することができる。流速に応じて、適当な物性値が選ぶことで測定感度を向上できると考えられる。

摩擦力の測定原理を説明する。通風時と無風時における二つの画像からデジタル画像相関法によって歪量を算出して、摩擦力として計測する。デジタル画像相関法はカメラ画像を用いて、変位量と方向を得るために用いられる。この手法の原理は、デジタル化された画像上の輝度分布を追跡して変位量を自動的に測定することである。そのため離散的なマーカを用いなくても歪量を測定できる。



Subset  $N \times N$  pixels

## 図 3 無風時と通風時の sub-set 領域の移動

無風時の参照点  $P$  が通風時に  $P'$  へ移動したとする(図 3)。デジタル画像相関法はパターンマッチングの一つである。探索領域として  $P$  点の周りに  $N \times N$  のテンプレート領域を取る。無風時と通風時の画像からテンプレート領域で追跡を行い、相関係数が最大となる位置を求める。実験では  $N=10$  とした。

画像相関係数の計算は二段階に分けて行なう。初めに、テンプレート領域に基づいて、相関係数の計算を行ない、ピクセル単位での移動量を計算した。第二段階として、その位置の周囲でサブピクセル解析した。ピクセル周りに補間関数を作成して、その分布からサブピクセルの移動量を決定した。

## 4. 研究成果

初めに、コーティング材を使用した摩擦力計測法の構築を試みた。材料の選定、特性試験、風洞実験を段階的に行った。次に、圧力と摩擦力を同時計測する計測システムの構築を試みた。

### (1) コーティング材料の検討

実験では単層の柔軟コーティング材を用いた。信越シリコン KE-1052 を用いて作成した。コーティング材料の特性は、シリコンオイルと硬化剤の配合比を変化させて調節できる。実験条件に合った物性値を得るために配合比を変化させて多くの種類のコーティング材を作成した。物性値試験により得られた代表的な結果を表 1 に示す。表にはせん断弾性係数  $G'$ 、複素せん断弾性係数  $G''$ 、損

失正接  $\tan \delta$ , 密度  $\rho_c$  を示している.  $\tan \delta$  は時間応答性に関係するパラメータである. 配合比を変化させることで, 時間応答性を制御することができる.

表 1 柔軟壁面の物性値

Case	G'[Pa]	G''[Pa]	$\tan \delta$	$\rho_c$ [kg/m <sup>3</sup> ]
SIA	236.90	174.37	0.736	0.97
SIB	75.78	67.55	0.891	0.97
SIC	23.38	28.19	1.204	0.97

実験前に, デジタル画像相関法によって歪測定できるようにコーティング材の物性値を推算した. 摩擦係数は以下のように定義される.

$$C_f \equiv \frac{F_s}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 S} = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad (1)$$

ここで,

$$\tau_w = F_s / S \quad (2)$$

である. 摩擦力はせん断弾性係数とせん断歪を使って以下のように書くことができる.

$$\tau_w = G \cdot \gamma \quad (3)$$

(3)式を(1)式に代入すると(4)式が得られる.

$$C_f = \frac{G \cdot \gamma}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad (4)$$

せん断力による柔軟コーティング材料の壁面変位は

$$\gamma = C_f \cdot \frac{1}{2}\rho U_\infty^2 / G$$

$$x = C_f \cdot \frac{1}{2}\rho U_\infty^2 / G \cdot t \quad (5)$$

となる. 図 1 に示したように

$$\gamma = x/t \quad (6)$$

である. (5)式は壁面の歪量が実験条件や物性値によって決まることを示している. 壁面変位は画像相関法で計算する. せん断応力の計測精度は画像の単位ピクセル当たりの長さに関する. 例えば,  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  の測定範囲を  $1000 \times 1000$  の画素数を持つカメラで撮影すると, 単位ピクセルは  $1 \mu\text{m}$  の長さに相当する. 例えば, コーティング材の厚みが  $1 \text{ mm}$  であれば,  $1 \mu\text{m}$  の変位量に対する歪は  $10^{-3}$  である.

