U. D. C. 66.048

# 化学プラント用蒸留塔の最近の進歩

## Recent Advance of Distillation Column for Chemical Plants

橋　本　尚　人*
Naoto Hashimoto

要　　旨

化学工業用の蒸留塔として最近使用され始めた各種トレーの特性を概説した。特に日立製作所で最近開発した無せき多孔板トレーと，従来やや軽視される傾向にあった多孔板トレーについて，トレーダイナミックスの観点よりやや詳細に説明した。次にこれらの各種トレーの比較を試み，同一設計条件において価格を比較した結果，無せき多孔板トレーがいちばん安価なことがわかった。最後に参考文献をできる限り多数引用して，さらに詳しく調査する際の便に供した。

## 1. 緒　　言

化学工業用装置に占める蒸留塔の位置はきわめて大きく，その研究，開発，改良は絶えず続けられている。日立製作所においても最近の数年間は特に無せき多孔板トレーを中心とする多孔板トレーの実用化に力を注ぎ，相当な成果をあげてきている。

蒸留塔の研究開発の分野には次の4項目が考えられる。

（1） 気液平衡関係の測定，推算。

（2） 所要理論段数の計算法。

（3） トレー上の流動状態，圧力損失およびこれらと段効率の関連。

（4） 装置の動特性を含む制御方法の研究。

これらのうち第3項のいわゆるトレーダイナミックスは，最近各種のトレーが開発されるに従いきわめて定量的な研究が進み，大いに進歩した分野であり，また実際の設計に当たってはいちばん重要な事がらである。本稿は各種のトレーを，主としてトレーダイナミックスの観点より概説し，次に多孔板トレーおよび無せき多孔板トレーについてやや詳細に述べ，最後にこれらの各種トレーの比較に触れることにする。なお充てん塔は蒸留塔の重要な分野であるが，今回は触れないことにする。

## 2. 各種トレーの概説

### 2.1 概　　論

蒸留の操作が連続化されるようになったのは19世紀後半で，最初は充てん塔が用いられたがしだいにたな段塔が使用されるようになり，19世紀末に泡鐘塔が発明されるに及び，その使いやすさのためたな段塔の代名詞となるほど普及した。しかし1950年ごろより特に石油精製，石油化学の分野においてしだいに大容量のプラントが建設され始め，大形の蒸留塔を安価に造ることが要求されるようになり，種々の新しい形のトレーが考案され，実用化されてきた。一方多孔板トレーは泡鐘塔が発明される以前よりすでに実用化されていたが，そのやや使いがたさのため泡鐘塔におされて普及が伸び悩んでいた。しかし大形のものが安価にできるという特長が魅力となり，最近再び見直されてきている。これらはいずれも液降下管を有する十字流形であるが，液降下管のない向流形トレーも古くから考案されており，最近は大形化が容易で安価な特長により実用性が認められてきた。理在実用化されているトレーはだいだい以上の3種が基本となっていると考えられる。

### 2.2 各種トレーの分類

（1） 構造上の分類

（a） 十　字　流　形（液降下管があるもの）

泡鐘塔，改良泡鐘塔（Uniflux，Monz）

多孔板トレー，改良多孔板トレー（Jet）

バルブトレー（Float-Valve，Flexitray，Ballast）

そ　の　他（Kaskade）

（b） 向　流　形（液降下管がないもの）

格　子　形（Turbogrid，Kittel）

多　孔　板　形（Ripple，無せき多孔板）

濡　壁　形（Max Leva）

（2） 性能上より見た分類

（a） 泡鐘塔とほぼ同程度の性能を有し，構造を簡易化したものUniflux，Monz

（b） 構造を思い切って簡易化し，価格の大幅な低減を目的としたもの（性能的には多少劣る面もある）

Turbogrid，Ripple，無せき多孔板，Jet

（c） 性能上にある特長をもたせたもの（たとえば圧力損失がきわめて小さいなど）

Kaskade，Kittel，Max Leva

（d） 操作範囲の拡大を目的とし，合わせて構造の簡易化をはかったもの

バルブトレー類（Float-Valve）

### 2.3 各種トレーの構造と特長

各種トレーの比較を主体にした総説が多数あり[5][6][8][10][18][36]，また各トレーにつき評論した文献も多く出ているので，ここでは概略を表1および図1に示すことに止める。

## 3. 多孔板トレー

### 3.1 概　　論

多孔板トレーは気液の流動状況が泡鐘塔より複雑なためその解析がおくれ，最近になってようやく定量的な解明が行なわれるようになった。このトレーは構造が簡単で価格が安く，性能的にもすぐれた点を多く持っているが，一方では安定操作範囲が狭く目詰りが起こりやすい欠点があるとされ，泡鐘塔に比べ普及が著しくおくれた。しかし最近の研究によればこれらの欠点のうちのあるものは是正され，あるものは認識の誤りであったことが解明され，正しく設計された多孔板トレーは他の形式のトレーと同様に十分安定した操作が可能となったので，その使用範囲が著しく拡大されてきた。以下主として泡鐘塔との比較において多孔板トレーの特性を述べる。

### 3.2 構　　造

トレーの構造はよく知られているように，液降下管を有する多孔板であって，その孔径，ピッチ，開口比（空塔断面積と孔面積との比）などの選択が性能を大きく左右する。孔径は従来3 mm前後が常用されてきたが，最近ではしだいに大きくなり，最高は50 mm,

