

【整番】FE-19-TM-106		【標題】蒸留トレイの液面動揺の可否判別基準について	
分類：流れ(流体振動)／種別：技術メモ		作成年月：H20.7／改訂：Ver0.1(H20.8)	作成者：N.Miyamoto

例題と Fig.8,9 の追加 (H20.8.28)

全 8 枚

## 1. はじめに

石化プラントの蒸留塔や吸収塔のシーブトレイ(多孔トレイ)では、気液の流れが直交して気液混相状態になり、幾つかの特徴的な振動が派生する。ここで扱う“トレイの液面動揺(以下スロッシング)”もそれらの振動現象の一つである。この問題に関して、次の2つの古い文献は、

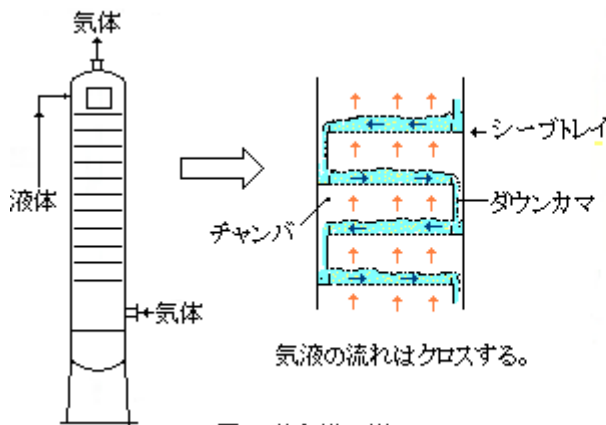
文献(1) “Oscillating Behavior on Distillation Trays” by Biddulph, M. W., and D. J. Stephens

AIChE Journal Vol.20 No.1 (Jan.1974) P60-67

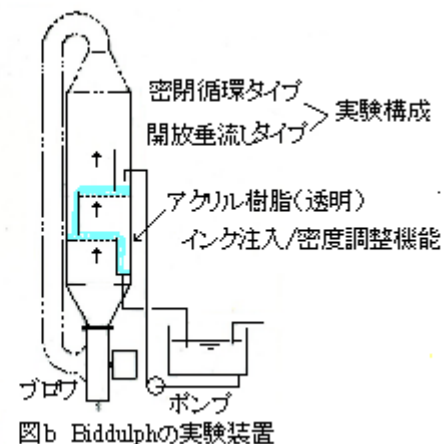
文献(2) “Oscillating Behavior on Distillation Trays- II” by Biddulph, M. W.

AIChE Journal Vol.21 No.1 (Jan.1975) P41-49

理論的というよりむしろ設計的に論じたものではあるが、現実の処方箋としては今もなお有用であると思われる。以下その内容を紹介してみたい。なお翻訳ではなく要点を抜き出し再アレンジしたものである。青字部分は TS 作成者のコメントです。



図a. 蒸留塔の例



図b Biddulphの実験装置

## 2. スロッシングの形態とその状況

蒸留塔のトレイ構造を図aに示す。トレイは多孔円板を梁桁で支えたもので何段にも重なっており、棚段塔とも呼ばれている。液は塔の上部から入ってトレイ上に拡がり、ダウンカマーとよばれる筒から下のトレイに流下してゆく。一方、気体(ガス、ベーパー)は塔の下部から入って各トレイの孔を通して下段から上段に上昇してゆく。気液の接触は、トレイ上の液流れの中を孔から湧き出た気体が横切るときに起きる。この気液接触で各孔の出口には気泡が生成し、間欠的あるいは連続的に液中を横切り気液混層(biphase)状態になる。通常この気液混層は安定しており全体表面は一定に保たれる。しかし気体流速が早くなると、次のように最初 **full-wave モード**、次いで **half-wave モード** の液面動揺が現れる。

### ① full-wave モードスロッシングの初生：

Fig.2にその様子を示す。ある流速に達すると気液混層は液流れにクロスする形で横移動し始め、トレイ中央の盛り上がり(相互衝突)と壁面の盛り上がり(壁との衝突)を反復的に繰り返すようになる。気液混層が中央あるいは壁で衝突すると、盛り上がり面から液滴が水煙となって湧き上がり、滴状流出(以下エントレン)が起きる。また盛り上がり下のトレイ孔からのウィーピング(目孔からの液の流出)が増加する。なお **full-wave モード** 発生流速は **flooding 発生流速** の約 **52%** 程度である。

