Effect of the Flowability of Dust on Collection Performance of Repeatedly Dislodged Filter Cloth

Mitsuaki Hirota, Yoshio Shimizu* and Toshio Oshima

Dept. of Chem. Eng., Himeji Inst. of Tech., Himeji 671-22

Key Words: Dust Collection, Powder, Dislodging, Flowability, Bag Filter

The effect of the flowability of dust on the collection performance of filter cloth was studied by using three kinds of dusts of different flowabilities. In the case of dislodging the filter cloth, the amount of dust remaining on the dislodged filter cloth was considerably affected by the flowability of the dust. For dust of low flowability, pressure drop across the filter cloth and collection efficiency were higher than for dust of high flowability when the same amount of dust remained on the filter cloth.

* DAIFUKU CO., LTD.

対称および非対称加熱垂直平行平板間自然対流熱伝達[†]

半沢 保・石原秀樹・関口邦明*・藤井隆彦**

鈴木康夫***・加藤邦夫

群馬大学工学部 化学工学科^{††}

緒 言

近年、電子工学の発達に伴い、電子回路の高密度化、小型化が盛んに進められている。この電子回路は熱の影響を非常に受けやすく、それゆえ、系内に発生する熱の除去を正確に予測することが非常に重要な問題になっている。これら電子回路はエポキシ樹脂板等に取付けられて電子回路板となり、電子器機内において一定間隔で垂直に設置される。この場合、系内では浮力による自然対流が生じ、回路板からの熱の除去が容易となる。ゆえに、電子回路板内での熱移動や温度分布解析をするには、垂直平行平板間の熱伝達係数を知ることが必要である。

ところで、自然対流を伴った垂直平行平板間の流動特性や熱移動に関しては、実験的にも理論的にも多数の研究が報告されている^{1,3-8,10-20,22,23)}。しかし、これらの研

究の多くは、加熱板と流体との温度差が比較的小さく、運動量や熱の移動現象が緩慢な場合を扱っている ($Gr < 10^4$)。しかるに、電子器機内では、電子回路板と周囲流体との間に比較的大きな温度差が存在し、 Gr 数も時には 10^8 にも達する。

本研究では、電子器機内の熱移動現象を定量的に解明するための基礎資料を得ることを目的として、垂直平行な2平板が対称に、または非対称に一樣温度で加熱される場合について、高 Gr 数下で平板からの熱伝達係数に及ぼす諸因子の影響を調べた。

1. 実験装置および実験方法

装置の概要を Fig. 1 に示す。加熱板は両面にアルミ板を取付けた枠内に、発熱体としてカンタル線を上、中、下の3箇所に分けて入れ、供給熱量を各々調整できるようにした。板の大きさは $30(\text{高さ}) \times 45(\text{幅}) \text{ cm}^2$ 、 $60 \times 45 \text{ cm}^2$ の2種類で、各々の加熱面温度は8本の銅・コンスタンタン熱電対を加熱面に埋込んで測定したが、その配置は測定面に5点(図B)、加熱面温度の対称性を調べるために、測定面の背中合わせの面に3点取付けた。

系内流体温度は、 $0.25 \text{ mm } \phi$ のシース型銅・コンスタンタン熱電対を、装置上部より系内に挿入して測定した。

[†] 1986年2月6日受理；化学工学協会第48年会（京都，1983年4月），同第50年会（横浜，1985年3月）にて一部発表

^{††} 〒376 桐生市天神町1-5-1

* 日立コンデンサ㈱

** 倉敷化工㈱

*** 日立プロセスコンピュータエンジニアリング㈱

Fig. 1 Experimental apparatus, ① Heated plate, ② Thermocouples, ③ Opposite plate, ④ Side plate, ⑤ Recorder, ⑥ Voltmeter, ⑦ Ammeter, ⑧ Slider

実験方法は、加熱面温度を各々の設定温度において一定にし、系内各壁温を記録しながら、装置上部から挿入した熱電対をスライダで移動させて、垂直平行平板間のガスの局所温度を測定した。操作条件は、加熱面温度が323, 373, 423 K, 平板間距離は0.75, 1.0, 2.0, 3.0および5.0 cm, そして対向板温度は室温から373 Kである。なお、系内ガス温度分布を調べるため、加熱面下部から垂直方向に5~10 cm おきに、また、水平方向に加熱面近傍では0.2 cm おきに、他の部分では0.5~1.0 cm おきにガス温度を測定した。さらに、加熱平板に供給した電力もあわせて測定した。

