船用ボイラ火炉内の放射熱伝達解析*

早坂 洋史**・工藤 一彦**・谷口 博**
 沖上 昇***・高橋 武敏***・関口 善利***

Radiative Heat Transfer Analysis in a Marine Boiler Furnace

By Hiroshi Hayasaka, Kazuhiko Kudo, Hiroshi Taniguchi, Noboru Okigami,
 Taketoshi Takahashi, Yoshitoshi Sekiguchi

The improvement of marine boiler furnace has mainly been done empirically. This is due to the complicated phenomena such as combustion, heat transfer and flow in the furnace. Among them, heat transfer by radiation is especially important because heat transfer to the furnace wall is mainly done by radiation. New analytical methods are proposed for the radiative heat transfer analysis to increase the accuracy and to reduce the computation time compared with the conventional Monte Carlo method. They are composed of the radiative heat ray method and READ (Radiative Energy Absorption Rate Distribution) method. The radiative heat ray method can calculate the radiative energy transfer from a small element of gas or wall in the furnace to other elements by using non-stochastic method. The result is used repeatedly in the iterational calculation of temperature distribution in the furnace. This method is called the READ method and eliminates the repeated calculation of radiative heat flux during the iteration which is necessary in the conventional Monte Carlo method. Temperature and wall heat flux distribution are calculated by using these methods and experimentally obtained velocity profile and flame shape. The results are compared with the experimental results and show good agreements. The radiative heat transfer diagnosis in the furnace is also carried out. This diagnosis is useful to consider the method to flatten the wall heat flux distribution.

1. ま え が き

従来の船用ボイラの高負荷化による性能向上は、理論解析よりむしろ経験的になされることが多かった。この理由は、火炉内の燃焼、流動、熱伝達の各現象が複雑であるため、十分な解析を事前に行うことがむずかしいためである。熱伝達のうち、とくに放射は、火炉壁面への主たる熱移動現象を左右するものであるから、まず、火炉内の放射熱伝達特性をより正確に把握することが重要な課題である。この放射熱伝達の解析手法として、従来より、ゾーンメソッド¹⁾とモンテカルロ法²⁾とがよく知られている。前者においては、全交換面積を求める計算手法が複雑であり、とくに三次元の解析では、膨大な計算量が必要となるため、モンテカルロ法により、この全交換面積を求めている例もある³⁾。後者のモンテカルロ

法の場合は、火炉内の吸収係数の分布を比較的考慮しやすいことや三次元への計算手法の拡張が容易であることなどの特徴がある。しかし、放射エネルギー束の吸収位置を確率計算により、順次、点として求めているため、解析の次元が増すにつれて、多くの点、つまり乱数を多数個使用しなければならず、計算時間が長くなる欠点があり、各種の改良計算法が提案されている^{4,5)}。著者らは、このモンテカルロ法の欠点である長い計算時間を改善する方法を検討した結果、READ (放射エネルギー吸収率分布, Radiative Energy Absorption Rate Distribution, 略して READ) による計算手法を開発した^{6,7)}。READ とは、「火炉内の放射ガス及び壁面の各要素から放射されるエネルギーがどの要素にどれだけ伝わるかを表わす割合の分布」である。別な表現をすると、READ は、燃焼ガスあるいは火炎と火炉壁面とを同時に考慮した形態係数の数値群である。従って、火炉内のガスの吸収係数の分布と壁面の放射率の分布、つまり火炉内の光学的条件が変化しない限り、定数となり、一度求めておけば、繰り返す求める必要はない。モンテカルロ法によ

* 原稿受付 昭和60年11月9日

昭和60年秋季学術講演(昭和60年10月23日)

** 正会員 北海道大学工学部(札幌市北区北13条西8丁目)

*** 日立造船(株)研究所(舞鶴市字余部下1,180)

る放射熱伝達の解析⁹⁾にこの READ を使うと, モンテカルロ法を一回使用して READ を求めればよく, 従来のモンテカルロ法のように計算が収束するまで繰り返し, モンテカルロ法を使う必要がなく, 計算時間は大幅に短縮される。また, 前述のように, 火炉内の光学的条件が一定である限り, READ は変化しないので, 流れの条件などを変えるパラメータ計算に有効である, などの特徴がある。このように, READ は放射熱伝達計算における火炉内各要素に対する形態係数であり, データベースの性格のあることを考慮して, この READ を正確に求める新たな解析手法を開発し, 放射熱線法⁷⁾ (Radiative Heat Ray Method)として提案した。この手法は, 点放射源と複数本の放射熱線を用いるもので, 火炉内の任意の点にある点放射源から射出される放射熱線の各々につき, 通過するガス層の光学厚さに従って, Beer の法則により, 通過する各要素での熱吸収量を順次求めていくという計算法であり, モンテカルロ法と異なり, 計算時に乱数を使用していないため, より正確な解を求めることができる。