* 日立製作所笠戸工場

表1　各　種　ト　レ　ー　の　一　覧　表

| No. | 種別 | 名称 | 特長 構造 | 特長 性能 | 開発した会社 | 国内における提携会社 | 特許 国外 | 特許 国内 | 主要文献 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 十字流形トレー（バルブトレー） | FLOAT-VALVE TRAY | 長方形開口部に可動ふたを取り付けた。ふたは一方が重くなっており，蒸気負荷により一方より開き始める。 | 操作範囲が広い。処理能力が大。圧力損失は普通。効率はほぼ同程度。 | I. Earl Nutter（アメリカ）(1951) | 株式会社藤永田造船所 (1963) | アメリカ | 38-12512 | (13) |
| 2 | | FLEXI-TRAY | 円形開口部に重さの異なる2種のふたを取り付けた。 | 操作範囲が広い。処理能力が大。圧力損失は普通。効率はほぼ同程度。 | Koch Eng. Co.（アメリカ）(1953) | 日本揮発油株式会社 (1963) | 不明 | なし | バルブトレー (25) (29) フレキシトレー (31) (32) (34) |
| 3 | | BALLAST TRAY | FLEXI TRAY とほぼ同様 | 操作範囲が広い。処理能力が大。圧力損失は普通。効率はほぼ同程度。 | Fritz W. Glitsch & Sons Inc.（アメリカ）(1951) | 千代田化工建設株式会社 (1962) | アメリカ | 35-18722 38-25964 39- 2216 | (2) (20) (30) |
| 4 | | UNIFLUX-TRAY | S形メンバーを組み合わせた長形の泡鐘板。 | 泡鐘塔とほぼ同程度。 | Socony Mobil Oil Co.（アメリカ）(1950) | 三井造船株式会社 (1963) | アメリカ | 不明 | (22) (23) |
| 5 | | MONZ TRAY or THORMANN TRAY | 泡鐘のキヤップの代わりにU字形メンバーを使用した長形の泡鐘 | 泡鐘塔とほぼ同程度。 | Fa. J. Montz（ドイツ）(1958) | なし | ドイツ M37451 IV c/12 a M37992 IV c/12 a (1961) | 不明 | (28) |
| 6 | | JET TRAY | たな板の一部をU字に切り取って，その部分を上方に折曲げた多孔板の変形。 | 文献がなく詳細不明であるが，著者らの実験では多孔板と大差ない。 | Esso Reseach & Eng Co.（アメリカ）(1952) | 千代田化工建設株式会社(1960) 三井造船株式会社 (1963) | アメリカ | 208925 (昭 29-7-26) | なし |
| 7 | | KASKADE TRAY | 細長い傾斜したS形メンバーを階段的に組み合わせたもの。 | 圧力損失が小さく，減圧蒸留に適している。 | Koch Eng. Co.（アメリカ）(1943) | なし | U. S. P. 2401569 (1946) | なし | (7) (35) |
| 8 | 向流形トレー | TURBOGRID TRAY | 平形のバーを平行に並べ，あるいは水平板を打抜いてトレイ面に細長いスリットを形成させた物。 | 処理能力が大。圧力損失はやや小さい。操作範囲が狭いと言われる。 | Shell Development Co.（アメリカ）(1951 ごろ) | なし | 不明 | なし | (19) |
| 9 | | RIPPLE TRAY | 多孔板を波形に成形したもの。 | 処理能力が大。圧力損失はやや小さい。操作範囲が狭いと言われる。 | Stone & Webster Eng. Co.（アメリカ）(1946) | なし | U. S. P. 2767967 (1956) | 35-3769 | (3) (12) (21) |
| 10 | | 無せき多孔板 (DUAL-FLOW TRAY) | 液降下管のない多孔板 | 処理能力が大。圧力損失はやや小さい。操作範囲は必ずしも狭くない。 | 日立製作所 (1960) F. R. I.（アメリカ）(1960) | 日立製作所 (F. R. I. に加入) (1965) | 不明 | 38-2971 38-2972 | (11) (24) (30 a) |
| 11 | | KITTEL TRAY | 平板に傾斜したスリットを設け，ガスの吹出により液に遠心力を与える。 | 多孔板と同程度あるいはそれ以上と言われる。 | W. Kittel（オーストリヤ）(1958 ごろ) | 不明 | オーストリヤ | 36- 72 39-2227 | (27) (33) |
| 12 | | MAX LEVA TRAY | 短い多管式濡壁を多段に重ねたもの。 | 不明であるが，圧力損失が小さいので減圧蒸留に適していると考えられる。 | Max Leva（アメリカ）(1958) | 千代田化工建設株式会社 (1964) | アメリカ | 291181 (昭36) | なし |

通常 12 mm 程度が使用され，一方特殊な目的のためには 0.8 mm の小さなものも使用されている。開口比は液と蒸気の負荷に影響するいちばん重要な因子で，5～15% 程度が普通である。トレーの板厚は主として機械的強度より決定され，薄いものでは 0.8 mm，通常 3～6 mm 程度である。

### 3.3 圧　力　損　失

多孔板トレーの圧力損失は一般に次式で示される。

$$\Delta p = \Delta p_d + \Delta p_h + \Delta p_\sigma$$

ここに，$\Delta p_d$：　乾き圧力損失（液が流れないときの圧力損失）

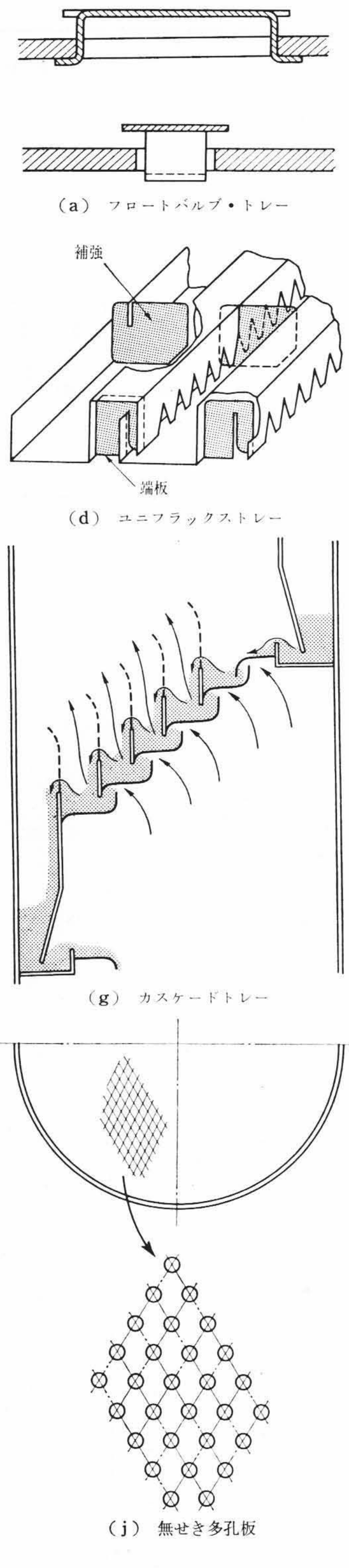
$\Delta p_h$：　湿り圧力損失（トレー上の滞留による圧力損失）

$\Delta p_\sigma$：　液の表面張力による圧力損失

$\Delta p_d$ は多孔板を蒸気が通過する場合の圧力損失で，孔のオリフィス係数を知れば容易に求まる。$\Delta p_\sigma$ は孔径と液の表面張力より求まるが，全圧力損失に占める割合はわずかである。$\Delta p_h$ はトレー上の液滞留量（ほぼ出口せきの高さに等しい）に比例する価であり，全圧力損失に対し支配的である。液滞留量すなわちせき高さは一方では段効率を支配する重要な因子であり，あまり小さくすることはできない。一般には 20～50 mm，減圧蒸留などで特に圧力損失が制限される場合でも 10 mm は必要である。**図2** は孔径が 3 mm 前後，せき高さが 20～25 mm，開口比が 8% 付近の多孔板トレーの圧力損失を種々な文献[4][16][17]および著者の実験値より引用したもので，物質系や操作圧力が違ってもかなりよく一致していることがわかる。

泡鐘塔との比較は種々な条件が考えられるのでなかなか困難であるが，定性的には次のことが言える。

（1）　多孔板トレーのせき高さと泡鐘塔の静止くぐり深さを同一にとれば，$\Delta p_h$ はほぼ同一になる。またこれがほぼ同一の




（a） フロートバルブ・トレー
（b） フレキシトレー
（c） バウストトレー
（d） ユニフラックストレー
（e） モンツトレー
（f） ジェットトレー
（g） カスケードトレー
（h） ターボクリッドトレー
（i） リップルトレー
（j） 無せき多孔板
（k） キットルトレー
（l） マックスレバトレー

図1　各種トレーの構造

段効率を与える条件ともなる。

（2） $\Delta p_d$ は蒸気流速の遅い所では両者はほとんど差が出ないが，流速の速い所では単なる円孔を蒸気が通過する多孔板と，複雑な通路を有する泡鐘内を通過する場合とでは，はるかに後者が大きくなる。この差は蒸気速度が大きくなる減圧蒸留では特に著しい。

図3は特に多孔板トレーと泡鐘塔との比較実験を行なった文献[14]より引用したもので，両者にくぐり深さの差があるが上記の特性がよく現われている。

### 3.4 段　効　率

トレーの構造，物質系の性質，操作条件などより段効率を推算しようとする試みは，泡鐘塔と同様多孔板トレーにおいても多くなされているが，いまだ推算式のみで十分な設計ができる段階には達していない。図4は図2で示したのとほぼ同様な条件における段効率の実測値であるが，圧力損失の場合に比べて物質系の影響がかなりはっきり現われて，相当値がバラついている。アルコール～水系よりも炭化水素系のほうが効率が低くなる傾向にある。