総じてその周波数は低く 1.2Hz 程度である。

② full-wave から half-wave モードへの遷移：

そのまま気体流速を上げて行くとスロッシングも増長するが、気液混層の横移動はやや乱れ間欠気味に壁が叩かれる。ウィーピングはその途中で 2.5 倍のピークに達し、エントレン量も略 40% 程度に増加する。

③ half-wave モードスロッシングの初生：

更に気体流速が上がりある流速に達すると Fig.3 に示すように、波長が伸びて左右の壁面との衝突が反復して繰り返される。ウィーピングは気体流速が勝って減退するが、エントレンは略 70% 程度に増加する。なお half-wave モード発生流速は flooding 発生流速の約 70% 程度である。周波数は低下して 2/3Hz 程度になる。

④ half-wave モードオーバー：

気体流速が half-wave の初生速度を越えてもスロッシングは収まらず、周波数がややダウンするものの、振動は激化する。

全般的にみて、スロッシングの発生によって気体流れの偏流が起きる。また上下隣接するトレイが異なる位相で揺れているように見え、上段に行くほどそれがひどくなる。

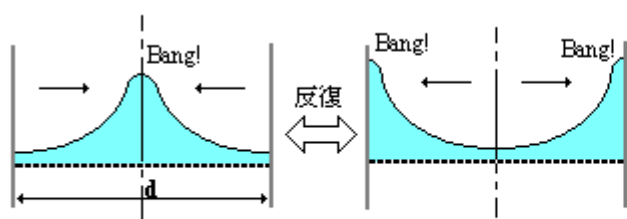


Fig.2 Full-wave oscillation  $L = d$

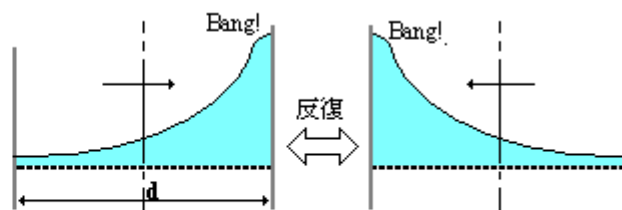


Fig.3 Half-wave oscillation  $L = 2d$

$L$ =波長(音響分野でいう波長の1/2),  $d$ =コラム径(胴径)

### 3. スロッシング発生の可否判定基準

(1) この問題については当初、気柱共鳴説があったが、今では(1974年現在)、乱流攪乱説が採られている。

**Hinze の理論解析**はこの説によるもので、質量保存則と運動量保存則を組み合わせ液高さと圧力の変動を正弦波に仮定することで安定波の波長の式を得ている。ここでは Hinze の理論<sup>(3)</sup>をベースにして、スロッシングが波長/コラム径(塔の胴径)の比がある値(1or2)に達したときに起こるという事実を考慮して、不安定発生の基準としての無次元数(以下、基準数) $B_s$ を作った。なお、この式では Hinze が無視した渦粘度を含めている。

(2) 基準数  $B_s$  とその運用は以下による。

$$B_s = V \varepsilon h_f \rho_g / (g d^3 \rho_L \alpha) \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 $V$ =見掛けの気体流速(m/s)=気体流量/コラム断面積、 $\varepsilon$ =渦粘度( $\text{m}^2/\text{s}$ )、

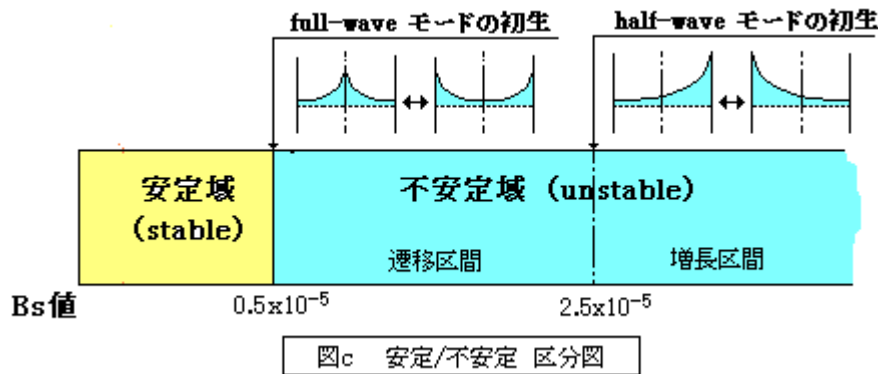
$h_f$ =フロス高さ(≡気液混層高さ)(m)、 $\rho_g$ =気体密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $\rho_L$ =液体密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$g$ =重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ )、 $d$ =コラム径(m)、 $\alpha$ =相対フロス密度= $h_L/h_f$ 、 $h_L$ =清澄液高さ(m)

