

段上の泡沫層が旋回流動するトレイについて

赤 木 靖 春

要 旨

段上の泡沫層を旋回させ、気液の接触効果を高める目的で開発されている旋回型のトレイのいくつか、すなわちキッテルトレイ、旋回ジェットトレイ、旋回流トレイなどを紹介し、これらの流動特性、物質移動特性について考察した。さらにこれらの応用例についても述べ、旋回型のトレイの特徴を明らかにしようとした。その結果、この種のトレイに関するデータが十分でないにもかかわらず気液の処理量を大きくできること、物質移動効率が良いことなどの特徴をある程度明らかにすることができた。

緒 言

蒸留、ガス吸収、放散などの物質移動操作の多くに段塔が使用されている。段塔には堰および溢流管を持ち、段間の気液の流路が分離されている十字流型と堰および溢流管を持たず気液がトレイ孔を同時に通過する向流型とがある。十字流型段塔は古くから使用されているものでその特性は比較的良好に知られている。泡鐘板、多孔板、各種のバルブ型トレイなどが多く使われている。一方、向流型段塔は安定操作域が狭いという理由で最近まであまり使用されていなかった。しかし最近はその特性が見直され、また制御技術の進歩とともに使用される機会が増えているようであるが十分研究されているとはいえない。向流型段塔には多孔板、グリッドトレイ、リップルトレイなどが使用されている。

これらのトレイとは異なり、気相の運動エネルギーによって段上の泡沫層が旋回流動するという特徴あるトレイが近年いくつか開発されている。この種のトレイとしてキッテルトレイがよく知られているが、この他、旋回ジェットトレイ、旋回流トレイなどがある。多くの著者¹⁾³⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾¹⁸⁾によってこの種の旋回型のトレイの有利な点が報告されている。すなわち、段上の気液の混合が激しいため気液の接触効果が良いこと、飛沫同伴が小さく、圧力損失が小さいため気液の処理量を大きくできることなどである。

しかし、この種のトレイに関する研究が比較的小さいためその特性に不明な点が多いが本報告ではこれら旋回型のトレイのいくつかを紹介し、それらの流動特性、物質移動特性などを向流型多孔板などの結果をも含めて比較考察し、各トレイの特性を明らかにする。

1. トレイの形状

旋回型のトレイはトレイを通過したガスが水平に近い方向へ運動し、これによって段上の泡沫層が旋回流動するような構造の孔を持つものである。この種のトレイとして孔構造の差異やその配列法あるいは気液の流れ形式などによって多くのものが報告されている。以下にそれらの中の

いくつかについて述べる。

1-1. キッテルトレイ (Kittel tray)

1940年頃から開発されているもので、種々の型がある。板に細長い孔をあけ両側を上下に押し曲げた構造の孔を持つ。図1(a)にその概略を示す。孔の配列法、流れ形式などの異なるいくつかのものが報告されている。

1-1-1. 標準キッテルトレイ (standard Kittel tray)¹⁾²⁾³⁾

このトレイは向流型であり2段で単位になっている。上段の孔は図1(b)に示すように段上の気液がトレイの中心から塔壁に向けて旋状に流れるように配列されている。下段では気液が中心へ向うように孔を配列している。したがって上段へ流入した液は旋状に流れて塔壁に集まり、塔壁近くの孔を通して流下する。下段へ流下した液は周囲からトレイ中心へ向って流れ、中心付近の孔を通してつぎの段へ流れる。真空下における操作の際におけるように気液の流量比が大きい場合には飛沫同伴を防止する目的で対になったトレイの間を充填物で満たして使用することがある。

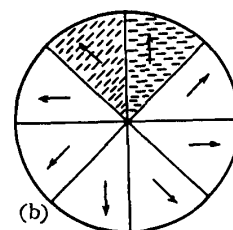
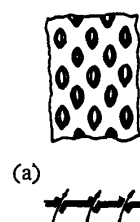


Fig. 1 Kittel tray (standard)