図5は特に泡鐘塔との比較のために行なわれた実験より引用した両者の段効率の実測値であるが，多孔板トレーはその最も良い条件の所では泡鐘塔よりすぐれた効率を示している。文献[16]の例では蒸気流量の大なる所で泡鐘塔より早く効率が低下しているが，これは段間隔が泡鐘塔の200 mmに対し150 mmしかなく，飛沫同伴の

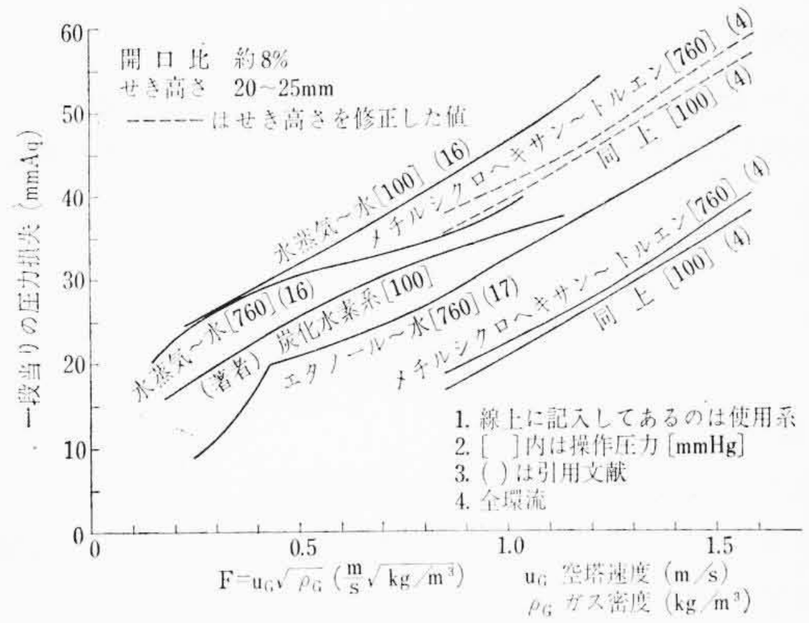



図2　多孔板トレーの圧力損失

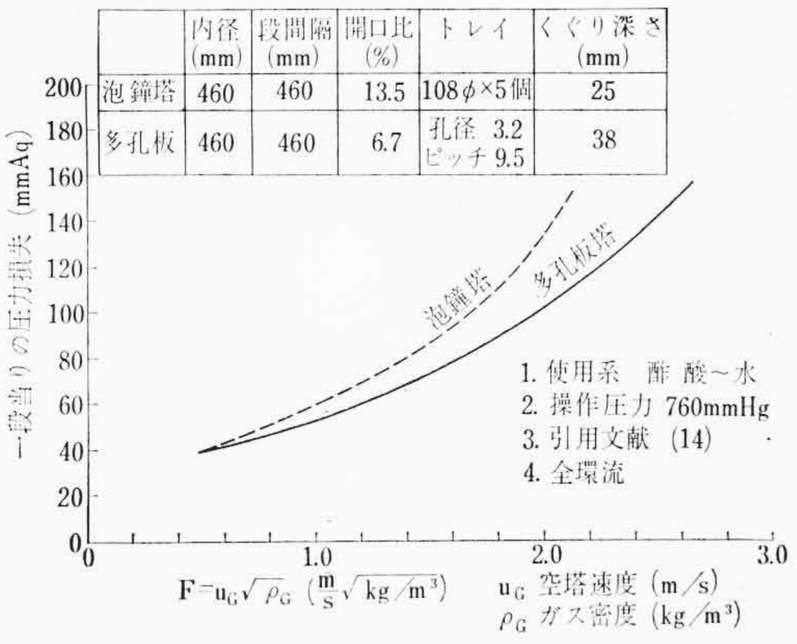



図3　多孔板トレーと泡鐘塔の圧力損失の比較

影響が早く現われたものと考えられる。図4, 5の値より見て，概括的には多孔板トレーの段効率は泡鐘塔とほぼ同程度ないしはややすぐれていると考えてさしつかえない。アメリカ化学工学協会の効率の推算式[1]は，泡鐘塔を主体にして実験を行なったものであるが，これをそのまま多孔板トレーにも適用しているのは，両者にほとんど差のないことを認めているためであろう。

### 3.5 操作範囲

トレーの操作範囲とは，通常かなり高い効率が安定して得られる液，ガスの流量範囲を指している。多孔板トレーは一般に操作範囲が狭いといわれているが，これは一種の偏見であって，概論で述べたようによく設計された多孔板トレーは泡鐘塔にさほど劣らない広い操作範囲を有する。たとえば図5の文献[14]において効率60%以上が得られるF因子の範囲は，泡鐘塔において0.5~2.1，多孔板において0.6~2.0でほとんど差がない。また図4の文献[17]の例において効率70%以上を示すF因子は0.2~1.35で，この場合の操作限界比は6.8に達する。一般的には多孔板トレーの操作限界比は3.3~4であり，最大容量の25~30%の減量運転も十分可能である。通例操作範囲の下限は漏れ現象(weeping)により制限されるといわれるが，実際には weeping が生じてもトレー上に液が滞留している限りは効率は急激に低下せず，十分操作は可能なので，操作範囲の下限は効率が急激に低下し始める点 (dumping point) により規定するのが正確である。図6は多孔板トレーの Capacity Graph であるが，これには weeping line と並んで dumping line が記入してあり，操作の下限を示している。図6には泡鐘塔の Cappity Graph も示してあるが，この図に示すように多孔板トレーは液量の少ない所での最小蒸気量がやや泡鐘塔に劣るほかは，全体の操作範囲としてはむしろまさっているといえよう。なお図6の Capacity Graph は実際の例に従って計算したもので，その基本条件は図2に示すとおりである。計算結果（精留塔の仕様その他）は表4に示してある。

