

# 球状粒子充填層内のガス流速分布

秋山 友宏\*      八木順一郎\*

Distribution of Gas Flow Rate in a Packed Bed of Spherical Particles.

By Tomohiro AKIYAMA and Jun-ichiro YAGI.

A numerical study was conducted for the distribution of the gas flow rate in a packed bed of spherical particles. Radial distribution of voidage in a packed bed, which was an important factor for nonuniform gas flow, was expressed as an empirical equation using the ratio of bed diameter,  $D$ , to particle diameter,  $d$ . Gas flow rate in a packed bed and in a free board was simulated under the calculated conditions of various  $D/d$  ratios and particle Reynolds numbers. Computed results compared favorably with the available experimental data.

These results revealed that the maldistribution of gas flow near a wall increased significantly with a decrease in the  $D/d$  ratio and caused reduction in the averaged Nusselt number.

(Received June 13, 1990)

**Keywords :** gas flow, packed bed, wall effect, voidage, Ergun's equation, Nusselt number, power law scheme, staggered grid, SIMPLE algorithm.

## 1. 緒 言

充填層プロセスはその伝熱効率の高さから製鉄業、化学工業においてしばしば使用されているが、最近では省エネルギーの観点から相変化物質 (PCM) を封入した球カプセル潜熱蓄熱充填層プロセス<sup>1)</sup> が注目され、500K 以上の工業廃熱の回収を目的とした高融点 PCM<sup>2)</sup> の報告がなされている。充填層の伝熱解析に必要な粒子・流体間の熱伝達係数は固定層においてかなりの測定結果が報告されているが、実際のプロセス解析においては既報の推算式による値は大きすぎて不適当<sup>3)</sup> な場合が多い。この原因を明らかにするために粒子周辺のガス流れや偏流の影響を詳細に検討する必要性<sup>4)</sup> が指摘されている。

通常、充填層内のガス流れは半径方向に均一を仮定している。しかしながら、厳密には壁付近の空間率が大きくなるためにガスの偏流が生じていると考えられる。小規模な充填層プロセスにおいてはその影響が無視できない可能性がある。一般に、均一粒径の粒子からなる充填層においては反応管径  $D$  と粒子径  $d$  の比が10以上になると空間率分布の影響は無視できる<sup>5)</sup> とされているが、充填層内部でのガス流速の直接測定は困難であるためガス流速分布が半径方向で均一であるかどうかは定かではない。

ガス流速の半径方向分布をはじめて指摘したのは Smith ら<sup>6)</sup> である。彼らは充填層の出口からやや離れた下流部で熱線流速計を用いてガス流速分布を測定した。その結果、半径方向のガス流速分布は壁からやや離れた位置に最大値をとった。これに対して、久保田ら<sup>7)</sup> は充填層内の流速と出口下流部における流速とは異なっていると仮定し、半径方向に空間率分布の異なる3つの充填層を作成し出口におけるガス流速分布の測定結果から、間接的に両者は異なっていることを

説明した。

近年、コンピュータによる数値計算技術の発展により、測定が困難な状況においてプロセス解析の有力な手段として数値流体力学（CFD）が脚光を浴びている。本報では  $D/d$  および  $Re_p$  数を変化させ、半径方向に空間率分布を持つ充填層内部のガス流速分布の数値計算をおこない、壁近傍における偏流現象の検討を行った。また、充填層および Free Board でのガス流れシミュレーションを行い既報告の測定値と比較することにより数値計算の妥当性を確認した。

## 2. 基礎方程式と数値解析

対象とした充填層を Fig. 1 に示す。数値実験は室温下で直径  $D$ 、高さ  $10D$  の充填層に空気が下部から吹き込まれることを想定した。管内の流れが定常、非圧縮、層流、軸対象であるとするれば  $(x, r)$  方向の速度成分を  $(u, v)$  として、連続の式、運動方程式は円柱座標系で次の保存式と Table 1 により表される。

