HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	2成分固液流動層の混合層濃度式
Author(s)	船水, 尚行; 高桑, 哲男
Citation	北海道大學工學部研究報告, 141, 19-26
Issue Date	1988-07-29
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/42108
Type	bulletin (article)
File Information	141_19-26.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第141号（昭和63年）

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University. No. 141 (1988)

2成分固液流動層の混合層濃度式

船水尚行　高桑哲男

（昭和63年3月31日受理）

Force balance equations for particles in binary-solid liquid fluidized beds

Naoyuki FUNAMIZU, Tetsuo TAKAKUWA

(Received March 31, 1988)

Abstract

The grains of binary media water filters are cleansed by upward backwashing with water at a rate sufficient to fluidize the entire bed without mixing two kinds filter media. In a binary-solid liquid fluidized bed complete segregation of two kinds of particles differing in size and density is observed at a liquid velocity less than the critical velocity. However beyond the critical velocity mixing of particles occurs. When calculating the critical velocity, a model to predict particle concentrations in a mixed bed is required.

The model is developed on the basis of the force balance equations of each particle (gravitational, buoyant and drag forces) and the assumption that the drag force acting on the particle 1 in the bed consisting of particle 1 and 2 is equal to that in the equivalent mono component bed of particle 1. The validity of the present model is tested against experimental data.

1. はじめに

水処理工学の分野で用いられているろ過池の高容量化の一つの方策として複層ろ過池があげられる。複層ろ過池はろ層の上部が低密度・大粒子，下部が高密度・小粒子より構成され，ろ層の逆流洗浄後もこの逆粒度構成が維持される必要がある。複層ろ過池を構成する二者のろ材の粒径，密度と逆流洗浄時の空塔速度の関係については，筆者らが逆流洗浄時にろ材が完全に混合するとして，洗浄終了後の干渉沈降過程で二つのろ材が完全に分離・堆積する条件を見出している[1]。しかし，複層ろ過池のろ材構成条件を検討するためには，逆流洗浄時にろ材が完全に混合する場合のみを扱うのでは不十分であり，逆流洗浄時のろ材の分離・成層状況についても考慮する必要がある。すなわち，複層ろ過池の逆流洗浄操作を粒径と密度の異なる2成分粒子群の流動化現象としてとらえ，2成分固液流動層の分離・成層現象について検討する必要がある。

粒径と密度の異なる2成分粒子群の流動化現象の特徴は，空塔速度によって粒子群の分離・成層状態が変化することである[2)~5)]。すなわち，空塔速度Vと各粒子の分離界面の高さの関係を模式

衛生工学科　下水工学講座

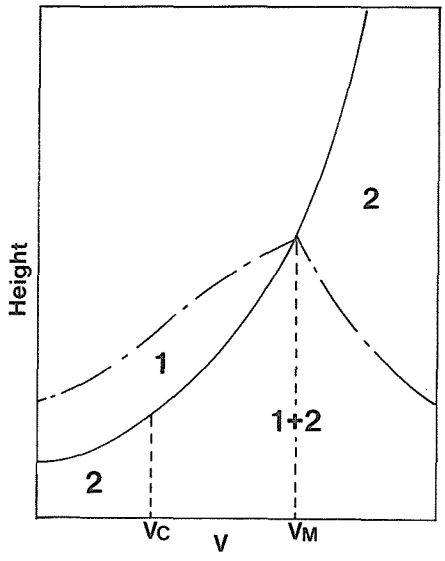

図1 2成分固液流動層の成層一模式図

的に示すと図1のようになり，$V<V_C$では二者が完全に分離し，$V_C<V<V_M$では下部に粒子1と2の混合層，上部に粒子1より成る層，$V_M<V$では下部に混合層，上部に粒子2より成る層ができる。

複層ろ過池のろ材構成条件，逆流洗浄条件を検討するためには，二つの粒子の粒径，密度と混合開始空塔速度 V_Cの関係を表現する必要があり，このためには混合層の各粒子の濃度と空塔速度の関係すなわち混合層濃度式が必要である。既往の混合層濃度式としてはMoritomiら[6]，Gibilaroら[7]によって提案されたものがある。しかし，Moritomiらの式は対象流れ領域がStokes則の成り立つ領域に限られているのでろ材粒子には適用できず，また，Gibilaroらの式は混合開始空塔速度の正確な予測にはむいていない。

