

## 連続泡沫塔における濃縮率

著者	森田 春樹
雑誌名	金沢大学工学部紀要 = Memoirs of the Faculty of Technology Kanazawa University
巻	8
号	1
ページ	105-112
発行年	1974-03-25
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/25222">http://hdl.handle.net/2297/25222</a>

# 連続泡沫塔における濃縮率

森 田 春 樹\*

## Enrichment Ratio of Form Liquid in the Continuous Foam Column

by

Haruki MORITA

### Abstract

Enrichment ratio of foam liquid and the properties of foam phase were studied, based on an assumption that a foam drainage model is composed of capillaries representing Plateau borders between foam bubbles.

As to the properties of form phase, liquid volume fraction of exit foam,  $\varepsilon_f$ , is related to the average bubble diameter,  $d$ , the superficial gas velocity,  $G$ , and the foam height,  $Z$ , by the equation

$$\varepsilon_f = \alpha G d^{-2} Z^{-\frac{1}{2}}$$

where  $\alpha$  is a constant which is determined by the experimental system and apparatus. The experimental results are discussed and compared with published equation. And the enrichment ratio of foam liquid,  $E$  is approximated with the equation

$$E = \alpha' d G^{-1} Z^{\frac{1}{2}}$$

## 1 緒 言

泡沫の有効な利用法の一つとして、泡沫分離法が最近、注目されてきた。泡沫分離法は、金属イオン、界面活性物質などが気液接触界面に吸着される現象を利用する分離操作である。その特徴として次のようなことがあげられる。他の方法では分離しにくいような稀薄溶液において、より効果的な分離が出来ること、主要な操作は常温で溶液内に気泡を発生させることであるから、経済性が良いことなどである。溶液内に発生させた気泡表面へ界面活性物質が吸着する速度はかなり早く、気泡表面は数秒の滞留時間で吸着平衡に達することが明らかになっている<sup>1)</sup>。したがって、液相において気液界面が吸着平衡の状態にあるときは、液液抽出操作と類似的である。この場合に、液相中の界面活性物質が除去されるプロセスは、完全混合の抽出槽と同じように考えて理論式がみちびける<sup>2)</sup>。

泡沫分離塔においては、液相から上昇する泡沫層が液相の上部にあらわれる。泡沫層においては、泡沫層の気泡によって形成される細隙を通して、連続的な排液流れが生ずる。この排液流れが吸着分離した物質の濃縮効果を促進するが、泡沫層における濃縮率について定量的な研究は十分ではない。

\*化学工学科

また、排液現象の理論も確立していない。ここでは、毛細管モデルを泡沫層の排液流れに適用して、泡沫液の液体積分率、濃縮率について、物性値、操作変数などとの関係式を求めた。また、泡沫分離塔による実験から得た測定値を既往の実験式と比較し、考察した。

### 2 泡沫層の解析

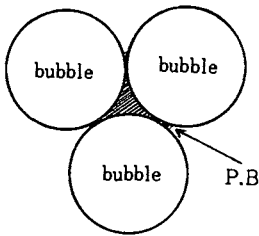
泡沫塔全体の物質収支は、供給液、泡沫液、塔出口の容積速度、濃度をそれぞれ、 $V_i, C_i, V_f, C_f, V_b, C_b$ 、とすれば、次式が成立する。

$$V_i C_i = V_f C_f + V_b C_b \tag{1}$$

溶液の供給を、液相中の上部で行うときは、気泡に同伴されて泡沫を形成する液の濃度は供給液濃度に等しいと考えられるから、泡沫液の物質収支は

$$V_f C_f = V_f C_i + \Gamma S \tag{2}$$

ここで、 $\Gamma$  は単位面積当りの吸着量、 $S$  は単位時間当りの吸着面積である。泡沫層においては、Fig. 1 に示すように、気泡の間に Plateau border (以下では P.B と略記する) があり、P.B を通して液の流下現象がみられる。液の流下は泡沫を形成する液膜部分と、P.B の部分との曲率の差から生ずる排液現象と考えられている。泡沫層の排液現象を解析するにあたり、つぎのように仮定する。



