

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 10 日現在

| |
|--|
| 機関番号：11301 |
| 研究種目：挑戦的萌芽研究 |
| 研究期間：2011～2012 |
| 課題番号：23656142 |
| 研究課題名（和文） 音が見える超高速大型位相シフト干渉計開発と 乱流温度境界層の定量計測 |
| 研究課題名（英文） Development of large-size high-speed phase shifting interferometer to observe sound and to measure turbulent thermal boundary layer |
| 研究代表者 圓山 重直 (MARUYAMA SHIGENAO) 東北大学・流体科学研究所・教授 研究者番号：80173962 |

研究成果の概要（和文）：高感度かつ高速度な計測を可能とする超高速大型位相シフト干渉計を開発した。位相シフトデータを高速に取得するため、新たに位相シフト・ケスタープリズムを開発した。さらに凹面鏡と準コモンパス 3 次元光路を採用し、風洞内に大型準コモンパスマツェンダー干渉計を構築した。そして、トリッピングワイヤを取り付けた加熱円柱周りの温度場から温度境界層の乱流遷移を観察した。また、円柱周りの圧力場を計測し、音場の計測の可能性を示した。さらに、加熱平板上に発達する温度境界層を計測し、速度場の推定を行った。

研究成果の概要（英文）：In order to achieve highly sensitive and high-speed measurement, a novel interferometry system was developed. A novel phase-shifting Koester prism was developed to acquire the phase shifted data with high sampling rate. In order to build the interferometer in the wind tunnel, the large-size quasi common path interferometer was developed with the concave mirror and three dimensional quasi common path. Next, the forced convection field around heated cylinder was observed and the turbulent transition of the boundary layer was estimated by using the tripping wire. Finally, the developing of the thermal boundary layer on the flat plate was measured quantitatively. Furthermore, the velocity distribution in the boundary layer was estimated.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|-------|-----------|---------|-----------|
| 交付決定額 | 3,000,000 | 900,000 | 3,900,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：対流熱伝達、境界層、干渉計、乱流遷移

1. 研究開始当初の背景

CFD などシミュレーション技術の進歩した現在でも、流れの観測は重要な技術であり、最先端の流動ダイナミクス研究には益々重要となっている。熱流動の可視化技術は多く存在するが、光干渉計は古くから用いられている手法であり、自然対流の測定などにも用いられてきた。

光干渉計は、シュリーレン法などに比べて定量的な測定が可能である。しかし、その精度は光の波長程度の光路差の測定が限界で

あった。申請者らは、光の位相を変化させた 3 種類の干渉縞画像から位相シフト画像を得る技術により、従来の光干渉計に比べて 10 倍以上良い位相解像度を有する位相シフト干渉計 [圓山, 柴田, 塚本, 微小重力環境下における急速冷却時の溶液中の熱・物質拡散場と結晶成長の測定, 日本機械学会論文集 (B) Vol.64,(1998)、日本機械学会論文賞受賞] を開発した。それによって結晶成長の定量計測に成功し [S. Maruyama, K. Ohno, A. Komiya, S. Sakai, Journal of Crystal

Growth, Vol.245(2002)]、物質拡散係数の導出も行っている [小宮敦樹他, 第 27 回日本熱物性シンポジウム講演論文集, (2006), 358-360 頁.、日本熱物性学会奨励賞受賞]。さらに、回転型の偏光板を使用することによって、より高解像度の位相画像の測定に成功し、拡散場の高精度測定に利用している [A. Komiya et al., Proceedings of the Ninth Asian Thermophysical Properties Conference, (2010), ATPC109254]。この新型の干渉計の位相解像度は従来の干渉計に比べて約 100 倍以上良い。

しかし、この干渉計は回転型偏光板を使用しているために、時間解像度が 1/10 秒であり、高速流動場の光干渉計測には使用できない。また、光学系の視野が 1cm 程度であるために大きな流動場の測定が出来ないという問題があった。

2. 研究の目的

特殊な位相シフト・ケスタープリズムと大型コモンパス・マッハツェンダー干渉計を開発し、これまで不可能であった音の密度差を検出できる超高感度位相差干渉計と高速度カメラで位相シフト画像を動的に測定することが出来る全く新しい熱流動場計測システムを構築する。このシステムと大型の低乱熱伝達風洞を使用して、温度境界層の乱流遷移の動的過程について定量的計測を行う。さらに、境界層遷移と音場との関係や、境界層剥離と騒音発生との関係など、数値シミュレーションでしか明らかにできなかった熱流動場の定量計測を実施して、実験と計算熱流動の融合による新しい研究パラダイムを構築する。