ここで摩擦係数計測に必要な柔軟材料の物性値を検討する. 空気密度は  $\rho \approx 10^0$ , 流速は  $U_\infty \approx 10^1 - 10^2$  とする. 摩擦係数は  $C_f \approx 10^{-3} - 10^{-4}$  である. せん断歪が  $\gamma \approx 10^{-3} - 10^{-4}$  のとき, 計測に必要となるせん断弾性係数は

$$10^{-3} - 10^{-4} = 10^{-3} \cdot 10^0 \cdot (10^{1-2})^2 / G$$

$$G = 10^2 - 10^5 [\text{Pa}] \quad (7)$$

となる. 様々なせん断弾性係数を持つ柔軟コーティング材は商用のシリコンゲルを用いて簡単に作成することができる.

## (2) 材料特性試験

コーティング材の歪量と摩擦力の較正には二つの方法が考えられる. A priori 較正では, 画像から得られる歪量と測定したせん断弾性係数から摩擦力が測定される. In-situ 較正は画像計測されるせん断歪と, 他の計測を併用することで摩擦力と歪量の関係を得る. In-situ 較正は, せん断弾性係数を間接的に測定することを意味する. 熱線流速計で測定した摩擦力と画像の歪量から較正を行った.

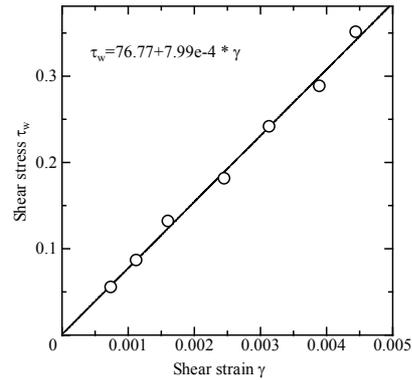


図 4 In-situ 法における校正曲線

## (3) 定常摩擦係数計測

初めに定常摩擦係数計測を行い, コーティング材を用いた摩擦係数計測を試みた. 実験は NPL 型ブローダウン風洞を用いて行なった. 風路断面積は  $60 \times 60 \text{ cm}^2$  であり, 流路長さは  $300 \text{ cm}$  である. 地面板前縁は楕円形状をしており, 円柱列を千鳥状に配置して測定位置  $200 \text{ cm}$  で十分発達した乱流境界層となるようにしている. 実験は単位長さ当たりのレイノルズ数  $Re$  で  $3 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$  の範囲で実験を行なった. 図 5 は測定部の拡大図を示している.

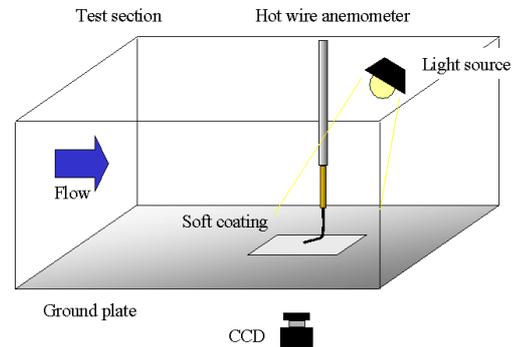
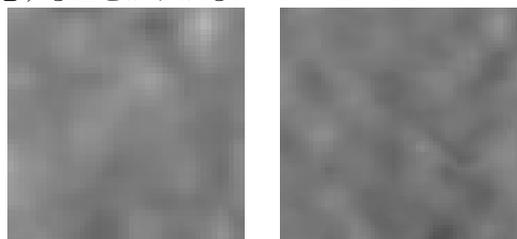


図 5 実験装置と計測システム図

柔軟コーティング材は厚さ  $1 \text{ mm}$ ,  $480 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$  の大きさに作成した. 柔軟壁面上のランダムパターンを測定するために CCD カメラと光源がテストセクションに設置されている. カメラは SONY XC-HR50 ( $640 \times$

480pixels, 60fps)を用いた。本手法の計測結果と比較するために、定温度型熱線流速計(KANOMAX Inc. model 7303)による摩擦力測定を行なった。コーティング材は無色透明である。実験ではカメラを測定面下部に設置して計測を行った。