$B_s < 0.5 \times 10^{-5} \rightarrow$  安定域、 $B_s \geq 0.5 \times 10^{-5} \rightarrow$  不安定域

$B_s = 0.5 \times 10^{-5}$  ----- full-wave モードの初生

$B_s = 2.5 \times 10^{-5}$  ----- half-wave モードの初生



$B_s$  式のうち  $g, d, \rho_L$  はほぼ固定した値を持っているが、 $V, \varepsilon, h_f, \rho_g, \alpha$  は運転によって変化する。気体流速  $V$  は基準数  $B_s$  に最も影響を与える変数である。 $V$  が増えると  $\varepsilon, h_f$  は増加し(後述)、 $\alpha$  が減少して、単なる比例増分以上に  $B_s$  が増加する。

気体密度  $\rho_g$  は、実験範囲内で  $B_s$  に対し特異な影響(例えば  $\varepsilon$  が変化するとか)はなく単に比例関係のみ。

渦粘度  $\varepsilon$  およびフロス高さ  $h_f$  については、次の Barker & Self の式が使用できる。

$$\varepsilon = D_e = 0.0067V^{1.44} + 0.0922h_L - 0.0056$$

$$h_f = 0.0354 + 4.81L_0 + 1.05W + 0.0384V$$

$$h_L = 0.024 + 1.74L_0 + 0.372W - 0.012V$$

ここで  $\varepsilon$  = 渦粘度( $m^2/s$ )、 $D_e$  = 渦拡散度( $m^2/s$ )、 $V$  = 気体流速( $m/s$ )、 $h_L$  = 清澄液高さ( $m$ )

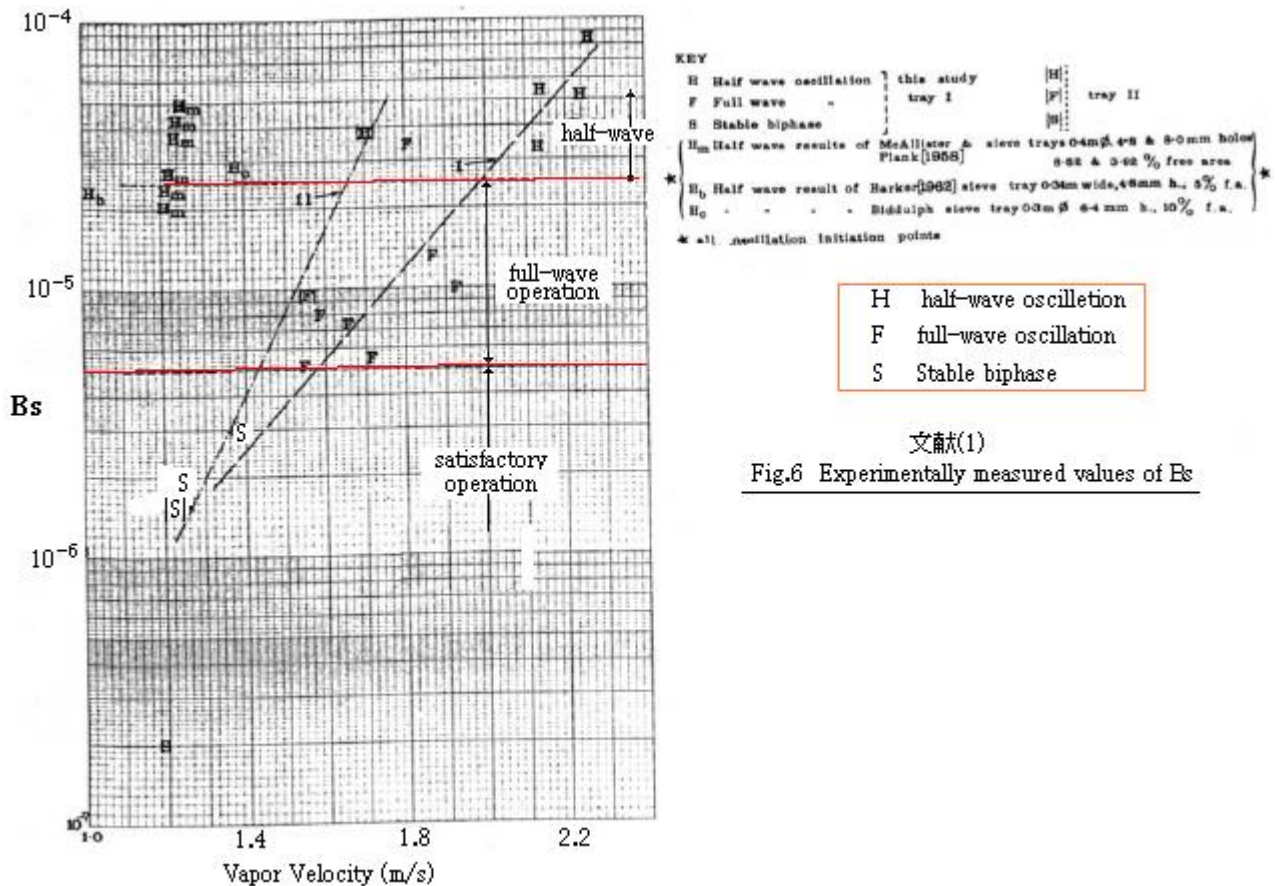
$L_0$  = 液流量( $m^3/s$ )、 $W$  = 堰の高さ( $m$ )、

