平板濡壁塔の流下液膜の厚みと波立ちについて*

城 塚 正**・本 田 尚 士**・大 畠 洋 一**

§ 1. 概 説

濡壁塔液膜の流動特性についての研究は従来液厚みの測定、ガス吸収速度より逆に推論する方法、向流に流したガスの圧損失などによってなされて来た。液厚みについては多くの研究があるが測定法としてはマイクロメーターによる直接測定法およびホールドアップを測定し、全濡れ面積に割りつける方法がその主なるものであり、比較の変ったものとしては放射性物質の稀薄溶液を流下液としガイガー計数管により放射能を測定して厚みを計算するという方法⁵⁾がみられる。我々の行った電気容量計による測定法は Dukler & Bergelin¹⁾ が理論式とともに示したものの改良法である。この方法は平均的な液厚みだけでなく時間および場所による厚みの変化をつかむことができるという点が秀れている。空気を流した場合の液厚みについては理論的には扱われているが実測値はほとんどえられていない。最近の亀井氏らの報文^{6)・7)}にホールドアップによる結果がみられる程度である。

液膜の表面に生ずる波立ち現象は液厚みやガス吸収速度の理論値と実測値とのずれを論ずる場合に必らず扱われているものである⁸⁾。しかし肉眼的観察あるいは普通写真による観察によって定性的に取扱われている^{11)・12)}だけで、これを数値として表わしたものはない。もちろんこの不規則な波を理論的に取り扱おうとする試みはなされていない。本実験は電気容量計による液厚み測定装置を用いて空気を流した場合の液厚みを測定すること、およびこの装置によるオシロスコープ写真について波打ちを定量的に取扱いガス吸収速度との相関を求めることを目的としてなされたものである。

液厚みについての理論式： Nusselt¹⁰⁾ は層流を仮定した液膜について、つぎのような理論式を誘導した。

$$\Gamma = \frac{m^3 \rho_L^2 g}{3 \mu_L} \quad (1)$$

空気を流した場合、空気-水間の抵抗によって液厚みが変わる。このような場合について Nusselt 式を変型したものがいくつか提出されている。実用になるものとして Lamb の式⁹⁾がある。

$$\Gamma = \frac{m^3 \rho_L^2 g}{3 \mu_L} - \frac{\tau \rho_L g m^3}{2 \mu_L} \quad (2)$$

以上は液が層流の場合であるが混流状態の液膜についても成り立つ式が Dukler & Bergelin¹⁾ によって提出されている。

円管濡壁塔では

$$\eta = \frac{m}{\mu_L} g^{1/2} \left(m \rho_L^2 - \frac{r}{2} \rho_L \frac{dP}{dL} \right)^{1/2} \quad (3)$$

本報の場合は Fig. 1 のような断面の平面濡壁塔として

$$\eta = \frac{m}{\mu_L} g^{1/2} \left(m \rho_L^2 - b \rho_L \frac{dP}{dL} \right)^{1/2} \quad (4)$$

この形は複雑なので計算図表によって液厚を求める。

§ 2. 実験装置

濡壁塔： 全長 140 cm, Fig. 1 のような断面をもつ平面濡壁塔を用いた。液の流下する面は真鍮板より成りこの面を接地して一方の極板とする。他の一面は透明塩化ビニール板で液膜の状態が観察できるようになっている。ヘッドタンクより供給された液は給水棚へ入り、濡壁塔上部より溢流して流下する。溢流の部分は円みをつけて供水棚の水の波動が直接液膜へ伝わらないようにしてある。排水棚へ入った液はギアポンプにより排出または循環させる。

圧取出口は塔の側面に直径 2 mm の穴をあけて銅パイプを取りつけ、ゴム管でチャトック微圧計へ導いた。

電 極 板：

(1) リン青銅線電極 非常に小さい波まで記録させるために用いた。0.3 mm のリン青銅線を液の落下面に接近させて(約 5 mm)とりつけた。線にはガラスの毛細管をかぶせ、これに撥水性樹脂を塗って水滴の附着による誤差をなくした (Fig. 2 A)。

