

浅層流動層伝熱に及ぼす流動粒子の影響

加藤 泰生*・宮本 政英*

The Effects of Particle Behavior on the Heat Transfer of a Shallow Fluidized Bed

Yasuo KATOH and Masahide MIYAMOTO

Abstract

In order to clarify the correlation of heat transfer and particle behavior around the tube surface, surface temperature and particle volume-fraction coming to contact with the tube surface were measured simultaneously by using thermocouples and a fiber optical probe at 5 locations around a heated tube surface. The fiber optical probe had two rods, one was connected to a light emitting diode(LED) and the other was connected to a photo-cell, which were separated from each other by a distance of 4mm, and this distance was chose to be about 10 times the mean particle diameter of 0.40mm. Experimental results show the local heat transfer rate closely depends on the particle volume-fraction and the particle residential time. The located angle of its maximum shifts from 135° to 120°, this being measured from a stagnation point, as the fluidized gas velocity increases.

1. 緒 言

流動層内水平円管群の熱伝達特性はその伝熱管周りの粒子の挙動に深く関わっていることはすでによく知られている [1]。そして伝熱管群がフリーボード域に配置された場合の熱伝達率と粒子挙動との関連を調べた研究例もいくつかある [2] [3]。ところで今までに実測された各列の管周平均熱伝達率 H_x は静止層高 L_c が比較的高い場合、空塔速度の増加に伴い一度極大値を示した後徐々に減少する傾向にある。この原因を管頂部近傍での粒子の堆積、滞留あるいは管周りの粒子の希薄化あるいは接触時間との関連で議論しているが、いまだ十分であるとは思われない。本報は、まずそれらを検証する第一歩として局所熱伝達率と管周りの粒子挙動の同時測定を行ない伝熱に及ぼす流動粒子の影響を調べ検討したものである。

2. 実験装置及び測定方法

実験装置試験部の概略を Fig. 1 に示す。測定部は $400 \times 400 \text{mm}$ の正方断面流路を有している。伝熱管群は、径 $D=34 \text{mm}$ 、垂直ピッチ $P_v=68 \text{mm}$ 、水平ピッチ $P_h=78 \text{mm}$ 、2列の千鳥配列とし、分散板から第1列管中心線までの距離 $X_1=150 \text{mm}$ である。各列5本のうち中央部の3本を実際の加熱管とし、厚さ $30 \mu\text{m}$ のステンレスホイルを螺旋上に貼付け通電加熱している。測定管に関しては、特に今回は局所熱伝達率とそれに対応する管周り粒子挙動の測定のために2列目中央管を選び、Fig. 2 に示すように管表面温度に関しては径 0.1mm のC-C熱電対を前方淀み点から管頂部まで一方 15° 毎に比較的密に、他方 45° 毎に疎に計16本埋め込んで使用し、管周りの粒子挙動に関しては、既報 [4] の送受光径 2mm 、光軸間 4mm の透過光型粒子濃度検出プローブ（以下光プローブと称す）を前方淀み点から管頂部まで 45° 間隔に5ヶ所で使用し、そしてそれら温度・粒子挙動は対応する位置で同時に測定、処理された。それらのデータは時系列変化をみるために1デー

