

通気攪拌槽における気泡について

酒 井 信 之

On the Bubbles in the Agitation Tank, Accompanied by Aeration

Nobuyuki SAKAI

The present investigation was carried out to find the average dia., distribution of dia., and dispersion of bubbles in the liquid under the agitation tank, accompanied by aeration.

The conclusions of the experimental results may summarised as follows:

The phenomena of the bubbles behavior were varying with the injection air by the impeller rotation and the blowing by nozzle.

The factors concerned above phenomenon were nozzle dia., impeller dia., the height of impeller fixed, rotational speed and the quantities of blowing air.

I 緒 言

攪拌作用によりガスを微細化し液中に分散せしめる方法は気液接触を目的とする操作即ち化学反応、吸収等において屢々用いられるものである。

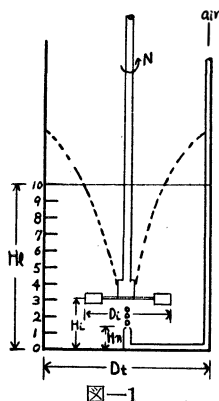
槽内液中に分散される気泡は攪拌槽の大きさ、構造、空気導入機構、液種類、液高、攪拌羽根の大きさ、形状、取付方法、邪魔板の有無および設置方法の外運転条件等に支配され、これらの諸条件の設定により、気泡の大きさ、分散状態、槽内運動および滞留時間等の因子が決定される⁽¹⁾。

最近攪拌槽内における液流動状態⁽²⁾に関し定量的なる結果が数多く報告され、且つ気液接触の機構⁽³⁾解明並びに応用研究もなされているが、いまだそれらの基本的事項ともいえる生成気泡の本質については不明の点が多い。

本報は気泡生成状態⁽¹⁾についての手懸りを得る目的で簡単なる条件下において気泡平均径、径分布状態並びに液中の分散状態を幾つかの要因にわけて観察測定した結果を纏めたものである。

II 実験装置および方法

実験装置全般の概要は従来のこの種の報告に準拠し特に山本、河東両氏の方法⁽²⁾に類似しているの



詳細を省略するが、実験の主体をなす攪拌槽および羽根の関係は図-1に示される。送入ガス（空気）は送風機、圧力調節弁、流量計を経由して羽根下部の吹込ノズルより一定温度、一定量の水中に導入される。攪拌羽根は所定のものを使用し一定回転をなしているものとする。羽根回転数の測定にはストロボスコープ装置を使用した。生成気泡の大きさおよび分布の測定については最近 Gründer, Siemens Fauffmann 等は二個の測定窓を供えた装置を槽内に挿入し、自動カメラで瞬間撮影して浮選槽内の気泡の大きさを測定している。

この欠点は装置が邪魔板的作用をなし液流動の変化をもたらす、為に気泡生成状態の把握に支障をきたすと考えられるので、本実験では測定位置に焦点を合わせた読取顕微鏡にカメラ装置を附属せしめ観察可能の位置より気泡

の生成状態を求めた。硝子の屈折率による誤差は予め基準球との比較により補正した。液中の気泡分散状態の測定には装置前面に設けられた瞬間カメラで撮影して得られた。

此外電力計法により攪拌動力を求めた。

実験条件は次の如くである。

攪拌槽：内径 $D_t=14$ [cm] の硝子製扁平平底面円筒槽，中心攪拌，邪魔板無し。

攪拌羽根：銅板製標準型平羽根タービン，単一，翼長 $D_i=4.0, 5.0, 6.0, 7.5$ [cm] 回転数 $N=\sim 1500$ [r.p.m.]，羽根取付位置 $H_i=4\sim 9$ [目盛 $H_i=10$ 目盛 $=H_i$ とする。]

空気吹込ノズル：径 0.7 [cm] の硝子管の先端を絞つたもの，単孔，ノズル位置 $H_n=2$ [目盛] に一定，先端部内径 $D_n=0.04, 0.05, 0.12, 0.5$ [cm]