1.(a) Profile view of a Plateau border

1. 泡沫層中における気泡は、十分に充填されていて、その形状は球とみなせる。

2. 泡沫層の排液現象は、P.B を通る毛細管中の液流下で近似出来る。

3. 塔内を上昇する泡沫層はピストン流であり、内部圧の変化は無視出来る。

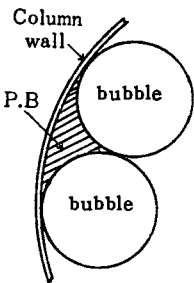
泡沫層の排液を、相当直径  $\delta$  の毛細管中の流れであらわすと、平均流速  $\bar{u}$  は Hagen-poiseuille の式によって、仮定 2 から次式のように示される<sup>4)</sup>。

$$\bar{u} = \frac{\rho g (1 - \epsilon) \delta^2}{32\mu} \tag{3}$$

液体積分率  $\epsilon$  は泡沫層高によって変り、 $(1 - \epsilon)$  は毛細管有効長に対する泡沫層高の補正項として含まれている。泡沫層の P.B は  $\epsilon$  とともに変るから、泡沫層の P.B の数を  $n(1 - \epsilon)$  とする。 $n$  は、塔断面の dry foam の数である。P.B の排液流れの断面積は、

$$f = n(1 - \epsilon) \frac{\pi \delta^2}{4} \tag{4}$$

$f$  はまた、Fig. 1 (a) のような気泡によってかこまれた P.B を  $f_{PB}$ 、Fig. 1 (b) のように泡沫塔の壁面に接する P.B を  $f_W$  とすれば



1.(b) A Plateau border of column wall

$$\begin{aligned} f &= f_{PB} + f_W \\ &= f_{PB} (1 + R) \end{aligned} \tag{5}$$

ここで、 $f_{PB}$ 、 $f_W$  における dry foam の個数を、それぞれ、 $n_1, n_2$ 、塔径  $D$  における平均気泡径を  $d$  とすれば、 $f_{PB}$ 、 $f_W$  の近似的な断面積はつぎのように求められる。

$$f_{PB} = \frac{2\sqrt{3} - \pi}{8} n_1 (1 - \epsilon) d^2 \tag{6}$$

$$R = \frac{2\pi D^2 - d^2 \pi (n_2 + 2) - 2n_2 d \sqrt{D^2 - 2Dd}}{(2\sqrt{3} - \pi) n_1 d^2} \tag{7}$$

$$\text{ただし, } n_1 = \left(\frac{D}{d}\right)^2, \quad n_2 = \frac{\pi}{\sin^{-1}\{d/(D-d)\}} \quad (8)$$

Eqs. (5) ~ (7) を Eq. (4) に代入して

$$\delta^2 = \frac{2\sqrt{3}-\pi}{2\pi} \frac{1}{1+(d/D)^2\pi/\sin^{-1}\{d/(D-d)\}} (1+R) d^2 \quad (9)$$

となる。したがって、Eq. (3) は

$$\bar{u} = \left(\frac{\rho g}{32\mu}\right) (1-\varepsilon) k (1+R) d^2 \quad (10)$$

ただし、

$$k = \frac{2\sqrt{3}-\pi}{2\pi} \frac{1}{1+(d/D)^2\pi/\sin^{-1}\{d/(D-d)\}} \quad (11)$$

塔頂液体積分率  $\varepsilon_t$  は、 $G(1-\varepsilon)/\bar{u}$  に比例すると仮定して、比例定数  $K$  を、かりに、排液定数とする。

$$\varepsilon_t = \frac{KG(1-\varepsilon)}{\bar{u}} \quad (12)$$

Eq. (10), (12) より

$$\begin{aligned} \varepsilon_t d^2 &= \left(\frac{32\mu}{\rho g}\right) \left(\frac{K}{k}\right) \left(\frac{1}{1+R}\right) G \\ &= k'K \left(\frac{1}{1+R}\right) G \quad \text{ただし, } k' = \left(\frac{32\mu}{\rho g}\right) \left(\frac{1}{k}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

つぎに、泡沫液の濃縮率を

$$E = \frac{C_f - C_i}{C_i} = \frac{Cf}{C_i} - 1 \quad (14)$$

とすると、Eq. (2) において、 $S = \pi D^2 Ga/4$ 、 $a = 6/d$  であるから、 $E$  は次式のように書きかえられる。

$$E = \left(\frac{\Gamma}{C_i}\right) \left(\frac{6}{\varepsilon_t d}\right) \quad (15)$$