そこで，本論文では複層ろ過池のろ材構成条件を検討する基礎として，広い流れ領域に適用可能な混合層濃度式を提案し，その妥当性を検討する。

2. 混合層濃度式

定常状態の固液流動層では各粒子にはたらく重力，浮力ならびに抗力がつり合っていると考えることができる。すなわち混合層内の粒子1と2について力のつり合いの式は

$$\frac{\pi}{6}d_1^3(\rho_1-\rho_b)g=\frac{1}{2}\rho_f\left(\frac{V}{1-f_1-f_2}\right)^2\cdot\frac{\pi}{4}d_1^2C_{D1} \tag{1}$$

$$\frac{\pi}{6}d_2^3(\rho_2-\rho_b)g=\frac{1}{2}\rho_f\left(\frac{V}{1-f_1-f_2}\right)^2\cdot\frac{\pi}{4}d_2^2C_{D2} \tag{2}$$

となる。ここで d_1，d_2はそれぞれ粒子1，2の粒径，ρ_1，ρ_2は密度，ρ_fは流体の密度，f_1，f_2は混合層内の粒子1，2の体積濃度，ρ_bは混合層の密度であり

$$\rho_b=\rho_1f_1+\rho_2f_2+\rho_f(1-f_1-f_2) \tag{3}$$

と表現される。また，C_{D1}，C_{D2}は抗力係数である。

式(1)，(2)中の抗力係数と空塔速度，各粒子の濃度，粒径の関係が与えられれば，式(1)，(2)を連立して解くことによって各粒子の濃度f_1，f_2を計算することが可能となる。しかし，粒径の異なる粒子が共存する状態での粒子の受ける抗力の表現は不明な点が多いので，本研究では，「混合層内で体積濃度f_1（f_2）の粒子1(2)の受ける抗力は相当体積濃度f_1^*（f_2^*）の粒子1(2)のみから成る流動層中の抗力に等しい」との仮定をおいて抗力の表現を試みる。

粒子1(2)の相当体積濃度f_1^*（f_2^*）の表現としては，混合層内では粒子間距離や粒子表面積などの抗力に影響を与える因子の効果が$d_1=d_2$の均一粒子群の場合とは異なり，同じ体積濃度f_1，f_2であっても二者の粒径によって変化すると予想されるので，次式の形を考える。

$$f_1^*=f_1+(d_1/d_2)^a f_2 \tag{4}$$

$$f_2^*=f_2+(d_2/d_1)^a f_1 \tag{5}$$

ここで，aは実験によって求めるべき指数である。このとき，上述の仮定により式(1)，(2)の右辺はそれぞれ

$$\frac{1}{2}\rho_f\left(\frac{V}{1-f_1^*}\right)^2\cdot\frac{\pi}{4}d_1^2 C_{D1}^* \tag{6}$$

$$\frac{1}{2}\rho_f\left(\frac{V}{1-f_2^*}\right)^2\cdot\frac{\pi}{4}d_2^2 C_{D2}^* \tag{7}$$

と表現され，式(1)，(2)中の抗力係数C_{D1}，C_{D2}は

$$C_{D1}=\left(\frac{1-f_1-f_2}{1-f_1^*}\right)^2\cdot C_{D1}^* \tag{8}$$

$$C_{D2}=\left(\frac{1-f_1-f_2}{1-f_2^*}\right)^2\cdot C_{D2}^* \tag{9}$$

となる。式中のC_{D1}^*（C_{D2}^*）は粒子1(2)のみから成る均一流動層における抗力係数であり，粒子1(2)の濃度，粒径，空塔速度および流体の密度，粘度の関数として表現される。

均一流動層内の粒子に関する抗力係数の表現は，従来より多数提案されている均一粒子群の濃度式[7)~10)]を変形することによっても得られるが，対象流れ領域や式の精度を考慮し，ここでは筆者らが作成した実験式[10)]を用いることにする。この実験式によれば

$$C_D^*=24/Re_f^* \qquad (Re_f^*\leqq 1) \tag{10}$$

$$C_D^*=22.222/Re_f^*+1.778 \qquad (1\leqq Re_f^*\leqq 10) \tag{11}$$

$$C_D^*=12.65/Re_f^{*0.5} \qquad (10\leqq Re_f^*) \tag{12}$$

となる。ここでRe_f^*は濃度を考慮したレイノルズ数で

$$Re_f^*=\frac{V\,d\,\rho_f}{\mu_f\,(1-f^*)}\{(1.47-0.521\log Re_0)\cdot(0.55-f^*)+0.05\} \tag{13}$$