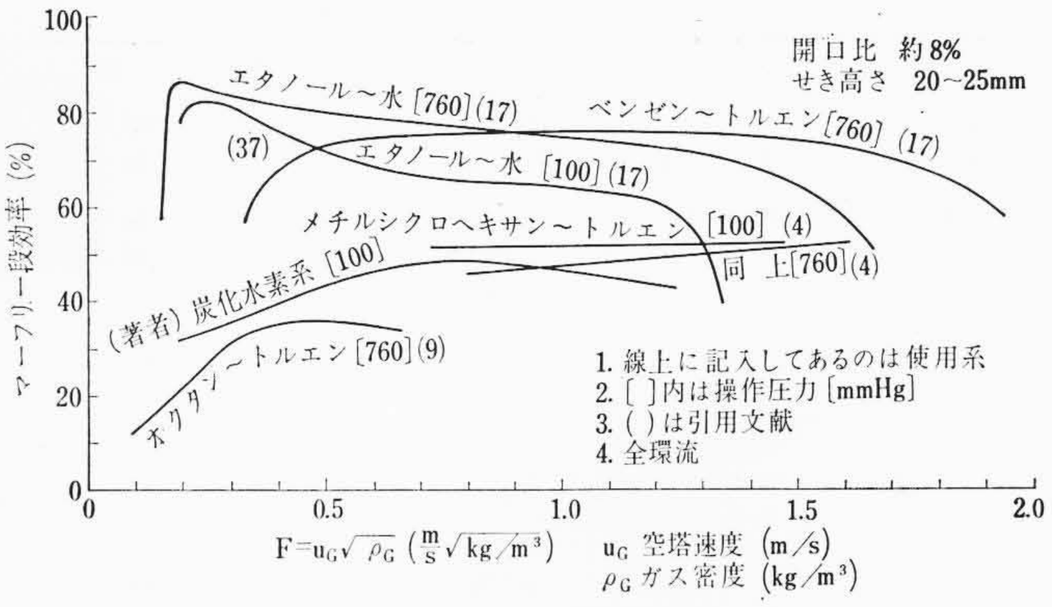



図4　多孔板トレーの段効率

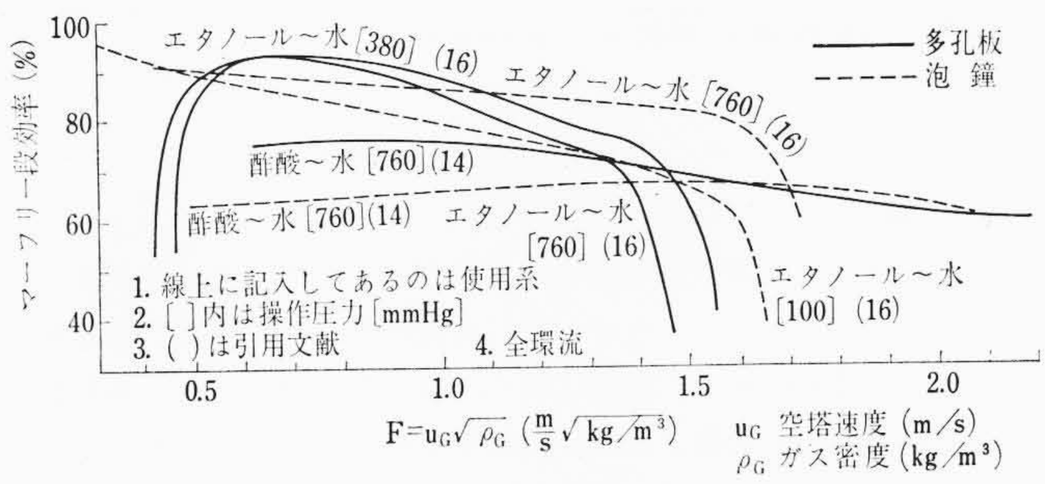



図5　多孔板トレーと泡鐘塔の段効率の比較

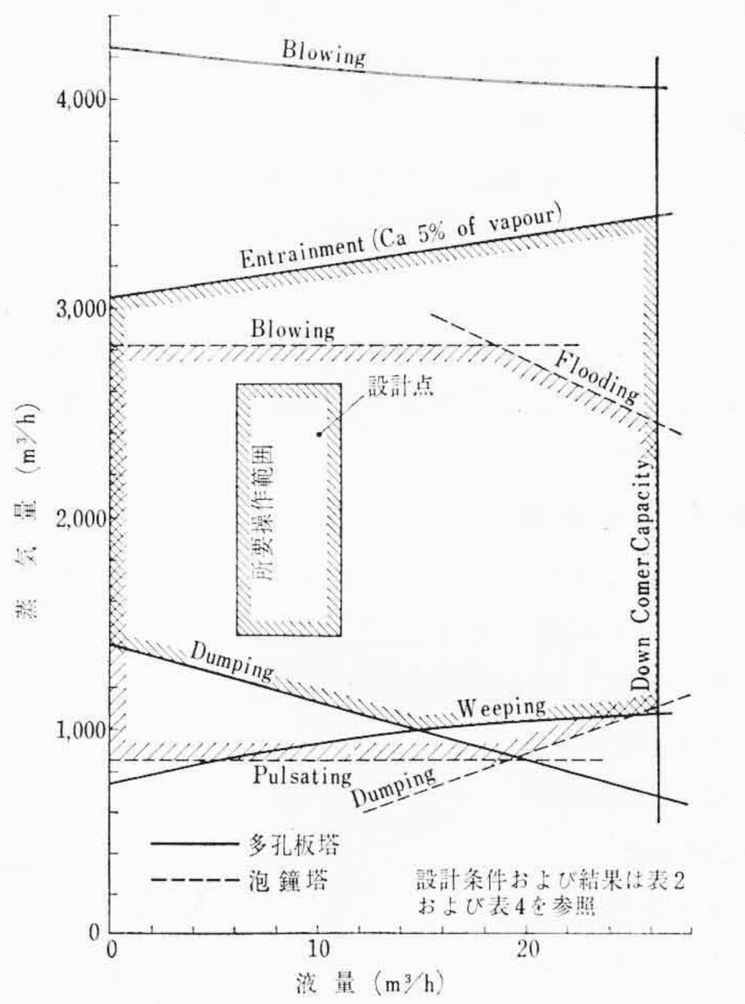



図6　多孔板トレーと泡鐘塔の性能比較表

### 3.6 目づまりおよびエロージョン

多孔板トレーの他の欠点とされているものに，沈殿物による目づまりと，エロージョンあるいは腐食による孔径の拡大があるが，これらは孔径を大きくすることによりほぼ避けられる問題である。すなわち孔径12 mm以上のトレーでは目づまりの恐れはほとんどなく，むしろスラリーの混入した液を処理するには泡鐘塔やバルブトレーより有利である。またエロージョンなどによる孔径の拡大も開口比にはあまり影響せず，性能上ほとんど問題はおこらない。なお孔径12~50 mmのトレーでも十分安定に運転可能で，図6は孔径12.7 mmのトレーについての Capacity Graph である。

表2　設計の基本条件

| 項目 | | 数値 |
|---|---|---|
| 操作圧力 (mm Hg) | | 760 |
| 操作温度 (℃) | | 88 |
| 液の性質 | 平均分子量 | 100 |
| | 密度 (kg/m³) | 1,180 |
| | 表面張力 (dyne/cm) | 22 |
| 液の流量 (kg/h) | | 12,000 |
| (m³/h) | | 10.1 |
| 蒸気の性質 | 平均分子量 | 100 |
| | 密度 (kg/m³) | 3.5 |
| 蒸気の流量 (kg/h) | | 8,400 |
| (m³/h) | | 2,400 |
| 所要理論段数 (リボイラを含む) | | 13.5 |
| 所要操作範囲 (%) | 液量 | 60～110 |
| | 蒸気量 | 60～110 |

備考　計算結果は図6，図12および表4を参照。

## 4. 無せき多孔板トレー

### 4.1 概　論

せきのない（液降下管のない）多孔板トレーは，ターボグリッドトレーやリップルトレーなどと同じ向流形トレーに属し，最も簡単なトレー形式といえる。着想は古く，おそらくせきのある多孔板トレーと同じころと想像されるが，特性が解明されがたいのでなかなか実用化に至らなかった。最近になりようやく定量的な研究[11][24][30a]が現われ始めた状況である。

日立製作所ではこの形式のトレーの優秀性に着目し，自己の技術ですでに数年前より実用化に成功している。

### 4.2 構　造

トレーは塔断面の全面にわたり多孔板をおいた単純なものであるが，孔径，ピッチ，開口比などの決定が性能を左右する重要な因子となる。

一般には孔径3～25 mm，開口比10～30%程度が採用される。

板厚もかなり重要な因子であり，機械的強度も考慮して2～6 mm程度が常用されている。

### 4.3 最大処理容量

塔内の上昇蒸気速度をしだいに大きくした場合，次のような現象によって操作が不可能となる。

（1）　液が流下しなくなる。(Flooding)

（2）　泡沫層が上部のたな段に接触する。(Priming)

（3）　飛沫同伴量が増大して段効率が急激に低下する。

多くの場合最後の項の飛沫同伴により最大処理量が規制される。泡沫層の高さは孔径，開口比，蒸気量，液量の関数であるが，泡沫層の密度はあまり影響を受けずほぼ一定であるので，後述する液滞留量が推定できれば泡沫層の高さも容易にわかる。泡沫密度の一例を**図7**に示す。

