

# 充填塔底部における気泡の吸込現象

荻原 宏二郎, 鈴木 重昭\*\*, 大橋 弘保\*\*\*

## 1 緒 言

ガス吸収操作において充填塔が広く用いられているが、塔内においては、中性ガスは液体に対する溶解損失のほか、機械的要因に基づく相当量の損失が認められる。溶解損失は溶解度に応じて必然的に失われるものであるからやむを得ないが、機械的損失はできるだけ少なくすることが望ましい。

機械的損失としては腐食による漏えい、接合部からの漏れなどの他に、充填塔の底部において原料ガスの一部が気泡として排出液中に吸込まれる現象等がある。これらのうち、後者の現象は原料ガス中の中性ガスが有用な場合はその損失となり、また不用の場合には放散ガス中に不純物を混入することになり、いずれにしても好ましくない結果を生ずる。よって、充填塔底部における気泡の吸込現象について模型実験を行ない、解析を試みたので報告する。

なお、この種の報告としては、伏崎等<sup>1)</sup>の研究があるので、それについても検討を加えた。

## 2 実験装置および方法

実験装置 (Fig. 1) : A は充填塔底部, I は目皿の 1 つの孔, H は液の出口を想定している。液は I から A に液柱となって落下し, H から出ていく。G は液・ガスの分離器で, B 内に分離されたガスが蓄積する。C は液の脈動を少なくするためとりつけたもので, D は溢流した液の受器, E は溢流管, M はマンオメータ, O はオリフィス流量計, P はポンプ,  $V_1 \sim V_6$  はニードルバルブおよびコックである。

実験方法 :  $V_1 \sim V_6$  の各コックおよびバルブを全開し,  $p_1$  より液体を B 内に充たしその後  $p_1$  を閉じる。この際 A, B および I' の水位は連通管になっているので一定になる。ついで,  $V_4 \sim V_6$  を閉じポンプを廻す。一定時間運転の後ポンプを止めると同時に  $V_3$  を閉じ I の水位が I' になるよう  $V_1$  および  $V_2$  で調節した後,  $V_1$  およ

び  $V_2$  を閉じる。次に B 内の圧力を大気圧と等しくするため  $V_6$  を開き  $V_3$  にて B 内の水量を調節する。ついで  $V_3$  を閉じ D の水を A に加えて運転前の水位となし, D 内の液量を測定する。実験中はガス溜 B は密閉されているから D で測定された液量は H より吸込まれた気泡の量に等しくなる。

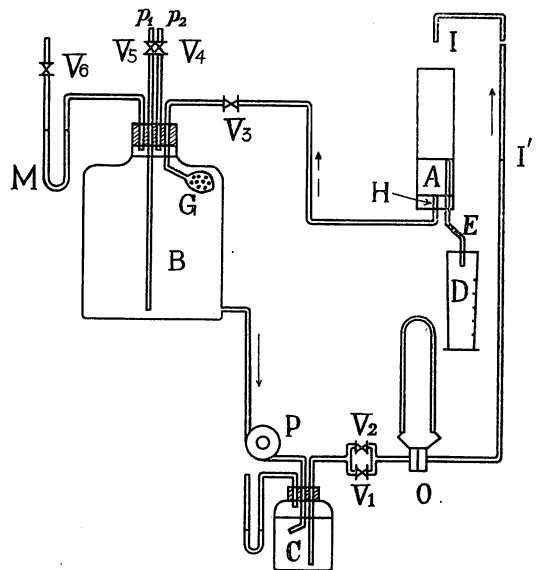


Fig. 1 Experimental Apparatus

## 3 次元解析

以上のようにして求めた実験結果を次元解析によって得られた式によって整理した。気泡の吸込現象は塔底部 A 内において気泡が発生する現象と、発生した気泡の一部が吸込まれる現象との二つの物理現象が同時に起るものと考えられるので、この考えに基づいて次元解析をおこなうと次式が得られる。

$$\frac{v}{V} = C \left( \frac{h}{d} \right)^a \left( \frac{H}{d} \right)^b \left( \frac{D}{d} \right)^c \left( \frac{du\rho}{\mu} \right)^e \left( \frac{du^2\rho}{\sigma} \right)^f \left( \frac{u^2}{2gd} \right)^i \left( \frac{d'}{d} \right)^j \quad (1)$$

\*\* 秋田大学鉱山学部 (現在: 日本揮発油(株))

\*\*\* 秋田大学鉱山学部

4 実験範囲

伏崎等の実験と比較する意味を兼ねて Table 1 に示す範囲について実験を行った。使用した液体は主として水道水で、粘度を変化させる場合はグリセリン水溶液、表面張力を変化させる場合は酪酸水溶液を用いた。

