

泡沫塔の基礎的特性

酒 井 信 之

The Fundamental characteristic Property of the Foam Tower.

Nobuyuki SAKAI

The present investigation was carried out to find the fundamental characteristic property of the foam tower.

The result obtained are given in the following summary.

- a. The classification of the foam tower were established, —batch and continuous types, parallel flow and counter flow, single nozzle and porous filter, liquid layer.
- b. Liquid holdup, pressure drops of the foam layer and bubble size were studied.

§1. 緒 言

泡沫塔は塔内の下部にいれた起泡性溶液を 送気法によって吹きこまれたガスによって 泡立たせて泡沫層を塔内につくったものである。泡沫塔に関する考え方はいまだ十分に確立されていないが、著者は上述のように定義して従来から 研究されているこの種のものを気液の給排方法、ガスの吹きこみ部分の機構およびノズル上の液層の有無によって表—1 のように分類した。

表—1 泡 沫 塔 の 分 類

気液導入排出	気液方向	ノズル形式	ノズル上液層	研究者	研 究 概 要
回分式	-	単 孔	有 り	酒井 (1954) (1960)	泡沫層高、圧力損失、ホールドアップを調べた。物質移動に適用
			無 し	酒井 (1960)	全 上
		多 孔	有 り	酒井 (1954) (1960)	全 上
			無 し	酒井 (1960)	全 上
連続式	並流	単 孔	有 り	酒井 (1955) (1960) 恩田信典(1959) (1960)	泡沫層生成速度、圧力損失、ホールドアップを調べた。物質移動に適用 全 上
			無 し	酒井 (1960)	圧力損失、ホールドアップ、持液面積を調べた
		多 孔	有 り	酒井 (1954) (1955) 矢野 (1955)	圧力損失、物質移動を物質手摺作条件により調べた 煙霧量の捕集性能を調べた
			無 し	酒井 (1960)	圧力損失、ホールドアップ、持液面積、限界条件を調べた
	向流	多 孔	有 り		
			無 し	Metzner (1956) 矢野 (1960) 酒井 (未発表)	圧力損失、物質移動を調べて他形式と比較した。 消泡剤の消泡性能を調べた 圧力損失、ホールドアップ、持液面積を調べた物質移動
		単 孔	有 し		
			無 し		

表において起泡性溶液の一定量が あらかじめ塔内に入れられているか、連続的に塔に供給されるかによって回分式および連続式にわけ、気液の流動方向によって並流方式と向流方式とした。

泡沫塔についての 研究および応用については表に示す通りであるが、塔の特性ことに泡沫層の性質については充分知られていないので、連続式の塔を対象にして基礎的の考察をおこなった。

§2. 装置および実験方法

実験に用いた装置は図-1に示す。(a)は並流方式の全体図で(b)は向流方式の塔頂附近の関係(c)は並流方式貯槽浸液の場合の塔下部の関係をそれぞれあらわしている。Aは塔(内径3~6[cm]、

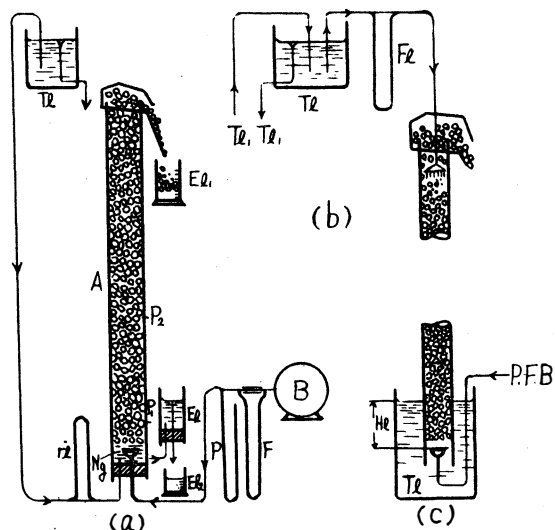


図-1 実験装置

高さ 30~200[cm])である。起泡性溶液は貯槽 $T1$ から流量計 $F1$ を通ってノズルまたは液分配板(向流方式)から塔内に送られる。ただし(c)では液の貯槽 $T1$ 中に塔下端が浸されている。ガスは送風機 B から流量計 F 、圧力計 P およびノズル Ng を経て液中に吹きこまれる。かくしてできた泡沫層は塔内を上昇して塔頂部から溢流する。向流方式のときは溢流なく塔内で一定の高さの泡沫層を示す。