1-1-2. 溢流型キッテルトレイ (Kittel overflow tray)⁴⁾⁵⁾

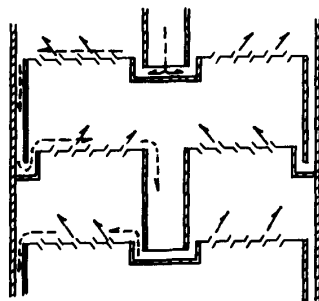


Fig. 2 Section of Kittel overflow tray

標準キッテルトレイの各段の液の流下する部分に溢流管を取りつけたものである。液は上段においてトレイ中心から周囲へ流れ、塔壁の近くの環状の溢流管を通して下段へ入る。下段では周囲から中心へ向って流れ、中心にある円型溢流管を通して流下し、つぎの段の中心へ入る。このトレイの断面を図2に示す。

1-1-3. 多角形キッテルトレイ (Kittel polygonal tray)¹⁾⁴⁾

これは溢流型キッテルトレイと同様に周囲の環状溢流管を持つトレイと中心の円型溢流管を持つトレイとを組合せたものである。しかし開孔部が多角形をしており、さらに開孔部の内周と外周に案内板をつけて液流の旋回運動を助長するような工夫がなされている。したがって液流量が大きい場合とか、ガスの流量が小さい場合などの液の旋回流の生じにくいときに有効である。

1-1-4. 遠心キッテルトレイ (Kittel centrifugal tray)⁴⁾

溢流型キッテルトレイのトレイ中心から塔壁に向う流れを生ずるものだけを重ねたものである。各段で周囲の堰をこえた液は放射状の管によって中心へ集められ下段に流入する。また、このトレイでは堰をこえた液を同じトレイに再び中心から流入させて液の循環を行なわせることが可能である。

1-2. 旋回ジェットトレイ (rotational jet tray)⁶⁾

I. P. Slobodyanik らによって報告されている。図3に示すようにトレイはガスが水平に近い方向へ噴出するようになったアーチ型の孔を同心円配列したものである。液は中心からトレイへ

流入し、ガスとともに旋回し、周囲の環状の堰をこえる。溢流管へ入った液は中心へ集められ、下段へ流入する。

1-3. フランスにおいて開発されたトレイ⁷⁾

図4 (a) に示すように孔はトレイに切れ目を設け、この切れ目を上方へ脹らして凸出部とした構造を持つ。この孔を図4 (b) に示すように配列している。そのため上昇ガスがトレイ上で旋回する。溢流部は扇形をして

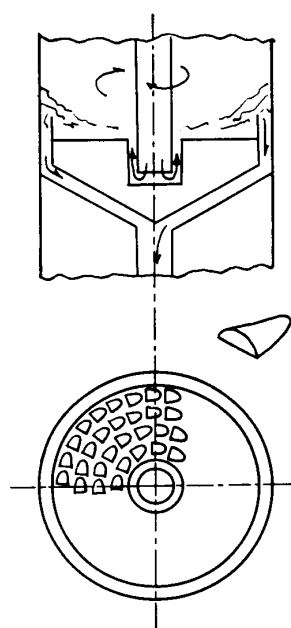


Fig. 3 Rotational Jet tray

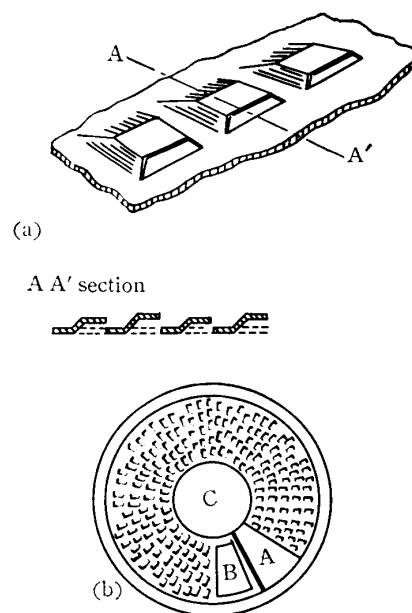


Fig. 4 Tray developed in France

おり、上段からの液はAよりトレイへ流入し、ガスとともに旋回して、Bの扇形溢流管より下段へ流下する。中心部Cは気液接触にあずからない部分である。さらに孔の凸出部の高さが2種類あり、これを交互に配置している (図4 (a)参照)。高低2種類の孔の上端へかかる液の静圧が異なるため、通過ガス量が変化する。そのため泡沫層の混合が激しくなり、したがって気液の接触が良好となる。

