- Process Design and Develop., 8, 267 (1969)
 56) Skoczylas, A.: *Brit. Chem. Eng.*, 15, 221 (1970)
 57) Stahel, E. P. and J. K. Ferrell: *Ind. Eng. Chem.*, 61, 55 (1969)
 58) Sterbacek, Z. and P. Tausk: "Mixing in Chemical Industry", Pergamon Press (1965)
 59) Strek, F. and S. Masiuk: *Verfahrens Technik*, 4, 238 (1970)
 60) Uhl, V. W.: "Mixing Theory and Practice", Vol. 1 and 2, Academic Press (1966 and 1967)

- 61) Uhl, V. W.: Paper presented at 3rd Congress of CHISA (1969)
 62) 山本一夫: 京都大学学位論文 (1960)
 63) Yorulmaz, Y., P. F. Dickson and A. J. Kidney: *Ind. Eng. Chem., Process Design and Develop.*, 10, 180 (1971)
 64) Zaloudik, P. and M. Hruby: *Intern. Chem. Eng.*, 10, 82 (1970)
 65) Zlokarnik, M.: Paper presented at 3rd Congress of CHISA (1969)

(B) ガ ス ・ 粉 粒 体 系*

東 稔 節 治**

粉粒体の伝熱は乾燥、溶融などの単位操作、鉱石の還元、石油接触分解などの反応操作に広く関与している。代表的な伝熱装置としては固定層、移動層、流動層があり、近年湿潤・凝集状態にある粒子層の流動化を容易にする機械的搅拌、振動を併用する伝熱装置が各種操作に応用されている。装置内の粉体伝熱のうち固定層、移動層、流動層に関する研究は本誌の他レビューに含まれるので省略し、ここでは主に機械的流動化を伴う伝熱に限定して粉体伝熱に関する諸研究をまとめる。搅拌粒子層の伝熱は粒子移動を伴う伝導、対流、放射現象が起る複雑な過程であり、操作設計の基礎となる伝熱速度、伝熱機構について扱った研究は少ない。この形式の伝熱操作は装置内壁から粒子層への伝導による間接的伝熱、熱風接触による粒子層の直接的伝熱に分けられ、この視点より搅拌粒子層における伝熱係数の測定並びに伝熱機構の解析について現在までの約10年間に発表された文献を紹介し、その内容を概説する。

1. 壁面伝導伝熱

搅拌粒子伝熱は乾燥、造粒などの工業操作に比較的多く応用されているが、装置壁面から粒子層への伝熱過程は搅拌を伴う伝導、放射が組合わり、伝熱機構について解析した研究はきわめて少ない。ここでは流体は粒子間隙に共存し、粒子移動による伝導伝熱が主体となる搅拌伝熱について回分操作としての搅拌固定層、連続操作としての搅拌移動層に分けて諸研究をまとめる。

1・1 搅拌固定層

工業装置における搅拌粒子層の総括伝熱係数の大略値は、Holt⁸⁾、Sloan¹⁸⁾、Uhlら²²⁾によって示されており、Holtは液相搅拌伝熱との相似性にもとづいて総括伝熱係数の相関式を提出している。大竹・東稔ら¹¹⁾は櫛形羽根を挿入した円筒槽内の粒子層温度分布の時間的変化から伝熱係数を算出し、搅拌によって増加した有効熱伝導度 $(k_e)_{id}$ について伝熱過程と粒子混合過程の相似性を適用して次の関係式を導き、実測値を整理した。

$$(k_e)_{id} = \varphi C_p \rho_b D \quad (1)$$

ここに C_p は粒子比熱、 ρ_b は見かけ密度、 D は粒子混合係数であり、見かけの接触抵抗を補正する係数 φ は実測値から0.210をえた。また壁部に接触する粒子移動速度が羽根先端速度に比例するととして、壁部伝熱係数と操作条件の関係をえた。