溢流泡沫層は受器 $E1$ の中で消泡液化し計量される。泡沫化しない残液および向流方式の降下排出液は塔底からとり出されて $E2$ の受器で計量される。ガス速度は流量計 F で測定され、泡沫層の上昇速度は塔側面に印された二定点を通過する時間からも求められる。また送気圧および泡沫層の圧力損失はそれぞれ P および $P1$

の圧力計でよまれる。

なお以上の測定から誘導された速度、レイノルズ数などはすべて塔径を基準にとった。

使用したガスは空気 N_2 および CO_2 で起泡性溶液は純水中に数種の起泡性界面活性剤の適量を添加して得た。泡沫層の性質はガス吹きこみ部即ちノズルの構造によってかなり異なるが、ここでは #G₂ 多孔質濾過板を使った。濾過板の作用孔径および分布状態は福井らの方法⁽¹⁾で検討した。

§3. 実験結果

1. 限界ガスレイノルズ数 $(Re)_{gc}$

泡沫層の性質はあるガス速度または (Re) 数の値を境として相反する傾向を示すことが従来から報告されている⁽²⁾。この限界を示す状態は近似的にノズル上に液層が存在するか否かを現わしている。限界状態におけるガスの (Re) 数を限界ガスレイノルズ数 $(Re)_{gc}$ とよぶ。

$(Re)_{gc}$ は塔の構造、ノズルの種類、気液の種類および液の供給速度などによって変ることが実験的に確められた。いま図1-(a)の装置において気液の特性と液の (Re) 数を変えて $(Re)_{gc}$ をもってこれらを組合せて図-2を得た。

この場合起泡性溶液の表面張力 $\sigma = 20 \sim 50$ [dyne/cm] 液の (Re) 数 $(Re)l = 100 \sim 5000$ の範囲において $(Re)_{gc}$ は次の実験式によって表わされることがわかった。

$$(Re)_{gc} = 8.9 \times 10^{-2} (Re)l^{0.5} (\sigma_0 - \sigma / \sigma_0)^{-4.1} \quad \text{ただし } (Re)l < 300 \quad (1)$$

$$(Re)_{gc} = 1.97 \times 10^{-3} (Re)l^{1.2} (\sigma_0 - \sigma / \sigma_0)^{-4.1} \quad \text{ただし } (Re)l > 300 \quad (2)$$

他の型式の塔においてもそれぞれ同様のことが云える。泡沫塔の応用においては $(Re)_{gc}$ の範囲を知ることが極めて重要であり例えば揚液の場合には $(Re)_{gc}$ 以下となし気液間の物質移動においては $(Re)_{gc}$ 以上になるようにガスの流れをきめることが望ましい。

2. 泡沫層の液ホールドアップ

塔内の泡沫層の性質を表わす因子の1つとして液ホールドアップ ϕ_l を定義する。これは泡沫層の単位容積中に含まれる液容積であるとし、いまある溶積の泡沫層 V_f 中に存在する液容積を V_l 、また塔内を上昇する泡沫層および液の速度をそれぞれ U_f, U_{fl} とすれば次の関係をもつ。

$$\phi_l = V_l / V_f = U_{fl} / U_f \quad (3)$$

ϕ_l の値が大きければ泡沫層は液量の多い水っぽい状態を示し ϕ_l が小さければ乾いた状態を示す。 ϕ_l は塔の構造、ノズルの種類、気液の性質、気液の流動状態および塔の高さによって変わるが図-1の装置についてその塔頂の値を調べて図-3のように纏めることができた。