Table 1 実験範囲

h	0.18 ~ 0.90 [m]
H	0.04 ~ 0.10 [m]
D	0.0417 ~ 0.146 [m]
d	0.0048 ~ 0.0079 [m]
d'	0.0048 ~ 0.0143 [m]
u	0.295 ~ 1.073 [m/sec]
$\rho$	800 ~ 1127 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\mu$	$6.69 \times 10^{-4} \sim 3.01 \times 10^{-3}$ [kg/m·sec]
$\sigma$	0.0401 ~ 0.0749 [kg/sec <sup>2</sup> ]

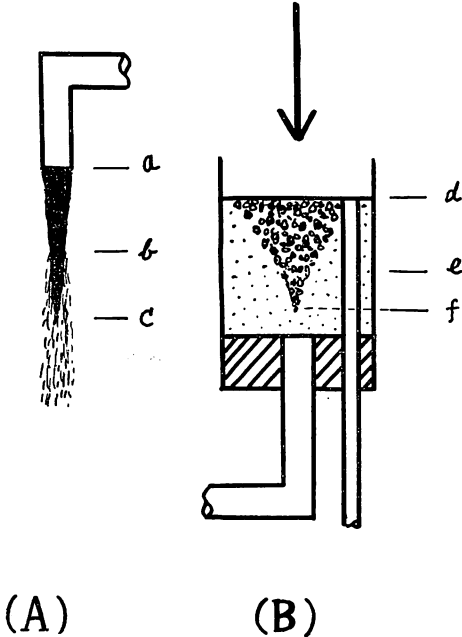


Fig. 2 Flow Pattern

5 実験結果および考察

5-1 H/d の影響 (Fig. 3) H/d の値を種々に変化させ、h = 0.464 [m]、および 0.810 [m] の場

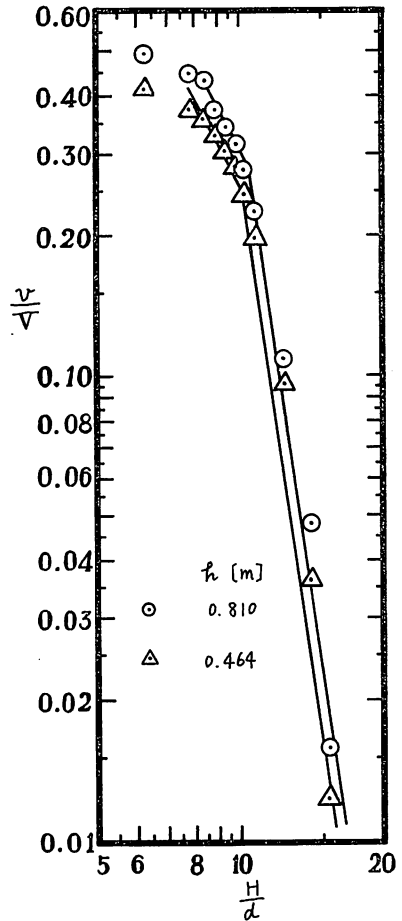


Fig. 3 v/V vs. H/d

合についてその他の項を一定にして実験を行った。h の値はAにおいて十分に泡立ちの現象が認められる点をとった。本図より H/d = 10 を境として勾配が大きく変化し、また H/d < 8.4 ではさらに緩やかな勾配になることがわかる。これはA内において気泡が Fig. 2 (B) に示すような分布をなしており、吸込口が図のどの位置にあるかによる違いである。Fig. 2 (B) において、吸込口が d-e 間にあれば、すでに比較的大きな気泡も吸込口に達しているため気泡の吸込量が大きく、したがって Fig. 3 における勾配が小さくなっている。また吸込口が e-f 間にあれば気泡の到達が不充分のために僅かの深さの相違によって吸込量に大きな差を生じ、したがって勾配が非常に大きくなる。なお、吸込口が f 以下にあれば吸込量も一定せず、データは再現性に乏しくなる。このように液深さによって吸込量に大きな変化が見られるので、以後の実験では吸込口が d-e 間にある H = 0.06 [m] (H/d = 9.38)、吸込口が e-f 間にある H = 0.08 [m] (H/d = 12.5) の両者について実験をし

た。

Fig. 3より  $H/d$  の指数は,  $H/d > 10$  のとき  $-6.93$ ,  $H/d < 10$  のとき  $-1.58$  となる。

5-2  $D/d$  の影響 (Fig. 4) 塔径  $D$  を変えて  $D/d$  の影響をみたもので, 本図から  $D/d$  の指数は,

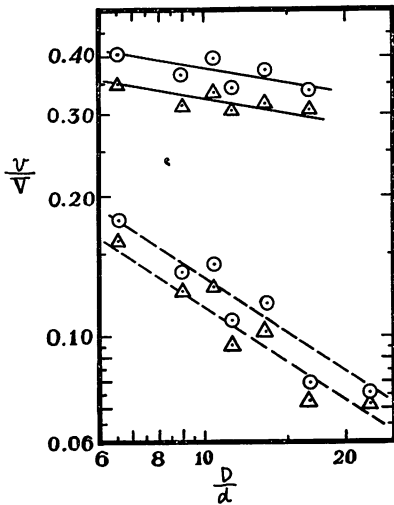


Fig. 4  $v/V$  vs.  $D/d$

	$H$ [m]	$h$ [m]
—○—	0.06	0.810
—△—	0.06	0.464
.....○.....	0.08	0.810
.....△.....	0.08	0.464