槽内液：水（温度 15°C ）液高 $H_l=D_t=14$ [cm]

吹込ガス：空気，吹込量 $Q=\sim 30$ [c.c./s]

Ⅲ 実験結果および考察

1. 静止液中への空気吹込み

攪拌槽の気泡を解析する第1要件として，まず静止液中への空気吹込みを考えてみよう。これについては多数の研究が報告されている。⁽⁴⁾ ノズルより吹出したガスが気泡化する機構は一般に液の粘性，表面張力，吹込ガス速度，背容積，ノズル壁と液間の親和性，ノズル径等に関係するものと云われているが，理論的には浮力による上向きの力 $\frac{1}{6}\pi d^3 \Delta\rho \cdot g$ と表面張力による引張りの力 $\pi D n \delta$ との均衡性により $(\frac{1}{6}) \pi d^3 \Delta\rho \cdot g = \pi D n \delta$ 即ち

$$g \cdot \Delta\rho \cdot d^3 / (\delta D n) = 6 \text{ (一般に恒数 } k \text{ で示される)}$$

この k について種々の実験により各種の値が出されているが筆者の実験においては週期を充分大きくしてやると略々理論式に近似の値が得られた。（詳細を省略）

流量が増大すると気泡外觀に可成り異れるものが得られ所謂分離気泡，鎖状気泡，連続流（噴流）にわけられるが後二者においては上式が適用し難い。またこれら各状態への遷移流量については既に報告されているので詳細は省略する。

2. 空気吸込最小回転数 N_m

攪拌槽内での液流動状態は上述のごとく種々追求されているが一定条件下で回転数を変化せしめると液内部運動状態および液面の変化を来すものである。この場合の液の運動は混成回転流動でこれより液面は普通回転軸を頂点とする回転双曲面および拋物面の組合せによつて得られるが，この頂点（曲面最低部）が羽根取付位置より高位置に存在する場合は攪拌作用は内容物の移動，混合に留まるが羽根位置以下に来る時は外界より空気を吸込む。この限界即ち頂点が羽根位置に達し空気吸込み現象を開始せる時の回転数を空気吸込最小回転数と称する。

故にノズルより空気を導入（吹込む）し， N_m 以上の回転数の場合には吹込みによる気泡化の外に吸込み空気による気泡化が併合されるものである。

空気導入のない場合の N_m の決定には，永田氏等，山本氏等の解析せる計算式によつて得られる。図-2 は羽根位置 H_i 並びに羽根大いさ D_i についての吸込最小回転数 N_m の計算値の線図を示す。図中の各点は筆者の測定値であり計算式の妥当性を裏書きするものである。空気を導入すると N_m は一般に増入することが認められるが，図-3 は羽根大いさ D_i ，羽根位置 H_i の各種の値に対する吹込み空気量 Q と N_m の関係の1例を示すものである。特に Q のある値以上においてが飛躍的に増加する。これは気泡形態の分類より連続流の範囲に属する。またこの状態においては吹込まれた空気は恰かも羽根全体を包みこみ自由液面の中心部に気泡が吸い寄せられてゆく如き