1-4. 旋回流トレイ (rotational-current tray)⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾

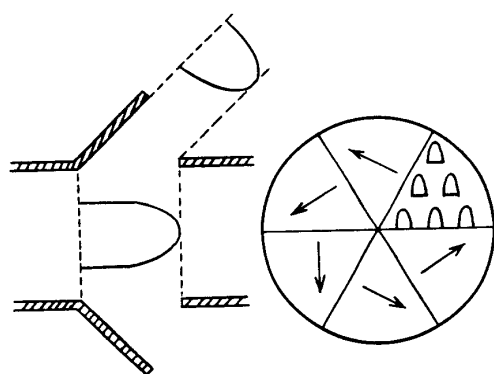


Fig. 5 Rotational-current tray

著者らが開発したトレイで図5にその構造を示す。孔は長径と短径の比が3対1の楕円の半分を切り抜き、短径を軸として上方 (U.G.T.) または下方 (D.G.T.) に折り曲げたものである。その上、この孔が6等分されたトレイ上の区分内で各孔の短径が区分半径と平行になるように正三角形配列されている。したがって上昇ガスが段上で旋回し、これによって液も旋回して向流にトレイを通過する。

1-5. 気相細分化ならびに攪拌用バッフ板¹¹⁾

これはトレイではないが段上の泡沫層を旋回させる目的を持つものである。トレイからある距離はなれた泡沫層中に水平に設置された板でこれによって上昇ガスが細分化されると同時に一定方向へ噴出する。これを設置した塔の断面を図6 (a) および (b) に示す。 (a) は十字流型トレイの場合で (b) は向流型トレイの場合である。このバッフ板によって気泡は再分割されて気液の接触面積が増大するとともに気液の混合が激しくなるため界面の更新が促進される。したがって気液の接触効率が増大する。また、泡沫層高および飛沫同伴量が減少する。そのため段間隔を小

さくすることが可能となる。バッフル板の構造を**図 6 (c) および (d)** に示す、(c) は上昇ガスを一定方向へ向わせるもので**図 6 (a)** に示す十字流型トレイの場合に使用される。このバッフル板の設置によって段上の液勾配が減少し、均一な泡沫層が形成される。特に大きな径の塔に対して有効である。(d) は旋回型のバッフル板であり、バッフル板の上方の泡沫層が旋回流動する。

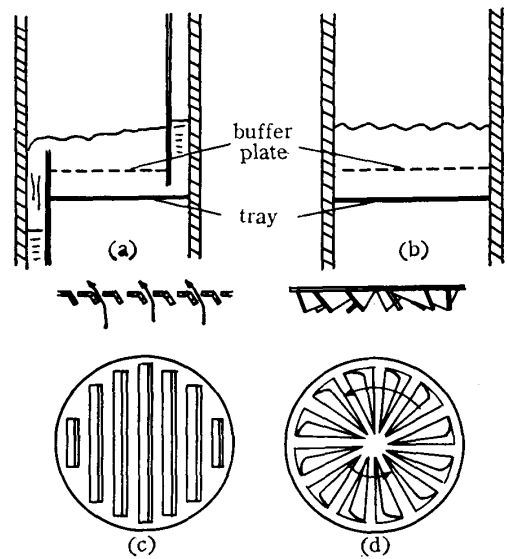


Fig. 6 Buffer plates

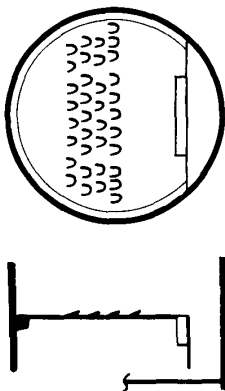


Fig. 7 Jet tray

1-6. ジェットトレイ (jet tray)¹²⁾

これは旋回型のトレイではないが上昇ガス流が液に作用

し、液流に方向性を持たせる点で旋回型のトレイと同一であるため、参考のため取り上げた。**図 7**にその構造の概略を示す。段上の液勾配を減少させる効果を持っている。