以下, Fig. 5, 6, 12, 13でも同様

$H/d > 10$  で  $-0.64$ ,  $H/d < 10$  で  $-0.17$  となり, 液深さによる相違は歴然としている。本実験の範囲では  $D$  が小さくなった場合でも器壁や気泡相互の干渉による影響はないと考えられる。

5-3  $Re$  数の影響 (Fig. 5) 液体の粘度を変えて  $Re$  数の影響を調べた。粘度を変える場合表面張力や密度などの他の物性はなるべく変化しないことが望ましいので, 1 c.p. 付近のところは水の温度を変えて実験して, 高粘度の方はグリセリン水溶液を用いた。グリセリン水溶液を用いた場合には密度, 表面張力も僅か乍ら変化するので, これについては  $We$  数の変化による影響を補正した。本図より  $Re$  数の指数は,  $H/d > 10$  のとき,  $0.74$ ,  $H/d < 10$  のとき  $0.27$  である。

5-4  $We$  数の影響 (Fig. 6) 液体の表面張力を変えて  $We$  数の影響を求めた。表面張力は酪酸水溶液

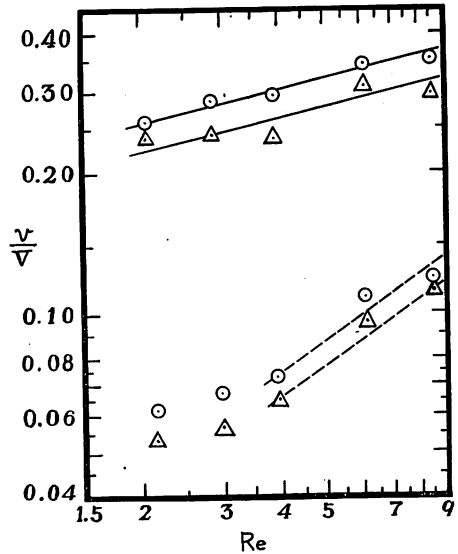


Fig. 5  $v/V$  vs.  $Re$

を用いて変化させたが, この際密度の変化は無視できるが, 酪酸の濃度が高くなれば粘度も 10% 程度大きくなるので  $Re$  数の変化による影響を補正した。表面張力が小さくなれば吸込量が大きくなるのが本図より明らかであるが, これは小さい気泡が非常に多く発生してエマルジョンのような形で  $A$  の中に存在して, 気泡のホールドアップ量が大きくなることに起因するものと考えられる。また  $H/d = 12.5$  の場合の  $We = 125$  の点が特に下っているのは, この程度の表面張力になると気泡のホールドアップ量が特に増大し液面上に泡沫層が形成されるために起る異常現象によるものである。本実験では水の表面張力以下の場合についてのみ測定したが, 実際の充填塔においても大部分は水以下の表面張力の液で操作しているようである。以上のように液深さが深い場合には  $We$  数の影響は非常に大きくなる。

図から  $We$  数の指数は,  $H/d > 10$  の場合,  $1.47$ ,  $H/d < 10$  の場合  $0.45$  となる。

5-5  $h/d$  の影響 (Fig. 7, 8) 流速  $u$  を助変数として  $h/d$  を変化させた実験の結果で, Fig. 7 は  $H/d < 10$ , Fig. 8 は  $H/d > 10$  の場合である。これらの図より  $h/d$  の  $v/V$  に対する影響は, (1)  $h$  の減少と共に  $v/V$  が減少するもの, (2)  $h$  が減少するとき,  $v/V$  の値に極小, 極大値ができるもの, (3) 前二者以外のもの, に分類できる。これら三種の類型に分けられるのは,  $h$ ,  $H$  および  $u$  の相関によるものである。Fig. 2 (A) は落下する液柱を模型的に図示したものであるが, 気泡を生ずるのは液柱が底部の液内に入るとき液柱

