

氏 名 ( 本 籍 )	諸 頭 眞 和 (滋賀県)
学 位 の 種 類	博 士 (工学)
学 位 記 号 番 号	甲第 118 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 12 年 3 月 24 日
専 攻	生産開発システム工学専攻
学 位 論 文 題 目	炭酸ガスを媒質とした赤外線二色CTによる温度測定法の研究 (光学厚さが厚い場合のアルゴリズム)  (Study on Infrared Two-Band-CT Pyrometry Employing Carbon Dioxide as Radiation Active Medium (Algorithm for Thick Optical Length))
学位論文審査委員	(副査) 教 授 若 井 和 憲 (副査) 教 授 熊 田 雅 彌 教 授 西 村 誠 助教授 花 村 克 悟 教 授 工 藤 一 彦

## 論文内容の要旨

本論文は、2500K 程度までの燃焼ガスを測定対象とした炭酸ガス ( $\text{CO}_2$ ) を媒質とした赤外線二色 CT による温度測定法の開発に関するものであり、最近はやりのレーザを用いた方法と趣を異にし、空間分解能や応答性ではそれらに劣るものの簡便性や適用対象の大きさなどに特徴があることに狙いを定めて開発を進めたものである。

第1章「序論」では、本研究の背景である二次元温度分布測定法に関して、実機へ適応の可能性が高い光 CT 法を中心に従来の研究をレビューし、現状と問題点を整理すると共に残された課題を明確にし本研究の目的を述べている。すなわち、吸収二色 CT 法では  $\text{H}_2\text{O}$  における統計モデルの適用法がすでに開発されているものの、光学厚さが厚い場合は  $\text{CO}_2$  を媒質とした方が測定精度の向上が期待できるため、 $\text{CO}_2$  を媒質とした場合のアルゴリズムの構築と測定精度の検討が必要であること、ふく射二色 CT 法では、統計モデルの組み込みがなされておらず、光学厚さが厚い場合の測定ができていないことなどを示している。

第2章「赤外線二色 CT 温度計の原理」の中の、まず吸収二色 CT 法の項では、従来から開発されていた  $\text{H}_2\text{O}$  を吸収媒質としたアルゴリズムを  $\text{CO}_2$  用に改良し、各波長、温度における吸収係数に RADCAL という計算コードを用いたアルゴリズムを導いている。つぎに、ふく射二色 CT 法の項では、バンドモデルとして統計モデルを、非一様温度分布については Curtis-Godson 法を採用してふく射率、吸収率を見積もり、これにより非線型となるプロジェクションデータの逆解析にあたって、新たに収束法により再構成を可能とするアルゴリズムを構築している。このアルゴリズムがこの論文の最大のオリジナリティーといえる。

第3章「計算機シミュレーションによる検討」では、計算機によりプロジェクションデータを作成し、前章で示したアルゴリズムにより温度、濃度の再構成を行った結果を基に、その収束性や測定精度について調べている。その結果、吸収二色 CT 法においては、 $\text{H}_2\text{O}$  の場合と同様に

CO<sub>2</sub> を媒質としても統計モデルを導入した場合の収束計算が可能であり、適当な波長と波長幅を選べば4回程度の繰り返し計算でほぼ目標値に収束することを示している。吸収係数の波長特性がフラットな波長領域を選べば、吸収率が95%程度の光学厚さ（例えばCO<sub>2</sub>濃度11.6%の場合なら火炎直径12cm程度に相当）までなら誤差5K程度の精度で再構成可能、黒体エネルギーの0.1%程度のノイズ（S/N比1000）が乗っても $\rho/\rho_0 \cdot l$ が0.016cm～0.19cm（円形フラット火炎の場合には直径が1cm～12cmに相当する）以内であれば標準偏差30K程度以内のばらつきで再構成できることが示されている。ふく射二色CT法については、新しく開発した収束法による再構成アルゴリズムでは、50%程度の吸収率の火炎では10回程度繰り返し計算すると収束し、その精度は8K程度であることが示されている。本論文で使用した波長帯においては、誤差解析から2000Kでの誤差の5倍まで許容するとするなら、低温側は1150Kまでの測定が可能であることが示されている。もちろん、採用する波長によっては、もっと低温まで精度良く測定できる可能性がある。中央から少し偏心して円形の温度のくぼみがあるモデル（凹分布）と温度の突起があるモデル（凸分布）のような非一様温度分布についても、収束精度、繰り返し数共に等温分布と同じように再構成でき、この方法が一般の火炎に適用できることを示している。