2. 実験結果および熱伝達係数の相関

得られた実験結果の一部を以下に示す。

Fig. 2 は加熱面温度を373 K で一定にした場合の、各平行平板間距離における系内温度分布の実測値を示すが、ここでは一例として加熱面高さ $H=60$ cm, 対向板温度 t_w を非加熱および373 K の場合で、垂直方向距離 y をパラメータとして示す。図は横軸が平板間距離 D を、縦軸に無次元温度をとるが、図より、 $D=3$ cm 以上の場合には、系内全域において、加熱面近傍でのみ急激な温度勾配があるが、 $D=1$ cm ではこの傾向は、加熱面下端近傍でのみ見られることがわかる。また、 D が小さいほど、そして t_w が高いほど、 y に対する温度上昇が見られる。以

Fig. 2 Effect of plate spacing on the cross-sectional temperature distributions

上の系内温度分布の傾向は、 $H=30$ cm の系における測定でも同様にみられた。なお、これらの垂直方向距離 y に対する温度分布の発達の形状は、宮武、藤井の同様な系における基礎式の数値解析結果とも、大略同じであった⁵⁾。

電子器機内に充填された、電子回路板表面からの熱移動に対する基礎資料として、垂直平行平板加熱面における局所熱伝達係数 h が必要となる。ここでは h を任意の垂直方向位置での温度勾配と、その t_H と入口ガス温度 t_A との差を使用し、次式により求めた。

$$h = - \frac{\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=0}}{t_H - t_A} \quad (1)$$

なお、本研究では温度勾配 $(\partial t / \partial x)_{x=0}$ として、加熱面と加熱面最寄りの測定点一点との温度勾配を使用した。

また、垂直平行平板間の平均 Nu 数に影響を及ぼす因子について検討を行ったが、平均 Nu 数は次の定義に基づいて得たものを使用した。

$$\bar{h} = \frac{1}{H} \int_0^H h \, dy \quad (2)$$

$$\bar{Nu} = \frac{D \bar{h}}{\lambda} \quad (3)$$

さらに、供給電力に基づく熱収支より次式が得られる。

$$Q = \bar{h} A (t_H - t_A) \quad (4)$$

Eqs.(2), (3)より求めた $\bar{Nu}$ と、Eq.(4)より求めた $\bar{Nu}$ とは $\pm 5\%$ 以内で一致した。

Fig. 3 は対向板が加熱および非加熱である場合における h の分布を、一例として $H=60$ cm, $t_H=373$ K について、 D をパラメータとして示す。図(a)より、対向板が非加熱の場合、 D が大きいほど h は y の増加に従って一定値に近づくことがわかる。他方、対向板が加熱されてい

Fig. 3 Effect of plate spacing on the local heat transfer coefficient

る場合は、図(b)より、 h は D によって大きく影響を受け、かつ D の小さい場合ほど、 y の増加と共に h は著しく小さくなるのがわかる。

次に、垂直平行平板間の平均 Nu 数に対して、影響を及ぼす因子として Gr 数、 H/D 、および t_w に対する無次元温度 θ を取り、これら因子と平均 Nu 数との関係を求めた。なお、ここでは対向壁が非加熱で、対向壁面温度が一樣にならない場合の θ は、壁面での実測値の平均により求めた。

Fig. 4は $\bar{Nu}$ に対する $(1+\theta)$ の関係を、一例として $H=60\text{cm}$ 、 $H/D=20$ [-]の場合について、 Gr 数をパラメータとして示す。図より、 $\bar{Nu}$ は $(1+\theta)$ の増加と共に減少し、 $\bar{Nu}$ は $(1+\theta)$ の -0.12 乗に比例することがわかる。

また、 $\bar{Nu}$ に対する Gr 数および H/D の関係も調べ、 $\bar{Nu}$ は Gr 数の 0.25 乗に、そして H/D の -0.26 乗にそれぞれ比例することがわかった。

以上の結果に基づき、全測定値について $\bar{Nu}$ と諸因子との関係を示したのがFig. 5である。これより、垂直平行平板間での平均 Nu 数と諸因子との関係に対して、本実験での操作条件の範囲において次式を得た。

$$\bar{Nu} = 0.75 (1 + \theta)^{-0.12} Gr^{0.25} (H/D)^{-0.26} \quad (5)$$

図より、対向壁面温度が一樣にならない場合、その平均値を使用して θ を定めても、相関式とよく一致することがわかる。また、図中には類似の系における他の研究者の実測値および数値解析結果も記したが、ここで、対向壁が断熱壁の時は、 H/D が小さくなると θ は 1.0 に近づくので、この場合 $\theta = 1.0$ とみなして図中に示した。図より、相関は大略良好であると思われる。なお、宮武、