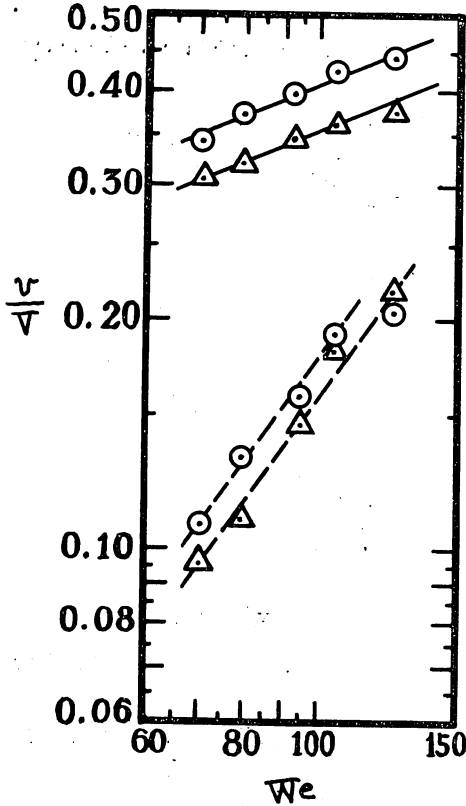


Fig. 6  $v/V$  vs.  $We$

の周囲のガスを抱えこむことによるもので、このとき抱えこまれるガスの量は液柱の状態によって変化する。すなわち、落下する液柱は重力により速度を増し、同時に液柱の径が細くなる (a-b) が、この状態では液柱に伴われるガスはガス境界のみである。さらに液が落下すればガスの抵抗が増大して液柱の表面が液滴に分散しはじめ (b-c)、ある位置 (c) 以下になると液柱は完全に分散して液滴となる。この場合液に伴われるガスは液滴の間に包含されたものも含むので、その量が非常に多くなる。また液柱の分散程度により落下する液のもつエネルギーが異なるので、液柱が液内につき進む深さが異なり、そのために気泡の吸込み量が変化する。すなわち高さ  $h$  の相違により液表面に達するときの液柱の状態が異なり、そのため気泡の発生量および吸込み量を変化せしめるのである。おのおのの類型について考察すると、

(1) に属するもの : Fig. 7 の  $u = 0.893$  [m/sec] の場合である。すなわち  $H$  が小さいのに対して、 $u$  が大であるため液柱が分散している場合でも Fig. 2 (B) の  $f$  点が完全に吸込口まで達している。そのため  $h$  の減少と共に液柱の分散の程度も減少した状態で液面に到達するため  $v/V$  も減少しているのである。特に  $h/d < 40$  では液柱が分散しない状態すなわち Fig. 2 (A) の  $b$  以

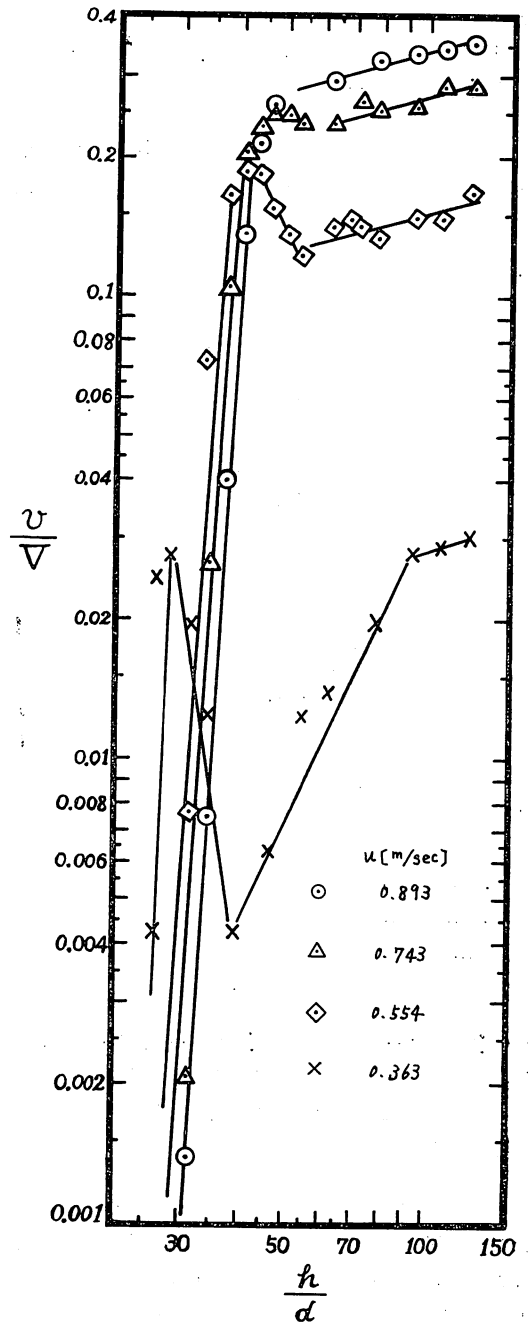


Fig. 7  $v/V$  vs.  $h/d$  ( $H/d = 9.38$ )