よって、Eq. (13), (15) から、濃縮率について次式がみちびかれる。

$$\frac{E}{d} = \left(\frac{\Gamma}{C_i}\right) \left(\frac{6}{k'K}\right) (1+R) \frac{1}{G} \quad (16)$$

界面活性物質が、気液界面において吸着平衡にあるとき、 $\Gamma$  について Gibbs の式が成立つとして、

$$\Gamma = -\frac{C}{iRT} \frac{\partial \sigma}{\partial C} = -\frac{1}{iRT} \frac{\partial \sigma}{\partial \ln C} \quad (17)$$

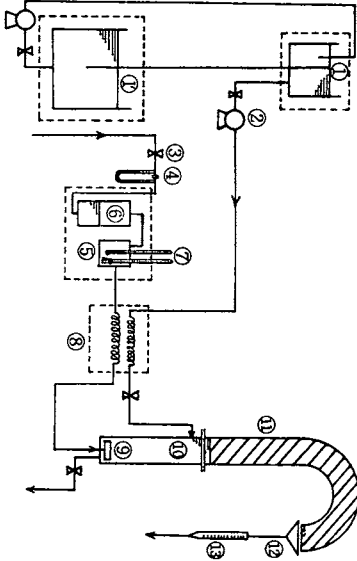
Eq. (17) において、定温で、表面張力  $\sigma$  と  $\ln C$  が直線で近似出来るときは、 $\Gamma$  が一定である。したがって、Eq. (16) の右辺で、括弧のなかはすべて定数になる。

### 3 装置と実験方法

Fig. 2 に実験装置の略図を示した。泡沫塔本体⑩はアクリル樹脂製の円筒で、その内径は 7.76 cm である。泡沫が破壊するのを防ぐため、泡沫塔の塔頂部分は U 字形である。泡沫受けロート⑪の内壁にシリコン樹脂を塗り、塔頂部から流出する泡沫を破壊して、泡沫液を計量した。実験中、液面の高さを一定 (50 cm) に保ち、泡沫層高は 48 cm, 120 cm, 222 cm, について実験を行った。気泡発生用のガスは、空気をフィルターに通してから使用した。マイクロバルブ⑨を調節し、空気流量は 0.5~5.0 cm/sec の範囲で多孔板⑧から気泡を発生した。泡沫層の動的現象を解析する目的から、多孔板の穴径は比較的大きく、0.5 mm, 0.8 mm, 1.0 mm である。飽和器⑨を通して、ガスを水蒸気

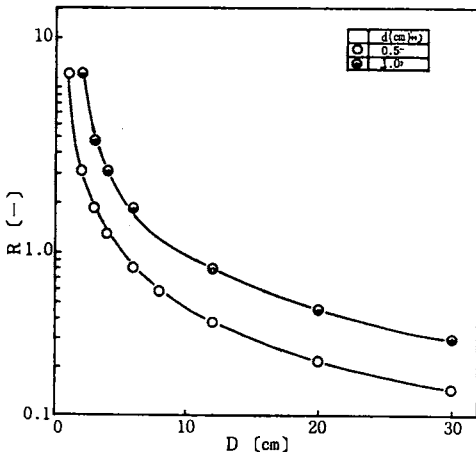
で飽和し泡沫塔の気泡内へ水の蒸発がおこらないようにした。不飽和ガスを用いたときは、気泡表面の吸着量が、ガスの飽和度により変化するためである。気泡径は写真撮影によって測定し、算術平均値をもって平均気泡径とした。

界面活性剤溶液は、ヘッド一定のタンク①から流下し、さらにマイクロポンプ②によって流量を調節してから、泡沫塔本体に供給される。界面活性剤は、ドデシルナトリウムサルフェート（以下では、



2. Diagram of experimental apparatus

来る。 $d=0.5\text{cm}$ ,  $D=7.76\text{cm}$  として計算すると、 $k=0.042$  となる。実験に用いた D. N. S 溶液の平均密度、および粘度は、それぞれ、 $0.997\text{gr/cm}^3$ ,  $9.19 \times 10^{-3}$  ポアズであるから、この値を使用して、Eq. (13) から  $k'=7.17 \times 10^{-3}\text{cm. sec}$  となる。また、Eq. (7) は排液の壁効率を示すものであり、塔径によって変化する。Eq. (7) による  $D$  と  $R$  の関係を示したのが、Fig. (3) である。