ここでは渦粘度  $\varepsilon$  は評価が難しいので、渦拡散度  $D_e$  と等しいとしている。これは乱流のシュミット数( $\varepsilon/D_e$ )を 1 としたもの。フロス高さ( $h_f$ )は多分、気液混層の高さで堰高さ  $W$  よりも大きい(なお堰はトレイ上の液面をコントロールするために設置)。【 $L_0$  と  $V$  の単位に注意。式の中では、例えば 4.81 が掛けられ  $4.81L_0$  となることで、 $m^3/s$  から高さ  $m$  のディメンジョンに変換されると考える。】

上記の Barker&Self 式は空気-水系の実験によっているが、空気-水系以外のシステムにも適用できると思われる。ただ、空気-水系以外については下記の文献を用いてもよい。

$h_L$  については Ludwig の文献(1964)／  $h_f$  については Fair の文献(1963)<sup>(4)</sup>と AIChE の式  
なお限界流速ベースの比較では、Barker&Self 式は  $\pm 15\%$  程度の誤差がある。

[文献の計算結果を調べたが、Baker & Self 式が何故か合わない。運用に当たっては 25～50% 程度のマージンを考える必要があると思う]。



文献(1)  
Fig.6 Experimentally measured values of  $B_s$

#### 4. 関連パラメータがスロッシングに及ぼす影響

スロッシングの可否判定基準に関連すると思われるパラメータについてのスタディ結果は次の通り。

0.79～1.8 kg/m<sup>3</sup>の範囲の気体密度  $\rho_g$  について：

- 密度の如何によらず、スロッシングの発生は変わらない( 図 4 参照 )。
- この密度範囲内では、問題なく  $B_s$  による可否判定基準は成立する。
- 気体密度  $\rho_g$  は渦拡散  $D_e$  に余り影響しない。Baker & Self 式は使用できる。

小さい目孔径について：

- 小さい目孔径(1.75, 3mm)でも、スロッシングの発生は同じ。
- 小さい目孔径では、back mixing がやや少なくトレイ効率がよくなる。これは孔径の小さい大径シーブトレイでトレイ効率が良くなる事実と合う。
- 小さな目孔径でも  $B_s$  による可否判定基準は成立する。即ち  $\phi$  1.75～6.4 の目孔範囲では基準数  $B_s$  は目孔径に依らない( 図 7)。

負圧運転条件について：

- 大気圧以上で運転される 1m 径以上のコラムではスロッシングが起きないと云われているが、負圧運転の 1.5m 径のコラムではスロッシングが起きると云われている。
- 程々の負圧条件で運転されているコラムではガス流速は例えば 3m/s と早くなっている。従って  $\rho_g$  の減少よりも  $V$  の増加の影響が強く  $B_s$  値はアップする傾向になる。これが負圧条件下でスロッシングが著しくなる原因と思われる。従って  $B_s$  による可否判定基準は負圧条件でも成立する見込みがあるが、更に実験で確認する必要がある。