上の位置で液面に達するため急激に減少している。

(2) に属するもの : Fig. 7 の  $u = 0.743, 0.554, 0.363$ , Fig. 8 の  $u = 0.893, 0.743, 0.622$  および  $0.554$  [m/sec] の場合である。一定の  $H$  に対して  $u$  を減少せしめると気泡が完全には吸込口に達しない状態 (Fig. 2 (B)) が現われる。このような条件の場合に  $v/V$  に極

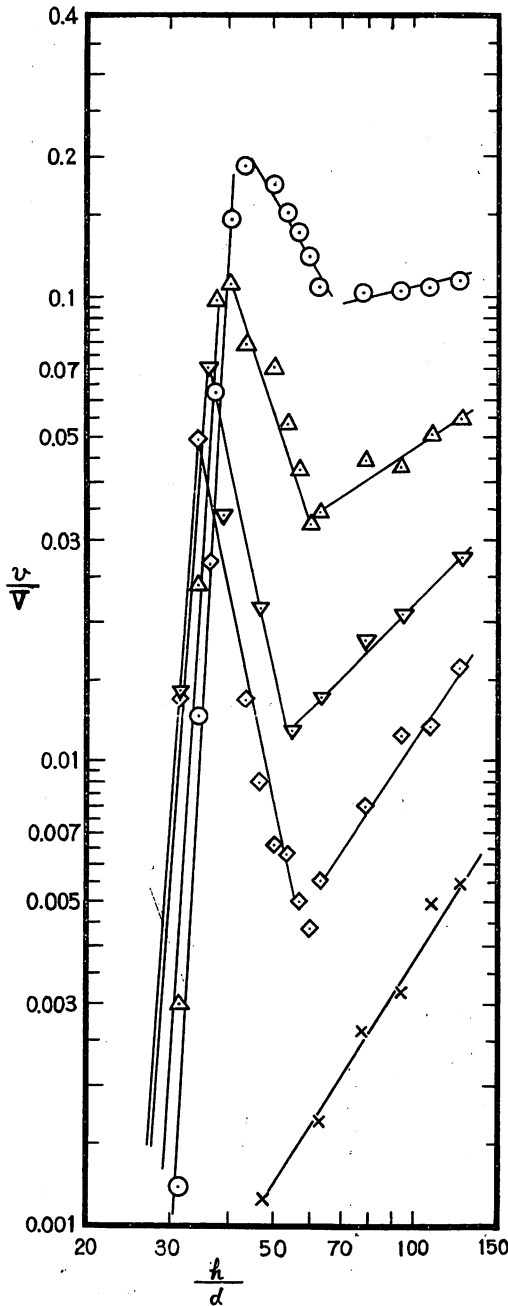


Fig. 8  $v/V$  vs.  $h/d$  ( $H/d = 12.5$ )

$\nabla$   $u = 0.622$  [m/sec]

他のシンボルは Fig. 7 に同じ

小および極大値を生ずる。 $h/d$  が十分大きく液柱が分散しているときは  $h/d$  が小さくなるにつれて、液滴のエネルギーも小さくなり気泡の発生量も少く、したがっ

て  $v/V$  も小さくなるが、 $h/d$  がある値になると落下する液柱の一部が分散した状態で液面に達するようになり、完全に分散した状態の時より液内を下方へつき進む力が大きいので生成する気泡の量は少ないが、生成した気泡がほぼ完全に吸込口迄達するので気泡の吸込量は増加する。さらに  $h/d$  が小さくなると、液柱は分散せずに液面に達するから気泡の発生量が急減し  $v/V$  は激減する。以上の理由から極小および極大値を生ずるのである。

(3) に属するもの : Fig. 8 での  $u = 0.455$  [m/sec] の場合である。 $H$  が大なのに対し  $u$  が小さいと生成する気泡の量が少なくある高さ以下では測定がほとんど不可能で、 $h/d$  に対して  $v/V$  は直線的に減少し、(2) の場合の  $h/d > 50 \sim 60$  の範囲と類似の傾向を持っている。

$h/d$  の  $v/V$  に対する影響は以上のごとく複雑であるが、 $u \geq 0.554$  [m/sec] ,  $h/d > 50$  のときと  $u = 0.363$  [m/sec] ,  $h/d > 90$  のときそれぞれ平行な直線となり、この範囲において  $h/d$  の指数 0.38 が得られる。一方、Fig. 8 において  $H/d > 10$  の場合、 $h/d > 50 \sim 60$  では  $u$  が小なる程  $v/V$  に対する  $h/d$  の指数が大きくなり、明らかに  $h/d$  と  $u$  との間にはある関数関係が存在する。

5-6  $u$  の影響 (Fig. 9~12) Fig. 9 は  $H/d > 10$  について  $h/d$  をパラメータとして  $v/V$  と  $u$  をプロットしたものである。

