

機関番号：53801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760139

研究課題名(和文)

強安定成層下における乱流輸送機構の解明

研究課題名(英文)

An Investigation of Turbulent Transfer Phenomena in a Strongly Stably-Stratified Flow

研究代表者

大庭 勝久 (OHBA KATSUHIKA)

沼津工業高等専門学校 電子制御工学科・准教授

研究者番号：40321442

研究成果の概要(和文)：強安定成層流中における熱・運動量輸送に及ぼす浮力効果の解明を目的として、気流の温度・速度の同時計測が可能な二線式温度流速計の高精度化を行った。本研究では、FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いて各種補償系をデジタル化した。抵抗線温度計用の周波数補償系では、フィルタ係数を逐次更新することで温度変動成分に対する高精度な補償を実現した。熱線流速計用の温度補償系では、平均流速  $U=3.0\text{m/s}$ 、平均温度差  $\Delta\Theta=0\sim 60\text{K}$  の加熱気流中においても、正確な流速計測が可能となった。遅延補償系では、 $1.0\sim 5.0\text{m/s}$  の流速範囲において、瞬時信号に基づいて温度信号を適切に遅延させることが可能となった。

本研究により、乱流生成や乱流輸送の解明に必要な温度・速度変動及び相関量の高精度計測が可能なデジタル二線式温度流速計が構築された。

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：環境流体力学、温度成層流、温度流速計、熱・運動量輸送、浮力効果

## 1. 研究開始当初の背景

鉛直方向に温度勾配を有する温度成層流は、熱機器や化学プラントを始めとする産業機器内、あるいは大気・海洋や湖・河川等の地球環境中に存在する基本的流れである。ここでは、温度差により発生する浮力が、流体運動や熱・物質輸送に重大な影響を及ぼし、工業地域から排出される汚染物質の環境中への拡散・集積や気候変動等を高精度に予測する上で重要な要素となる。従来の室内実験では、温度成層形成装置の方式や性能等の制

約から、低乱れ、かつ  $1000\text{K/m}$  を超える大きな温度勾配を有する混合層は実現されておらず、数値計算においても乱流渦と成層効果の相互干渉を十分な分解能で予測し得るには至っていない。一方、二次元混合層や非成層条件下での物体後流に関する研究は多くあるが、大きな温度差が存在し、流体運動に対し浮力が能動的に作用する強安定成層流中における渦構造の生成過程や乱流輸送機構については十分に解明されているとは言い難い。

冷熱二線式温度流速計の単一のセンサを用いた一点計測では、温度勾配は時間平均値しか取得できず、エネルギー輸送の時系列変化を評価する上で必要となる瞬間値を求める為には、センサを鉛直方向に複数配置した多点計測を行う必要があった。しかし、従来のアナログ回路を基盤とする計測システムでは、多チャンネル化した各チャンネルにおける電気的特性のわずかな差異が空間構造の解明に障壁となることが明らかになっていった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、冷熱二線式温度流速計における温度・速度の同時計測アルゴリズムに必須となる同時相互補償系をデジタル化し、強安定成層流中における乱流生成や乱流輸送の解明に必要な温度・速度変動及び相関量の高精度計測が可能なデジタル二線式温度流速計を構築することである。

## 3. 研究の方法

本研究では、FPGA と呼ばれる電子デバイスを用いて抵抗線温度計用の周波数補償系、熱線流速計用の温度補償系、また、空間分解能を向上させるための遅延補償系を構築した。FPGA は内部の論理回路をプログラムで構成可能、複数処理の完全並列実行が可能であるという特長を有する。