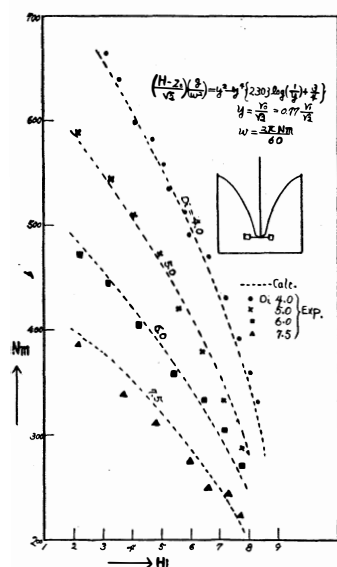


図-2

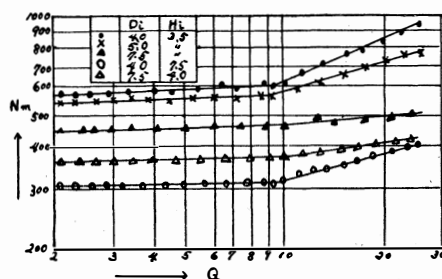


図-3

観がある。なおこの状態では動力消費が著しく減少しNmの増加と動力減少割合との間において何らかの関連性も考えられるが、これは後日の機会にて検討したい。

数多くの測定より連続流範囲におけるNmの値は主としてDiに影響され実験式として次式を得た。

$$Nm = KQ^{0.67} - 0.07Di$$

但し k: 羽根形状, 槽形状, 並びに空気吹込なしの場合のNmに関する恒数

3. 分散気泡の平均径

液中に導入された空気は羽根回転による剪断力, 打撃力, 圧縮力により微細化され分散気泡として放出されるが導入空気量の多少, 流動状態, 羽根の構造, 枚数, 加工程度および取付方法による作用力の大きさ並びに振動等により均一性を有せず, また気泡同志の会合, 圧力等の関係より種々の大きさが混在する。Nm以上の回転数では吸込み空気による気泡化があるが得られる気泡は充分なる回転力を受けている為極めて微細である。これに反し吹込み空気による気泡は羽根からの作用力充分でなく前者にくらべ粗大化せるものが得られる。

液中に放出された気泡は完全なる球を示さずGründerらの云う如く回転楕円体と見るべきで従って気泡径とはこれと同体積の球の直径を以て示す。平均径の算出は一定容積中の気泡径を容積基準で平均したものである。

a. 羽根回転数Nの影響(図-4)

何れも回転数を増加すると気泡径dは減少する傾向をもつが, 上述の吸込現象によりNmを限界として2本の曲線(大体双曲線に近い曲線)によつて示される。これは恰かも永田氏等の液攪拌の微粒化の場合に類似している。

従つて近似的には次式により表せる。

$$d = N / (aN + b)$$

但し a, b: 攪拌条件によつて異なる常数

b. 吹込流量Qの影響(図-5)

低流量即ち完全なる分離気泡を形成し, Nm以下の回転の場合は放出気泡は回転力により外周に押しやられるのみで径の変化は認められない。つまりノズル径により定まつた大きさの儘液中を流動上昇する。Nm以上では翼の衝撃作用による細分化と吸込の為による微細気泡が混在し全体的に気泡径が減少する。

回転数一定にして空気量を増せば気泡径は次第に粗大化する。

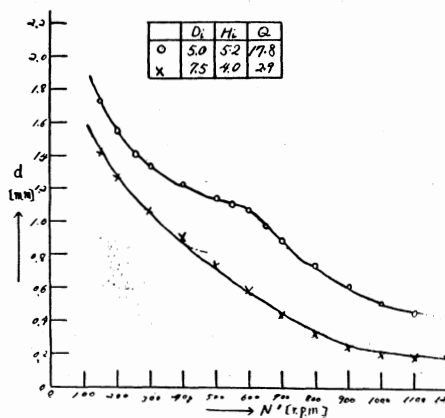
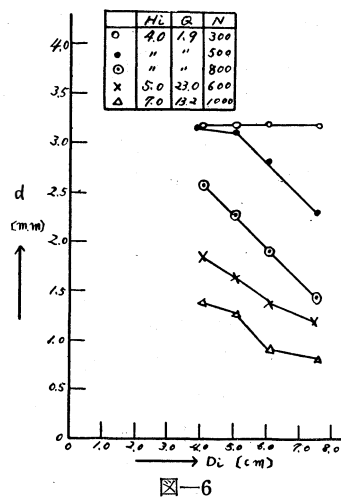
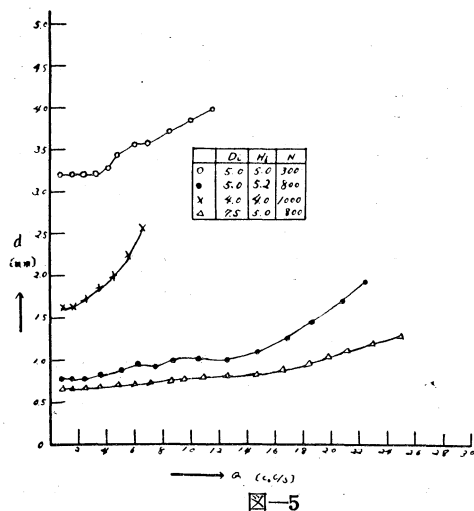