3. Effect of column diameter on  $R$  (calculated value)

で、ガス速度  $G$  を用いている。泡沫層の液体積分率は、泡沫層高によって変化するから、Fig. (4) において、 $\epsilon_t d^2$  に対する泡沫層高の影響がみとめられる。泡沫層高の影響を考えると、Fig. (5) に

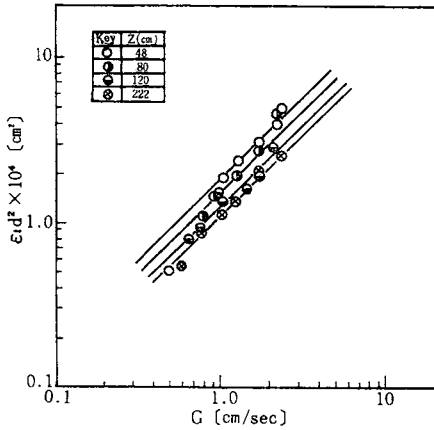
D. N. S と略記する) を用いた。蒸留水に溶解した供給溶液は一定濃度 ( $1.76 \times 10^{-3}\text{mol/l}$ ) である。泡沫液の濃度は Auerbach の分析法 (ブロムフェノールブルー法) によって測定した。この分析法は紫色から淡青色に変化する滴定終点が見にくい欠点があるが、十分な結果を得た。D. N. S 溶液の濃度と表面張力の関係から、泡沫液の濃度を定めることが出来るので、この方法を併用した。しかし表面張力の経時変化などのため、信頼性のあるデータを得るのは、かなり面倒である。吸着量の算出に用いた Fig. 7 は、測定を繰り返した実測値であり、文献値<sup>1)</sup>との照合も良好である。供給液の濃度は既知であるから、測定値の信頼性は Eq. (1) から確かめられる。

#### 4 結果の整理と考察

Eq. (11) の  $k$  を求めてみると、第2項は、塔径が大きくなるにしたがって、1に近づくから、 $D \gg d$  では無視出来る。 $d=0.5\text{cm}$ ,  $D=7.76\text{cm}$  として計算すると、 $k=0.042$  となる。実験に用いた D. N. S 溶液の平均密度、および粘度は、それぞれ、 $0.997\text{gr/cm}^3$ ,  $9.19 \times 10^{-3}$  ポアズであるから、この値を使用して、Eq. (13) から  $k'=7.17 \times 10^{-3}\text{cm. sec}$  となる。また、Eq. (7) は排液の壁効率を示すものであり、塔径によって変化する。Eq. (7) による  $D$  と  $R$  の関係を示したのが、Fig. (3) である。図から、 $D$  が大きくなると、 $R$  は減少し  $D > 30\text{cm}$  では塔径の影響を考えなくてもよいことがわかる。本実験の場合、 $R=0.563$  である。したがって、以上の  $k$ ,  $k'$ ,  $R$  を用いると、Eq. (13) はつぎのようになる。

$$\epsilon_t d^2 = 4.58 \times 10^{-3} KG \quad (18)$$

$G=0.5 \sim 4.0\text{cm/sec}$ , 泡沫層高,  $Z=10 \sim 175\text{cm}$  において、 $d$  の変化を実測した結果は、 $G$  を変えても  $d$  はほとんど変わらず、泡沫層高によってもあまり変わらない。多孔板の穴径が泡沫層の平均気泡径を支配しているといえる。Fig. (4) に  $\epsilon_t d^2$  と  $G$  の関係を示した。理想泡沫モデルを仮定しているから、泡沫速度はガス速度に等しいの



4. Correlation between  $\epsilon t d^2$  and  $G$

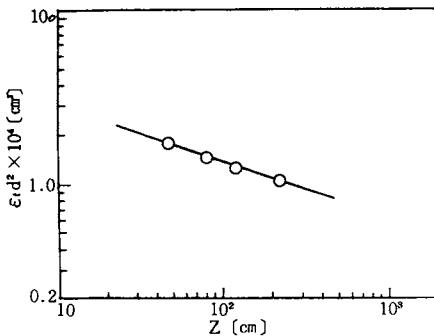
である。これに反して、 $G$  が  $0.8\text{cm/sec}$  以下では、泡沫速度がおそくなり排液が十分に行われるので、濃縮率が增大すると思われる。塔内における気泡の滞留時間から考えて、D. N. S は気泡表面で吸着平衡にたっているとは仮定出来る。Eq. (7) において、D. N. S の場合は、 $i=2$  であるから、Fig. (7) に示してある  $\sigma$  vs.  $\ln C$  より傾斜を求めて計算すれば