と与えられる。Re_0は粒子の単粒子自由沈降速度U_0を代表速度としたレイノルズ数

$$Re_0=U_0 d\,\rho_f/\mu_f \tag{14}$$

であり，μ_fは流体の粘度である。また，式(11)は式(10)のStokes領域と式(12)のAllen領域の遷移区間すなわち$1\leqq Re_f^*\leqq 10$の間を円滑に内挿するように筆者らが作成した式である。式(10)～(12)は均一流動層におけるレイノルズ数と抗力係数の関係が単粒子自由沈降における両者の関係に一致することを示している。

最後に実験結果を用いた式(4)，(5)中の指数aの決定方法を示す。式(1)，(2)，(8)，(9)に実測の空

塔速度 V と混合層の各粒子の体積濃度 f_1, f_2の値を代入すると，式(1), (2)の右辺の抗力の項は相当体積濃度 f_1^*, f_2^*のみが未知数となり，適当な数値計算法により f_1^*, f_2^*の値を求めることができる。次に，$f_1^*-f_1$と f_2 ($f_2^*-f_2$と f_1) の関係をプロットすることにより $(d_1/d_2)^a$, $(d_2/d_1)^a$の値が求まり，粒径比が既知なので指数 a の値を求めることができる。

3. 実　　験

実験装置は内径5 cm，高さ 2 m の透明アクリル樹脂製の円管を用い，整流板には厚さ 5 mm の焼結金属板を用いた。流動化には札幌市水道水を循環使用し，流量調節弁で空塔速度を変化させた。実験に使用した粒子の体積平均径と密度を表1に示す。各粒子は JIS 標準ふるいで粒径をそろえた上，まえもって流動化させたときの圧力勾配が一定である部分を抜き取って調製した。

実験では二者の粒子が完全に混合する状態（図1の空塔速度 V_Mの状態）を作り，この状態での界面高さ，空塔速度ならびに水温を測定した。また，2成分固液流動層の実験に先立ち，各粒子を単独で流動化させたときの空塔速度と体積濃度の関係を測定し，今回用いた均一流動層の濃度式による計算値と実験値が一致するように粒径を変化させたときの best-fit 径を求めた。表1に各粒子の best-fit 径を示す。

表1　実験に用いた粒子

記　号	ふ　る　い (μm)	体積平均径 (μm)	best-fit 径 (μm)	密　　度 (g/cm^3)
G100	84～105	97.9	91.0	2.473
G160	149～177	159.7	148.0	2.476
G200	177～210	203.0	192.0	2.480
C400	350～420	392.8	350.0	1.418
C550	500～590	558.8	545.0	1.386
C750	710～840	747.1	770.0	1.398

4. 実験結果と考察

はじめに本実験に用いた各粒子を単独で流動化させた場合の空塔速度と体積濃度の関係の実験結果と best-fit 径を用いた計算結果の関係を図2に示す。また実験結果を整理して求めた Re_f^*と C_D^*の関係を図3に示す。これらの図より，今回用いた濃度式が各粒子の層膨張特性をよく表現しているといえる。

次に，混合層内の各粒子の体積濃度と空塔速度の関係の実測例を図4に示す。図4は G160と C550を用いた実験結果であり，図中の破線は各粒子をそれぞれ単独で流動化させた場合の空塔速度と体積濃度の関係を示している。同図より，G160では単独の場合よりわずかに体積濃度が減少していることがわかる。一方，C550では混合開始後，空塔速度の増加とともに体積濃度が増加し，単独の場合とは異なった挙動を示している。ここで，図4の結果を利用して式(4), (5)中の指数 a の値を求める。いま粒子1を C550，粒子2を G160として，2章で示した手順により f_1^*と f_2^*の値を