2. 流動特性

旋回型のトレイ上に形成される泡沫層の挙動は他の形式のトレイ上のそれとはかなり異なる。旋回型のトレイ上では泡沫層が旋回流動するので段上の液は中心で少なく、塔壁近くで多くなる。また同じ旋回型のトレイでもそれが十字流型であるか向流型であるかによってその流動特性が大きく変化する。十字流型の場合の特性は他の形式のそれと大差がないので以下では向流型トレイを中心に述べていく。

2-1. フローパターン¹³⁾

旋回型トレイ上の泡沫層の旋回は上昇ガスの運動エネルギーによって生ずるのであるから、その旋回性はガスの持つ運動エネルギーの水平成分と液ホールドアップの相対的な量によって決まる。また、段上の液の分布状態が泡沫層の旋回性の表現であるからこれによってフローパターンを考察する。一例として旋回流トレイにおける液の分布を**図 8**に示す。液流速一定でガス流速を増加すると、ガス流速の小さい範囲では泡沫層の旋回は遅く、段上の液分布は小さい。ガス流速を増加させると泡沫層の旋回が速くなり、液の分布が急になる。この状態が旋回型トレイの最も特徴ある領域である。旋回速度は最大7~8回/秒程度である。さらにガス流速を増加すると液ホールドアップが増大するため泡沫層の旋回性が逆に悪くなり、液分布は均一に近づく。

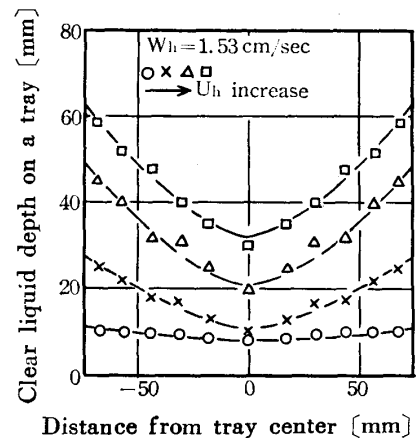


Fig. 8 Profile of clear liquid depth on a tray

2-2. 圧力損失

ガス側圧力損失は流動特性の重要なものの1つである。一般に次式で表現される。

$$\Delta P_T = \Delta P_d + \Delta P_b + \Delta P_e$$

2-2-1. 乾き圧力損失

これはトレイにガスのみを流したときの圧力損失であり、ガスの流路の急縮少、急拡大ならびにトレイ孔における摩擦によって生ずる損失である。

V.G. Fastovskii ら³⁾ によって報告された板厚 0.5 mm, 孔径 3.6 : 8.6 mm, 開孔比 27% の標準キッテルトレイの ΔP_d を図9の⑤に示す。

K. Hoppe ら⁵⁾ は溢流型キッテルトレイについて研究し、板厚 0.5~2 mm, 孔の短径 0.75 ~ 6.0 mm, 孔の長径 2.8 ~ 24.0 mm, 開孔比 5.17 ~ 45.5% のトレイの ΔP_d を、

$$\Delta P_d = 2.84 \frac{U_h^2 \rho_g}{2g} \quad (2)$$

で表現した。この結果を図9の④に示す。

I.P. Slobodyanik ら⁶⁾ は旋回ジェットトレイの ΔP_d を次式で表現した。

$$\Delta P_d = \zeta \frac{U_h^2 \rho_g}{2g} \quad (3)$$

係数 ζ は Re 数で変化する。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \zeta &= 171 Re^{-0.565} && Re < 4000 \text{ の場合} \\ \zeta &= 1.6 && Re \geq 4000 \text{ の場合} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$Re \geq 4000$ における結果を図9の⑥に示す。