第4章「実験的検討」では、温度検定用の円形フラットバーナを用いてシミュレーションによる結果の検証がなされている。その結果、吸収二色CT法では、温度検定用の円形フラットバーナを用いた実験結果よりシミュレーション通りに精度良く二次元温度分布が再構成できることが明らかにされている。また、シミュレーションにより選択波長が再構成温度に与える影響を検討した結果もほぼ妥当であることが示されている。つぎに非一様温度分布火炎による測定精度の検証と家庭用ガス瞬間湯沸かし器用バーナ及び家庭用ガスコンロの火炎温度分布の測定を試み、本測定法が実用バーナへ適応できることを示している。一方、ふく射二色CT法での実験は、まだこれからという段階なので、吸収法で用いたものと同じ温度検定用のフラットバーナに対して1条件での火炎温度、濃度分布の測定値しか得られていないが、吸収法での測定結果とほぼ同じ値が得られ、新しく構築したアルゴリズムが実用に耐えることを示している。

第5章「結論」では、主たる成果をまとめ、残された課題について記述している。

以上、本論文ではCO<sub>2</sub>を媒質とした赤外線二色CTによる温度測定法において、光学厚さが厚い場合の再構成アルゴリズムを構築し、それを用いたシミュレーションと実験による検討を行い、本測定法が実用バーナに適応が可能であることを示すことにより、工学的に価値が高いことを示している。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、2500K程度までの燃焼ガスを測定対象とした炭酸ガス（CO<sub>2</sub>）を媒質とした赤外線二色CTによる温度測定法の開発に関するものであり、最近はやりのレーザを用いた方法と趣を異にし、空間分解能や応答性ではそれらに劣るものの簡便性や適用対象の大きさなどに特徴があることに狙いを定めて開発を進めたものである。

序論でバックグラウンドを述べ、この研究の位置づけをしている。その後、第2章「赤外線二色CT温度計の原理」の中の、まず吸収二色CT法の項では、従来から開発されていたH<sub>2</sub>Oを吸収媒質としたアルゴリズムをCO<sub>2</sub>用に改良し、各波長、温度における吸収係数にRADCALという計算コードを用いたアルゴリズムを導いている。つぎにふく射二色CT法の項では、バンドモ

デルとして統計モデルを、非一様温度分布については Curtis-Godson 法を採用してふく射率、吸収率を見積もり、これにより非線型となるため困難と考えられていたプロジェクションデータの逆解析にあたって、新たに収束法により再構成を可能とするアルゴリズムを構築している。ふく射二色法は吸収二色法と比べて応用的には大規模火炎や非定常火炎に対し圧倒的優位にあり、このアルゴリズムが完成したということは今学会でやっと半導体レーザを用いた赤外吸収法が話題をにぎわしている状況からすれば、最先端に行くものと評価できる。

