添 字

c : 吹き出し気体の最初に持っている値, r : 壁面断熱のときの値, w : 壁面のところの値, x : x のところの値,
 ∞ : 一般流, 0: 吹き出しのないときの値, 1: 物質 1 (吹き出し流体), 2: 物質 2 (一般流流体), 12: 1 が 2 の中へ
 拡散する, 上つき*: 基準温度 $T^* = T_\infty + 0.5(T_w - T_\infty) + 0.22(T_r - T_\infty)$ に対する値。

文 献

- 1) 平田: 機械学会誌, 68-558, 883 (1965)
- 2) Gross, J. F.: et al.: *Int. J. Heat Mass Transfer*, 3-3, 198 (1961)
- 3) Baron, J. R.: *ARS J.*, 32-7, 1053 (1962)
- 4) Sparrow, E. M., et al.: *Trans. ASME, Ser. C.*, 86-3, 311 (1964)
- 5) Tewfik, O. E.: *Int. J. Heat Mass Transfer*, 7-4, 409 (1964)
- 6) Sparrow, E. M., et al.: *Trans. ASME, Ser. C.*, 86-4, 508 (1964)
- 7) Sparrow, E. M., et al.: *AIAA J.*, 2-4, 652 (1964)
- 8) Gollnick, A. F.: *Int. J. Heat Mass Transfer*, 7-7, 699 (1964)
- 9) Sparrow, E. M., et al.: *Trans. ASME, Ser. C.*, 87-3, 321 (1965)
- 10) Sparrow, E. M., et al.: *AIAA J.*, 3-7, 1341 (1965)
- 11) Pun, W. M., et al.: *Proc. 3rd. Int. Heat Transfer Conf.*, 3, 15 (1966)
- 12) Hirschfelder, J. O., et al.: "Molecular Theory of Gases and Liquids", §8, John Wiley & Sons, Inc., New York (1964)
- 13) Hartnett, J. P., et al.: *Trans. ASME*, 79-2, 247 (1957)
- 14) Sparrow, E. M., et al.: *Int. J. Heat Mass Transfer*, 9-1, 53 (1966)
- 15) Stewart, W. E., et al.: *Int. J. Heat Mass Transfer*, 5-12, 1149 (1962)
- 16) Prober, R., et al.: *Int. J. Heat Mass Transfer*, 6-3, 221 (1962)
- 17) Sparrow, E. M., et al.: *Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf.*, 3, 15 (1966)
- 18) Gill, W. N., et al.: *Int. J. Heat Mass Transfer*, 8-8, 1135 (1965)
- 19) Sparrow, E. M., et al.: *Trans. ASME, Ser. C.*, 86-4, 508 (1964)
- 20) Sparrow, E. M., et al.: *Int. J. Heat Mass Transfer*, 9-1, 53 (1966)
- 21) Adams, A., et al.: *J. A. I. Ch. E.*, 12-4, 642 (1966)
- 22) Carter, L. F., et al.: *J. A. I. Ch. E.*, 10-3, 330 (1964)
- 23) Hartnett, J. P., et al.: *J. Aero/Space Sci.*, 27-8, 623 (1960)
- 24) Torii, K., et al.: *Proc. 3rd Int. Heat Transfer Conf.*, 3, 34 (1966)
- 25) Torii, K., et al.: 機械学会 726 回講演会前刷, 25 (1964)
- 26) Wooldridge, C. E., et al.: *AIAA J.*, 4-11, 2009 (1966)
- 27) Spalding, D. B.: *AIAA J.*, 3-5, 965 (1965)
- 28) Tanaka, H., et al.: 機械学会論文集, 32-242, 1550 (1966) および *J. A. I. Ch. E.*, 13-1, 194 (1967)

XXII-11 攪 拌 槽 伝 熱*

村 上 泰 弘**

Chapman^{11,12)} の総説に詳しい。伝熱係数は Heat flux を壁温度と流体側温度の代表値差で除して求めるが、こ

は じ め に

装置工業の分野でもっとも利用度の高い装置の一つに攪拌槽があるが、伝熱操作の面では理論的な体系化が遅れており不明確な点が多い。機構の解明という立場からの文献もきわめて少なく、問題点の所在を明らかにすることも意味あることと考え全般的な現状の紹介という点に留意してまとめた。

1. ニュートン流体に関する研究

1-1 平均的伝熱係数 ($\bar{h}_j$) を中心とする研究

実用に供せられている諸相関式はすべてこれに属するが、翼の種類によって多少異なっている。これら諸式の適用範囲、使用法については E. J. Ackley¹⁾, F. F.

