充てん層内の放射エネルギーの透過に及ぼす配列の 不規則性の影響* (二次元配列の場合)

工 藤 一 彦^{*1}, 谷 口 博^{*1}
金 鎔 模^{*2}, 三 好 克 彦^{*3}

Effects of Randomness of Arrangement on Radiative Energy Transmission Through Packed Bed (Two-Dimensional Arrangement)

Kazuhiko KUDO, Hiroshi TANIGUCHI,
Yong-Mo KIM, and Katsuhiko MIYOSHI

Radiative transfer through regularly/randomly-packed parallel columns is analysed by the Monte Carlo method. Profiles of circumferential energy inflow are obtained in each column. It is concluded that: (1) the profiles become more uniform for smaller wall emissivity and volume fraction of columns and larger irregularity of the arrangement, and this has the effect of increasing the radiative energy transmittance, and (2) as two-dimensional randomly-packed columns have many narrow passages which disturb the transmittance, the above-mentioned effect is cancelled, and the transmittance through randomly-packed columns is no larger than through regularly packed ones.

Key Words: Thermal Radiation, Numerical Analysis, Packed Bed, Transmittance, Arrangement, Randomness

1. 緒 言

真空中粒子層断熱, 宇宙基地用ドロップレットラジエータ, 流動層ボイラ, 微粉炭燃焼などの充てん層中の伝熱現象においては, 放射伝熱が重要な役割をなす。このような系での放射伝熱の解析のため, 規則的に配列された, 表面が鏡面⁽¹⁾あるいは乱反射面⁽²⁾の球数個で囲まれた微小空間(セル)を考え, このセルの放射エネルギー透過, 散乱, 吸収特性を求め, 充てん層をこのようなセルの集合と考えて, この単一セルの結果を積み重ねることにより充てん層の放射エネルギー透過特性を求めることが試みられたが, 実験値より1けた以上低い透過率しか得られなかった。また単一球の拡散入射光に対する光学的特性を積み重ねると, 実験値とよく合う透過特性が得られることがわかって⁽²⁾いる。前述のセルを用いた解析では, 規則配列における隣接球相互の位置と角度関係が解析の中に入っていたが, 後者の解析では均一な入射光にたいする単一

球の特性のみを用いており, これは隣接球との関係が平均をとると一様になる不規則配列の充てん層を取扱ったことになると考えられる。これらのことから, 充てん層中の放射エネルギーの透過現象には配列の規則性あるいは不規則性が大きな影響を有するものと考えられる。

本研究は, 結果が視覚的に理解しやすい二次元系で円(平行円柱に相当)を規則的あるいは不規則にならべ, その間の放射エネルギーの透過, 吸収, 散乱をモンテカルロ法によってシミュレートして放射の透過およびその障害の機構を調べ, これらに及ぼす配列の不規則性と円柱の光学的特性および充てん率の影響を明らかにするものである。より複雑な, 球の三次元配列充てん層での放射の透過特性解明の際には, 本報で明らかにされたような特性を持つ放射の透過機構に着目することで, 透過特性の物理的解釈が容易になる。

2. 解 析 モ デ ル

上記目的のためには, 同一径の円の規則的あるいは不規則的な配列の作成, これらの配列の不規則さのチェック, これらの配列中での放射エネルギーの透過, 吸収, 散乱のシミュレーションの三つを行う必要がある。

* 昭和63年6月3日 第25回伝熱シンポジウムにおいて講演, 原稿受付 昭和63年7月7日。

*¹ 正員, 北海道大学工学部 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)。

*² 北海道大学大学院。

*³ 北海道大学大型計算機センター。

円の規則配列は簡単で、千鳥配列をつくれば良い。不規則配列はそのつくりかたに2とおり考えられる。一つは最初に規則配列をつくり、これを乱して不規則配列をつくるもので、他の一つは、なんらかの方法ではじめから不規則配列をつくるものである。後者は大きさの点であれば、2個1組の乱数列をもちいて簡単に作成できるが、円の場合お互いの重なりを排し、かつ任意の充てん率の円の不規則配列を作成するのははなはだ困難である。これに対し前者の方法は、必要な充てん率の規則配列をつくり、各円を順に任意の方向に移動させ、他の円に衝突したら反射させて、各球ごとの全移動距離が各回の移動ごとに任意に設定した距離に達するまで移動させ、これを多数回繰返すことで不規則配列を実現するものである。なお、これらの球群の外部境界は、最初の規則配列を囲む長方形領域とし、その各辺は、その外部には同じ円配列の長方形領域が無限に存在している周期境界とする。図1、2に充てん率 $C=0.6$ の規則配列と不規則配列の例を示す。

