

学位論文題名

ふく射・透過を利用したすすを含む火炎内温度・
すす濃度・CO₂分圧分布の推定法に関する研究

学位論文内容の要旨

様々な燃焼形態のメカニズム解明やエンジン、ガスタービン、ボイラー等燃焼機器の開発の際に、火炎内の温度、すすの濃度、ガス分圧の分布を知ることには非常に重要である。

火炎内の温度を測定する方法のうち接触式としては、熱電対による測定がある。熱電対は安価で扱いやすいが、火炎内の多数の点を同時に計測して温度分布を得ようとする場合には、多数の熱電対を火炎内に挿入することになり、熱電対は燃焼ガスの流れに対する外乱として無視できなくなる。

非接触で火炎内の温度、ガス濃度等の分布を測定できる方法としては PLIF 法(Planar laser-induced fluorescence), CARS 法(Coherent anti-Stokes Raman scattering), レーリー散乱法, CT 法等が提案されている。前 3 者が大掛かりな装置が必要となるのに比べ、ふく射を利用した CT 法は、比較的安価に測定できる方法である。

ふく射を利用して、燃焼機器など現実の火炎内の温度、すす濃度、ガス分圧分布の測定を行う際、その測定法には下記の要求を満たすことが理想的である。a) 非対称な分布の火炎を測定できること、b) 不輝炎を測定できること、c) 輝炎を測定できること。ここで、ふく射を利用して、b) の不輝炎を測定できること、というのは、厳密には、b-1) 火炎内のガスからのふく射を考慮した方法で、かつ、b-2) 火炎内のガスによる自己吸収を考慮した方法、であることを意味する。同様に c) の輝炎を測定できることというのは、厳密には、c-1) 火炎内のすすからのふく射を考慮した方法で、かつ、c-2) 火炎内のすすによる自己吸収を考慮した方法、であることを意味する。

ところが、これまで開発されたふく射を利用した火炎内温度、ガス濃度、すす濃度の分布測定法のうち、上記 a), b), b-1), b-2), c), c-1), c-2) をすべて満たすものはない。たとえば微粒子を含む火炎を対象とした方法では、b-1) のガスふく射と c-1) に相当する微粒子からのふく射は考慮されているが、b-2) のガスによる自己吸収と c-2) に相当する微粒子による自己吸収が考慮されていない。また、b-1) のガスふく射と b-2) のガスによる自己吸収を考慮した方法の場合、c-1) のすすふく射と c-2) のすすによる自己吸収を考慮していないため、c) の輝炎を測定できない。輝炎を測定できる方法では、c-1) のすすふく射と c-2) のすすによる自己吸収を考慮しているが、b-1) のガスふく射と b-2) のガスによる自己吸収を考慮していないため、b) の不輝炎を測定できず、また a) に関して火炎温度が同心円状に一定との仮定が必要となる。

以上のような背景から、本論文では、火炎内の温度、すす濃度、CO₂ 分圧の二次元分布を非接触で推定できる方法のうち上記 a) ~ c-2) をすべてを満たす方法の提案を行う。つまりこの方法は、火炎内の温度、すす濃度、CO₂ 分圧が非対称な二次元分布でもこれらを非接触で推定でき、また、火炎内のすす、CO₂ による自己吸収と、すす、CO₂ からのふく射を考慮した推定法であるため、不輝炎のみでなく輝炎や輝炎中にすすのない部分を含む火炎でも推定できる方法である。

本論文は、全 4 章より構成されている。第 1 章の序論では、ふく射・透過を利用したすすを含む火炎内温度・すす濃度・CO₂ 分圧分布の推定法開発の背景と、本研究の目的、本論文の構成を述べた。