Fig. 4 Relation between experimental $\bar{Nu}$ and $(1+\theta)$

藤井は本研究と同様の系において、 $(D/H) Gr$ が大きい場合の $Pr=0.7$ における漸近式に対して、対向壁が断熱の場合と、相異なる温度をもつ場合のそれぞれについて次式を与えている^{15,17)}。

$$\bar{Nu} = 0.561 \left(\frac{D}{H} Gr \right)^{0.25}$$

$$\bar{Nu} = 0.53 \{ 1 + 0.165 (1 - \theta)^{0.36} \} \left(\frac{D}{H} Gr \right)^{0.25}$$

Fig. 5から本研究で得られた実験式は、 $\bar{Nu}$ がこれらの式より若干大きくなる傾向を示した。

ここで、Eq.(5)の適用範囲は $\theta = 0 \sim 0.99$ [-]、 $D=1\text{cm}$ 以上、 $H/D=6 \sim 60$ [-]、そして $Gr=10^3 \sim 10^7$ [-]である。

3. 考 察

Fig. 6はEq.(2)によって得た平均熱伝達係数 $\bar{h}$ に対し、加熱面温度 t_H と対向板温度 t_w との差 $(t_H - t_w)$ の影響を、一例として $H=60\text{cm}$ 、 $t_H=373\text{K}$ の場合について、平板間距離 D をパラメータとして示す。図より $D=1\text{cm}$ 以上の場合、 $(t_H - t_w)$ が小さくなると共に $\bar{h}$ はわずかに増大するが、 $D=0.5\text{cm}$ ではこの傾向が逆転し、 $(t_H - t_w)$ の減少に従って $\bar{h}$ は急速に減少することがわかる。

このことは、 D が 1cm 以下になると、 D の減少により系内での対流の発達が極度に抑制されるためと推察されるが、ここで垂直平行平板間の自然対流によるガス流速について考える。いま、系を細長い長方形断面のダクトと考えると、系内上昇速度は次式により得られると思われる。

$$4p = (\rho_A - \bar{\rho}) g H \quad (6)$$

$$4p = \frac{2f \rho H \bar{v}^2}{D_e} \quad (7)$$

Eqs.(6), (7)において $f=16/Re$ とし、また他の因子については本実験の実測値を使用して、系内上昇速度 $\bar{v}$ に対する D の影響について考察すると、 D の増加と共に系内

Fig. 5 Relation between $\overline{Nu} (1+\theta)^{0.12} (H/D)^{0.26}$ and Gr

温度は低下し、 $(\theta_1 - \bar{\theta})$ が小さくなって、 $\bar{v}$ は緩やかな増加を示す。逆に、 $D=1.0\text{cm}$ 以下になると、 $\bar{v}$ は急速に減少すると推察される。結局、本装置での系内の移動現象は、大略 $D=1\text{cm}$ 前後を境にして、完全に異なった性状を示すと思われる。Bar-Cohen らは垂直平行平板について、自然対流による冷却のための最適間隔に関して報告している⁴⁾。この文献における最適値の式によると、本研究での最適間隔は、本実験条件下で約 $D=0.9\text{cm}$ となる。ところで、この最適間隔は比較的大きい熱移動速度での最小平板間隔ということで、Fig. 6 の $\bar{h}$ の特異点に関連すると考えられるから、この図で $D=1\text{cm}$ が先の最適値 $D=0.9\text{cm}$ と大略合致することは、本実測値と系内速度に対する考察とが大略妥当であることを示すと思われる。

単一垂直平板からの熱伝達は、平行平板において、平板間距離が充分大きい場合のそれに相当すると言える。そこで、Eq.(5)は単一平板にも適用できるよう配慮した。一般に、等温の単一垂直平面からの自然対流による熱移動は次式で示される^{2,9,21,24)}。

$$\overline{Nu} = C Gr^n \quad (8)$$

ここで、 $C=0.3\sim 0.7$ 、 $n=1/5\sim 1/4$ である。Eq.(5)を等温単一平板に適用させると次式となる。

$$\overline{Nu} = 0.69 Gr^{0.25} \quad (9)$$

Eqs.(8)と(9)の一致は大変良好と思われる。

結 言

一様温度の2枚の垂直平板間の自然対流熱伝達について、非対称加熱から対称加熱までの広範囲にわたって、比較的高 Gr 数のもとで実験を行い、以下の結果を得た。

1) 加熱面での局所熱伝達係数 h は、対向板が非加熱の場合、 D が大きいほど加熱面に沿って一定になるが、対向板が加熱されている場合は、 D の影響を受けやすい。

