

揺動攪拌に関する実験的研究

加藤, 禎人

<https://doi.org/10.11501/3110982>

出版情報 : 九州大学, 1995, 博士 (工学), 論文博士
バージョン :
権利関係 :

Chapter 4

動力特性

4.1 緒言

混合操作において攪拌所要動力は、攪拌槽の設計および操作の点から最も重要なパラメータである。モーターの容量決定は勿論、混合時間や物質移動特性など攪拌効果の評価は、攪拌所要動力を基準にして議論される。したがって、揺動攪拌においてもその所要動力についての定量的な知見が、必要不可欠である。しかしながら、揺動攪拌はこれまで実験室レベルでの取扱いしかなされてこなかったため、所要動力の定量的な評価もまったくなされていないのが現状である。

本章では、揺動攪拌における装置設計上の指針となる評価基準および最適操作条件を検討することを目的とする。そして、揺動攪拌所要動力の推算式を提出する。また、単位容積あたりの所要動力を基準にして、従来用いられている翼を用いた攪拌と揺動攪拌の混合性能を比較検討する。

4.2 実験装置および実験方法

揺動攪拌に必要な所要動力を、ここでは揺動攪拌所要動力と呼ぶ。

揺動攪拌所要動力は、翼を備えた攪拌槽の所要動力のようにトルクから測定する事ができないため、消費電力から測定した。消費電力の測定には、電力測定器(日置電機(株)製デジタルパワーハイテスタ 3183)を用いた。また、電圧降下の外乱を最小限に抑えるためにスタビライザー(日本スタビライザー(株)製 AC-Power Supply ACR-1001)を使用した。実験装置の概略を Fig.4.1 に示す。

揺動攪拌所要動力は槽内の流体が消費したエネルギーと定義し、攪拌操作時の消費電力と槽中の液面に蓋を取り付け自由表面を取り除いた密閉槽として操作したときの消費電力の差から求めた。このとき、有効数字が2桁以上となるように、攪拌槽を動かす機械的消費電力を含めた電力計の表示電力に対し、攪拌消費動力の占める割合が5%以上のものを採用した。

ただし、密閉槽における動力測定は、蓋を取り付ける煩雑さを省くために、攪拌液の代

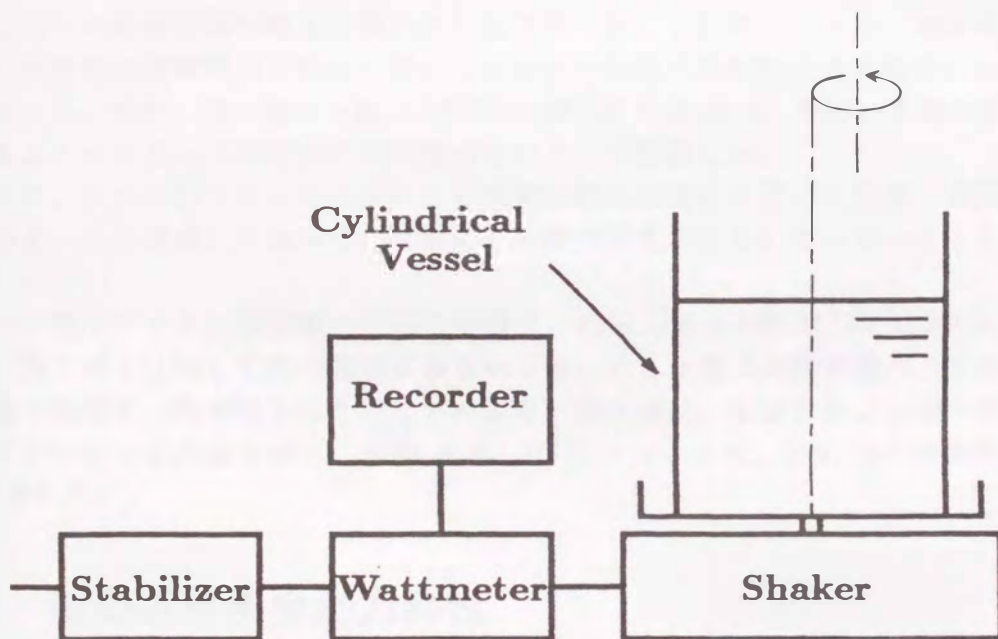


Fig.4.1 Experimental apparatus for power consumption

Table 4.1: Experimental Conditions

D [m]	0.140, 0.173, 0.206
d [m]	0.01 ~ 0.04
N [s ⁻¹]	1.7 ~ 3.3
ν [m ² · s ⁻¹]	$0.9 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-3}$
ρ [kg · m ⁻³]	997 ~ 1260

わりに等しい質量を持つ粘土を槽内にいれて行った。これについては、あらかじめ蓋を取り付けた場合の消費電力と粘土を用いた場合の消費電力に統計的な有意差がないことを確認している。また、別の振とう器 (TAITEC(株) 製 R-30mini) を用いて動力測定し、装置が異なることによって測定値に有意差がないことも確認した。

さらに、アルミ粉トレーサー法による流動状態の可視化を行った結果、密閉槽では流体粒子がまったく運動しておらず、流動による動力消費がなされていないことも定性的に確認している。

用いた槽はアクリル樹脂製の平底円筒槽で、内径 D が 0.140, 0.173, 0.206m の 3 種類である。第 2 章と比較して槽の種類が少ないのは、小さな槽では消費電力が小さすぎて、精度の高い測定データが得られないことによる。攪拌液は、水道水および種々の粘度に調製したグリセリン水溶液を用い、液深 H は、 $H/D = 1$ とした。これらの実験条件は Table 4.1 に示した。

4.3 揺動攪拌所要動力特性

揺動攪拌所要動力の測定結果の一例を Fig.4.2 に示す。本実験範囲の低粘性流体 (粘度約 10^{-2} Pa · s 以下における実験範囲のオーダー) では、混合限界回転数 N_C 以下の回転数においてほとんど動力消費が認められなかった。また、 N_C 以下の回転数で操作することは完全混合状態を得るという目的に対しては不適當なので、所要動力はすべて N_C 以上の回転数で測定した。

また、Fig.4.3 に示すように流体粘度が高くなってくると本実験装置の制御可能な回転数の範囲内 ($0 \sim 3.3$ s⁻¹) で、ある回転数を境に動力が低下する現象が観察された。Fig.4.3 では回転数が 2.9 s⁻¹ の時、動力は極大値となり、それ以上の回転数では動力は小さくなっていく。

この傾向は、Fig.4.4 に示すように槽壁部液面上昇高さ h に対しても同様であり、動力が極大となる回転数以上の回転数では液高さが低くなっていく。そして、 h と P が極大値を取る回転数はほぼ一致している ($N_{max,P} = N_{max,h}$)。従って、揺動攪拌所要動力は槽壁部液面上昇高さに大きく影響を受けることが示唆される。

また、動力が低下する場合、どのようなフローパターンになっているか観察した結果を Fig.4.5 に示す。この写真は、槽と同期回転するカメラで槽を側面から撮影したものであ

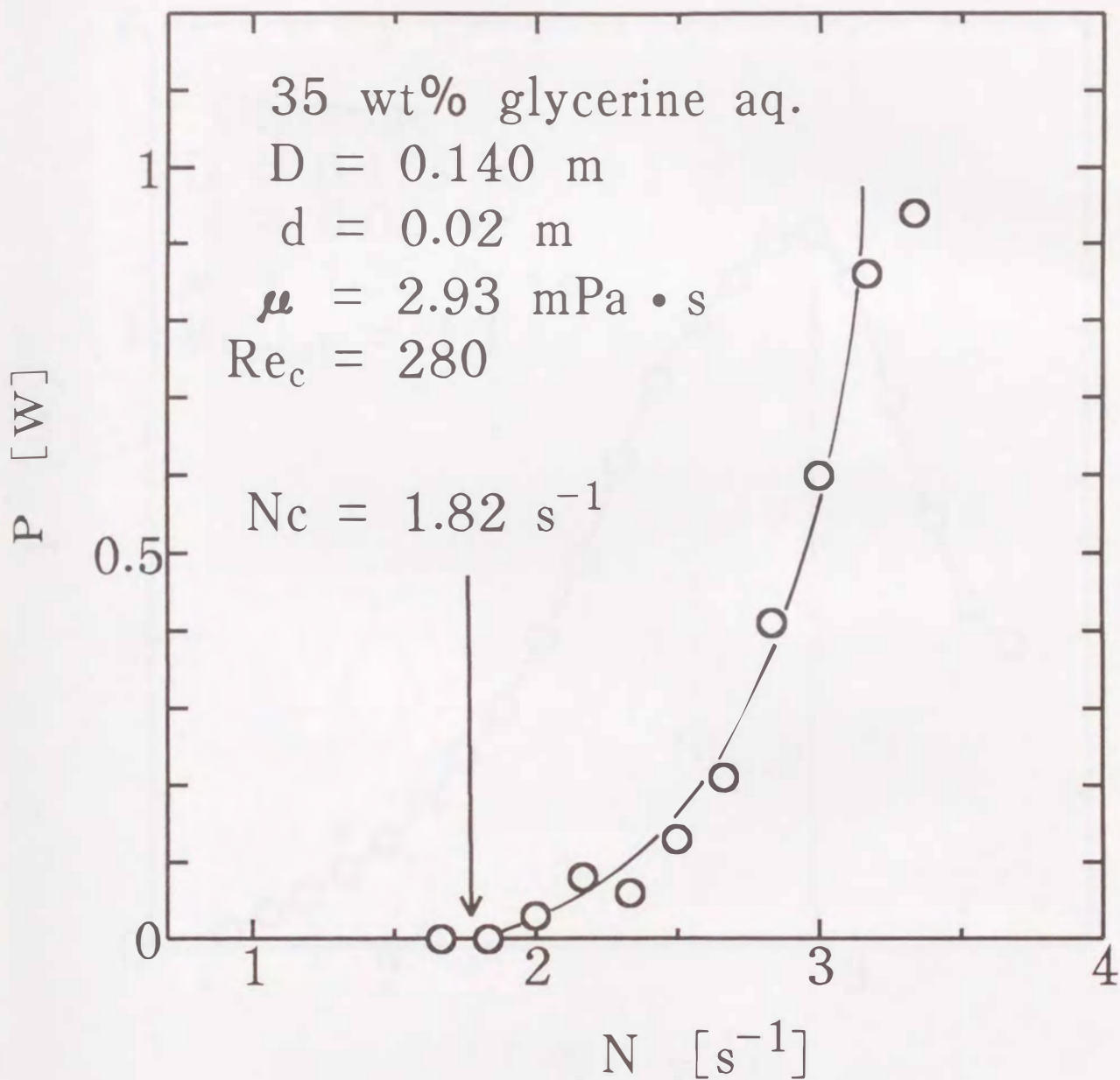


Fig.4.2 Effect of circulating frequency on power consumption

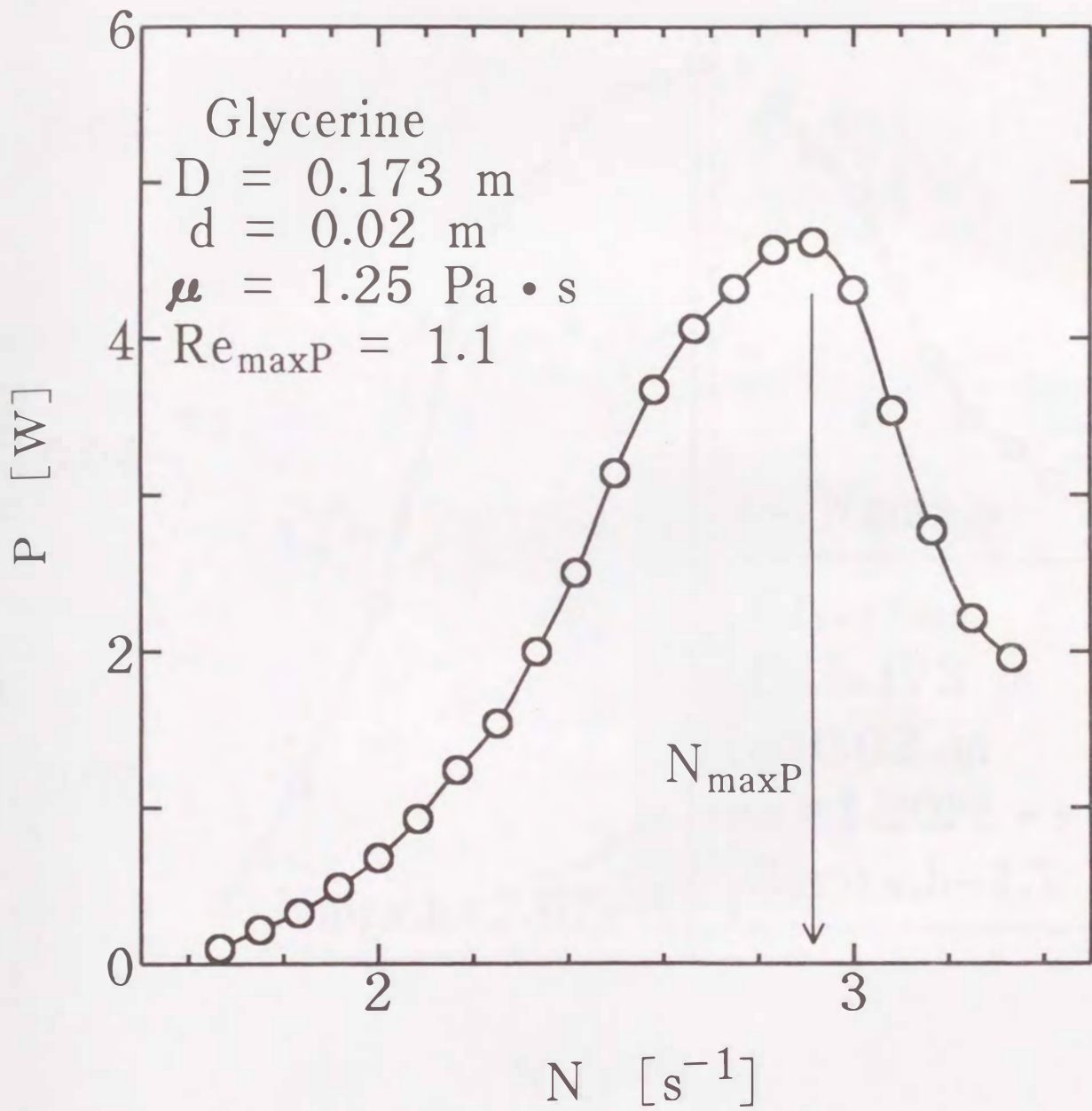


Fig.4.3 Effect of circulating frequency on power consumption

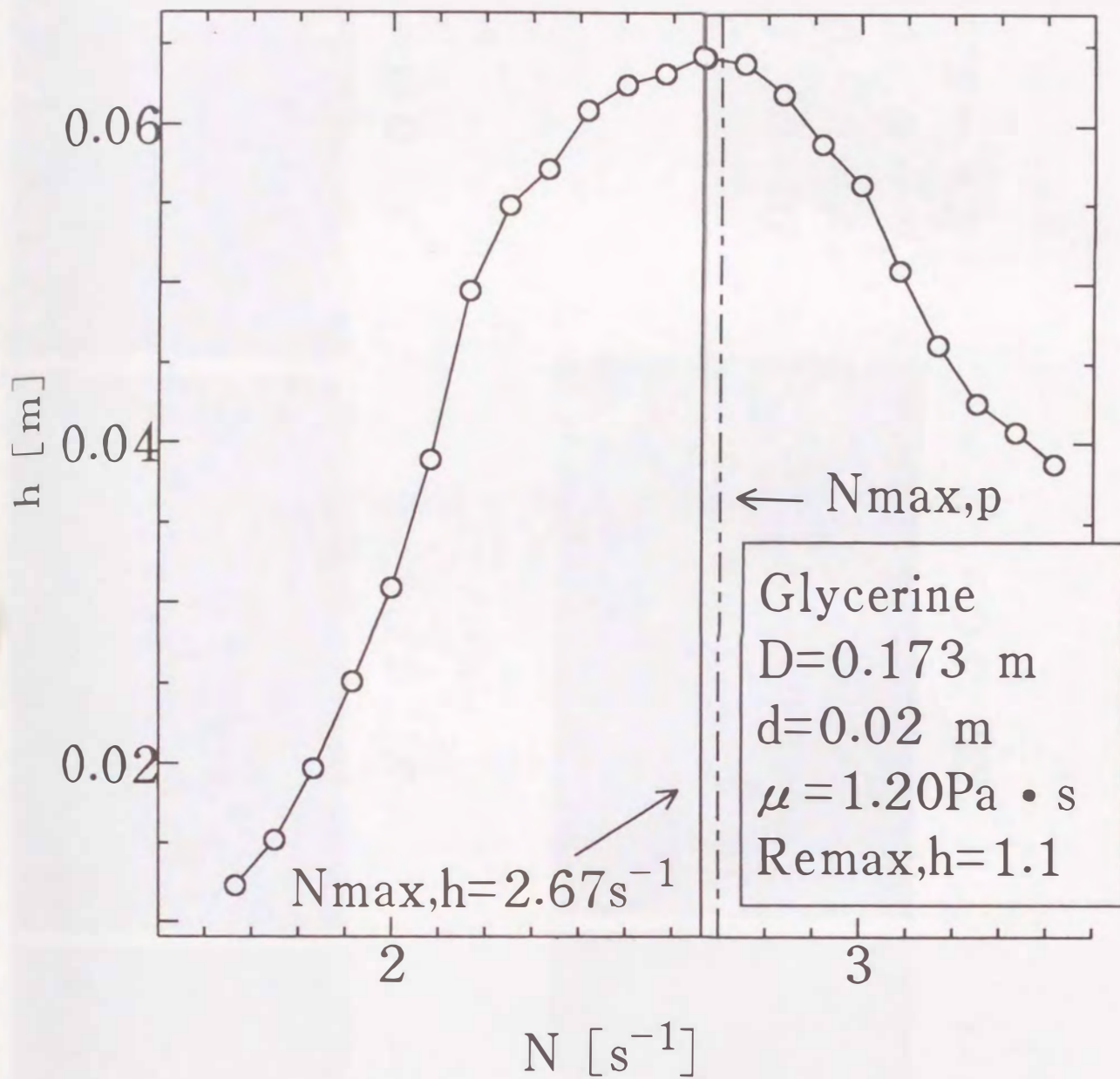


Fig.4.4 Effect of circulating frequency on elevated height of liquid surface on vessel wall



2. 17 s⁻¹



2. 40 s⁻¹

(*N_c*)



3. 00 s⁻¹



3. 30 s⁻¹

(*N_{max, p}*)



3. 50 s⁻¹

$D = 0.173 \text{ m}$

$d = 0.01 \text{ m}$

$\mu = 0.05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

$Re = 5.4 \sim 8.8$

Fig.4.5 Typical flow patterns

る。可視化手法は第2章と同様アルミ粉トレーサー法を用いている。この場合、回転数を上げて行けば混合限界回転数を境にフローパターンは、流体粒子が同じ場所で小さな円運動をする進行波型から、流体粒子が主に水平方向に槽内を旋回する旋回流型に変化しているが、動力の極大値を越える回転数では、進行波型に逆戻りしていることが読み取れる。フローパターンが進行波型であることは完全混合には不適當であるので、動力の極大値を越える回転数で操作することは、混合操作の観点からは望ましくない。

この現象について、槽径、回転直径、液粘度を変えて極大値を示す回転数 $N_{max,P}$ を測定した結果、次式を満足する条件で所要動力が極大値をとることが解った。次式の相関の精度は相対誤差で約3%であり、非常に精度良く相関できる。ただし、 $Re > 5$ の低粘度側では、実験装置の回転数の上限が $3.3s^{-1}$ であるため、 $N_{max,P}$ 値は実測できなかった。

$$Fr_{max,P} = 0.135(Re_{max,P})^{0.166} \quad (4.1)$$

ここで、 $Fr_{max,P}$ は $(N_{max,P})^2 D/g$ 、 $Re_{max,P}$ は $N_{max,P} d^2/\nu$ で定義される Fr 数および Re 数である。

4.4 揺動攪拌の最適操作条件

第2章では、混合操作を可能にする最小の回転数である混合限界回転数 N_C を次式で提示した。

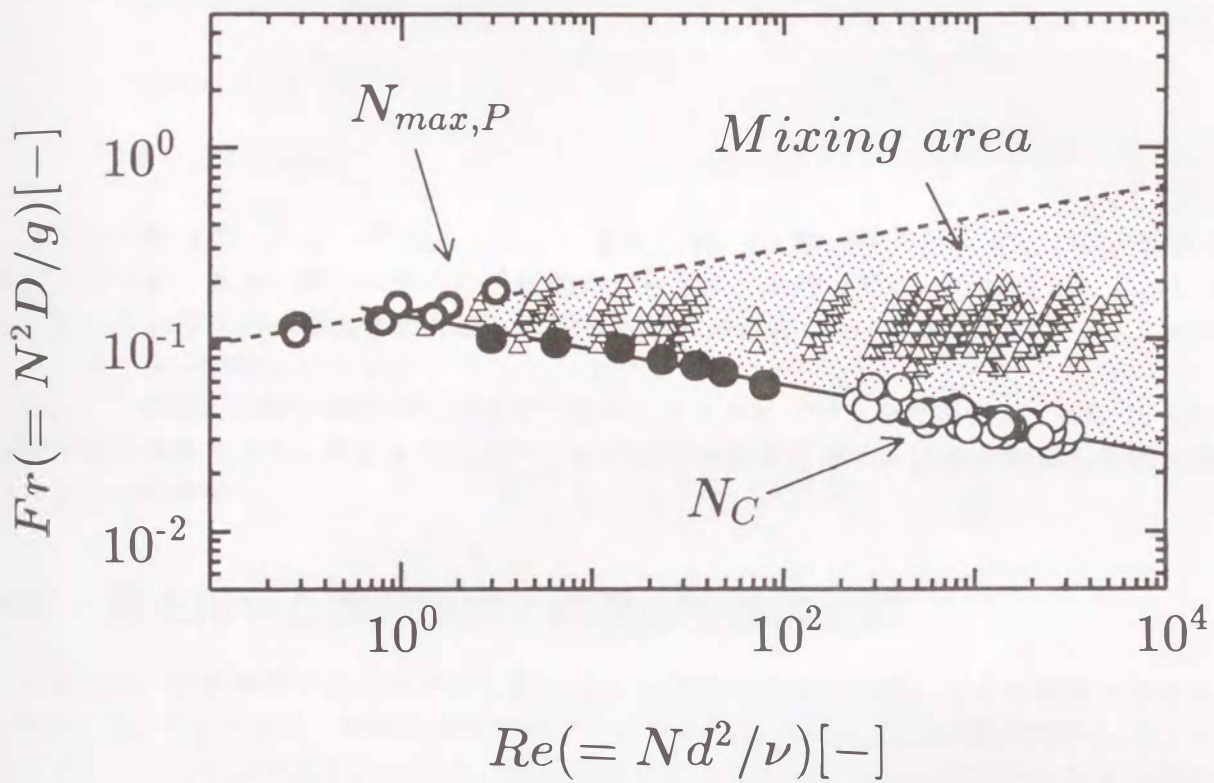
$$N_C = 1.137 D^{-0.46} d^{-0.16} \nu^{0.08} \quad (4.2)$$

ここで、上式は適用範囲が比較的低粘性の液について得られた結果であったので、高粘度液についてもフローパターンの観察から N_C を測定し Re 数の広い範囲で N_C を相関した。その結果、 $N_{max,P}$ と同様、 N_C に関する Fr 数 ($= N_C^2 D/g$) と Re 数 ($= N_C d^2/\nu$) の間に次のような相関が得られた。

$$Fr_C = 0.135(Re_C)^{-0.176} \quad (4.3)$$

Fig.4.6 は、Eq.(4.1) と Eq.(4.3) の相関式をマップ化したものである。ここで、フローパターンの観察から追加した N_C データは黒ぬりのキーで示してある。Fig.4.6 より以下の知見が得られた。

1. 混合操作に適した揺動攪拌の操作範囲は、Eq.(4.1) と Eq.(4.3) に挟まれる領域である。
2. Re 数 ($= N d^2/\nu$) が1より小さい領域では揺動攪拌による混合操作は不適當である。すなわち、その領域ではいかなる回転数で操作しても混合操作に適した旋回流型のフローパターンをとることはない。



- \triangle :Exp. points of power consumption
- \bullet :from flow pattern
- \circ :from mixing time exp.
- \odot :from power consumption exp.