*機械工学科

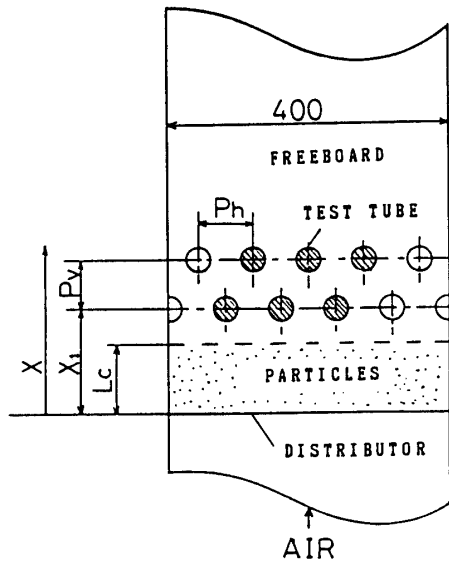


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

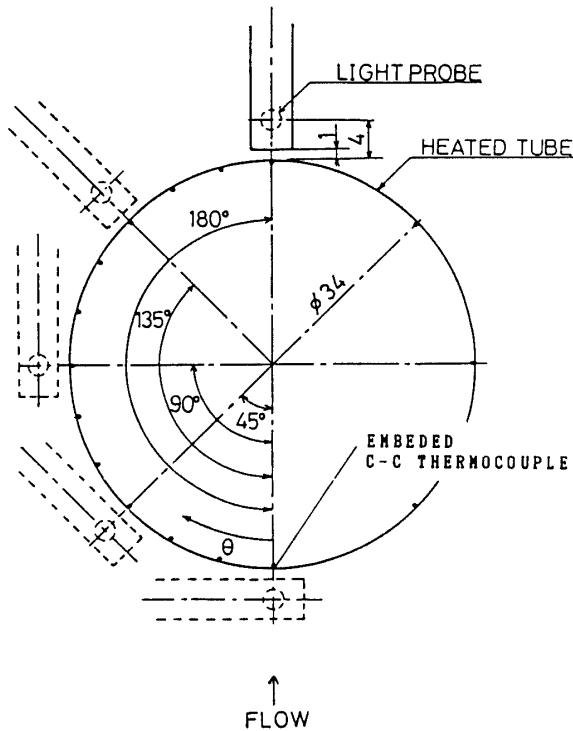
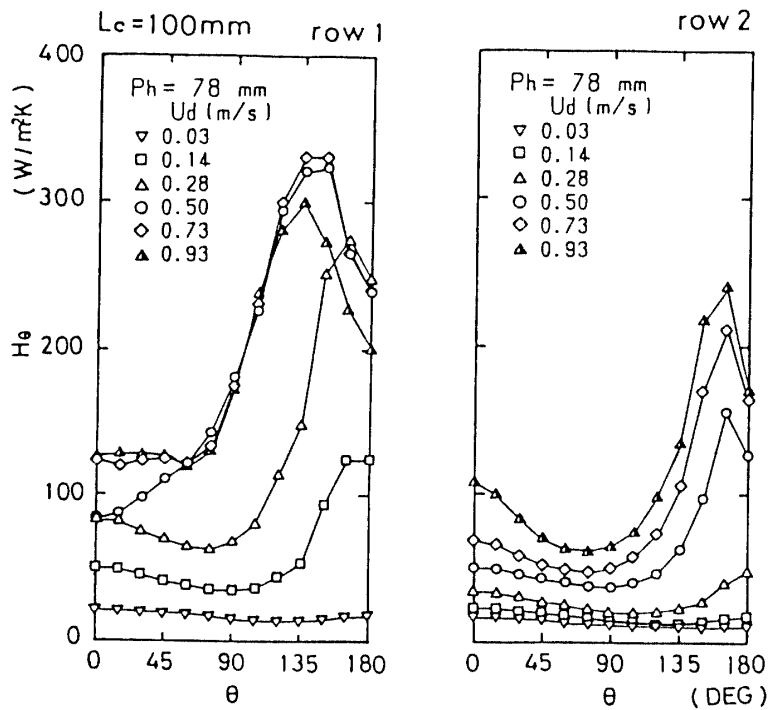


Fig. 2 Locations of thermocouple and optical probe

タにつきそれぞれサンプリング周期10msec, サンプリング個数約2000個用いられた. そのほか層温度の測定は流路中央の分散板上 $X=90\text{mm}$ の位置にある外径 2.2mm のシーブ熱電対を用い, また流動粒子は平均粒子径 $d_p=0.40\text{mm}$ のケイ砂 (最小流動化速度 $U_{mf}=0.13\text{m/s}$) を用いた. このため今回は先の光軸間距離を粒子径の10倍程にして 4mm と置いている. 実験は静止層高 L_c , 空塔速度 U_0 を種々変化させて行なった.