Dunskiら⁶⁾は真空下における搅拌粒子層の粒子-壁間伝熱では気体中の伝導に比較して放射がより支配的となり、搅拌速度によって伝熱速度が影響されないこと、また最大の伝熱速度は壁面の粒子滞留時間が大なる場合にえられることを報告している。

1・2 搅拌移動層

Kasatkinら⁹⁾はスクリュー羽根付横型円筒における移動粒子層の総括伝熱係数が処理量にほぼ比例することを報告しており、Uhlら²²⁾は搅拌を伴う乾燥粒子の総括伝熱係数が処理量の0.6乗に比例し、液相伝熱係数の関係式の0.5乗に近いことをのべている。Vermeulenら²³⁾はスクリュー押出機の重合体粒子の溶融伝熱過程を移動加熱面の溶融過程で模擬し、粒子と溶融物が共存する遷移域について理論式を導き、実測値と対比して妥当

* 昭和47年10月5日受理

** Setsuji Tone (正会員) 大阪大学基礎工学部化学工学科

性を確かめた。大竹・東稔ら¹²⁾は粒子押し出し流れとなる攪拌移動層の実測温度分布から伝熱係数を算出し、攪拌による有効熱伝導度の増加値と操作条件の關係に(1)式を適用し、係数 ϕ について0.310の値をえた。また粒子層が完全混合となる攪拌移動層において壁部伝熱係数を実測し、押し出し流れとなる場合に比較して約2倍の大きさになることを確かめた²¹⁾。

1・3 粒子移動を伴う伝熱機構

粒子層伝熱機構について液相攪拌との相似性による取り扱いをさらに進め、移動粒子の非定常伝熱を考慮した解析がある。Harakasら⁷⁾は円筒の回転速度が槽内粒子の線速度に等しくなるように操作し、攪拌によって径方向温度分布を一様にし、加熱平板と粒子間の伝熱係数を実測した。このとき平板での粒子接触時間 τ として非定常伝熱モデルにもとづいて壁部伝熱係数 h_w について次式を導き、実測値が整理できることを確かめた。

$$h_w = 2\sqrt{k_e \cdot C_p \rho_p / \pi \tau} \quad (2)$$

ここに k_e は間隙流体を含む粒子層有効熱伝導度である。

東稔ら²⁰⁾は攪拌粒子層の伝熱機構について移動粒子塊の合一、分離を伴う非定常伝熱モデルにもとづいて解析し、有効熱伝導度の攪拌による増加値が(1)式で表示されることを明らかにした。また壁部伝熱機構について同様に非定常伝熱モデルによって解析し、壁部伝熱係数の理論式を導き、攪拌固定層、攪拌移動層の実測値を相關した。

2. 通気接触伝熱

流体が貫流し、機械的流動化を伴う粒子層伝熱は流体対流、粒子伝導などの多くの過程が入り複雑となり、伝熱係数と操作条件および伝熱機構については不明の点が多い。今後の研究の進展が望まれる。伝熱装置として攪拌流動層、かき上げ板によって粒子移動をおこなう回転炉、ガス流量で粒子流量を制御する移動層熱交換器があり、これに関する研究をのべる。

2・1 攪拌流動層

Reedら¹⁵⁾は振動羽根を挿入した流動層において伝熱係数を実測し、高ガス流量では振動に伴う伝熱係数の増加は低ガス流量の場合に比較して少なく、有効ガス流量が存在するのべている。Bukarevaら⁴⁾は振動流動層において測定した底部の伝熱係数は振動速度について最大値を示すが、垂直部の伝熱係数は最大値をもたずに一率に増大することを報告している。Botterillら^{2,3)}は攪拌流動層の壁部伝熱係数を実測し、壁面接触する単一粒