本論文においては, 新しい計算手法の READ と放射熱線法を船用ボイラ火炉に適用し, 実験データと比較検討しとりまとめた。

2. 実 験

実験に使用した船用ボイラの概略図とその設計仕様を図 1, 表 1 に示す。実験条件の概略は, 表 2 に示すとおりである。火炉は, 図 1 に示すように 2 基のロータリバーナが天井に装備されている天井だき方式で, メンブレンウォール構造となっている。燃焼室負荷は, $10^6 \text{ kcal}/(\text{m}^3 \text{ h})$ ($1163 \text{ kW}/\text{m}^3$) である。実験に当っては, 火炉壁面に 25 個の観察窓 (図 1 の側壁○印) より計測器具を燃焼室内へそう入し, 火炉奥行き方向に 7 箇所 (図 1 の後壁×印) で, 火炉内温度分布, ガス成分の各濃度分布と

図 1 火炉概略図

表 1 ボイラ設計条件

項 目	負 荷	常用負荷	最大負荷
蒸 発 量	(t/h)	25	40.2
過熱器出口蒸気圧力	(atg)	63	30
過熱器出口温度	(℃)	525	400
給 水 温 度	(℃)	121	121
空 気 温 度	(℃)	20	20
ボイラ効率	(%)	85	

表 2 実験条件

負 荷	100 %
空気過剰係数	1.2
空 気 温 度	32℃
燃料……軽油	
高発熱量	10,784 kcal/kg
消 費 量	3,200 kg/h
組成 (%)	$c = 85.39, h = 13.40,$ $s = 1.16$

ガスの流速分布の測定を総計 175 点の測定位置で行った。また, 観察窓より燃焼状態の観察と火炉壁面の受熱量分布の測定を行った。火炉内の温度分布は, R (PR) 熱電対を装備した吸引式温度計で測定した。火炉内の流速は, 水冷式ピトー管を使用し, その差圧を傾斜マノメータにより読みとり, 求めた。ガス成分の分析は, オルザットガス分析計により行い, このガス成分の濃度分布と温度分布とにより, 最終的には, 火炉内の重量速度分布として計算して求めている。火炉壁面の受熱量分布については, 板状熱流束計¹⁰⁾により計測している。

3. 解 析

3.1 火炉のモデル化 図 1 の火炉の概略図より, 火炉は側壁中央で対称であることを考慮すると, 火炉の半分を解析すればよく, 図 2 のようにモデルを設定した。このようにすることで, 計算のための分割要素数が減り, 計算時間の短縮が図れる。なお, 火炉内対称面で放射エネルギーは, 鏡面反射するものとした。

3.2 放射の解析手法と条件

3.2.1 放射熱線法による解析手法⁷⁾ 放射熱線法の解析原理を図 3 の二次元モデルに示すが, これは, 正方形火炉の断面中央に無限小の放射源がある場合に相当する。図 3 (a) の放射熱線法は, 複数本の放射熱線を周囲に均一に射出し, その放射熱線の各々について各要素を通過する光学距離 kl (k は吸収係数, l は距離) に従って, 放射エネルギーの吸収量を Beer の法則を適用して計算する方法である。図 3 (b) には, 比較のために, モンテカルロ法の計算手法を示したが, 放射源から多数の放射エネルギー束が射出され, その各々につき, 射出方向, 吸収距離を乱数によって確率計算して, 吸収位置の点を決定している。このため, 100 本程度の放射エネルギー束数では, 一本も入射していない分割要素もあることがわ

図2 解析モデル

かる。このように、吸収位置を点として求めているので、一様分布を求めるためには、多数の放射エネルギー束が必要である。これに対して、放射熱線法では、図3(a)の例のように、20本の熱線数でも、ほとんどの要素を熱線が通過しており、熱線数をあまり増加させなくても、一様分布となる解が求まることになる⁷⁾。