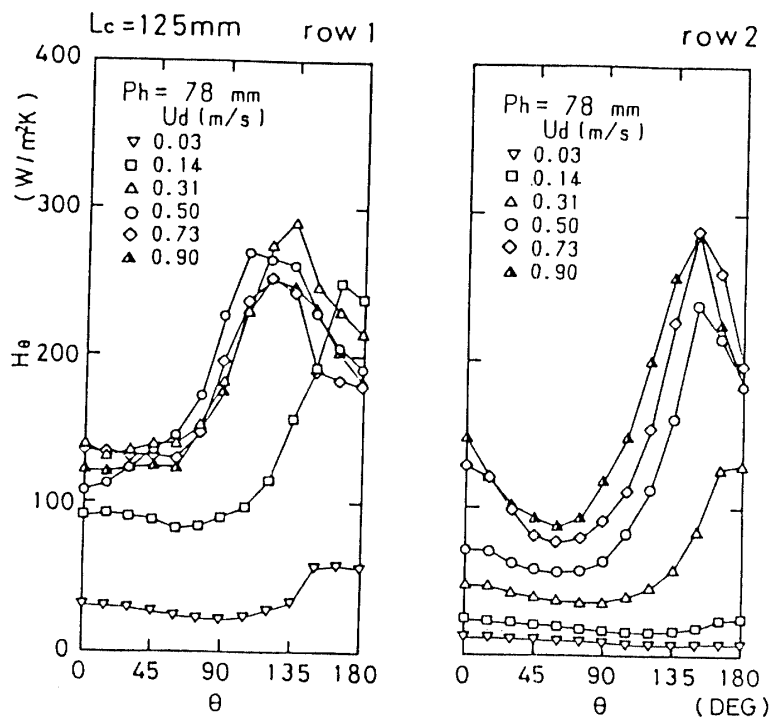
3. 実験結果及び考察

Fig. 3 a, b, c に $L_c=100, 125, 150\text{mm}$ の場合の各列の管周方向局所熱伝達率 H_θ と速度 U_d の関係を示す. 図 a は $L_c=100\text{mm}$ の場合のものである. 1, 2 列共に U_d が増加するにつれて熱伝達率が増加しており特に管上方部での増加は著しい. にもかかわらず管頂部付近に熱伝達率の低下がみられ, これは管頂部付近に粒子が堆積しそれによって新たな粒子との熱交換が阻害されるためと思われる. また1列目において管周方向局所熱伝達率の極大値を示す位置は U_d が低い時は $\theta=180^\circ\sim 165^\circ$ 付近にあるものの, U_d の増加とともに $\theta=135^\circ$ 近傍へ移動している. またそれと同時に管周方向局所熱伝達率が相対的に低い領域が管頂部から徐々に広がっており, これは U_d の増加に伴う粒子の落下抑制のため堆積する範囲が広がって, 粒子と伝熱面間の活発な接触が妨げられるためと思われる. ただしその範囲にあっても, 粒子の堆積した高さがある高さを超えたと思われる時は局所熱伝達率も高く極大値を示す. このように極大値を示す位置が現われるのは, 堆積していたいまだ熱交換をしていない上層の粒子が, その位置へゆっくりとした速さで滑り落ち, そこでの粒子と管壁との接触時間が適切な間隔であるために, 良好な熱交換が行なわれたためだと思われる. また興味あるのは2列目において U_d が高い時, 前方淀み点付近で高い熱伝達率をとることである. これは1列管群間を流動粒子が通り抜ける際, 管径による流路断面積の減少 (絞り) により加速噴流となり, それが前方淀み点付近に直接ぶつかるためと思われる. 図 b は $L_c=125\text{mm}$ の場合である. どちらも1列目において U_d が高い時, 管周方向局所熱伝達率の極大値を示す位置が $\theta=120^\circ$ 付近にありほぼ同様な局所熱伝達率の分布形状を示している. また2列目においては流速による管周方向局所熱伝達率の極大値を示す位置の前方淀み点方向への若干の移動がみられる. 図 c は $L_c=150\text{mm}$ の場合である. 1列目の管高さが $X_1=150\text{mm}$ であるので最初から1列目は砂粒子の中に埋もれている. 1列目