Fig. 6 Effect of temperature difference between heating plate and opposite plate on the average heat transfer coefficient

2) 平均熱伝達係数に対する実験式として Eq.(5)を得た。

Nomenclature

A	= surface area of heating plate	[cm ²]
C_p	= heat capacity at constant pressure	[J/g·K]
D	= plate spacing	[cm]
D_e	= hydraulic diameter	[cm]
f	= friction factor	[-]
Gr	= Grashof number ($=g\beta D^3(t_H - t_A)/\nu^2$)	[-]
g	= gravitational acceleration	[cm/s ²]
H	= plate height	[cm]
h	= local heat transfer coefficient	[W/cm ² ·K]
$\bar{h}$	= average heat transfer coefficient	[W/cm ² ·K]
Nu	= Nusselt number ($=hD/\lambda$)	[-]
Pr	= Prandtl number ($=C_p\mu/\lambda$)	[-]
Q	= heat duty to heating plate	[W]

T = dimensionless temperature
 $(=(t-t_A)/(t_H-t_A))$ [-]
 t = temperature [K]
 v = velocity in axial direction [cm/s]
 x = cross-sectional coordinate [cm]
 y = axial coordinate [cm]

β = volumetric coefficient of expansion [K^{-1}]
 Δp = Pressure drop [$g/cm \cdot s^2$]
 θ = dimensionless temperature of opposite plate
 $(=(t_H-t_W)/(t_H-t_A))$ [-]
 λ = thermal conductivity [$W/cm \cdot K$]
 μ = viscosity [$g/cm \cdot s$]
 ν = kinematic viscosity [cm^2/s]
 ρ = density [g/cm^3]

<Subscripts>

A = inlet zone
 H = heating zone
 W = wall

<Superscript>

- = mean value

Literature cited

- 1) Aihara, T. : *J. Heat Transfer*, **29**, 903 (1963)
- 2) Anderson, R. and A. Bejan : *Int. J. Heat Mass Transfer*, **24**, 1611 (1981)
- 3) Aung, W., L. S. Fletcher and V. Sernas : *ibid.*, **15**, 2293 (1972)
- 4) Bar-Cohen, A. and W. M. Rohsenow : *J. Heat Transfer*, **106**, 116 (1984)

- 5) Bodoia, J. R. and J. F. Osterle : *ibid.*, **84**, 40 (1962)
- 6) Burch, T., T. Rhodes and S. Acharya : *Int. J. Heat Mass Transfer*, **28**, 1173 (1985)
- 7) Currie, I. G. and W. A. Newman : *Heat Transfer* 1970, *Elsevier Pub.*, **4**, NC 2.7 (1970)
- 8) Elenbass, W. : *Physica, Holland*, **9**, 1 (1942)
- 9) Goldstein, R. J. and D. G. Briggs : *J. Heat Transfer*, **30**, 490 (1964)
- 10) Hardwick, N. E. and E. K. Levy : *ibid.*, **95**, 289 (1973)
- 11) Hasegawa, S. and M. Morisue : Preprints of the Meeting of JSME. at Miyazaki, **33** (1960)
- 12) Kettleborough, C. F. : *Int. J. Heat Mass Transfer*, **15**, 883 (1972)
- 13) Kishinami, K. and N. Seki : *J. Heat Transfer*, **105**, 759 (1983)
- 14) Kobayashi, A. and Y. Fujimoto : *ibid.*, **20**, 233 (1954)
- 15) Miyatake, O. and T. Fujii : *Kagaku Kōgaku*, **36**, 405 (1972)
- 16) idem : *ibid.*, **36**, 859 (1972)
- 17) idem : *ibid.*, **37**, 491 (1973)
- 18) idem : *ibid.*, **37**, 852 (1973)
- 19) Nakamura, H. *et al.* : Preprints of the 42th National Meeting of JSME., No.120, **5** (1964)
- 20) Nakamura, H., Y. Asako and T. Naitou : *Numerical Heat Transfer*, **5**, 95 (1982)
- 21) Sparrow, E. M. and J. L. Gregg : *J. Heat Transfer*, **78**, 435 (1956)
- 22) Sparrow, E. M., G. M. Chrysler and L. F. Azevedo : *ibid.*, **106**, 325 (1984)
- 23) Wirtz, R. A. and R. T. Stutzman : *ibid.*, **104**, 501 (1982)
- 24) Yang, K. T., J. L. Novotny and Y. S. Cheng : *Int. J. Heat Mass Transfer*, **15**, 1097 (1972)

Natural Convective Heat Transfer between Vertical Parallel Plates with Symmetric and Asymmetric Heating