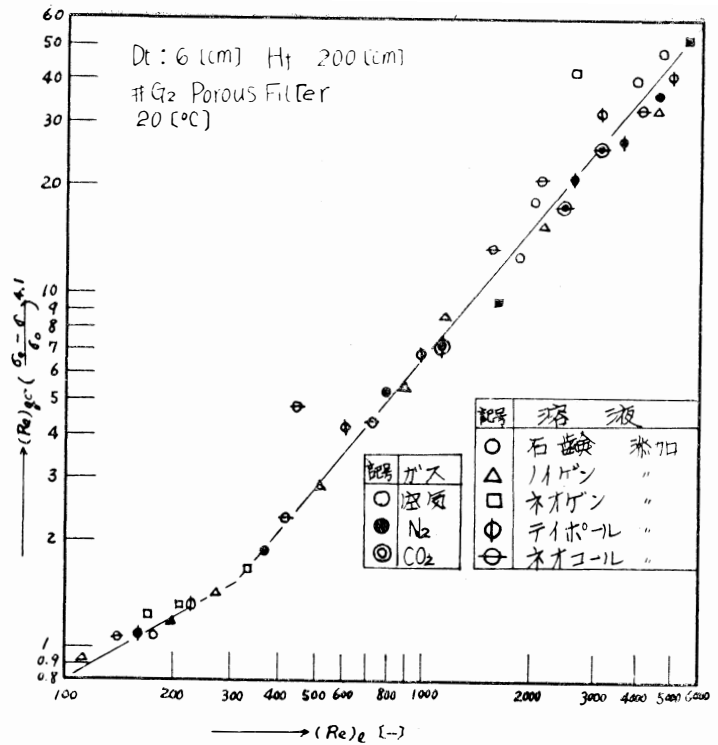
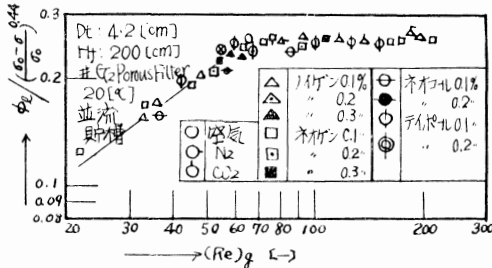
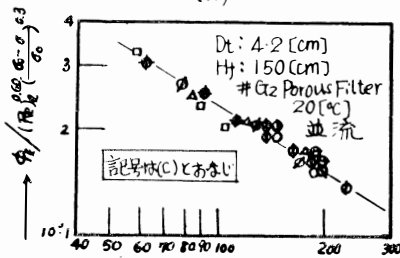


図-2 限界ガスレイノルズ数



(a)



(b)

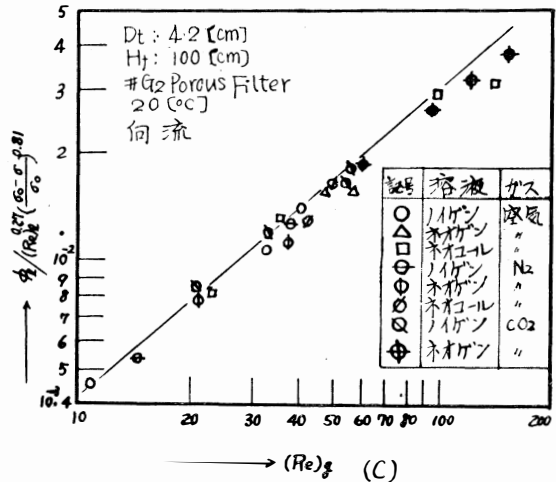


図-3 泡沫層の液ホールドアップ

これらの線図から ϕ_l は次式で表わされた。

a. 並流方式 図-1 C型式 $(Re)_g < (Re)_{gc}$ $H_f = 200 [cm]$

$$(Re)_g = 75 \quad \phi_l = 0.042 (Re)_g^{0.45} (\sigma_0 - \sigma / \sigma_0)^{0.44} \quad (4)$$