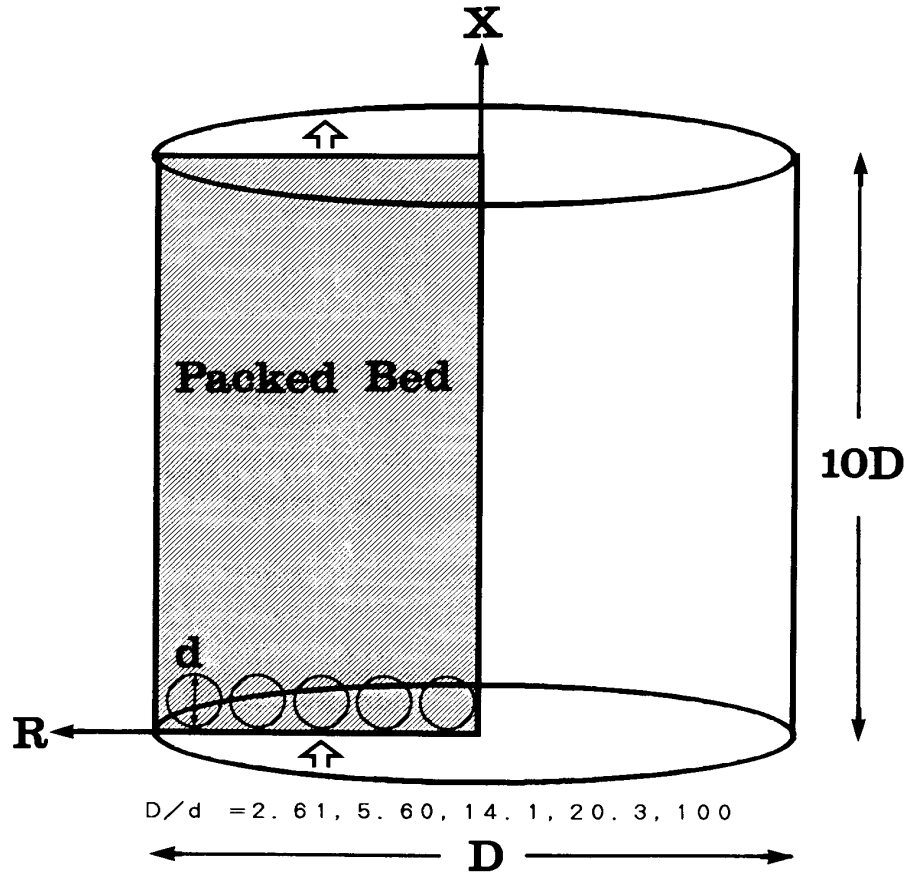


Fig. 1 Simulation model for a packed bed of spherical particles.

Table 1  $\phi$ ,  $\Gamma$  and  $S$  in the conservation equation.

| Equation      | $\phi$ | $\Gamma$ | $S$  |
|---------------|--------|----------|--|
| Continuity    | 1      | 0        | 0  |
| $x$ -momentum | $u$    | $\mu$    | $-\partial p / \partial x - (f_1 + f_2  u ) u$               |
| $r$ -momentum | $v$    | $\mu$    | $-\partial p / \partial r - \mu v / r^2 - (f_1 + f_2  v ) v$ |

$$f_1 = 150 (1 - \epsilon)^2 \mu / \rho d^2 \epsilon^3, \quad f_2 = 1.75 (1 - \epsilon) / \rho d \epsilon^3$$

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v \phi)}{\partial r} = \frac{\partial(\Gamma \partial \phi / \partial x)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \Gamma \partial \phi / \partial r)}{\partial r} + S \quad (1)$$

充填層内の圧力損失は空間率の大きさにかかわらず2次元に拡張した Ergun 式<sup>8)</sup>が適用できると仮定した。また、収束性を考慮して $\phi$ に関して次のように線形化して計算を行った。

$$S = S^* + (dS/d\phi)^* (\phi - \phi^*) = -f_2 \phi^{*2} + (f_1 + 2f_2 \phi) \phi \quad (2)$$

基礎方程式を離散化する際の一般的方法としては、テラー級数展開を用いるものがよく知られているが、近年コントロール・ボリューム法により厳密に物質バランスを保ち離散化を行った解析が数多く報告されるようになった。ここでは Patankar の著書<sup>9)</sup>を参考にして(1)式をコントロール・ボリューム法で離散化し、スッタガード格子、対流・拡散項にはべき乗法 (Power Law scheme)、圧力補正には SIMPLE 法を採用した。収束計算は上流から下流に向かって行い、 $u, v, p$  の残差が規定値内に収束した値を解とした。

速度の境界条件として流入部では一定速度、壁面では Non-Slip 条件 ( $u = v = 0$ )、流出部では半径方向の速度を零とした。計算に使用した円柱左半断面のコントロール・ボリュームを Fig. 2 に示す。通常は等間隔メッシュ A) ( $33 \times 53$ ) を使用したが、急激にガス流れが変化する条件 (後述のケース C および D) では計算が発散してしまうためにガス入口付近で密な等比間隔のメッシュ B) ( $53 \times 53$ ) を用いる必要があった。