図6は瞬間の無風画像と通風画像を示している。撮影領域は $10 \times 10 \text{ mm}^2$ である。輝度分布に違いがあることから、コーティング表面のランダムパターンが摩擦力によって変化することがわかる。



(a) 無風時 (b) 通風時

図6 無風時と通風時のカメラ画像

1ケースの実験について、無風画像と通風画像は最大300枚撮影した。CCDカメラなどによるノイズの影響は画像平均により除去される。平均化された無風画像と通風画像の歪量を計算して定常流れとした。図6を用いて二画像間の相関値を計算して、歪量から摩擦力を求める。撮影領域が狭いため面摩擦力は0.1%のばらつきの範囲で同じ値であった。図7にa priori校正と熱線流速計で測定した局所摩擦係数 $C_f$ と $Re$ 数の関係を示す。実線でWhiteの式も示している[10]。

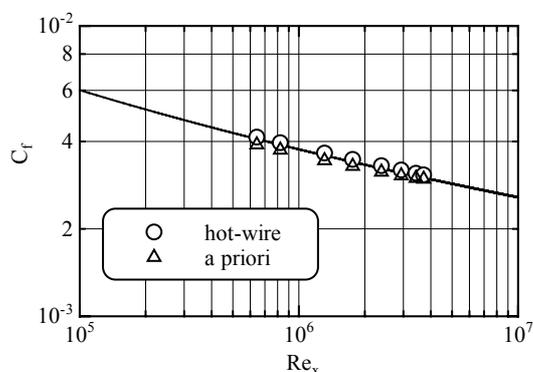


図7 a-priori校正による摩擦係数 $C_f$

平板上に働く摩擦力の $Re$ 数効果を捉えている。熱線流速計の結果に対して3~5%の範囲で $C_f$ が一致した。傾きにやや違いが見られる。A priori校正では、実験結果が物性試験結果に強く依存する。物性試験を繰り返し行い、測定結果のばらつきを抑えることで定量性は改善されると考えられる。

図8にIn-situ校正による結果を示す。図4の校正結果を元に $C_f$ が計算される。In-situ校正を用いた場合でも、良好な結果が得られている。どちらの校正法も熱線流速計による $C_f$ 測定と同程度の精度で計測可能であり、本手法による摩擦力測定の校正法として有効

であることを確認している。

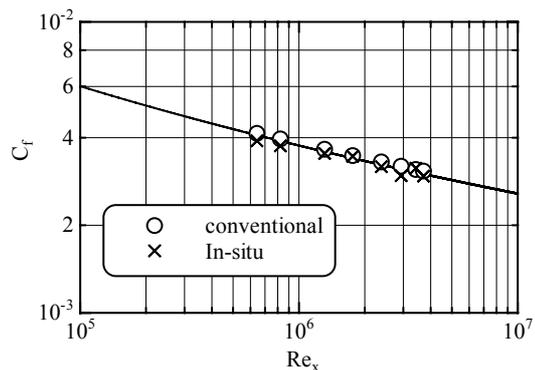


図8 In-situ校正による摩擦係数 $C_f$

#### (4) 超音速流れへの適用

超音速流れに対して、本手法を適用してみた。実験は大学所有の超音速風洞を用いて行った(図9)。コーティング材料は(3)で使用したのと同じである。模型は半頂角 $20^\circ$ の円錐模型を用いた。



図9 超音速風洞と円錐模型

風洞始動時の衝撃などにより、コーティング材の剥離や、実験再現性が得られないなどの問題があった。配合比率や塗布厚さを変えることで、吸着力が強くなり、コーティング材が剥離しにくいように調節を試みた。マッハ数2の流れで10回以上通風しても剥離しないものもあったが、3回位で使用できなくなる場合が殆どであった。超音速流れに適用するコーティング材を製作するには試行錯誤が必要である。

#### (5) 非定常摩擦力計測

非定常摩擦力を測定するために、物性試験を行った。図10, 11はせん断弾性係数と損失正接の周波数特性を示している。配合比を変化させても、コーティング材は粘弾性特性特有の性質を示している。

