222 ガス輻射と自然対流の共存熱伝達

宇都宮大学工学部 黄 凱[○]、秋山 光庸、二宮 尚

An Investigation of Natural Convection-Radiation Combined Heat Transfer

Kai HUANG*, Mitsunobu AKIYAMA** and Nao NINOMIYA**

Heat transfer by natural convection and radiation in participating fluids enclosed in a square enclosure is numerically simulated. The continuity, momentum and energy equations are solved by the control volume method while the radiative heat transfer is analyzed by the Monte Carlo simulation. The Monte Carlo simulation is linked with the SIMPLE algorithm for solving the Navier-Stokes equations, therefore all variables such as U , V , and T are solved each time the radiative heat flux is updated. As the result, the influences of thermal radiation on the flow and temperature fields are found significant. The radiative heat transfer is dominant. The convection is also strengthened. These features become clear with higher optical thickness.

1. 緒論

燃焼装置や原子炉等の工業装置内の流体は炭酸ガス、水蒸気等熱輻射に対して非透過体であるものが多く、その内部流れにおける流れ場や温度場や伝熱量を求めようとした場合、自然対流のほかに輻射による熱移動の影響等を合わせて考慮する必要がある。しかし、輻射伝熱と流れ場を記述する支配方程式の性質が異なるために、統括的なシミュレーションを行おうとすると、数値解析が非常に複雑になる。流体が輻射に対して非透過体である場合、その解析には微積分型の輻射強度の輸送方程式をナビエ・ストークス方程式やエネルギー式と並行して解く必要がある。このため、自然対流及び輻射の共存する流れに関する研究はこれまでもいくつか報告されているが、両者を同時にしかも厳密に取り扱った例は少ない。

本研究では、二次元正方形密閉空間内における自然対流と輻射の相互作用による輻射性ガスの熱流動現象の詳細を解明することを目的とした。ガス輻射に対して、輻射強度を代数的に解析する代わりに、量子物理的な概念から離散化した単位エネルギーを持つ数多くのエネルギー束を考え、そのエネルギー束がガスに吸収、再放出されたり、壁面に到達して反射あるいは吸収される過程を統計的に解析するモンテカルロ法を用いて解析を行った。この様に、輻射伝熱に対して高精度な解析が可能なモンテカルロ法によるシミュレーションと、自然対流の流れ場に対する有限体積法による数値解析を連成させることによって、熱と流れの両者に対してバランスがとれた正確な解析を行うことができる。

* Graduate School of Engineering, Utsunomiya University, 2753 Ishii machi, Utsunomiya 321

** Faculty of Engineering, Utsunomiya University, 2753 Ishii machi, Utsunomiya 321

2. 計算方法

解析対象及び座標系を Fig.1 に示す。一辺の長さ L の正方形断面の二次元密閉空間内に二酸化炭素を充填し、内壁は全て輻射に対して黒体とする。密閉空間内の流体は左壁から $T=T_H$ で等温加熱され、右壁から $T=T_C$ で等温冷却される。上下壁では共に断熱とする。本研究で使用した無次元数は以下のように定義した。

$$Ra = g\beta(T_H - T_C)L^3/\nu\alpha \quad \tau = KL$$

$$Pl = (\lambda/L)/4\sigma T_0^3 \quad Nu = qL/\lambda(T_H - T_C)$$

Fig.1 Geometry of the problem

ここで、 g は重力加速度、 β は体膨張率、 ν は動粘性係数、 α は熱拡散係数、 σ はステファン・ボルツマン係数、 λ は熱伝導率、 K は吸収係数、 q は伝熱量を表すものとする。レイリー数 Ra 、輻射ガスの光学厚さ τ 、熱伝導と輻射伝熱の比を表す Pl 数等を様々に変化させることにより、輻射を伴う流れ場と熱伝達特性の詳細を調べた。

解析空間において、流れは二次元層流で、流体は連続で非圧縮であるとした。温度差によって生じる自然対流に対しては、温度による物性値の変化を密度のみに限定するブジネ近似を用いた。流体は灰色ガスと仮定した。本研究で用いた支配方程式（連続の式、ナビエ・ストークスの運動方程式、エネルギーの保存式）は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} &= 0 \\ \rho \left(U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial X} + \mu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \\ \rho \left(U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} \right) &= -\frac{\partial P}{\partial Y} + \mu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \rho g \beta (T - T_{ref}) \\ \rho C_p \left(U \frac{\partial T}{\partial X} + V \frac{\partial T}{\partial Y} \right) &= \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \right) - \text{div} \vec{q}_r \end{aligned}$$