Fig.4.6 Region of Fr and Re number for complete mixing

4.5 揺動攪拌所要動力の推算式

揺動攪拌所要動力は、次元解析に基づき、動力数 $N_P (= P/\rho N^3 D^5)$ 、 Fr 数 ($= N^2 D/g$)、 Re 数 ($= Nd^2/\nu$) および d/D で次式のように相関することができた。

$$N_P = 934 Fr^{3/2} Re^{-1/4} (d/D)^{3/2} \quad (4.4)$$

$$0.05 < Fr < 0.2$$

$$1 < Re < 5000$$

ここで、動力数、 Fr 数の代表長さとして槽径 D を、 Re 数の代表長さとして回転直径 d を用いている。また、解析に用いた所要動力データは、前節で得られた知見から Eq.(4.1) と Eq.(4.3) に挟まれる混合操作に適した領域内のもののみとした。測定点は Fig.4.6 において三角のキーで示してある。

Eq.(4.4) の相関の寄与率は 0.81 であり、個々のデータにバラツキはあるが、平均 17% の推定誤差で推算できる。Fig.4.7 に全データの相関の程度を示す。指数が簡単な分数で表される点は興味深い。

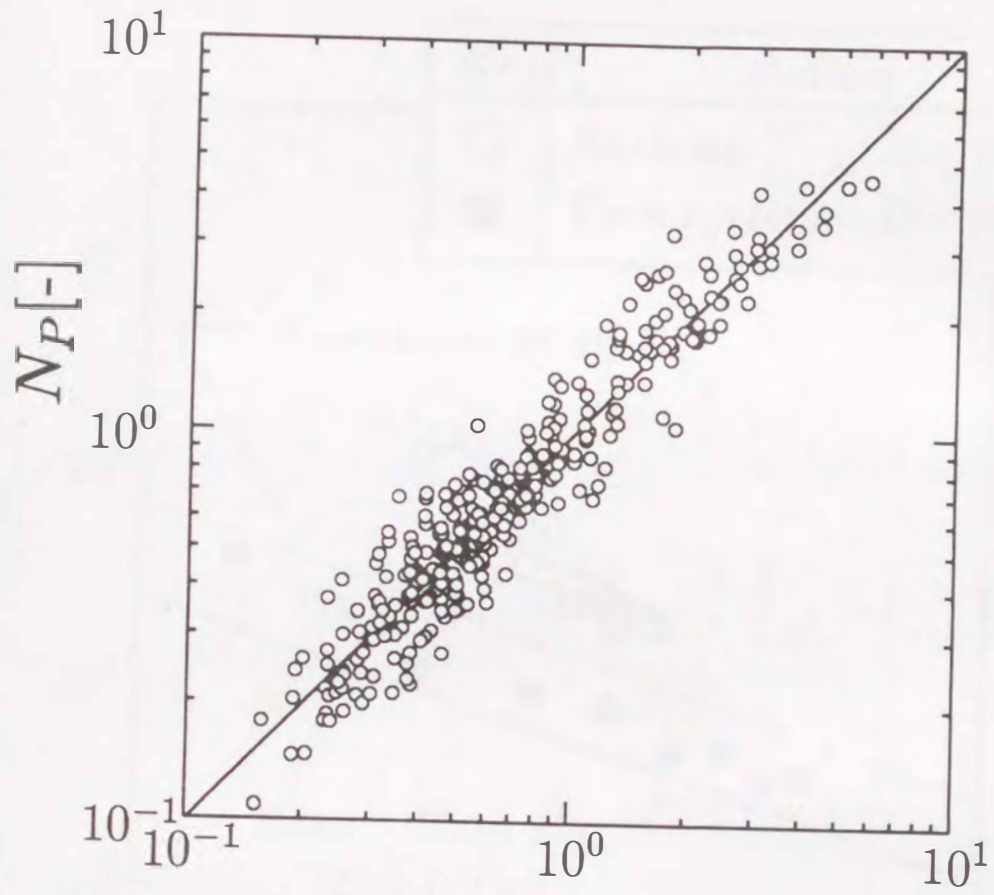
4.6 翼を用いた攪拌操作との混合特性の比較

本節では、揺動攪拌の混合効率が、翼を備えた攪拌の場合と比較してどの程度であるかを検討した。Fig.4.8 は、横軸に単位容積あたりの所要動力 P_V 、縦軸に混合時間 t_m をとってプロットしたものである。ここで、揺動攪拌における P_V は、4.5 節で求められた所要動力の相関式から計算した値であり、 t_m は実測値である。攪拌液として水を用いた場合の結果を示した。一方、翼を備えた攪拌の結果は、ごく一般的に用いられるバツフルありの単段パドル翼およびディスクタービンのものを示した。

図中の破線は、上和野ら⁵⁴⁾の実験データから算出した相関線であり、実線は Sano-Usui⁹¹⁾ の相関式から得られたものである。また、黒丸は Hiraoka ら²⁶⁾の実測値である。この実測値は、揺動攪拌の混合時間を求めた手法とまったく同じ手法を用いて求められたものである。

この図によれば、揺動攪拌のデータが、翼攪拌のデータより上側に位置しているので、攪拌効率という観点からみると揺動攪拌は翼攪拌より劣っている。これは、揺動攪拌は大きなスケールの対流でのみ混合が進行するのに対し、翼攪拌は対流に加えて翼近傍での局所的な剪断作用が働くからであると考えられる。

揺動攪拌での混合時間の所要動力に対する依存性は翼攪拌のそれよりも大きくなっているので、高い P_V 値域では翼攪拌に近い効率が得られるようにも見受けられる。



$$934Fr^{3/2}Re^{-1/4}(d/D)^{3/2}[-]$$

Fig.4.7 Correlation of power consumption

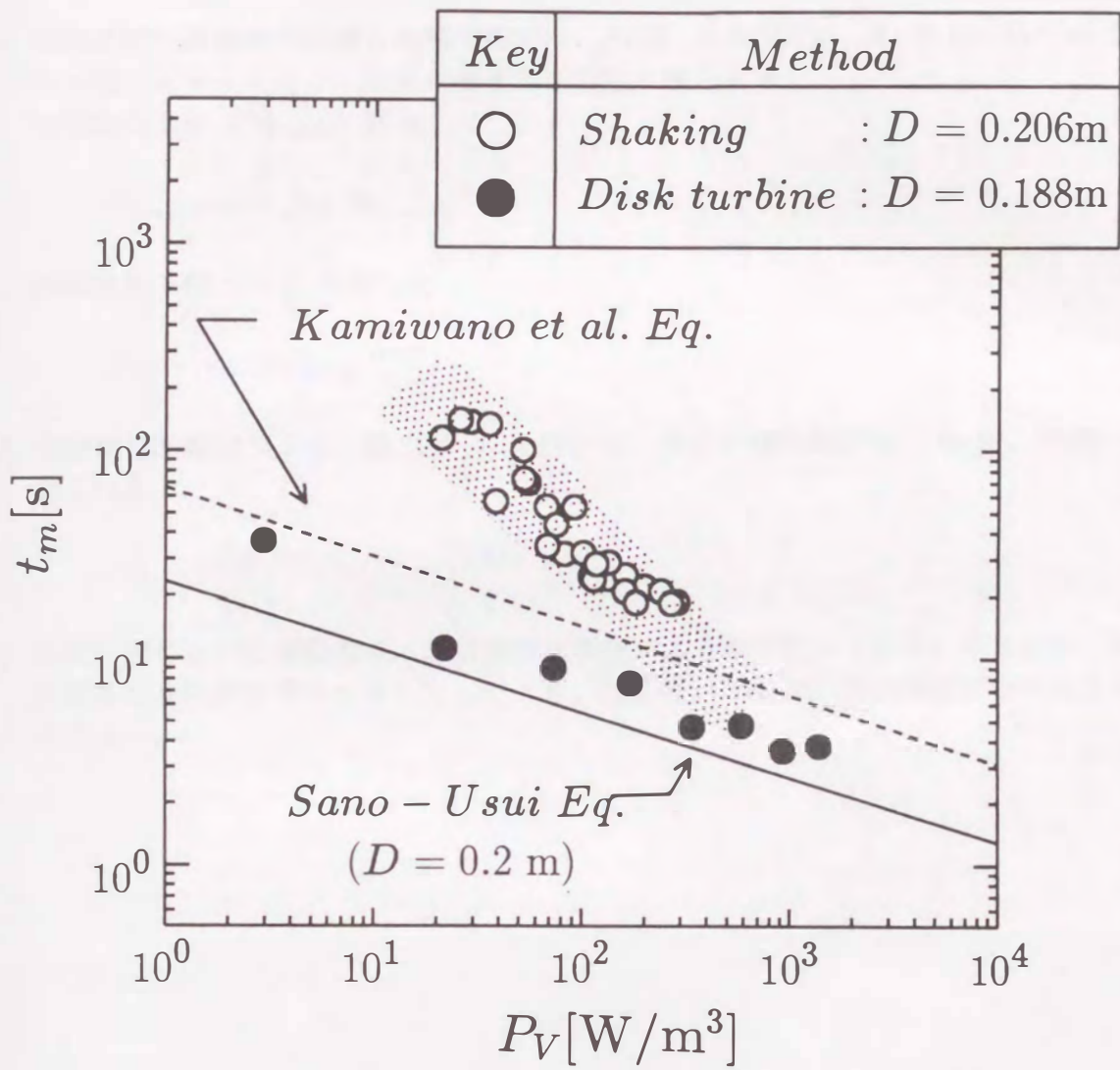


Fig.4.8 Comparison of mixing performances of shaking agitation with that of paddle agitation

4.7 本章の結論

揺動攪拌の動力特性の検討結果から以下の知見を得た。

1. 揺動攪拌で混合操作に適した操作範囲は、 Fr 数 ($= N^2 D/g$)、 Re 数 ($= Nd^2/\nu$) を両軸に取ったマップより、次式に挟まれる領域に限られる。
回転数の上限 ($N_{max,P}$) に対して

$$Fr_{max,P} = 0.135(Re_{max,P})^{0.166}$$

回転数の下限 (N_C) に対して

$$Fr_C = 0.135(Re_C)^{-0.176}$$

2. 揺動攪拌所要動力 P は、動力数 N_P を用いて、上述の操作範囲で、 Re 数、 Fr 数で相関された。

$$N_P = 934Fr^{3/2}Re^{-1/4}(d/D)^{3/2}$$

3. 低粘性液における揺動攪拌の混合効率¹⁾は翼攪拌より若干劣っている。すなわち、単位容積あたりの所要動力を等しくしたとき、揺動攪拌の混合時間は翼攪拌のそれよりやや大きい。

Chapter 5

槽壁物質移動特性

5.1 緒言

第4章で、単位容積あたりの所要動力を基準にして、従来用いられている翼を用いた攪拌と揺動攪拌の混合性能を比較検討し、槽の回転数が低いところでは揺動攪拌は翼攪拌より性能は劣るが、回転数が高いところでは性能は同程度であるという知見を得ている。

本章では、揺動攪拌槽の槽壁近傍での槽壁側平均物質移動係数および局所物質移動係数を、パドル翼付き攪拌槽に対して既に確立されている手法⁷³⁾である希薄溶液系のイオン移動を利用して測定し、槽内壁の物質移動係数分布を明らかにしどの箇所で混合および物質移動が促進されているかを考察する。

また、槽壁における局所物質移動係数の分布が解れば、物質移動と熱移動のアナロジーから伝熱特性も明らかになる。

5.2 実験装置および実験方法

実験装置の概略を Fig.5.1 に示す。槽は内径 D が 0.140, 0.150, 0.173m のアクリル樹脂製のものを用い、槽底部と槽壁部にニッケル板を張り付けた。また、槽壁部には孤立電極 (2.8mm ϕ ニッケル線) を鉛直方向に槽底から $D/10$ 間隔で取り付け⁷³⁾。槽壁側平均物質移動係数を測定するときは、アノードとして槽底のニッケル板、カソードとして槽壁のニッケル板を使用し (Fig.5.1(a))、局所物質移動係数を測定するときはアノードとして槽底のニッケル板、カソードとして槽壁に取り付けたニッケル線の孤立電極を使用した (Fig.5.1(b))。Fig.5.2 に孤立電極の拡大図を示す。

定電位電解装置にはポテンシオスタット (北斗電工 (株) 製 HA-102) を用いた。ただし、局所物質移動の測定に対しては、孤立電極にイオンが集中するのを防ぐために可変直流安定化電源 (メカトロニクス (株) 製 MTR18-5) を併用し、槽壁に限界電流値と同じ大きさの電流を与えた。

物質移動係数は、攪拌液として 1N-KOH + 0.2N - $K_4Fe(CN)_6$ + 0.01N - $K_3Fe(CN)_6$ 水溶液を用いた定電位電解法により、限界電流値を測定し、Eq.(5.1) より求めた。本実験方

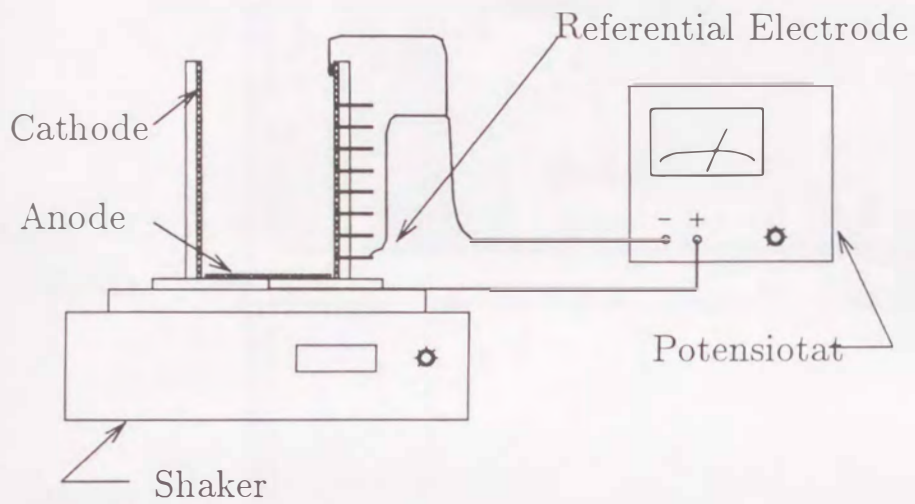


Fig. 5.1(a) Schematic diagram of experimental apparatus for average mass transfer coefficients

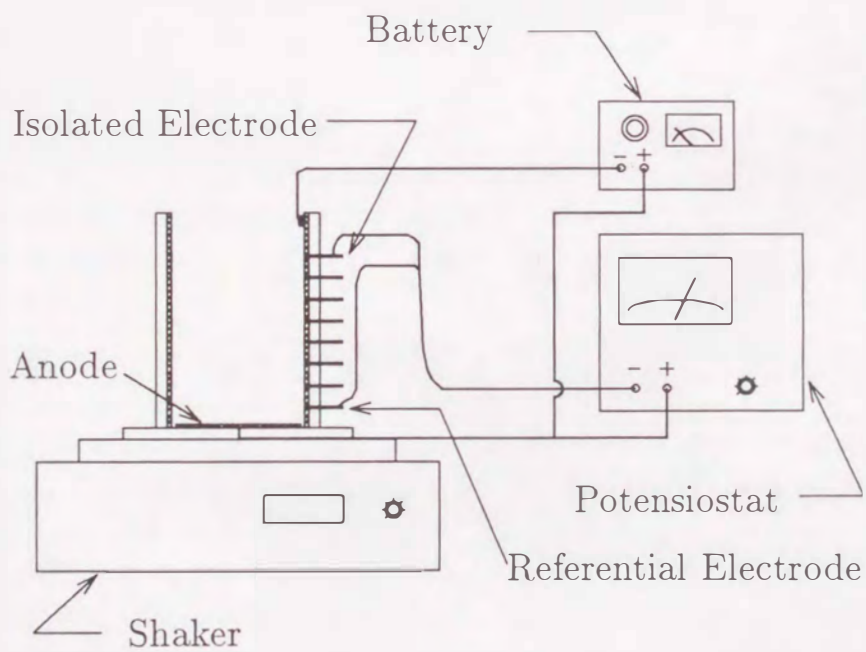


Fig. 5.1(b) Schematic diagram of experimental apparatus for local mass transfer coefficients

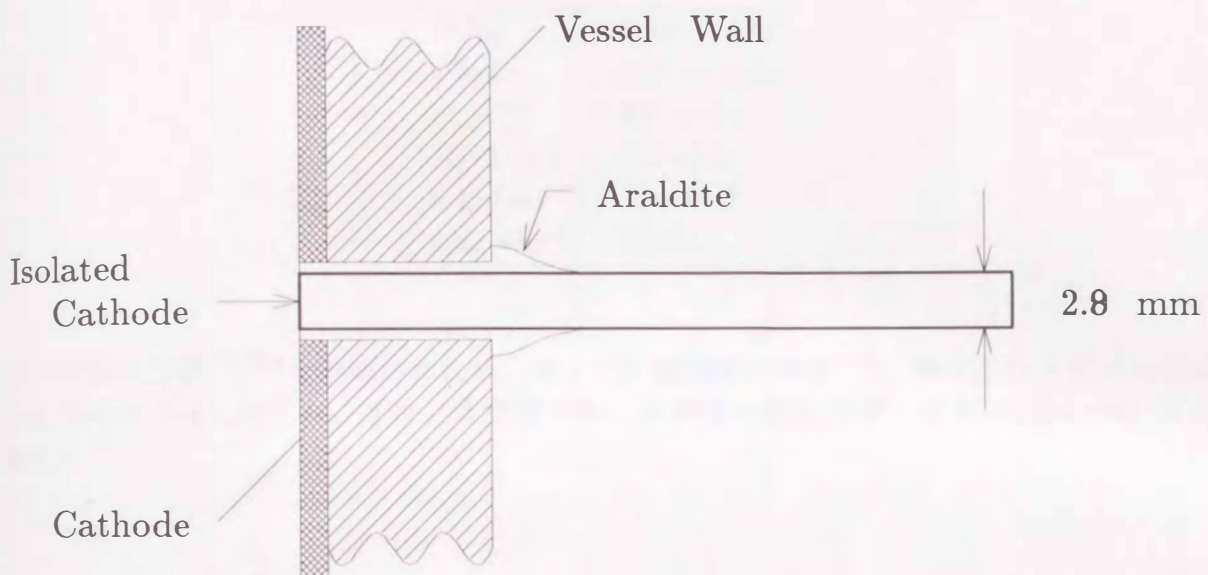


Fig.5.2 Isolated point cathode

Table 5.1: Experimental Conditions

D [m]	0.14 ~ 0.17
d [m]	0.01 ~ 0.04
N [s^{-1}]	0.8 ~ 3.3
H/D [—]	0.5 ~ 1.0
ν [$m^2 \cdot s^{-1}$]	0.9×10^{-6}
ρ [$kg \cdot m^{-3}$]	1088.1

法の理論は文献^{30, 73)}を参照されたい。そして、攪拌液の物性³⁰⁾、操作条件を含め実験条件は Table 5.1 に示した。また、本実験で用いた溶液の物性推算方法を Appendix B に示す。

$$k = \frac{I_d}{nFAC_{ferric}} \quad (5.1)$$

ここで、 I_d は測定される限界電流値 [A] であり、 n は電極反応で移動するイオンの電荷数 (=1)、 F はファラデー定数 ($=9.65 \times 10^7 C/kmol$)、 A は電極面積 (各操作条件で変動 [m^2])、 C_{ferric} は、槽内のフェリシアン化物イオン $Fe(CN)_6^{3-}$ の濃度 ($=1 \times 10^{-5} kmol/m^3$) である。

ただし、槽壁側平均物質移動係数を測定する際の電極面積 A は槽側壁の濡れ面積である。しかし、操作中は表面波が発生し、回転数により変化するので、Fig.5.3 に示すように、第3章で検討した壁面上昇の波形から求めた。すなわち、混合限界回転数 N_C 以上で操作する場合の濡れ面積は、単に静止液面で計算した場合のそれより大きくなるからである。電極面積の補正方法を Appendix C に示す。また、局所物質移動係数を測定する場合の電極面積は、孤立電極の断面積とした。ここで、すべての孤立電極をまったく同じ品質で製作することは不可能であるので、本実験前に自然対流条件下で各孤立電極に対する限界電流を測定し、各測定データのばらつきをあらかじめ補正する方法を取った。

5.3 槽壁における槽壁側平均物質移動係数の測定結果

回転数 N と槽壁側平均物質移動係数 \bar{k} の関係を Fig.5.4 に示す。第2章で提出された、混合が完全に完了しない限界の回転数、すなわち、混合限界回転数 N_C を境に \bar{k} の回転数依存性が高くなる。これはフローパターンが N_C を境に変化して所要動力が増大し、混合に適した状態になることと一致する。

次に揺動攪拌と翼攪拌の \bar{k} の差異を比較するため、Eq.(5.2) で与えられる単位体積あたりの所要動力 P_V と物質移動係数 \bar{k} の関係¹¹⁾ を Fig.5.5 に示した。 \bar{k} は P_V を用いて良好に相関出来た。ある回転数以上では、翼攪拌の場合の相関式 Eq.(5.2) に、若干低めではあるが、おおよそ一致している。また、ある回転数以下では、揺動攪拌の混合速度は翼攪拌に比して劣ると同様に揺動攪拌の \bar{k} も翼攪拌のそれよりも小さい。