$$(Re)g > 75 \quad \phi l = 0.30(\sigma_0 - \sigma / \sigma_0)^{0.44} \tag{5}$$

b. 並流方式 図-1a型式 $(Re)g > (Re)gc$ $H_f = 150(\text{cm})$

$$\phi l = 3.28 \times 10^{-2} (Re)^{0.60} (\sigma_0 - \sigma / \sigma_0)^{0.3} \tag{6}$$

c. 向流方式 図-1b型式 $(Re)g > (Re)gc$ $H_f = 100(\text{cm})$

$$\phi l = 5.98 \times 10^{-4} (Re)^{0.27} (Re)^{0.84} g(\sigma_0 - \sigma_0)^{0.81} \tag{7}$$

ただし以上の各式は $(Re) > 10$ $\sigma = 20 \sim 50(\text{dyne/cm})$

の起泡性溶液の範囲にあるものとする。

3. 泡沫層の圧力損失

泡沫塔の特性を表わす1つとして泡沫層の圧力損失がある。泡沫層の圧力損失は泡沫層自身の重さと流動のマサツ抵抗の和として考えられる。前者は泡沫層の密度または液ホールドアップに関係し、後者は流動が早くなるに従って増すものである。

単位泡沫層高さ当りの圧力損失を $\Delta P/H_f$ [m-H₂O/m] で表わすとこれは層の高さによって異なるほかに液ホールドアップの場合と同様の種々の因子によって影響をうける。

いま図1の装置について塔全体の平均圧力損失を P_1 の測定孔からもとめて整理した結果図-4の線図を得た。

これらの結果から起泡性溶液において $(Re)g > 10$ $\sigma = 20 \sim 50(\text{dyne/cm})$ の範囲における圧力損失 $\Delta P/H_f$ [m-H₂O/m] は次式によって表わされた。

a. 並流方式 図-1C型 $(Re)g > (Re)gc$
 $H_f = 200(\text{cm})$

$$(Re)g \leq 75$$

$$\Delta P/H_f = 0.10(Re)g^{0.3} (\sigma_0 - \sigma / \sigma_0)^{0.3} \text{ [m-H}_2\text{O/m]} \tag{8}$$

$$(Re)g > 75$$

$$\Delta P/H_f = 0.19(Re)g^{0.15} (\sigma_0 - \sigma / \sigma_0)^{0.3} \text{ [m-H}_2\text{O/m]} \tag{9}$$

b. 並流方式 図-1a型 $(Re)g > (Re)gc$
 $H_f = 150(\text{cm})$

$$\Delta P/H_f = 3.44 \times 10^{-3} (Re)g^{-0.3} (Re)^{0.9} (\sigma_0 - \sigma / \sigma_0)^{0.3} \text{ [m-H}_2\text{O/m]} \tag{10}$$

c. 向流方式 図-1b型 $(Re)g > (Re)gc$ $H_f = 100(\text{cm})$

$$\Delta P/H_f = 1.35 \times 10^{-3} (Re)g^{0.32} (Re)^{0.40} (\sigma_0 - \sigma / \sigma_0)^{0.70} \text{ [m-H}_2\text{O/m]} \tag{10}$$

ガスを送入するために必要な圧力即ち送気圧は以上の泡沫層の圧力損失のほかにノズル部の損失およびノズルまでの全損失の総計である。多孔質濾過板を使用する場合にはノズルの損失に比較

