

氏名	カイ フク カズ ヒデ 貝 吹 和 秀
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第809号
学位授与の日付	平成23年9月28日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	熱流体計測システムの応答特性の同定と適応応答補償
論文審査委員	主査 教授 田川 正 人 教授 辻 俊 博 教授 石野 洋二郎

## 論文内容の要旨

熱流体現象を適切に解析し評価するためには、技術的水準の高い熱流体計測システムが必要となる。とりわけ産業部門では、開発設計や生産準備の短期化、管理工数低減、労働安全衛生水準の向上の観点から簡便で安価かつ安全性の高い技術が求められている。このような多様なニーズに対応するには、安価で取り扱いやすく、かつ汎用性のある既存の熱流体計測システムの適用可能性を高めることが合理的である。しかし、一般の熱流体計測システムには応答遅れという重要な問題があり、その遅れを適切に補償しなければ時々刻々と変化する測定対象の状態を正確に把握することはできない。本研究では、この問題を解決するために、種々の熱流体計測システムに適用できる「適応応答補償」という独自の技術を確立し、変動する物理量の高精度測定を可能とする技術を実現して上記の要求に応えることを目指している。

「適応応答補償」技術は熱流体計測システムの応答特性を測定環境に合わせて自動的に同定し、応答遅れを補償する手法である。熱流体計測システムの主役であるセンサは多種多様あり、それらは固有の応答特性を有する。本研究では、その中で基本的な一次遅れ系および二次遅れ系の特性をもつセンサを対象として、周波数応答特性の理論解析、応答特性の同定と応答遅れの補償を研究した。以下に、各章の内容をまとめる。

### 第1章 序論

研究の背景、目的および本論文の構成を説明した。

## 第2章 熱流体計測システムの応答特性と適応応答補償

適応応答補償を熱流体計測システムに適用するには、その応答特性を明らかにする必要がある。本章では、応答特性の理論解析の一例として細線熱電対の周波数応答の理論解を導出した。この理論解を用いれば、細線熱電対の応答特性を一次遅れ系で近似できる条件を明確にできるだけでなく、熱電対で測定された変動温度を適切に応答補償できることを示した。さらに、これまでに提案された時定数推定法について、種々の熱流体計測システムへの適用可能性を検証した。

第3章 一次遅れ系の応答特性をもつセンサの応答補償：定電流型熱線流速計を例として  
一次遅れ系の応答特性をもつセンサとして、安価かつ簡便ではあるが応答が遅い定電流型熱線流速計（CCA）の応答補償を試みた。はじめに、CCAの周波数応答の理論解を導出して、プローブの幾何学形状や駆動電流の大きさがCCAの応答特性に及ぼす影響を明らかにした。ついで、理論解に基づく応答補償法を開発し、その有効性を実験的に検証した。その結果、CCAの出力を応答補償することにより、高価ではあるが応答補償の必要がない定温度型熱線流速計と同じ程度の高い信頼性で変動速度を測定できることを示した。

第4章 二次遅れ系の応答特性をもつセンサの応答補償：圧力測定系を例として

二次遅れ系の応答特性をもつセンサとして、圧力測定系の応答補償を試みた。はじめに、圧力測定系の応答特性を表す代表的な三つの数式モデルにより周波数応答を解析して、それらの結果を相互比較した。その結果から、応答特性が二次遅れ系で近似できて、かつ各数式モデルの周波数応答が互いによく一致する圧力測定系の幾何学形状の条件が明らかになった。ついで、これまでに提案された四種類の時定数推定法を拡張して二次遅れ系に適用し、その有効性を実験的に検証した。その結果、いずれの時定数推定法によっても、応答特性の支配パラメータを正しく推定し適切に応答補償できることが示された。

第5章 細線熱電対群の適応応答補償と流体温度場の多次元計測

流体の温度分布を簡便かつ迅速にその場で測定することを目的として、64個の二線式熱電対を二次元格子状に配置した平面プローブ（細線熱電対群）を製作し、流体温度場を可視化計測した。その結果、この平面プローブより得られた測定値を適応応答補償すれば、時空間的に激しく変化する高温空気噴流の挙動を正しく捕捉し可視化できることが実証された。また、多数の熱電対を同時に使用することにより、時定数推定と応答補償をほぼ実時間で実行できることを示した。

第6章 細線熱電対列による流体温度場の可視化計測

多数の二線式熱電対を一行に配置して掃引可能とした棒状の温度プローブ（細線熱電対列）を製作し、プローブ位置の画像計測とセンサ出力の適応応答補償を融合させることにより、新しい型式の流体温度場可視化技術を実現した。適応応答補償を導入すれば、測定対象の流速やプローブ掃引速度によって大きく変化する熱電対の時定数を正しく推定し応答補償できるため、流体温度場を極めて容易かつ短時間に測定できる。また、このようにして得られた流体温度分布を測定対象の画像上に重ねて提示する方法を開発した。これは新しい型式の流体温度場可視化計測法であり、本研究ではその基礎を確立することに成功した。