Fig. 1

Wall temperature profile ($Re=2.1 \times 10^5$)

* 昭和 42 年 2 月 27 日 受理

** Yasuhiro Murakami 九州大学化学機械工学科

Fig. 2 An example of measuring temperature profile in the agitated vessel

Fig. 3 Mixing vessel and heat-transfer probe

Fig. 4

Point heat-transfer coefficients in a mixing vessel

これらの要因について検討した例は少ない。図1、図2にF. Strek²³⁾、水科¹⁶⁾らの壁温度、流体内部温度分布の実測例を示した。これらの知見から水科¹⁶⁾らは攪拌槽壁側伝熱係数の遷移域の問題を明らかにした。また代表的な各種攪拌翼特性を $(b \sin \theta / H)^{0.15} (n_p)^{0.15}$ なる無次元項 (冷却管の場合は H を H_c ¹⁸⁾ とする) で統一している¹⁶⁾。以上の研究はほとんどすべて乱流域に属するものであるが、層流域は実用上あまり意味がなく、むしろ掻き取り型^{6,7,13,15,20-22)}、ドラフト付螺旋型翼¹⁹⁾などが熱移動現象の高効率化には望ましい。今後両者の連続的かつ統一的な現象把握、邪魔板効果、冷却(加熱)管群の

槽壁への熱移動現象の妨害作用¹⁶⁾などが解明されることが必要である。最近 W. T. Appleton³⁾らは冷却管壁表面粗さの研究で高 Pr 域と低 Pr 域について伝熱挙動の差異を論じている。Uhl らの本も参考になる²⁴⁾。

1.2 局所的伝熱係数 (h_j) の挙動に注目した研究

攪拌槽伝熱が学問的な体系化に成功するか否かはこの方面の研究にまところが多い。P. H. Calderbank⁹⁾らの研究は示唆に富む内容を有している。図3に実験に用いた槽、測定用 Probe を、図4に結果を示す。この Probe は槽中を任意に移動させ、伝熱量は内部より押出される凝縮量を実測する。図4-A は翼近傍のみ h_j は (L/D) の影響をうけ、翼より 5inch も離れると (L/D) の影響がないことを示している。 $\bar{h}_j$ について (L/D) の影響があまり顕著でないという水科¹⁶⁾の結果に通じるものがある。また図4-B から翼近傍では回転数依存性が $h_j \propto N^{0.78}$, 翼より遠ざかると $h_j \propto N^{0.6}$ で $\bar{h}_j \propto N^{0.67}$ (1.1 項参照) であることを考え合わせると興味深い。平板模型に基づく結論^{2,4)} が $\bar{h}_j \propto N^{0.8}$ であることについても近い将来明確な解答が期待されそうである。

1.3 他の装置系における移動現象 (熱, 物質) との関係

P. H. Calderbank¹⁰⁾らは Kolmogoroff 理論より導かれる小渦の尺度である下記 (l) と 1 次渦の大きさの尺度 (L) (攪拌槽の場合は翼径) 間の距離 (d) ($L \gg d \gg l$) の乱流場 (Isotropic Turbulence を仮定) における速度変動 $U_{(a)}$ を用いた Re 数を定義し物質・熱移動係数との相関式を導びいた。すなわち

$$l = \frac{\mu_c^{3/4}}{\rho_c^{1/2}} \left(\frac{P}{v} \right)^{-1/4} \quad (1)^*$$

$$\bar{U}_{(a)}^2 = \text{Const.} \left(\frac{P}{v} \right)^{2/3} \left(\frac{d}{\rho_c} \right)^{2/3} \quad (2)$$

$$\frac{\bar{U}_{(a)}^2 d \rho_c}{\mu_c} \propto \frac{d^{4/3} \rho_c^{2/3} \left(\frac{P}{v} \right)^{1/3}}{\mu_c} = (Re')^2 \\ = \left(\rho_c^{1/3} \left(\frac{P}{v} \right)^{1/6} \frac{d^{2/3}}{\mu_c^{1/2}} \right)^{2**} \quad (3)$$

物質移動係数 k_L と Re' は次の関係にあると仮定し, $k_L \propto D_L^{2/3}$ なる通常の関係を検討すると $x=1/3$, $y=3/2$ となる。

$$\frac{k_L d}{D_L} \propto \left(\frac{\mu_c}{\rho_c D_L} \right)^{x=1/3} \left(\frac{\rho_c^{1/3} \left(\frac{P}{v} \right)^{1/6} d^{2/3}}{\mu_c^{1/2}} \right)^{y=3/2} \quad (4)$$

すなわち、熱移動を含めて

$$k_L, \frac{h}{C_p \rho_c} \propto \left\{ \left(\frac{P}{v} \right) \mu_c / \rho_c^2 \right\}^{1/4} \left(\frac{C_p \mu_c}{\lambda} \right)^{-2/3} \quad (5)$$