旋回流トレイの ΔP_d について著者ら⁸⁾ は次式のごとく表現した。

$$\Delta P_d = k \left(\frac{T}{D} \right)^{-1.17} \left\{ \left(1 - \frac{A_h}{A_c} \right)^2 + 0.5 + 0.3 \cos \theta + 0.2 \cos^2 \theta + 4f \left(\frac{T}{D} \right) \right\} \frac{U_h^2 \rho_g}{2g} \quad (5)$$

係数 k は $U.G.T.$ および $D.G.T.$ に対してそれぞれ 0.31 および 0.37 となる。この結果を図9の②および③に示す。この式の適用範囲は塔径 15 cm, 相当孔径 0.42 ~ 1.12 cm, $T/D = 0.34 \sim 0.86$, 開孔比 6.0 ~ 34.1% である。

以上の4種のトレイの ΔP_d を比較すると旋回流トレイのそれがやや大きい。また図9の①は多孔板に対するものであるが旋回型のトレイの方がかなり小さい ΔP_d を示すことがわかる。多孔板のデータは著名な Hunt ら¹¹⁾ の次式によって求めた。

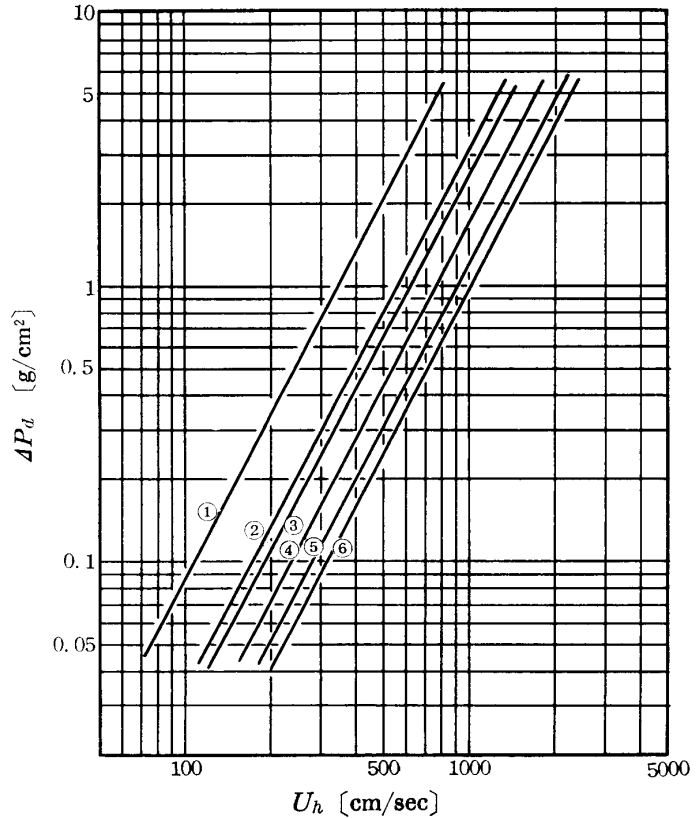


Fig. 9 Dry pressure drop

$$\Delta P_d = 1.14 \left\{ \left(1 - \frac{A_h}{A_c}\right)^2 + 0.4 \left(1.25 - \frac{A_h}{A_c}\right) \right\} \frac{U_h^2 \rho_g}{2g} \quad (6)$$

2-2-2. 全圧力損失

V.G. Fastovskii ら³⁾ および B. Pollard¹⁾ は標準キッテルトレイの全圧力損失として 図10 に示す結果をえている。

著者ら⁸⁾ は旋回流トレイに対して次式を提出した。

$$\begin{aligned} \Delta P_T = & k \left(\frac{T}{D}\right)^{-1.17} \left\{ \left(1 - \frac{A_h}{A_c}\right)^2 \right. \\ & + 0.5 + 0.3 \cos \theta + 0.2 \cos^2 \theta \\ & + 4f \left(\frac{T}{D}\right) \left. \right\} \frac{U_h^2 \rho_g}{2g} + k_b h_l \\ & + 0.8 \left(\frac{4\sigma}{Dg}\right) \quad (7) \end{aligned}$$