その他パラメータについて：

トレイ間隔、トレイ開口比、堰高さ、液流量などはスロッシング発生に目立った影響を与えない。

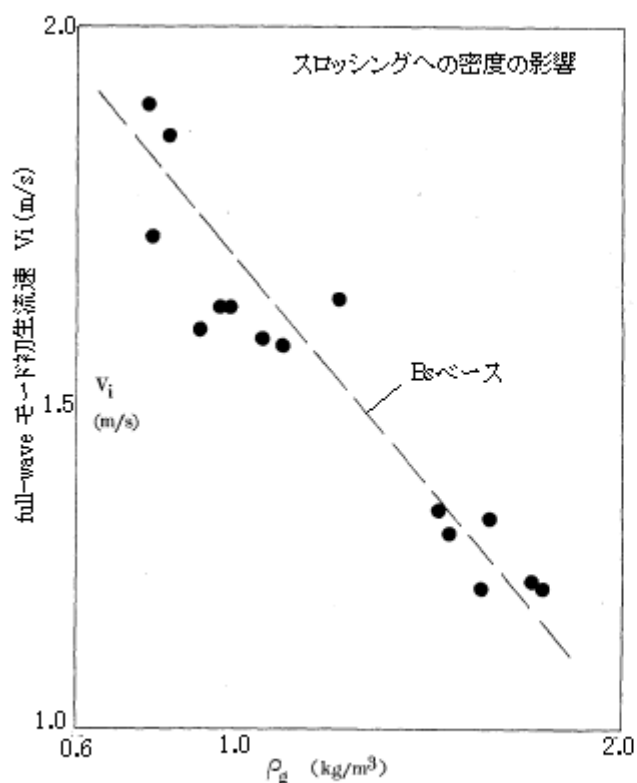


Fig.4 Dependence of full wave oscillation velocity on gas density  
文献(2)

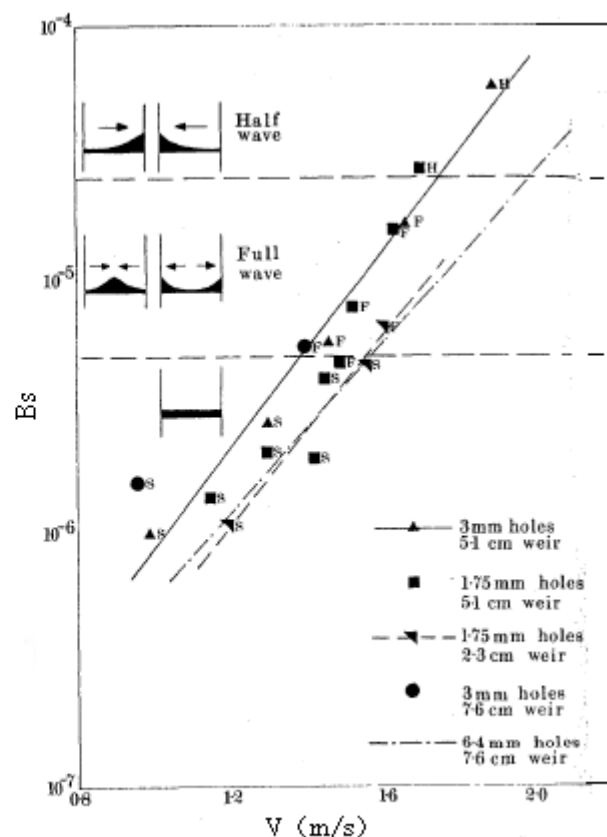


Fig.7 Bs value for various trays (孔径とBsの関係)  
文献(2)

## 5. スロッシングによる性能低下

スロッシングによって液面動揺すると、エントレン/ウィーピングが増加して性能がダウンするとともに flooding の発生タイミングが早くなる。

エントレンについて：

- Fig.4、5 のように full-wave→half-wave へとエントレン量は急増する。許容レベルを 0.05 kg/kg (気体流量当たりの滴状流出量)とすれば、full-wave モードではまだ許容以下であるが、half-wave モードでは許容を越える。
- flooding 限界以下で設計されたコラムではスロッシングによるエントレンの加増で flooding 量がオーバーすることになる。
- トレイ間隔が短いとアップする傾向がある。またバッフルがあるとエントレン量がダウンする。