(2) 真鍮板電極 液厚みおよび安定した波打ちを記録するためのものである。Fig. 2 B のようにポリ

Fig. 1 Cross section of column unit in mm

* 昭和 32 年 3 月 9 日受理

** 早稲田大学理工学部

Fig. 2 A Wire electrode

Fig. 2 B Plate electrode

エチレン製の枠に真鍮板をはめこんだもので塔の外側からネジで取り付ける。

電気容量計および付属装置： 使用した電気容量計の回路図は Fig. 3 に示す。Dukler & Bergelin¹⁾の使用した回路では C. I. 発振法を用いていたため、真空管発熱その他によってコイルの膨脹などが起り安定度が不足していたが、この回路では水晶発振法を使用しているため、安定度が良好となった。付属装置として掃引装置はオシロスコープのブラウン管上の点を水平軸上に時間とともに動かすためのものである。オシロスコープは掃引回路を内蔵しているが、一回の掃引時間が最大 1/7~1/10 秒で、液膜の波打ちの周期からみて速すぎるため掃引時間 1/2~3 秒の回路を組立てて使用した。

電気容量計の較正は次のような方法によって行った。電極を固定し、これに濡壁塔の濡れ幅に等しい幅の金属板を向かい合わせ、マイクロメーターにより金属板と電極との距離を変化させる。電気容量計を接続して距離の変化と容量計の読みの変化との関係求めた結果、ほぼ

Fig. 3 Connection diagram of capacitance meter

Fig. 4 A Plot of friction factor f vs. Reynolds number for gas Re_G

Fig. 4 B Plot of friction factor f vs. relative Reynolds number for gas, $Re_G(r)$

直線を示す較正曲線を得た。

§ 3. 実験結果と考察

A. 濡壁塔における空気流れの圧損失： 液と向流に流れる空気の圧損失は濡壁塔における物質移動との相関、液膜表面の波立ち、液厚みの増加などを論ずるために測定されているものである。円管濡壁塔では圧取出口の取り付けが困難であるが、本実験で用いた平面濡壁塔

では水の流れない面に設けることができる。但し液面による圧損失と液の流れていない壁面の圧損失との合計として圧損失が現われるので、空管の場合との比較により補正が必要である。

圧損失をチャック微圧計によって測定し、摩擦係数の形で整理したものを、Fig. 4A また亀井氏ら⁷⁾にならって液に対するガスの相対速度にもとづくガス相対レイノルズ数 $Re_G(r)$ を用いて整理した結果を Fig. 4B にそれぞれ示す。

つぎに圧損失に対する波立ちの影響をみるため、表面活性剤を加えて完全に波立ちをおさえた液膜について測定を行ったものを Fig. 5 に示す。円管濡壁塔によって同様の測定を行った亀井氏⁷⁾の結果と比較してみると濡壁塔では空管の約2倍の圧損失を示すこと、相対速度を用いてもなお空管と一致しないこと、および表面活性剤を加えても影響が現われないことが一致している。しかし亀井氏は水を流した場合の圧損失の増加の原因を疎面度の増加のためとしているが、これらの実験結果からこの説明は否定される。

B. 空気を流した場合の液厚増加： 本実験の実測値との比較のため平面濡壁塔についての Dukler & Berglin の式を次のように変形して使用した。(4) 式より

$$\eta^2 = \frac{m_0^2}{\mu_L^3} m_0 \rho_L^2 g = \frac{m^2}{\mu_L^2} \left(m \rho_L^2 - b \rho_L \frac{dP}{dL} \right) g$$

$$(m - m_0) \left[1 + \frac{m_0}{m} + \left(\frac{m_0}{m} \right)^2 \right] = \frac{b}{\rho_L} \left(\frac{dP}{dL} \right) \quad (5)$$