図-4



c. 羽根径 D_i の影響 (図-6)

D_i が増大すると攪拌力が大となり気泡細分化力が増し気泡径が減少するが、ある値を限界として減少割合が小となる。尤もこの関係は Q および N の相互影響を受けるものであるが気泡分散度および所要動力の見地より総合してみるに最適羽根径は

$$D_{iopt} \approx (0.4 \sim 0.5) D_t$$

の条件が得られる。合葉氏も攪拌の強さと動力消費の件で50%以内である事を指摘している。

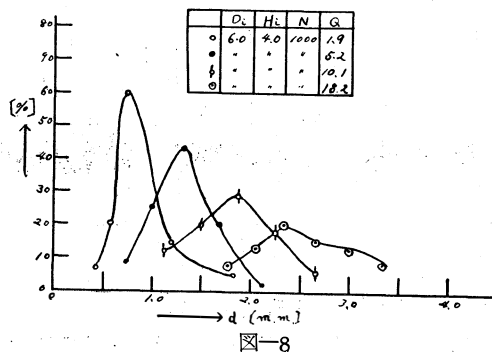
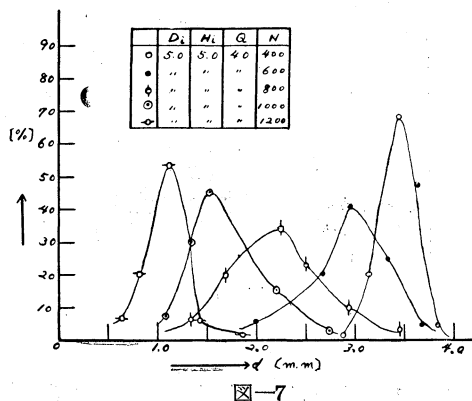
d. ノズル径 D_n の影響

線図は省略するが分離気泡、低回転数の場合には気泡径に影響するが流量増大、回転数大の場合には殆ど無関係となった。気液接触の問題より考えればできるだけノズルの径の小なることが望ましく、流量大を必要とする場合には多孔ノズル又は分布管等を使用することが肝要である。

IV 気泡径分布

羽根周辺より放出された気泡群は槽内液流動、遠心力および浮力等により複雑なる運動をなし、また径変化を行い、場所によつて分布状況は非常に異なるものである。

茲では放出直後の羽根周辺の部分のみにつき限定して考える。



気泡径分布に主として影響するものは回転数および流量であり、度数分布曲線の1例は図-7（回転数 N の影響）および図-8（流量 Q の影響）に示される。図-7 において Q 一定で N を増加すると N_m を境として分布状態は異なり N_m 以上ある回転数までは非常にバラツキが多い。これは羽根回転による衝撃力と吸込気泡の略々均衡している為である。

図-8 においては、流量が増加すると気泡が粗大化すると共にバラツキも増大してくる事がわかる。

D_i の影響も考えられるが、むしろこれは N および Q と相関して来り所謂衝撃力又は攪拌作用力として関係するものである。

H_i は羽根が液面近く又はノズル孔に基だ接近せる場合に影響をもつものであるが、この特殊の場合を除いてはその影響は無視し得る。

V 液中における気泡の分散状態

液中における気泡は前項で述べた如き要因により、ある運動経過を辿り遂に液面上に浮上して消失する。この気泡の運動即ち液中に存在する状態は気液接触、混合、吸収作用に極めて重要な役割をなし、例えば Rushton らは気泡の平均接触時間を種々の因子で纏めて求めている。