(a) $L_c=100$ mm

Fig. 3 (a) Local heat transfer coefficient distributions



(b) $L_c=125$ mm

Fig. 3 (b) Local heat transfer coefficient distributions

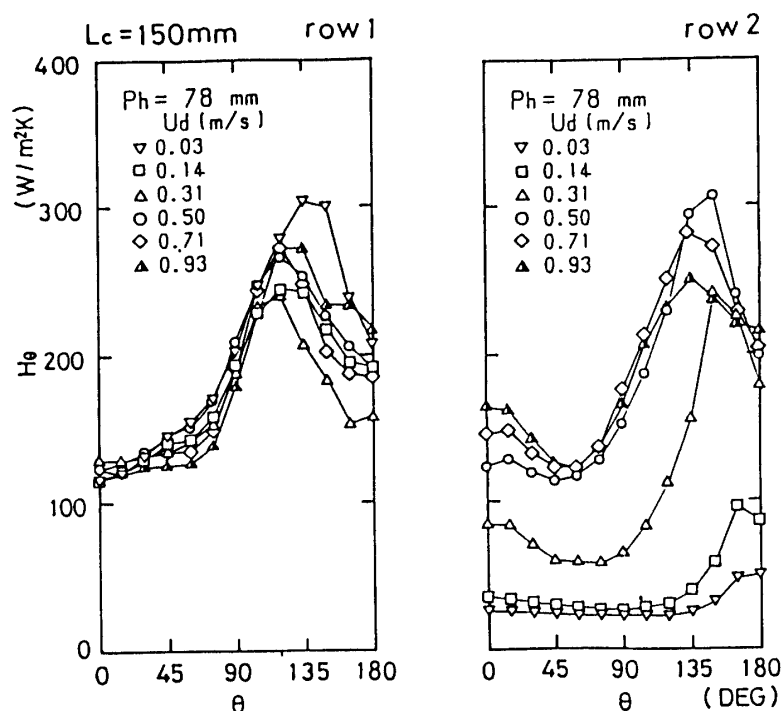
(c) $L_c=150$ mm

Fig. 3 (c) Local heat transfer coefficient distributions

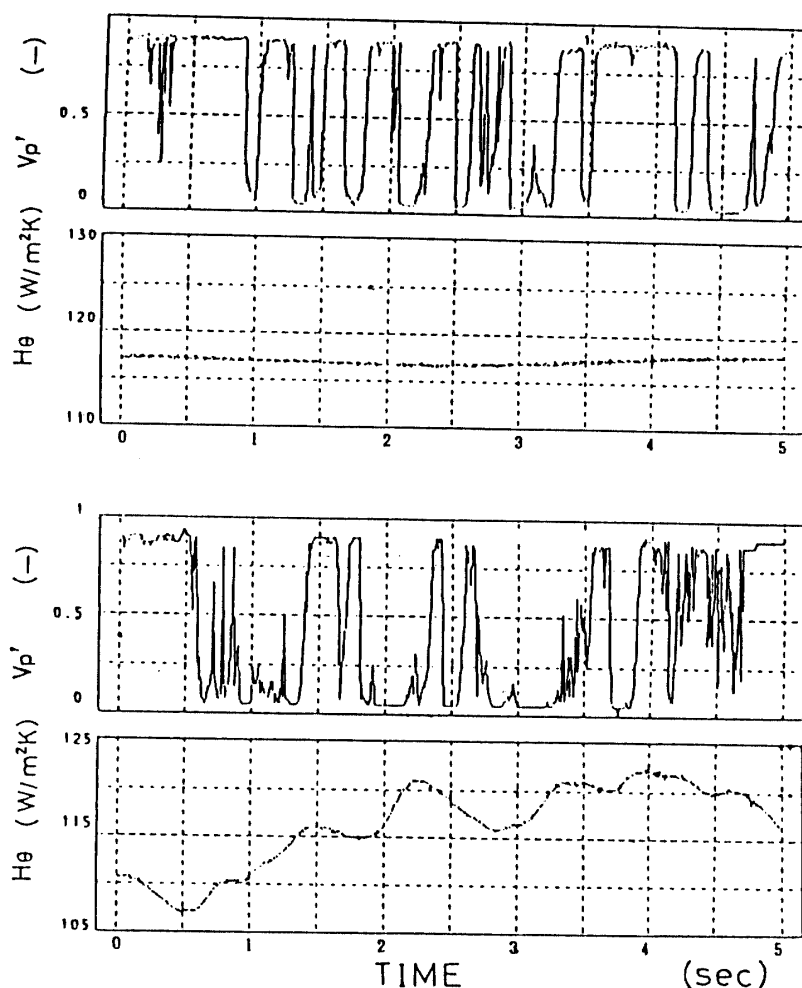
において管周方向局所熱伝達率は U_d の増加と伴に低下している。これは管まわりの粒子濃度が U_d の増加による層の膨張で希薄になるためと思われる。2 列目、 $U_d=0.50$ m/s 以上の場合、管周方向局所熱伝達率は前方淀み点近傍において U_d の増加と伴に高くなり後方域において逆に U_d の増加と伴に減少しているがこれは先の図 a, b の場合と同じ理由によるものと考えられる。さらに、この場合、平均熱伝達率にあまり変化がないことを意味している。