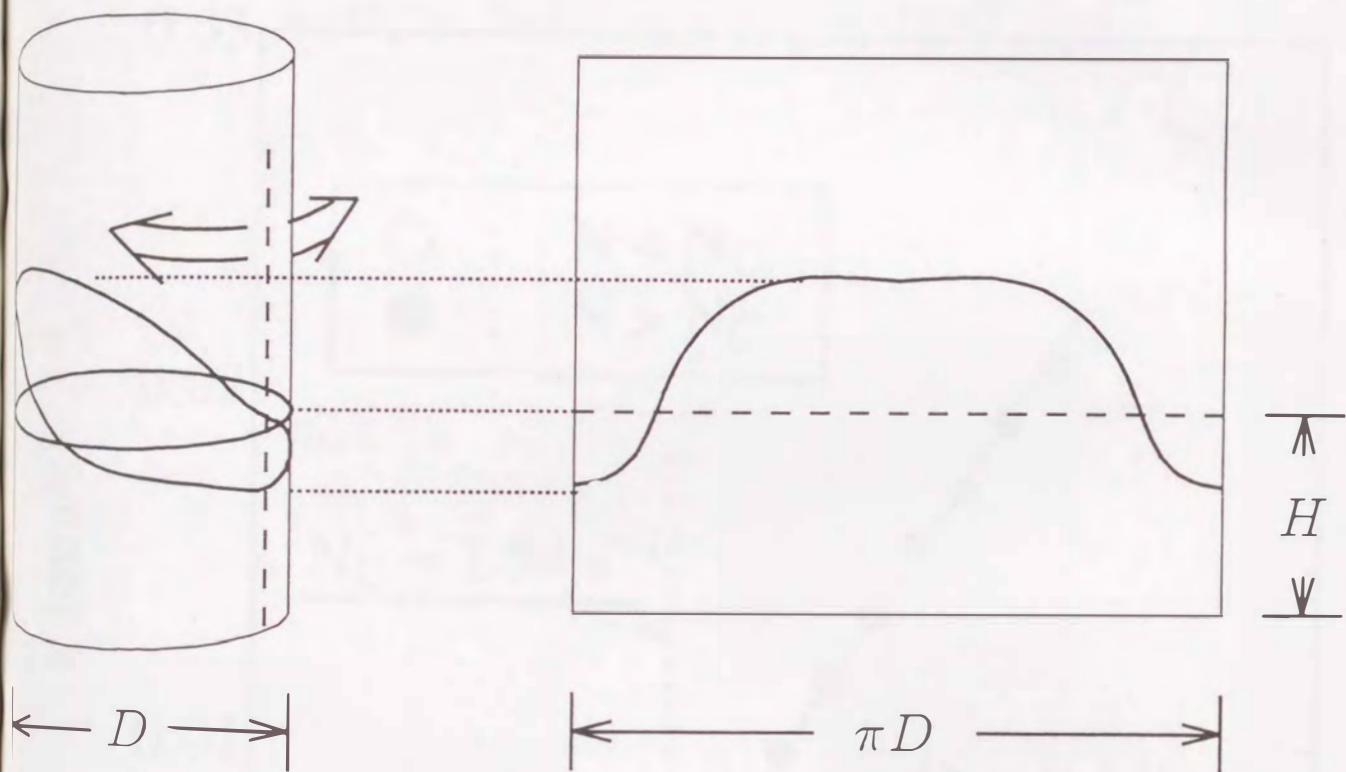


Fig.5.3 Definition of cathode surface area

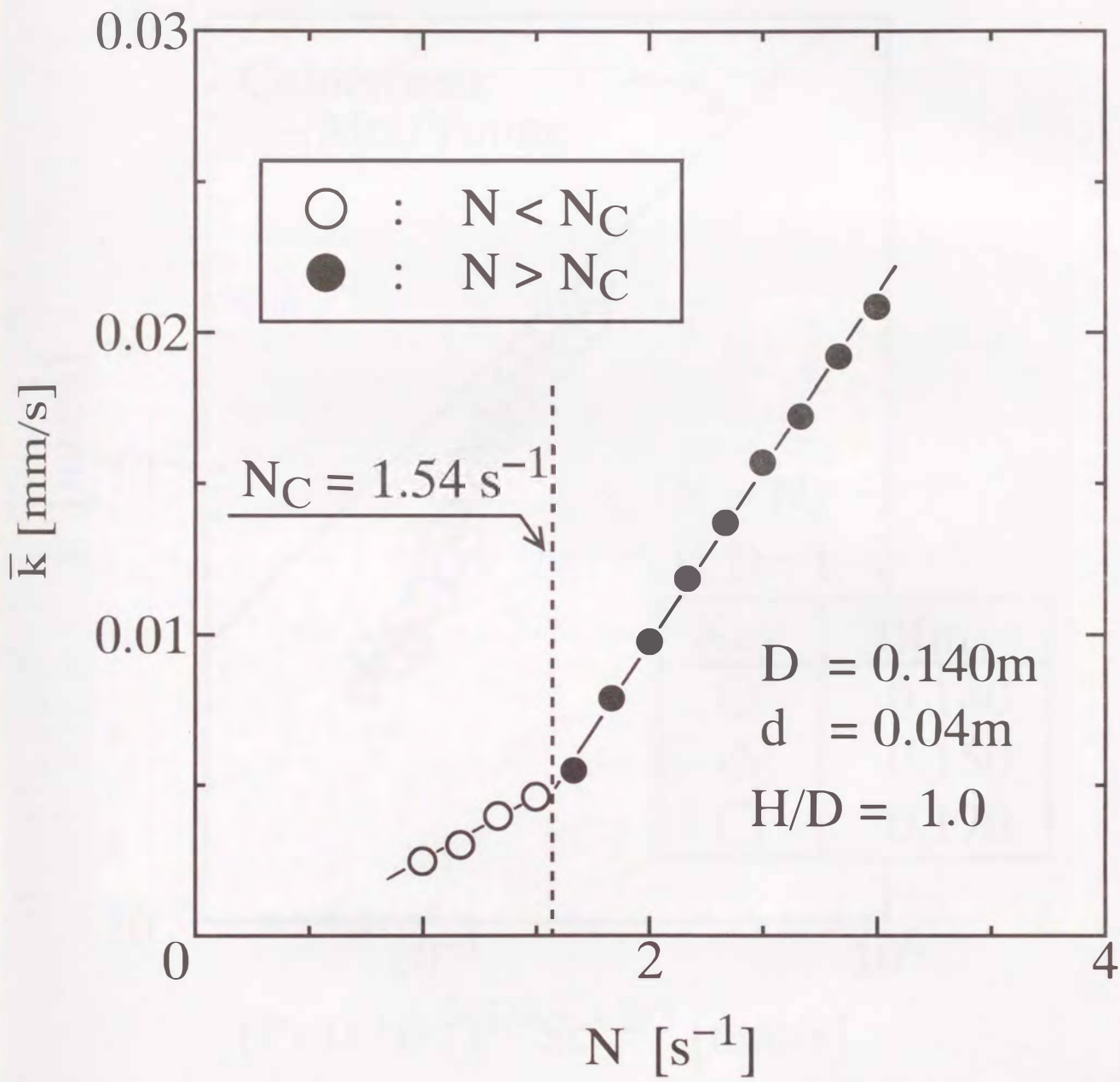


Fig.5.4 Effect of circulating frequency on average mass transfer coefficient

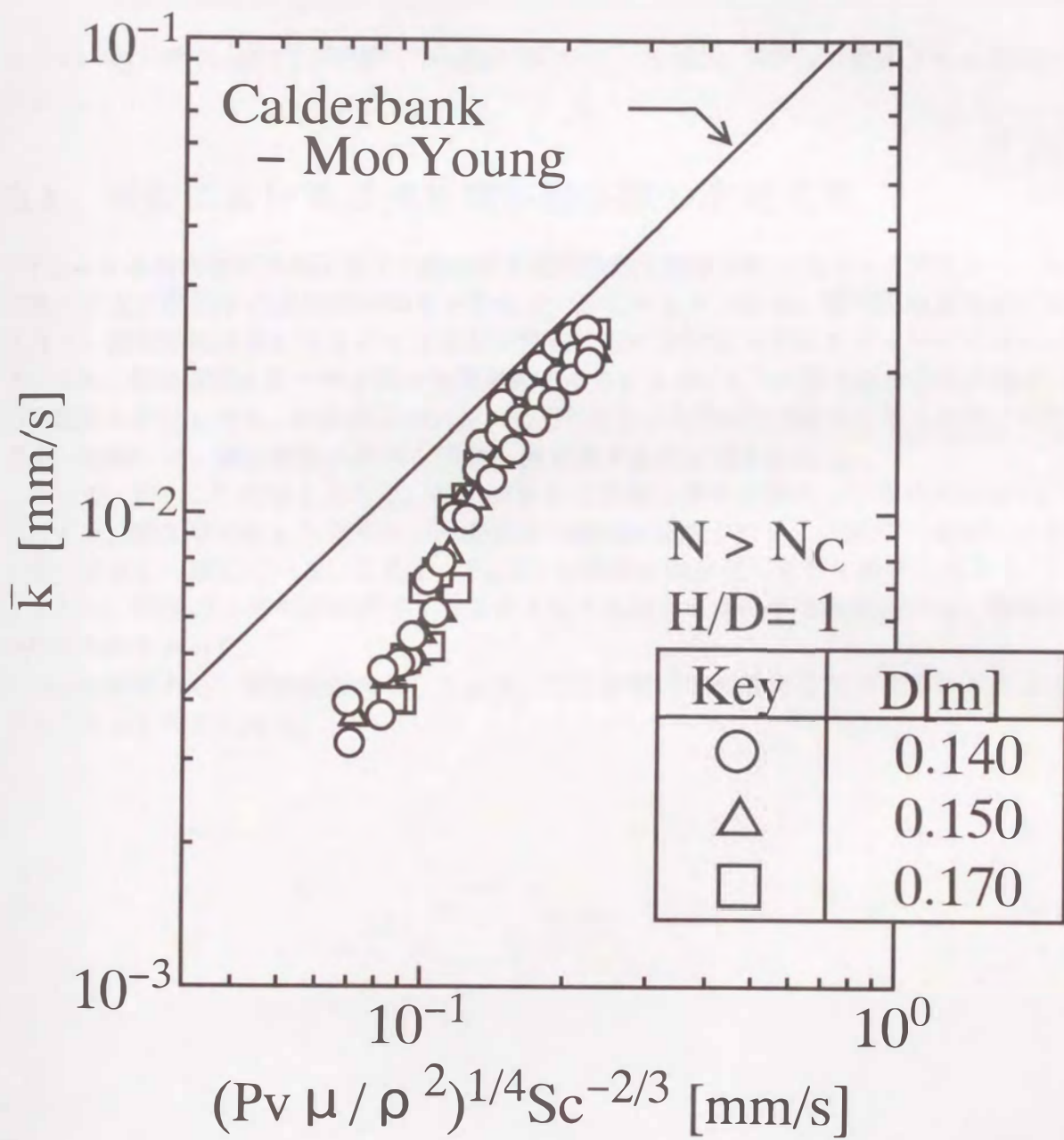


Fig.5.5 Correlation of average mass transfer coefficient with power consumption

$$\bar{k} = 0.13(P_V \mu / \rho^2)^{1/4} Sc^{-2/3} \quad (5.2)$$

ここで、 Sc 数は ν/D_{ferri} で定義される無次元数である。所要動力の値は、第4章の結果から次式で計算した。

$$N_P = 934 Fr^{3/2} Re^{-1/4} (d/D)^{3/2} \quad (5.3)$$

ここで、動力数 N_P は $P/\rho N^3 D^5$ 、 Fr 数は $N^2 D/g$ 、 Re 数は Nd^2/ν で定義される無次元数である。

5.4 槽壁における局所物質移動係数の測定結果

Fig.5.6 は局所物質移動係数 k を総括物質移動係数で無次元化した k/\bar{k} と槽底からの無次元高さ z/D の関係を自由表面の動きと合わせて示したものである。槽の回転数が大きくなるほど、物質移動係数が大きくなる範囲が槽底に近づき分布の形状がブロードになっている。また、自由表面に近いほど高い物質移動がみられるが、 k/\bar{k} が最大値をとる位置は、槽の回転数が変化しても、自由表面波の谷の部分に近い。 k/\bar{k} が谷で最大となるのは、それより高い位置では、孤立電極が露出・浸積を繰り返すためと考えられる。

さらに、Fig.5.7 に示すように、最大値をとる位置は液位が変化しても代わらない。このことは、第3章で示したように自由表面波の運動は液深さが $0.5 < H/D$ の範囲では変化しないことと一致している。ここで、Fig.5.7 は縦軸を静止液面基準に換算してある。

さらに、槽径 D と槽の回転直径 d を変化させて検討したが、本実験範囲では、顕著な違いはみられなかった。

以上の結果から、揺動攪拌にとって自由表面の運動が攪拌効果を左右するひとつのポイントであると考えられる。

$D = 0.140\text{m}$
 $d = 0.04\text{m}$

$H/D = 1.0$

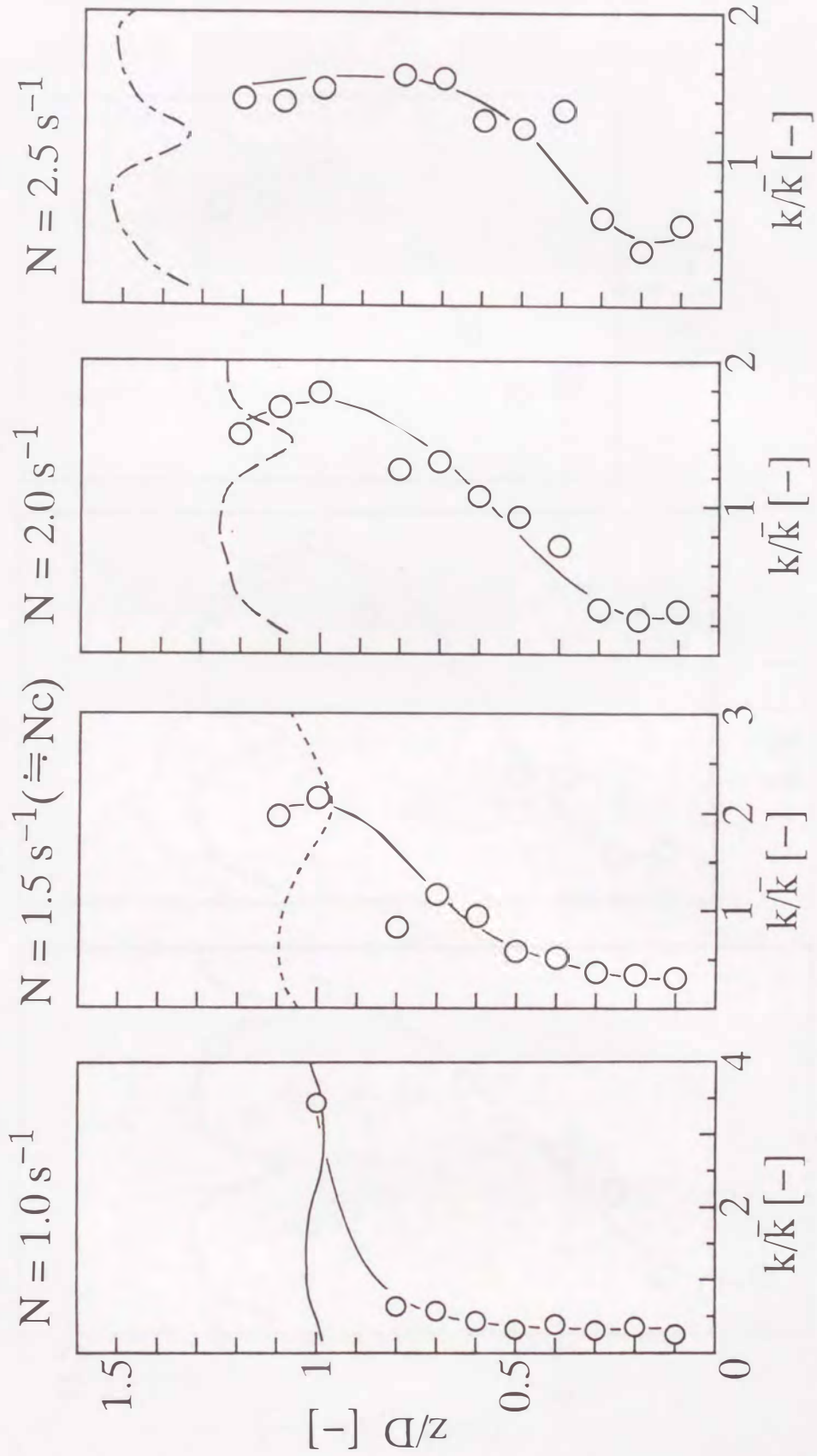


Fig.5.6 Profile of local mass transfer coefficient

$D = 0.140\text{m}$ $N = 2.0\text{ s}^{-1}$
 $d = 0.04\text{m}$

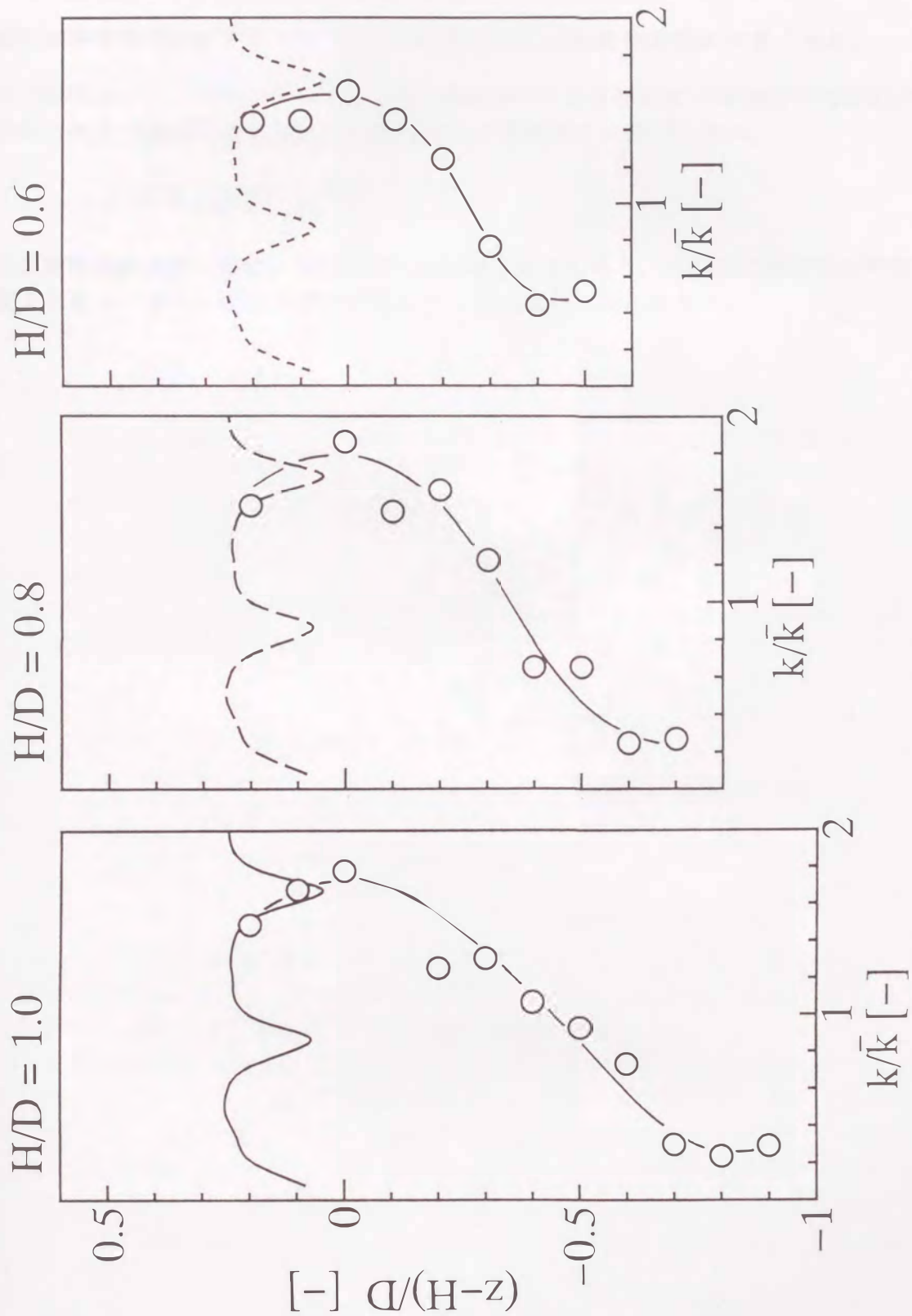


Fig.5.7 Effect of liquid height on profile of local mass transfer coefficient

5.5 本章の結論

揺動攪拌の槽壁物質移動特性の検討結果から以下の知見を得た。

1. 槽壁側平均物質移動係数は混合限界回転数を境に回転数依存性が大きくなる。
2. 高回転領域では、揺動攪拌の混合速度は翼攪拌のそれと同程度で槽壁側平均物質移動係数は次式で推算できるが、低回転領域では翼攪拌より若干小さい。

$$\bar{k} = 0.13(P_V \mu / \rho^2)^{1/4} Sc^{-2/3}$$

3. 局所物質移動係数分布は、自由表面に近いほど大きくなり、自由表面波の谷の部分で最大となる。また、液位が多少変化してもその傾向は変わらない。

Chapter 6

固液混合特性

6.1 緒言

固液系を対象にした攪拌操作は粒子の懸濁、晶析操作等において頻繁に見受けられる操作である。ただし、揺動攪拌においては、動植物細胞あるいは剪断に弱い物質を攪拌する場合がほとんどであるので、その主たる目的は固液間(細胞-液間)の物質移動の促進にある。この場合、すべての固体粒子の表面が液体と接触していることが必要であるので、固体粒子の浮遊状態が大きな問題となる。粒子浮遊状態を検討する上で最も重要なパラメータは浮遊化限界回転数 N_{JS} ^{4, 13, 81, 82, 89, 116)}である。完全浮遊状態とは、すべての粒子が装置内を動いている状態を言う。一般に翼攪拌では、物質移動係数 k と翼回転数 N の関係は、 N_{JS} 未満の回転数では液と固体粒子との接触面積が増加しつつあるため k の回転数依存性が高いが、 N_{JS} で固体粒子と液体間の接触面積が最大となるため N_{JS} 以上の回転数では k の回転数依存性が小さくなる。更に回転数が増加し自由表面からの気泡巻き込みが始まると k は変化しなくなる。従って、固液間の物質移動に関する最適操作条件は N_{JS} から気泡巻き込みが起こる直前の回転数ということになる。一般の固液系の翼攪拌では、 N_{JS} における物質移動係数 k_{JS} は装置形状によらず一定であることが知られている⁸³⁾ ことから、固液攪拌において、浮遊化限界回転数が重要なパラメータであるということが理解できる。従って、揺動攪拌においても浮遊化限界回転数についての検討をしておくことは必要なことである。

本章では、揺動攪拌に関して粒子の浮遊状態を実験的に観察し、翼攪拌における Baldi らの浮遊化理論⁴⁾に基づき浮遊化限界回転数の相関式を展開し、浮遊化限界動力、つまり完全浮遊に必要な攪拌動力を測定して、翼攪拌のそれと比較検討する。

また、粒子濃度分布を測定し翼攪拌との比較を検討する。一般の固液攪拌操作において粒子濃度分布を把握することは、装置運転時あるいはスケールアップ時における混合状態の判断基準として、また、装置設計時におけるサンプリング口等の設置位置決定の手がかりとして有用な情報源となる。従って、揺動攪拌において粒子濃度分布が槽回転数等の操作変数に対してどのような特性を示すのかを把握しておくことは必要である。本章で対象とした系は、細胞培養を念頭においているので、固体粒子は比較的低濃度としている。

6.2 固体粒子の浮遊化限界回転数

6.2.1 実験装置および実験方法

槽は内径 D が 0.140, 0.173 および 0.206m の透明アクリル樹脂製のものを用いた。また、槽底を静止させて観察するために、槽と同期回転するビデオカメラを取り付け槽底の様子をモニターした。装置の概要を Fig.6.1 に示す。浮遊化限界回転数 N_{JS} の定義は、最も一般的に採用されている Zwietering による¹¹⁶⁾ “槽底に 1~2 秒以上静止している粒子が存在しなくなる状態”とした。これは、目視によって測定される方法で多少個人差はあるが、 $\pm 5\%$ 程度の誤差範囲にはいる再現性があるといわれている^{12, 81, 116)}。揺動攪拌の場合は、次項でその詳細を述べるが、Zwietering の定義に従うと翼攪拌の場合よりも槽内部の浮遊状態が不完全な状態での N_{JS} の値を与えることとなる。これは、揺動攪拌では粒子は最初浮遊せず槽底を転がり始めるため、Zwietering の定義上この回転数が N_{JS} として求められる。このとき、大部分の粒子が槽底を転がり始めるこの浮遊化限界回転数は 1rpm の精度で判定可能であった。 N_{JS} に関与する因子として粒子および液体の物性、操作条件、装置の寸法が考えられる。それらは Table 6.1 に示す範囲で変化させ実験を行った。槽径及び粒子径の範囲が若干狭いが、Zwietering の実験範囲はほぼ網羅するよう考慮した。