ウィーピングについて：

- ウィーピングは、動揺するピーク液面の下で局部的におきる。
- Fig.8 のように、full-wave モードになるとウィーピングは急増し half-wave モードに至るまでにピークに達し、その後は気体流速が上がって局部ウィーピングが抑制されるためダウンしてゆく。
- 一方、気体流速が 0.8m/s 程度以下では、液はトレイから漏れ落ちてしまう (いわゆるダンプアウト)。
- バッフルがあるとウィーピング量がダウンする。ただ安定した気液混層ではバッフルの効果はなくウィーピング量は減らない。

back mixing について：



- back mixing の発生範囲は気体密度によらない。
  - Full-wave モードが起きても back mixing は増加しないこと。
- [back mixing があるとトレイ効率が低下する。]

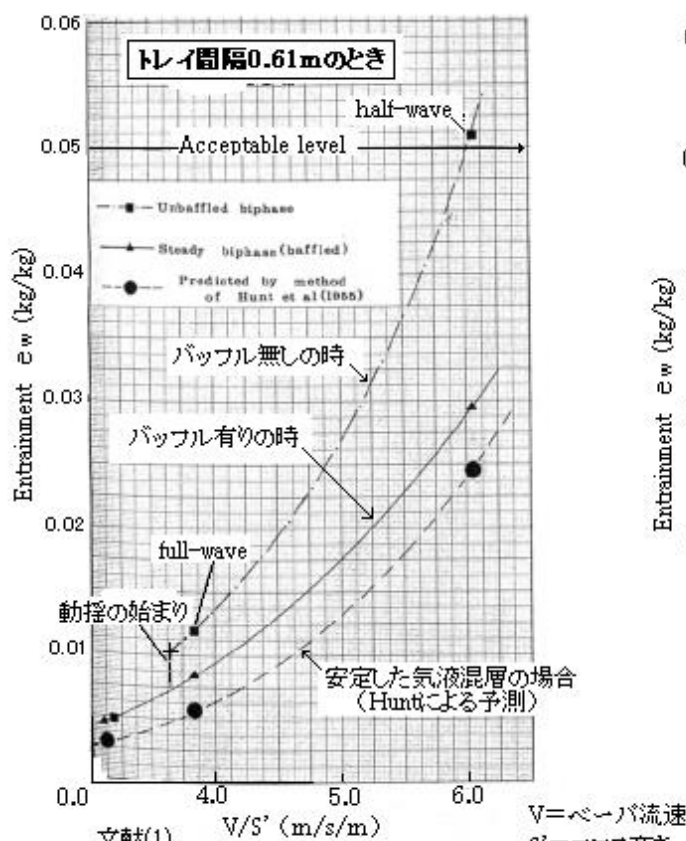


Fig.4 Effects of oscillation on entrainment

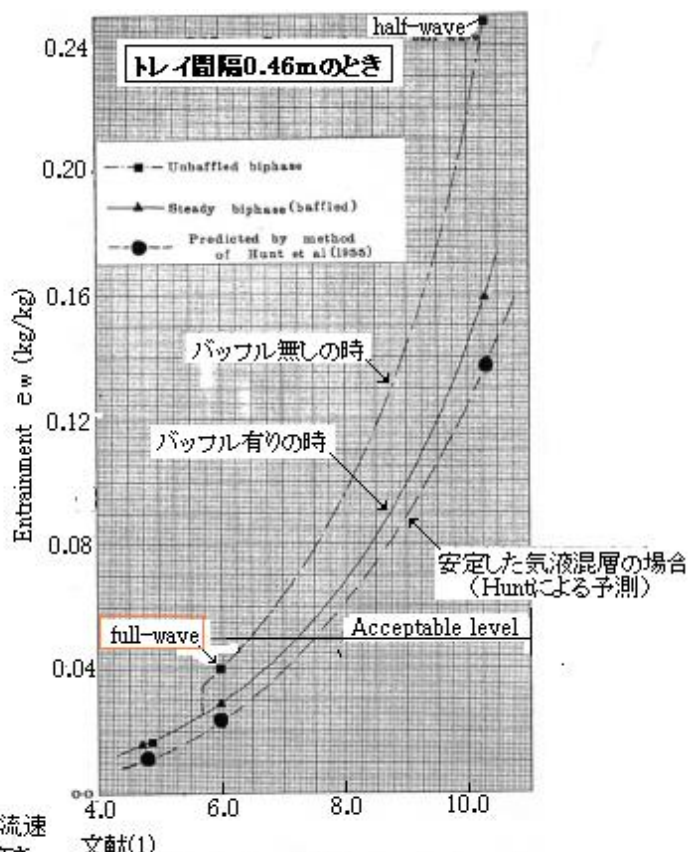


Fig.5 Effects of oscillation on entrainment

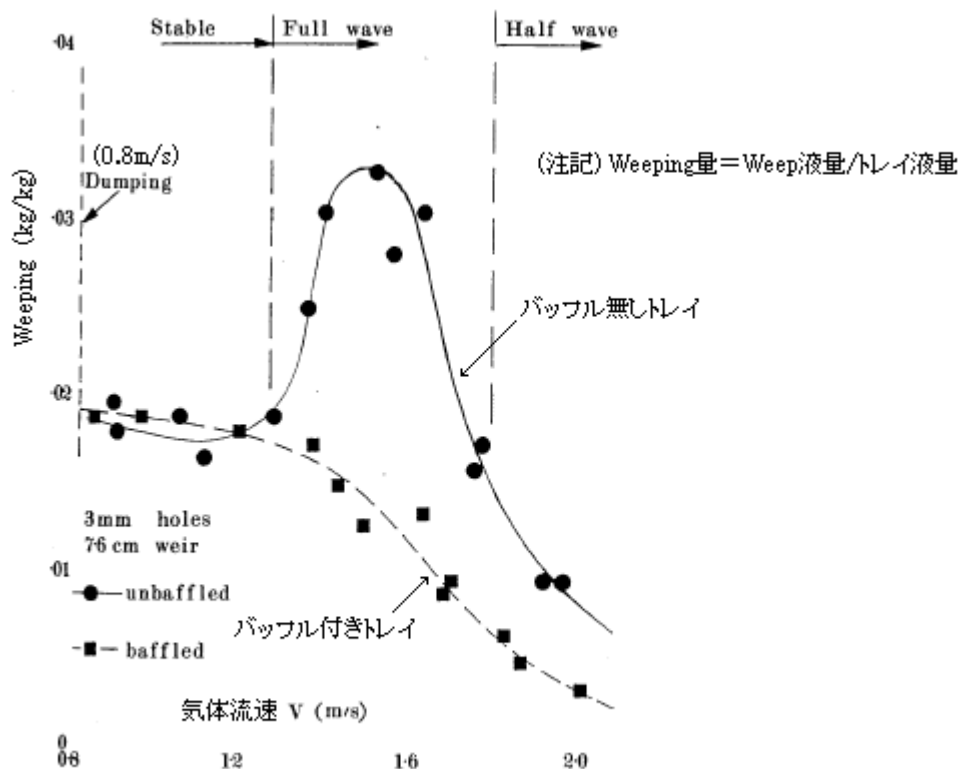
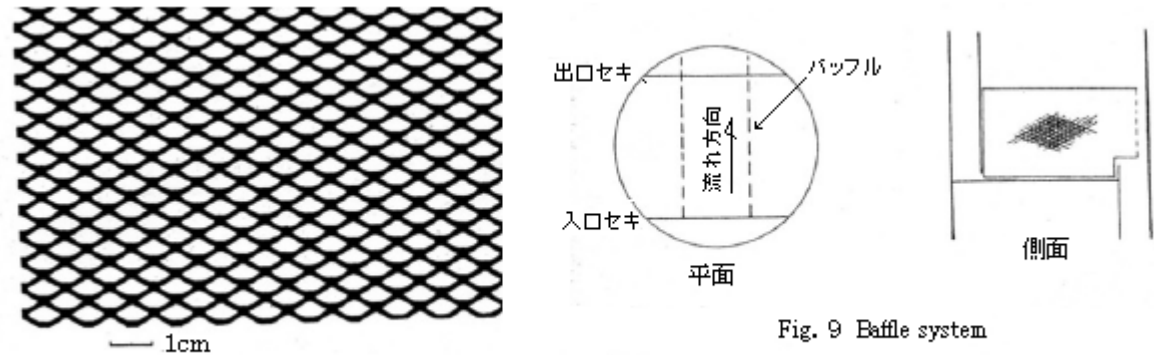


