

MEMS 技術を用いた流体摩擦力計測技術の開発

寺 島 修*

Development of the wall shear stress measurement technique with using micro fabricated sensor

Osamu Terashima*

To establish the measurement technique to measure wall shear stress in high accuracy, micro-scale sensor is fabricated and their responses to the wall shear stress are investigated. In this study, a floating-element sensor which consists of a floating element, two stationary components, and two springs is fabricated. The calibration test of the floating-element sensor is performed with using Stokes layer excitation method. The calibration result shows that the output voltage of the C-V conversion circuit connected to the floating-element sensor E is almost proportional to the wall shear stress τ_w as theoretically expected.

1. はじめに

近年、化石燃料の高騰や地球温暖化ガスの排出量削減の観点から、機械工学の分野、特に流体が関わる機器の研究開発においては、これらの機器の効率向上による省エネルギー化が盛んに進められている。この「機器の効率向上」を実現するためには、流体による損失が発生している箇所やその程度を正確に把握し、それに基づいた改良を施す必要がある。しかし、流体による損失が発生している箇所を特定すること、特に流体中の物体の表面近傍で損失が発生している箇所を特定することは非常に難しい。

このような背景から、物体の表面近傍で流体による損失が発生している箇所を表す指標の一つである流体摩擦力(壁面せん断応力)を計測するためのセンサの開発やその有用性の評価がこれまで行われてきた^{[1]-[4]}。このような流体摩擦力計測用のセンサは直接計測式と間接計測式の二つに大別され^[5]、前者はセンサの受感部に作用する力を直接計測し、後者はセンサの受感部に作用する力を別の物理量に置き換えて計測する。しかし、これまで開発されたいずれの方式のセンサも装置の複雑さやS/N比、空間分解能、時間分解能などの点に少なからず課題を有していた。

そこで本研究では、これらの課題を解決すべく、流体の粘度計測用センサとして従来から利用されていたセンサを応用し、流体摩擦力を直接計測するフローティングエレメント式センサの試作と動作検証を行った。

2. フローティングエレメントセンサ

このセンサは、可動部電極、固定部電極、ばねで構成されており、可動部はばねで支持されている。可動部と固定部は櫛歯型構造をしており、それぞれセンサの駆動部と検出部の役割をなしている。センサの概略図は図1に示す通りである。

本センサの測定原理を記す。櫛歯型構造部はコンデンサとなっており、静電容量を持っているが、このセンサを流れの中にある固体表面に設置すると、可動部に流体摩擦力が作用してその位置が変化し、静電容量が変化する。このため、静電容量の変化を検知することで流体摩擦力の計測が可能となる。頁の関係上詳細の記述は省略する(詳細は文献^[6]を参照されたい)が、このセンサは双方の静電容量と可動部電極の変位量が比例関係となる。また、センサ可動部の両端がばねで固定されているため、ばね変位と力が比例関係となり、双方の静電容量の差が可動部に作用する力に比例する。したがって、静電容量の差を電氣的に検出することにより、壁面せん断応力を計測することが可能となる。本研究では、静電容量の差をC-V変換差動増幅回路を用いて電圧に変換して検出した。

3. 較正試験方法

センサの較正試験には Chandrasekaran ら^[3]の手法を参考に較正試験装置を製作して行った。この較正試験装置は音波(平面波)を利用して正方形管内に Stokes Layer を励起し、Stokes Layer により生じる流体摩擦力を利用する装置である。

2013年3月31日 受理

*豊田理研スカラー

(名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻)