子の非定常伝熱モデルにもとづいて伝熱係数から粒子接触時間を求め、攪拌時の接触時間は無攪拌流動層の値の数分の1に減少することをのべている。Coudercら⁵⁾は攪拌流動層の伝熱係数が低回転速度では空気流量の増加とともに増大し、高回転速度では減少することを見出し、Botterillらの伝熱モデルに壁面と粒子間の距離を考慮して修正し、計算値と実測値の対比から粒子接触時間と羽根回転速度の關係をえた。Williamsら²⁴⁾は攪拌流動層の伝熱係数について、Coudercらと同様の結果をうるとともに、壁面の粒子移動は気泡となる過剰ガス量によって起るとして、過剰ガス量と羽根回転速度を相關させる流動モデルを提出し、自由流動層と攪拌流動層の伝熱係数を無次元の形で整理した。

2・2 回転炉その他

Holt⁸⁾は回転炉の粒子層における総括伝熱係数の大略値を示すとともに、伝熱速度が粒子比熱に比例し、粒子滞留時間に逆比例するとして総括伝熱係数の相關式を提出している。Porter¹³⁾は粒子内伝熱抵抗を考慮して粒子層温度と滞留時間の關係を求め、回転冷却器の設計法を提出しており、Myklestad¹⁰⁾は向流接触の乾燥伝熱において物質移動を考慮して粒子、流体温度と滞留時間の關係を導くとともに総括伝熱係数とガス流量の關係を実験よりえている。Sass¹⁶⁾は回転炉の伝熱を粒子内の液が沸点まで加熱される部分、液が一定温度で蒸発する部分、乾き粒子が所定温度まで加熱される部分の三つの領域に区別し、粒子、ガスの伝導、放射を含む五つの伝熱過程を考慮して熱収支式を立てて模擬し、伝熱係数の実験式を用いて回転炉の長さを推算した。このときセメント炉では7%、鉬石加熱炉では15%の誤差で実測値と計算値が一致することを報告している。Sonnenschein¹⁹⁾はガス流量によって移動貯蔵粒子がその流量を制御され、水平に等量に分流して高効率で熱交換する移動層を開発し、向流接触時の圧損失、層内平均温度と操作条件の關係を示している。

流動層伝熱では熱効率を高めるには多段化を必要とし、このため圧損失は大となり、また回転炉ではガスと粒子の接触が不十分となるなどの欠点があり、Rawaswamyら¹⁴⁾はこれらの欠点を改良したジグザグ型通路をもつ伝熱装置を開発し、向流接触時の粒子-流体間伝熱係数を実測し、粒子流量、ガス流量などの操作条件について検討した。結果としてこの装置では粒子流れがガス流量によって調節でき、圧損失は少く、非常に速い固気反応(接触分解)、吸着、乾燥などの工業操作に応用できることを報告している。