本図からも  $v/V$  に対する  $h/d$  と  $u$  の複雑な関数関係が伺われる。さて  $v/V$  に対する  $u$  の影響は (1) 式から  $Re$  数、 $We$  数および  $Fr$  数であるが、 $v/V$  に対して  $h/d$  と複雑な関数関係を示すのは無次元数の特性から考えて、 $Fr$  数であろう。いま  $v/V$  と  $h/d$  および  $Fr$  数の関係式を示すと、

$$\frac{v}{V} = A (h/d)^m (Fr)^n \quad (2)$$

ここで  $m, n$  は  $h/d$  と  $Fr$  数の指数で (3) 式で表わされるものである。

$$\left. \begin{aligned} m &= p + s \log Fr \\ n &= q + t \log (h/d) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$A, p, q, s, t$  は定数である。よって、

$$\log \frac{v}{V} = \left\{ (s+t) \log \left( \frac{h}{d} \right) + q \right\} \log Fr + p \log \left( \frac{h}{d} \right) + \log A \quad (4)$$

ゆえに Fig. 9 の各直線の指数を求め、 $Fr$  数の指数を算

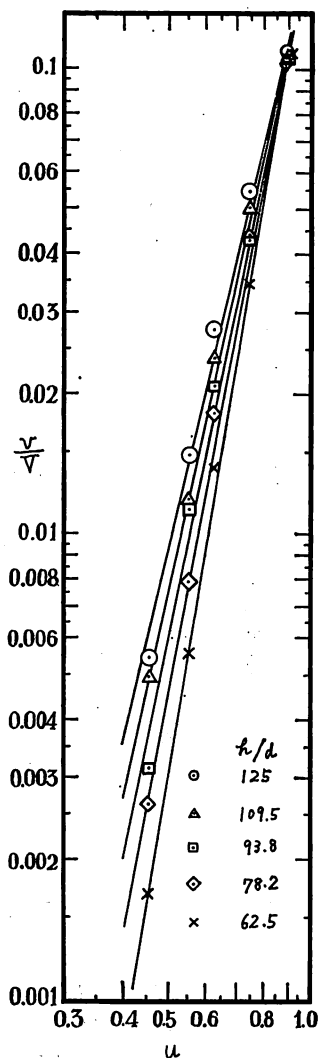


Fig. 9 v/V vs. u (H/d=12.5)

出し,  $\log(h/d)$  に対してプロットすれば Fig. 10 の直線が得られる。本図から Fr 数の指数は  $-3.7 \log(h/d) + 7.9$  となる。かくて,  $(h/d)$  を Fr 数の指数に入れたので,  $Fr = 1.0$  のときの  $v/V$  と  $h/d$  をプロットし, この勾配より  $h/d$  の指数 2.85 が得られる (Fig. 11)。

$H/d < 10$  における  $v/V$  と  $u$  の関係は Fig. 12 に示す通りで, これより Fr 数の指数は 0.06 となる。

5-7  $d'$  の影響 (Fig. 13) 吸込口径  $d'$  を変えて実験した結果を Fig. 13 に示す。本図より  $d'/d = 1.1$  付近で極大値が現われ,  $d'/d < 1.1$  では余り差がなく,  $d'/d > 1.1$  では  $d'/d$  の指数は,  $H/d > 10$  のとき  $-0.76$ ,  $H/d < 10$  のとき  $-0.78$  となる。