一般に槽内における気泡の分散状態は条件によつて可成り異り、全体を均一に分散するという事はない。

図-9 ~ 図-13 の諸図は写真によつて得られた分散状態の1例をスケッチせるものである。

図-9 は空気吹込のない場合で N_m 以上においては吸込空気のみによる気泡分散状態を示したものである。

次に分散状態に影響あると思われる諸因子によりその変化を示してみよう。

a. 流量 Q の影響 (図-10)

Q が増加すると分散がよくなる傾向をもつが攪拌作用能力以上に Q が増せば気流により羽根全体が包み囲まれる如きになり分散割合が低下する。また気泡の粗大化傾向もこの原因の1つとして考えられる。

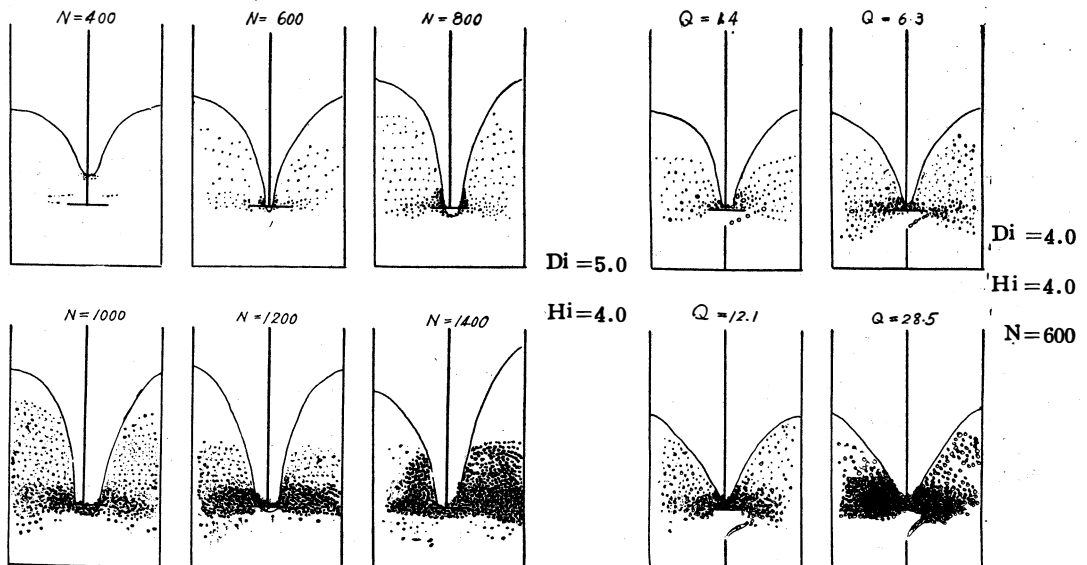


図-9

図-10

b. 羽根径 D_i の影響 (図-11)

回転数および流量の外 N_m の因子が相関してきたり径のみの単独の影響は判然としないが兎も角

ある程度まで羽根を大きくしてやる事により分散が良好になる。然し限界を越えるとこの影響は次第に薄れてくる。

c. 羽根位置 H_i の影響 (図-12)

平羽根タービン型のもは羽根下部の分散は極めて悪い、即ち気泡は羽根上部に集中している。故に分散をよくする為には羽根を出来るだけノズルに近接（底部に下げる）する事が必要であろう。

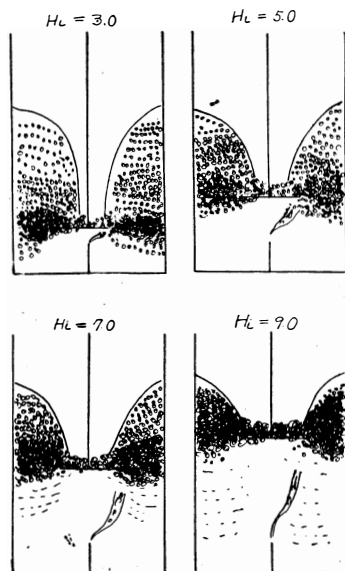
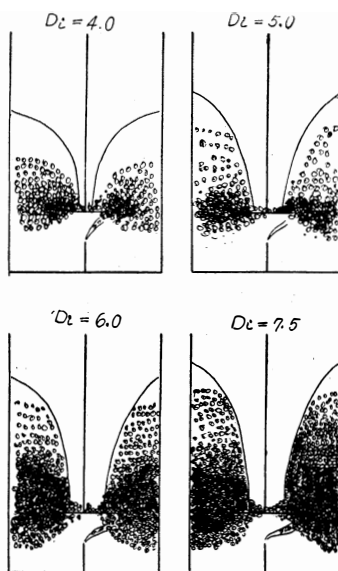