$$\Gamma = 2.72 \times 10^{-10} \text{mol/cm}^2 \quad (21)$$

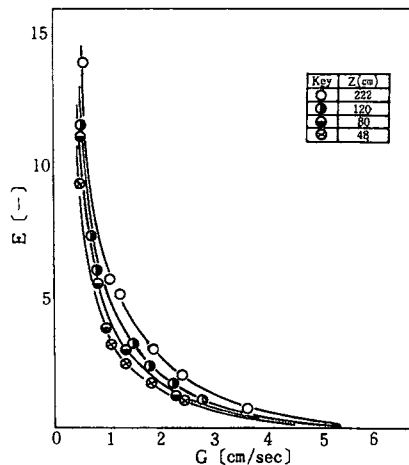
となる。Eq. (16) に  $\Gamma$  を代入し、 $Z$  の補正項を用いると、つぎのようになる。

$$\frac{E}{dZ^{\frac{1}{3}}} = 1.45 \frac{1}{G} \quad (22)$$

$E/dZ^{\frac{1}{3}}$  と  $G$  を両対数紙に示したのが、Fig. (8) である。図において、Eq. (22) をあらわす直線と、傾斜がやや異なるのは、 $G$  が小さいところでの泡沫速度が減少するためであると考えられる。各泡沫層高における濃縮率を、Eq. (22) から求めた結果が Fig. (9) に示してある。実験値を示した Fig. (6) と比較してみると、Eq. (22) は濃縮率について、よく近似しているといえる。一般的に、Eq.(22) は、 $E = \alpha' d G^{-1} Z^{\frac{1}{3}}$  として表わし得る。 $\alpha'$  は実験の系、装置などによって決まる定数である。

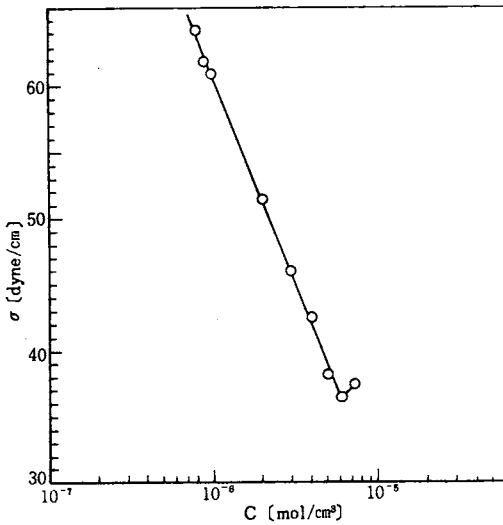


5. Correlation between  $\epsilon t d^2$  and  $Z$

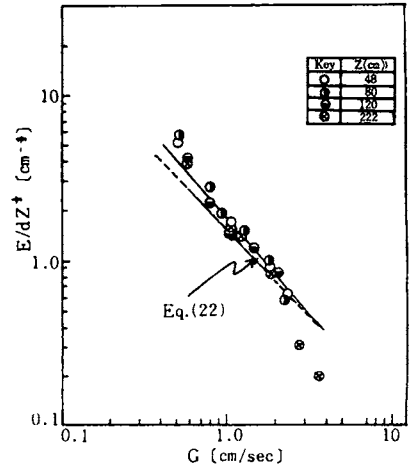


6. Effect of gas velocity on  $E$

ここで、既往の実験式と比較してみる。Garden<sup>5)</sup> は、塔径、 $2.46\text{cm}$ 、泡沫層高  $40\sim 80\text{cm}$  によっ



7. Relationship between surface tension and concentration of D. N. S. at 25°C



8. Correlation between  $E/dZ^2$  and  $G$

て、界面活性剤としてモノブチルピフェニールナトリウムサルフェートを用い、 $1.6 \sim 1.7 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$ の範囲において実験を行った。その結果、泡沫塔における泡沫層の動的特性として、つぎの実験式を提出している。