* $v \propto L^3$ とおくと $(l/L)^4 = 1/(\rho_c^2 PL/\mu_c^2)$ となる。

** $v \propto L^3$, $d \propto L$ とおくと $(Re')^6 = \rho_c^2 PL/\mu_c^3$ となる。
($\rho_c^2 PL/\mu_c^3$) は水科¹⁶⁾らによっても別の観点から導びかれている。
W. S. Askew⁷⁾らの手法も水科らの着眼と同じ考え方である。

攪拌槽伝熱係数、物質移動 (固-液系, 液-液系) に関する既往の実験値は 66% の偏差で次式でまとめられた。

$$k_L (Sc)^{2/3} = \frac{\bar{h}}{C_p \rho_c} (Pr)^{2/3} = 0.13 \left[\frac{(P/v) \mu_c}{\rho_c^2} \right]^{1/4} \quad (6)$$

充填層中を流れる流体の流動損失は次式で示される。

$$\frac{P}{v} = \frac{\Delta P}{L_p} \frac{G}{\rho_c \epsilon} \quad (7)$$

$\Delta P/L$ について Chu の実験式を考慮する。

$$\frac{\Delta P}{v} = 35.4 \left(\frac{\mu_c (1-\epsilon)}{dG} \right)^{0.44} \frac{G^2 (1-\epsilon)}{d \rho_c \epsilon^3} \quad (8)$$

(7), (8) 式を (6) 式に代入し, $\epsilon=0.41$ とおくと

$$J_D = 0.69 N_{Re}^{-1/3^{9)}} \quad (9)$$

となり Fallat らの結果 ($J_D = 0.626 N_{Re}^{-0.322}$) に一致する。円管内流動については Blasius の式から次式をうる。

$$\frac{P}{v} = \frac{\Delta P d_p \rho_c}{L_p G^2} = 0.0396 (N_{Re})^{-1/4} \quad (10)$$

(10) 式を (6) 式に代入すると

$$J_H = 0.058 N_{Re}^{-1/3^{9)}} \quad (11)$$

これは $N_{Re} = 2000 \sim 20000$ で Chilton and Colburn の結果 ($J_H = 0.023 N_{Re}^{-0.2}$) に $\pm 12\%$ で一致する。(6) 式は相当のパラツキを有する相関式であるとはいえ、従来の回転速度のみを考慮した Re 数 ($L^2 N/v$) を用いた相関式のごとく、攪拌系の幾何学的相対関係によらず、 P/v が正しく評価されればエネルギー消費形態の同様な系にはすべて適用可能である点で一般的である。従来頻用されている攪拌槽の Re 数 ($L^2 N/v$) は槽内各部署の攪拌状態を正しく反映していないことは事実である。今後の研究課題の一つであるといえる。 ν は運動粘度を示す。

2. 非ニュートン流体に関する研究^{8,14,17,18)}

すべて平均的伝熱係数に基づく相関式である。槽壁側に対して P. Carreau⁸⁾ (Turbine), Blanchard¹⁴⁾ (Paddle), 水科¹⁷⁾ (Anchor) の結果がある。たとえば Carreau らは次式を求めているが, N_{Re} , N_{Pr} での見掛け粘度は異なっており不合理である。

$$N_{Nu} = 1.474 N_{Re}^{10.7} N_{Pr}^{0.33} (\mu_{aw}/\mu_a)^{-0.24/n} \quad (12)$$

各研究者の結果は攪拌翼も異なり、流動模型も異なっているので簡単に比較できない。冷却管については水科¹⁸⁾らの研究がある。以上は擬塑性流体に関するものであるが塑性流体については槽壁、冷却管に関して水科^{17,18)}らの研究があるのみである。

む す び

最近攪拌槽伝熱に関し基礎的なアプローチが種々行なわれつつあることは実用上からも好ましいことである。

記 号

b : 羽根幅, C_p : 比熱, D : 槽径, D_c : 拡散係数, d : 分散系粒子径または距離 $L \gg d \gg l$, d_p : 管径,
 G : 質量速度, H : 伝熱面高さ, H_c : 冷却管輪高さ, $\bar{h}$: 伝熱係数, h_j : 攪拌槽壁伝熱係数 (局所), $\bar{h}_j$:
 攪拌槽壁伝熱係数 (平均), J_D, J_H : J-factor (9), (11) 式, k_L : 物質移動係数, l : (1) 式, L : 攪拌翼径,
 m : Power law 係数, N : 回転数, n : Power law 指数, n_p : 攪拌羽根数, $[P/v]$: 単位容積あたり動力,
 $\Delta P/L_p$: 単位長さあたり圧力損失, ρ : 密度, μ : 粘度, λ : 熱伝導度, $(\mu_a)_a$: 高速度勾配域平衡粘度
 (無次元項)
 $N_{Nu} = \bar{h}_j D / \lambda$ (ヌッセルト数), $N_{Re} = d_p G / \mu_c$, dG / μ_c , $N_{Re}' = L^2 N^2 n_p / \gamma$ (レイノルズ数), $N_{Pr} = C_p (\mu_a)_a / \lambda$ (プラ
 ントル数), $\gamma = gcm/8 \left(\frac{6n+2}{n} \right)^n$, Pr, Sc : プラントル, シュミット数
 (添 字)
 c : 連続相, w : 壁面, b : bulk