3.2.2 READによる解析手法^{6,8)} READの定義は、前述のとおりであるが、具体的には図4に示したように、注目している分割要素 dV (ガス)あるいは、 dS (壁面)に吸収される放射エネルギーの割合の分布である。READは、ゾーンメソッドにおける全交換面積と異なり無次元数であり、火炉内のガスと壁面の全分割要素をまとめて表わしており、火炉内の放射熱伝達特性を示す具体的な指標である。注目している要素 dV_0 ($X=i, Y=j, Z=k$)についてのREADを求めるには、任意の要素 dV が($X=I, Y=J, Z=K$)に配置されているような場合にREADを、 $R_d(ijk, IJK)$ と表わすと、これは次式で計算される。

$$R_d(ijk, IJK) = N_{ab}(ijk, IJK) / N \quad (1)$$

ここで、 N は分割要素(i, j, k)から図3(a)のように射出される放射熱線数(各放射熱線は単位量の放射エネルギーを持って放出される)であり、 $N_{ab}(ijk, IJK)$ は、そのうち分割要素(I, J, K)に吸収された放射熱エネルギーである。

求めたREADを使って、着目している分割要素へ伝

図3(a) 放射熱線法

図3(b) モンテカルロ法

図4 火炉モデル

達される放射エネルギー q_r を計算するには、次式を使って求めればよい。

$$q_r(I, J, K) = \sum_i \sum_j \sum_k R_d(ijk, IJK) ST(i, j, k) \quad (2)$$

ここで、 $ST(i, j, k)$ は各分割要素の放射エネルギー強度

であり, 次式で求めることができる.

$$\left. \begin{aligned} ST(i, j, k) &= 4(1-\alpha_g)\sigma k T_g^4 dV \text{ (ガス)} \\ ST(i, j, k) &= \epsilon\sigma T_w^4 dS \text{ (壁面)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで, α_g は自己吸収係数, σ はステファン・ボルツマン定数, k は吸収係数, T_g はガス温度, dV , dS はそれぞれ分割要素のガス体積と壁面面積, ϵ は壁面放射率, T_w は壁面温度である. また, 各分割要素のエネルギー方程式は, 次式で表わされる.

$$\left. \begin{aligned} 4(1-\alpha_g)\sigma k T_g^4 dV &= q_r + q_h + q_c \text{ (ガス)} \\ \epsilon\sigma T_w^4 dS &= q_r + q_a + q_c \text{ (壁面)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで, q_h は発熱量, q_c は対流及び流れによる熱移動量, q_a は壁面における正味の受熱量である. 一度求めた READ は, 前述のように火炉内の k と ϵ の分布が一定である限り変化しないので, 一度 READ を求めておけば, 式(2)~(4)を使って, 流れの条件などを種々変化させるパラメータ計算を容易に行い得ることがわかる.

次に, READ を使って火炉内の温度分布と壁面受熱量分布を求めるには, 以下のようにすればよい. まず, 各分割要素で仮定した温度の初期値 T_{g0} により, 式(3)で $ST(i, j, k)$ を計算し, 式(2)で $q_r(I, J, K)$ を求め, 別途に計算した q_h , q_c とともに, 式(4)を代入して T_g を求める. もし, $T_g \neq T_{g0}$ でなければ, $T_{g0} = T_g$ として, 上記の計算過程を $T_g \neq T_{g0}$ となるまで繰り返せばよい. この繰り返し計算は, 通常 10 回程度の反復で十分な精度の解が求まる. また, この収束計算に要する計算時間は, READ を求めるための計算時間と比べて, 無視できる程短く, READ を一度求めておくと, 迅速に放射熱伝達計算を行うことができる.

3.2.3 放射の解析条件 火炎及びガスの吸収係数については, この種の解析によく使われている 0.8 と 0.4 m^{-1} を用いた. 火炉壁面の条件としては, ボイラ火炉面であることと, 表 1 を参考にして, 放射率は 1, 温度は 327°C {600 K} とした. また, 側壁中央の対称面では, 放射は鏡面反射するものとして取扱っている.

3.3 燃焼・流動の解析手法と条件

3.3.1 火炎形状及び発熱量分布 燃焼の解析手法と条件につき, ここでは以下のように簡単化して取扱った. まず, 火炎形状では火炉内の燃焼状況の観察結果を参考にして, 図 2 に示すように設定(図 2 中の斜線部)した. 発熱量分布は, 前報の結果⁹⁾を参考にし, 装備されているバーナがロータリバーナで, バーナ近傍での発熱量の大きいことを考慮し, バーナ入口部に相当する二つの分割要素(図 2 上図の $\square$ 印の 2 要素)に, 全発熱量の 80% を与えた. 他の火炎部においては, 残りが均一に分布しているものとした. なお, 図 2 の下図に示した $\times$ 印の 4 要素 ($I=3, 4, J=4, K=5, 6$) は, 燃焼ガスの部分であり, 火炎は観察結果と同じ中空としている.