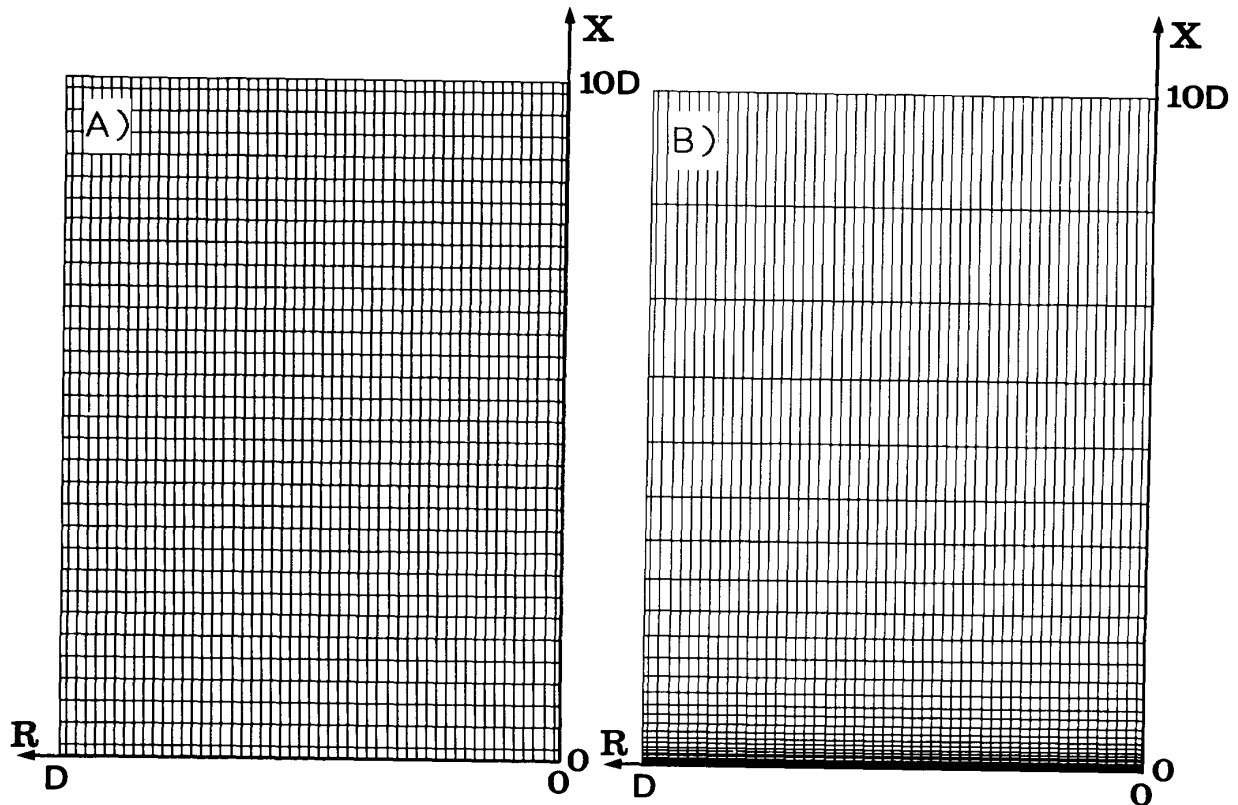


Fig. 2 Control volumes (A :  $33 \times 53$ ), (B :  $53 \times 53$ ).

### 3. 充填層内の空間率分布

均一粒子の充填層内における空間率  $\varepsilon$  の半径方向分布に関しては、いくつかの研究が報告されている。しかしながら、いずれの結果も壁から半粒子径程度のところまでは中心部に比べかなり大きな空間率になっているが、それより内側ではほとんど中心部の空間率に等しいことを示している。本研究においては、Fig. 3 に示す Benenatti<sup>10)</sup> らの測定結果に基づき、Fig. 4 に示す半径

方向の空間率分布を数値データとして与え計算を行った。計算条件を Table 2 に示す。また、空間率分布の他に流速の影響をみるために  $Re_p = 100$  と  $1000$  の 2 ケースに関して計算を試みた。比較のためにケース E の  $D/d = 100$  では均一空間率  $0.4$  と仮定した。

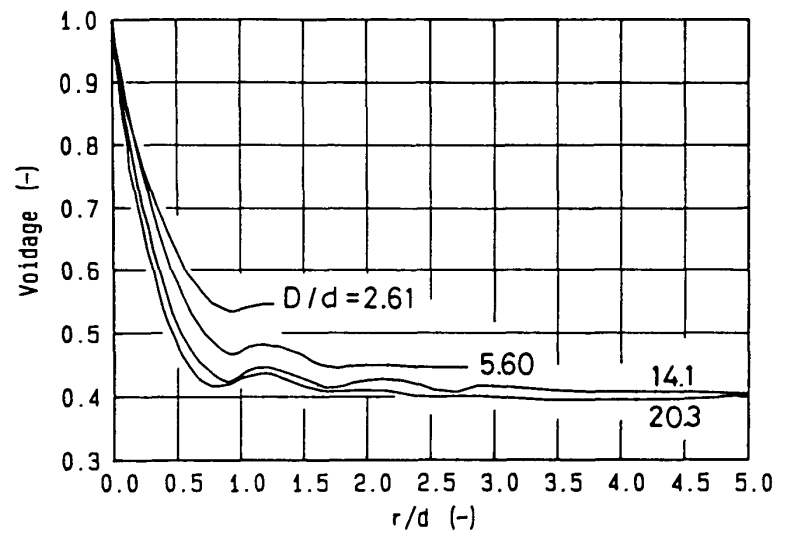


Fig. 3 Voidage in a packed bed of uniform sphere  $D/d = 2.61$ , 5.60, 14.1 and 20.3.