配列の不規則さは、すべての円についての下記の動径分布関数 $G(R)^{(3)}$ の平均値を用いてチェックする。

$$N=4\pi R^2 dR N_0 \cdot G(R) \dots \dots \dots (1)$$

ここで N は、着目円の中心から $R \sim R+dR$ の距離の間に中心を有する円の個数、 N_0 は円の個数濃度である。よって、動径分布関数 $G(R)$ は、ある円の中心から R の距離のところに実際に存在する円の個数濃度の、平均個数濃度に対する比をあらわす。したがって、 $G(R)$ の各円についての平均値が R にかかわらず1であれば、円の配列が完全に不規則であるとみなすことができる。図3、4は、図1、2の配列に対する $G(R)$ の平均値の分布を求めたもので、規則配列に対する図3が遠方にいたるまで配列の規則性を保っているのに対し、図4では円の近傍を除きほぼ1となり、不規則であることが示されている。ちなみに $G(R)$ の1からの偏移の標準偏差 σ_G は、図3の規則配列での2.09に対し、図4の不規則配列では0.37と非常に小さくなっている。ここで D は円の直径である。

これらの配列中の放射エネルギーの透過シミュレー

図1 規則配列円柱 ($C=.6$) 図2 不規則配列円柱 ($C=.6$)

ションでは、図5~9のように、作成した配列の左側面から拡散光に相当する多数のエネルギー束を入射させ、モンテカルロ法によりこれらエネルギー束の各円表面での吸収と乱反射を追跡した。各図の上下の側面は反射壁とし、紙面に垂直方向には無限とした。

3. 解析結果と検討

図5~7に円柱表面放射率 ε が放射エネルギーの透過性に及ぼす影響を、充てん率 $C=0.6$ の規則配列について示す。ここでは、各2000本の放射エネルギー束を左方から入射させている。これから放射率が小さいほど、多重反射のため放射エネルギーの透過性が向上することがわかる。次に図6の充てん率を0.4に減らした場合の透過性を図8に示す。これより、充てん率を減少させると透過性が増加することがわかる。また図6の配列を不規則にしたときの放射エネルギーの透過性を図9に示す。これより配列を不規則にしても、透過深さは平均的にはあまり変化しないことがわかる。

次に充てん層中でのミクロ的な放射エネルギーの透過機構を調べるため、その充てん層と同じ充てん率の規則配列の平均透過方向の円ピッチを DY としたとき、各充てん層において入口から DY ずつ等間隔にとった各領域 (図10右上図の $N=1, 2, 3, \dots$) の中にある円の周囲への放射エネルギーの周方向の入射量分布の平均値を調べる。この入射量が各円の入口に面した部分で多ければ、入射した放射が入口側に反射で戻され

図3 動径分布関数分布 ($C=.6$, 規則配列)

図4 動径分布関数分布 ($C=.6$, 不規則配列)

で透過率が低下し、出口に面した部分で多ければ透過率を向上させる。図10は、図5と同じ放射率1の円の規則配列に対する分布で、縦軸は全入射量に対する周方向 $\pi/6$ 当たりの入射量の比をあらわす。第1層めは入射光が拡散光で広い角度から入射するので割合なだらかな分布をしている。これに対し2層めでは、1層めの円の間を抜けた放射のみが入射するので、非常に入口側 ($\theta=0$) にかたよった分布となる。これを以後コリメート作用と呼ぶ。第3層では、2層に当たらなかった放射が当たるので、入口側正面への入射は零となり、肩の部分のみに当たる。これを以後ストリーミング作用と呼ぶ。これより規則配列中では、入口側正面に入射するコリメートビームと、すきまを斜めに通過して円の側面に当たるストリーミングビームによって、放射が透過することがわかる。図11は図10の放射率を0.4に減少させたもので、多重反射により3層

め以降の入口側正面の入射量が図10のように零ではなく有限の値をとること、また $\theta=\pi/3, (2/3)\pi$ にストリーミング作用により極大値がでていることがわかる。また多重反射のため、第2層へのコリメートビーム入射による入口側の鋭いピーク状の分布も高さが減少している。さらに放射率を0.1まで減少させると、多重反射による入射量分布の均一化のため、図12のようになだらかな分布となる。図13は、図11の充てん率を0.7に増加させたもので、配列が密になったために図11の3層め以降のストリーミングビームによる側面への入射がなく、コリメートビームのみによる入口側に鋭いピークを有する分布を示す。このような場合には、放射エネルギーは非常に透過しにくくなる。