3.3.2 火炉内流動条件 火炉内の流動は, 重量速度分布として, 前述のように実験で求めてあり, その結

果の例を図 5 に示した. この図 5 において, 各要素の重量速度は, 矢印によって示してあり, 火炉入口のバーナ部の入力を 100% とし, 図の外に示した矢印の長さが, 10% に相当するものとして表現してある. この図 5 より, バーナ軸心上に循環域のあることなどがわかる.

全発熱量や全重量速度は, 表 2 の実験条件より計算して与えた他, 対流熱伝達率は, 10 kcal/($\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$) {11.63 W/(m^2K)} 一定として計算した.

図 5 火炉内流動状況

4. 解析結果

4.1 実験結果との比較 図 6 に火炉内温度分布, 図 7 に受熱量分布の解析値と実験値とを比較して示してある. $\circ$ 印は解析値で, $\times$ 印は実験値である. 解析値は, 実験値と比べ温度分布, 受熱量分布とも多少フラットな傾向となった. この理由としては, 解析手法の実用性を考慮して分割要素の寸法を少々, 大きくとることとしたため, 実機におけるバーナ近傍の強い燃焼域を再現できなかったものと考えられる. 今後, 分割要素数を増やし, また, 各種バーナに対する発熱量分布の検討も行って, より実験結果に適合する条件を容易に設定できるように

図 6 火炉内温度分布

図7 火炉壁面受熱量分布

手法の開発が必要である。

4.2 火炉内放射熱伝達診断⁸⁾ 図8に火炉壁面で最大受熱量を示す分割要素 〃 印に対して、放射熱伝達診断を行った結果を示した。ここで、放射熱伝達診断とは、「放射の遠隔作用を考慮しながら、放射による火炉内局所への熱エネルギーの集中の原因を分析し、その熱エネルギーの集中を分散させ均一化を図る方策を見つけ出す作業」のことである。その放射熱伝達診断は、前述の READ を使えば、容易に行うことができる。つまり、火炉内の温度分布が求まると、図4中のガス分割要素 dV_0 ($X=I, Y=J, Z=K$) から射出される放射エネルギーは、式(3)で計算でき、火炉分割壁面 dS ($X=i, Y=j, Z=k$) へ到達する放射熱伝達量は、 $R_d(IJK, ijk)$ が既知であるので次式で求められる。

$$q_r(IJK, ijk) = R_d(IJK, ijk) ST(I, J, K) \quad (5)$$

この計算を火炉内全要素について行い、 dS への全放射熱伝達量に対する割合を求めたのが図8である。図8より、火炉壁面への放射の熱伝達量は、近傍のガス塊から主として到達していることがわかり、特に壁面に接している分割要素からの割合が大きいことがわかる。この診断により、船用ボイラ火炉内の火炎は、バーナ近くで、半径方向に広がる短炎よりは、軸方向に長く伸びた長炎のほうが、壁面への放射熱伝達量の集中を除くことになり、適していることがわかる。

5. ま と め

(1) READ による放射熱伝達の計算手法につき報告し、船用ボイラへの適用例を紹介した。また、READ を使った放射熱伝達診断を行い、ボイラ火炉壁面での受熱量を均一化する方法につき考察した。

(2) READ を求める解析手法としての放射熱線法を新たに開発し、モンテカルロ法と比較して、実用上、有利なことを示した。

最後に、本研究は文部省科学研究費(奨励研究 A6075 0170)の援助を受けたものである。また数値計算に当っては、北海道大学大形計算機センタを利用させていただいた。ここに、付記して謝意を表わす。

文 献

- 1) Hottel, H. C., Cohen, E. S., A. I. Ch. E. Journal, 4-1 (1958-3), 3.
- 2) 谷口・舟津, 日本機械学会論文集, 36-284(昭45-4), 610.
- 3) 大森, 東京ガス(株)技研報告第26号(昭57-3), 169.
- 4) 早坂ほか2名, 日本機械学会論文集(B編), 51-467(昭60-7), 2202.
- 5) 媚山ほか2名, 日本機械学会論文集, 44-385(昭53-9), 3124.
- 6) 早坂ほか2名, 日本機械学会講演論文集, No.842-3(昭59-9), 142.
- 7) 早坂ほか5名, 第7回エネルギー利用と直接発電シンポジウム(1985-3), 1.
- 8) 早坂ほか5名, 第22回伝熱シンポジウム講演論文集(1985-5), 259.
- 9) 谷口ほか2名, 日本船用機関学会誌, 17-12(昭57-12), 974.
- 10) 小泉・市川, 日本機械学会誌, 68-554(昭40-3), 322.