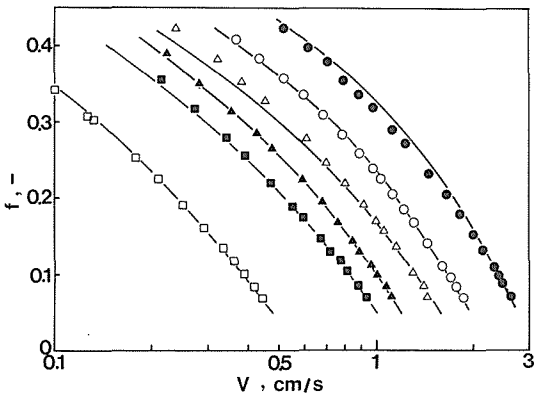

図2　空塔速度と濃度の関係（均一流動層）

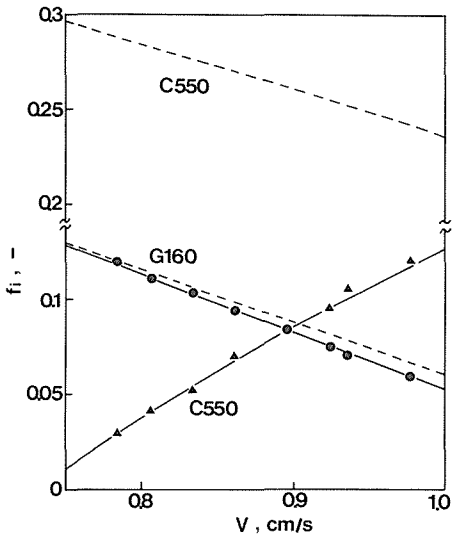

図4　混合層の各粒子の濃度と空塔速度の関係－1（G160＋C550）

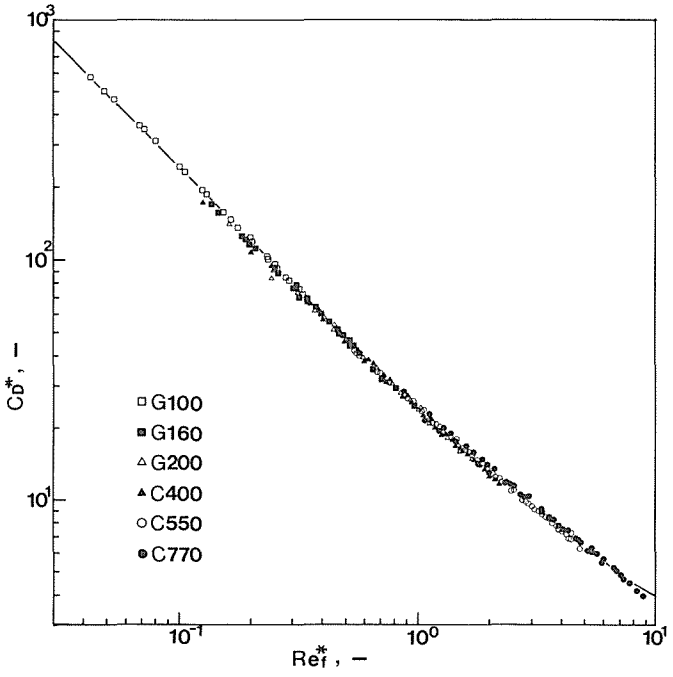

図3　Re_f^*とC_D^*の関係（均一流動層）

求め，$f_1^*-f_1$とf_2の関係をプロットすると図5のようになる。$f_1^*-f_1$とf_2の関係は原点を通る傾き約1.55の直線となり，粒径比d_1/d_2の値が約3.68であることから，a＝1/3を得る。一方，$f_2^*-f_2$とf_1の関係は図6のようになる。粒子1の場合と比較して粒子2では他粒子が存在することによる影響が小さく，濃度測定上の誤差によりプロットにかなりのバラツキがみられるが，図中の直線