3. 研究の方法

本研究は、(1)位相シフト・ケスタープリズムと大型コモンパス・マッハツェンダー干渉計、高速度デジタル画像処理装置の開発によって、音波の動的伝播が観測できる超高精度熱流動場計測システムの構築と、(2)上記を用いて世界有数の性能を有する大型低乱熱伝達風洞を用いた温度境界層の乱流遷移現象の計測や、音場と乱流境界層の関係、剥離流が流体騒音に及ぼす影響を明らかにする研究、に大別される。(1)については 23 年度を中心に実施し、大型干渉計の開発は 24 年度に実施した。(2)については、主に 24 年度に実施した。特にケスタープリズムを用いることによって、1CCD カメラの仕様が可能となり、高速ビデオカメラと本計測装置を組み込むことにより、従来数値シミュレーションでしか情報が得られなかった音の伝播と熱流体现象の関連性を明らかにする。

4. 研究成果

大型準コモンパスマッハツェンダー干渉計を構築した。Figure 1 に本研究で構築した干渉計の概略図を示す。大型準コモンパスマッハツェンダー干渉計では風洞への適用および擾乱による影響の低減を行うため、光学パスを三次元準コモンパス光路とした。また凹面鏡と収差補正レンズにより、観察視野の拡大を行った。

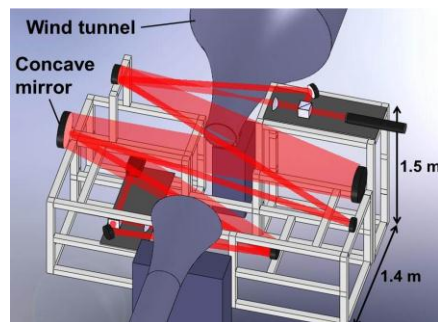


Fig. 1. Schematic of quasi common path phase-shifting interferometer.

さらに大型準コモンパスマッハツェンダー干渉計へ位相シフト技術を導入するために、特殊な位相シフト・ケスタープリズムを開発し、位相シフトデータの取得に成功した。Figure 2 に位相シフトケスタープリズムの概略図を示す。位相シフトケスタープリズムは入射光を 4 つの光に分割し、同じ方向に出射するため、単一のカメラで 4 つの光を同時に取得できる。ここで出射光に対してフィルターを配置することで出射光それぞれに機能を持たすことができる。本研究では偏光子を配置し、3 種類の干渉縞を同時取得した。Figure 3 に画像処理画面を示す。Figure 3(a)に CCD カメラによる取得画像を、Fig. 3(b)に画像処理結果を示す。Figure 3 に示すように 4 つの画像を単一のカメラで同時取得することで、位相シフト技術の高速現象の適用を可能とする。

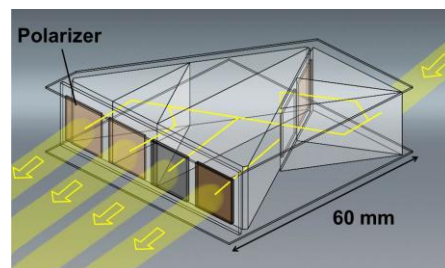


Fig. 2. Schematic of phase-shifting Koester prism.

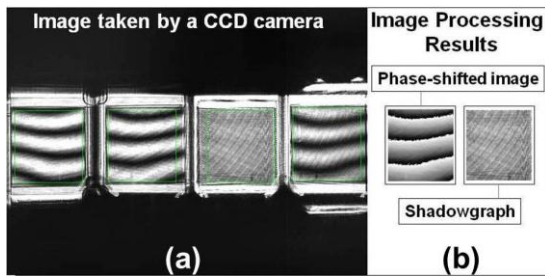


Fig. 3. Processing screen of obtained images by phase-shifting Koester prism.

構築した干渉計を用いて垂直加熱平板周りの層流自然対流の温度境界層を可視化計測した。計測温度データを数値計算から得られる温度場と比較し、温度境界層の3次元性の影響を定量的に評価した。比較結果をFig. 4に示す。比較から良い一致が得られ、構築した光学システムの流れ場への有効性が示された。

次に構築した干渉計を風洞へ設置し、強制対流場の可視化を行った。トリッピングワイヤを取り付けた加熱円柱周りの温度場から温度境界層の乱流遷移を観察した。Figure 5に干渉縞による可視化結果を示す。トリッピングワイヤにより剥離点が移動していることがわかる。また可視化結果からレイノルズ数と乱流遷移の関係を導き、既存のデータと比較し、良好な一致を得た。さらに、円柱周りの圧力場を計測することができ、音場の計測の可能性を示した。

さらに、加熱平板周りの強制対流の温度境界層の可視化計測をし、プラントル数の修正を行うことで速度場の推定を行った。温度計測結果をFig. 6に、速度の推定結果をFig. 7に示す。温度計測、速度推定ともに良好な一致が得られ、強制対流場への有効性が示された。

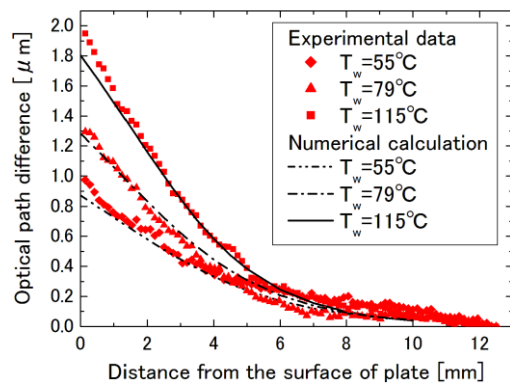


Fig. 4. Comparison between experimental data and numerical calculation data.