## 4. 研究成果

### (1) 周波数補償系のデジタル化

先行研究では、連続周波数領域から離散周波数領域への写像である双一次変換を採用し、既存のアナログ補償系と同等の特性を有するデジタル補償系を構築した。初期的なデジタル補償系では、予備実験により得られた時間平均した伝達関数から、プローブの一次遅れ特性の時定数を求め、それを固定値として補償系に設定していた。本研究では、サンプリング周期  $100\mu\text{s}$  に合わせてフィルタ係数を更新することにより、流れ場の瞬時情報に同期して補償系の特性を変化させ、プローブの熱的時定数の変動に追従した補償を可能にした。低周波域 ( $0.01\sim 10\text{Hz}$ ) における周波数補償の特性の検定は、図 1 に示す気流加熱装置を有する全長  $3380\text{mm}$  の風洞内に、直線状の温度分布 (最大温度差  $15\text{K}$ ) を持つ流れ場を形成し、その中で温度センサ ( $\phi=5.0\mu\text{m}$ ) を一定周期で上下動させ、正弦波状の温度変動を与える方法により行った。検定試験の様子を図 2 に、流速  $U=3.0\text{m/s}$  における周波数応答特性の検定結果を図 3 に示す。今回構築したデジタル補償系により、誤差  $\pm 3.9\%$  以内の補償を実現した。本研究における補償対象は、温度に加えて速度依存性を有する系であるが、今回は流速を固定値として扱ったことによ

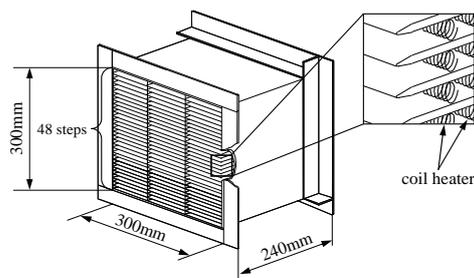


図 1 気流加熱装置の概観

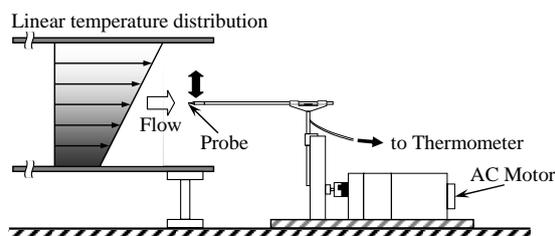


図 2 抵抗線温度計用の低周波特性検定試験の概観

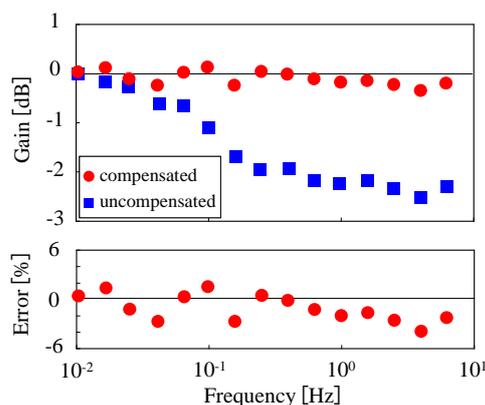


図 3 低周波域における抵抗線温度計の周波数特性 (平均流速  $U=3.0\text{m/s}$ )

り誤差が増大したものと推測される。本システムは、流速の瞬間値を反映させて補償特性を調整することで更に精度を向上させることが可能である。

双一次変換法を適用することにより、抵抗線温度計の一次遅れ特性を補償するデジタル補償系を FPGA 上に構築し、フィルタ係数を逐次更新させた結果、低周波域の周波数補償を流れの状態に追従して動的に制御する補償系が実現できた。

### (2) 温度補償系のデジタル化

本研究で構築したデジタル温度補償系を以下の 2 つの方法により評価した。

#### ① 熱電対の平均温度に基づく評価

気流加熱装置を有する全長  $3380\text{mm}$  の風洞内に、非加熱時の平均流速  $U=2.0, 3.0, 4.0\text{m/s}$  の

流れ場を形成し、室温からの温度差 $\Delta\Theta=0\sim40^{\circ}\text{C}$ の範囲での平均流速を取得することにより行った。本風洞は縮流洞上流に鉛直方向に48段 $\times$ 2列に配置されたコイルヒーターが内蔵され、これらをボルトスライダにより加熱制御することで、気流を一様に加熱することが可能である。実験結果を図4に示す。鎖線は空気の体積膨張率に基づいて算出した加熱時の流速である。未補償時は、気流温度の上昇に伴って出力値が減少していく様子が見受けられる。これは、細線を定温度で動作させる場合には、細線表面の熱伝達率は気流流速に加えて、気流温度および膜温度の関数であり、これらに応じた温度補償を行わなければ正確な流速値が得られないことを意味している。このような減衰特性に対して、本デジタル補償系による温度補償を行うことにより、補償後の出力値は、体積膨張率に基づいて算出された流速値と良く一致している。温度補償後の最大誤差は1.60%となり、 $\Delta\Theta=0\sim40^{\circ}\text{C}$ の温度変化に対する平均流速の補償を適切に行う補償系がデジタル方式で構築されたことが示された。