バインダの動的特性試験による系統的な情報を元に、ひずみ量を算出することができるので、非定常摩擦力計測が可能となる。

非定常摩擦力計測用カメラにはディテクト HAS-220 (640x480pixels, 200fps)を用いた。実験装置は(3)の低速風洞を用いて行った。図12は本手法と熱線流速計で得られた摩擦係数の時間変化を示している。熱線流速計の結果は $y^+ < 5$ の粘性底層内で測定した速度変動から計算している。熱線流速計の

測定点の直下を画像計測することは出来ないで、ここでは定性的な傾向を比較する。

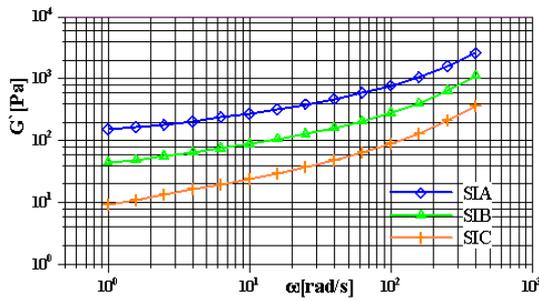


図 10 せん断弾性係数の周波数依存性

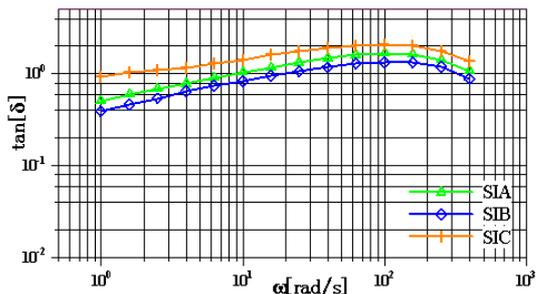


図 11 損失正接の周波数依存性

熱線流速計の時間分解能 10kHz に対して、カメラの時間分解能が 200fps である。そのため、詳細な  $C_f$  の変化を捉えることは出来ていない。しかし、摩擦係数の変動幅は同程度である。使用したカメラの時間分解能を考慮すれば、十分な精度で非定常摩擦力を計測できている。

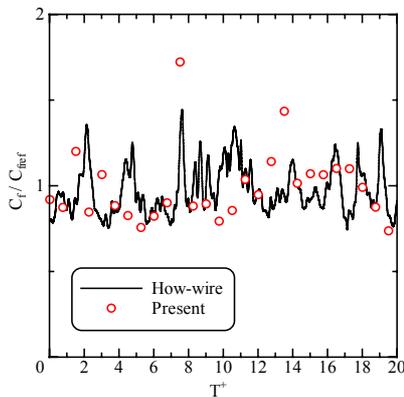


図 12 非定常摩擦変動

#### (6) 感圧塗料実験との融合

コーティング材による摩擦計測が可能となったので、機能性分子センサによる圧力と摩擦力の同時計測システム構築を試みた。塗料には Ruthenium 錯体系塗料である (Bath-phen)Ru, バインダには信越シリコン KE-1052 を用いた。光源には青色 LED を用いた。CCD カメラには浜松ホトニクス C8484-05G (1024x1024pixels, 12bit) を用いた。

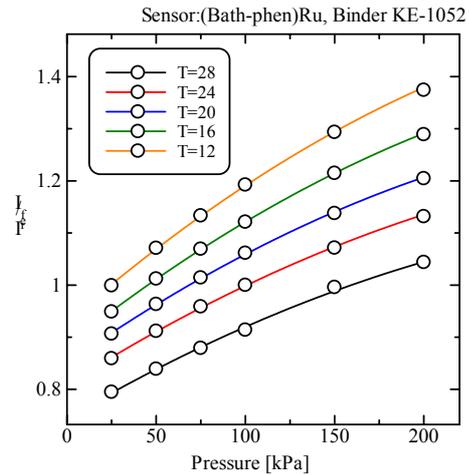


図 13 感圧塗料の圧力特性

感圧塗料の圧力特性の代表例を図 13 に示す。感圧塗料は温度依存性がある。図 13 の結果を元に、センサの温度依存性を除去することができる。

円柱に作用する圧力・摩擦力の同時計測と空気力測定を行った。実験装置は (3) で使用した風洞装置で行った。模型直径は 20mm, レイノルズ数は  $2 \times 10^4$  である。