Table 6.1: Experimental Conditions

	This work	Zwietering
D [m]	0.140 ~ 0.206	0.154 ~ 0.60
d [m]	0.01 ~ 0.04*	0.05 ~ 0.224**
ν [$m^2 \cdot s^{-1}$]	$0.9 \times 10^{-6} \sim 6.6 \times 10^{-5}$	$0.39 \times 10^{-6} \sim 1.11 \times 10^{-5}$
ρ_L [$kg \cdot m^{-3}$]	997 ~ 1260	790 ~ 1600
ρ_p [$kg \cdot m^{-3}$]	1140 ~ 2490	2160 ~ 2600
d_p [μm]	460 ~ 3760	125 ~ 8500
X_0 [wt %]	0.1 ~ 20	0.5 ~ 20

*:circulating diameter **:impeller diameter

浮遊化限界回転数での攪拌所要動力、すなわち浮遊化限界動力は、第4章と同様にして消費電力から求めた。

6.2.2 粒子浮遊状態

回転数と粒子の浮遊状態の関係を Fig.6.2 に示したが、翼を用いた攪拌の場合と状況は少し異なる。まず、低回転数の場合 (a) は、回転数の増加とともに粒子は槽底部中心へと集まってくる。このとき、粒子はほとんど浮遊していない。さらに回転数が増加すると (b)、円錐状の塊の表面にある粒子が浮遊を始める。そして、回転数が Zwietering の定義に基づく N_{JS} を越えるところ (c) で円錐状の塊の頂上部分から粒子の巻き上がりが生じ、渦巻状

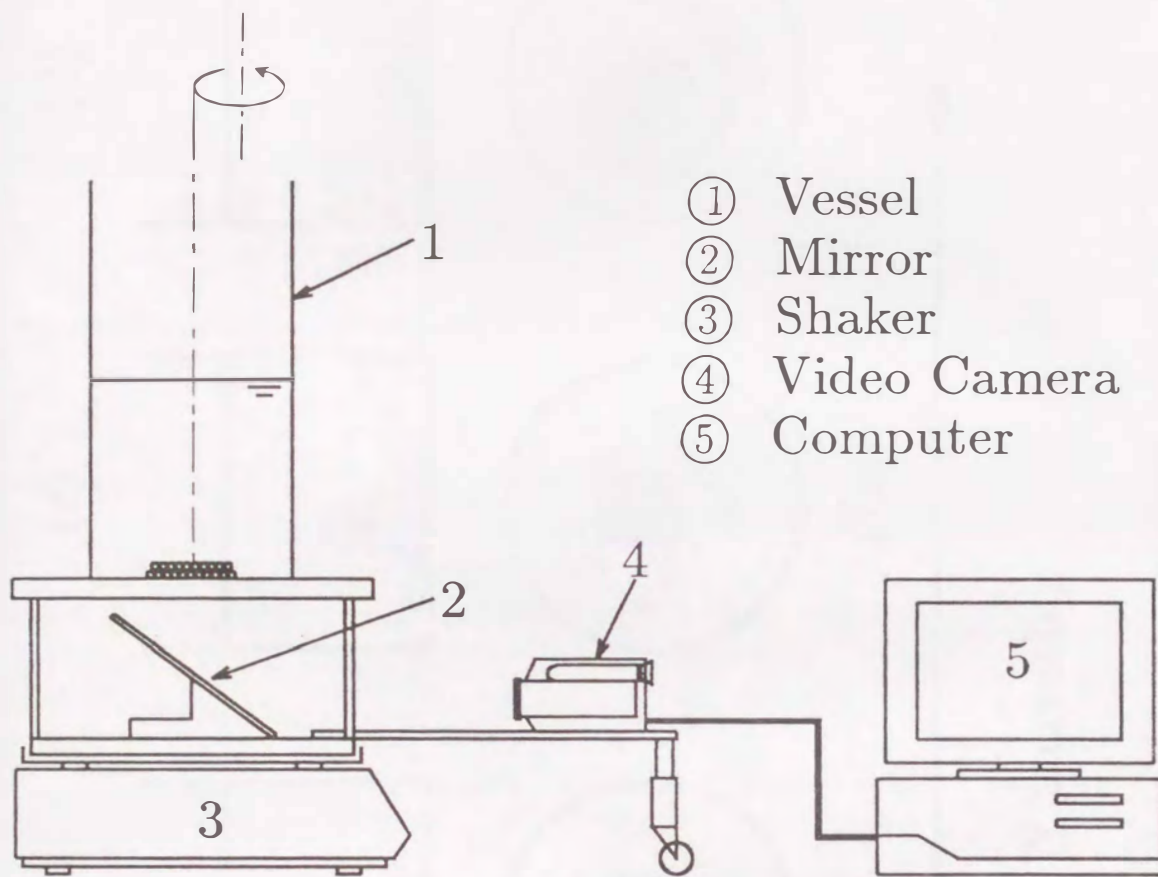


Fig.6.1 Schematic diagram of experimental apparatus

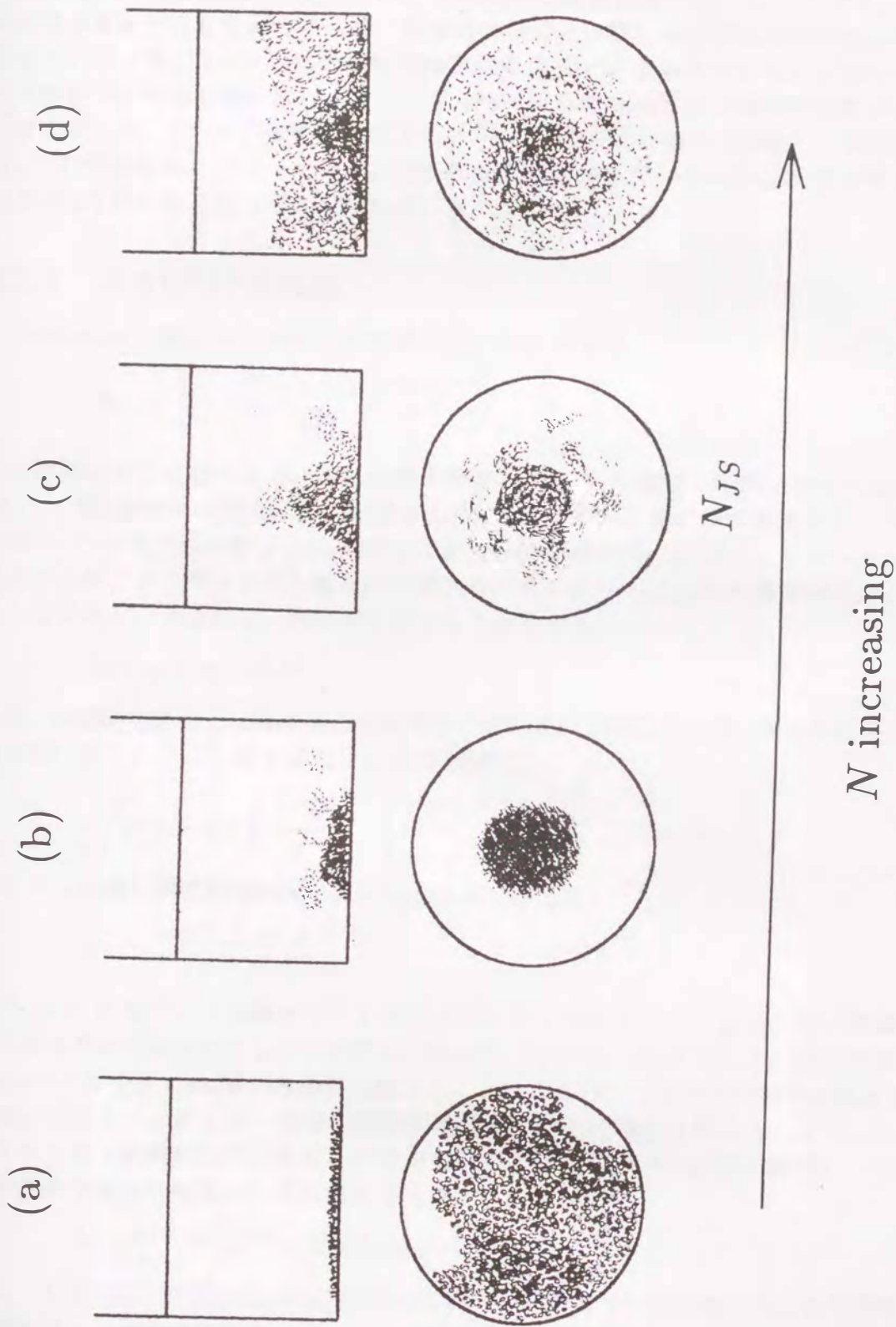


Fig.6.2 Sketch of particle suspension patterns

に粒子全体が動き出す。このように、揺動攪拌の場合は槽が動いているので、Zwietering の定義に従って与えられる N_{JS} は、翼攪拌の場合と比較して目視上では不完全な浮遊状態を示す。つまり、 N_{JS} での粒子の挙動は槽内に浮遊するというよりも、大部分の粒子が槽底を転がっている状態に近い。また、 N_{JS} は均相系における混合限界回転数 N_C より大きい値を示した。さらに回転数が増加すると (d)、ほとんどの粒子は浮遊し、翼攪拌の場合の N_{JS} での浮遊状態に近づいていく。定性的な観察結果から、この浮遊状態を得るには N_{JS} のほぼ 1.5 倍から 2 倍の回転数を必要とする。

6.2.3 浮遊化限界回転数

Zwietering の翼攪拌の場合の相関式は Eq.(6.1) である。

$$N_{JS} = \frac{S\nu^{0.1}d_p^{0.2}(g\Delta\rho/\rho_L)^{0.45}X_0^{0.13}}{d_{imp}^{0.85}} \quad (6.1)$$

この相関は以下に述べる Baldi らの粒子浮遊モデル⁴⁾に基づく相関とよく一致している。従って、揺動攪拌の浮遊化限界回転数も Baldi らのモデルに基づいて整理することを試みる。

Baldi らのモデルは粒子と同程度の大きさの臨界渦が持つ乱流エネルギー $\rho_L(\epsilon d_P)^{\frac{2}{3}}$ と粒子がある高さまで持ち上げられるのに要するエネルギー $d_P\Delta\rho g$ が平衡関係にあると仮定するものである。すなわち、次式が成立すると仮定する。

$$d_P\Delta\rho g \propto \rho_L(\epsilon d_P)^{\frac{2}{3}} \quad (6.2)$$

また、本実験範囲内では固液系の所要動力は均相系の所要動力と差が認められなかった(次項参照)ので、上式と第4章で示した動力相関式

$$\frac{P}{\rho N^3 D^5} = 934 \left(\frac{N^2 D}{g} \right)^{3/2} \left(\frac{N d^2}{\nu} \right)^{-1/4} \left(\frac{d}{D} \right)^{3/2} \quad (6.3)$$

から N_{JS} に関し次式が導かれる。(Appendix D 参照)

$$N_{JS} \propto \frac{d_P^{0.09}(\Delta\rho g/\rho_L)^{0.26}}{D^{0.35}d^{0.17}\nu^{0.04}} \quad (6.4)$$

Eq.(6.4) に基づいて実験データを整理すると Fig.6.3 のようになり、粒子種類が一定であればほぼ比例関係にあることが解る。従って、Eq.(6.4) を基本として、粒子密度(密度差) $\Delta\rho g/\rho_L$ と粒子径 d_P に関する指数を修正し、この式に含まれていない粒子の重量含有率 X_0 の項を加えることにより、浮遊化限界回転数の相関式の導出を試みた。まず、Eq.(6.4) の項のうち粒子種類に無関係な項、つまり分母にある項をすべて左辺に移項し、それぞれの項の指数を新たに変数として次式を与える。

$$N_{JS} D^{0.35} d^{0.17} \nu^{0.04} \propto d_P^\alpha (\Delta\rho g/\rho_L)^\beta X_0^\gamma \quad (6.5)$$

次に、上式右辺の指数および比例定数を実験データに基づく重回帰分析により決定し、 N_{JS} の相関式として次式を得た。

$$N_{JS} = \frac{0.58 d_P^{0.06} (g\Delta\rho/\rho_L)^{0.04} X_0^{0.03}}{D^{0.35} d^{0.17} \nu^{0.04}} \quad (6.6)$$

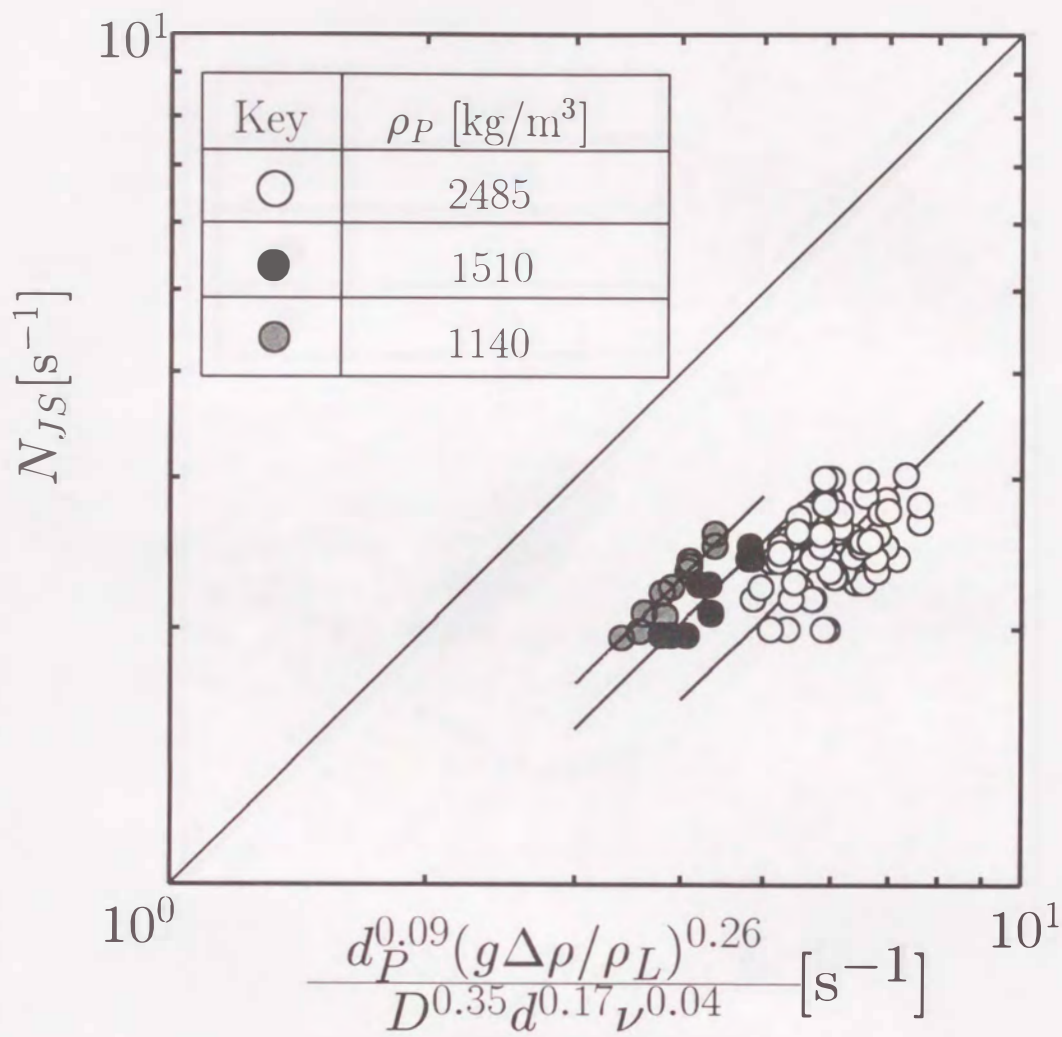


Fig.6.3 Correlation of N_{JS} based on the Baldi's model

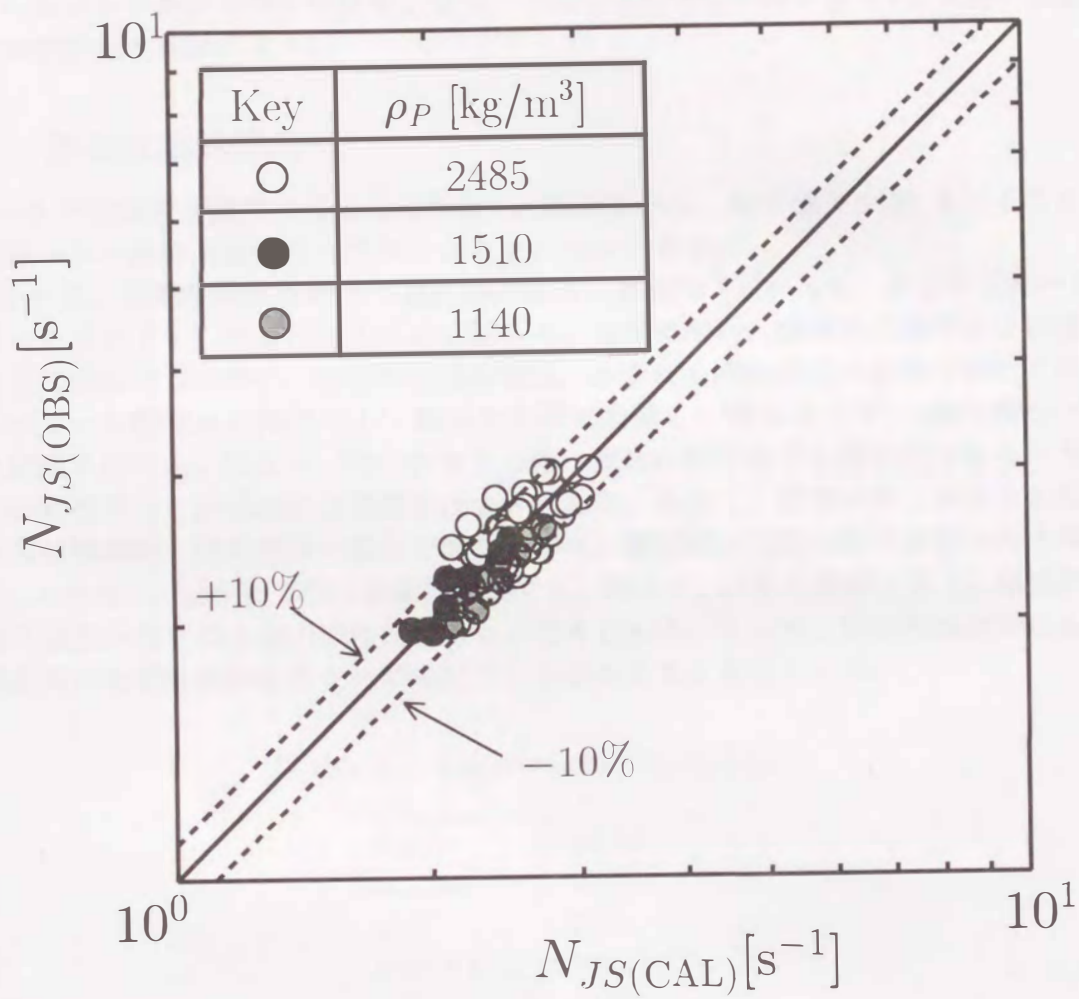


Fig.6.4 Correlation of N_{JS} from the modified equation

ここで、Eq.(6.4)とEq.(6.7)を比較すると、粒子径に関する指数は0.09から0.06でほとんど変化していないが、密度差に関する指数が0.26から0.04へとかなり小さくなった。これは、 N_{JS} における粒子の挙動は槽底を転がっているものが多く、密度差の寄与が小さくなっているからであると考えられる。また、上式はFig.6.4に示すように、約10%の誤差範囲で実験結果を相関できた。

6.2.4 浮遊化限界動力

Fig.6.5に仕込粒子濃度と浮遊化限界動力の関係を示す。粒子濃度が20%以下であれば十分液相のみの攪拌所要動力と同等とみなすことができる。

Fig.6.6に、揺動攪拌における浮遊化限界動力と翼攪拌(プロペラ、ディスクタービン、45°ピッチドパドル)におけるそれを比較した。比較に用いた固液系の条件および攪拌翼の条件をTable 6.2に示す。三種類の攪拌翼は、いずれも固体浮遊に最適の翼取り付け位置とされている槽底から槽径の1/4離れた位置に設置し、槽径の1/10の幅を持つバップルを4枚取り付けた。図より、同じ大きさの槽、流体に同じ粒子を浮遊化させようとしたとき、揺動攪拌の方が浮遊化限界動力は小さくなる。ただし、前項で示したように粒子の濃度分布が翼攪拌と揺動攪拌の場合で異なるので、翼攪拌と同様の粒子濃度分布を得るには、 N_{JS} のほぼ1.5倍から2倍の回転数を要する。従って、図から推察すると、翼攪拌と同様の粒子濃度分布を得る動力はほぼ等しいと考えられる。よって、真の性能比較のためには、固液間の物質移動特性等を比較検討する必要があると考えられる。

Table 6.2: Experimental Conditions

D [m]	0.173
d_{imp} [m]	0.07
c [m]	0.04
ν [$m^2 \cdot s^{-1}$]	0.9×10^{-6}
ρ_L [$kg \cdot m^{-3}$]	1000
ρ_p [$kg \cdot m^{-3}$]	2485
d_p [μm]	460
X_0 [wt %]	8,16