ここで $m_0/m \approx 1$ とおくと

$$(m - m_0) \approx \frac{b}{3\rho_L} \left(\frac{dP}{dL} \right) \quad (5')$$

同様にして Lamb の (2) 式も変形できる。

$$q = \frac{m_0^3 \rho_L g}{3\mu_L} = \frac{m^3 \rho_L g}{3\mu_L} - \frac{\tau_i g m^2}{2\mu_L}$$

$$(m - m_0) \left[1 + \frac{m_0}{m} + \left(\frac{m_0}{m} \right)^2 \right] = \frac{3}{2\rho_L} \tau_i \quad (6)$$

$m_0/m \approx 1$ において

$$(m - m_0) \approx \frac{1}{2\rho_L} \tau_i \quad (6')$$

τ_i と (dP/dL) との間につきの関係がある。

$$\frac{dP}{dL} = \frac{1}{b} \tau_i \quad (7)$$

ゆえに (6') 式は

$$(m - m_0) \approx \frac{b}{2\rho_L} \left(\frac{dP}{dL} \right) \quad (8)$$

(5') 式および (8) 式において $(m - m_0)$ は空気を流したときの液厚み増加分である。ここで導いた近似式によって整理すると $(m - m_0)$ と (dP/dL) との間に比例関係があり、しかも液流量に無関係な一定の勾配となるため非常に便利である。

電気容量計によって測定した液厚み増加を圧損失に対して点綴したものが Fig. 6 である。二つの理論式において $m_0/m \approx 1$ と近似したための誤差はほぼ斜線の範囲に入るものである。本実験の結果はほぼ Lamb の式と一致し Dukler & Bergelin の式より大きくなっている。二つの式を比較すると Dukler の式は $u^+ y^+$ で表わされた円管内流体の速度分布が濡壁塔液膜にも成り立つとして誘導されているが、空気を流さない場合はともかく、

Fig. 5 Correlation between f and Re_G when there is no wave motion

Fig. 6 Correlation between increment of film thickness and friction

Fig. 7 Oscilloscopic photograph of wave motion

空気を流した場合、この流速分布が保たれているかという点に疑問がある。一方 Lamb の式は空気との摩擦により流速分布が変ってくることを前提として誘導されており、この式の方が合理的であると考えられる。この式は層流仮定のもとに誘導されたものであるが、空気の影響だけを考えるとときには混流の部分まで適用できることが分った。

C. 波立ちによる表面積増加： 液膜表面の波立ちを撮ったオシロスコープ写真について、波立ちによる表面積増加を計算した。得られた写真は Fig. 7A のようなものである。Fig. 7B は同じ条件で撮影した 50 サイクルの交流電圧で波高および波の数を比較して x 軸 y 軸の目盛が決る。 x 軸 y 軸の目盛の比が異っている座標

Fig. 8
Correlation between surface area increment and Re_G , Re_L

の上にある不規則な曲線の実際の長さは測定することができないので曲線の各部の勾配が同一であるとして近似計算を行う。回転走行距離計により曲線の長さを実測して Fig. 7C のように直角三角形の斜辺におく。これは波を同じ勾配をもつ三角波のいくつかに近似したことになる。この方法によって計算した表面積増加率 α [%] を Fig. 8 に示す。

図より明らかなように α [%] の値はきわめて小さい。最高の点でも 0.2% に達していない。濡壁塔を用いたガス吸収あるいは蒸発実験において、波立ちによる気液の接触面積の増加は全く無視してよいことが分る。表面積増加については波長の短いこまかい波の影響が大きいと考えられるので、この実験ではとくに直径 0.3 mm のリン青銅線を電極として用い、さらにこれを液膜に接近させてある。したがって大体波長 0.3 mm 程度以上の細かい波までつかめているはずであるが、表面積増加は 0.2 % 以下にとどまっている。

Fig. 10 Correlations of mean values of wave height with Re_G and Re_L respectively

Fig. 9
Wave profiles on the surface of falling water film, calculated mean film thickness $m=0.385$ mm $Re_L=832$

の中心線からの距離 x を波形図面の n 個の点で測定して次式によって平均波高 [mm] σ を計算した。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum x^2}{n}} \quad [\text{mm}]$$