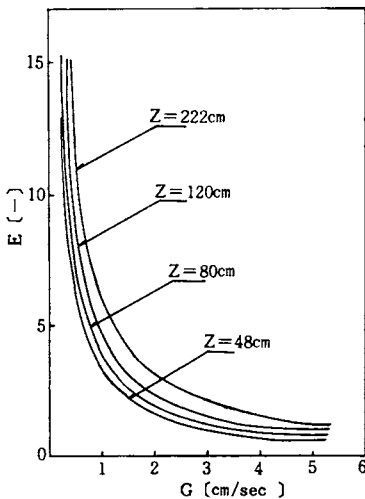
$$E/d^2 = 4.35 \times 10^{-4} v_f^{0.99} \tag{23}$$

$v_f$  は泡沫速度であるが、Eq. (19) と比較すると、泡沫層高の影響を示す  $Z$  の補正項がふくまれていない。前述のように、 $G$  が小さいと、泡沫速度が小さくなる傾向を示すのは、泡沫がこわれるためである。また、泡沫がこわれる速度は泡沫層高によって変るから、泡沫速度を用いると、 $Z$  の補正項はなくてもよいと考えられる。しかし、操作変数として、泡沫層高によって変化する泡沫速度を用いるのは適当ではない。 $Z$  の補正項は、泡沫のこわれる割合を表現する項であるとも考えられる。本実験と同じ濃度範囲であるから、界面活性剤の種類によって、密度、粘度があまり変らないとすれば、近

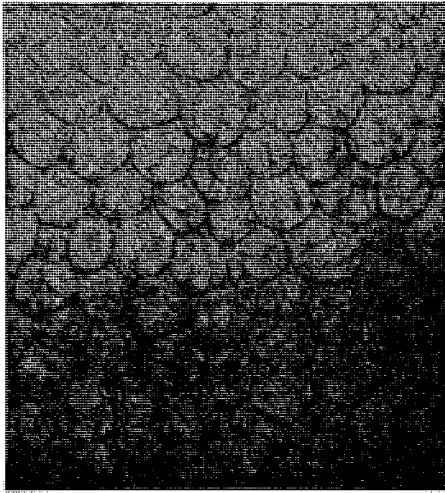
似的に本実験の  $k, k'$  を用いることが出来る。また、塔径の影響を考えると、 $R=1.45$  となる。これらの値を用いて、Eq. (23) から排液定数を求めてみると、

$$K = 1.48 \times 10^{-1}$$

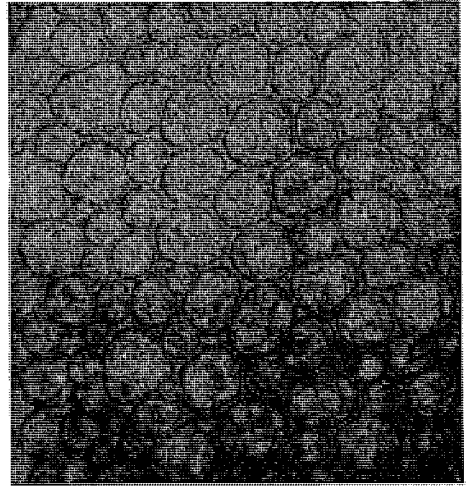
となり、本実験の  $K$  にちかい値である。 $v_f$  のべき乗は 1 に近似しているから、Eq. (19) は泡沫層の特性について、よりよく表現していると考えられる。濃縮率を問わず Eq. (22) を求めるときに、 $\Gamma$  の計算は Gibbs の式を用いているが、Gibbs の式そのものの実験的検証はむずかしく、実験ではしばしば、理論式より大きな  $\Gamma$  になることが知られている<sup>3)</sup>。緒言にも述べたように、気液界面に界面活性剤が平衡吸着される速度は早い、動的な平衡吸着量の正確な値はわからない。しかし、 $\Gamma$  が濃度によって影響されない場合、すなわち、表面張力が変化しても  $\Gamma$  が変化しないときには、Gibbs の式を用いて、実験結果と一致することが示される。