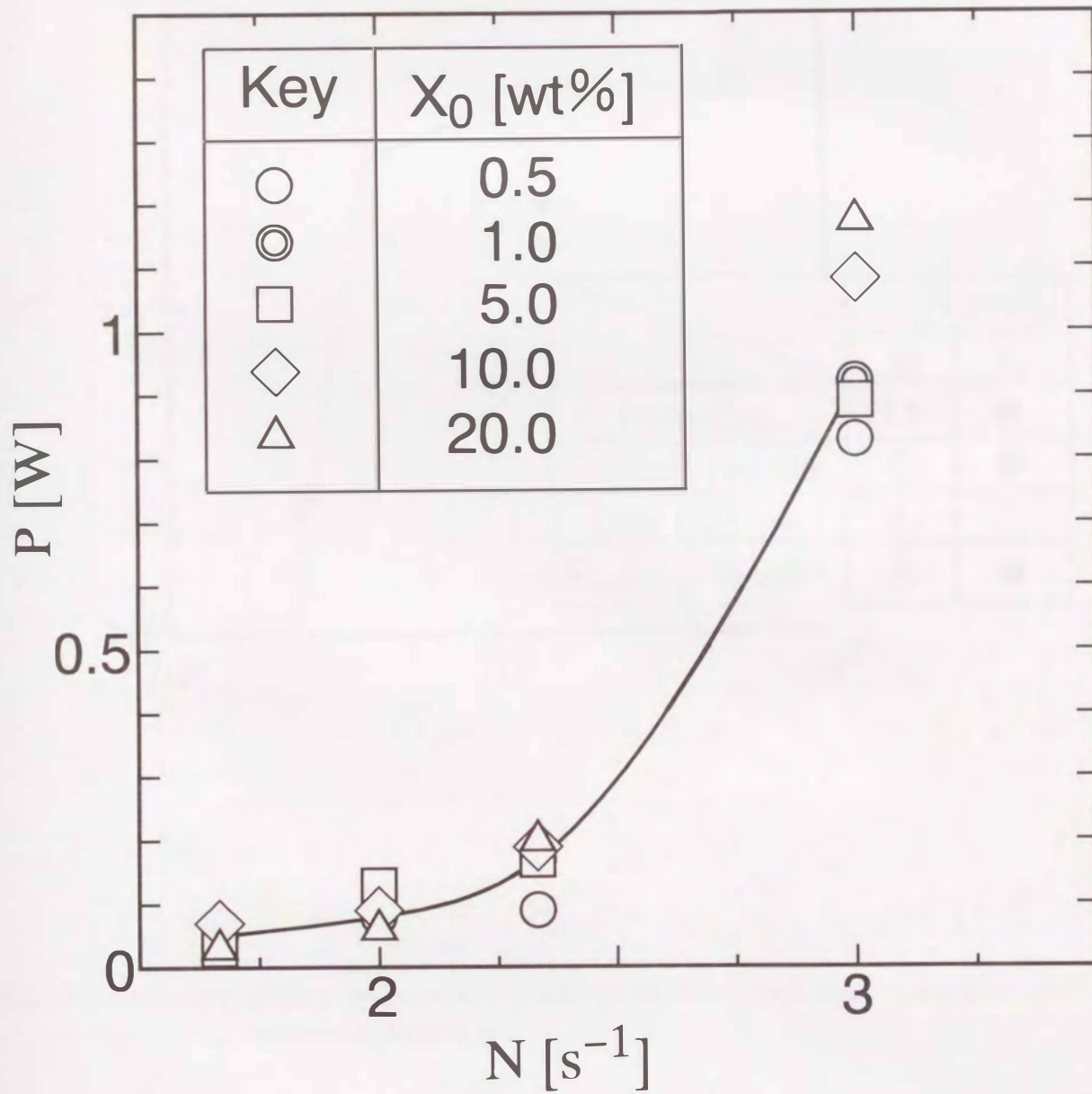


Fig.6.5 Power consumption for suspension

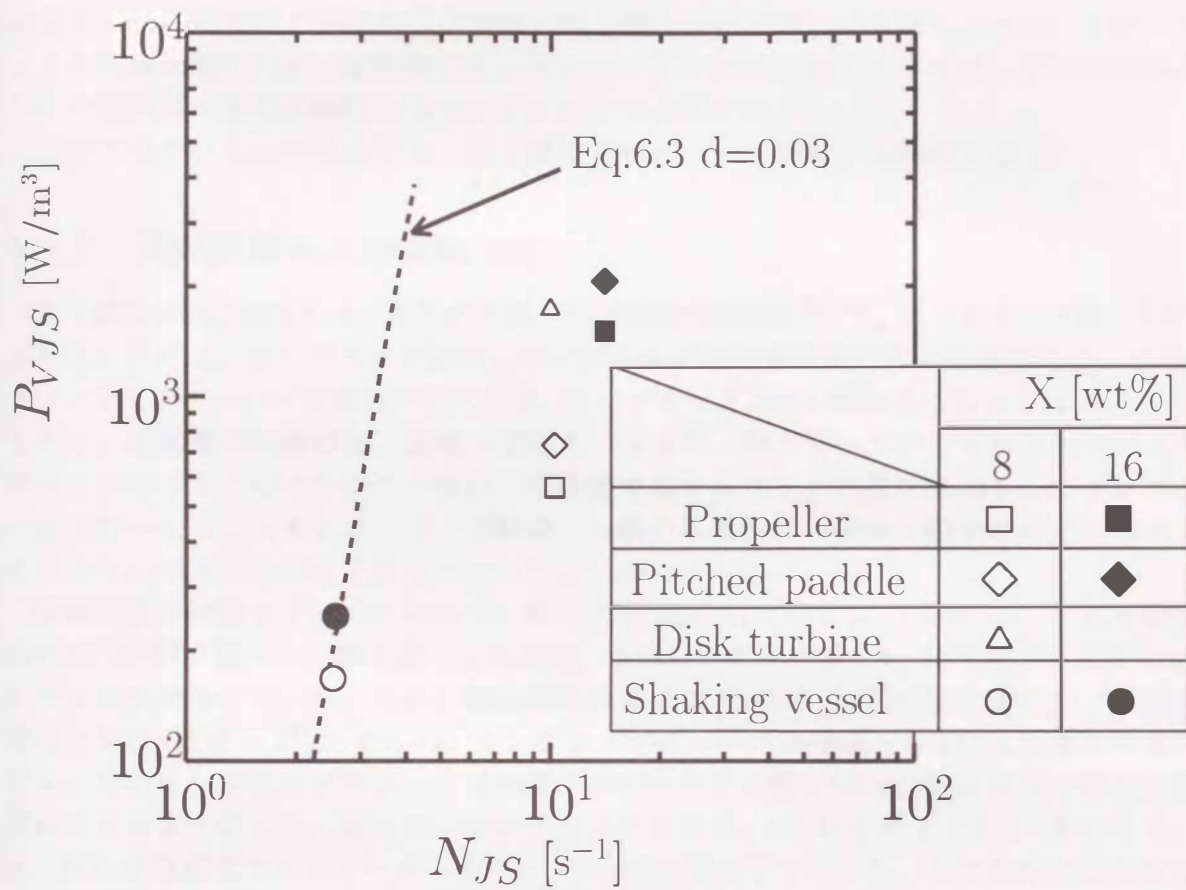


Fig. 6.6 Comparison of suspension power of shaking agitation with that of impeller agitation at critical suspension condition

6.3 槽内粒子濃度分布

前節では Zwietering の定義¹¹⁶⁾に基づいて揺動攪拌操作における浮遊化限界回転数について検討した。このとき、浮遊化限界回転数 N_{JS} および浮遊化限界動力 P_{VJS} はともに翼攪拌の場合よりも小さいことを示した。ただし、粒子の分散状態が翼攪拌と揺動攪拌の場合で異なるので、翼攪拌と同様の分散状態を得るには、 N_{JS} のほぼ 1.5 倍から 2 倍の回転数を要し、結局翼攪拌と同様の浮遊状態を得る動力はほぼ等しいと考えられた。ただ、このときの分散状態の判定は定性的であったので、真の性能比較のためには、槽内の粒子濃度分布や固液間の物質移動特性等を比較検討する必要性が生じた。

本節ではこれらの特性のうち、粒子濃度分布について検討した結果を示す。

6.3.1 実験装置および実験方法

粒子濃度分布の測定には、光学的手法¹¹²⁾、電気伝導法^{69, 78)}、サンプリング法^{5, 6, 10, 97)}がある。ここで、サンプリング法は、サンプリングを等速吸引で行う必要があり、さらに、サンプリングチューブの形状や挿入距離、サンプリング速度が問題になるとされている^{5, 6)}。しかし、揺動攪拌の場合は、装置の簡便さ、および、槽が動いていても容易にサンプル孔を取り付けることができることから、本研究ではサンプリング法を採用した。サンプリング法を用いた最も大きな理由は、揺動攪拌の場合は翼攪拌の場合と粒子の浮遊状態が大きく異なり、半径方向の粒子濃度が均一でないからである。

実験装置の概略を Fig.6.7 に示す。槽は内径 D が 14.0 および 17.3cm のアクリル樹脂製の平底円筒槽を用いた。攪拌液には水道水、固体粒子には比重 1.5、粒子径 550, 1095 μm のイオン交換樹脂を用いた。また、槽の回転直径 d は 1~4cm の間で変化させた。液高さは槽径と等しく ($H = D$) したため、サンプリングチューブは槽底から $D/10$ おきに 8 カ所設けた。そのサンプリングチューブは内径 2mm のガラス管を用い、半径方向の挿入距離を変化できるようにした。従って、サンプリング点は Fig.6.7 に示すように 24 点になる。また、吸引は電動式アスピレーターを用い 30mmHg 減圧下で行った。この測定方法の精度検定は Appendix E に示す。

6.3.2 粒子濃度分布

揺動攪拌における粒子濃度分布に対し、特徴的な点が 2 つ見いだされた。一つは、浮遊化限界回転数において、槽底中心部で粒子濃度が最大になる点であり、もう一つは、粒子濃度分布は翼攪拌の場合と異なり、高さ方向だけでなく半径方向にも分布が生ずることである。

粒子濃度分布に対する回転数の影響

Fig.6.8 は局所粒子濃度に対する回転数の影響を、サンプリング位置をパラメータとして示した図である。Fig.6.8(a), (b), (c) はそれぞれ、槽中心部、槽中心と槽壁の中間部そして槽壁部における局所粒子濃度である。Fig.6.8(a) が最も特徴的な分布を示しており、回

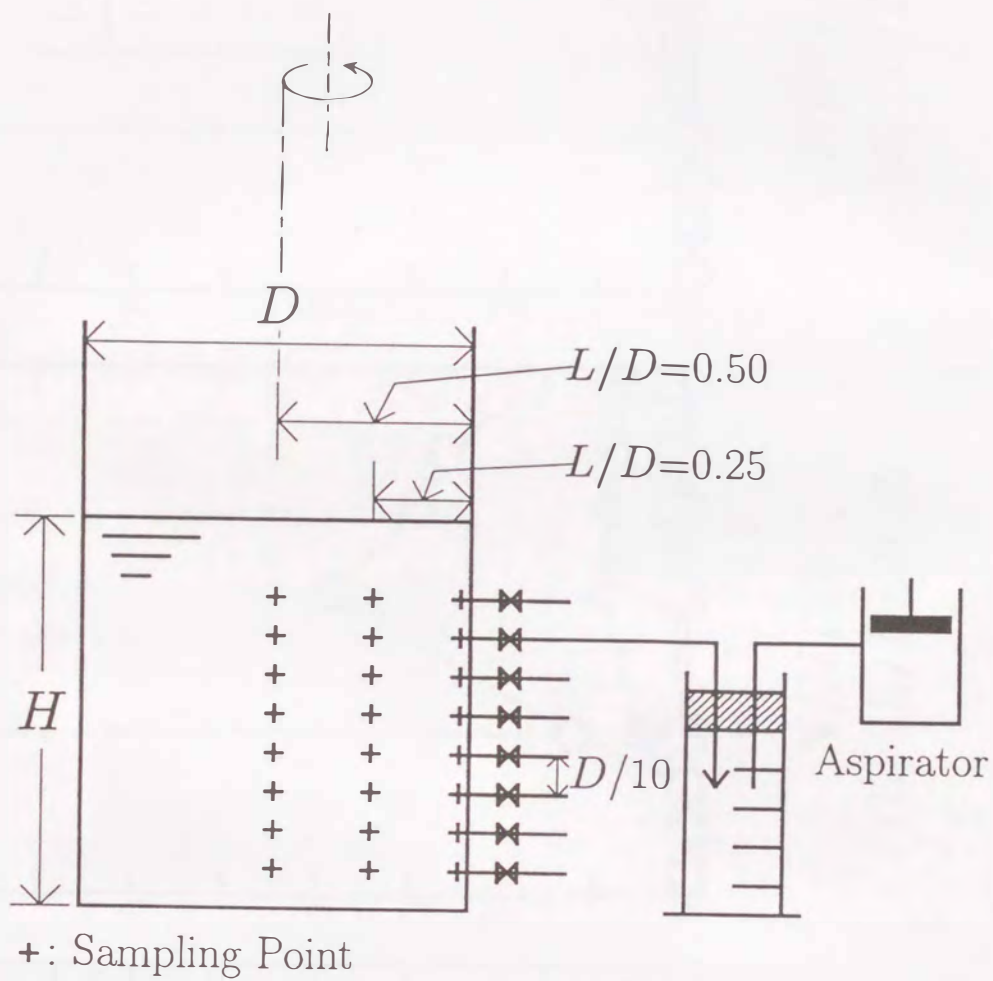


Fig.6.7 Schematic diagram of experimental apparatus

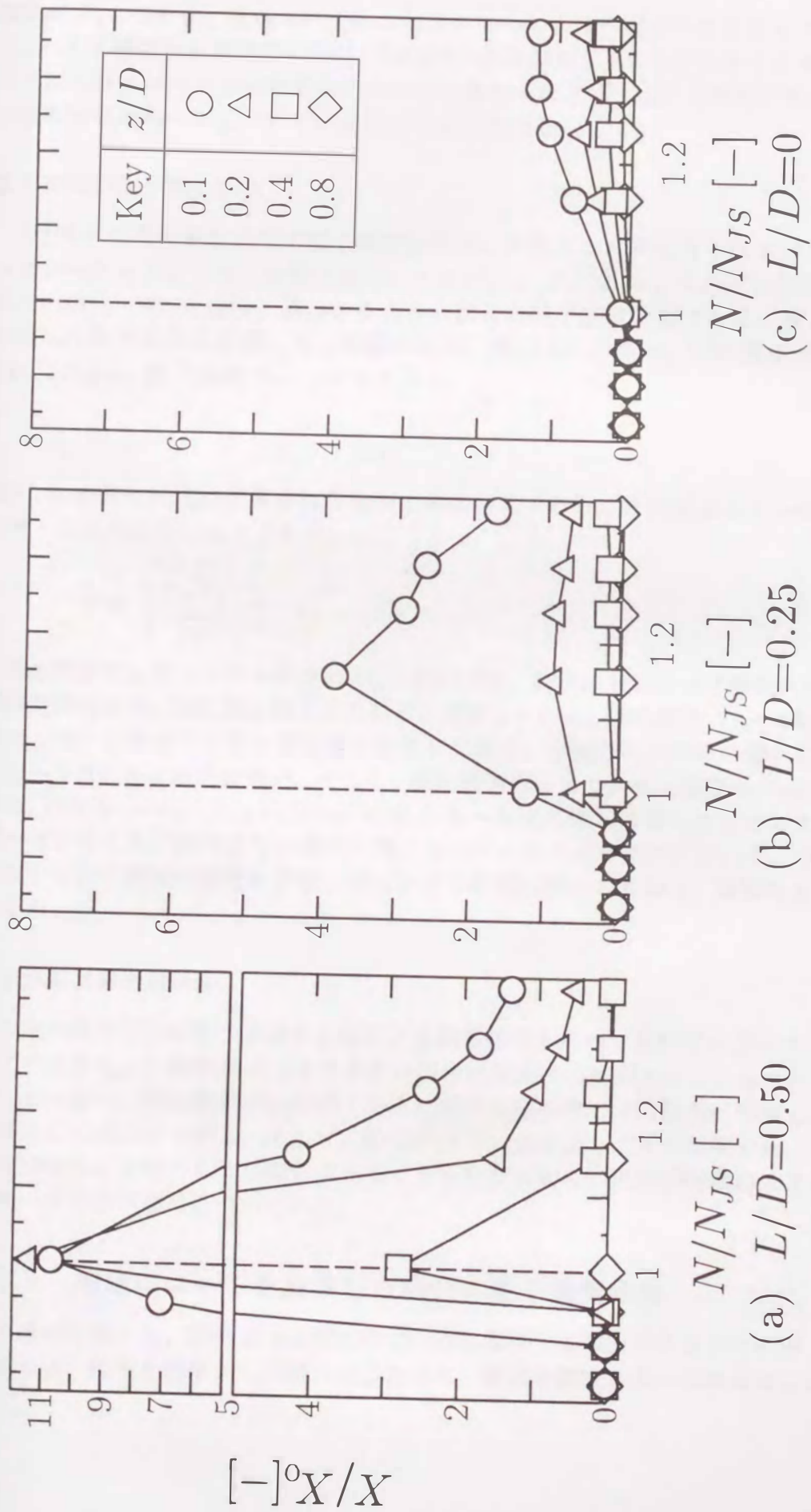


Fig.6.8 Effect of circulating frequency on particle fraction ($N_{JS}=2.2s^{-1}$)

転数が N_{JS} のとき、槽内のいずれの高さにおいても分布がピークを示している。これは、 N_{JS} のとき槽底から液表面に向けて竜巻状に粒子が巻き上がっていることを意味している。いずれの図においても回転数が大きくなればなるほど X/X_0 が 1 に近づき、高さ方向の粒子濃度分布が均一に近づいていくことを示している。

高さ方向の粒子濃度分布

Fig.6.9 は槽の高さ方向の粒子濃度分布を、半径方向に変化させたサンプリング位置をパラメーターとして示した図である。ここで、(a),(b),(c) は、それぞれ回転数が N_{JS} より小さい場合、 N_{JS} の場合、 N_{JS} より大きい場合の粒子濃度分布である。なお、 N_{JS} は前節で得られた次式から計算した。実験条件は、槽径 $D=17.3\text{cm}$ 、回転直径 $d=4\text{cm}$ 、粒子径 $d_p=1095\mu\text{m}$ 、粒子濃度 $X_0=1\text{wt}\%$ である。

$$N_{JS} = \frac{0.58d_p^{0.06}(g\Delta\rho/\rho_L)^{0.04}X_0^{0.03}}{D^{0.35}d^{0.17}\nu^{0.04}} \quad (6.7)$$

図中の σ の値は次式で計算される分布の標準偏差である。この値が小さいほど槽内の粒子が均一に分布していることを示す。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i}{X_0} - 1 \right)^2} \quad (6.8)$$

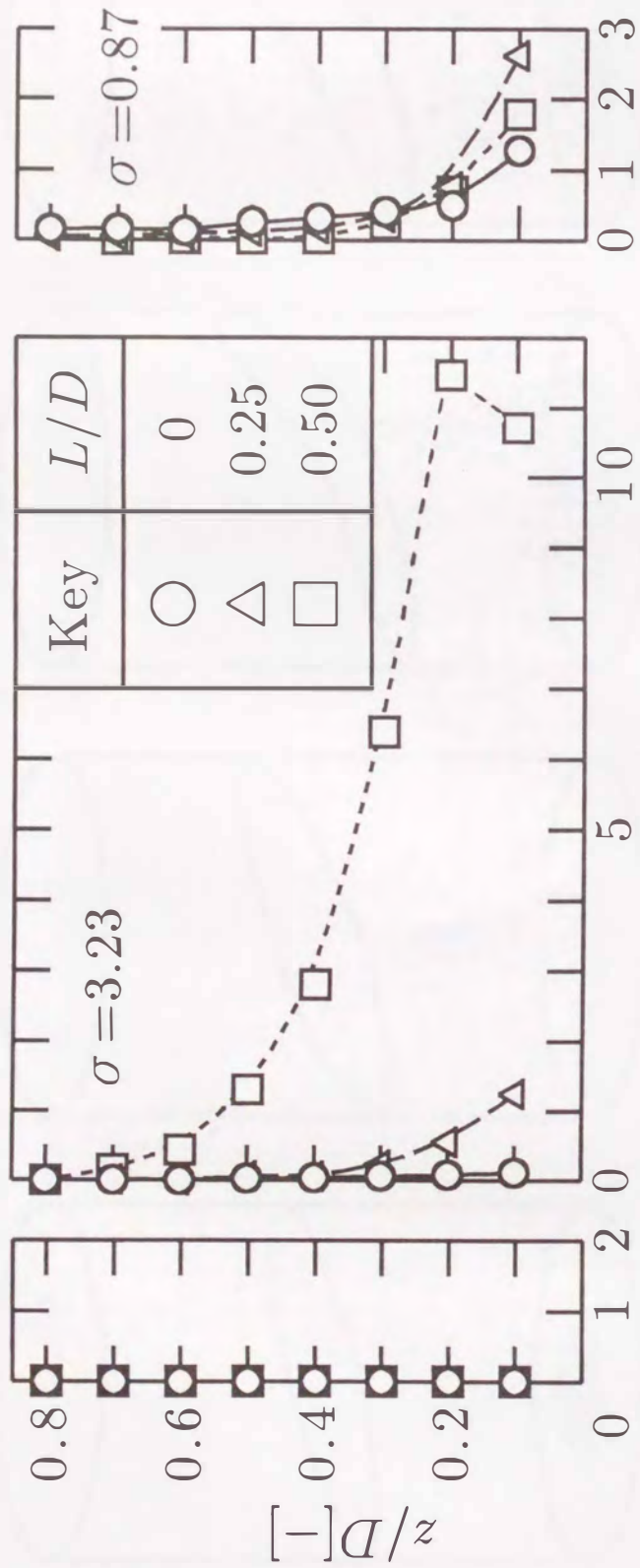
回転数が N_{JS} より小さい場合の Fig.6.9(a) では、粒子はほぼすべて槽底に沈んでおり、粒子浮遊操作に対し回転数が低すぎることを意味している。回転数が N_{JS} の場合の Fig.6.9(b) では、粒子は槽底中心部に最も多く分布しており、半径方向の分布に着目したとき槽中心に向かうほどその傾向は強い。そして、回転数が N_{JS} より大きい場合の Fig.6.9(c) では、図中の \square ($L/D = 0.5$) と \triangle ($L/D = 0.25$) のキーがよく似た分布になっており、槽中心の濃度だけでなく若干槽壁よりの濃度も高くなっていることを意味している。 N_{JS} より高い回転数では粒子濃度は槽底から槽上部にかけて単調に減少しており、特異的な挙動は観察されなかった。

粒子分散状態の概略図

以上の粒子分散状態の結果を目視による観察結果も含めて定性的に図示すると Fig.6.10 のようになる。回転数が N_{JS} より小さい場合は槽底中心に集まってくるのみでまったく浮遊していない。回転数が N_{JS} に達すると、粒子は槽底中心で円錐状に浮遊し、円錐の中心を軸にして回転している。そして、回転数が N_{JS} より少し大きい程度では、円錐状の粒子の塊が槽中心を軸として公転しているような状況になる。更に回転数が大きくなると粒子は均一な分散状態に近づいていく。

6.3.3 槽底にコーンを設置した場合の粒子濃度分布

上述の結果から、固体粒子は槽底中心付近に集積する傾向があることが解った。通常翼攪拌では、粒子を効率よく浮遊させるために、槽底を皿底あるいは球形にしたり、槽底に

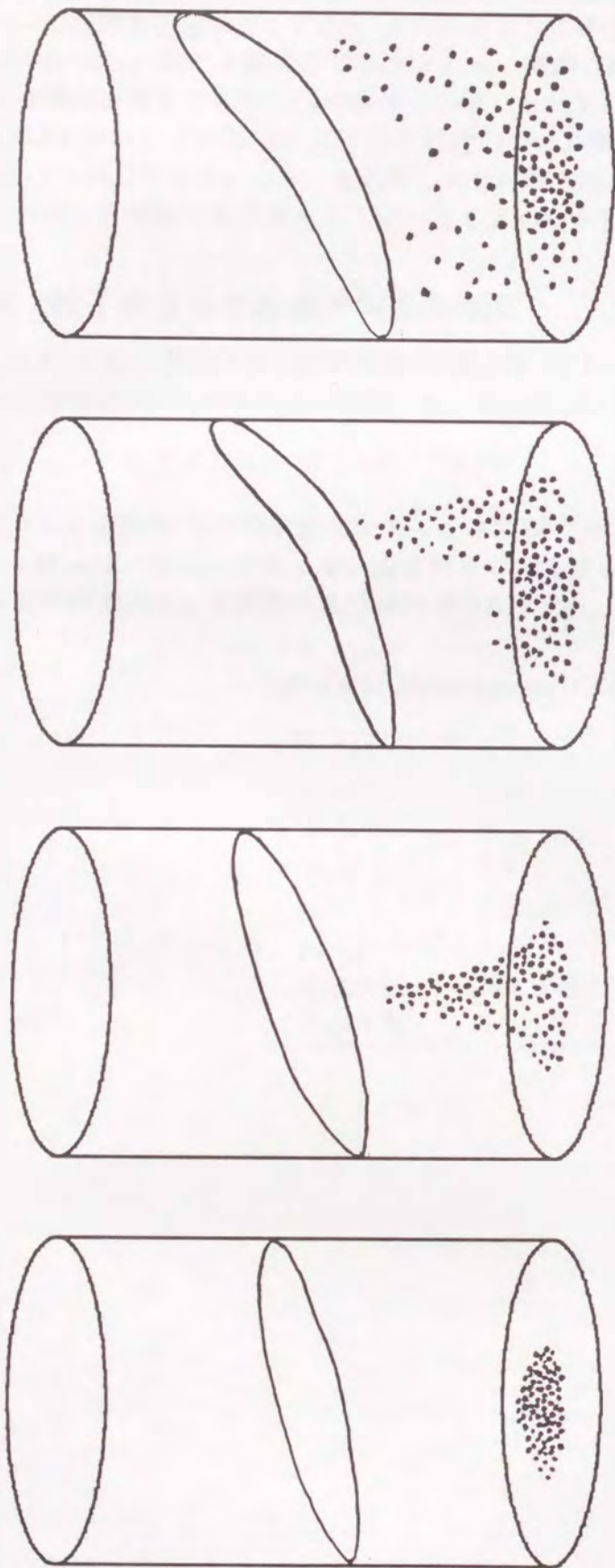


(a) $N/N_{JS}=0.85$

(b) $N/N_{JS}=1.00$

(c) $N/N_{JS}=1.30$

Fig.6.9 Axial particle fraction profile ($N_{JS}=2.2s^{-1}$)



$$N < N_{JS}$$

$$N = N_{JS}$$

$$N > N_{JS}$$

$$N \gg N_{JS}$$

Fig.6.10 Particle dispersion in shaking vessel

コーンを設置することが行われる。揺動攪拌でも槽底付近の粒子をより浮遊化させるためにコーンの設置を検討した。Fig.6.11 に示すように槽底に取り付けたコーンは最大直径を槽径の半分とし、高さを液高さの 1/3 とした。槽内の流動状態可視化における知見から、コーンは槽内に発生する旋回流の発達を阻害しないため、有効な幾何形状と考えられる。