円柱表面の摩擦力ベクトルを可視化した結果を図 14 に示す。円柱後流で剥離域が形成される様子をとりえられている。

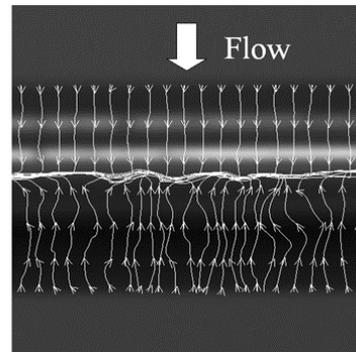


図 14 円柱表面摩擦力ベクトル分布

感圧塗料を用いて圧力分布を計測した結果を図 15 に示す。圧力計測のための実験画像は 300 枚撮影した。その後、画像平均化と画像処理によるノイズ除去を行った。さらに平均枚数を増やしたり、様々なノイズ処理方法を試みたが改善されなかった。

円柱の淀み点側では圧力が高く、背後では低くなっており、円柱表面の圧力分布を定性的に捉えている。流れのパターンは図 14 に対応している。

円柱に作用する圧力と摩擦力から全空気を求めることができる。図 15 に測定結果を示す。実線は Weiselberger による結果である。また、ピトー管による運動量計測で得られた結果も示している。本手法による結果は他の結果に比べて  $C_D$  値が低くなっている。

このときの実験条件では、全抵抗に対して圧力抵抗は約 8 割を占める。しかし、機能性分子センサを用いた方法では 6 割程度でしかなかった。低速実験では感圧塗料の圧力感度が低くなる。高 bit 数のカメラや圧力感度の高いセンサを使用すれば、より高い精度で圧力と摩擦力を同時計測できると考えられる。

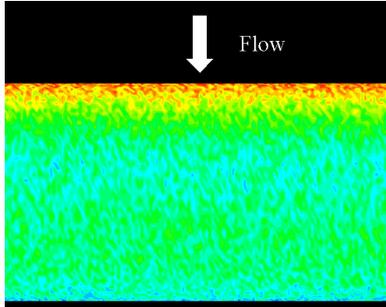


図 15 円柱表面圧力分布

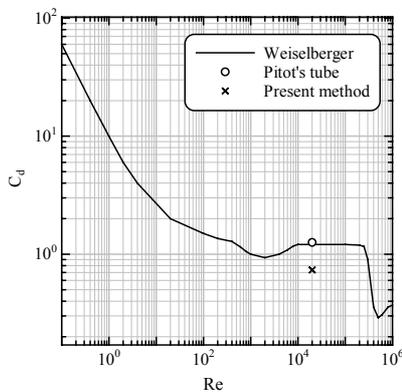


図 16 円柱の空気力特性

#### (7) 画像処理統合プログラムの開発

本実験では、実験画像を取得してから様々な画像処理を経て計測結果が得られる。

作業効率を向上させるために、画像読み出しからノイズ処理、画像相関計算、などを統合したプログラムを作成した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 4 件)

1. Nobuyoshi Fujimatsu and Isao Misu, Surface Skin Friction Measurement and Visualization Based on Compliant Coatings, 2008 ASME Heat Transfer /Fluids /Energy /Solar /Nano Conferences, FEDSM2008- 55203 (2008).
2. Nobuyoshi Fujimatsu and Isao Misu, Development of Surface Skin Friction Measurement Technique based on Compliant Coatings, 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Summer

Conference, FEDSM2007 -37323, (2007).

3. 藤松信義, 三栖 功, 柔軟コーティング材を用いた表面摩擦力の画像計測, 第 39 回流体力学講演会, (2007).

4. 藤松信義, 三栖 功, 軟質ゲルコーティングを用いた表面摩擦力の画像計測システムの構築, 第 35 回可視化情報シンポジウム, (2007).

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤松信義 (FUJIMATSU NOBUYOSHI), 青山学院大学・理工学部・助教・研究者番号: 70342623