以上管周局所熱伝達率と伝熱管への粒子の接触とが相互に関連を持つものと考え次に管周りの 5 点において熱電対と光プローブを用いてそれぞれ温度と粒子挙動とを同時に測定した。この光プローブにおいて光軸間に粒子によるさえぎりが無い時のプローブ出力を V_{ph} 、光軸間が完全に遮断された時の出力を V_{pl} とすると、平均出力 V_{pm} は光軸間の粒子濃度に関係するが濃度そのものではなく、光軸間を粒子または粒子塊が通過した際のさえぎる頻度に対応する。ここではこの光プローブ出力の時間平均値を以下のように無次元量化し、光軸間に光を遮るものがない場合の無次元光プローブ出力 $V_{p'}=1$ 、完全に遮った場合 $V_{p'}=0$ とした。

$$V_{p'} = (V_{pm} - V_{pl}) / (V_{ph} - V_{pl}) \quad (1)$$

また本研究においては $V_{p'}=0$ の際、流動粒子が伝熱管と必ず接触したものとみなした。

Fig. 4 a~c に特徴的な例として $\theta=180, 135$ での各速度 U_d の無次元光プローブ出力 $V_{p'}$ と管周方向局所熱伝達率の時系列変化を示す。図 a は $U_d=0.50$ m/s の場合である。 $\theta=180^\circ$ (管頂部) では常に表面に粒子が存在しているために吹き上げられた粒子が直接伝熱管表面に接触できないので $V_{p'}$ と管周方向局所熱伝達率は必ずしも対応しないものと思われる。 $\theta=135^\circ$ では $V_{p'}$ の値が連続的に 0 を示しているところがあり、これは粒子が管に接触する頻度が高く、そしてその量も多いということを示している。また $V_{p'}$ の値が連続的に 0 を示しているところではそれに対応して管周方向局所熱伝達率が上昇し、比較的高い管周方向局所熱伝達率を示していることもわかる。図 b は $U_d=0.71$ m/s の場合である。 $\theta=180^\circ$ では H_θ の値は程度の差はあれ図 a と同様な傾向を示している。 $\theta=135^\circ$ では $V_{p'}$ の値が連続的に 0 を示す時間が $U_d=0.50$ m/s の時に比べいくぶん長くはなっているが図 a と同様の考察が可能である。またそこでの管周方向局所熱伝達率の上昇の程度が $U_d=$



(a) $U_0=0.50\text{m/s}$

Fig. 4 (a) Heat transfer coefficient and dimensionless optical output
Top= 180° Bottom= 135°