ここで k は前述のとおりであり、 k_b は U.G.T. および D.G.T. に対してそれぞれ 1 および 0.85 である。これらの結果を 図10 に示す。図より標準キッテルトレイと旋回流トレイの全圧力損失には大きな差異はないが、旋回流トレイの方がガス流速の大きい範囲まで操作できることがわかる。

一方、十字流型トレイに対してはまず溢流型キッテルトレイの全圧力損失を前述の条件において K. Hoppe ら⁵⁾ は、

$$\Delta P_T = 2.84 \frac{U_h^2 \rho_g}{2g} + 0.00242 \left(\frac{A_h}{A_c}\right)^{-1.54} e^{1.47L} L \quad (8)$$

と与えている。

I.P. Slobodyanik ら⁶⁾ は $U_c = 0.4 \sim 4.0$ m/sec, 液流量 6,000~30,000 kg/m²・hr, 塔径 200, 300 および 400 mm, 孔径 5.1, 6.42 および 7.62 mm, 開孔比 5.4~25.6% の旋回ジェットトレイに対して次式を与えている。

$$\Delta P_T = \zeta \frac{U_h^2 \rho_g}{2g} + 83.2 \left(\frac{L}{G}\right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right) \quad (9)$$

ここで ζ は (4) 式のとおりである。

2-3. 液ホールドアップ, 泡沫密度, 飛沫同伴および操作限界

これらの特性に関する定量的研究はほとんどない。わずかに旋回流トレイに関して著者らが行なった次元解析法による液ホールドアップの研究⁸⁾ があるのみである。したがって各特性について定性的に考察していく。

まず、液ホールドアップについてであるが、一定液流速においてガス流速が増加するとあるガ

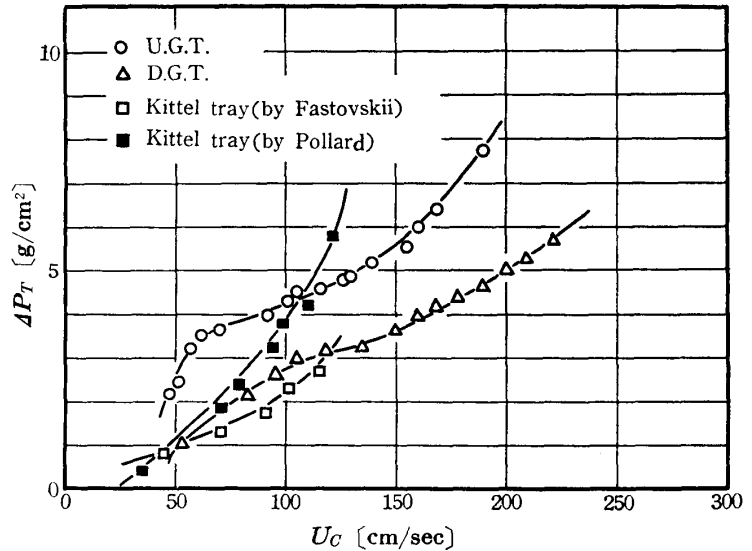


Fig. 10 Total pressure drop

流速で液が段上に停滞を始める（この点は液停滞点とよばれ、向流型トレイの操作下限である）。ここでは比較的安定な泡沫層が形成され、液ホールドアップのガス流速による増加は急である。つづいて気泡の相互作用や泡沫層の旋回性が顕著になり、泡沫層が振動を始める。ここでは液ホールドアップの増加はゆるやかである。さらにガス流速を増加すると液ホールドアップの増加が再び急になり、やがて溢注現象を呈する（すなわちこの点が操作の上限である）。このようにガス流速の変化によって3つの領域がみられるが、これは泡沫構造の変化によるのであろう。以上の液ホールドアップの傾向は液流速、トレイ形状ならびに使用系の物性によって変わらないが、各領域の現われるガス流速あるいは液ホールドアップの大きさはこれらの因子によって強く影響される。