次に配列の不規則性の効果について調べる。図14、15は図11の配列を不規則にしたもので、図15は図4

図5 放射エネルギー束透過特性
($C=.6, \epsilon=1$, 規則配列)

図6 放射エネルギー束透過特性
($C=.6, \epsilon=.4$, 規則配列)

図7 放射エネルギー束透過特性
($C=.6, \epsilon=.1$, 規則配列)

図8 放射エネルギー束透過特性
($C=.4, \epsilon=.4$, 規則配列)

図9 放射エネルギー束透過特性
($C=.6, \epsilon=.4$, 不規則配列)

図10 放射エネルギー束入射量分布
($C=.6, \epsilon=1$, 規則配列)

図11 放射エネルギー束入射量分布
($C=.6, \epsilon=.4$, 規則配列)

図12 放射エネルギー束入射量分布
($C=.6, \epsilon=.1$, 規則配列)

 図 13 放射エネルギー束入射量分布
($C=0.7$, $\epsilon=0.4$, 規則配列)

 図 14 放射エネルギー束入射量分布
($C=0.6$, $\epsilon=0.4$, 若干不規則)

に示すようにほぼ不規則になっている。図 14 は 2 章の不規則配列作成手順で、各円の 1 回の移動距離を直径の 5 % と非常に短く制限したもので、若干規則性を残した不規則配列 (σ_0 が規則、完全不規則配列の間の値 0.48 を取る) である。図 11, 14 の比較より、不規則性が少し入るとコリメートビームの入射位置が左右にずれるため、第 2 層の分布高さが減少し、また斜め方向のストリーミングビームが寸断されて、第 3 層め以降の側面への入射が減少することがわかる。さらに不規則性を増加させた図 15 の結果では、3 層めを除き全般的に図 11 の規則配列より入口側の入射が少なく、側面側にずれた分布となり、配列の不規則性により出口側への散乱が増加することを示している。第 3 層めの入口側の入射量が図 11, 14, 15 と不規則性の増加に伴い増加するのは、1 層めの球のために量が少なかった 2 層めの球間からのコリメートビームが、配列の乱れによる 1, 2 層めの位相のずれのために強くなり、これが 3 層めの入口側に当たったものであり、入口付近の特殊現象である。なお図 13 のようなストリーミングのない充てん率の高い規則配列を乱すと、コリメートビームの当たる位置が左右にずれるので、図 16 のように入口側の入射量のピークが低くなる。なお上記の結果より不規則配列のほうが出口側への散乱が増大

 図 15 放射エネルギー束入射量分布
($C=0.6$, $\epsilon=0.4$, 不規則配列)

 図 16 放射エネルギー束入射量分布
($C=0.7$, $\epsilon=0.4$, 不規則配列)

することがわかったが、これにもかかわらず図 6, 9 のように規則配列と不規則配列で透過性があまり変化しないのは、二次元配列の場合、配列を不規則にすると上述のように円の側面に入射するストリーミングビームが減少するほか、図 9 に見られるように、円同志の接触により完全に透過を遮断してしまう部分が増加するためである。なお、三次元の球の配列では球の接触点の周囲には放射が透過できるすきまがあるため、特に充てん率が高いストリーミング作用の少ない範囲では、配列の不規則性により球周囲の入射エネルギー分布が規則配列のときより均一化し、出口側への散乱が増加するため、緒言に述べたように不規則配列の透過率が規則配列より大きくなるものと推察される。

4. 結 言

平行円柱群間の二次元放射エネルギー透過に関し、

- (1) 円柱周囲への放射エネルギー入射量分布は、壁面放射率小、充てん率小、不規則性大で均一化する。
- (2) 二次元不規則配列では、放射エネルギー透過のあい路となる狭い通路が各所にでき、上記の入射量分布の均一化による出口側への散乱増加の効果を打ち消す。

本研究を進めるにあたり豊橋技術科学大学の後藤圭司教授に不規則配列球の取扱いについてご教示いただいた。また本研究は昭和 62 年度科学研究費一般研究

(C) (62550140) の補助を受けたものである。ここに記して謝意を表する次第である。

52.

- (2) 工藤・ほか2名, 機械の研究, 39-1 (昭62), 211.
- (3) 戸田・ほか3名, 液体の構造, (昭51), 32, 岩波.

文 献

- (1) Chan, C. K. and Tien, C. L. *J. Heat Transf.*, 96 (1974),
-