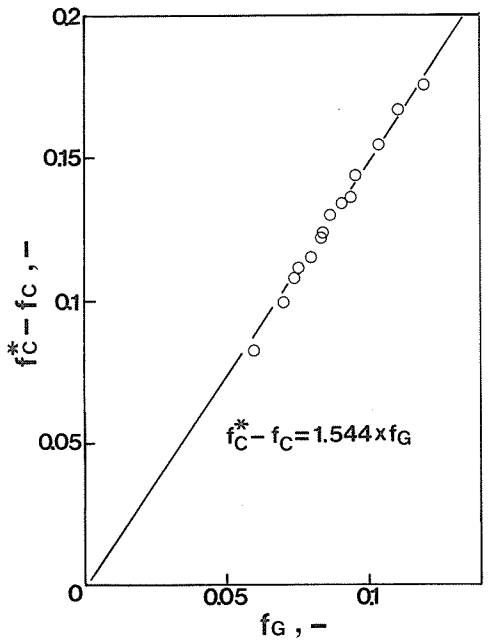

図5 粒子1の相当体積濃度と粒子2の濃度の関係

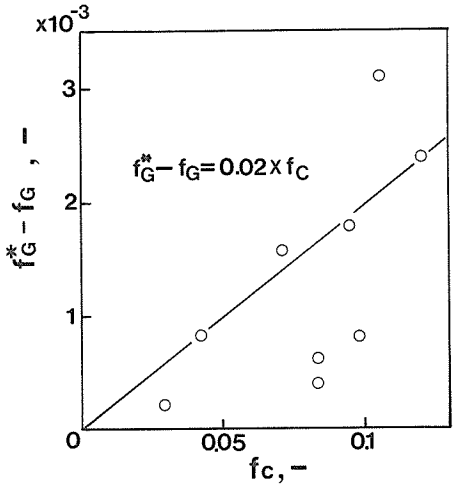

図6 粒子2の相当体積濃度と粒子1の濃度の関係

のような関係をもつとすると，aの値として約3を得る。以上により，低密度大粒径粒子l（ここでは粒子1），高密度小粒径粒子h（粒子2）の相当体積濃度は

$$f_l^* = f_l + (d_l/d_h)^{1/3} f_h \quad (15)$$

$$f_h^* = f_h + (d_h/d_l)^3 f_l \quad (16)$$

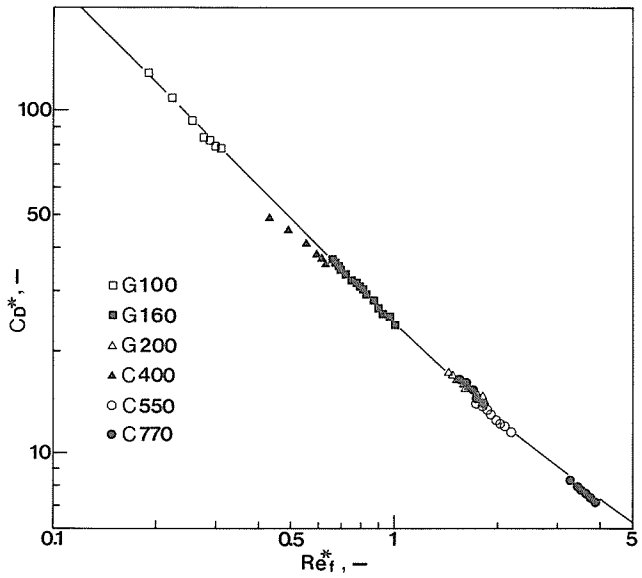

図7 Re_f^* と C_D^* の関係（2成分流動層）

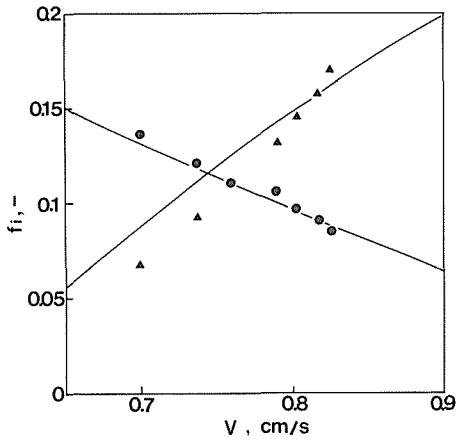

図8　混合層の各粒子の濃度と空塔速度の関係－2（G160＋C800）

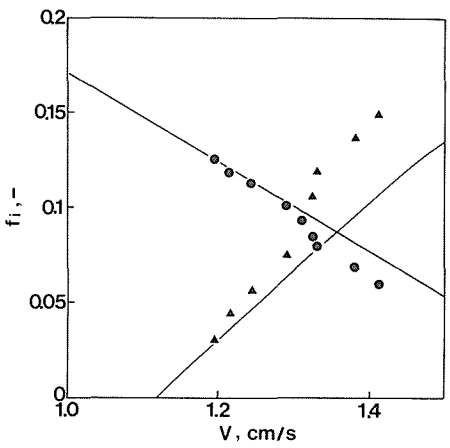

図9　混合層の各粒子の濃度と空塔速度の関係－3（G200＋C800）

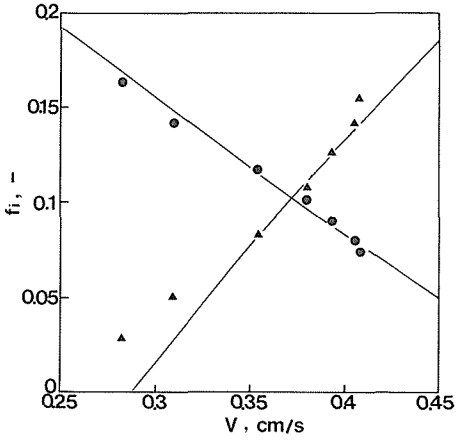

図10　混合層の各粒子の濃度と空塔速度の関係－4（G100＋C400）

と表現される。はじめに，式(15)，(16)で各粒子の相当体積濃度を表現し，実測の各粒子の体積濃度と空塔速度の値より求めた Re_f^* と C_D^* の関係を図7に示す。同図より，均一粒子群の場合と同じく2成分粒子群の固液流動層の混合層内においても，Re_f^* と C_D^* の関係は単粒子自由沈降時のレイノルズ数と抗力係数の関係と一致するとみなすことができ，本濃度式の導出過程で用いた仮定が妥当であったことがわかる。次に，式(15)，(16)と同じaの値を用い，混合層内の各粒子の体積濃度と空塔速度の関係を計算した結果と実験結果の比較例を図4，8～10に示す。混合層内の各粒子の体積濃度は，実験に用いた粒子の層膨張特性にきわめて敏感に影響されることを考慮すれば，計算結果はほぼ満足できる結果を与えていると考えられる。

5. おわりに

2成分固液流動層の混合層内粒子体積濃度を表現する濃度式について検討し，以下の知見を得た。

(1) 混合層内の粒子について重力，浮力，抗力のつり合いの式をたて，抗力の計算には，粒径の異なる他粒子jの体積濃度を注目する粒子iの体積濃度に換算する係数 $(d_i/d_j)^a$ を提案し，式(1)，(2)，(8)，(9)の濃度式を得た。