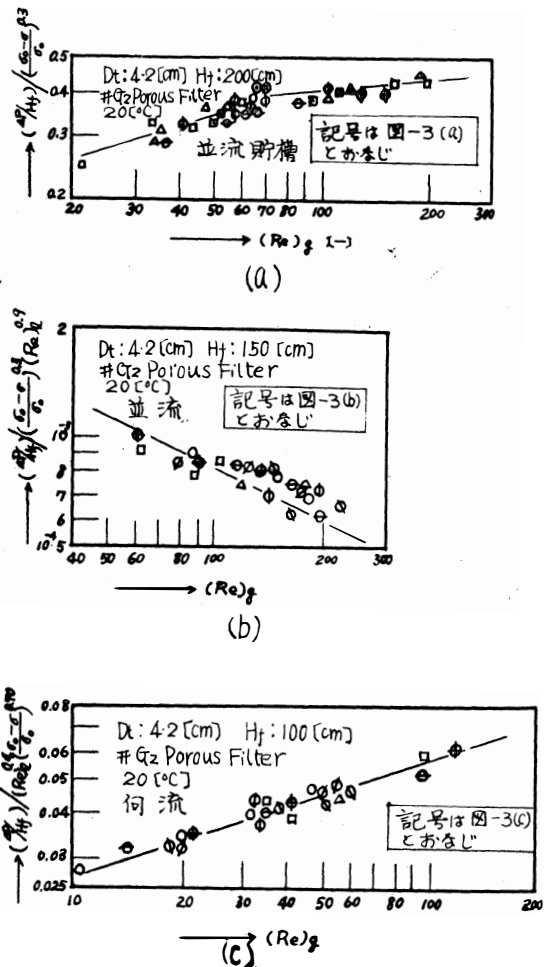


図-4 泡沫層の圧力損失

して泡沫層の損失は小さいが、比較的孔径の大きい単孔ノズルを使用する場合には泡沫層の圧力損失が大きく影響してくる。

4. 泡沫層中の気泡の大きさ

泡沫層を構成する気泡の大きさはノズルの孔径その他によって大小があり同一の孔からつくられた気泡も泡沫層を構成後種々変化して不同となる。泡沫層内の気泡の大きさおよびその分布状態は液ホールドアップ、圧力損失その他泡沫層の特性を左右する重要な因子として考えることができる。

一定の径孔から生成した気泡の大きさについては従来から各種の研究がおこなわれている⁽³⁾。また多孔質濾過板からつくられた気泡の大きさおよび分布状態については若干の研究があり⁽¹⁾いづれもその大きさを予測することが可能である。

泡沫層内の気泡は後述のように変形して本来の球形を保たないでしかも分離会合をおこなって大きさが塔上部に昇るに従って変化する。著者の観察によれば泡沫層高さ H_f における気泡の平均径は $H_f^{0.1-0.2}$ に比例して増大することが確められた。

5. 泡沫層内における気液接触面積

泡沫塔の性能および利用性を調べる時、泡沫層内の気液接触面積の大きさが屢々論議される。いま泡沫層内の気泡と同容積で球状の気泡を考えて且つこの気泡の大きさがすべて一様であると見做し、気液接触面積を $a[\text{cm}^2/\text{cm}^3]$ で表わすことにする。

気液接触面積 a は次の諸法でもとめることができる。

- a. 泡沫層内の気泡の平均内圧、泡沫層の外圧およびこれらの差即ち過圧をそれぞれ P_i , P_e , $\Delta P[\text{cm-H}_2\text{O}]$ とし、溶液の表面張力を $\sigma[\text{dyne/cm}]$ とすれば

$$a = 3(P_i - P_e) / 2\sigma = 1.5\Delta P / \sigma \quad [\text{cm}^2/\text{cm}^3] \quad (12)$$

の式が得られる。

- b. 泡沫層の光学的研究から導かれたものであるが、⁽⁵⁾一定光線の泡沫層内の気泡に対する入射光線の強さおよび反射光線の強さをそれぞれ I_0 , I とすれば

$$a \propto (I_0/I) - 1 \quad [\text{cm}^2/\text{cm}^3] \quad (13)$$

であらわされる。

- c. 泡沫層内における気泡は最密充填をなしているものと考えれば、⁽⁶⁾これは3個の気泡が 120° の角度を示すが、これに近似的な角度をもつ正12面体（所謂蜂の巣状）の形をなしているものと考えることが妥当である。