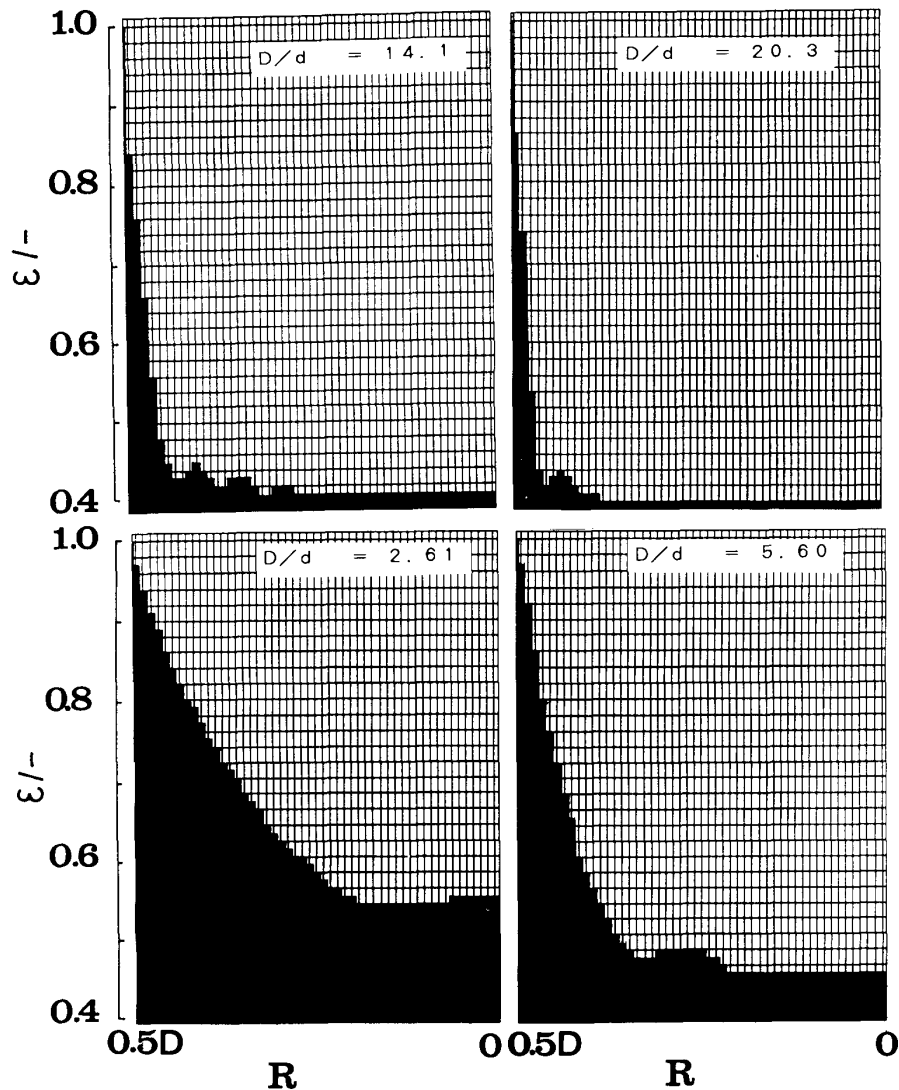


Fig. 4 Radial distribution of voidage used for calculation.

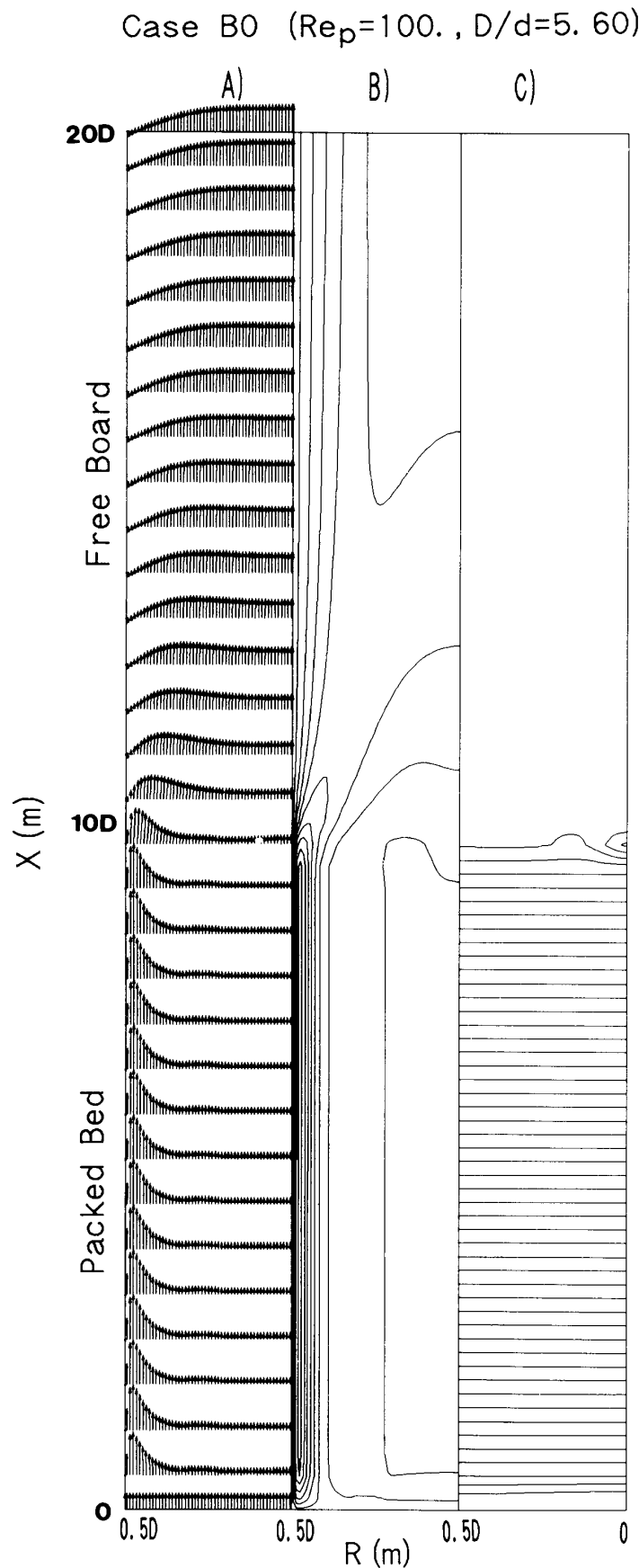


Fig. 5 Computed gas velocity vectors (A), constant velocity contours (B) and isobars (C) for case B0.

Table 2 Calculating conditions.

| $D/d$ | $Re_p=100$ | $Re_p=1000$ |
|-------|------------|-------------|
| 2.61  | Case A-0   | Case A-1    |
| 5.60  | Case B-0   | Case B-1    |
| 14.1  | Case C-0   | Case C-1    |
| 20.3  | Case D-0   | Case D-1    |
| 100   | Case E-0   | Case E-1    |

#### 4. 結果および考察

##### 4・1 充填層下流でのガス流速分布の遷移

計算条件ケース B0 は久保田の実験条件<sup>7)</sup>と同一である。彼らは層頂部から  $1.05D$  離れた位置でガス流速を測定した。数値計算は高さ  $10D$  の充填層に引き続き長さ  $10D$  の Free Board を設定し計算をおこなった。得られた流速ベクトル, 等流速線および等圧線図を Fig. 5 に示す。等流速線および等圧線の刻みはいずれも等間隔とした。等流速で流入したガスは壁付近に曲げられ, 層上部では壁付近に最大値を持つ十分に発達した流れとなっている。層頂部付近では端末効果のためにわずかに流速分布に変化がみられる。引き続く Free Board では最大流速の位置が壁から中心部へと移行し放物形の中心流へとしだいに遷移している。