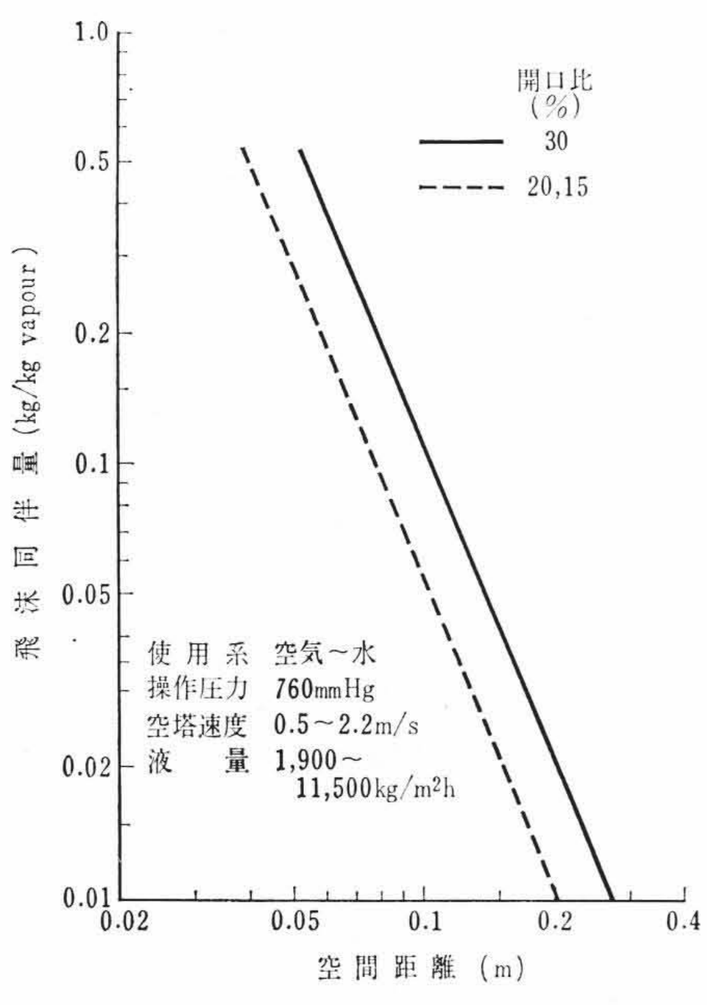



図8　無せき多孔板トレーの飛沫同伴量

飛沫同伴量は蒸気速度と泡沫層上面と上部のたな段との距離（空間距離）により定まり，**図8**のような関係にある。設計に当たっては操作条件における液滞留量と泡沫密度より泡沫高さを推定し，飛沫同伴を一定量以下に押えるような段間隔を決定すればよい。水～空気系において飛沫同伴量を0.1 kg/kg以下に押えると，段間隔を350 mmにすれば，空塔速度2 m/s程度までは十分運転可能である。

### 4.4 圧力損失

圧力損失の一般式は，通常の多孔板トレーと同様であるが，液の滞留量はせきのあるトレーのように単純ではない。**図9**は開口比が15%，30%の場合の全圧力損失を，液～蒸気比一定の条件で表わしたもので，開口比により圧力損失がかなり大幅に変化することがわかる。しかし圧力損失が小さい場合は，後述するように段効率も低下するので，両者の得失を考えて適当な値を採用せねばならない。段効率があまり低下せずに運転できる最小の圧力損失は20 mmAq程度である。なお**図9**には開口比がほぼ同一のターボグリッドトレーとリップルトレーの圧力損失の実測値（著者らによる）が記入してあるが，無せき多孔板トレーに比べほぼ同一ないしやや大きいようである。

### 4.5 段　効　率

無せき多孔板トレーの段効率は，同一物質系においては主としてトレー上の液滞留量と液および蒸気の流量により定まる。液の滞留量は孔径，ピッチ，開口比などの構造的因子と，液～蒸気比や空塔速度などの操作的因子に左右され，かなり複雑な様相を示す。**図10**は空気～水系における液滞留量の状態を示したものである。一般には液滞留量は空塔速度の増加とともに増大している。たとえば開口比20%のトレーについて見ると，空塔速度が1.2 m/sより1.8 m/s