第7章 結論

本研究で得られた成果を総括した。

## 論文審査結果の要旨

熱流体现象を適切に解析し評価するには、測定精度および信頼性の高い熱流体計測システムが必要である。なかでも現象が時間的に変化する場合にはセンサの応答遅れが問題となる場合が多く、測定結果の信頼性に疑義が生じることもある。一般に、センサの応答特性は流体の種類や流速などセンサ周囲の環境によって大きく変化することから、測定対象の状態を正確に把握するには、センサの応答特性をその場で自動的に同定するとともに応答遅れを測定環境に応じて適切に補償する必要がある。本研究の目的はこの要求に応えることであり、種々の熱流体計測システムに適用可能でかつ上述の問題を解決する「適応応答補償」という独自の計測法を確立するとともに、変動する物理量の高精度測定を可能とする普遍性の高い計測技術を実現している。とくに、応答特性が一次遅れ系および二次遅れ系で表現されるセンサを対象として、周波数応答の理論解析、応答特性の同定、および応答遅れの適応補償について詳しく研究している。得られた結果は以下のように要約される。

1. センサの応答特性解析の有効性を示す一例として、細線熱電対の周波数応答の理論解を導出するとともに、その応答特性を一次遅れ系で近似できる条件を特定することに成功した。また、本理論解を利用することによって、細線熱電対の応答遅れを適切に補償し、その応答速度を10~50倍に高速化できることを実証した。
2. 応答補償の有効性を示す一例として、安価で簡便な定電流型熱線流速計(CCA)の周波数応答の理論解を導出し、プローブの幾何学形状や駆動電流の大きさがCCAの応答特性に及ぼす影響を明らかにした。また、理論解に基づく応答補償法を開発し、その有効性を実験的に検証した。その結果、CCAを応答補償することにより、市販の定温度型熱線流速計と同程度の高い精度と信頼性で変動速度を測定できることを示した。
3. 二次遅れ系の応答特性を有するセンサとして、圧力測定系の応答補償を試みた。はじめに、圧力測定系の周波数応答を既存の代表的な3つの数式モデルで解析し、それらの結果を相互比較することにより、応答特性が二次遅れ系で近似できる圧力測定系の幾何学条件を明らかにした。この結果に基づいて、一次遅れ系に対して提案された既存の四種類の時定数推定法を拡張して二次遅れ系に適用し、それらの有効性を実験的に検証した。その結果、拡張した方法によって二次遅れ系の支配パラメータを推定することに成功し、適切に応答補償できることを実証した。
4. 適応応答補償法を多数のセンサで構成されたプローブ(センサ群)に適用して多次元計測の可能性を検証した。具体的には、二次元格子状に配置された64個の二線式熱電対(細線熱電対群)を用いて、流体の温度分布を簡便かつ迅速にその場で測定できる可視化計測法について検討した。その結果、細線熱電対群プローブの出力を適応応答補償すれば、時空間的に激しく変化する高温空気噴流の挙動を正しく捕捉し可視化できることを実証した。さらに、多数のセンサを同時に用いることで、時定数の推定と応答補償をほぼ実時間で実行できることを示した。
5. 多数の二線式熱電対を一行に配置して掃引可能とした棒状の温度プローブ(細線熱電対列)を製作し、その出力の適応応答補償とプローブ位置の画像計測を融合させることで、新しい形式の流体温度場可視化法の開発に成功した。適応応答補償を用いれば、測定対象の流速やプローブ掃引速度によって大きく変化する熱電対時定数を正しく推定し、流体温度の二次元分布を極めて容易かつ短時間に可視化できることを実証するとともに、新しい形式の流体温度場可視化計測法の基礎を構築した。

以上本論文では、流体の種類や流速などセンサ周りの環境によって大きく変化するセンサの応答特性をその場で自動的に同定するとともに、センサの応答遅れを測定環境に応じて適切に補償する「適応応答補償」という独自の計測法を確立したものである。適応応答補償は、丈夫で安価ではあるが応答が遅いセンサによっても、変動する物理量を高い精度と信頼性で計測できる汎用性の高い測定技術であり、さまざまな熱流体計測システムに適用可能である。以上のように、本研究の成果は、熱流体が関連する種々の機器や装置の研究開発から性能評価にわたる広い分野で有用であり、学術上、実用上寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として十分に価値あるものと認める。

また、平成23年8月4日に論文内容と関連する事項について試問した結果、合格と認めた。