第 2 章では、開発した方法を解説した。この方法は、すすのみの吸収帯(0.53 μm)と CO₂ とすすの吸

収帯($4.3\mu\text{m}$)について、火炎からのふく射と、火炎とは別に設けた光源からのふく射が火炎内を透過したふく射を、それぞれ火炎のまわりから測定して、火炎内の温度、すす濃度、 CO_2 分圧の二次元分布を推定する方法である。すす濃度は、測定したふく射強度をもちいて、透過率に関する非線形方程式を全測定光路に対して立て、これらを連立して収束計算で解くことで求める。温度と CO_2 分圧は、先に求めたすす濃度と、測定したふく射強度をもちいて、温度と CO_2 分圧を陰に含むふく射と透過についての非線形方程式を全測定光路に対して立て、これらを連立して収束計算で解くことで求める。

第3章では、開発した方法の妥当性をシミュレーションによって検証した結果とその考察を示した。ふく射の測定値が誤差を含まない場合、温度、 CO_2 分圧、すす濃度は十分な精度で推定できることを示した。ふく射の測定値が $\pm 0.5\%$ 以内の誤差を含む場合、温度、 CO_2 分圧、すす濃度の推定誤差は、測定誤差を含まない場合に比べて、それぞれ最大で 0.1% 、 3.1% 、 5.1% の増加であった。温度が高いほど、温度の推定精度は高かった。これは、温度は計算で得られた黒体ふく射強度からプランクの法則を用いて求めるが、温度と黒体ふく射強度の関係が線形でないためである。すす粒子の球形近似が精度に与える影響、すす粒径一定の仮定が精度に与える影響、ふく射測定誤差が精度に与える影響、光源のふく射強度がすす濃度の推定精度に与える影響、火炎中のすす濃度・ CO_2 分圧の大きさが精度に与える影響についても示した。

第4章の結論では、本研究で得られた結果を要約した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 工 藤 一 彦

副 査 教 授 菱 沼 孝 夫

副 査 教 授 伊 藤 献 一

副 査 助 教 授 早 坂 洋 史

学 位 論 文 題 名

ふく射・透過を利用したすすを含む火炎内温度・ すす濃度・CO₂分圧分布の推定法に関する研究

様々な燃焼形態のメカニズム解明やエンジン、ガスタービン、ボイラー等燃焼機器の開発の際に、火炎内の温度、すすの濃度、ガス分圧の分布を知ることが非常に重要である。

火炎内の温度や化学種濃度を測定する方法のうち接触式としては、熱電対やガスクロマトグラフによる測定がある。しかし火炎内の多数の点を同時に計測してこれらの分布を得ようとする場合には、多数の検出器を火炎内に挿入することになり、検出器は燃焼ガスの温度場、流れに対する外乱として無視できなくなる。

非接触で火炎内の温度、ガス濃度等の分布を測定できる方法としては PLIF 法 (Planar laser-induced fluorescence), CARS 法 (Coherent anti-Stokes Raman scattering), レーリー散乱法, ふく射・透過を利用した方法等が提案されている。なかでも, PLIF 法, レーリー散乱法はシート状のレーザーによる蛍光, 散乱を利用して温度等の 2 次元分布を求めることができる方法で, 時間・空間分解能が高く応答性が良いという利点がある。しかし, 装置が大掛かりで, レーザー光の入射に対して直角方向で測定しなければならないという制約がある。また火炎内にすすを含む輝炎を対象とする場合, 蛍光や散乱光の測定は, すす粒子による吸収やすすからのふく射の影響を受け, 定量的な評価が困難となる。

一方, ふく射・透過を利用した方法とは, 火炎からのふく射量や, 火炎とは別に設けた光源からのふく射が火炎を透過した透過量を様々な角度から火炎の周りで測定して, これらの測定値から火炎内部の温度や化学種濃度など物理量の分布を再構成する方法である。この方法は, 空間分解能はレーザーによる散乱・蛍光を利用する方法に劣るが, 測定装置が簡易であり, 光源の透過光を利用する場合でも, 透過光の入射方向と測定方向が同一面でよいことは実用上 LIF 等にくらべ有利である。さらに火炎が輝炎の場合, 火炎内のすす粒子によるふく射の吸収とすすからのふく射を考慮に入れた (利用した) 方法であれば, 蛍光・散乱光を利用した方法のようにすすによる吸収・ふく射の存在自体が誤差を引き起こすことはない。