Fig. 6 は充填層出口からの位置と半径方向のガス流速分布の関係を示している。同図には  $1.05D$  の位置で測定した実験データ<sup>7)</sup>も併示しており計算結果と良好な一致を示している。これは Free Board での流速計算の精度を示すとともに, 本数値解析が充填層内部の流動シミュレーションに有効であることを示唆している。充填層内部と Free Board における

流速ベクトルを比較すると、Free Boardでの流速分布は充填層内部における流速分布と大きく異なり、充填層の壁近傍で発達した流れが中心流へと移行している。Smithら<sup>6)</sup>の測定した流速分布は壁面から1～2粒子離れた位置に最大値があった。この測定結果はFig. 6においては充填層出口から $D$ および $2D$ 離れた位置における流速分布とよく一致している。(充填層出口直後での流速測定は乱れが生じ測定困難であった)

#### 4・2 $D/d$ が異なる充填層内でのガス流れ

ケースB0と $D/d$ が異なるケースA0, Fig. 6 Gas flow patterns of outcoming gas from a packed bed for case B0. C0, D0, E0の計算結果をFigs. 7～10に示す。いずれもケースB0と同様に壁付近に流速の最大値があり、出口では十分に発達した流れとなっている。層頂部における半径方向のガス流速分布を図11に示す。 $D/d$ が大きいほどガス流速最大の位置は壁方向に移動している。これは $D/d$ が大きいほど空間率が高くなる領域が壁面に移動するためと考えられる。

#### 4・3 $Re_p$ 数が異なる場合の流速分布の比較

$Re_p$  数1000の場合の各ケースでの層頂部における半径方向のガス流速分布をFig. 12に示す。Fig. 11と比べガス流速の最大値はさらに壁付近に移行し、中心流速が低下し偏流の度合いが強くなっている。この傾向は特にケースA, Bの場合に顕著に表われた。これは流速の増大により壁における粘性の効果が相対的に小さくなり、壁付近での流速が増大したと考えられる。

通常、充填層内のガス流速はピストンフローで半径方向に均一流速が仮定される場合が多い。Figs. 11, 12より $D/d$ が10以上であるケースC(14.1)とD(20.3)では確かに壁付近を除いて流れが均一であることから、壁付近を無視すれば数学的モデルにおいてピストンフローの仮定は妥当であるといえる。等流速の領域は各ケースによって異なりおよそ次の通りであった。

ケースAの場合,  $r/R < 0.4$

ケースBの場合,  $r/R < 0.7$

ケースC, Dの場合,  $r/R < 0.9$

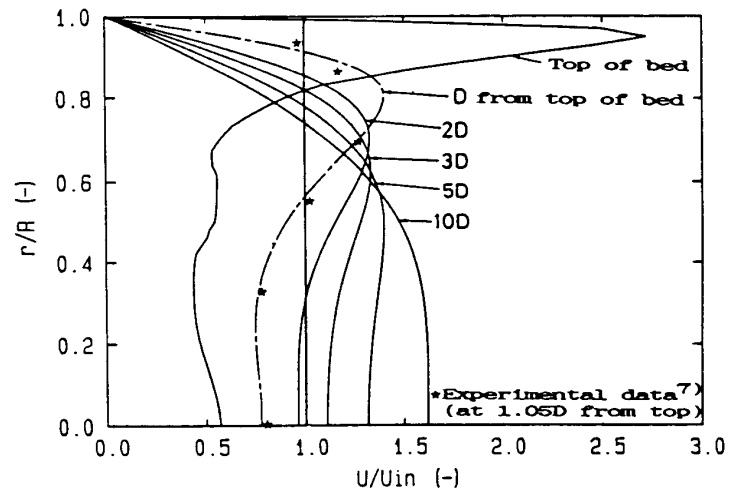
等流速領域はケースA, Bで $Re_p$ 数によりわずかに変化した。ケースC, Dでは無視できるほど小さな変化であった。壁付近での偏流は相対的に面積が大きいので中心部での流速の低下を引き起こす。Fig. 13は各ケースにおける中心部での流速を示したもののだが、 $Re_p$ 数が大きく、 $D/d$ が小さい場合に偏流が促進されている。 $D/d$ が20.3と大きいケースDの場合でも、中心流速は約73%程度まで減少した。この時の中心流速の $Re_p$ 数依存性は無視できるほど小さかった。

