京都工芸繊維大学

氏　　名	たけうち　せいいち **竹内　誠一**
学位(専攻分野)	博　士（工学）
学位記番号	博甲第 663 号
学位授与の日付	平成 25 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科　設計工学専攻
学位論文題目	**火炎の乱流変動が炉内放射伝熱に及ぼす影響の吸収線データベースに基づく検討**
審査委員	(主査)教授　岡本達幸 教授　萩原良道 教授　森西晃嗣

論文内容の要旨

燃焼炉内の伝熱においては，炉が大きくなるほど放射伝熱の占める割合が高くなり，火力発電プラントでは 90%以上を占めると推定されている．このため，一品生産となりがちで，実機規模の炉を試作することが困難な大型工業炉の設計に際しては，放射伝熱を数値シミュレーションで適正に予測できるようになることが強く望まれている．しかし，赤外活性ガスからの熱放射は温度に対して強い非線形性を示すため，濃度・温度の時間平均値から放射エネルギー射出量を評価したのでは，時々刻々の射出量を時間平均化した値と大きく食い違う可能性が高いうえに，被加熱物までの光路上での吸収量について，時間平均温度における吸収量で評価してよいのかどうかの知見も得られていない．この難点が，赤外活性ガスの非灰色性を表現するモデルの精度が全般に低いという難点と並んで，炉内放射伝熱の数値シミュレーションの信頼性を失わせる二大要因であることは，関係者の間では古くから認識されているのであるが，放射エネルギーの射出・吸収の乱流変動のモデル化は極めて難しく，モデルの確立には至っていない．また，温度・濃度の乱流変動履歴を提示できる流動・燃焼の数値シミュレーションと，非灰色モデルに起因する誤差を排除しうる Line-by-Line 解析による放射伝熱計算の組み合わせは余りにも計算負荷が重く，近い将来に設計ツールとして実用化されるとは思えない．本研究では，非灰色性を表現するモデルによる誤差を排除しつつ，温度・濃度の乱流変動を模擬した燃焼ガス中での放射エネルギーの射出・吸収の特性を詳細に調べ，温度・濃度の時間平均値ベースで行われてきた放射伝熱計算に若干の変更を加えるだけで，乱流変動を考慮したシミュレーションに比べて遜色のない結果を得られることを基礎的に明らかにするとともに，炉全体への適用を図り，火炎の乱流変動が炉内放射伝熱に及ぼす影響について，工学的に有用な知見を得た．

論文は序章，総括の章に加え，以下の 4 つの主要な章によって構成される．

（1）まずは流動・燃焼状況の数値シミュレーションと放射伝熱計算を切り離し，かつ，大型円筒炉の中心軸から炉壁へと向かう半径方向の典型的な一光路のみに着目して，乱流変動を無視することが炉壁に到達する放射エネルギー量の評価に及ぼす影響を Line-by-Line 解析で検討した．

その結果，温度とガス分圧の乱流変動を無視して求めた炉壁到達時の放射強度の評価値は，両者の乱流変動履歴を追跡して評価した放射強度の瞬時値に時間平均を施した値に比べて，かなり過小評価されることが明らかとなり，乱流変動が大型工業炉での放射伝熱量に与える影響も，流動・燃焼状況の数値予測と放射伝熱計算を連成したシミュレーションで検討する必要があることを明示した．

（２）乱流変動の追跡と Line-by-Line 解析を組み合わせた炉全体の伝熱のシミュレーションが非現実的な手法となってしまうのは，乱流変動を追跡する際の時間ステップ数の膨大さと，Line-by-Line 解析のための帯域分割数の膨大さとが組み合わさるためである．まず，帯域分割数の問題について，狭域の吸収係数スペクトルを降順に並べ替えたうえで，帯域幅が二次関数に従って増加するようにサブ狭域に分割する手法を採れば，Line-by-Line 解析に比べて飛躍的に少ない帯域分割数で，Line-by-Line 解析に比べて全く遜色のない放射伝熱計算ができることを見いだし，非等温場に適用しても Line-by-Line 解析との差異は僅かで済むことを立証した．

（３）一光路上での検討に際して，乱流変動の相互相関が及ぶ距離の長短を変えてみても，光路上での放射強度の成長・減衰挙動にほとんど変化が見られなかったことから，異なる 2 点の乱流変動に独立性を仮定してもよいとの仮説を立て，その妥当性を立証した．その結果，放射エネルギーの射出過程と吸収過程を分離することができ，射出量については温度変動の確率密度関数を考慮した時間平均値を使う必要はあるが，乱流変動のない定常射出として取り扱えることを見出した．また，定常射出された放射エネルギーの吸収過程についても，温度と濃度の関連性を考慮すれば，温度・濃度の時間平均値に対応する吸収係数で評価しても，乱流変動を考慮した場合とほとんど差のない結果を得られることを示した．