#### ② 抵抗線温度計の瞬時温度に基づく評価

従来のアナログ素子を基幹とする補償系では、実装上の制約から式(1)で表されるパラメータを式(2)の様に近似し、補償演算を行っていた。それに起因して、図5に示すように、 $\Delta\Theta=40\text{K}$ 以上の高温域において補償演算の近似精度が劣化するという問題があった。一方、FPGAでは、アナログ計測器では実装が困難な複雑な演算でも容易に実装することが可能である。本研究では従来の温度補償アルゴリズムに気流の物性値の温度依存性を考慮し、式(3)、(4)に示されるように1次の補正項を導入した。図5から、厳密化されたアルゴリズムでは $\Delta\Theta=80\text{K}$ においても高精度に近似されていることが分かる。厳密化されたアルゴリズムをFPGAへ実装し風洞実験によって評価した。

$$\frac{A}{A_0} = \frac{\lambda_{f_0}}{\lambda_f} \left( \frac{T_f}{T_0} \frac{T_0}{T_a} \right)^{-0.17} \left( 1 - \frac{\theta_a}{\theta_w} \right)^{-1}, \frac{B}{B_0} = \left( \frac{v_f}{v_{f_0}} \right)^{0.45} \quad (1)$$

$$\frac{A}{A_0} \cong \left( 1 - \frac{\theta_a}{\theta_w} \right)^{-1}, \frac{B}{B_0} \cong \frac{\theta_a}{\theta_w + \alpha} \quad (2)$$

$$\frac{A}{A_0} \cong \left( \text{Gain} \left( \frac{\theta_a}{\theta_w} \right) + \text{Zero} \right) \left( 1 - \frac{\theta_a}{\theta_w} \right)^{-1}$$

$$\text{Gain} = 1.19 \times 10^{-6} \theta_w^2 - 8.03 \times 10^{-4} \theta_w - 1.93 \times 10^{-2} \quad (3)$$

$$\text{Zero} = 3.51 \times 10^{-8} \theta_w^2 - 1.63 \times 10^{-5} \theta_w + 1.00064$$

$$\frac{B}{B_0} \cong \frac{\theta_a}{\theta_w + (0.6663\theta_w + 656.69)} \quad (4)$$