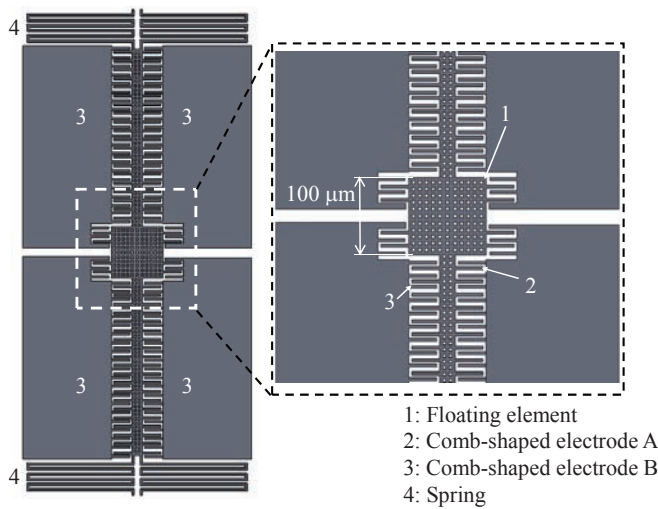


図 1. Top view of the floating element sensor

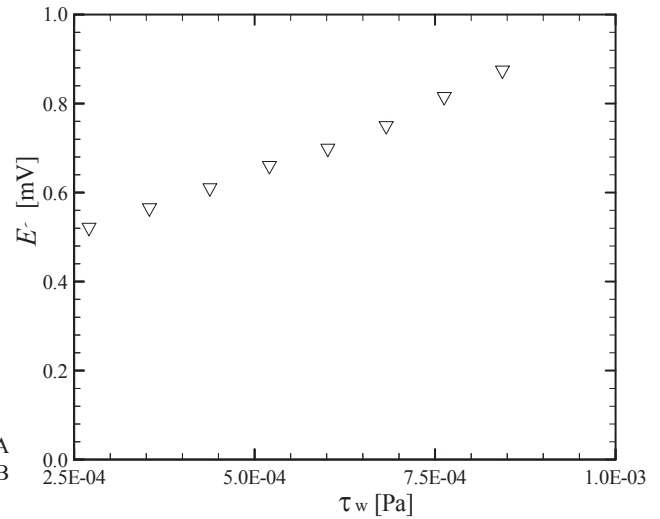


図 2. Calibration result of the floating-element sensor with Stokes layer excitation system

本装置では、正方形管（断面積 85 mm × 85 mm）の左端に直径 300 mm のスピーカを設置し、これにより正方形管内に音波を励起した。Chandrasekaran ら⁽³⁾によれば、管内を伝搬する平面波の圧力変動振幅 p' と平面波の周波数 f 、流体摩擦力 τ_w には以下の関係が成立することが示されている。

$$\tau_w = \frac{p' \sqrt{jf\nu}}{c} e^{j(ft-kx-\pi/2)} \tanh(\eta\sqrt{j}) \quad (1)$$

ここで、 $j = \sqrt{-1}$ 、 ν は空気動粘度、 c は音速、 $k = c/f$ 、 x は音波の進行方向座標、 η はストークス数である。式(1)より、Stokes Layer による壁面せん断応力は、 p' と音波周波数 f の平方根に比例することがわかる。なお、この較正試験ではファンクションジェネレータを用いて 100 Hz の音波を発生させて較正試験を行った。

4. 結果と今後の展望

図 2 に較正試験結果の一例を示す。図の横軸は流体摩擦力 τ_w 、縦軸は差動増幅回路の出力電圧 E を表している。図より、理論通り、センサの出力は流体摩擦力に対して線形比例の出力となっていることが分かる。また、マイクロヒーティングエレメントを用いた間接計測の場合、自己発熱による対流の発生によりこのような微小なオーダの流体摩擦力を検知することは難しいが、本センサのような直接計測ではそれが実現され、高 S/N 比計測実現の可能性を有していると考えられる。今後はセンサのより詳細な特性を調べるとともに、実際の流れ場における流体摩擦力計測への展開を検討する予定である。

5. 謝辞

本研究は名古屋大学の酒井康彦教授、式田光宏准教授、長田孝二准教授、肥田博隆研究員、沢田拓也氏、濱口佳代氏の協力を得て行われた。ここに記して関係各位に謝意を表す。

REFERENCES

- (1) Große, S. and Schröder, W., “High Reynolds number turbulent wind tunnel boundary layer wall-shear stress sensor”, *Journal of Turbulence*, Vol. 10, No. 14 (2009), pp. 1-12.
- (2) Brücker, Ch., Bauer, D. and Chaves, H., “Dynamic response of micro-pillar sensors measuring fluctuating wall-shear-stress”, *Experiments in Fluids*, Vol. 42 (2007), pp. 737-749.
- (3) Chandrasekaran, V., Cain, A., Nishida, T., Cattafesta, L.N. and Sheplak, M., “Dynamic calibration technique for thermal shear-stress sensors with mean flow”, *Experiments in Fluids*, Vol. 39 (2005), pp. 56-65.
- (4) Löfdahl, L., Gad-el-Hak, M., MEMS applications in turbulence and flow control, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 35 (1999), 101-203.
- (5) Terashima, O., Sawada, T., Sakai, Y., Nagata, K., Hida, T. and Shikida, M., “Measurement of Wall Shear Stress by Using Micro-fabricated Sensor”, *Proceedings of ISEM 12* (2012), C107.