上下壁における境界条件は、対流及び輻射によって出入りする熱流束の合計を 0 とすることによって断熱とした。プラントル数は $Pr=0.72$ とした。

本研究で用いた計算格子は 42×42 のスタッガード格子で、速度及び温度の離散化にはコントロールボリューム法を用い、対流項には高次の風上差分スキーム QUICK を用いた。また、圧力については連続の式を満足するように速度・圧力の補正を行う SIMPLE 法と PLDS 法を用いた。輻射熱流束の解析にはモンテカルロ法を用い、全てのガス要素及び壁面要素から、乱数によって決定された方向に多数のエネルギー束を放出し、乱数によって決定された到達距離に達するまで追跡し、統計的に輻射熱流束を決定した。速度場及び温度場の計算と輻射熱流束の計算を交互に行い、両方が収束に至るまで反復計算を行った。

3. 結果及び考察

Fig.2 に、 $Ra=5 \times 10^6$ 、 $Pr=0.02$ の時の種々の光学厚さ τ における解析結果を示す。各図は、上から順に $\tau=0.2$ 、 $\tau=1.0$ 、 $\tau=5.0$ の場合を示しており、各々左の図が等温線、右の図が流線を示している。等温線の分布を見ると分かるように、光学厚さ τ が大きくなる

Fig.2 Effect of optical thickness on isotherms and streamlines ($Ra=5 \times 10^6$, $Pr=0.02$)

につれて、空間中央部により明確な温度成層が形成されていることが分かる。これは、輻射の影響で高温壁近傍のガスから低温壁近傍のガスへの熱移動が盛んに行われたため、対流が増強されたためと考えられる。このことは、流線の分布にも表れており、光学厚さ τ が大きくなるにつれて、対流が強くなり、かつ空間全体に及んでいることが分かる。

Fig.3 に、中央断面における水平・垂直速度成分に対する光学厚さの影響を示した。壁近傍及び空間中心部において、両速度成分が輻射の影響によって増強されたことが分かる。特に、左右の両等温壁及び上下断熱壁近傍においては、強い速度勾配が形成されたことが判明した。光学厚さの薄いガスより、光学厚さの厚いガスの方が速度増大の程度が大きい

ことが明らかになった。また、上下壁近傍における輻射による水平速度の増加が、高、低温壁近傍における垂直速度の増加より程度が大きいことが分かる。

Fig.3 Velocity profiles on midplanes ($Ra=5 \times 10^6$, $Pl=0.02$)

熱伝達率に対する光学厚さ τ の影響を Fig.4 に示す。計算条件は $Ra=5 \times 10^6$ 、 $Pl=0.02$ とし、Yucel ら¹⁾の結果と比較した。この図から、輻射による熱流束が大きな割合を占め、光学厚さ τ が大きくなるにつれてヌセルト数が小さくなっていることが分かる。これは、光学厚さが大きい場合、高温壁からの輻射熱はすぐに壁近傍のガスに吸収されてしまうことが原因と考えられる。しかし、逆にガスからガスへ輻射によって伝わる熱量は大きくなっており、その結果、対流が促進され、光学厚さの影響は温度場より速度場に顕著に表れることが分かる。

Fig.4 Nusselt number on the hot wall

4. 結論

本研究において得られた結論をまとめると、以下のようになる。

- (1) ガス輻射が存在する場合、ガス輻射による盛んなエネルギー交換作用により、高温の領域が広がり、空間全体にわたって対流が強くなることが分かった。
- (2) 光学厚さが大きくなるにつれて、ガス輻射によるガスとガス間の熱移動が盛んになり、対流が強くなると同時に、空間中央の温度成層が明確になることが分かった。
- (3) 加熱壁における平均ヌセルト数は、輻射によって大きな影響を受けるが、光学厚さが増すにつれて、ヌセルト数はやや減少することが分かった。

5. 謝辞

本研究の一部は平成7年度喫煙科学研究財団の研究助成を受けた。記して謝意を表する。

6. 参考文献

- 1) Yucel A., Acharya S. and Williams M. L., Natural Convection and Radiation in a Square Enclosure, Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 15, 1989, pp. 261-278.