これまで開発されたふく射・透過を利用した火炎内の温度・化学種濃度等の測定方法は, そのほとんどが CT 法を用いたものである。CT 法に用いる CT 計算は, 計算量が少なく, 投影データに紛れ込んでいるノイズに対して安定であるという利点がある。しかし CT 法を火炎特に, 火炎内にすすを含む輝炎に適用する場合, i) 輝炎内のすすのない部分の測定が可能で, かつ ii) 輝炎内のガスとすすによるふく射の自己吸収を考慮できる方法は今のところ存在しない。この理由は, CT 計算が線形の式にしか適用できないことにある。

本研究では火炎内の温度、 CO_2 分圧、すす濃度分布の推定法のアルゴリズムを提案する。つまり提案する方法は、火炎内の温度、すす濃度、 CO_2 分圧が非対称な二次元分布でもこれらを非接触で推定でき、また、火炎内のすす、 CO_2 による自己吸収と、すす、 CO_2 からのふく射を考慮した推定法であるため、不輝炎や火炎全体がすすに覆われた輝炎だけでなく輝炎中にすすのない部分を含む火炎でも対象にできる方法である。

本論文は、全5章より構成されている。

第1章の序論では、ふく射・透過を利用したすすを含む火炎内温度・すす濃度・ CO_2 分圧分布の推定法開発の背景と、本研究の目的、本論文の構成を述べた。

第2章では、従来開発されてきたふく射・透過を利用した火炎内温度分布等の測定法の問題点とその原因を述べ、その解決法について述べた。さらに開発した方法を詳述した。この方法は、すすのみの吸収帯($0.53\mu\text{m}$)と CO_2 とすすの吸収帯($4.3\mu\text{m}$)について、火炎からのふく射と、火炎とは別に設けた光源からのふく射が火炎内を透過したふく射を、それぞれ火炎のまわりから測定して、火炎内の温度、すす濃度、 CO_2 分圧の二次元分布を推定する方法である。まず、すすのみの吸収帯について測定したふく射強度をもちいて、透過率に関する非線形方程式を全測定光路に対して立て、これらを連立して部分線形化を利用して収束計算を行い、すす濃度分布を求める。温度と CO_2 分圧の分布は、先に求めたすす濃度と、測定したふく射強度をもちいて、温度と CO_2 分圧を陰に含むふく射と透過についての非線形方程式を全測定光路に対して立て、これらを連立して部分線形化を利用して収束計算で解くことで求める。

第3章では、開発した方法の妥当性をシミュレーションによって検証した。その結果、温度、 CO_2 分圧、すす濃度は十分な精度で推定できることを示した。

第4章では、推定に影響を与える各種誤差について考察した。各種ふく射の測定値が $\pm 0.5\%$ 以内の誤差を含む場合、温度、 CO_2 分圧、すす濃度の推定誤差は、測定誤差を含まない場合に比べて、それぞれ最大で0.1%、3.1%、5.1%増加した。温度が高いほど、温度の推定精度は高かった。これは、温度は計算で得られた黒体ふく射強度からプランクの法則を用いて求めるが、温度と黒体ふく射強度の関係が線形でないためである。すす粒子の球形近似が精度に与える影響、すす粒径一定の仮定が精度に与える影響、ふく射測定誤差が精度に与える影響、光源のふく射強度がすす濃度の推定精度に与える影響、火炎中のすす濃度・ CO_2 分圧の大きさが精度に与える影響についても示した。

第5章の結論では、本研究で得られた結果を要約した。

これを要するに著者は、すすのみの吸収帯と CO_2 とすすの吸収帯について、火炎からのふく射と、火炎後方の光源からのふく射が火炎内を透過したふく射の測定を利用して、火炎内の温度、すす濃度、 CO_2 分圧の二次元分布を推定するための新しい計算手法を開発しており、熱工学上有益な多くの新知見を得たものであり、熱工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。