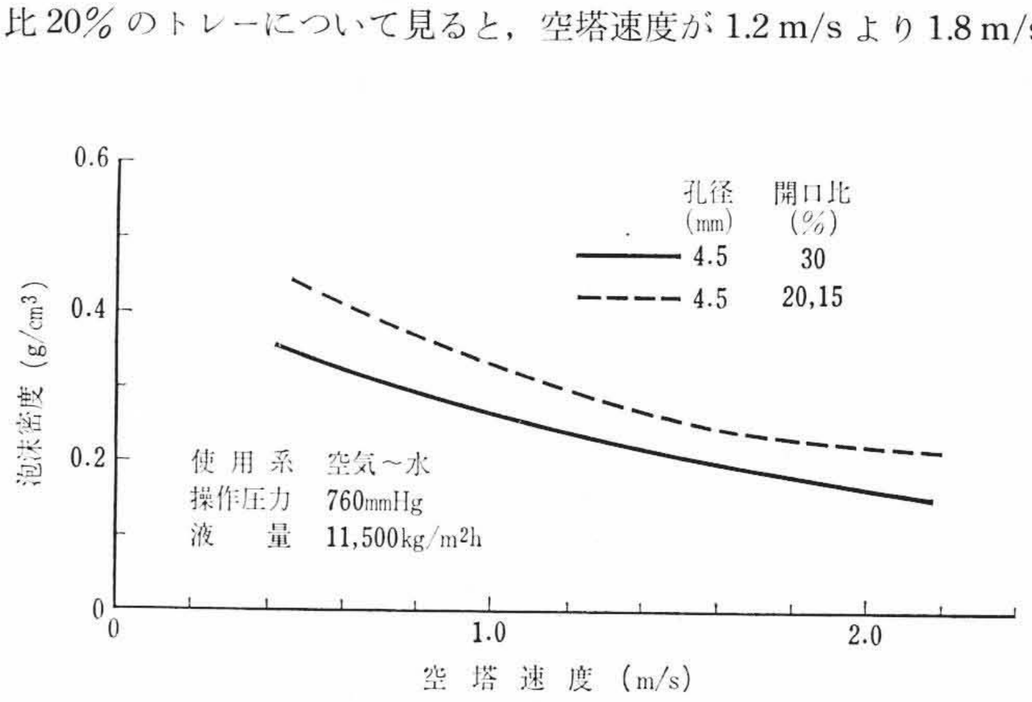



図7　無せき多孔板トレーの泡沫密度

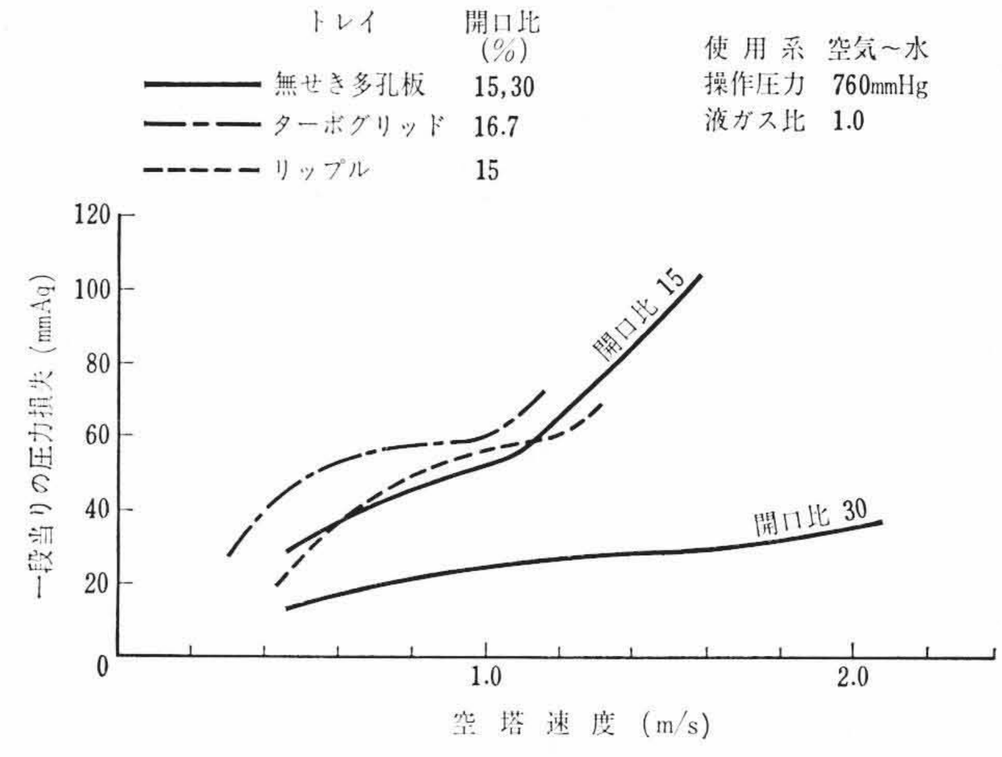



図9　無せき多孔板トレーの圧力損失

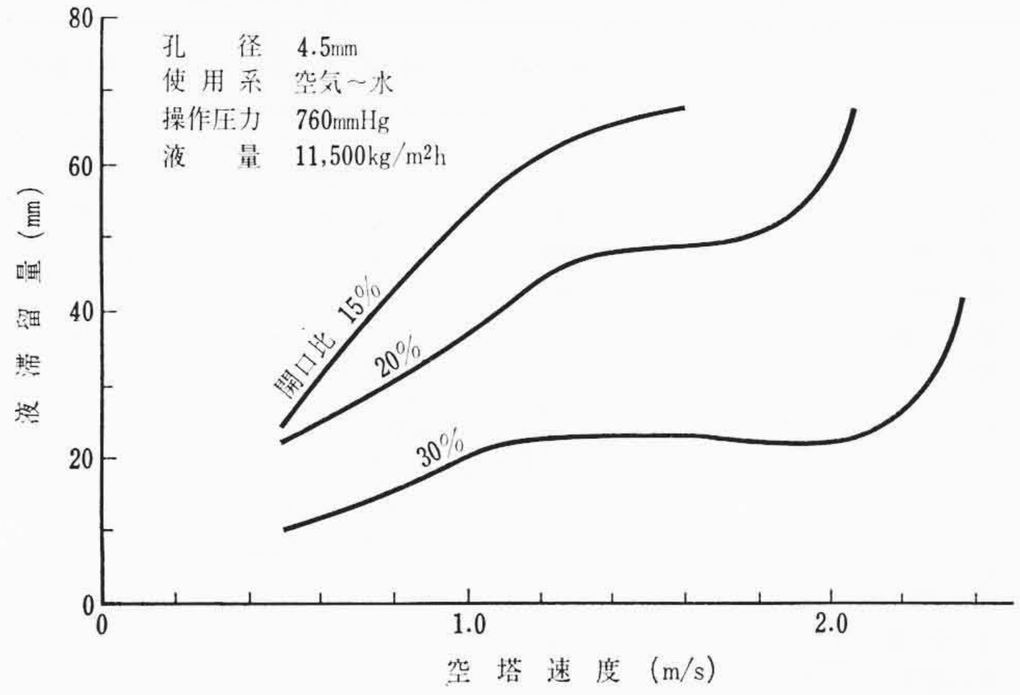
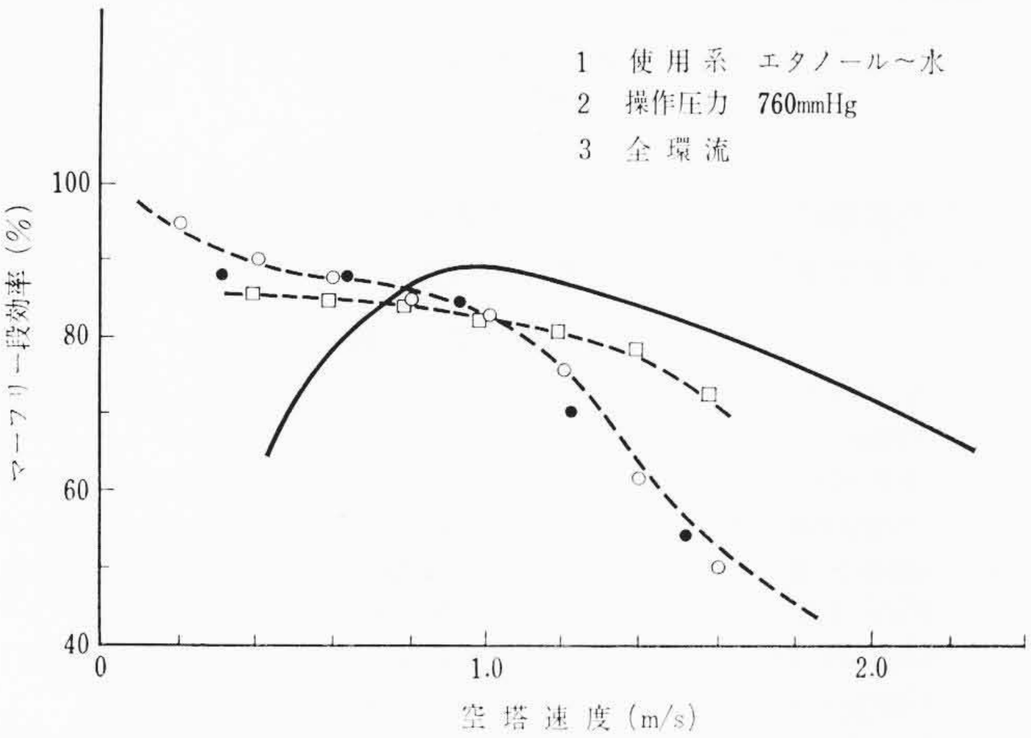