図11に旋回流トレイにおける液ホールドアップの一例を示す。図には比較のために向流型多孔板¹⁵⁾¹⁶⁾およびグリッドトレイ¹⁷⁾の結果もあわせて示した。

泡沫層中の液の含有量を表現し、気液の接触面積と強く相関している泡沫密度はガス流速の増大とともに1から約0.2まで直線的に減少する。また、これは液流速の変化によっては変化しないが、トレイ形状あるいは使用系の物性によって変化する。

液停滞点についても定量的な報告はみあたらない。液停滞点におけるガス流速は液流速の増加によって減少し、さらにトレイ形状、使用系の物性等によって変化する。また、操作の上限である溢注点についても下限の場合と同様であるが、これには段間隔が強く作用する。

飛沫同伴についても十分な研究はなされていないが旋回型のトレイでは液滴が塔壁へ向って放出されるため、他の型のトレイとは小さいものと考えられている。

3. 物質移動特性

旋回型のトレイの物質移動実験の結果はいくつか報告されているが、操作が吸収、放散、蒸留など、物質移動抵抗の大きさや存在する相の異なる種々の系でなされていること、結果の表現法がまちまちであることおよび使用トレイの形状が詳細に報告されていないトレイがあることなどによって、実験結果を正しく比較することが困難な場合が多い。そのため、ここでは比較の可能な結果のみについて考察する。

V. G. Fastovskiiら³⁾は上述の標準キッテルトレイで水中の酸素を空気中へ放散する実験を行ない、図12に示す結果をえている。著者ら¹⁰⁾は旋回流トレイを使用して同一の系で実験した。そのうちの孔径0.72 cm、開孔比17.2%のトレイでの結果を図12に示す。この系は液相抵抗の支配的な系であり、図では結果をMurphreeの液相基準の段効率で表現している。

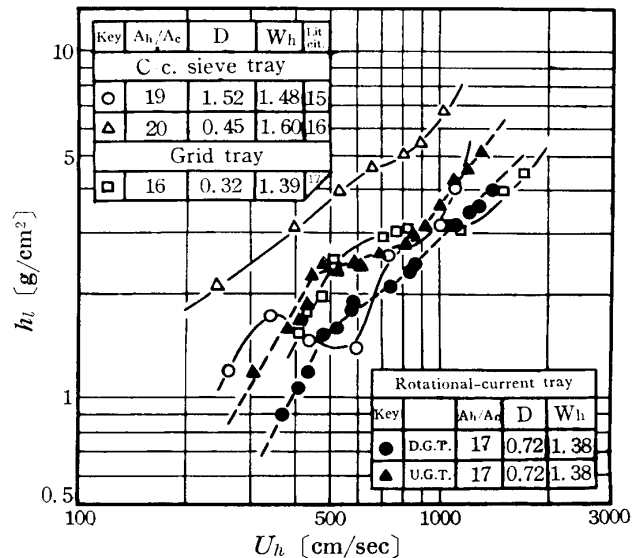


Fig. 11 Liquid holdup on several trays

図12より標準キッテルトレイはガス流速の小さい範囲で効率がよいが、旋回流トレイの方が高ガス流速まで操作できることがわかる。

4. 応 用 例

以上、その特性を明らかにした旋回型のトレイを工業規模のプロセスに適用した例の報告は少ない。数個の応用例はいずれもガスの精製プロセスに使用している。

まず、J. Bähr¹⁸⁾ は工業的な装置を使用して石炭ガス中の H_2S の水による吸収実験を行ない、充填塔、泡鐘塔およびキッテルトレイ塔の性能の比較を行なった。その結果を表1に示す。充填塔にくらべて段塔の性能が非常にす