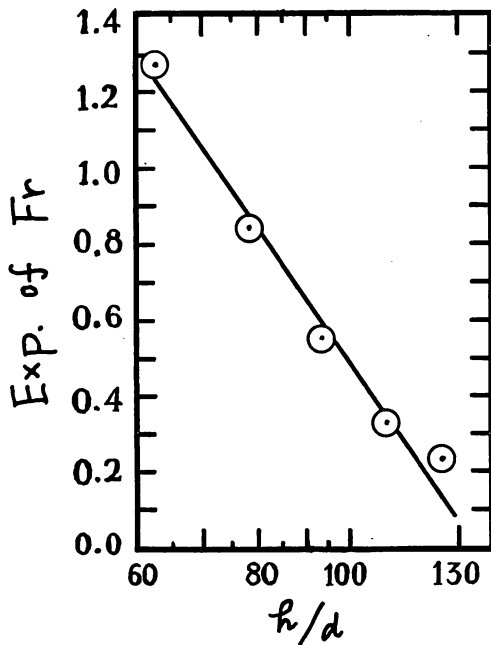


Fig. 10

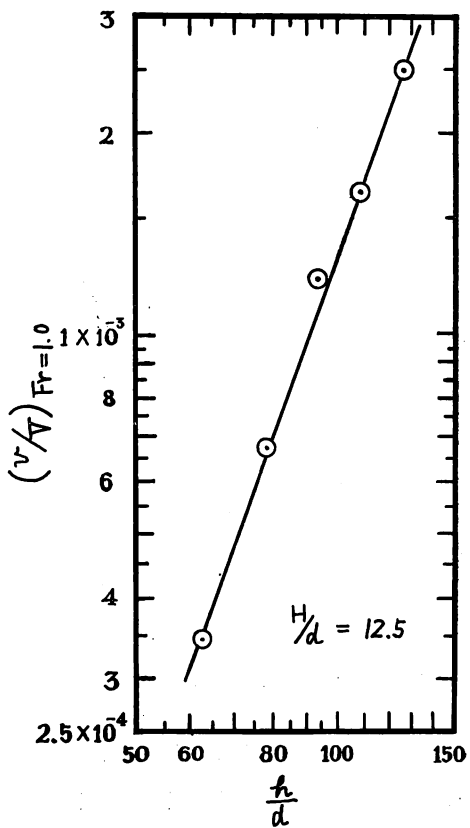


Fig. 11

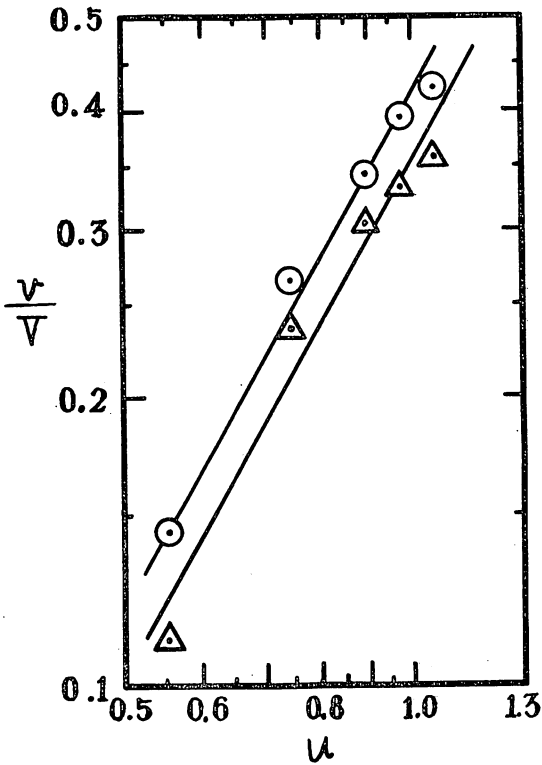


Fig. 12  $v/V$  vs.  $u$  ( $H/d=9.38$ )

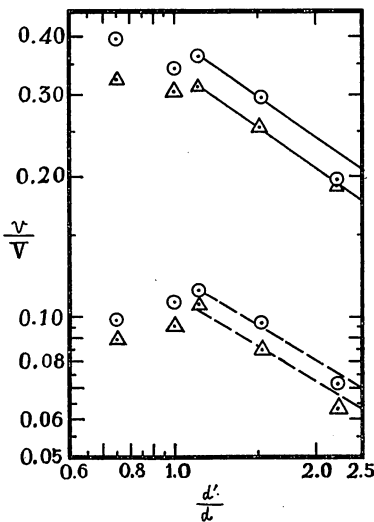


Fig. 13  $v/V$  vs.  $d'/d$

5-8  $d$ の影響 (1) 式の各項には落下口の直径  $d$  を含んでいるので、 $d$  を変えて実験を行ったが、この際  $Re$  数、 $We$  数および  $Fr$  数が  $d$  のみの関数になる

ように  $d$  とともに  $u$  を変えた。なお  $H/d > 10$  の場合には  $h/d$  も一定に保った。その結果  $d$  の指数は  $H/d < 10$  のときは、2.78、 $H/d > 10$  のときは  $h/d=125$  で 10.39、 $h/d=62.5$  のとき 9.29 となり、各項の  $d$  の指数の和によく一致した。

5-9 係数  $C$  の決定 (Fig. 14) 横軸に  $We$  数をとり縦軸に  $v/V$  を  $We$  数を除く項の積で割った値をとりプロットしたのが Fig. 14 である。これより係数は、 $H/d > 10$  においては  $5.38 \times 10^{-5}$ 、 $H/d < 10$  においては  $3.56 \times 10^{-2}$  となる。

以上の結果から得られた (1) 式の係数および指数を Table 2 に示す。

本実験の妥当性を確認するため、 $\rho = 1090$ 、 $\mu = 0.001335$ 、 $\sigma = 0.0588$  および  $\rho = 1127$ 、 $\mu = 0.001535$ 、 $\sigma = 0.056$  の二種の食塩水を用いて実験した結果が本図の黒丸である。

なお、伏崎等の実験結果は次式の通りである。

$$h/H < 3 \quad \frac{v}{V} = 5.63 \times 10^{-12} \left( \frac{h}{H} \right)^{0.455} \left( \frac{D}{d} \right)^{-1.3} (Re)^{2.94} \quad (5)$$

$$h/H > 4 \quad \frac{v}{V} = 1.15 \times 10^{-3} \left( \frac{h}{H} \right)^{0.96} \left( \frac{D}{d} \right)^{-0.41} (Re)^{0.57} \quad (6)$$