図10　無せき多孔板トレーの液滞留量



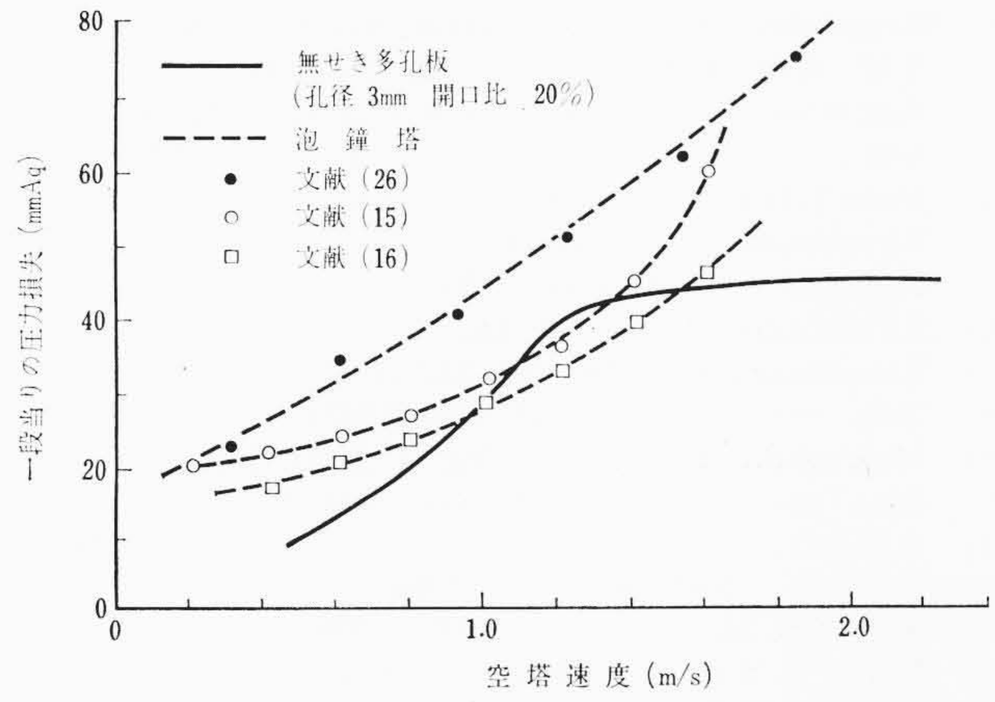




図11　無せき多孔板トレーの段効率と圧力損失の対照

の間で液滞留量が急激に増加しない部分がある。開口比が30%のトレーではさらにこの傾向が著しい。この現象が無せき多孔板トレーの操作にいっそうの安定性を与えている。図11はエタノール～水系の蒸留実験により，空塔速度に対する圧力損失（ほぼ液滞留量に見合う）と段効率の関係を示したものである。この図では圧力損失がやや平坦になる空塔速度1.0 m/sあたりまでは，段効率も急激に上昇しているが，それ以降はゆるやかに減少している。圧力損失もその間2.2 m/sまではほとんど増加していない。効率の急激な上昇は液滞留量の増加に基づくものであり，ゆるやかな減少は飛沫同伴量の増加と液および蒸気の接触時間の減少によるものである。無せき多孔板トレーでは段効率がピークを過ぎてゆるやかに減少する範

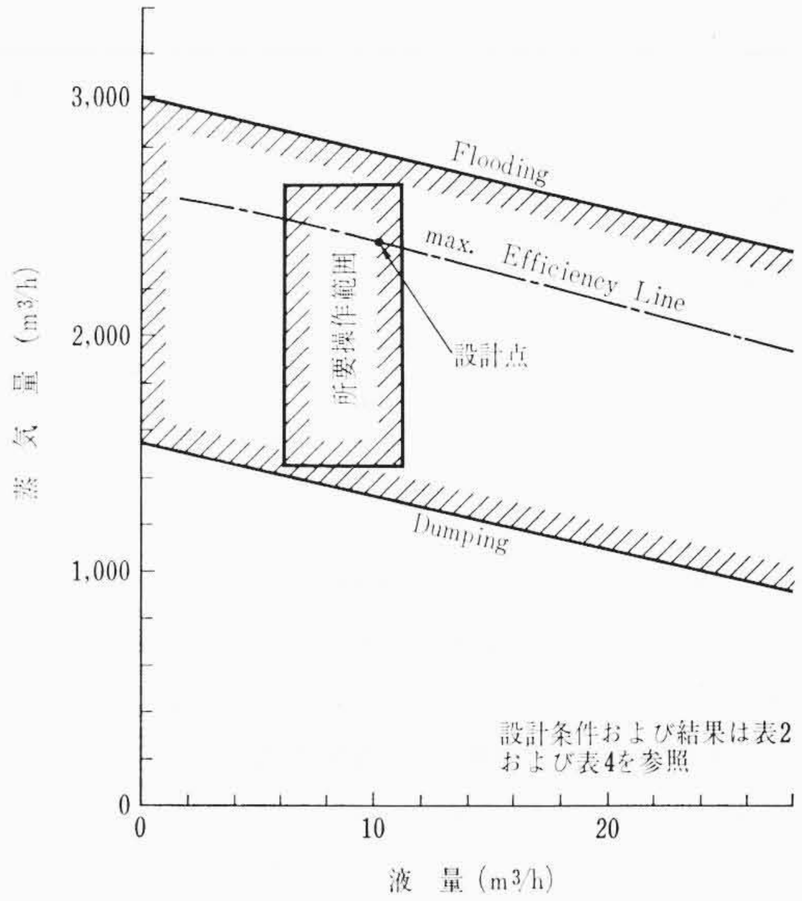



図12　無せき多孔板トレーの操作範囲

囲，すなわち圧力損失がほぼ平坦となる範囲が最も好ましい操作条件である。もちろんそれ以前の圧力損失や段効率が急激に上昇する範囲でも十分運転は可能である。

段効率の絶対値については物質系の影響を大きく受けるので一概にはいえないが，エタノール～水系では図11に示すような最高90%，また80%以上はかなり広い範囲にわたり維持することが可能である。

同図には他の文献[15][16][26]より泡鐘塔の実験値を引用記載してあるが，これと比較すると無せき多孔板トレーが特に大なる空塔速度の場合にすぐれた効率を有し，しかも圧力損失はむしろ低いことが明らかになろう。炭化水素系の場合には多孔板トレーの場合と同様，段効率の絶対値は低下する傾向にあり，これは泡鐘塔においてもまったく同様である。

### 4.6　操　作　範　囲

トレーの操作範囲を決定する因子は段効率と圧力損失である。一般に加圧または常圧の蒸留では圧力損失より効率を問題とすることが多く，減圧蒸留では逆のことが多い。図11のように処理量（空塔速度）と圧力損失，段効率の関係がわかっておれば，操作範囲も明白となる。今段効率70%以上の得られる範囲を考えると，空塔速度2.1～0.5 m/sの範囲となり，操作限界比は4.2となる。同じ条件における泡鐘塔のそれは0.2～1.3 m/s, 6.5であり，操作範囲は広いが最高処理能力は無せき多孔板トレーの65%に過ぎない。また圧力損失が30 mmAq以下で段効率60%以上の範囲は0.4～1.0 m/sで，操作限界比は2.5となり実用的には十分である。一般に液降下管のないトレーは操作範囲が狭く実用的でないといわれるが，以上の実例より見ても確実な資料に基づいて設計すればなんら実用上さしつかえないことがわかる。しかし無せき多孔板トレーの特長は処理能力が大きく価格が安いことにあるので，操作範囲を広げるために他を犠牲にするのは好ましくない。図12に無せき多孔板トレーのCapacity Graphの一例を示す。この計算の基礎と結果は表2，表4に示してある。

## 5.　各種トレーの比較

### 5.1　比較上の問題点

各種トレーの特長を明らかにして種々の比較を行なうことは，トレー選択の基準を得るために必要であるが，種々の因子が重なり合って正しい比較を行なうことはなかなか困難である。通常比較の項

表3　各種トレーの比較表

| 項目＼トレー | 泡鐘塔 | 多孔板 | バルブトレー | 向流式トレー |
|---|---|---|---|---|
| 蒸気の処理量 | 3 | 4 | 4 | 4 |
| 液の処理量 | 4 | 4 | 4 | 5 |
| 段効率 | 3 | 4 | 4 | 4 |
| 操作範囲 | 5 | 3 | 5 | 1(3) |
| 圧力損失 | 3 | 4 | 4 | 4 |
| 設計の信頼性 | 4 | 4 | 3 | 2(3) |