Fig.6.12 はコーンの有無による粒子濃度分布の差異を示したものである。実験条件は Fig.6.9(c) と同じである。コーンを設置した方が槽上部における粒子濃度がより高くなっており、分布の標準偏差も小さくなっていることがわかる。

6.3.4 粒子濃度分布の標準偏差の相関

Fig.6.13 に粒子濃度分布の標準偏差 σ を動力数 N_P を用いて相関した結果を示す。粒子濃度分布の標準偏差 σ はほぼ次式で相関でき、動力数 N_P に逆比例することがわかった。

$$\sigma = 5N_P^{-1}(ND/u_t)^{-0.40}(d/D)^{0.46}X_0^{0.10} \quad (6.9)$$

ここで、 u_t は固体粒子の終末速度である。本実験では、粒子径 $550\mu\text{m}$ の u_t は 1.6cm/s 、 $1095\mu\text{m}$ の u_t は 4.9cm/s であった。固体粒子の物性値が入っていないのは終末速度に含まれているためである。実験条件は Table 6.3に示す。

Table 6.3: Experimental Conditions

D [m]	0.140, 0.173
d [m]	0.02, 0.03, 0.04
N [s^{-1}]	$N_{JS} \sim 3.3$
H/D [—]	1.0
ν [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	0.9×10^{-6}
ρ_p [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	1500
d_p [μm]	550, 1095
X_0 [wt %]	0.5, 1.0, 2.0

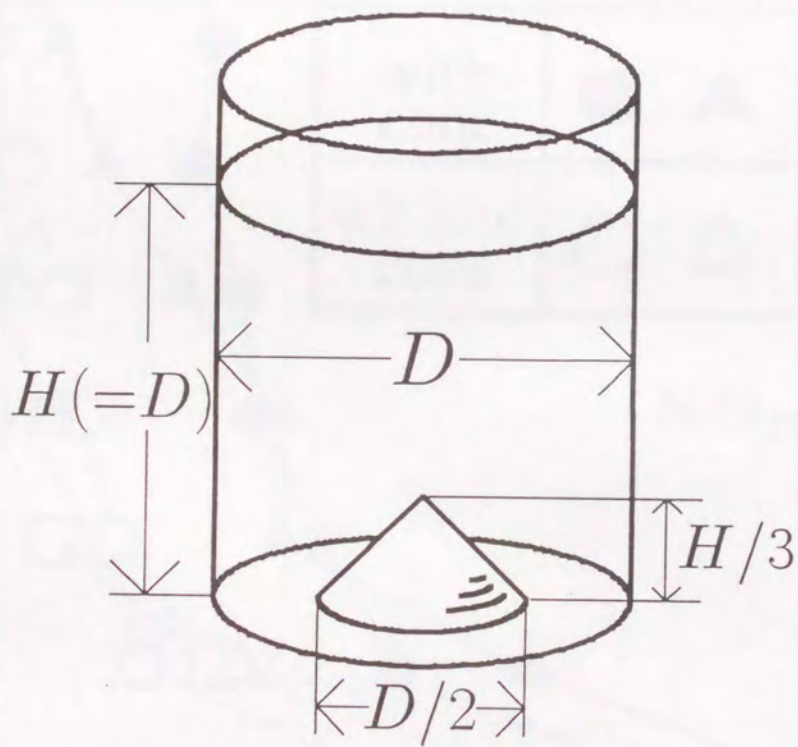


Fig.6.11 Schematic diagram of vessel with cone

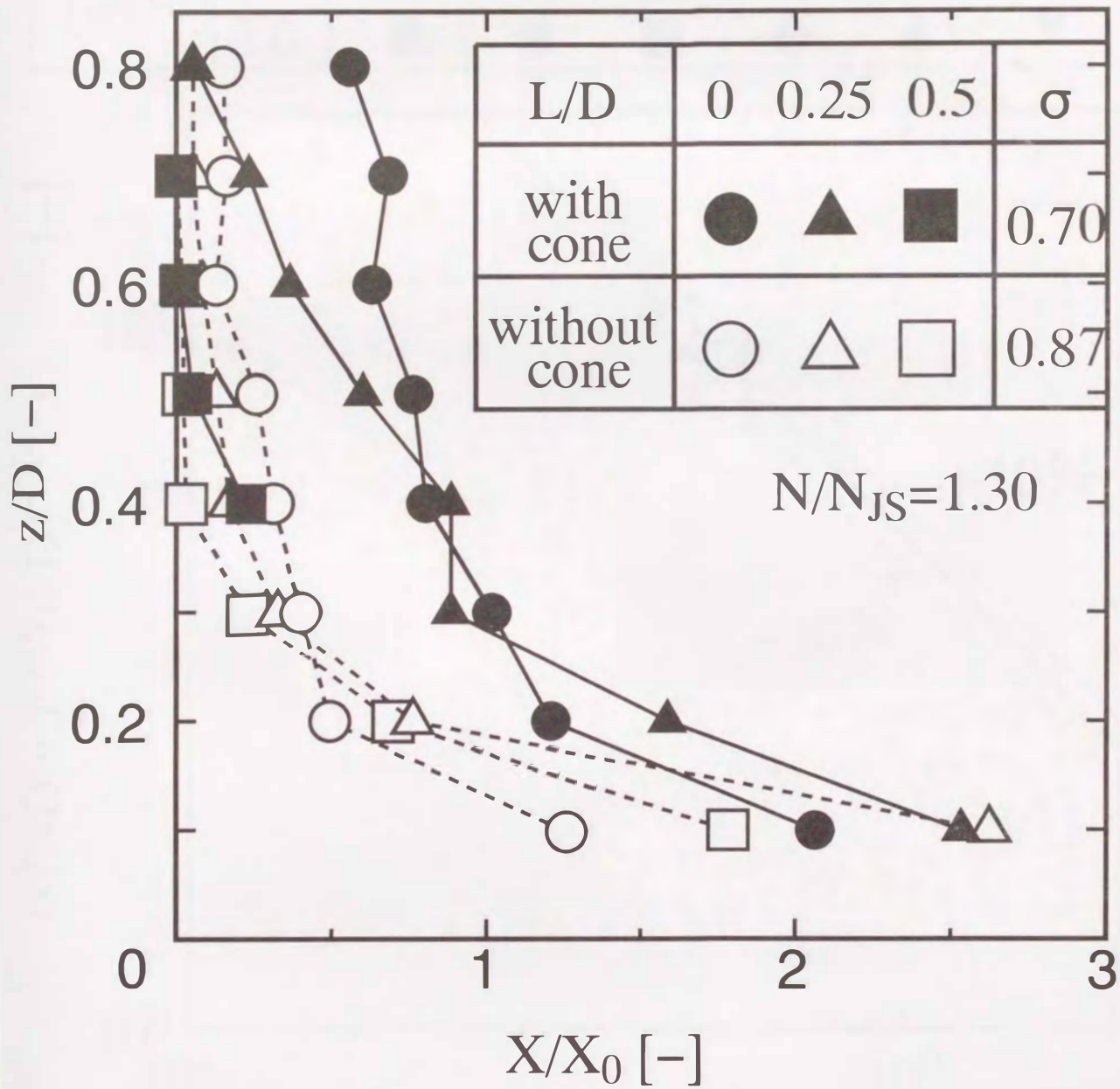


Fig.6.12 Comparison of dispersion profile between with cone and without cone

Key		d/D [-]					
		0.12	0.14	0.18	0.21	0.24	0.29
X ₀ [wt%]	0.5	○	⊙	□	◇	△	▽
	1.0	●	⊗	■	◆	▲	▼
	2.0	●	⊗	■	◆	▲	▼

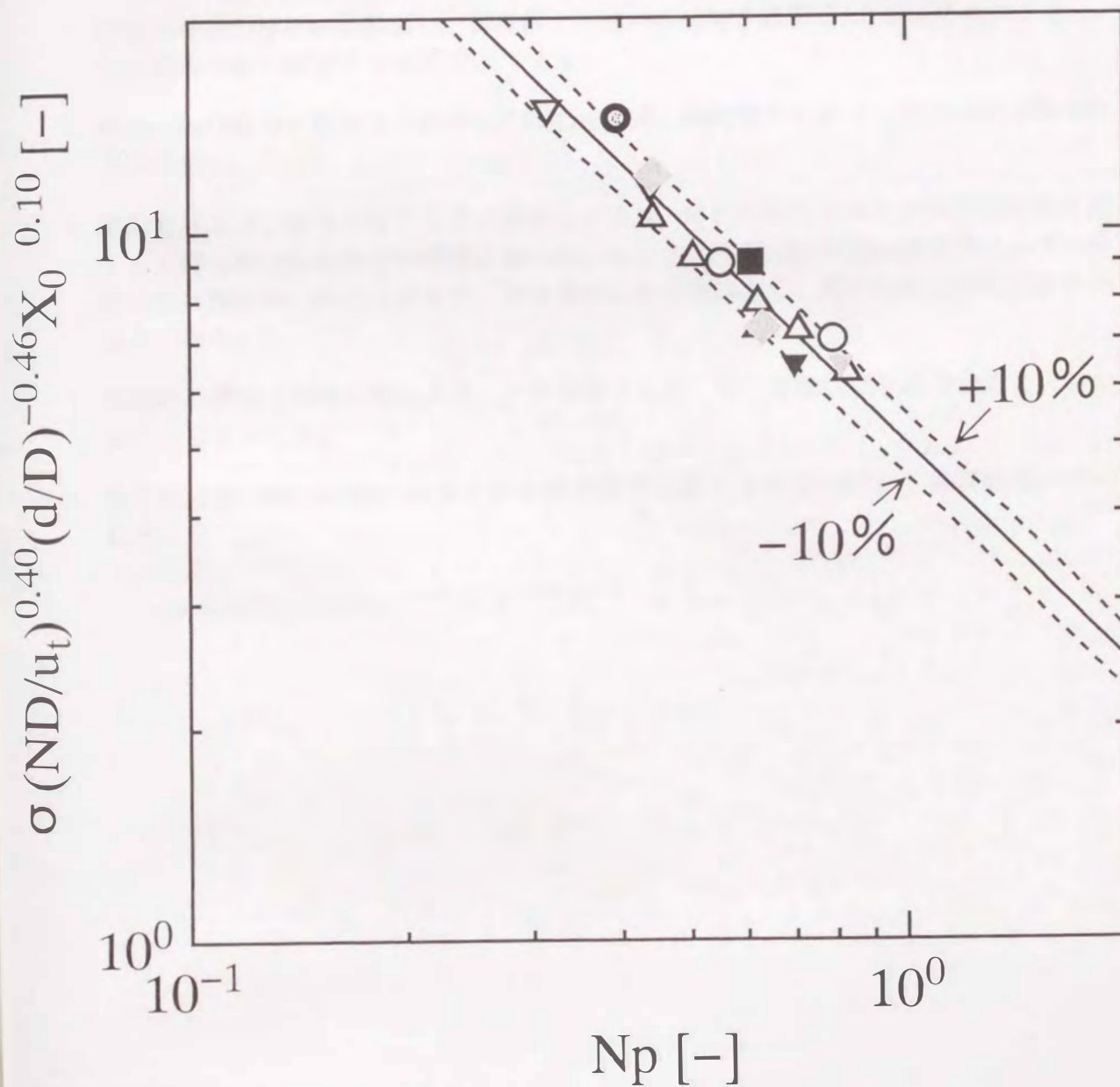


Fig.6.13 Effect of power number on standard deviation of particle dispersion

6.4 本章の結論

固液系の揺動攪拌特性の検討結果から以下の知見を得た。

1. 浮遊化限界回転数を Zwietering の定義に基づき測定した結果、粒子浮遊状態は翼攪拌の場合と異なっているが、この浮遊化限界回転数は Baldi らの粒子浮遊理論から導出した式に簡単な補正を加えることにより次式で良好に相関できた。

$$N_{JS} = \frac{0.58d_p^{0.06}(g\Delta\rho/\rho_L)^{0.04}X_0^{0.03}}{D^{0.35}d^{0.17}\nu^{0.04}}$$

2. 固液系の揺動攪拌所要動力は、翼攪拌と同様に固体粒子濃度が 20 % 以下であるなら、均一液相の動力相関式で推算可能である。
3. 浮遊化限界動力を翼攪拌の場合と比較した結果、揺動攪拌における浮遊化限界動力の方が小さい。
4. 揺動攪拌では、槽内の粒子はまず槽中心に集り、槽の回転数が浮遊化限界回転数に達すると槽の中心から粒子が浮遊し始める。そして、浮遊化限界回転数近傍における分散状態は翼攪拌の場合と異なり、半径方向にも分布が生じ、槽中心付近で粒子濃度が極大になる。
5. 翼攪拌の場合と同様に槽底にコーンを設置すれば、粒子分散状態を改善することができることを示した。
6. 粒子の分散状態の定量的指標である標準偏差は動力数に逆比例する相関結果が得られた。

$$\sigma = 5N_p^{-1}(ND/u_t)^{-0.40}(d/D)^{0.46}X_0^{0.10}$$

Chapter 7

総括

第1章では、現在の攪拌研究に対する本研究の位置づけを概説した。現在は低剪断攪拌に関する知見が僅少で、揺動攪拌も従来の経験と勘によって行われているのみである。そこで、揺動攪拌の有用性と工学的意義を説明した。

第2章では、揺動攪拌の混合特性について説明した。混合時間の測定結果から、本攪拌方法には完全混合を達成するのに最小限必要な回転数があることを見だし、それを、“混合限界回転数”と名付けた。そして、混合限界回転数を基準にした混合時間の推算式を提出した。また、混合過程を脱色法によって可視化した結果から揺動攪拌の場合には翼攪拌でみられるようなデッドスペースは存在しないことを示した。

第3章では、流動特性について説明した。槽内の流動状態を知ることは、混合特性、動力特性を説明する上で必要不可欠である。揺動攪拌の流動状態は、“混合限界回転数”を境に一変することがわかった。そして、操作回転数が混合限界回転数より小さい場合は、そのフローパターンが進行波型、大きい場合は旋回流型に分類できることがわかった。さらに、流動状態を記述するその他のパラメータとして、槽高さを決定する上で重要となる槽壁部液面上昇高さについて検討し、その相関式を提出した。また、循環時間分布の測定結果から、操作条件と循環流量の関係、混合時間と循環時間の関係を明らかにした。

第4章では、動力特性について説明した。攪拌所要動力は、従来の翼を用いた攪拌操作のように攪拌軸のトルクからは算出できないので揺動装置の消費電力から算出した。その結果、水のような低粘度流体の場合は、混合限界回転数以下では、ほとんど動力が消費されないことが解った。また、グリセリンや水飴のような高粘度流体では、所要動力に極大値が存在し、さらに、レイノルズ数が1以下の場合は、混合が可能な操作領域が存在しないことが解った。これらの結果から、揺動攪拌で良好な混合状態を得るためにはある範囲内の回転数で操作しなければならないことが解った。一方、揺動攪拌所要動力の推算式を提出し、その結果から、単位容積あたりの所要動力を基準にして、従来用いられている翼を用いた攪拌と揺動攪拌の混合性能を比較検討した。そして、揺動攪拌は、単位容積あたりの所要動力に対する混合時間は翼攪拌に比較して若干大きくなることを定量的に示した。

第5章では、槽壁物質移動特性について説明した。揺動攪拌槽の槽壁近傍での槽壁側平均物質移動係数および局所物質移動係数を希薄溶液系のイオン移動を利用して測定した。そして、単位容積あたりの所要動力を基準とした槽壁側平均物質移動係数は、高回転領域

では従来の翼攪拌の相関とほぼ同じレベルであるが、低回転領域では、翼攪拌より劣っていることが解った。また、局所物質移動係数の測定より、高さ方向に分布が得られたが、この分布は自由表面の運動と大きく関係していることが解った。この結果は、物質移動と熱移動のアナロジーから、揺動攪拌における伝熱特性の説明を可能にする。

第6章では、固液混合特性について説明した。固液攪拌で最も重要なパラメータである、浮遊化限界回転数について検討し、その相関式を提出した。また、槽内における粒子濃度分布についても測定を行い、揺動攪拌では、槽内の粒子はまず槽中心に集り、槽の回転数が浮遊化限界回転数に達すると槽の中心から粒子が竜巻状に浮遊し始めることがわかった。そして、浮遊化限界回転数近傍における分散状態は、翼攪拌の場合と異なり、半径方向にも分布が生じ、槽中心付近で粒子濃度が極大になる。さらに、粒子分散状態を改善するためには、翼攪拌の場合と同様に槽底にコーンを設置すれば良いことも解った。

以上の検討結果から、水平円運動をする円筒槽の”揺動攪拌”における基礎的特性がかなり明らかになったと思われる。これらの検討結果が、より最適な装置の設計、用途開発の指針として活用されれば、本研究の目的が達成されることになる。

Appendix A

グリセリン水溶液の物性推算式

本研究では、攪拌液に種々の粘度に調整したグリセリン水溶液を用いた。ここでは、各溶液において温度 θ [°C]を変数とした、密度 ρ [kg/m³]と動粘度 ν [m²/s]を求める実験式を示す。

1. 密度

密度 ρ [kg/m³]はWeld型ピクノメータを用いて測定した。このとき、恒温槽を用いて4水準の温度で測定した。そして、密度は次式で相関した。

$$\rho = A_0 + A_1\theta + A_2\theta^2 \quad (\text{A.1})$$

ここで、 θ は温度[°C]であり、 A_i ($i = 0 \sim 2$)は各溶液における定数である。この定数をTable A.1に示す。

2. 動粘度

動粘度 ν [m²/s]はUbelode型とキャノン-フェンスケ型粘度計を用いて測定した。密度の測定と同様に恒温槽を用いて4水準の温度で測定した。そして、動粘度は次式で相関した。

$$\nu = \frac{B_0}{1 + B_1\theta + B_2\theta^2} \quad (\text{A.2})$$

ここで、 θ は温度[°C]であり、 B_i ($i = 0 \sim 2$)は各溶液における定数である。この定数をTable A.2に示す。

Table A.1: Constants for density correlation

vol. %	0	20	30	50	100
wt. %	0	24	35	55	100
A_0	1000.18	1061.17	1088.66	1144.74	1273.22
$A_1(\times 10^{-1})$	0.075	-1.112	0.667	-0.614	-6.390
$A_2(\times 10^{-3})$	-5.250	-5.179	-9.853	-8.772	-0.171
Range θ [°C]	-	17.0~43.5	15.0~40.0	11.0~30.0	15.0~30.0

Table A.2: Constants for kinematic viscosity correlation

vol. %	0	20	30	50	100
wt. %	0	24	35	55	100
$B_0(\times 10^{-6})$	1.7014	3.8352	4.8061	-32.289	3976.6
$B_1(\times 10^{-2})$	2.9520	4.4265	1.8963	-33.442	-9.4388
$B_2(\times 10^{-4})$	2.5207	3.6242	8.7194	25.742	122.57
Range θ [°C]	20.0~40.0	17.0~43.5	15.0~40.0	20.0~30.0	20.0~30.0

Appendix B

KOH -K₄Fe(CN)₆-K₃Fe(CN)₆系水溶液の物性推算式

1. 密度 ρ 及び粘度 μ の推算式³⁰⁾

30°C における KOH -K₄Fe(CN)₆-K₃Fe(CN)₆系の水溶液の液密度 ρ [kg/m³]、及び粘度 μ [Pa·s] は、1 kmol/m³ KOH を用いた場合、次のように濃度の線形関係で相関される。

$$\rho_{30} = 1041.7 + 223.8C_{ferro} + 167.7C_{ferri} \quad (B.1)$$

$$\mu_{30} = 8.670 \times 10^{-4} + 4.765 \times 10^{-4}C_{ferro} + 2.653 \times 10^{-4}C_{ferri} \quad (B.2)$$

ここで、 C_{ferro} はフェロシアン化物イオンの濃度、 C_{ferri} はフェリシアン化物イオンの濃度であり、kmol/m³の次元を持つ。

また、粘度 μ [Pa·s] と温度 θ [°C] の関係式を以下に示す。

$$\mu = \mu_{30} + (1.95 \times 10^{-6} + 1.94 \times 10^{-5}C_{ferro} + 0.84 \times 10^{-5}C_{ferri}) \times (30 - \theta) \quad (B.3)$$

動粘度 ν [m²/s] は以下に示すように密度の相関式と粘度の相関式より算出した。このとき、密度は30°Cの値を代入した。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_{30}} \quad (B.4)$$

2. 拡散係数の推算式³⁰⁾

フェリシアン化物イオンの拡散係数 D_{ferri} [m²/s] は次式によって推算される。

$$\frac{D_{ferri} \mu}{T} \times 10^{15} = 2.25 + 0.044 \Gamma \quad (B.5)$$

ここで、 T は絶対温度 [K] である。また、 Γ はイオン強度 [kmol/m³] であり、次式で定義される。

$$\Gamma = \frac{1}{2} \sum_j Z_j^2 C_{j,b} \quad (\text{B.6})$$

式中の Z_j はイオン種 j の電荷であり、 $C_{j,b}$ はそのイオンのバルク中の濃度 [kmol/m³] である。

本実験で使用した攪拌液における各物性値を Table B.1 に示す。

Table B.1: Physical property of agitated liquid

ρ_{30} [kg·m ⁻³]	1088.1
μ_{30} [Pa·s]	9.65×10^{-4}
Γ [kmol·m ⁻³]	3.06
\mathcal{D}_{ferri} [m ² ·s ⁻¹]	$7.2 \sim 7.4 \times 10^{-10}$
Sc [-]	1220 ~ 1270