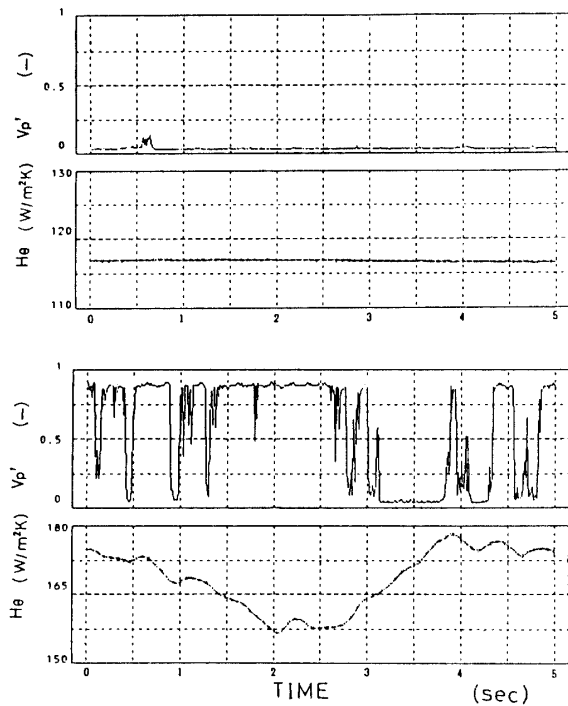
0.50m/sの時に比べ大きい。図cは $U_d=0.90\text{m/s}$ の場合であるが、 $\theta=135^\circ$ では前述と同様に伝熱管への粒子接触が常に多量に行なわれている状態にあると思われる。そして粒子の接触が気泡などによって阻害される時(V_p' の値が0を示していない時)に熱伝達率が下がっているものと思われる。

Fig. 5に管周各位置での無次元光プローブ出力 V_p' の時間平均値と管周方向局所熱伝達率の時間平均値と速度 U_d の関係を示す。 V_p' の時間平均値は粒子の管接触頻度あるいは量を表わすものであると言える。つまりこの値が、0を示す時は常に粒子が伝熱管表面に接触している状態であると言える。 U_d が増加するにつれて V_p' の時間平均値は0に近くなり $\theta=180^\circ$ を除いて局所熱伝達率も V_p' の時間平均値に対応して高くなっている。局所熱伝達率は半実験式であるところの単相の

単相まわりの局所強制対流熱伝達(H_{conv}) [5]と粒子と壁との接触による非定常熱伝導の理論 [6] から得られる値 (H_{cond}) とを用いてプローブ出力 V_p' との関係を勘案すると以下の様に置ける。

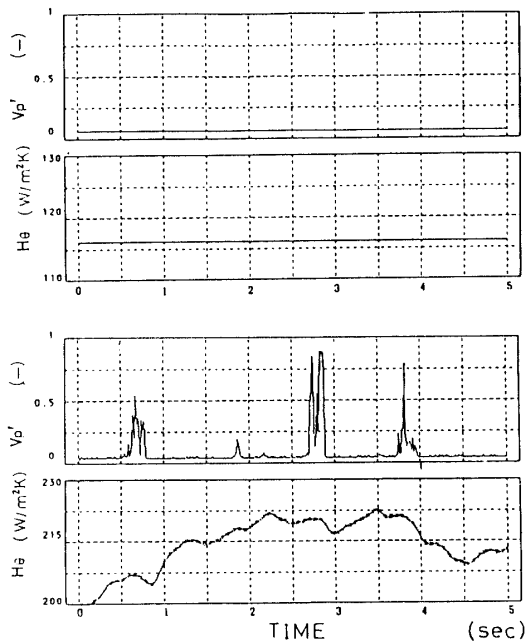
$$H_\theta = (H_{cond})(1 - V_p') + (H_{conv})V_p' \quad (2)$$

(2)式で求めた値をFig. 5に破線で示してあるが、本実験値との関係は必ずしも良好とは言えない。これは V_p' の測定精度が悪い事とともに、 V_p' が必ずしも接触粒子の全てを捕らまえているとは言えずこれを基に計算することに無理があるとも思える。しかしながら本方法のごとく対流支配域と熱伝導支配域の分配和であるとして、時間平均局所熱伝達率をある程度予測することが可能かと思われる。



(b) $U_0=0.71\text{m/s}$

Fig. 4 (b) Heat transfer coefficient and dimensionless optical output
Top=180° Bottom=135°



(c) $U_0=0.90\text{m/s}$

Fig. 4 (c) Heat transfer coefficient and dimensionless optical output
Top=180° Bottom=135°