（４）上記の成果によって，炉内各点の温度変動の確率密度関数（PDF）を求める手順さえ付け加えれば，乱流モデルを組み入れて流速・温度・ガス組成の時間平均値の炉内空間分布を求める方法と，非灰色性を表現する広域・狭域モデルを用いた時間平均値ベースの放射伝熱計算を連成させるという現状行われている方法とほぼ同等の計算負荷で，バンドモデルに起因する誤差を排除しつつ，乱流変動を考慮した放射伝熱をも含む炉内伝熱のシミュレーションを行えることになった．この成果を応用して，放射エネルギーの再吸収を無視できない大型工業炉において，乱流変動を無視することが炉壁に到達する放射エネルギー量の評価に対してどの程度の誤差をもたらすかについても検討を行い，その誤差の程度や誤差を生み出す機構，さらには炉の大きさによって誤差の程度が変わり得るか等について，得られた知見を報告した．

論文審査の結果の要旨

大型炉においては，放射伝熱は炉内伝熱の大部分を占める重要な伝熱形態でありながら，燃焼場の速度・温度・濃度の乱流変動履歴を追跡する数値シミュレーション手法に，温度・濃度の乱流変動と赤外活性ガスの非灰色を考慮した放射伝熱計算を組み合わせる手法が未だ確立できず，現状では，火炎の乱流変動が炉内放射伝熱に及ぼす影響を理論的に議論することが難しいとされてきた．

これに対して，申請者は，Line-by-Line(LBL)解析によって赤外活性ガスの非灰色性を厳密に考慮したうえで，実験で得られている相互相関の特性が表現できるような温度・濃度の乱流変動を模擬することで，一光路上の温度・濃度の乱流変動履歴が与えられた条件下では，乱流変動を無

視して放射伝熱量を評価すると，大幅な過小評価につながることを明らかにした．

次に申請者は，膨大な数の光路を考慮しなければならない炉全体に対する影響を検討するために，精度を維持しつつ，LBL 解析に伴う膨大な帯域分割，乱流変動を追跡するのに要する多大な時間ステップ数を著しく削減し，実用的なレベルの計算負荷で行える手法に取り組んだ．帯域分割については，吸収線データベースをもとに，比較的少数の要素灰色ガスの集まりで，狭域の特性を効率的に表現する手法を見出している．また，一光路上での検討結果において，乱流変動の相互相関の及ぶ距離が被加熱物への放射伝熱量に殆どと言ってよいほど影響しないことに着想を得て，射出過程と吸収過程を全く分離することができ，射出過程は量的には乱流変動の影響を考慮しなければならないが，定常射出として取り扱えることを見出した．さらに，その定常射出扱いできる放射エネルギーの吸収過程において，光路上の各微小区間での吸収量は時間平均温度における吸収係数を用いて評価しても殆ど精度の低下がないことを見出した．

この結果は，乱流変動を考慮した放射伝熱計算をパーソナルコンピュータ程度の計算機で行いうる手法を開発しえたことを意味し，工学的に大いに有用であると評価できる．

さらに申請者は，大型炉を対象に，流動・燃焼状況の数値予測と放射伝熱計算を連成させての検討も行っており，乱流変動を無視した場合には，射出の強い領域で射出量を低めに評価してしまうのであるが，そのことが，その領域の温度上昇を招き，結果として，ボイラ水管のように炉壁付近にある被加熱物への放射伝熱量はあまり変わらないとの結果が得られている．このことも大型炉の設計に際しては有用な知見である．

申請論文の各章の内容は，審査を経て掲載され，あるいは，掲載が決定している 4 編の論文をもとに構成されている．

(1) 竹内誠一, 岡本達幸，“炉内放射伝熱計算のための Line-by-Line 解析の効率的実行法について（手法の提案と等温場での検討）”，日本機械学会論文集 B 編，Vol. 78，No. 792 (2012)，pp.1409-1420.

(2) 竹内誠一, 岡本達幸，“炉内放射伝熱計算のための Line-by-Line 解析の効率的実行法について（手法の提案と非等温場での検討）”，日本機械学会論文集 B 編，Vol. 78，No. 792 (2012)，pp.1421-1431.

(3) 竹内誠一，小西健也，岡本達幸，“乱流変動が炉内放射伝熱に及ぼす影響の基礎的検討”，日本機械学会論文集 B 編（掲載予定）

(4) 竹内誠一，岡本達幸，“炉内放射伝熱計算における乱流変動の取り扱いに関する研究”，日本機械学会論文集 B 編（掲載予定）