(2) C550とG160を用いた流動化実験により，低密度大粒径粒子について $a=1/3$，高密度小粒径粒子については $a=3$ を得た。

(3) また，実測の各粒子の体積濃度と空塔速度の値より計算された Re_t^* と抗力係数 C_D^* の関係は単粒子自由沈降時のレイノルズ数と抗力係数の関係と一致し，本濃度式導出の際の仮定の妥当性が示された。

(4) 上記の結果を用いた各粒子の体積濃度の計算結果は実測結果とほぼ一致し，本式の妥当性が示された。

おわりに，本研究の実験にあたり当時の大学院学生上野直樹氏のご協力を得た。また，本研究の一部は文部省科学研究費一般研究C，奨励研究Aの援助によるものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1) 船水尚行，高桑哲男：工学部研究報告，第128号（昭60），p. 29～39
2) G. Van Duijn and K. Rietema : Chem. Eng. Sci., Vol. 37 (1982), No. 5, p. 727～733
3) H. Moritomi, T. Iwase and T. Chiba : Chem. Eng. Sci., Vol. 37 (1982), No. 12, p. 1751～1757
4) N. Epstein and B. P. LeClair : Chem. Eng. Sci., Vol. 40 (1985), No. 8, p. 1517～1526
5) H. Moritomi, T. Yamagishi and T. Chiba : Chem. Eng. Sci., Vol. 41 (1986), No. 2, p. 297～305
6) L. G. Gibilaro, et al. : Chem. Eng. Sci., Vol. 41 (1986), No. 2, p. 379～386
7) J. F. Richardoson and W. N. Zaki : Trans. Jnstn. Chem. Engers., Vol. 32 (1954), p. 35～53
8) B. Barunea and J. Mizrahi : The Chem. Eng. J., Vol. 5 (1973), p. 171～189
9) L. G. Gibilaro, et al. : Chem. Eng. Sci., Vol. 40 (1985), No. 10, p. 1817～1823
10) 高桑哲男，船水尚行：第39回全国水道研究発表会講演集（昭63）