すなわち σ [mm] は液の中心線からの距離 x の 2 乗の平均値の平方根で“平均的な液面の変動の幅”という意味である。液レイノルズ数 Re_L 、ガスレイノルズ数 Re_G と平均波高 σ [mm] との関係を示す実験結果を Fig. 10 に示す。空気を流さぬ場合 Re_L が 100 附近の層流部すでに波立ちは起っており Re_L とともに大となる。 Re_L が 300 位から波立ちの増加の程度が減少し、擬層流部でこの状態が持続する。さらに Re_L が 1200 位からの混流部に入ると波形はますます不規則となって、波高はかえって減少し始める。この混流部の波立ちの減少は予想に反するが、波と波が打ち消し合い波高の大きい波ができ

にくくなるものと思われる。平均波高 σ を Re_G 、 Re_L の関数として液の流れの層流部、擬層流部に分けて表式化すると次式をうる。

$Re_L = 100 \sim 300$ の範囲内では

$$\sigma [\text{mm}] = 3.42 \times 10^{-5} (Re_G)^{0.64} (Re_L)^{0.52}$$

$Re_L = 300 \sim 1500$ の範囲内で

$$\sigma [\text{mm}] = 2.04 \times 10^{-4} (Re_G)^{0.64} (Re_L)^{0.18}$$

D. 波立ちと Re_L 、 Re_G と

の関係： Fig. 9 に波立ちのオシロスコープ写真の一例と理論式より計算した液厚みとを比較して示した。この図から明らかなように波の高さは相当大きく、波による液の流れの乱れも相当起っていることが分る。特にガスレイノルズ数 Re_G の大きい時には液膜の底まで達している。

波立ちの程度を数値化するにあたって波が非常に不規則なためはっきりした波高がつかめなため統計学における標準偏差の考えを用いて、液

Fig. 11 Influence of surface tension on wave height

E. 波立ちと表面張力との関係： 濡壁塔の流下液膜の液体に表面活性剤を加えて、表面張力を下げていくと波立ちは減少し遂には全く波立ちのない液膜となる。

Emmert²⁾ がのべているように濡壁塔のガス吸収速度に気-液の界面張力が関係し、張力の低下によって吸収速度が小になるが、これは波立ちの減少によって吸収速度が小になると思われる。表面張力と波立ちの関係はFig. 11のように実測されたが、表面張力 45 [dyne/cm] 付近から波立ちは急激に減少する。これは液膜表面に単分子層の形成された点を示す。

§ 4. 結 論

1. 濡壁塔における空気流れの圧損失を実測し空管の場合と比較した結果、空管より大きな圧損失を示した。相対速度を用いて整理しても、なお摩擦係数は大きくなる。波打ちによる疎面度の増加はこの場合大きな意味を持たない。

2. 空気を流した場合の液厚について、Lamb 式および Dukler & Bergelin 式を変形して近似式を求め実測値がほぼ Lamb の式に一致することを認めた。

3. 波打ちによる表面積増加についてオッシロスコープ写真より計算した。表面積増加率は最大 0.2% に達せず、ガス吸収速度を考える場合、全く無視してよいことが明らかになった。

4. 平均波高 σ と Re_G , Re_L との関係を求め次式をえた。

$Re_L = 100 \sim 300$ に対し

$$\sigma [\text{mm}] = 3.42 \times 10^{-5} (Re_G)^{0.64} (Re_L)^{0.52}$$

$Re_L = 300 \sim 1500$ に対し

$$\sigma [\text{mm}] = 2.04 \times 10^{-4} (Re_G)^{0.64} (Re_L)^{0.18}$$

5. 表面張力を変じた水-空気系の波打ちは表面張力 45 [dyne/cm] 以下で急激に減少する。

Nomenclature :