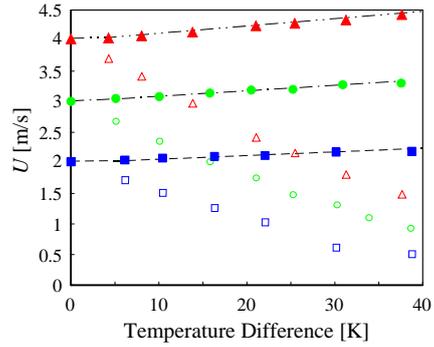


図4 熱電対の温度に基づく温度補償による温度補償系の評価

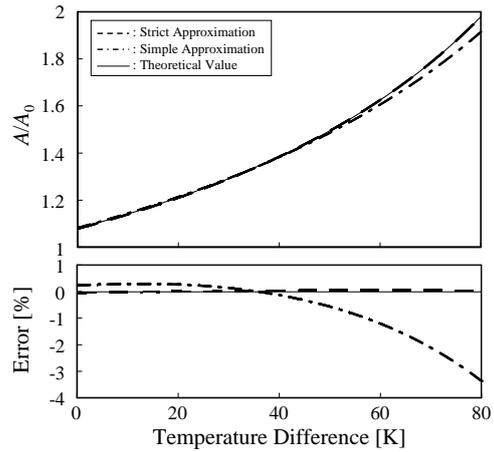


図5 温度補償演算に関するパラメータと近似式による値の温度差に対する変化

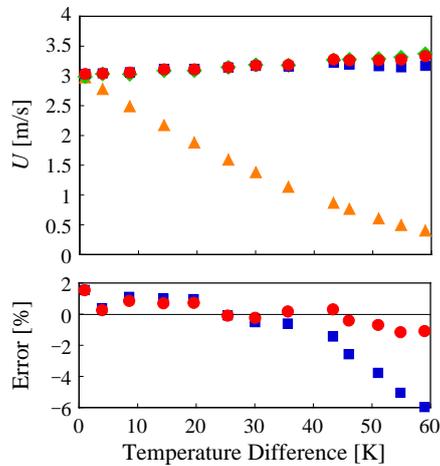


図6 抵抗線温度計の瞬時温度情報に基づく温度補償による温度補償系の評価

風洞内に非加熱時の平均流速 $U=3.0\text{m/s}$ の一樣流を形成し、室温からの温度差 $\Delta\Theta=0\sim60\text{K}$ における流速を計測することで、従来方式の温度補償系と物性値の影響を考慮した本補償系の補償精度を比較した。I-I型プローブ( $\phi=5\mu\text{m}$ )を使用し、抵抗線温度計の出力に基づいて流速の温度補償を行うことで温度・速度の同時計測を実現した。

室温からの温度差に対する流速値とその誤差を図6に示す。横軸は気流温度と室温の温度差、縦軸はそれぞれ流速値・ピトー管の流速値に対する相対誤差である。ピトー管の流速値(◆)から、気流の温度上昇による熱膨張に伴って平均流速 $U$ は上昇し、温度差60Kでは約13%増加している。しかし、未補償時の平均流速 $U$ (▲)は温度差60Kでは約86%減少しており、正確な流速計測が行われていない。これは、熱伝達率 $h$ が流速だけでなく気流温度にも依存することに起因している。それに対し、温度補償を行った場合には流速の上昇を正確に捉えている。従来の温度補償法(■)では、温度差が40K以上になると誤差が負の方向に増大しているが、それ以下の温度差では誤差が $\pm 1.6\%$ 以下に抑えられており、高精度な流速計測が実現されている。物性値の影響を考慮した演算による温度補償法(●)では、温度差60Kまで誤差が $\pm 1.6\%$ 以下に抑えられており、センサと気流間の温度差が減少する高温域においても高精度に計測可能な温度域が加熱比の変更なしに従来方式より1.5倍に拡大された。

### (3) 遅延補償系のデジタル化

二線式温度流速計は、図7の様主流に対して上流側に温度センサ、下流側に速度センサを配置しており、センサ間隔は互いに干渉しないよう1mm程度の空間的隔たりを要する。この隔たりは計測器の空間分解能を劣化させると共に、信号間に位相差を生じさせ熱流束計測時に誤差となる。そこで、Taylorの凍結仮説を用いて、 $\Delta t$ だけ温度信号を遅延させることで位相差を等価的に補償する。FPGAボード上に実装されたA/D変換器(分解能:16bit)により取得した温度信号は、速度信号に基づいて算出した遅延時間が経過するまでRAMに記憶され、遅延時間経過後に出力される。

一定流速に相当する直流電圧を入力し、温度信号を想定した100Hzの正弦波(5.0 $\pm$ 2.0V)を遅延させることで、構築した遅延補償系の静特性を評価した。流速範囲は1.0~5.0m/s、センサ間隔は1mmとした。評価結果を図8に示す。各流速での遅延時間は理論値と精度良く一致している。相対誤差は $\pm 1.0\%$ 以下となっており、高精度な遅延時間の制御が実現された。このことは、空間分解能の劣化に対して適切な補償系が確立されたことを意味している。

本研究によって、強安定成層流中における乱流生成や乱流輸送を解明するために必要な温度・速度変動及び相関量を計測することの可能なデジタル二線式温度流速計が構築された。