Appendix C

槽壁側平均物質移動係数の測定における濡れ面積 A の補正

槽壁側平均物質移動係数の測定で用いた濡れ面積 $A[\text{m}^2]$ は攪拌条件により変化するため、静止時の濡れ面積 $A_0[\text{m}^2]$ を基準にして補正を行った。本実験における各実験条件での静止時の濡れ面積 A_0 を Table C.1 に、また、攪拌時における濡れ面積 A と静止時における濡れ面積 A_0 の比、 A/A_0 の回転数 N による変化を Figs.C-1,2,3 に示す。

Table C.1: Values of $A_0[\text{m}^2]$

$D[\text{m}]$	H/D		
	1.0	0.8	0.6
0.140	5.53×10^{-2}	4.38×10^{-2}	3.24×10^{-2}
0.150	6.47×10^{-2}	5.13×10^{-2}	3.79×10^{-2}
0.170	8.19×10^{-2}	6.45×10^{-2}	4.71×10^{-2}

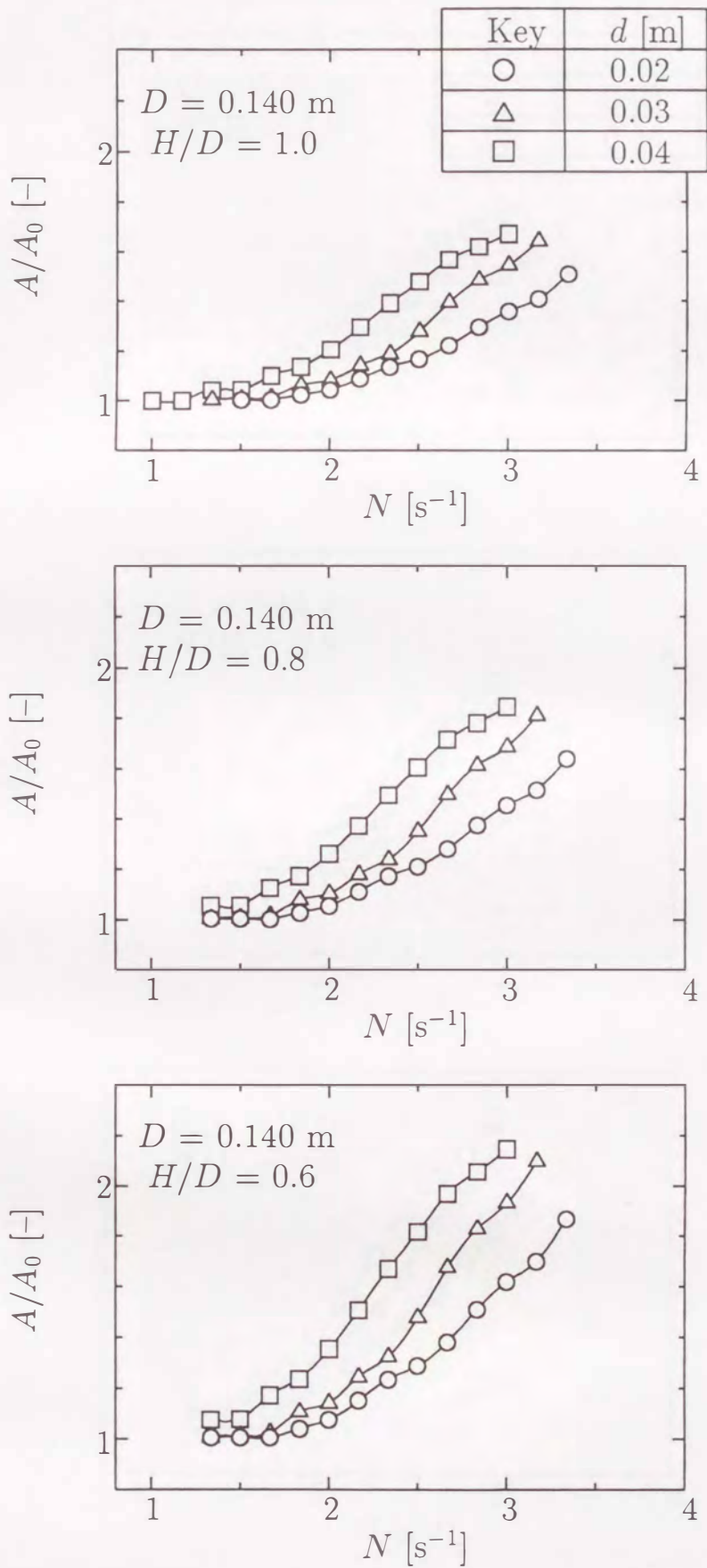


Fig.C-1 Relationship between A/A_0 and circulating frequency for $D=0.140$ m

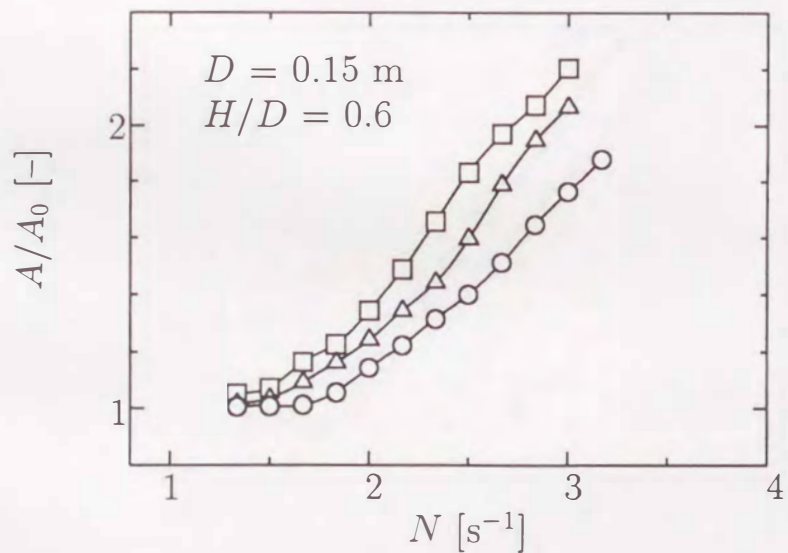
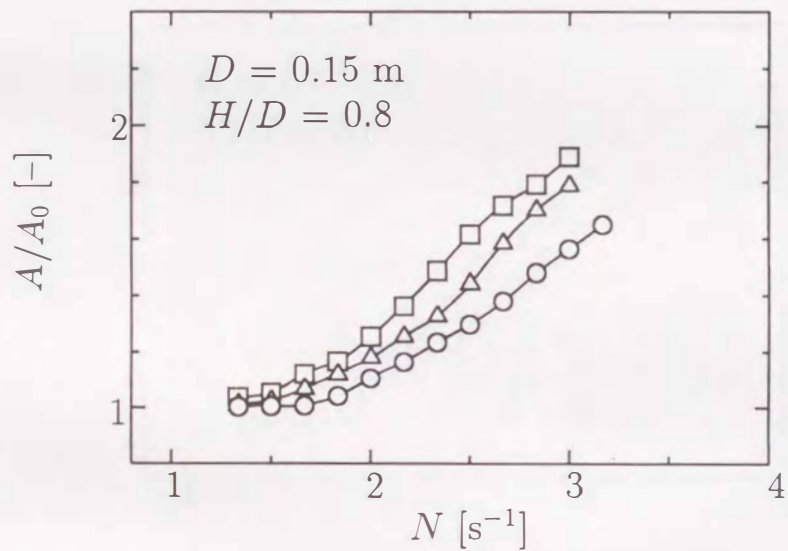
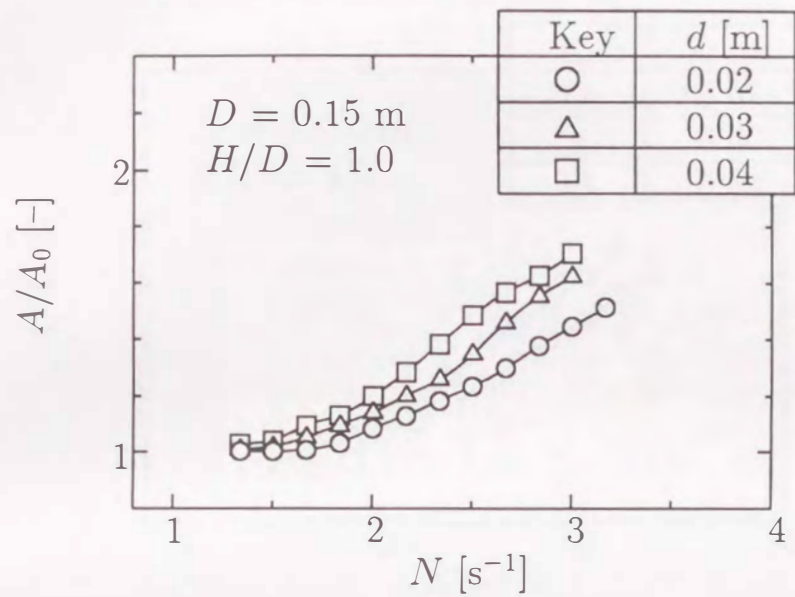


Fig.C-2 Relationship between A/A_0 and circulating frequency for $D=0.150 \text{ m}$

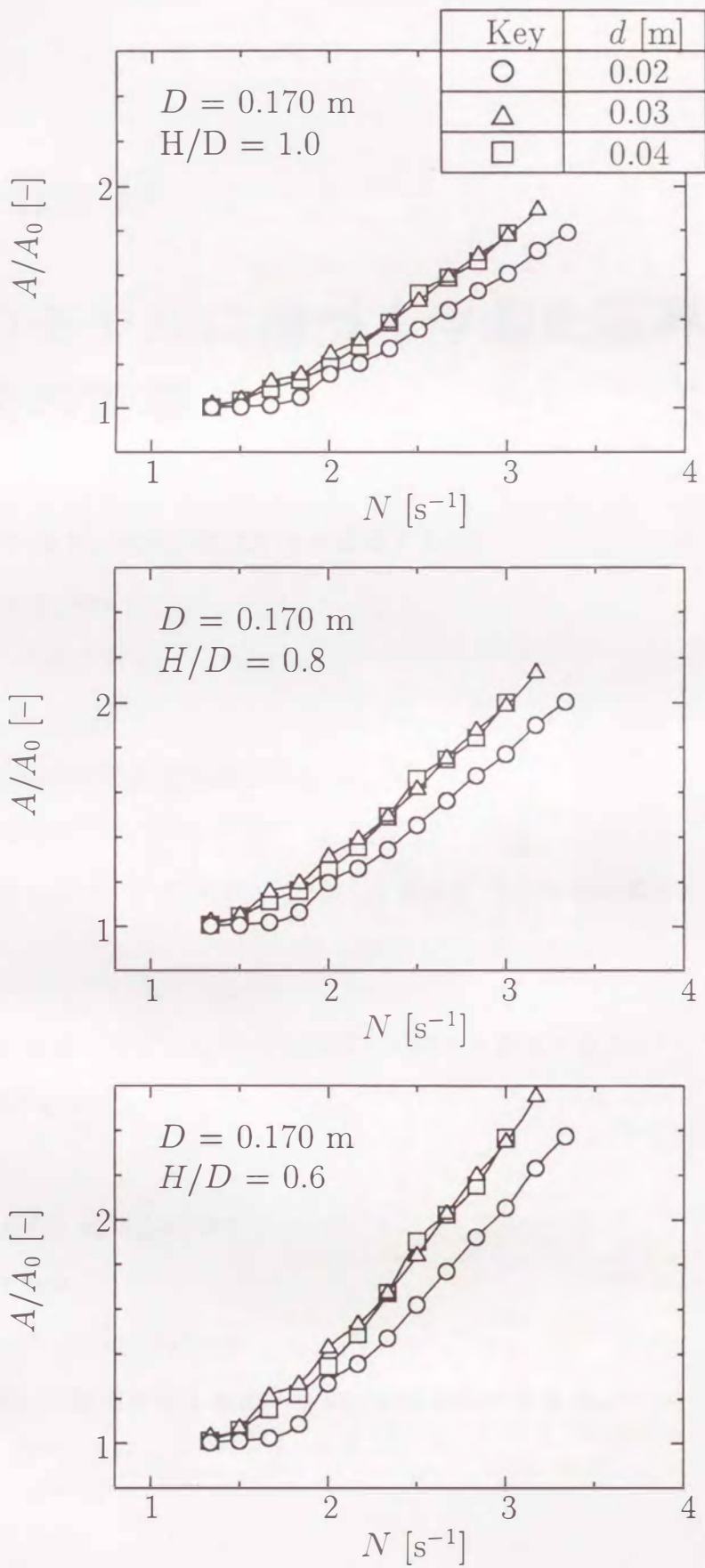


Fig.C-3 Relationship between A/A_0 and circulating frequency for $D=0.170$ m

Appendix D

Baldi のモデルに基づく浮遊化限界回転数の の相関式の誘導

Baldi らのモデルより、次式が成立すると仮定する。

$$d_P \Delta \rho g \propto \rho_L (\epsilon d_P)^{\frac{2}{3}} \quad (\text{D.1})$$

上式を変形すると次式となる。

$$\epsilon \propto d_P^{\frac{1}{2}} (\Delta \rho g / \rho_L)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{D.2})$$

一方、揺動攪拌の動力相関式は次式で与えられる。

$$N_P = 934 Fr^{3/2} Re^{-1/4} (d/D)^{3/2} \quad (\text{D.3})$$

ここで、 N_P , Fr および Re は $P/\rho N^3 D^5$, $N^2 D/g$ および $N d^2/\nu$ で定義される無次元数である。従って、

$$P \propto \rho N^3 D^5 (N^2 D/g)^{3/2} (N d^2/\nu)^{-1/4} (d/D)^{3/2} \quad (\text{D.4})$$

ここで、 $H = D$ であるので $P_V (\propto P/D^3)$ に関して解くと次式となる。

$$P_V \propto N^{\frac{23}{4}} D^2 d \nu^{\frac{1}{4}} \rho \quad (\text{D.5})$$

従って、次式

$$\epsilon \propto P_{VJS} / \rho_L \propto N_{JS}^{\frac{23}{4}} D^2 d \nu^{\frac{1}{4}} \quad (\text{D.6})$$

より次式が導出される。

$$N_{JS}^{\frac{23}{4}} D^2 d \nu^{\frac{1}{4}} \propto d_P^{\frac{1}{2}} (\Delta \rho g / \rho_L)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{D.7})$$

よって、 N_{JS} に関して整理すると本文中の Eq.(6.4) が導出される。

$$N_{JS} \propto \frac{d_P^{0.09} (\Delta \rho g / \rho_L)^{0.26}}{D^{0.35} d^{0.17} \nu^{0.04}} \quad (\text{6.4})$$

Appendix E

サンプリング法の検定

本測定方法の再現性は良好で、予備実験での翼攪拌の場合の粒子濃度分布の測定結果は Fig.E-1 に示すように文献値⁴⁾と良好に一致した。この場合の条件は、槽径の 1/10 のバツフルを 4 枚設置した攪拌槽に槽底から槽径の 1/3 の位置に下方流の 4 枚ピッチドパドルを備え、固体粒子：ガラスビーズ、平均粒子径：463 μm 、粒子濃度：0.5wt %、浮遊化限界回転数 $N_{JS}=8.3\text{s}^{-1}$ で操作しているものである。また、サンプリング結果の平均値に関する分散の t 検定を行った結果、次式を満たしており危険率 5% で粒子の仕込濃度とサンプリング平均濃度の間で有意差はなくサンプリング結果の妥当性が確認された。

$$t_0 = \frac{\bar{X}_i - X_0}{\sigma/\sqrt{n}} < t(n, 0.05) \simeq 2 \quad (\text{E.1})$$

ここで、 σ は本文 Eq.(6.8) で示される全サンプリングデータの標準偏差、 n はサンプル数 (本実験では 24)、 \bar{X}_i は全サンプリングデータの平均値、 X_0 は仕込濃度である。

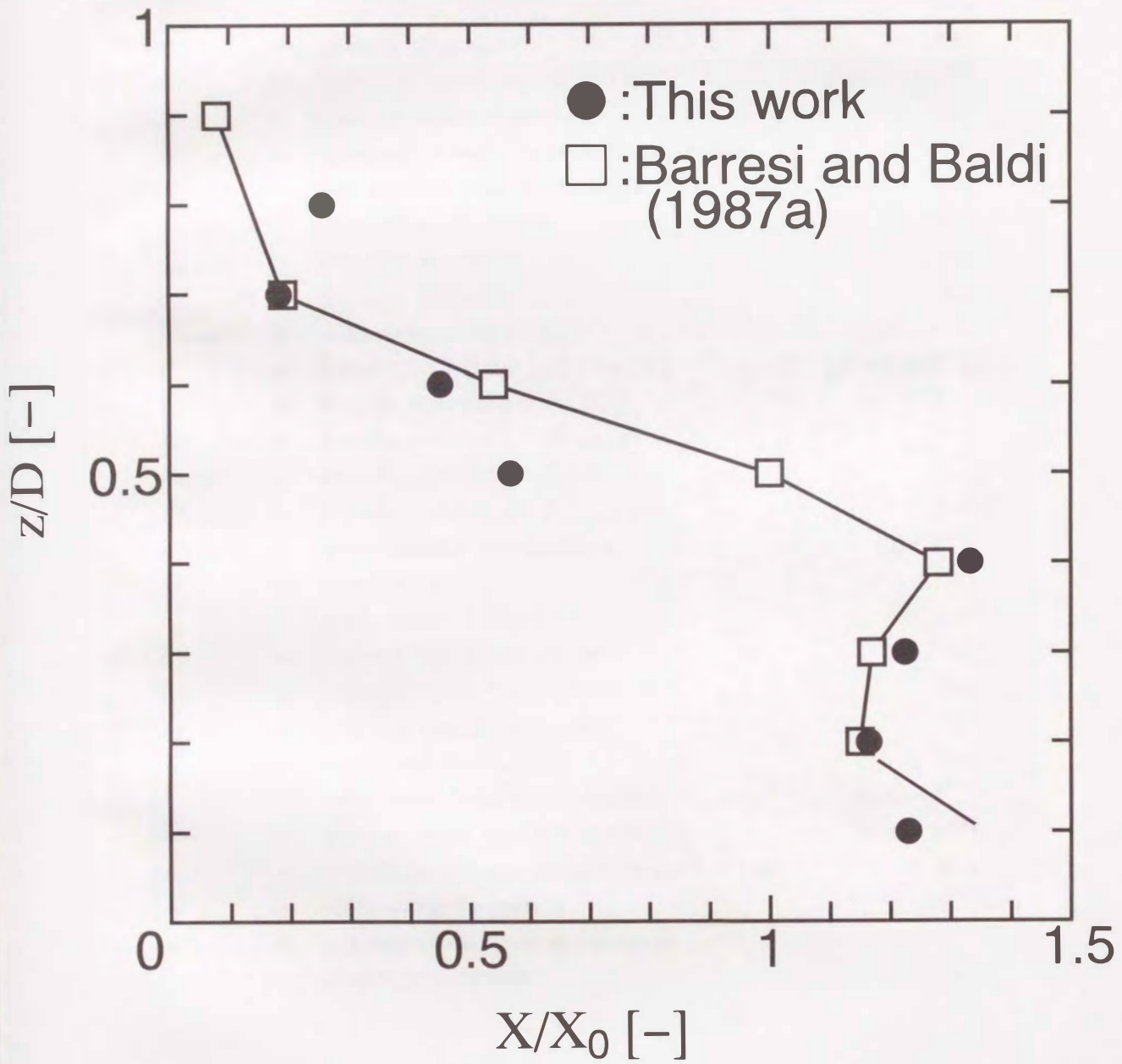


Fig.E-1 Comparison of experimental data with literature data

Nomenclature

A	= amplitude of oscillation curve at peak or valley point	[—]
A	= surface area of cathode	[m ²]
B	= constant in Eq.(2.1)	[—]
c	= bottom clearance	[m]
C_{ferric}	= bulk concentration of Fe(CN) ₆ ³⁻	[kmol • m ⁻³]
D	= shaking vessel diameter	[m]
D_a	= apparent vessel diameter for spherical and conical vessels ($= (4V/\pi)^{1/3}$)	[m]
d	= circulating diameter	[m]
d_{imp}	= impeller diameter	[m]
d_p	= particle diameter	[m]
\mathcal{D}_{ferric}	= diffusivity of Fe(CN) ₆ ³⁻	[m ² • s ⁻¹]
F	= Faraday constant ($= 9.65 \times 10^7$)	[C • kmol ⁻¹]
Fr	= Froude number ($= N^2 D/g$)	[—]
Fr_C	= Froude number ($= N_C^2 D/g$)	[—]
$Fr_{C,a}$	= Froude number ($= N_C^2 D_a/g$)	[—]
$Fr_{max,P}$	= Froude number ($= N_{max,P}^2 D/g$)	[—]
g	= gravitational acceleration	[m • s ⁻²]
H	= liquid height	[m]
h_p	= peak value of Eq.(3.6)	[—]
h	= highest liquid free surface	[m]
h'	= highest liquid free surface ($N < N_C$)	[m]
I_d	= limiting electrical current	[A]
K	= coefficient in Eq.(2.1)	[—]
k	= local mass transfer coefficient	[mm • s ⁻¹]
\bar{k}	= average mass transfer coefficient	[mm • s ⁻¹]
L	= sampling distance from side wall of vessel	[m]
N	= circulating frequency	[s ⁻¹]
n	= number of electron involved in electrode reaction	[—]

N_C	= critical circulating frequency for mixing	[s ⁻¹]
N_{JS}	= critical circulating frequency for complete suspension	[s ⁻¹]
$N_{max,h}$	= circulating frequency for maximum elevated height of liquid free surface on vessel wall	[s ⁻¹]
$N_{max,P}$	= circulating frequency for maximum power consumption	[s ⁻¹]
N_P	= power number (= $P/\rho N^3 D^5$)	[-]
Nq_c	= circulation flow rate number (= q_c/Nd^3)	[-]
P	= power consumption	[W]
$P(\theta)$	= circulation time distribution function	[-]
P_V	= power consumption per unit volume of liquid (= $P/\frac{\pi}{4}D^2H$)	[W · m ⁻³]
P_{VJS}	= suspension power consumption per unit volume of liquid	[W · m ⁻³]
q_c	= circulation flow rate (= $\pi D^2 H/4t_c$)	[m ³ · s ⁻¹]
r	= distance from vessel center	[m]
Re	= Reynolds number (= Nd^2/ν)	[-]
Re_C	= Reynolds number for critical circulating frequency for mixing (= $N_C d^2/\nu$)	[-]
$Re_{max,P}$	= Reynolds number for circulating frequency for maximum power consumption (= $N_{max,P} d^2/\nu$)	[-]
S	= constant in Eq.(6.1)	[-]
Sc	= Schmidt number (= ν/\mathcal{D}_{ferr})	[-]
t_c	= mean circulation time	[s]
t_m	= mixing time	[s]
t_n	= n % mixing time	[s]
t_{95}	= 95 % mixing time	[s]
t_{99}	= 99 % mixing time	[s]
u	= mean circulation time	[s]
u_1	= mean circulation time for Pattern 1	[s]
u_2	= mean circulation time for Pattern 2	[s]
u_3	= mean circulation time for Pattern 3	[s]

u_t	=	terminal velocity of particle	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
V	=	liquid volume	$[\text{m}^3]$
w	=	constant in Eq.(3.6)	$[\text{s}]$
x	=	wave height	$[\text{m}]$
X	=	particle concentration	$[-]$
\bar{X}_i	=	average particle weight percent in sample	$[\text{wt } \%]$
X_i	=	particle weight percent in sample	$[\text{wt } \%]$
X_0	=	particle weight percent in vessel	$[\text{wt } \%]$
z	=	distance from vessel bottom to free surface	$[\text{m}]$
z_0	=	distance from vessel bottom to trough of free surface wave	$[\text{m}]$
z_1	=	distance from vessel bottom to crest of free surface wave	$[\text{m}]$
α	=	exponent in Eq.(2.6)	$[-]$
α, β, γ	=	exponents in Eq.(6.5)	$[-]$
ϵ	=	dissipated power per unit mass of liquid	$[\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$\Delta\rho$	=	density difference ($=\rho_p - \rho_L$)	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
θ	=	circulation time	$[\text{s}]$
ρ, ρ_L	=	liquid density	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_p	=	particle density	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
μ	=	viscosity	$[\text{Pa} \cdot \text{s}]$
ν	=	kinematic viscosity	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
σ	=	standard deviation of X_i	$[-]$
ϕ	=	phase difference	$[\text{rad}]$
ω	=	angular velocity	$[\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}]$