図-11

$H_i = 4.0$

$Q = 16.3$

$N = 800$



$D_i = 5.0$

$Q = 10.2$

$N = 800$

図-12

d. 回転数の影響 (図-13)

回転数が増加すれば分散が良好になるがこれは Nm の関係も併合されて影響するものである。

以上の実験結果および考察において、気泡生成の問題は攪拌の強さ（衝撃、剪断、打撃）と流量（気泡の形態即ち分離気泡、鎖状気泡、連続流）の相関によって諸種の場合が考えられ又検討されねばならぬ。これは結局影響するであろう因子を夫々総合、組合わせた考え方の必要性を示し、更に液の流動状態、攪拌所要動力、気泡接触の見地からも調べる事が肝要であるが、これについては別の機会に報告する予定である。

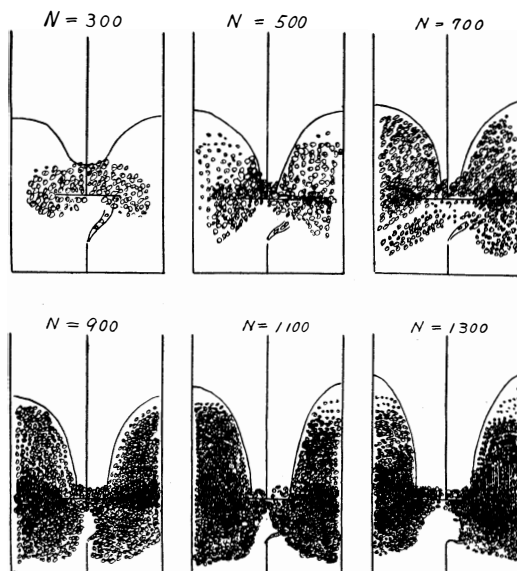


図-13

Ⅶ 結 論

扁平底面円筒槽に径と等しい高さに水を入れ、単一標準型平羽根タービン翼による中心攪拌とし底部の単孔ノズルにより通気攪拌を行い、生成気泡の平均径、気泡径分布、および液中における気泡の分散状態を調べた。これら気泡の挙動

は主として吸込空気（空気吸込最小回転数が関係する）およびノズルからの吹込空気（気泡の形態即ち分離気泡、鎖状気泡および連続気流が関係する）により著しく異なり、これに関係する因子としてノズル径、羽根大いさ、羽根取付位置、羽根回転数および吹込量の影響を述べた。

文 献

- (1) 永田 他 3 名：化学工学と化学機械 vol 8,43 (1950)
永田 他 2 名：化学工学 vol 18,228 (1954)
H. C. Foust, D. E. Mack and J. H. Rushton : I. E. C. 36 517 (1944)
大山、遠藤：化学工学 vol 19,106 (1955)
- (2) cooper, C, M, Fernstrom, G, A, and Miller, SA : I, E, C, 36,504 (1944)
山本、河東：化学工学 vol 20,106 (1956)
- (3) W. Gründer. W. Siemens U, F. Kauffmann : Eyzmettall 559 (1956)
- (4) D, W, van Krevelin, P, J. Hoftijzer : C. E. P. 46,29 (1950)
大竹、竹腰：化学機械 vol 13,135 (1949)
- (5) 合葉：化学工学 vol 21,139 (1950)
(以上の外必要に応じ、他の文献をも参照したが以下省略する)