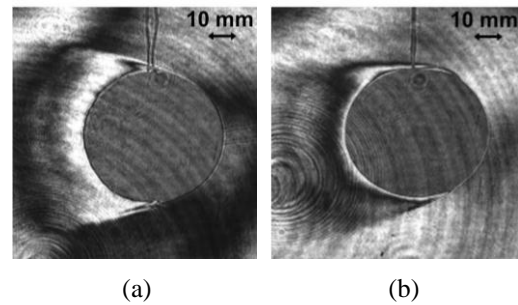


Fig. 5. Visualization results of forced convection around circular cylinder, (a) without trip-wire (b) with trip-wire.

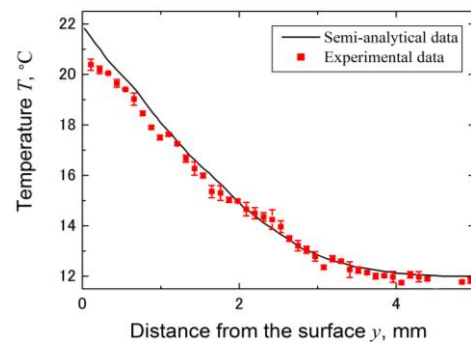


Fig. 6. Comparison of temperature distribution between experimental and semi-analytical data

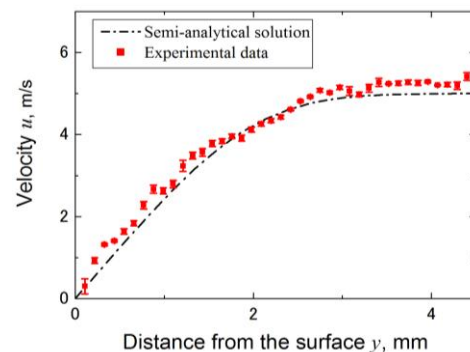


Fig. 7. Velocity comparison between experimental data and semi-analytical solution.

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)

[雑誌論文] (計1件)

[1] E. Shoji, A. Komiya, J. Okajima, and S. Maruyama, Development of quasi common path phase-shifting interferometer for measurement of natural convection fields, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有, Vol. 55, 2012, pp. 7460-7470.

DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.07.039

〔学会発表〕（計 5 件）

[1] E. Shoji, A. Komiya, J. Okajima, and S. Maruyama, Temperature Distribution Mesurement in Natural Convection around Vertical Heated Flat Plate by Using Inverse Abel Transform and Phase-Shifting Interferometer, 23rd International Symposium on Transport Phenomena, 2012.11.19-2012.11.22, Auckland, NewZealand.

[2] E. Shoji, S. Kon, A. Komiya, J. Okajima, and S. Maruyama, Visualization and Measurement of Laminar Natural Convection in Square Enclosure, The Third International Forum on Heat Transfer, 2012.11.13-2012.11.15, Nagasaki, Japan.

[3] E. Shoji, A. Komiya, J. Okajima, and S. Maruyama, Design of Interferometer System with Phase-shifting Koester Prism, Ninth International Conference on Flow Dynamics, 2012.09.19-2012.09.21, Sendai, Japan.

[4] 庄司衛太, 小宮敦樹, 岡島淳之介, 円山重直, コモンパス位相シフト干渉計による自然対流場の高精度計測, 日本機械学会東北支部第 47 期総会・講演会, 2012.03.13, 仙台市.

[5] E. Shoji, A. Komiya, J. Okajima, and S. Maruyama, Visualization and Measurement of Natural Convection around Vertical Flat Plate by Common Path Phase-Shifting Interferometer, 22nd International Symposium on Transport Phenomena, 2011.11.09-2011.11.11, Delft, Netherlands.

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：多機能画像取得装置およびケスタープリズム

発明者：円山重直, 庄司衛太, 岡島淳之介, 川村博, 千布善行

権利者：国立大学法人東北大学, 日東光器株式会社

種類：特許

番号：特願 2012-096688

出願年月日：2012 年 4 月 20 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

円山 重直 (MARUYAMA SHIGENAO)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：80173962

(2) 研究分担者

小宮 敦樹 (KOMIYA ATSUKI)

東北大学・流体科学研究所・准教授
研究者番号：60371142

守谷 修一 (MORIYA SHUICHI)

東北大学・流体科学研究所・技術専門職員
研究者番号：30400419

岡島 淳之介 (OKAJIMA JUNNOSUKE)

東北大学・流体科学研究所・助教
研究者番号：70610161