伏崎等の結果に対する検討。

- (1) 伏崎等は  $h/H$  なる項を用いているが、 $h$  および  $H$  の指数が明かに異なるので本実験のように  $h/d$  および  $H/d$  なる二つの項で表わすのが妥当である。
- (2) 伏崎等は液体として水のみを用いているので、液体の流動に関する項として  $Re$  数だけを考慮して、 $Re$  数の指数を  $u$  の変化から求めている。しかし本実験の結果から明らかのように  $Re$  数の他に液体の表面張力の影響も大きく  $We$  数および  $Fr$  数も無視できない。

## 6 結 言

充填塔底部での気泡の吸込現象の模型実験をおこなひ、これにおよぼす諸因子の影響を調べた。その結果、液落下口の口径、液深さ等の構造上の影響が極めて大きいことがわかった。また、液の表面張力の影響も大きく、特に  $Fr$  数の指数が  $h/d$  の関数になることを明らかにした。

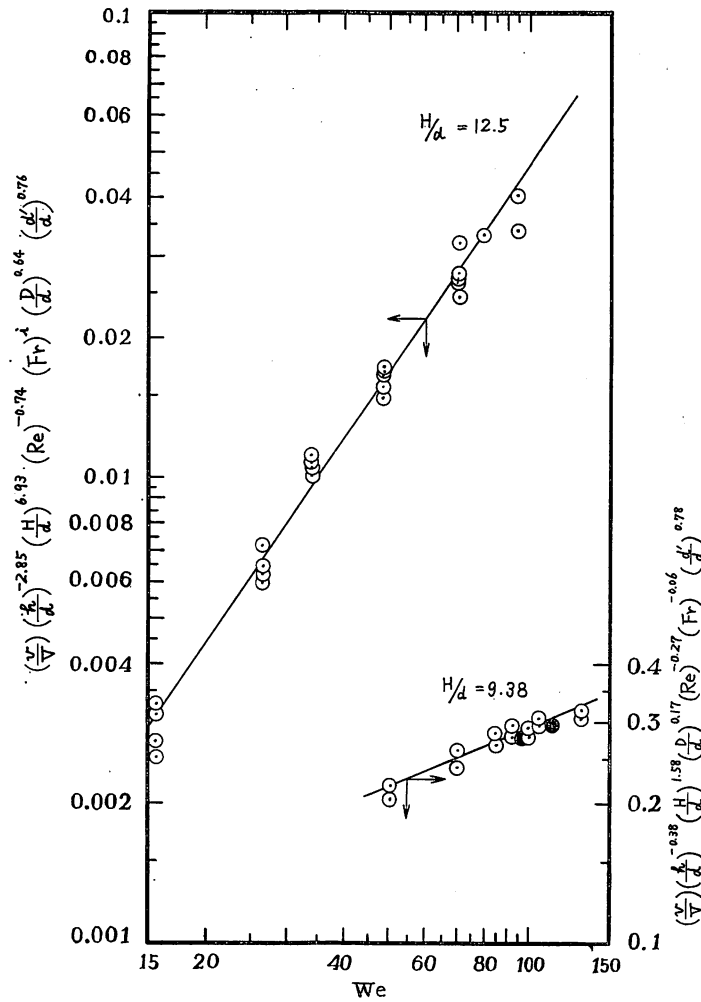


Fig. 14 C

Table 2 係数および指数

	C	a	b	c	e	f	i	j
H/d > 10	$5.38 \times 10^{-5}$	2.85	-6.93	-0.64	0.74	1.47	$-3.7 \log \left( \frac{h}{d} \right) + 7.9$	-0.76
H/d < 10	$3.56 \times 10^{-2}$	0.38	-1.58	-0.17	0.27	0.45	0.06	-0.78

使用記号

- D: 塔径 [m]
- d: 液落下口直径 [m]
- d': 液吸込口直径 [m]
- Fr: Froude 数 =  $u^2/2gd$  [-]
- g: 重力加速度 [m/sec<sup>2</sup>]
- H: 液深さ [m]
- h: 液面より液落下口までの高さ [m]
- Re: Reynolds 数 =  $du\rho/\mu$  [-]

- u: 管内流速 [m/sec]
- V: 液流量 [m<sup>3</sup>/sec]
- v: 気泡の吸込量 [m<sup>3</sup>/sec]
- We: Weber 数 =  $du^2\rho/\sigma$  [-]
- $\mu$ : 液粘度 [kg/m·sec]
- $\rho$ : 液密度 [kg/m<sup>3</sup>]
- $\sigma$ : 液表面張力 [kg/sec<sup>2</sup>]

文献

1) 伏崎, 吉川, 山田, 化学機械 15, 5 (1951)