いま球状と考えたときの平均気泡径を $\delta_B[\text{cm}]$ 、正12面体をなす気泡の面積および容積を $S_a[\text{cm}^2]$ $V_b[\text{cm}^3]$ とする。また気泡をつくるノズル径 $D_n[\text{cm}]$ 、泡沫層のガスホールドアップ $\phi_g = 1 - \phi_l[-]$ とすれば

$$S_b \approx 2.32\delta_B^2 \quad (14)$$

$$V_b \approx 0.39\delta_B^3 \quad (15)$$

$$\delta_B \approx 0.182 \sqrt[3]{D_n \sigma} \quad (16)$$

であるから

$$a = S_b / (\phi_g V_b) \approx 32\phi_g / \sqrt[3]{D_n \sigma} \quad [\text{cm}^2/\text{cm}^3] \quad (17)$$

または

$$a \approx 5.95\phi_g / \delta_B \quad [\text{cm}^2/\text{cm}^3] \quad (18)$$

によってもとめることができる。

気液の物質移動をとり扱かう場合に充填塔では有効接触面積を考えて充填物のもつ全表面積との

$$(Re)g > 75 \quad \phi l = 0.30(\sigma_0 - \sigma / \sigma_0)^{0.44} \tag{5}$$

b. 並流方式 図-1a型式 $(Re)g > (Re)gc$ $H_f = 150[\text{cm}]$
 $\phi l = 3.28 \times 10^{-2} (Re)^{0.60} (\sigma_0 - \sigma / \sigma_0)^{0.3}$ (6)

c. 向流方式 図-1b型式 $(Re)g > (Re)gc$ $H_f = 100[\text{cm}]$
 $\phi l = 5.98 \times 10^{-4} (Re)^{0.27} (Re)^{0.84} g(\sigma_0 - \sigma_0)^{0.81}$ (7)

ただし以上の各式は $(Re) > 10$ $\sigma = 20 \sim 50[\text{dyne/cm}]$

の起泡性溶液の範囲にあるものとする。

3. 泡沫層の圧力損失

泡沫塔の特性を表わす1つとして泡沫層の圧力損失がある。泡沫層の圧力損失は泡沫層自身の重さと流動のマサツ抵抗の和として考えられる。前者は泡沫層の密度または液ホールドアップに関係し、後者は流動が早くなるに従って増すものである。

単位泡沫層高さ当りの圧力損失を $\Delta P/H_f$ $[\text{m-H}_2\text{O/m}]$ で表わすとこれは層の高さによって異なるほかに液ホールドアップの場合と同様の種々の因子によって影響をうける。

いま図1の装置について塔全体の平均圧力損失を P_1 の測定孔からもとめて整理した結果図-4の線図を得た。

これらの結果から起泡性溶液において $(Re)g > 10$ $\sigma = 20 \sim 50[\text{dyne/cm}]$ の範囲における圧力損失 $\Delta P/H_f$ $[\text{m-H}_2\text{O/m}]$ は次式によって表わされた。

a. 並流方式 図-1C型 $(Re)g > (Re)gc$
 $H_f = 200[\text{cm}]$

$$(Re)g \leq 75$$

$$\Delta P/H_f = 0.10(Re)g^{0.3} (\sigma_0 - \sigma / \sigma_0)^{0.3} \quad [\text{m-H}_2\text{O/m}] \tag{8}$$

$$(Re)g > 75$$

$$\Delta P/H_f = 0.19(Re)g^{0.15} (\sigma_0 - \sigma / \sigma_0)^{0.3} \quad [\text{m-H}_2\text{O/m}] \tag{9}$$