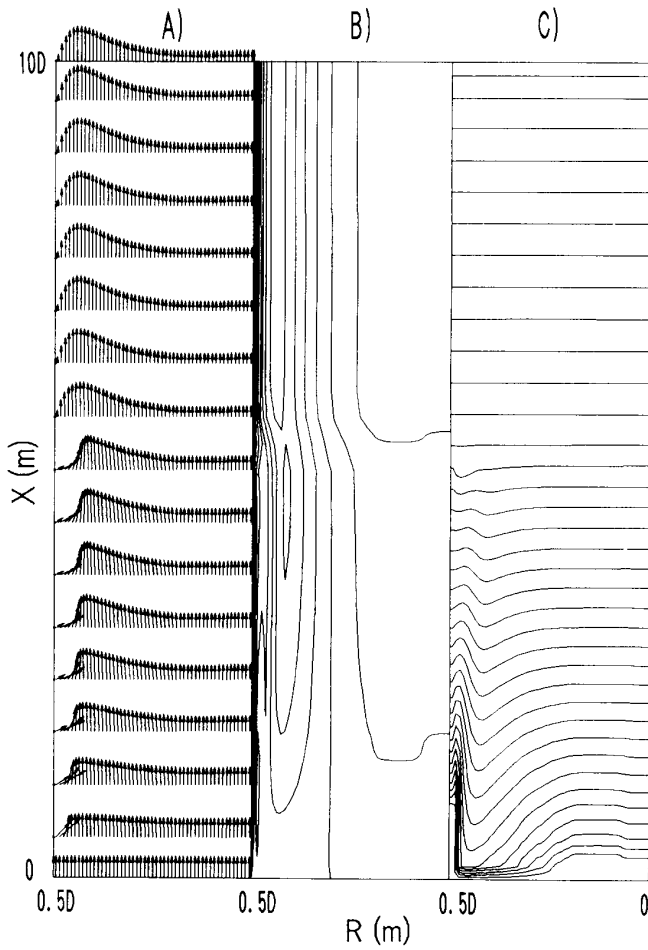
#### 4・4 ガスの偏流が $Nu$ 数におよぼす影響

壁付近のガスの偏流による中心流速の低下が伝熱現象に及ぼす影響を検討した。充填層における気体固体間の熱伝達係数の推算には、通常、次に示すRanz<sup>11)</sup>の式を用いる場合が多い。

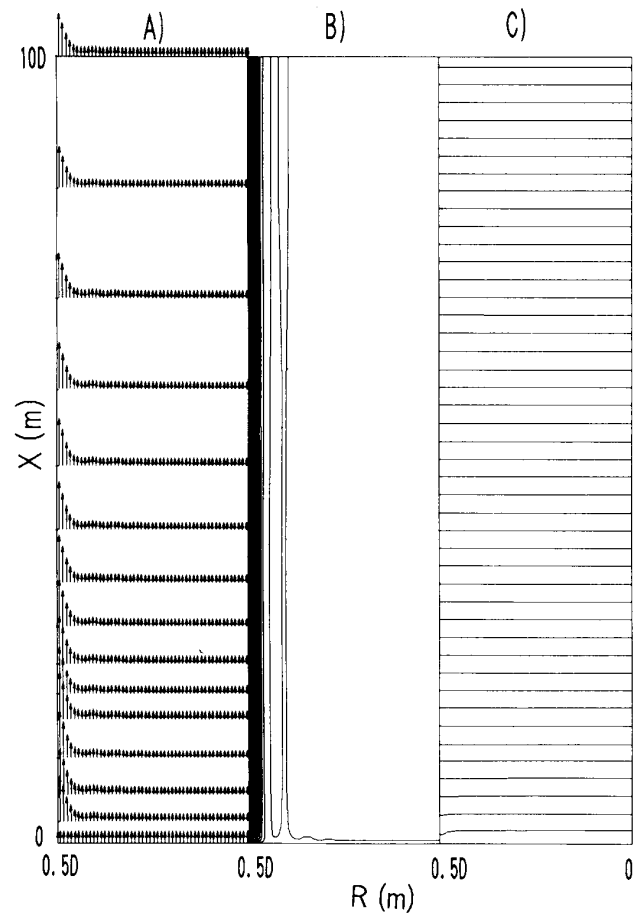
$$Nu = 2.0 + 1.8 Pr^{1/3} Re_p^{1/2} \quad (3)$$

上記の4・3の数値シミュレーションの結果より判断して、 $D/d$ が20程度でレイノルズ数が73

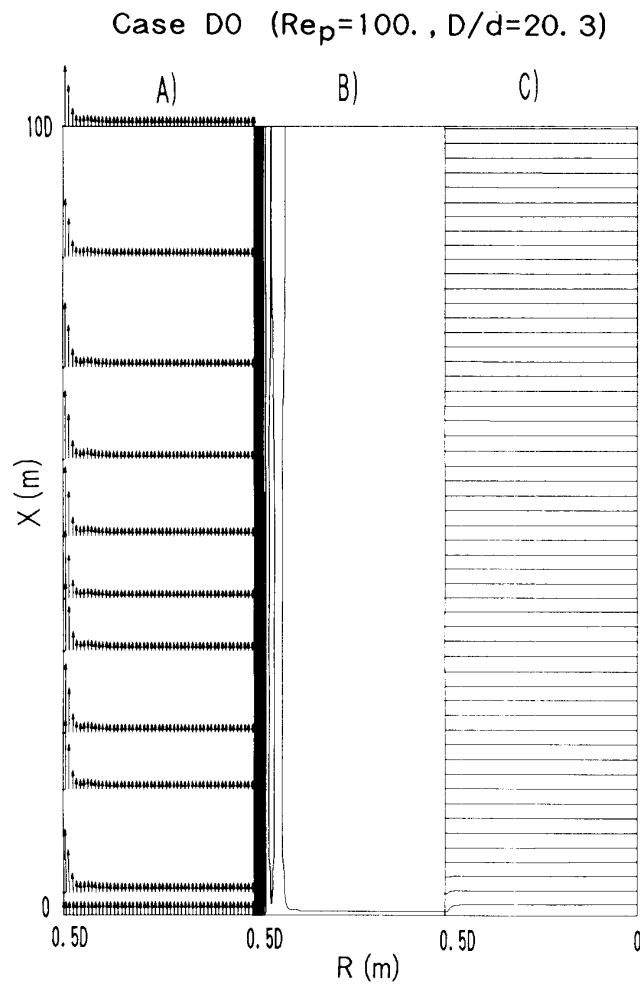


Case A0 ( $Re_p=100.$ ,  $D/d=2.61$ )