〔質 疑 応 答〕

質問者 芦屋大学 大原清司

〔質問〕 一般論であるが、燃焼室の熱計算には、火炎及び燃焼ガスの局部的温度、黒度、流量、流速及び周壁の温度、黒度が必要で、中でも前者の各値が重要である。これを求めるには直接測定、または、流れのパターンと燃焼過程を基にした正確な推定が必要であるが、いずれもかなりむずかしい。

本報告においては、火炎及び燃焼ガスの温度、成分及び流速と壁面における熱吸収量を直接測定してはいるが、この値をそのまま計算に使っているのではなく、立方体に分割した火炎及び燃焼ガスと矩形に分割した壁面との間の輻射、対流熱伝達を火炎形状、発熱量分布、火炎及び燃焼ガスの流速分布を仮定しながら求めたものであるため、上記の推定法による計算を行っているわけであるが、火炎形状、発熱量分布、フローパターンなどに検証されていない仮定が多い。

図8 放射熱伝達診断例

本報告のように火炎及び燃焼ガスを数多く分割するのであれば、少なくとも、広瀬・光永（機械学会論文集，36-292（昭45-12），2093）のように流れのパターンを推定し，これに燃焼過程を仮定して，局部発熱量を推定して行く方法が望ましいと考えるが，どうか。

私見によれば，燃焼室の熱設計において分割数を多くするなど精密な推定法をとるほど，これを各段階で検証する直接測定が数多く必要であると考えますが，この点につき貴見を伺い度い。

この私見により，ボイラの設計では燃焼室周壁を蒸発器と過熱器に2分したり，火炎と燃焼ガスを2〜3分割すればよい場合も多いので，火炎及び燃焼ガスをできるだけ少分割する模型も有効であると考えますが，どうか。

また，今後，フローパターン，燃焼過程などの推定と検証を行う予定があるかどうか伺い度い。

〔回答〕 まず，最初の質問からお答えする。本論文は，従来より指摘されているようにモンテカルロ法による放射熱伝達の解析手法における計算時間，計算精度の問題点を解決する方法として放射熱線法と READ による解法につき，主として述べているものである。ご指摘の流動，燃焼過程を推定する手法については，既に報告済み⁹⁾で，流動は三次元粘性流，燃焼過程は指数関数的な燃焼モデルについて解析及び実験値との対比を行ってある。本論文では，上記のように主として新しく開発した放射熱伝達の解析手法の特徴について述べることにしたため，流動状況については，解析結果を組み入れることも考えたが，実測値があるので，それを採用することとした。また，発熱量分布については，ほぼ同じバーナ型式であることを考慮し，上記燃焼モデルを適用した。本

論文で示したように，新しい放射熱伝達の解析手法を実用的に利用できるように確立させることができた。また，従来のモンテカルロ法は，ほぼ同じ概念であるが，計算時間の長いこと，また，計算精度に限界があることを明らかにしたので，今後は，流動及び燃焼の解析の改良にも力を入れていきたいと考えている。

次の質問については，以下のように考えている。火炉内の流動状態が乱流であることや火炉寸法，構造によっては，測定が不可能なことを考慮すると，解析手法の検証は，必ずしも実施できるとは限らない。そのため，実験値と解析値とをどのように評価し利用するかが，今後の重要な検討事項であると考えている。ご質問の直接測定の項目数については，測定可能かどうか，また，どのデータが解析手法の検討に真に必要なか十分に検討していくべきだと考えている。ただ単に測定項目を増すことは実用的でないと考えている。

最後の質問に対しては，次のように考えている。石谷・山崎そして大原による簡単な模型による解析手法は，多くのボイラ設計に使われてきた実績があり，その有効性は明らかである。しかし，火炉内のヒートスポットを解消し壁面の焼損の防止策や火炉内の最適温度により左右される NO_x 発生 の低減策を検討するためには，本論文のような火炉を実用上必要な数の要素に分割して検討する手法の確立が望まれている。さらに，熱伝達，流動，燃焼の各現象を組み合わせた解析手法が確立され，各方面で実用化されれば，新型火炉や低公害燃焼法の設計段階での検討が可能となる。このため，現にボイラ火炉ばかりでなく鋼材加熱炉やガス化炉などに対して，本論文のような解析法の適用が要望され共同研究を進めている。