b. 並流方式 図-1a型 $(Re)g > (Re)gc$
 $H_f = 150[\text{cm}]$

$$\Delta P/H_f = 3.44 \times 10^{-3} (Re)g^{-0.3} (Re)^{0.9} (\sigma_0 - \sigma / \sigma_0)^{0.3} \quad [\text{m-H}_2\text{O/m}] \tag{10}$$

c. 向流方式 図-1b型 $(Re)g > (Re)gc$ $H_f = 100[\text{cm}]$

$$\Delta P/H_f = 1.35 \times 10^{-3} (Re)g^{0.32} (Re)^{0.40} (\sigma_0 - \sigma / \sigma_0)^{0.70} \quad [\text{m-H}_2\text{O/m}] \tag{10}$$

ガスを送入するために必要な圧力即ち送気圧は以上の泡沫層の圧力損失のほかにノズル部の損失およびノズルまでの全損失の総計である。多孔質濾過板を使用する場合にはノズルの損失に比較

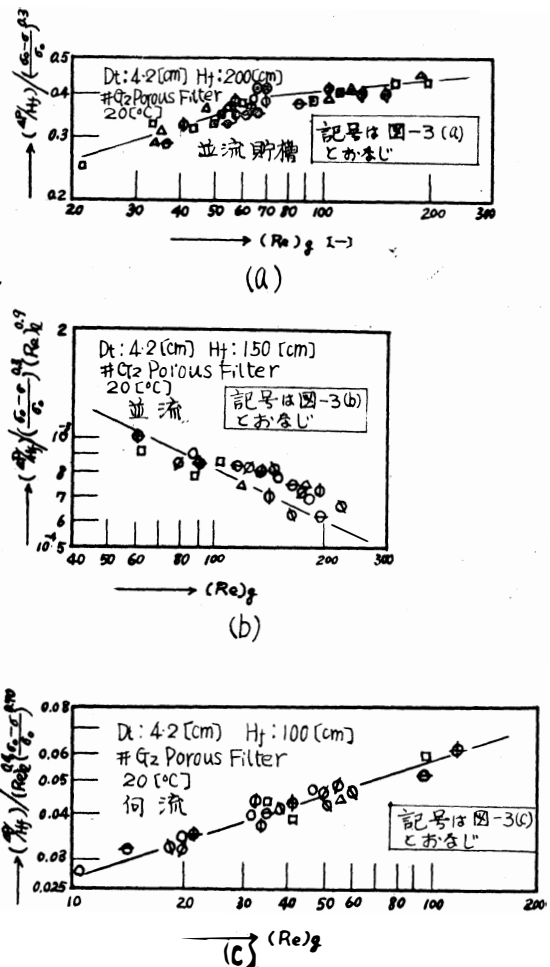


図-4 泡沫層の圧力損失

して泡沫層の損失は小さいが、比較的孔径の大きい単孔ノズルを使用する場合には泡沫層の圧力損失が大きく影響してくる。

4. 泡沫層中の気泡の大きさ

泡沫層を構成する気泡の大きさはノズルの孔径その他によって大小があり同一の孔からつくられた気泡も泡沫層を構成後種々変化して不同となる。泡沫層内の気泡の大きさおよびその分布状態は液ホールドアップ、圧力損失その他泡沫層の特性を左右する重要な因子として考えることができる。

一定の孔径から生成した気泡の大きさについては従来から各種の研究がおこなわれている⁽³⁾。また多孔質濾過板からつくられた気泡の大きさおよび分布状態については若干の研究があり⁽¹⁾いづれもその大きさを予測することが可能である。

泡沫層内の気泡は後述のように変形して本来の球形を保たないでしかも分離会合をおこなって大きさが塔上部に昇るに従って変化する。著者の観察によれば泡沫層高さ H_f における気泡の平均径は $H_f^{0.1-0.2}$ に比例して増大することが確められた。