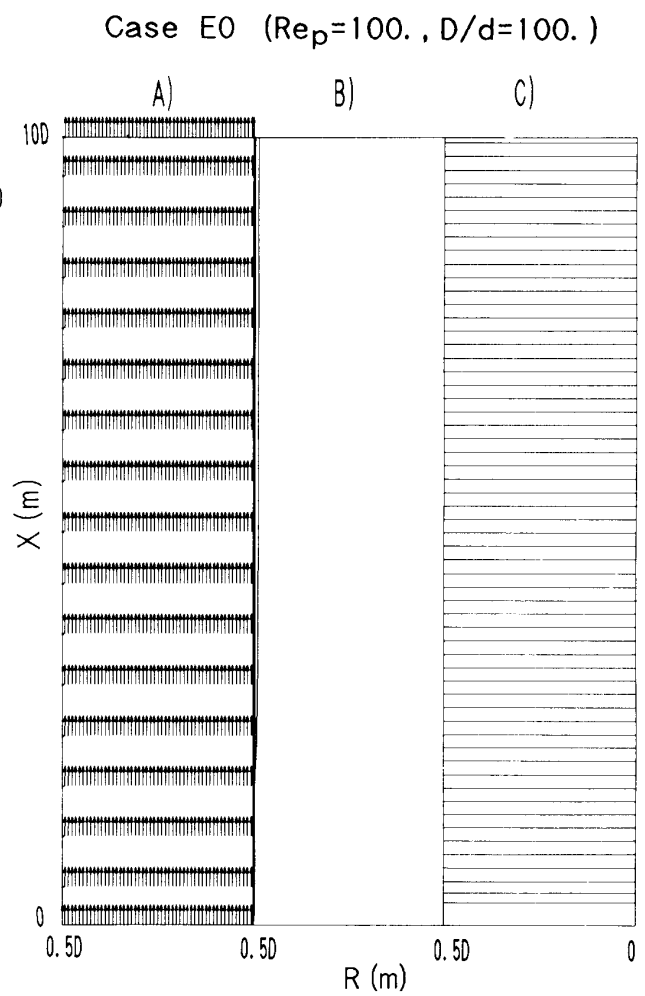
**Fig. 7** Computed gas velocity vectors (A), constant velocity contours (B) and isobars (C) for case A0.

Case C0 ( $Re_p=100.$ ,  $D/d=14.1$ )

**Fig. 8** Computed gas velocity vectors (A), constant velocity contours (B) and isobars (C) for case C0.



**Fig.9** Computed gas velocity vectors (A), constant velocity contours (B) and isobars (C) for case D0.



**Fig.10** Computed gas velocity vectors (A), constant velocity contours (B) and isobars (C) for case E0.

%に減少すると仮定すると, 空気 ( $Pr = 0.71$ ) で  $Re_p$  数1000の場合, (3) 式より  $Nu$  数を計算すると53から45へと低下し, およそ伝熱速度は14%程度減少することになる. したがって, 壁付近のガスの偏流がないと仮定して伝熱解析において (3) 式を使用すると, 計算値と実測値の間に不一致が生じることになる. この誤差は  $D/d$  が小さくなるほど増大することが予想できる.

一方, 高炉内の伝熱解析では Ranz 式による  $Nu$  数を10ないし20%程度に低下させなければ炉内現象を説明できない場合<sup>12)</sup> が多い. この現象は高炉においては  $D/d$  が十分に大きいと考えられるので壁付近における偏流の影響だけでは説明がつかない. この原因として以下の事が考えられる. (3) 式は最密充填構造 (空間率0.26) を仮定してガスは空塔の9倍の速度で粒子の回りを流れ個々の粒子に有効に熱が伝わると仮定して導出された半経験式である. しかし, 実際の充填層プロセスでは最密充填ではなく空間率0.38から0.44程度であり, 粒子周囲のガスの流動・伝熱状況が最密充填構造と大きく異なっていると考えられる. たとえば, 最密充填ではなくガス流れ方向の同一直線上に粒子が配列された充填構造の場合, 下流側の粒子は上流側の粒子の影響で粒子回りの平均  $Nu$  数がかなり低下することが予想される<sup>4)</sup>.

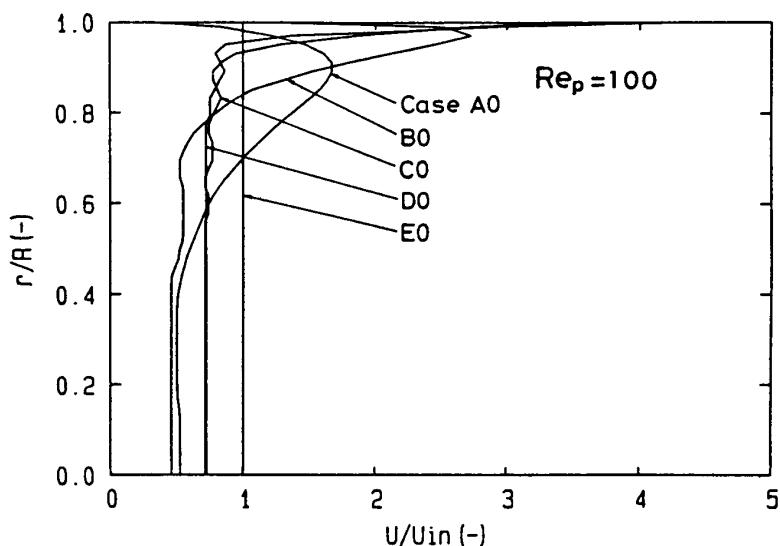


Fig.11 Radial distribution of gas flow rate in a packed bed for  $Re_p = 100$ .