(1)　出典，文献(5)
(2)　5…優秀　4…優良　3…良好　2…普通　1…不良
(3)　(　)は著者による修正

目としては，処理能力，段効率，圧力損失，操作範囲，価格などであるが，これらはお互いに関連していて独立して比較することはできない。たとえば多孔板トレーにおいて塔径，段間隔を一定にしても，開口比を大にすれば処理能力は増加するが，一方では weeping の限界が上昇して操作範囲が狭くなる。段効率を上昇させるにはせき高を高くすればよいが，必然的に圧力損失は増大する。したがってたとえば段効率を比較しようとすれば，他のすべての条件をまったく同一に保たなければ真の比較とはいえない。しかしこれは実際には不可能に近いので，効率は高いが操作範囲は狭いトレーと，その反対のトレーとどちらがすぐれているかというようなことは単純に比較できる問題ではない。もし必要とするトレーが操作範囲が狭くてよいものなら，明らかに前者が好ましいが，操作条件が大幅に変わるものであれば評価は逆になる。同様に一理論段当たりの圧力損失が少ないことは，減圧蒸留では絶対必要な条件であるが，常圧あるいは加圧の場合は他の性能のほうがより重要である。従来より上記の各項目を種々なトレーにつき比較し，表示した文献[5][8][10][36]があるが，これらは各トレーの特性を明確にするためのもので，総合点で優劣を論ずる性質のものではない。そのうちの一例[5]を示したのが**表3**であるが，(　)内は著者らの研究結果により修正したものである。

### 5.2　トレー比較の一例

使用の目的，範囲を明確にすれば，その目的に合致する最も安いトレーが最も優秀なトレーということになる。**表2**に示した設計条件に従って自由に設計し，その結果を主として重量で比較したものが**表4**である。比較は泡鐘塔，多孔板塔および無せき多孔板塔について行ない。段間隔のみは同一にそろえたが，他は各トレーの特性に従って自由に決定した。この表に示すように重量は無せき多孔板塔，多孔板塔，泡鐘塔の順序で大となり，無せき多孔板塔が最もすぐれていることになる。バルブトレーについては比較を行なわなかったが，文献[32]によれば価格は同一性能の泡鐘塔の 80～89% といわれているから，多孔板塔と泡鐘塔の中間に位置するものと考えられる。**表4**に示された仕様の塔に対する Capacity Graph はすでに**図6**，**図12**に示してある。

## 6.　結　　言

蒸留塔のトレーダイナミックスは，泡鐘塔についてはある程度まとまった感があるが，多孔板や他の種類のトレーについてはようやく定量的表現が現われ始めた段階である。特にいちばん重要な段効率については，A. I. Ch. E. の組織的な研究[1]をもってしても実用上十分とはいえない。本稿では従来やや不当に軽視されていたと思われる多孔板トレー，無せき多孔板トレーのダイナミックスについてやや詳細に説明したが，定量的表現が十分できなかったのは残念である。

今後に残された問題はきわめて多いが，上述のように段効率とトレー上の流動状態を結びつけて，段効率の推算式を見出すことがいちばん重要な事がらであると考えられる。

表4　各種トレーの仕様および重量の比較

| 項目＼塔の種別 | 泡鐘塔 | 多孔板塔 | 無せき多孔板塔 |
|---|---|---|---|
| 塔径 (mm) | 1,100 | 1,100 | 800 |
| 段間隔 (mm) | 400 | 400 | 400 |
| 段数 | 40 | 40 | 40 |
| 全塔高 (mm) | 24,000 | 24,000 | 24,000 |
| 設計圧力 (kg/cm²) | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 設計温度 (℃) | 150 | 150 | 150 |
| 材質 | SS41 | SS41 | SS41 |
| トレーの詳細 | 泡鐘(径×数) 108φ×24個<br>せき高さ 50mm<br>1) 静封高 15mm<br>せき長さ 770mm | 孔径 12.7mm<br>開口比 6.1%<br>せき高さ 38mm<br>せき長さ 770mm | 孔径 12.7mm<br>開口比 20% |
| 塔断面積比 | 100 | 100 | 53 |
| 平均段効率 % | 30.4 | 30.4 | 30.4 |
| 圧力損失 (mm Aq/1段) | 100 | 75 | 48 |
| 2) 操作範囲 (%) | 35～118 | 53～136 | 59～114 |
| 3) 操作限界比 | 3.27 | 2.50 | 1.93 |
| 製品重量比 | 100 | 81 | 65 |

備考　1)　スロット上縁よりせきの上面までの高さ。
2)　設計点を100とし，液・蒸気比を一定とした場合の値。
3)　上記の条件における最大値と最小値の比。
4)　設計の基本条件は表2を参照。

## 参　考　文　献


(1)　A. I. Ch. E.: Tray Efficiency of Distillation Columns (1958)
(2)　千代田化工：ケミカルエンヂニヤリング No. 9, 39 (1964)
(3)　Dytnerskii Yu I. et al: Khim. Prom. No. 1, 70 (1964)
(4)　Ellis S. R. et al: Trans. Instn. Chem. Engrs. **38**, 21 (1960)
(5)　Fair J. R.: Chem. Eng. **72**, No. 14, 107 (1965)
(6)　Garner et al: Trans. Instn. Chem. Engrs. **35**, 61 (1957)
(7)　Garner F. H. et al: J. Inst. Pet. **43**, 86 (1957)
(8)　Gerster J. A.: Chem. Eng. Prog. **59**, No. 3, 35 (1963)
(9)　Hellums J. D. et al: A. I. Ch. E. Journal **4**, 465 (1958)
(10)　Hengstebeck R. J.: Distillation, Reinhold (N. Y.)
(11)　平塚，増田，橋本：化学工学 **30**, 38 (1966)
(12)　Hutchinson M. H. et al: Chem. Eng. Prog. **52**, 503 (1956)
(13)　今井：ケミカルエンヂニヤリング No. 9, 18 (1964)
(14)　Jones J. B. et al: Chem. Eng. Prog. **51**, 424 (1955)
(15)　Kirschbaum E.: Distillation & Rectification p. 228 & 235 Chemical Publishing Co. (1948)
(16)　Kirschbaum E.: Chem. Ing. Tech. **31**, 779 (1959)
(17)　Kirschbaum E.: Ibid. **34**, 283 (1962)
(18)　木場，小松：化学工学 **27**, 504 (1963)
(19)　Majewsky: Brit. Chem. Eng. **4**, 336 (1959)
(20)　松山，細田：化学工学 **27**, 530 (1963)
(21)　三井造船：ケミカルエンヂニヤリング No. 9, 25 (1964)
(22)　三井造船：Ibid. No. 9, 30 (1964)
(23)　Muller H. M.: I. E. C. **51**, 625 (1959)
(24)　Myere H. S. et al: I. E. C. **50**, 1671 (1958)
(25)　Norman W. S. et al: Trans. Instn. Chem. Engrs. **39**, 305 (1961)
(26)　Peavy C. C. et al: I. E. C. **29**, 1056 (1937)
(27)　Pollard B.: Trans. Instn. Chem. Engrs. **35**, 69 (1957)
(28)　Raichle L. et al: Chem. Ing. Tech. **35**, 831 (1963)
(29)　Raichle L. et al: Ibid. **37**, 669 (1965)
(30)　Robin B. J.: Brit. Chem. Eng. **4**, 351 (1959)
(30a)　斎藤，前田：化学工学 **26**, 1093 (1962)
(31)　三箇，寺尾：化学工学 **27**, 508 (1963)
(32)　関：ケミカルエンヂニヤリング No. 7, 49 (1963)
(33)　下川：化学工学 **24**, 181 (1960)
(34)　鈴木：ケミカルエンヂニヤリング No. 9, 34 (1964)
(35)　Thrift G. C.: Petro. Ref. **33**, No. 5 199 (1954)
(36)　Zuiderweg. F. J. et al: Proceeding of the International Symposium on Distillation (1960)