Literature Cited

- 1) Abid M., C. Xuereb and J. Bwrtrand : Trans. IChemE , 70, 376-384 (1992)
- 2) Abid M., C. Xuereb and J. Bwrtrand : Canadian J. Chem. Eng. , 72, 184-193 (1994)
- 3) Andou, K., R. Hukuda and K. Endo : Kagaku Kogaku, 38, 460-465 (1974)
- 4) Baldi, G., R. Conti and E. Alaria : Chem. Eng. Sci., 33, 21-25 (1978)
- 5) Barresi A. and G. Baldi : Chem. Eng. Sci., 42, 2949-2956 (1987)
- 6) Barresi A. and G. Baldi : Chem. Eng. Sci., 42, 2969-2972 (1987)
- 7) Biggs, R. D., : AIChE J., 9, 636-640 (1963)
- 8) Bird, R. Byron, Warren E. Stewart and Edwin N. Lightfoot : "Transport Phenomena", John Wiley & Sons, New York, 96-98 (1960)
- 9) Bode, J. : Chem. Eng. Technol. , 17, 145-148 (1994)
- 10) Buurman, C., G. Resoort and A. Plaschkes : Chem. Eng. Sci., 41, 2865-2871 (1986)
- 11) Calderbank, P. H. and M. B. Moo-Young : Chem. Eng. Sci., 16, 39-54 (1961)
- 12) Chapman, C. M., A. W. Nienow and J. C. Middleton : Trans. Inst. Chem. Eng., 59, 134-137 (1981)
- 13) Chudacek, M. W., : Chem. Eng. Sci., 40, 385-392 (1985)
- 14) Czeslaw Kuncewicz : Chem. Eng. Sci., 47, 3959-3967 (1992)
- 15) Dodge, F. T., D. D. Kana and H. N. Abramson : AIAA J., 3, 685-695 (1965)
- 16) Fokema M. D., M.S. Kresta and P.E. Wood : Canadian J. Chem. Eng , 72, 177-183 (1994)
- 17) Frank S. Crawford, Jr.: "Berkeley Physics Course Vol.3 Waves", McGraw-Hill Book Company, New York (1968), 高橋秀俊監訳, 「パークレー物理学コース 3 波動」, 丸善株式会社, 386-396 (1973)
- 18) Funakoshi M. and S. Inoue : J. Fluid Mech., 192, 219-247 (1988)
- 19) 船越満明, 井上進 : 日本物理学会誌, 44, 323-329 (1989)
- 20) Gardner J. and G. B. Tatterson : Biotechnology and Bioengineering , 39, 794-797 (1992)

- 21) Harnby, N., M. F. Edwards, A. W. Nienow : "Mixing in the Process Industries 2nd Edition", Butterworth & Co(Publishers) Ltd (1992)
- 22) Harnby, N., M. F. Edwards, A. W. Nienow : "Mixing in the Process Industries", Butterworth & Co(Publishers) Ltd (1985), 高橋幸司訳, 「液体混合技術」, 日刊工業新聞社, p.61 (1989)
- 23) Harnby, N., M. F. Edwards, A. W. Nienow : "Mixing in the Process Industries", Butterworth & Co(Publishers) Ltd (1985), 高橋幸司訳, 「液体混合技術」, 日刊工業新聞社, 157-185 (1989)
- 24) 日野幹雄 : 「流体力学」, 朝倉書店, 184-187 (1992)
- 25) 萩原新吾監修 : 「静止型混合器—基礎と応用—」, 日刊工業新聞社, (1981)
- 26) Hiraoka, S., N. Kamei, Y. Kato, Y. Tada and T. Miwa : APCCHE & CHEMECA 93 OFFICIAL PROCEEDINGS, MELBOURNE, AUSTRALIA, Vol.1, pp.353-358 (1993)
- 27) Hiraoka, S., I. Yamada and K. Mizoguchi : J. Chem. Eng. Japan, 11, 487-493 (1978)
- 28) Hiraoka, S., I. Yamada and K. Mizoguchi : J. Chem. Eng. Japan, 12, 56-62 (1979)
- 29) Hiraoka, S., I. Yamada, T. Aragaki, H. Nishiki, A. Sato and T. Takagi : J. Chem. Eng. Japan, 21, 79-86 (1988)
- 30) Hiraoka, S., I. Yamada, H. Ikeno, H. Asano, S. Nomura T. Okada and H. Nakamura : J. Chem. Eng. Japan, 14, 345-351 (1981)
- 31) Hiraoka, S. and R. Ito : J. Chem. Eng. Japan, 8, 323-326 (1975)
- 32) Hixson, A. W. and S. J. Baum : Ind. Eng. Chem., 33, 478-485 (1941)
- 33) Hool, K., : AIChE J., 38, 473-476 (1992)
- 34) 池田俊介, 山坂昌成, 武藤聡, 平井克明 : 土木学会論文報告集, 381, 65-74 (1987)
- 35) 池田俊介, 秋山成興, 中村広昭, 白井伸一 : 土木学会論文報告集, 290, 53-65 (1979)
- 36) Ishi, M. and B. Zuber : AIChE J., 25, 843-856 (1979)
- 37) 石川忠晴, 椎貝博美 : 土木学会論文報告集, 219, 45-53 (1973)
- 38) 石川徹, 神谷保 : 化学工学論文集, 20, 41-46 (1994)
- 39) 伊藤龍象, 平田雄志, 坂田敬, 中原勇 : 化学工学論文集, 4, 267-272 (1978)
- 40) 伊藤龍象, 平田雄志, 香西正博, 山原孝夫, 木附和人 : 化学工学論文集, 8, 98-100 (1981)

- 41) 伊藤龍象, 平田雄志, 生田章雄: 化学工学論文集, 15, 1166-1171 (1989)
- 42) 伊藤龍象, 平田雄志, 大塩明義: 化学工学論文集, 16, 1013-1019 (1990)
- 43) 井上一郎, 佐藤一省: 化学工学, 30, 922-927 (1966)
- 44) Jaromir, U. J. and G.K. Patterson: "Mixing of Liquid by Mechanical Agitation", Gordon and Breach Sci. Pub. (1985)
- 45) 化学工学会編:「化学工学の進歩 24 攪拌・混合」, 槇書店 (1990)
- 46) 化学工学会編 東山明, 大久保司直:「化学工学の進歩 24 攪拌・混合」, 槇書店 153-165(1990)
- 47) 化学工学会編:「最近の化学工学 44 ミキシング—変貌する攪拌混合技術—」, 化学工業社 (1992)
- 48) 化学工学会編 平田雄志:「最近の化学工学 44 ミキシング—変貌する攪拌混合技術—」, 化学工業社, 114-120 (1992)
- 49) 化学工学会編 増尾喜久:「最近の化学工学 44 ミキシング—変貌する攪拌混合技術—」, 化学工業社, 151-156 (1992)
- 50) Kaminoyama, M., F. Saito and M. Kamiwano: J. Chem. Eng. Japan, 23, 214-221 (1990)
- 51) Kaminoyama, M., K. Arai and M. Kamiwano: J. Chem. Eng. Japan, 27, 17-24 (1994)
- 52) 上ノ山周, 齊藤文良, 上和野満雄: 化学工学論文集, 14, 786-793 (1988)
- 53) 上ノ山周, 齊藤文良, 上和野満雄: 化学工学論文集, 16, 820-829 (1990)
- 54) 上和野満雄, 山本一夫, 永田進治: 化学工学, 31, 365-372 (1967)
- 55) Khang, S. J. and O. Levenspiel: Chem. Eng. Sci., 31, 569-577 (1976)
- 56) 菊地雅彦, 高田一貴, 伊藤久善, 佐藤栄祐, 村上泰弘: 神鋼パンテック技報, No.112-2 (1991)
- 57) 菊地雅彦, 高田一貴, 岡本幸道: 神鋼パンテック技報, No.130 (1993)
- 58) Koh, S. T., S. Hiraoka, Y. Tada, T. Aragaki and T. Hijikata and T. Yamaguchi: J. Chem. Eng. Japan, 24, 760-766 (1991)
- 59) Koh, S. T., S. Hiraoka, I. Yamada, Y. Tada, T. Aragaki and T. Takahasi: J. Chem. Eng. Japan, 22, 611-615 (1989)

- 60) Koh, S. T., S. Hiraoka, Y. Tada, T. Takahasi, T. Aragaki, I. Yamada and I. Morimoto : J. Chem. Eng. Japan, 23, 463-467 (1990)
- 61) Koh, S. T., S. Hiraoka, Y. Tada, T. Aragaki, I. Yamada and I. Morimoto : J. Chem. Eng. Japan, 23, 632-635 (1990)
- 62) 近藤茂之 : 平成 5 年度ミキシング技術特別研究会夏期セミナーテキスト, 化学工学会ミキシング技術特別研究会, 9-18 (1993)
- 63) 倉津正文, 西見晴行, 三島守, 鴨田武征 : 住友重機械技報, Vol.35, No.104 (1987)
- 64) 倉津正文, 彌富隆一, 西見晴行, 三島守 : 住友重機械技報, Vol.38, No.114 (1990)
- 65) Langrish, T. A.G., R.B.Keey and C.A. Hutchinson : AIChE J., 38, 1945-1956 (1992)
- 66) Maruyama, T., N. Kamishima and T. Mizushina : J. Chem. Eng. Japan, 17, 120-126 (1982)
- 67) Maruyama, T., Y. Ban and T. Mizushina : J. Chem. Eng. Japan, 15, 342-348 (1982)
- 68) McDonough R. T. : "Mixing for the Process Industries ", Van Nostrand Reinhold (1991)
- 69) McKee, S.L., R.A.Williams, F.J.Dickin, R.Mann, J.Brinkel, P. Ying, A. Boxman and G. McGrath : ICHEM SYMPOSIUM SERIES No.136, 9-16 (1994)
- 70) Metzner, A. B. and J. S. Taylor : AIChE J., 6, 109-114 (1960)
- 71) Miller, D. N. : Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 10, 365-375 (1971)
- 72) 南茂夫編著 : 「科学計測のための波形データ処理」, CQ 出版, 181-197 (1986)
- 73) Mizushina, T., R. Ito, S. Hiraoka, A. Ibusuki and I. Sakaguchi : J. Chem. Eng. Japan, 2, 89-94 (1969)
- 74) Murakami, Y., T. Hirose, T. Yamato, H. Fujiwara and M.Oosima : J. Chem. Eng. Japan, 13, 318-323 (1980)
- 75) 村上泰弘編集 : 「最新攪拌・混合・混練・分散技術集成」, リアライズ社 (1991)
- 76) 村上泰弘 : 平成 3 年度攪拌・混合・混練先端技術講習会及び見学会テキスト, 化学工学会ミキシング技術特別研究会, p.5 (1991)
- 77) 流れの可視化学会 : 「流れの可視化ハンドブック」, 朝倉書店, 198-201 (1986)
- 78) Musil, L. and J. Vlk : Chem. Eng. Sci., 33, 1123-1131 (1978)
- 79) 永田進治, 山本一夫, 橋本健治, 成瀬雄二 : 化学工学, 24, 99-105 (1960)

- 80) Nagata, S., N. Yoshioka and T. Yokoyama : *Memoirs Fac. Eng., Kyoto Univ.*, 17, 175-185 (1955)
- 81) Nienow, A. W. : *Chem. Eng. Sci.*, 23, 1453-1459 (1968)
- 82) Nienow, A. W. : *Can. J. Chem. Eng.*, 47, 248-258 (1969)
- 83) Nienow, A. W. and D. Miles : *Chem. Eng. J.*, 15, 13-24 (1978)
- 84) Norwood, K. W. and A. B. Metzner : *AIChE J.*, 6, 432-437 (1960)
- 85) 小川浩平, 齊藤文良, 佐藤一省, 平田雄志監修: 「攪拌・混合技術」, アイピーシー, p.77 (1988)
- 86) Oldshue, J. Y., H. E. Hirschland and A.T. Gretton : *Chem. Eng. Prog.*, 52, 481-484 (1956)
- 87) Oldshue, J. Y. : "Fluid Mixing Technology", McGraw-Hill Pub. Co. (1983)
- 88) 大村節男, 小笠原弘明, 中村謙一郎 : 平成6年度ミキシング技術特別研究会夏期セミナーテキスト, 化学工学会ミキシング技術特別研究会, 75-84 (1994)
- 89) 大山義年, 遠藤一夫 : *化学工学*, 20, 576-581 (1956)
- 90) Rushton, J.H., J.B. Gallagher and J.Y. Oldshue : *Chem. Eng. Prog.*, 52, 319-323 (1956)
- 91) Sano, Y. and H. Usui : *J. Chem. Eng. Japan*, 18, 47-52 (1985)
- 92) 笹倉寿介, 加藤悦昌, 山室渉一, 大井信一 : *化学工学論文集*, 4, 595-601 (1978)
- 93) 佐藤一省, 前田法史, 吉野善彌 : *化学工学論文集*, 12, 287-293 (1986)
- 94) 佐藤一省, 井上一郎 : *化学工学*, 37, 937-943 (1973)
- 95) 佐藤忠正, 谷山巖 : *化学工学*, 30, 922-927 (1965)
- 96) 沢本正樹, 加藤一正 : *土木学会論文報告集*, 232, 37-47 (1974)
- 97) Shamlou, P.A. and E. Koutsakos : *Chem. Eng. Sci.*, 44, 529-542 (1989)
- 98) Suzanne M. Kresta and Philip E. Wood : *AIChE J.*, 37, 448-460 (1991)
- 99) Takahashi, K., M. Sasaki, K. Arai and S. Saito : *J. Chem. Eng. Japan*, 15, 217-224 (1982)
- 100) Takahashi, K., Y. Takahata, T. Yokota and H. Konno : *J. Chem. Eng. Japan*, 18, 159-162 (1985)
- 101) 高橋幸司 : 「新素材のための液体混合技術」, アイピーシー (1994)

- 102) 竹田宏 : 機械の研究, 45, 157-160 (1993)
- 103) 竹田宏 : 化学工学, 58, 189-194 (1994)
- 104) Takeda. H., K. Narasaki, H. Kitajima, S. Sudoh, M. Onofusa and S. Iguchi : Computers Fluids, 22, 223-228 (1993)
- 105) 竹田邦彦, 星野照彦 : 化学工学, 29, 506-512 (1965)
- 106) 竹田邦彦, 星野照彦 : 化学工学, 30, 445-449 (1966)
- 107) 竹田邦彦, 星野照彦, 清水克夫, 西畑隆男: 化学工学, 32, 202-208 (1968)
- 108) 種子田定俊, 船越満明 : ながれ, 6, 285-307 (1987)
- 109) Tanguy P. A., R. Lacroix, F. Bertrand, L. Choplin, and E. Brito de la Fuente : AIChE J., 38, 939-944 (1992)
- 110) Tatterson, G. B. : "Fluid Mixing and Gas Dispersion in Agitated Tanks", McGraw-Hill Pub. Co. (1991)
- 111) Tatterson, G. B. : "Scaleup and Design of Industries Mixing Process", McGraw-Hill Pub. Co. (1994)
- 112) Tojyo, K. and K. Miyunami : Ind. Eng. Chem. Fundam., 21, 214-220 (1982)
- 113) 山本一夫, 西野宏監修 : 「攪拌技術」, 佐竹化学機械工業株式会社 (1992)
- 114) 弓削耕, 大島栄次 : 化学工学, 33, 898-904 (1969)
- 115) 弓削耕, 大島栄次 : 化学工学, 34, 439-444 (1970)
- 116) Zwietering, T.N. : Chem. Eng. Sci., 8, 244-253 (1958)

著者発表の研究論文

本論文中における所在

1. 加藤禎人, 平岡節郎, 多田豊, 森隆志, 白井誠二, 植孝文, 高承台「水平円運動をする揺動攪拌槽における低粘性流体の混合時間と混合限界回転数」: 化学工学論文集, 20, 437-444 (1994) 第2章、第3章
2. 加藤禎人, 平岡節郎, 多田豊, 白井誠二, 植孝文, 高承台, 山口隆夫「水平円運動をする揺動攪拌槽の所要動力」: 化学工学論文集, 21, 365-371 (1995) 第3章、第4章
3. 加藤禎人, 平岡節郎, 多田豊, 白井誠二, 高承台, 山口隆夫「水平円運動をする揺動攪拌槽壁における輸送現象」: 化学工学論文集, 21, 621-624 (1995) 第5章
4. 加藤禎人, 平岡節郎, 多田豊, 城田猛, 高承台, 李泳世, 山口隆夫「揺動攪拌槽内の固体粒子の完全浮遊条件」: 化学工学論文集, 21, 948-952 (1995) 第6章
5. 加藤禎人, 平岡節郎, 多田豊, 植孝文, 高承台, 李泳世「揺動攪拌槽内の循環時間分布の測定」: 化学工学論文集, 掲載決定 (1995) 第3章
6. 加藤禎人, 平岡節郎, 多田豊, 植孝文, 高承台, 李泳世「種々の幾何形状をもつ揺動攪拌槽内の流動状態の可視化」: 化学工学論文集, 掲載決定 (1995) 第3章
7. 加藤禎人, 平岡節郎, 多田豊, 佐藤幸吉, 高承台, 李泳世「揺動攪拌槽内の固体粒子濃度分布の測定」: 化学工学論文集, 査読中 (1995) 第6章
8. Y. Kato, S. Hiraoka, Y. Tada, S.T. Koh, Y.S. Lee 「Mixing time and Power Consumption in a Horizontally Shaking Vessel with Circulating Motion」: Chem. Eng. Res. & Des., 査読中 (1995) 第2、4章

謝辞

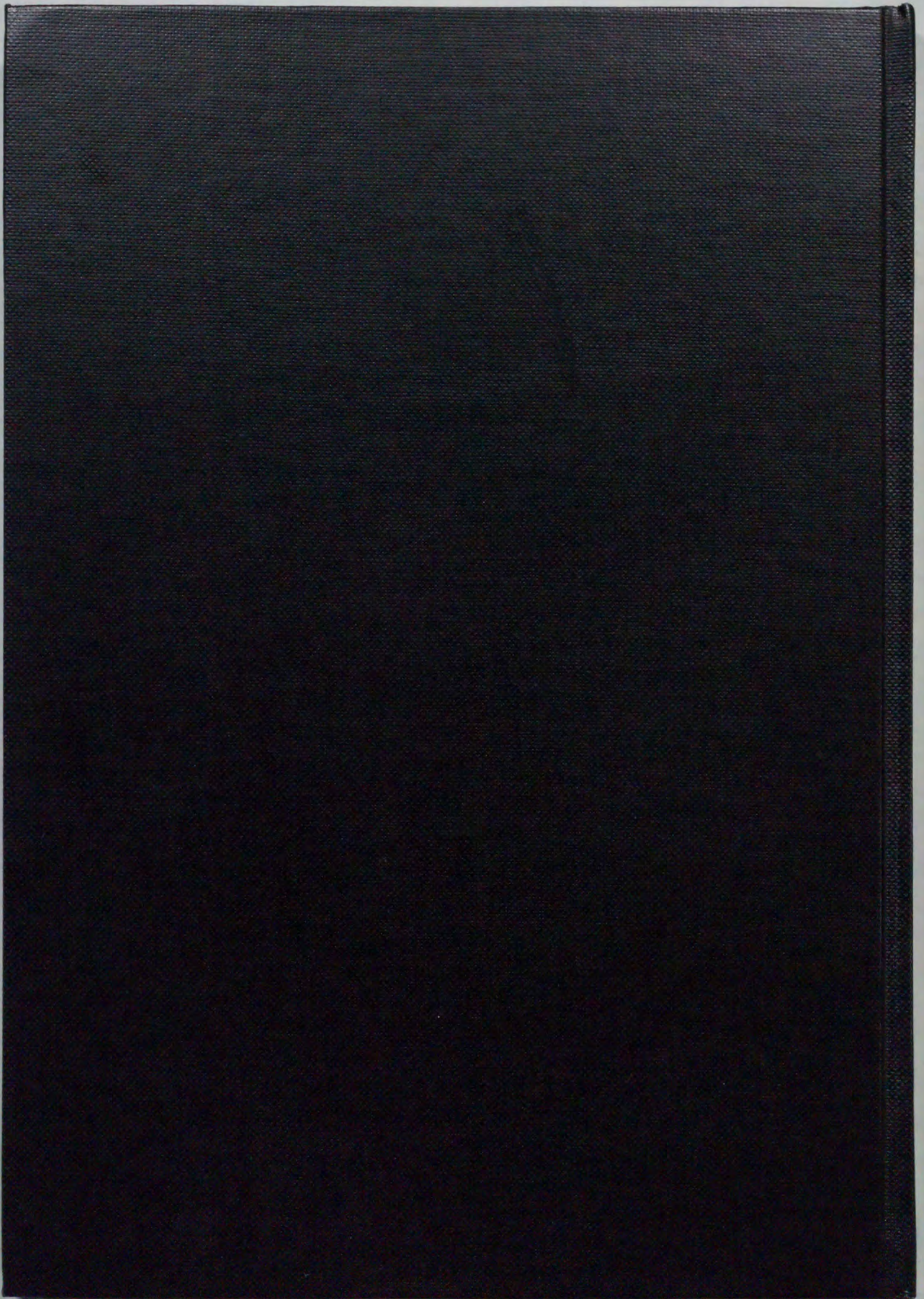
本研究を進めるにあたり、多大な御指導をいただきました名古屋工業大学応用化学科の平岡節郎教授に心から感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり、有益な御助言を賜りました、九州大学工学部化学機械工学科の村上泰弘教授に心から感謝の意を表します。また、有益な御助言を賜りました、化学機械工学科の宮武修教授、資源工学科の森祐行教授、応用原子核工学科の西川正史教授に厚く御礼申し上げます。

また、私が名古屋工業大学に在学中から現在に至るまで御指導いただきました、名古屋工業大学名誉教授山田幾穂先生に厚く御礼申し上げます。さらに、私が名古屋工業大学に在学中より、公私にわたり御指導いただきました、新垣勉教授、多田豊助教授、森秀樹助教授、小田昭昌助手、尾花匡美事務官、大同工業大学の中村肇教授、松浦章裕講師に厚く御礼申し上げます。

そして、研究に直接御協力いただいた、森隆志氏、白井誠二氏、植孝文氏、城田猛氏、西尾明人氏、柳生達二氏、佐藤幸吉氏、森佳巳氏、齊藤勤氏をはじめとする名古屋工業大学応用化学科化学工学研究室の卒業生の方々に深く感謝いたします。

最後に、現職に就く前に3年間に渡り多大な御指導を承りました東レ株式会社の皆様にもこの場をお借りして厚く御礼申し上げます。



inches 1 2 3 4 5 6 7 8
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