引用文献

- 1) Adamski, T.: *Brit. Chem. Eng.*, **13**, 611 (1968)
- 2) Botterill, J. S. M., J. R. Williams: *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, **41**, 217 (1963)
- 3) Botterill, J. S. M.: *Chem. Eng. Progr., Symp. Ser.*, Vol. 66, No. 101, 61 (1970)
- 4) Bukareva, M. F., V. A. Chlenov, N. V. Mikhailov: *Intern. Chem. Eng.*, **9**, 119 (1969)
- 5) Couderc, J. P., H. Angelio, M. Eujalbert: *Chem. Eng. Sci.*, **21**, 533 (1966); **22**, 99, 109 (1967)
- 6) Dunski, V. D.: *Intern. Chem. Eng.*, **4**, 405 (1964)
- 7) Harakas, N. K., K. O. Beatty, Jr.: *Chem. Eng. Progr., Symp. Ser.*, Vol. 59, No. 41, 122 (1963)
- 8) Holt, A. D.: *Chem. Eng.*, Jan. 8, 1962, p. 108; Oct. 23, 1967, p. 145
- 9) Kasatkin, A. G., V. M. Lakae, L. N. Elkin: *Intern. Chem. Eng.*, **4**, 85 (1964)
- 10) Myklestad, O.: *Chem. Eng. Progr., Symp. Ser.*, Vol. 59, No. 41, 129 (1963)
- 11) Otake, T., S. Tone: *Kagaku Kōgaku (Chem. Eng. Japan)*, **24**, 156 (1960); **25**, 56 (1961)
- 12) Otake, T., S. Tone, T. Shimizu: *ibid.*, **30**, 891 (1966)
- 13) Porter, S. J.: *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, **41**, 272 (1963)
- 14) Rawaswamy, S. R., E. R. Gerhard: *Brit. Chem. Eng.*, **11**, 1210 (1966); **13**, 611 (1968)
- 15) Reed, T. M., M. R. Fenske: *Ind. Eng. Chem.*, **47**, 275 (1955)
- 16) Sass, A.: *Ind. Eng. Chem., Process Design and Development*, **6**, 532 (1967)
- 17) Shimizu, T., S. Tone, T. Otake: *Kagaku Kōgaku (Chem. Eng. Japan)*, **25**, 885 (1961)
- 18) Sloan, C. E.: *Chem. Eng.*, June 19, 1967, p. 167
- 19) Sonnenschein, H.: *Chem.-Ing.-Techn.*, **43**, 240 (1971)
- 20) Tone, S., T. Otake: *Kagaku Kōgaku*, **30**, 495 (1966); **31**, 31 (1967)
- 21) Tone, S., K. Higuchi, E. Abe, T. Otake: *ibid.*, **30**, 1107 (1966)
- 22) Uhl, V. W., W. L. Root III: *Chem. Eng. Progr.*, **63** (7), 81 (1967)
- 23) Vermeulen, J. R., P. G. Scargo, W. J. Beek: *Chem. Eng. Sci.*, **26**, 1445, 1457 (1971)
- 24) Williams, J. A., V. C. Smith: *Chem. Eng. Progr., Symp. Ser.*, Vol. 66, No. 101, 70 (1970)

9. 熱 交 換 器*

喜 多 隆 三**

はじめに

伝熱に関する研究の成果は、具体的には各種の機器、装置の設計に寄与するわけであるが、なかでも熱交換器へのウェイトが非常に大きい。しかし、今日にいたるまで数多くの文献が発表されてきているが、熱交換器の設計に直接携わっているエンジニアの立場からみれば、本当に有用と考えられるものは少ない。たとえば、工業的にもっとも多く使用されている多管式熱交換器についていうと、シェル側の伝熱および流動については近年ようやく信頼しうる方法⁵⁾が発表されたばかりであり、シェル側において相変化を伴う多成分系のコンデンサー、リボイラーなどについてはいまだ不明点が多い。

この分野の研究が遅れている原因は、実際の熱交換器の形状がシェル側において非常に複雑であり、シェルサイズ 150~200 mm 程度のサイズのデータではスケールアップが困難であること、そして、工業規模の装置を作って多数のケースをシステマティックに実験していくに

は、あまりにも膨大な資金と労力が要求されるので、一つの大学あるいは一つの会社の研究室では無理なためであろう。したがって、本来はチューブバンドルで、しかもコマーシャルサイズで行なうべきところを単一チューブ、あるいは小さなサイズで行なわざるを得なかったのではなかろうか。

1962年に HTRI (Heat Transfer Research, Inc.) がアメリカで設立された。これは熱交換器のメーカー、ユーザーなどの共同出資による、伝熱と流動に関する非営利の試験研究会社である。現在、日本の 10 社を含め 100 社をこえる会社がメンバーとなっているが、このような形態こそこれまでの研究と実装置とのギャップを埋める有力な機関のように考えられる (HTRI の概要については、本誌 Vol. 33, p. 256 参照)。ここから発行される Report Books, Design Manuals, Data Books などは、熱交換器に関係するエンジニアからみれば、まさにこれまで渴望していたものといえる。残念ながら、この資料はメンバー以外には非公開となっている。しかし、一部公表されているものもあり^{5, 11, 36, 42, 47, 75)}、引続きある程度は公開する方針の模様なので今後も注目に値する (た

* 昭和 47 年 10 月 16 日受理

** Ryuzo Kita (正会員) 三井造船株式会社