Fig.8 Effect of oscillation on weeping

## 6. スロッシングの防止

スロッシングは、液面動揺に直交する方向(液流れ方向)にバッフルを設置することで防止できる。half-wave モードに対してはトレイの中央にバッフルを設ければよいが、full-wave モードに対しては効かないので、Fig.9 のように2つのバッフルを設ける必要がある。バッフルの高さはフロス高さ( $h_f$ )と同程度。孔明きのないソリッドバッフルでは壁になって衝突反射を起こすので、開口面積比 55%程度 of エキスパンドメタルで作られたバッフルを用いる。このバッフルの設置で気液混層はかなり高い気体流速まで安定する。



文献(1) Fig.8 baffle material (エキスパンドメタル)

Fig. 9 Baffle system  
文献(1)

## 7. 基準数 $B_s$ を用いた可否判定基準の背景となる実験の範囲

Biddulph 提案の基準数  $B_s$  による可否判定は、それなりに広い範囲で成立し得ると思われるが、一応安全側には Biddulph の行った下記の実験範囲で根拠があるということになる。

気体流速  $V$  : 0.8~2.3m/s、 気体密度  $\rho_g$  : 0.79~1.8 kg/m<sup>3</sup>

コラム(胴)径 :  $\phi$  0.69m、目孔径 :  $\phi$  1.75~ $\phi$  6.35mm、セキ高さ : 2.3~7.6 cm

トレイ開口率 : 5~13%、液流量 : 20~65x10<sup>-4</sup>m<sup>3</sup>/s

後書き : ここで述べられる Biddulph の提案は、何らかの形で AIChE や API などに取り込まれているような気がする。要調査。

## 8. サンプル計算

コラム径 850mm、見掛け気体流速 1.8m/s、液流量 19.8x10<sup>-4</sup>m<sup>3</sup>/s、セキ高さ  $W=2.54$ cm の時の液面動揺の可否をチェックする。なお気体密度 1.2 kg/m<sup>3</sup>、液密度 1000kg/m<sup>3</sup> とする。

$$\begin{aligned} \text{清澄液高さ : } h_L &= 0.024 + 1.74L_0 + 0.372W - 0.012V \\ &= 0.024 + 1.74 \times 19.8 \times 10^{-4} + 0.372 \times 0.0254 - 0.012 \times 1.8 = 0.0153 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{フロス高さ : } h_f &= 0.0354 + 4.81L_0 + 1.05W + 0.0384V \\ &= 0.0354 + 4.81 \times 19.8 \times 10^{-4} + 1.05 \times 0.0254 + 0.0384 \times 1.8 = 0.1407 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon = D_e &= 0.0067V^{1.44} + 0.0922h_L - 0.0056 \\ &= 0.0067 \times 1.8^{1.44} + 0.0922 \times 0.0153 - 0.0056 = 0.0114 \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

$$\text{相対フロス密度 : } \alpha = h_L/h_f = 0.0153/0.1407 = 0.1087$$

$$\begin{aligned}
& \text{よって } B_s = V \varepsilon h_f \rho_g / (g d^3 \rho_L \alpha) \\
& = 1.8 \times 0.0114 \times 0.1407 \times 1.2 / (9.807 \times 0.85^3 \times 1000 \times 0.1087) \\
& = 3.465 \times 10^{-3} / 655 = 0.53 \times 10^{-5} > 0.5 \times 10^{-5}
\end{aligned}$$

従って full-wave モードの液面動揺が起きる可能性がある。

#### 引用文献)

- (1) “Oscillating Behavior on Distillation Trays” by Biddulph, M. W., and D. J. Stephens  
AIChE Journal Vol.20 No.1 (Jan.1974) P60-67
- (2) “Oscillating Behavior on Distillation Trays- II” by Biddulph, M. W.  
AIChE Journal Vol.21 No.1 (Jan.1975) P41-49
- (3) 「Oscillations of a Gas/Liquid Mixture on a Sieve Plate」 Hinze, J.R.,  
Symp. on two-phase Flow F-101, University of Exeter, U.K (1965)
- (4) 「Design of Equilibrium Stage Process」 Fair, J.R  
(B. D. Smith(Editor) P545 McGraw-hill, New York 1963)