引 用 文 献

- Ackley, E. J.: *Chem. Eng.*, **22**, Aug. 22, 133 (1960)
- Andersen, H. E.: *Chemie.-Ing.-Techn.*, **35**, 824 (1963)
- Appleton, W. T. and Brennan, W. C.: *Canad. J. Chem. Eng.*, **44**, 276 (1966)
- Askew, W. S. and Beckmann, R. B.: *I. E. C./P. D. D.*, **4**, 268 (1966)
- Askew, W. S. and Beckmann, R. B.: *ibid.*, **4**, 311 (1966)
- Bott, T. R. and Romero, J. J. B.: *Canad. J. Chem. Eng.*, **41**, 213 (1963)
- Bott, T. R. and Sheikh, M. R.: *Brit. Chem. Eng.*, **9**, 229 (1964)
- Carreau, P., Charest, G. and Corneille, J. L.: *Canad. J. Chem. Eng.*, **44**, 3 (1966)
- Calderbank, P. H. and Moo-Young, M. B.: *Int. Symposium on Distillation* P-59 (1960)
- Calderbank, P. H. and Moo-Young, M. B.: *Chem. Eng. Sci.*, **16**, 39 (1961)
- Chapman, F. F. and Holland, F. A.: *Chem. Eng.*, **72**, Janu. 18, 153 (1965)
- ibid.*, **72**, Feb. 15, 175 (1965)
- Houlton, H. G.: *Ind. Eng. Chem.*, **36**, 522 (1944)
- 伊藤竜象: 化学機械技術, 15集, P-1 (1963)
- Latinen, G. A.: *Chem. Eng. Sci.*, **7**, 263 (1958)
- 水科真郎, 伊藤竜象, 村上泰弘, 桐蔭崇: 化学工学, **30**, 719 (1966)
- 水科真郎, 伊藤竜象, 村上泰弘, 田中資俊: 化学工学, **30**, 819 (1966)
- 水科真郎, 伊藤竜象, 村上泰弘, 桐蔭崇: 化学工学, **30**, 827 (1966)
- 永田進治: 化学工場, **8**, 18 (1965)
- Skelland, A. H.: *Chem. Eng. Sci.*, **7**, 166 (1958)
- Skelland, A. H.: *Brit. Chem. Eng.*, **3**, No. 6, 325 (1958)
- Skelland, A. H., Oliver, D. R. and Tooke, S.: *Brit. Chem. Eng.*, **7**, 346 (1962)
- Strek, F.: *Int. Chem. Eng.*, **3**, 533 (1963)
- Uhl, V. W. and Gray, J. B., "Mixing Vol. 1", Academic Press (1966)

XXII-12 窯

炉*

功 刀 雅 長**

窯炉では、燃料として重油が広く使用されており、焰からの伝熱は放射伝熱が支配的であることはよく知られている。

Holliday ら¹⁾は、炭素と水素との比 $R=C/H$ が 6.36 ないし 12.57 の範囲の燃料油について、その焰の放射率 ϵ と R との関係を表わす実験式として

$$\epsilon = 0.282 \ln \frac{R-5.0}{4} + 0.002(T-200) + 0.484$$

をえている。ただし T は油の沸点 ($^{\circ}\text{C}$) である。さら

に焰中の煤の量および放射率を測定し、焰の放射率 ϵ は次の式で与えられることを述べている。

$$\epsilon = 1 - e^{-0.0025 LC}$$

ただし、 L は焰の厚さ (cm), C は煤の量 (mg/l) である。

窯炉では、重油バーナーとしては、空気あるいは水蒸気の高速によって油を霧化する形式のバーナーが比較的良好に使用されているので、Hubbard²⁾はこの形式の重油バーナーを使用し、バーナーのスラスト、霧化用空気量、バーナー・チップの構造、霧化用流体の種類などの

* 昭和 42 年 3 月 2 日 受理

** Masanaga Kunugi 京都大学 工学部工業化学科