第3章「計算機シミュレーションによる検討」では、計算機によりプロジェクションデータを作成し、前章で示したアルゴリズムにより温度、濃度の再構成を行った結果を基に、その収束性や測定精度について調べている。その結果、吸収二色 CT 法においては、 $H_2O$  の場合と同様に  $CO_2$  を媒質としても統計モデルを導入した収束計算が可能であり、適当な波長と波長幅を選べば4回程度の繰り返し計算でほぼ目標値に収束することを示している。吸収係数の波長特性がフラットな波長領域を選べば、吸収率が95%程度の光学厚さ（例えば  $CO_2$  濃度 11.6% の場合なら火炎直径 12cm 程度に相当）までなら誤差 5K 程度の精度で再構成可能、黒体エネルギーの 0.1% 程度のノイズ (S/N 比 1000) が乗っても  $\rho/\rho_0 \cdot l$  が 0.016cm ~ 0.19cm (円形フラット火炎の場合には直径が 1cm ~ 12cm に相当する) 以内であれば標準偏差 30K 程度以内のばらつきで再構成できることが示されている。アルゴリズムとともに、これらの内容は Proceedings of First Asia-Pacific Conference on Combustion, Oosaka, pp.43-46(1997) に公表されており価値が高いと認められる。ふく射二色 CT 法については、新しく開発した収束法による再構成アルゴリズムでは、50% 程度の吸収率の火炎では 10 回程度繰り返し計算すると収束し、その精度は 8K 程度であることが示されている。本論文で使用した波長帯においては、誤差解析から 2000K での誤差の 5 倍まで許容とするなら、低温側は 1150K までの測定が可能であることが示されている。もちろん、採用する波長によっては、もっと低温まで精度良く測定できる可能性がある。中央から少し偏心して円形の温度のくぼみがあるモデル (凹分布) と温度の突起があるモデル (凸分布) のような非一様温度分布についても、収束精度、繰り返し数共に等温分布と同じように再構成でき、この方法が一般の火炎に適用できることを示している。アルゴリズムとともにこれらの結果は、燃焼の科学と技術, 6-3, pp.161-170(1999) に公表されており、十分価値が高いと認められる。

第4章「実験的検討」では、温度検定用の円形フラットバーナを用いてシミュレーションによる結果の検証がなされている。その結果、吸収二色 CT 法では、温度検定用の円形フラットバーナを用いた実験結果よりシミュレーション通りに精度良く二次元温度分布が再構成できることが明らかにされている。また、シミュレーションにより選択波長が再構成温度に与える影響を検討した結果もほぼ妥当であることが示されている。つぎに非一様温度分布火炎による測定精度の検証と家庭用ガス瞬間湯沸かし器用バーナ及び家庭用ガスコンロの火炎温度分布の測定を試み、本測定法が実用バーナへ適応できることを示している。これらの結果は、燃焼の科学と技術, 7-3, pp.175-185(2000) に公表されており、理論的検討に終わらず精度をも実験的に調べ実用に耐えうることを示したことは、この方法の価値を一層高くしている。一方、ふく射二色 CT 法での実験は、まだこれからという段階なので、吸収法で用いたものと同じ温度検定用のフラットバーナに対して1条件での火炎温度、濃度分布の測定値しか得られていないが、吸収法での測定結果とほぼ同じ値が得られ、新しく構築したアルゴリズムが実用に耐えることを示している。これに関しては、まだ公表していないが国際学会に投稿中と言い、上述した半導体レーザを利用した赤外線吸収法による計測がいまだ理論解析を主としている他の研究レベルと比較すると、本論文

が理論のみでなく実験で検証までしていることの価値の高さは、審査員の一致した意見である。

第5章「結論」では、主たる成果をまとめ、残された課題について記述している。

以上、本論文では  $\text{CO}_2$  を媒質とした赤外線二色 CT による温度測定法において、とくに今まで困難と考えられていた光学厚さが厚い場合のふく射二色 CT 法の温度再構成アルゴリズムを新たに構築し、それを用いたシミュレーションによる検討のみならず実際に実験による検証を行い、本測定法が実用バーナに適応が可能であることを示しており、博士論文として価値が認められ、合格と判定した。

## 最終試験結果の要旨

語学の口頭試験を含め、最終試験に合格と判定した。