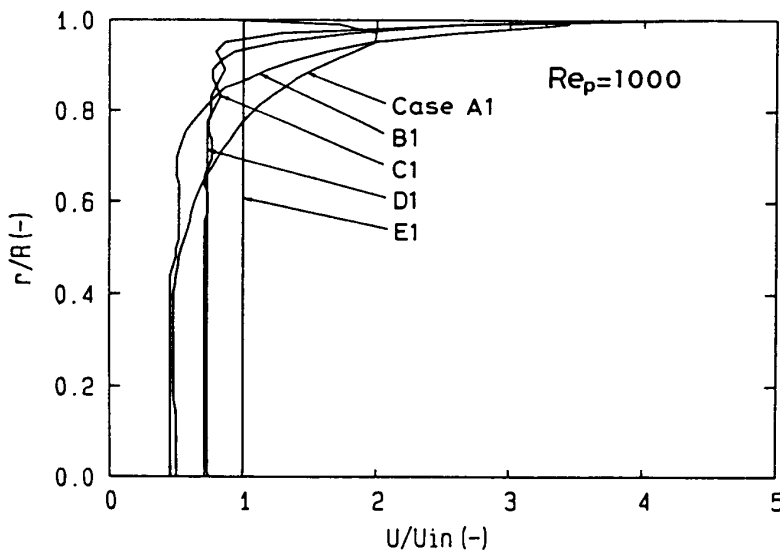


Fig.12 Radial distribution of gas flow rate in a packed bed for  $Re_p = 1000$ .

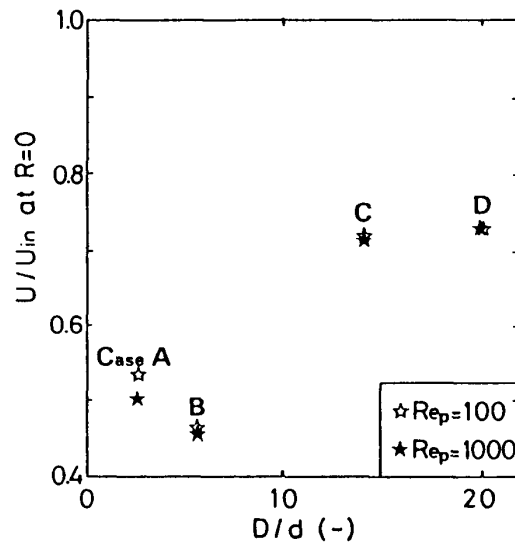


Fig.13 Gas velocity at the center.

## 5. 結 言

充填層内のガス流速分布は伝熱解析を行う場合極めて重要となる．壁付近のガスの偏流現象を解明するため，均一粒子充填層において  $D/d$  と  $Re_p$  数をパラメータとして半径方向の空間率分布が異なる充填層内の流動数値シミュレーションを行った．結果として以下の事項が明らかになった．

- 1) 充填層内のガス流れは壁付近に偏流が存在し，充填層の出口下流部におけるガス流速分布とは異なっている．
- 2)  $D/d = 10 \sim 20$  では壁付近を除き  $r/R < 0.9$  の範囲で均一流れと見なせるが，壁付近の偏流のため流速は流入速度に比べ7割程度にまで減少する．
- 3)  $Re_p$  数が増大すると  $D/d$  が10以下の場合は顕著に壁での偏流が促進されるが，10以上の場合はその影響は小さい．

最後に，本研究をまとめるにあたり（株）神戸製鋼所柴田耕一朗氏および当所高橋礼二郎助教授に有意義な御討論をして頂いた．また，本研究の一部は財団法人谷川熱技術振興基金「潜熱・反応熱を利用する蓄熱充填層の伝熱特性」（研究責任者八木順一郎）によった．ここに記して謝意を表する．

## 記 号

$D$ ：反応管径（m）

$d$ ：粒子径（m）

$f_1, f_2$ ：Ergun 式における抵抗係数

$Nu$ ：ヌッセルト数（-）

$Pr$ ：プラントル数（-）

$Re_p$ ：粒子径基準のレイノルズ数（-）

$S$ ：生成項

$r$ ：半径方向距離（m）

$u$ ：x 成分空塔速度（ $\text{ms}^{-1}$ ）

$v$ ：r 成分空塔速度（ $\text{ms}^{-1}$ ）

$x$ ：軸方向距離（m）

$\Gamma$ : 拡散係数

$\varepsilon$ : 空間率 (—)

$\mu$ : ガス粘度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )

$\rho$ : ガス密度 ( $\text{kgm}^{-3}$ )

$\phi$ : 従属変数

上付き \* : 推定値あるいは一つ前の反復値

## 文 献

- 1) 斉藤武雄, 広瀬宏一: 日本機械学会論文集, **51B** (1985), 1867.
- 2) 秋山友宏, 芦沢芳夫, 八木順一郎: 日本機械学会論文集 (印刷中)
- 3) 秋山友宏, 芦沢芳夫, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 東北大学選研彙報, **44** (1988), 191.
- 4) 秋山友宏, 高橋礼二郎, 八木順一郎: 鉄と鋼, **76** (1990), 848.
- 5) 日本金属学会編: 金属製錬反応速度, (1972), 57, 日本金属学会.
- 6) Schwartz, C.E.; Smith, J.M.: Ind. Eng. Chem., **45** (1953), 1209.
- 7) 久保田宏, 池田 稔, 西村靖彦: 化学工学, **29** (1965), 611.
- 8) Ergun, S.: Chem. Eng. Progr., **48** (1952), 89.
- 9) Patankar, S.V.: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow* (1980), McGrawHill, New York.
- 10) Benenatti, B.F.; Brosilow, C.B.: A.I.Ch.E.J., **8** (1962), 359.
- 11) Ranz, W.E.: Chem. Eng. Progr., **48** (1952), 247.
- 12) 羽田野道春, 栗田興一: 鉄と鋼, **66** (1980), 1898.