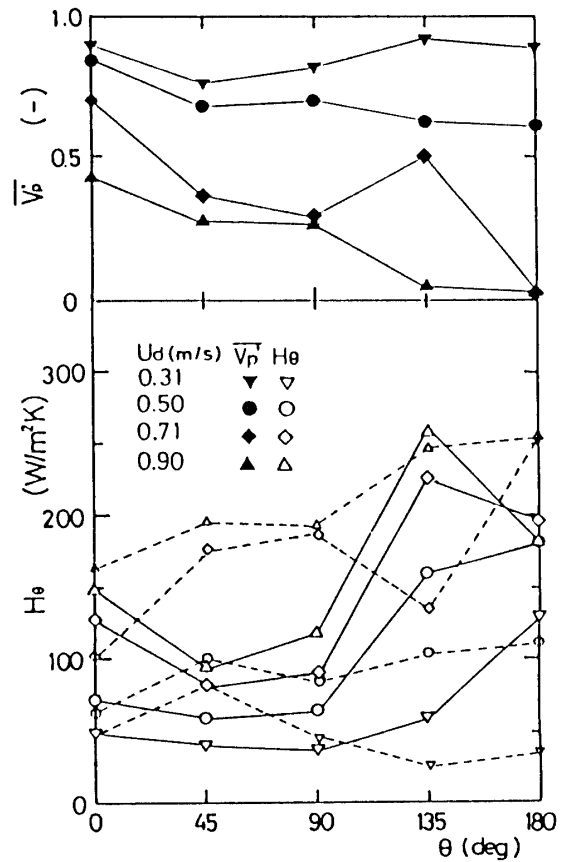


Fig. 5 Relationship between dimensionless optical output and time average heat transfer coefficient

4. 結 論

- 以上、本実験で得られた知見を以下にまとめて示す。
- (1) フリーボード域に置かれた伝熱管群の管周りの局所熱伝達率分布から局所熱伝達の極大値をとる位置がありその位置が流速の増加にともない管頂部から $\theta=120^\circ$ 近傍へ移動する。
 - (2) 管周りの粒子挙動と局所熱伝達の時系列変化の測定を同時に行い、粒子の伝熱管への接触と熱伝達率の変動とが対応しており明らかに両者には密接な関係があることが示された。
 - (3) 管頂部から $\theta=120^\circ$ 近傍までの局所熱伝達率低下の原因がそこでの粒子の滞留によるものであり平均熱伝達率の低下の一つの原因として考えられる。
 - (4) 局所熱伝達率は V_p' をパラメータに対流支配域と熱伝導支配域の分配和である程度予測できるものと思われる。

[謝辞] 本研究に多大の貢献を頂きました藤本昌樹君
(当時大学院生, 現宇部興産)に感謝の意を表します。

度
; 時間平均値を示す

使用記号

D ; 伝熱管管径
dp ; 粒子径
Hx ; 各管列における平均熱伝達率
H_θ ; 第2管列中央管における局所熱伝達率
Lc ; 静止層高
U₀ ; 空塔速度
U_{mf} ; 最小流動化速度
U_d ; 速度差 U₀-U_{mf}
V_{ph} ; プロープの最大出力電圧
V_{pl} ; プロープの最小出力電圧
V_{pm} ; プロープの平均出力電圧
V_{p'} ; 無次元光プロープ出力
θ ; 前方淀み点から時計回りを正にとった角

参考文献

- [1] Decker, N. A. & Glicksman, L. R., AIChE Sympo. Ser. 77(1981) 341
- [2] Biyikli, S., Tuzla, K. & Chen, J. C., AIChE J., Vol.5(1983) 712
- [3] 加藤・宮本, 日本機械学会中四国支部第27回期
総会講演会講演概要集, No.895-1(1989-3) 114
- [4] 例えば, 宮本ら, 第25回伝熱シンポジウム講演
論文集 (1988-6) 331
- [5] 機械学会編, "伝熱工学資料" 改訂第4版
(1986-10) 60
- [6] Gloski, D., Decker, N. A. & Glicksman, L. R.,
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.27 No.4,
(1984-4) 599

(平成2年10月15日受理)