5. 泡沫層内における気液接触面積

泡沫塔の性能および利用性を調べる時、泡沫層内の気液接触面積の大きさが屢々論議される。いま泡沫層内の気泡と同容積で球状の気泡を考えて且つこの気泡の大きさがすべて一様であると見做し、気液接触面積を a [cm^2/cm^3] で表わすことにする。

気液接触面積 a は次の諸法でもとめることができる。

- a. 泡沫層内の気泡の平均内圧、泡沫層の外圧およびこれらの差即ち過圧をそれぞれ P_i , P_e , ΔP [$\text{cm-H}_2\text{O}$] とし、溶液の表面張力を σ [dyne/cm] とすれば

$$a = 3(P_i - P_e) / 2\sigma = 1.5 \Delta P / \sigma \quad [\text{cm}^2/\text{cm}^3] \quad (12)$$

の式が得られる。

- b. 泡沫層の光学的研究から導かれたものであるが、⁽⁵⁾一定光線の泡沫層内の気泡に対する入射光線の強さおよび反射光線の強さをそれぞれ I_0 , I とすれば

$$a \propto (I_0 / I) - 1 \quad [\text{cm}^2/\text{cm}^3] \quad (13)$$

であらわされる。

- c. 泡沫層内における気泡は最密充填をなしているものと考えれば、⁽⁶⁾これは3個の気泡が 120° の角度を示すが、これに近似的な角度をもつ正12面体（所謂蜂の巣状）の形をなしているものと考えることが妥当である。

いま球状と考えたときの平均気泡径を δ_B [cm]、正12面体をなす気泡の面積および容積を S_b [cm^2]、 V_b [cm^3] とする。また気泡をつくるノズル径 D_n [cm]、泡沫層のガスホールドアップ $\phi_g = 1 - \phi_l$ [-] とすれば

$$S_b \approx 2.32 \delta_B^2 \quad (14)$$

$$V_b \approx 0.39 \delta_B^3 \quad (15)$$

$$\delta_B \approx 0.182 \sqrt[3]{D_n \sigma} \quad (16)$$

であるから

$$a = S_b / (\phi_g V_b) \approx 32 \phi_g / \sqrt[3]{D_n \sigma} \quad [\text{cm}^2/\text{cm}^3] \quad (17)$$

または

$$a \approx 5.95 \phi_g / \delta_B \quad [\text{cm}^2/\text{cm}^3] \quad (18)$$

によってもとめることができる。

気液の物質移動をとり扱かう場合に充填塔では有効接触面積を考えて充填物のもつ全表面積との

割合を調べている。泡沫塔においては気泡の存在する部分の全面積が有効面積として働いている。

§. 考察および結論

泡沫塔の基礎的特性を主として工学的見地から調べた。従来のこの種の研究は単に一種の起泡性溶液、1種のガスのみによっておこなわれたために利用の面が限定され、泡沫層の性質を左右する操作条件も不明であった。

この点において今迄明確でなかった所が若干明らかになった。得たる結果は次のようになる。

1. 泡沫塔を分類して研究および応用面を組織化した。
2. 塔の分類に従って起泡性溶液の特性値と操作条件との関係を限界ガスレイノルズ数、液ホールドアップ、泡沫層の圧力損失などに適用してそれぞれの実用式を得た。これによって泡沫層の性質と塔の構造および操作条件との関係が明らかにされた。
3. 気泡の大きさおよび気液接触面積をもとめる方法をあげた。

文 献

- (1) 福井：日碍レビュー 11.1 (1959)
- (2) Metzner, Brown : I.E. C. 48.2040 (1956)
- (3) 例えば Maier : U.S. Bur, Mines, Bull. 260 (1927)
- (4) Deriagin : Kolloid-Z, 64.1 (1933)
- (5) Ross etal : J.Phys. chem 58.247 (1954)
- (6) Plateau : Ibid. 141.44 (1870)

(昭和36年11月30日受付)