9. Effect of gas velocity on  $E$  (calculated value)



10(a) Foam at foam height, 120cm,  
G=1.78cm/sec



10(b) Foam at foam height, 10cm,  
G=1.78cm/sec

以上では、泡沫層を理想的な球形モデルとして考えているが、実際は、そのように単純なものではないことは明らかである。Fig.10 (a) に示した写真は、泡沫層高、120 cm,  $G=1.57$  cm/sec における泡沫層であるが、各気泡は、ほとんど5角形または6角形をなして、約  $120^\circ$  で交差する3本のエッジがある。正12面体の各面が  $117^\circ$  で交わることから、気泡は立体的に正12面体の類形をなしていると考えられる。Fig. 10 (b) に示したのは、泡沫層高、10 cm,  $G$  は同じ  $1.57$  cm/sec の場合であるが、気泡は、まだまるみをもって、球形にちかい。このことから、泡沫層は高くなるにしたがって、徐々に、球形から、ゆがんだ正12面体に発達し、また、移動過程で気泡がこわれて、種々の泡径分布をもった泡沫層へ変化してゆくと考えられる。泡沫塔内を上昇する泡沫層は複雑なプロセスであるが、一般的に排液流れと破泡の速度が泡沫の特性を決定するものである。泡沫分離における泡沫層は定常操作であるから、Plateau border の網状構造にもとづく毛細管モデルは、泡沫分離法において、検討する価値があり、さらに、実験が必要であると考えられる。

## 5 結 言

泡沫分離においては、気液界面積を大きくすることがのぞましいから、平均気泡径に影響する多孔板穴径は小さくすべきである。しかし、気泡径が小さいと、液体積分率が增加して、濃縮率は減少する。また、ガス速度を小さくすると、濃縮率は増加するが、一定量の泡沫液を得るのに長時間を要するから、操作条件を適当にえらぶ必要がある。濃縮率は、泡沫層の Plateau border による毛細管モデルにより解析し、実験結果として、次の近似式を得た。

$$E = \alpha' d G^{-1} Z^{\frac{1}{2}}$$

$\alpha'$  は、界面活性剤の種類、および泡沫分離の装置によって決まる定数である。

最後に、実験に協力していただいた学生諸君に感謝の意を表します。

### Nomenclature

$\alpha$  = specific surface area

[1/cm]

$C$  = concentration of adsorbate

[mol/cm<sup>3</sup>]



$D$ =column diameter	[cm]
$d$ =average bubble diameter	[cm]
$E$ =defined by Eq. (14)	[—]
$f, f_{PB}, f_W$ =fractional cross section for liquid flow	[—]
$G$ =superficial gas velocity	[cm/sec]
$i$ =constant Eq. (17)	[—]
$K$ =constant assumed by Eq. (12)	[—]
$k$ =constant defined by Eq. (11)	[—]
$k'$ =constant defined by Eq. (13)	[cm · sec]
$n_1, n_2$ =number of Plateau border	[—]
$R$ =gas constant	[dyne · cm/gr-mol° K]
$R$ =defined by Eq. (7)	[—]
$S$ =surface area of exit foam phase	[cm <sup>2</sup> /sec]
$T$ =absolute temperature	[°K]
$\bar{u}$ =average liquid velocity in a capillary	[cm/sec]
$V$ =volumetric flow rate	[cm <sup>3</sup> /sec]
$Z$ =foam height	[cm]
<Greek>	
$\Gamma$ =excess adsorbate of bubble surface	[mol/cm <sup>2</sup> ]
$\delta$ =equivalent Plateau border diameter	[cm]
$\varepsilon$ =average volume fraction of liquid in column of foam	[—]
$\varepsilon_t$ =volume fraction of liquid in exit foam	[—]
$\mu$ =liquid viscosity	[gr/cm · sec]
$\rho$ =liquid density	[gr/cm <sup>3</sup> ]
$\sigma$ =interfacial tension	[dyne/cm]
<Subscripts>	
$i$ =feed liquid	
$f$ =foam liquid	
$b$ =exit liquid	

## Literature cited

- 1) Matuura, et al. : *Bull. Chem. Soc. Japan*, 31, 125 (1958)
- 2) Morita, H. : Preprints for Tohoku meeting of The Soc. of Chem. Eng., 77, Yonezawa (1970)
- 3) Nakagaki, M. : *Gendai Butsuri Kagaku Kōza*, 9, P. 104, Tokyo Kagaku dōjin (1968)
- 4) P. A. Hass and H. F. Johnson: *Ind. Eng. Chem., Fundamentals*, 6, 225 (1967)
- 5) Rubin, E., C. R. Lamantia and E. L. Gaden: *Chem. Eng. Sci.*, 22, 1117 (1967)
- 6) Shirozuka, T., and M. Ishiwata: *Kagaku Kōgaku*, 31, 402 (1973)

(昭和48年10月8日受理)