- a : width of channel periphery [m]
- b : thickness of channel [m]
- g : gravitational constant [m/hr²]
- m : film thickness [m]
- m_0 : thickness of film outside air flow [m]
- n : number of samplings for wave height measurement
- dp/dL : pressure gradient [m-air/m]
- Re_G : Reynolds number for gas
- Re_L : Reynolds number for liquid
- $Re_{G(r)}$: relative Reynolds number for gas
- r : pipe radius
- u^+ : Karman's universal velocity parameter, dimensionless
- x : wave height as from center line [mm]
- y^+ : Karman's universal distance parameter, dimensionless
- α : percentage of surface area increment [%]
- Γ : liquid flow rate per unit channel periphery [kg/m·hr]
- η : magnitude of the universal distance parameter at the liquid surface [kg/m·hr]
- μ_L : liquid viscosity [kg/m·hr]
- ρ_L : liquid density [kg/m³]
- σ : statistically treated value of wave height [mm]
- τ_i : shear stress at the interface [kg/m]

Literature

- 1) Dukler, A. E. and Bergelin, O. P. : *Chem. Eng. Progress*, 48, 557 (1952)
- 2) Emmert, R. E. and Pigfold, R. L. : *Chem. Eng. Progress*, 50, 87 (1954)
- 3) Fujita, S. : *Chem. Eng. (Japan)* 18, 474 (1954)
- 4) Grimely, S. S. : *Trans. Inst. Chem. Engrs., London*, 23, 228 (1948)
- 5) Jackson, M. L. : *A. I. Ch. E. Journal*, 1, 231 (1955)
- 6) Kamei, S. and Oishi, J. et al : *Chem. Eng. (Japan)* 18, 545 (1954)
- 7) Kamei, S. and Oishi, J. : *Chem. Eng. (Japan)* 18, 421 (1954)
- 8) Kamei, S. et al : *Chem. Eng. (Japan)* 20, 65 (1956)
- 9) Lamb, H. : "*Hydrodynamics*"
- 10) Nusselt, W. : *Z. Ver. Dcut. Ing.*, 60, 541, 569 (1916)

Wave Motion on the Falling Liquid Film in a Wetted-Wall Column of Flat Plate

Tadashi Shiotsuka, Naoshi Honda and Yoichi Ohata*

The thickness of the water film falling on a vertical flat surface with countercurrent air flow was measured by the modified Dukler-Bergelin method using electrical capacitance. At the same time, quantitative data on wave motion on the falling film were obtained by the same technique using oscilloscope photographs. The results obtained are summarized as follows :

(1) Experimental values of increment of film thickness due to countercurrent gas flow agree closely with the values predicted from the modified Lamb equation over laminar and turbulent regions.

(2) The effects of Re_L and Re_G on statistically treated values of wave height are represented by the following equations :

$$\sigma[\text{mm}] = 3.42 \times 10^{-5} (Re_G)^{0.64} (Re_L)^{0.50} \text{ for } Re_L = 100 \text{ to } 300$$

$$\sigma[\text{mm}] = 2.04 \times 10^{-4} (Re_G)^{0.64} (Re_L)^{0.18} \text{ for } Re_L = 300 \text{ to } 1500$$

* Applied Chemistry Department, Waseda University

傾斜マノメーターの使い方について

傾斜マノメーターによる微小圧力測定の場合、液柱として普通の水を使用すると、表面張力の影響によって水柱の動きは圧力の変動に充分追従しない。この傾向は測定圧力が微圧である場合、マノメーター内径の小さい場合（よみやすくなるため内径は小さくすることが多い。）または圧力の変動が時間的に緩慢である場合など特に著しい。

これの対策としてアルコールを使用すれば液柱の追従性は充分よくなるが、等価水柱値への換算が必要なことや、アルコールの比重が漸変する危険などの難点が伴う。

そこで界面活性剤として陰イオン活性剤ラビソ

ール B-80 (Sodium-sulfo di-n-octyl succinate) を容積にして約 0.2% 混入した水を使用して見たところ、実用上水と同じ比重で、追従性も下図のごとく良好であった。圧力の小さい所で点がずれているのは垂直 U 字管のよみの誤差が大きくなるからで、大きい圧力で検定した直線を信用してよいと思う。なおラビソール B-80 は水と混合したときは発泡するが、マノメーター内に入れて静置すれば、やがて泡は消失する。

これから見ても現場で水のみで測定しているデータは信頼性がうすいといえよう。ちょっとおもしろいので紹介した次第である。 (H. I. K.)