Tamotsu Hanzawa, Hideki Ishihara, Kuniaki Sekiguchi*
 Takahiko Fujii**, Yasuo Suzuki*** and Kunio Kato

Dept. of Chem. Eng., Gunma Univ., Kiryu 376

Key Words : Heat Transfer, Vertical Parallel Plates, Natural Convection, Laminar Flow, Heat Transfer Coefficient, Symmetric Heating, Asymmetric Heating, Electronic Device Cooling

To analyze the heat transfer phenomenon in electronic circuit plates, natural convective heat transfer between two vertical parallel plates, with symmetric or asymmetric uniformly heated wall, was investigated experimentally in the range of high Grashof number ($Gr=10^3-10^7$).

The local heat transfer coefficient was strongly affected by the axial distance of the plate in the case where distance and temperature difference between plates were small. Average Nusselt number was affected by Grashof number, distance and temperature difference between the plates. An empirical equation for average Nusselt number in the two vertical parallel plates was obtained.

- * Hitachi Condenser Co., Ltd.
- ** Kurashiki Kako Co., Ltd.
- *** Hitachi Process Computer Engineering Co., Ltd.

ポリエチレン系粒子に対するウシT細胞の粘着速度[†]

古崎新太郎・鈴田哲也*

東京大学工学部 化学工学科^{††}

各種の血球を、その機能を失うことなく迅速に分離することは、診断あるいは治療の分野で望まれており各方面で研究が進められている¹⁰⁾。中でも、リンパ球のB細胞とT細胞とを分離することは臨床的に有用であり、従来からシリコン化ガラス、ナイロンなどの素材を用いて分離が行われている。これらの素材ではB細胞を素材に粘着させて血漿中に残留するT細胞を採取するのであるが、この場合、得られるT細胞の変形を抑制し機能の変化をできるだけ小さくする必要がある。この目的のために2-ヒドロキシエチルメタクリレート(HEMA)の重合体(PHEMA)を粘着材表面にコーティングした材料が開発されている^{6,8)}。

本研究は、機能の低下を起こさずにT細胞を分離する操作の基礎的検討事項として、T細胞の分離材料への可逆的および不可逆的粘着速度をポリエチレン粒子(PE)ならびにそれにHEMAをグラフト結合させた粒子(PEH)について求めたものである。

実験方法

粘着材粒子は東燃石油化学製ポリエチレンY6071[®]および、これに電子線グラフト重合によりHEMAを導入したものを用いた。後者のグラフト率(グラフト前の乾燥重量を基準とした重量増加率)は18%であった。これらの物性値はTable 1に記した。

粘着される試料にはウシリンパ球T細胞を用いた。ま

ず、ウシ全血に抗凝固剤としてクエン酸ナトリウム5kg/m³を加え、これに等量の生理的リン酸塩緩衝液(PBS)を加える。この溶液を少量とりFicoll-Paque[®]をほぼ同量加えて遠心分離する。分離後の中間層からリンパ球および単球を含む層を採取するが、精製のために同様の操作をさらに2回繰り返した。このとき、Trypan blueで染色して測定した細胞の生存率は90~95%であった。次いでナイロン繊維を用いて単球、B細胞および混入血小板を除去した。得られた細胞の懸濁液はPBSで目的の濃度に希釈して使用した。試料調整の詳細については別に示した⁹⁾。上記の操作はリンパ球の取扱法として一般に用いられているものであり^{2,3)}、得られたT細胞の機能は生体内におけるものから大きく逸脱していないと考えられる。

粘着速度の測定は、リンパ球の機械的損傷を防ぐために攪拌を避けカラムを用いて行った。すなわち、内径0.1mのシリコン処理ガラスカラムに粘着材を層高0.1mとなるように充填し、これにT細胞を含む試料を導入して粘着を行わせた。一定時間経過後に液を排出し、その細胞濃度を吸光度計(280nm)または血球計算板を用いて測定した。次いで、カラムを所定量の1%トリプシン-PBSで洗い¹⁾、溶出した液中の細胞濃度も同様の方法で測定した。なお、カラムの器壁に粘着する細胞の量は無視できることは確かめた。また、実験開始後1min以内の変形を受けていないと思われるT細胞を上記脱離液で処理すると100%回収できることを確かめた。

実験結果の解析

血球の粘着速度については、ポリアミン系の高分子を

[†] 1986年2月19日受理；化学工学協会第19回秋季大会(名古屋, 1985年10月)にて発表

^{††} 〒113 文京区本郷7-3-1

* 住友化学(株) 愛媛研究所