### 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)

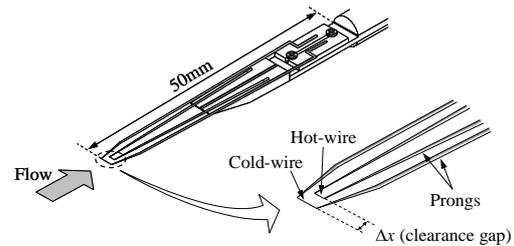


図7 二線式温度流速計のセンサ部の外観

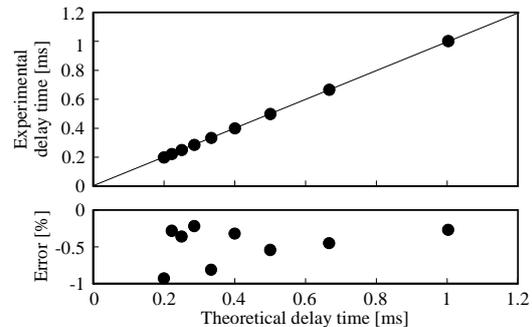


図8 遅延補償系の静特性評価(U=1.0~5.0m/s)

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① 早苗駿一、大庭勝久、組込みデバイスの流体計測分野への適用に関する基礎研究、日本高専学会誌、査読有、第16巻3号、2011.
- ② 早苗駿一、大庭勝久、温度流速計用の温度補償アルゴリズムに関する研究、沼津工業高等専門学校研究報告第45巻、査読無、2011、113-118.
- ③ 遠山勇樹、大庭勝久、小谷田雄一郎、FPGAによる抵抗線温度計用の周波数補償システムのデジタル化、沼津工業高等専門学校研究報告第44巻、査読無、2010、143-148.

〔学会発表〕(計26件)

- ① 伊井雅俊、早苗駿一、大庭勝久、成層乱流場用の熱流束計測系のデジタル化、日本機械学会東海支部第60期総会講演会、2011.3.14、豊橋技術科学大学.
- ② 伊井雅俊、早苗駿一、大庭勝久、乱流熱流束の高精度計測に向けたデジタル温度流速計の構築、第8回日本流体力学会中部支部講演会、2010.11.19、岐阜市じゅうろくプラザ.
- ③ 早苗駿一、大庭勝久、熱流体用のデジタル計測システムにおける動的補償システムの高精度化、日本機械学会第88期流体力学部門講演会、2010.10.30、山形大学.
- ④ 大庭勝久、伊井雅俊、早苗駿一、熱流体計測システムにおけるデジタル動的補償システムの構築、日本流体力学会年会2010、2010.9.10、北海道大学.
- ⑤ 早苗駿一、大庭勝久、FPGAを用いた温

度・速度同時計測システムのデジタル化、  
日本機械学会 2010 年度年次大会、  
2010.9.4、名古屋工業大学.

- ⑥ 早苗駿一、大庭勝久、組込みデバイスの  
流体計測分野への適用に関する基礎研  
究、日本高専学会第 16 回年会講演会、  
2010.8.28、長岡技術科学大学.
- ⑦ 遠山勇樹、大庭勝久、瞬時温度情報に基  
づく熱線流速計用デジタル補償システ  
ムの構築、日本機械学会東海支部第 59 期  
総会講演会、2010.3.9、名城大学.
- ⑧ 杉山清隆、大庭勝久、蒔田秀治、強安定  
成層流中における波動モードが乱流生  
成に及ぼす影響、日本機械学会第 87 期流  
体工学部門講演会、2009.11.7、名古屋工業  
大学.
- ⑨ 大庭勝久、遠山勇樹、熱流体用の温度・  
速度同時計測システムの FPGA 実装、第  
7 回日本流体力学会中部支部講演会、  
2009.10.16、名古屋大学.
- ⑩ 大庭勝久、遠山勇樹、FPGA による抵抗  
線温度計用の動的補償システムのデジ  
タル化、日本機械学会 2009 年度年次大  
会、2009.9.14、岩手大学.
- ⑪ 大庭勝久、杉山清隆、蒔田秀治、強安定  
成層流中における内部重力波の崩壊と  
乱流生成、日本流体力学会年会 2009、  
2009.9.2、東洋大学.

[その他]

ホームページ等

<http://www2.denshi.numazu-ct.ac.jp/staff/ooba/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大庭 勝久 (OHBA KATSUHISA)  
沼津工業高等専門学校・電子制御工学科・  
准教授  
研究者番号：40321442

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし