

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：24201

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14669

研究課題名（和文）測温抵抗体CTと相関解析による流路断面の瞬時温度・速度分布測定法の開発

研究課題名（英文）Development of resistance-wire CT for measuring cross-sectional temperature and velocity distributions

研究代表者

出島 一仁 (Dejima, Kazuhito)

滋賀県立大学・工学部・講師

研究者番号：20846810

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：熱流体機器の検査や評価のため、流路断面における流体の温度および速度分布を安価かつ簡便に測定する手法の開発が求められている。本研究では、医療分野などで利用されるCT(Computed Tomography)技術と、温度センサの一種である金属細線式測温抵抗体を組み合わせた温度分布測定法を開発した。加えて、流路の上流と下流で同時に温度を測定し、その変動の位相差から流体の速度を推定する手法を構築し、温度分布と速度分布を同時測定する見込みを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱流体機器の省エネルギー化を実現するうえで、流体の温度や速度を測定する技術は重要である。例えば、内燃機関では排ガスの温度と速度を測定することで、大気へ捨てられる熱エネルギー（排気損失）を評価することができる。ただし、単点測定ではなく温度・速度の時空間分布を測定することは難しいため、本研究ではそれを比較的容易に実施できる抵抗線CT法の開発に取り組んだ。これにより、単点測定に比べてより詳細な情報を得られるようになり、熱流体機器の高効率化へ向けた新たな設計指針等を得られる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：For evaluation or monitoring of thermo-fluid machines, a measurement technique for temperature and velocity distributions of fluid is important. In this work, we developed a resistance-wire CT (Computed Tomography) method, which combines a CT technique and resistance temperature detectors of metal wires, to measure cross-sectional temperature distribution. We also developed a velocity measurement technique with the resistance-wire CT from the phase delay of temperature fluctuation from upstream to downstream.

研究分野：熱工学

キーワード：抵抗線CT 温度分布 相関解析 計測技術

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

熱流体機器の検査や評価において、流路断面における流体の温度・速度分布測定は重要である。例えば、内燃機関では入力エネルギーが仕事や各種損失にどのような割合で変換されてたかを調べる熱勘定解析が行われ、その中で排気損失(排ガスが持つエンタルピーに相当)を求めするため、排ガスの温度・速度(流量)が測定される。熱勘定を把握できれば、運転条件やデザインを変更して熱効率が向上(あるいは悪化)したときに、何が、どのように作用したことが原因かを推察でき、適切な設計や運転条件の決定に活用できる。

ただし、排気は間欠的で乱れも強いいため、排気損失を正しく求めるためには、排気管断面の瞬時の温度・速度分布を測定しなければならない。例えば、機関回転数が 3000 rpm の高速運転時にはエンジン排ガスは 25 Hz で間欠的に噴射され、これを時系列的に捉えるには 100 Hz オーダーの応答速度が要求される。しかし、線形 25 μm の極細熱電対であっても空気中での応答速度は 20 Hz 程度[1]であり、従来手法では詳細な測定が困難であった。

実際に、従来のエンジン排ガス測定では温度・速度ともに定常的なものがほとんどであった。例えば、温度測定には主にシース熱電対が利用されているが、単点測定のうえに応答性が悪いため、算出される排気損失の定量性には懸念がある。この問題は、流路断面の瞬時温度・速度分布を測定する簡便な方法がなかったことに主たる原因がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、流路断面における瞬時温度・速度分布を簡便に測定する手法を開発することである。具体的には、CT (Computed Tomography) 技術と金属細線式測温抵抗体(抵抗線)を組み合わせた温度分布測定手法を開発する。加えて、抵抗線を流路の上流と下流に設置し、その設置間距離と温度の位相遅れ時間から速度を推定することで、速度分布も同時に得ようとする研究である。

3. 研究の方法

図1に示すように、厚さ 1.5 mm のガスケットに金属細線(ここでは直径 10 μm の白金線)を等間隔に設置し、その方向を変えたものを製作した。ここでは流路直径を 49 mm、ガスケット一枚当たりの抵抗線本数を 5 本としたため、抵抗線は 8.2 mm 間隔で設置しており、投影数は 4 方向とした。抵抗線の抵抗値は温度に依存して変化するため、事前に温度較正を行っておけば、抵抗値から温度を求めることができる。そのようにして各抵抗線の温度を求めることで、それぞれの方向の投影データを取得する。図1では合計 4 方向の投影データを取得し、CT のアルゴリズム[2]により温度分布を算出する。

速度分布測定については、抵抗線 CT 装置を 2 組用意し、上流と下流で同時に測定を行うことで、上流と下流間で生じる温度変動の位相差から速度を求める。これを各抵抗線に対して行うことで投影データを取得し、CT により速度分布を算出することで、温度と速度の同時測定を狙った。

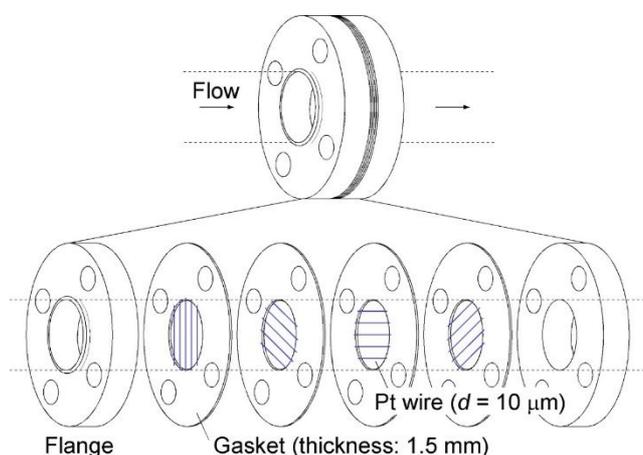


図1 4方向投影の抵抗線 CT 装置

4. 研究成果

4.1 温度分布測定の検証

図1の装置を用いて温度分布測定の精度検証を行った。吐出口直径 10 mm のスポットヒータを用いて高温空気噴流を定常的に噴射し、吐出口から 45 mm 下流の位置で流れと垂直方向に抵抗線を設置することで噴流断面の温度分布測定を行った。噴流温度は 40 から 70 まで変化させ、抵抗線 CT の中心を加熱する条件と、中心から 10 mm 程度ずらして加熱する偏心加熱条件で

測定を行った。吐出流量は約 20 L/min とした。

図 2 に測定した温度分布を示す。噴流温度が上昇するにつれて測定温度も上昇していることがわかる。また、中心加熱と偏心加熱で比較すると、高温部の位置が変化しており、これは実際の加熱位置と良く一致した。このことから、製作した抵抗線 CT 装置によって温度分布を捉えられることが定性的に確かめられた。

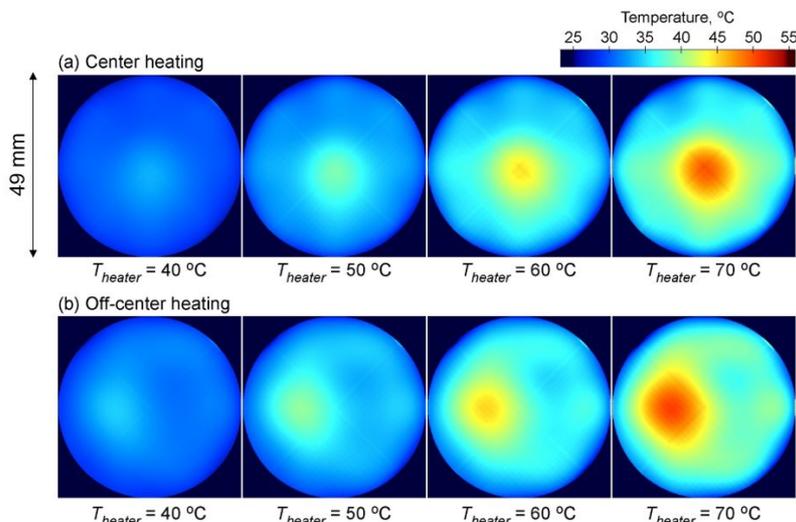


図 2 加熱空気噴流の断面温度分布

抵抗線 CT 法による温度分布測定の妥当性検証のため、熱電対による局所測定値との比較を行った。図 3 に、中心加熱条件での測定温度の比較を示す。ここで、熱電対は流路中心を通る一断面の直線上に配置した。

図 3 より、噴流温度が上昇するにつれて熱電対と抵抗線 CT による測定値も上昇し、また高温部の位置も一致していることがわかる。ただし、いずれの噴流温度においても抵抗線 CT の方が熱電対に比べて低い温度を示している。その差は噴流温度が 40 の場合は 2 K 程度、噴流温度が 70 の場合は 5 K 程度となり、噴流温度が高いほど温度差が大きくなる傾向が見られた。

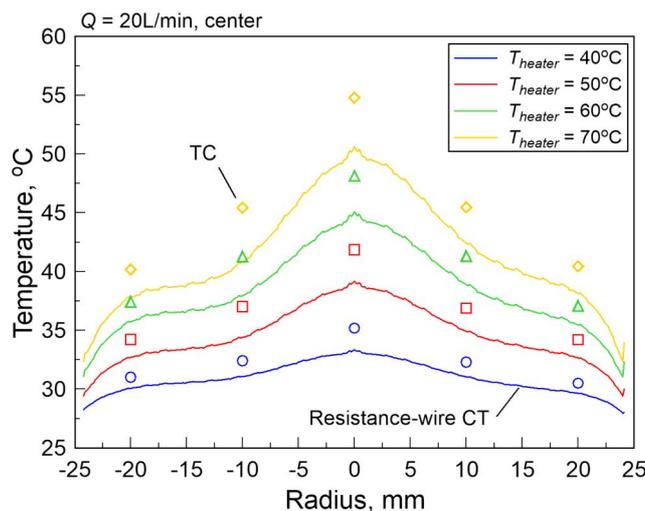


図 3 抵抗線 CT と熱電対の比較

図 4 に、熱電対による測定値に対する抵抗線 CT の相対誤差を示す。ここでは噴流温度 40 ~ 70 のすべての条件のデータをまとめて示している。前述のように、抵抗線 CT による測定温度は熱電対よりも低くなる傾向があり、平均的には -19 % であることがわかった。また、噴流温度や加熱位置が変化しても相対誤差は概ね一定であることもわかった。ただし、偏心加熱の場合には加熱位置から遠い位置で一部熱電対よりも高い温度が算出されたため、相対誤差が正の値を取っている。なお、追加の実験で投影方向数を増加させるほど温度分布の測定精度が向上することが確かめられているが、それと同時に投影数の増加に伴う精度向上率は徐々に小さくなることも確かめられている。すなわち、むやみに投影数を増加させてもコストに対して得られるパフォーマンス(精度)の割合は小さくなるため、コストとパフォーマンスのバランスを考えた装置設計が必要になることがわかった。

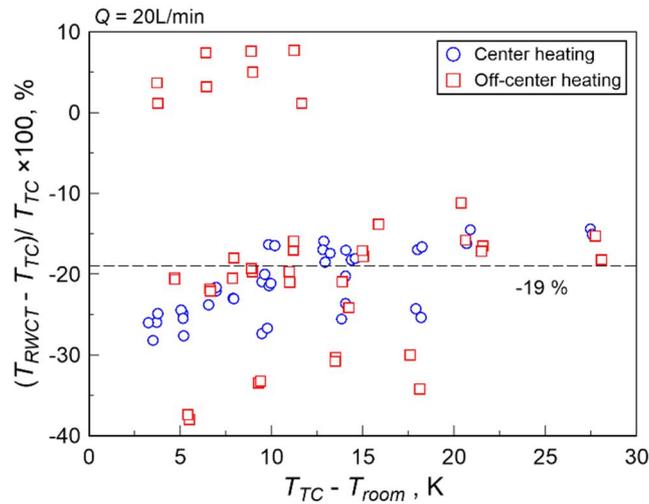


図4 熱電対に対する抵抗線CTの相対誤差

4.2 速度分布測定の見証

本手法では抵抗線CT装置を流路の上流と下流に2つ設置し、それぞれで得られる温度波形の位相差から速度を求めることで、温度分布に加えて速度分布も測定可能にすることを狙っている。本研究期間においては、その実現可能性について検証を行った。

本検証では、図5のように抵抗線を一本設置したガスケットを2枚用意し、流路の上流と下流に距離27mm離して設置した。ヒートガンによって加熱空気を流した際の温度変動を測定し、設置間距離を温度変動の位相遅れ時間で除すことによって速度を求めた。

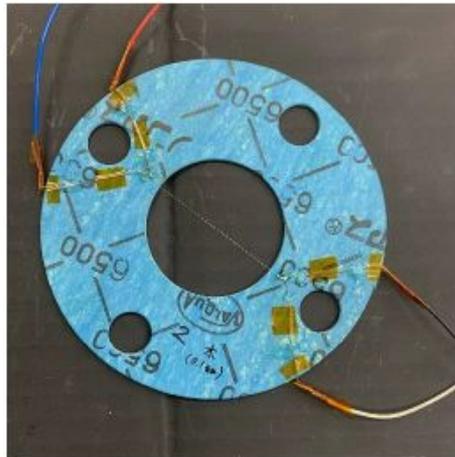


図5 速度測定検証用の実験装置

実験結果の一例を図6に示す。上流側のガスケットAに対して下流側のガスケットBは27mm下流に位置しているため、波形はよく似ているものの位相が遅れていることがわかる。相互相関解析によってこの位相遅れ時間を求めたところ、38msであった。したがって、測定間隔27mmを遅れ時間で除すことで求められる速度は約0.7m/sとなった。

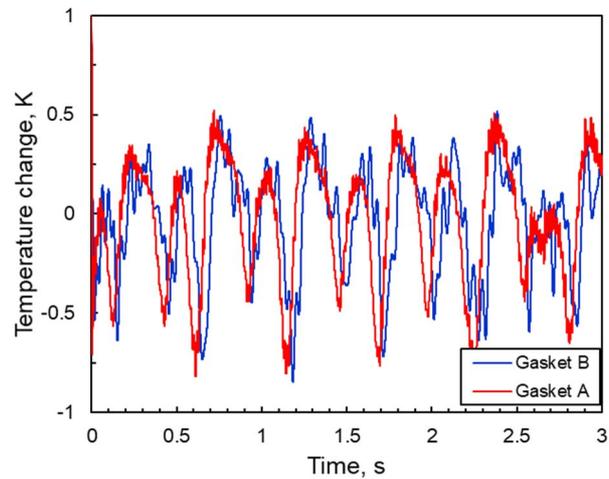


図6 上流と下流で得られた温度変動

位相遅れから得られた速度が抵抗線上の平均速度であれば、CT によって速度分布を算出できる。ただし、位相遅れから得られる速度が平均速度に一致するかは不明なため、PIV (Particle Image Velocimetry) との同時測定を行い、速度の検証を行った (図7)。

PIV で得られた速度と比較したところ、PIV で得られた速度の最大値や平均値に比べ、位相遅れから算出した速度は有意に小さい値となった。ただし、流量を変化させたときに、位相遅れから求めた速度の PIV 平均速度に対する割合は概ね一定であったため、適切な補正係数を設定することで平均速度に変換可能であると考えられ、この点については現在検討中である。平均速度への変換が適切に行えれば、そこから CT による速度分布算出が可能となり、温度・速度分布の同時測定が実現できると期待される。

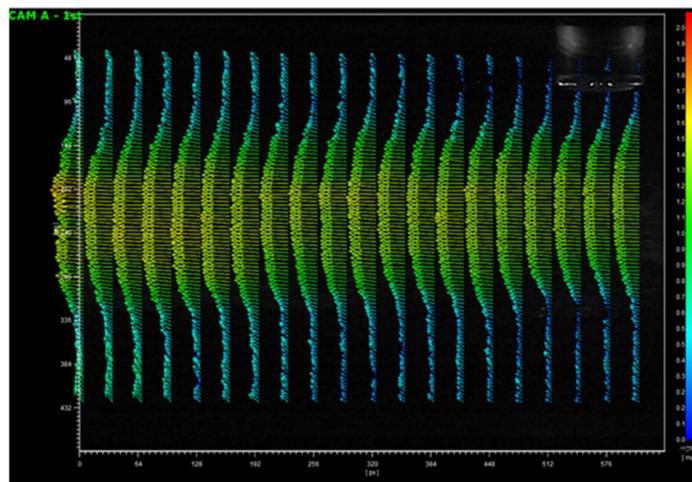


図7 PIVによって得られた速度分布

参考文献

- [1] 田川 正人, 加藤 健次, 太田 安彦, 細線温度センサの応答特性と応答補償, 日本機械学会論文集 B 編, 2005, 71 巻, 706 号, p. 1663-1670
- [2] 篠原広行, 中世古和真, 坂口和也, 橋本雄幸, 逐次近似画像再構成の基礎, 医療科学社, pp.3-19, (2013)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kazuhito Dejima, Isshin Miyazawa, Natsumi Imanaka, Kiyoshi Kawasaki, Koji Yamane
2. 発表標題 Cross-sectional temperature distribution measurement in a flow pipe using resistance-wire computed tomography
3. 学会等名 The Second Asian Conference of Thermal Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田史彦, 出島一仁, 河崎澄, 山根浩二
2. 発表標題 抵抗線CTを用いた温度測定における応答補償法の検討
3. 学会等名 第60回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉田史彦, 出島一仁, 稲輪有治, 河崎澄, 山根浩二
2. 発表標題 抵抗線CT法における温度測定精度の検証と流速の推定
3. 学会等名 第61回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------