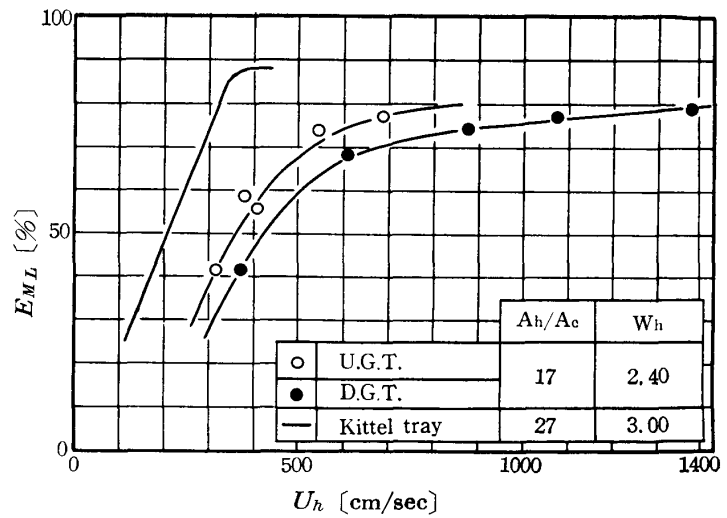


Fig. 12 Murphree plate efficiencies

Table 1. Selective H_2S removal with different absorption column

Column characteristics	Type of column		
	Hurdle packed	Bubble-cap	Kittel-tray
Diameter, m	3.2	3.2	2.0
Height, m	30.5	5.95	5.5
Gas rate, MSCM/hr	18.1	18.1	18.1
Gas velocity (based on empty column), m/sec	0.64	0.64	1.6
Water rate, kg/hr	840	740	770
H_2S absorbed, % of inlet	16.0	42.5	52.0
Outlet liquid, moles H_2S /mole CO_2	0.27	2.50	6.25

ぐれていることがわかる。さらに泡鐘塔と標準キッテルトレイ塔を比較すると、標準キッテルトレイではガス流速を泡鐘トレイの2倍以上に大きくできるから塔径を小さくすることができる。また、液流量は大体同一であるにもかかわらず H_2S の吸収効率は標準キッテルトレイの方がよい。ガスの精製においては不純物を選択的に除去して再利用することが望ましいが、標準キッテルトレイは泡鐘トレイにくらべて H_2S の選択吸収の効率がよい。たとえば吸収された H_2S と CO_2 のモル比は泡鐘トレイの2.5に対して標準キッテルトレイでは6.25である。また、同じ J. Bähr¹⁸⁾ は塔径1.93 mで32段の高さ6.1 mの標準キッテルトレイ塔で実験し、モル比 $H_2S/CO_2 = 10$ の結果をえている。

B. Pollard¹⁾ は CO_2 を水によって吸収する実験を塔径2 m、高さ11 mの42段の多角形キッテルトレイ塔を用いて27 atm. の条件で行なった(アンモニア合成におけるガスの精製)。そして結果を同一の塔に2 1/2 in. ラシヒリングを用いた充填塔での結果と比較している。表2にこの比較を示すが、多角形キッテルトレイを用いることで水の消費量がかなり節約できることがわかる。この実験において出口の水が CO_2 で飽和されていると考えれば水の消費量は $41m^3/1000$

standard m³ of gas となるべきであるから本実験では充填塔，多角形キッテルトレイ塔でそれぞれ 80 および 35 % の水が余分に消費されていることになる。

Table 2 . Comparison of Kittel trays and Packed tower (Raschig rings)
for carbon dioxide absorption in water

Absorber variables	Raschig rings (2 1/2-in. diam.)	Kittel tray (42 polygonal trays)
Gas rate, SCM/hr	13,000	13,000
Carbon dioxide in feed, %	29.0	29.2
Carbon dioxide in product gas, %	1.8	1.8
Pressure, atm.	27	27
Water rate, kg/hr	1,000,000	765,000
Water consumption, m ³ /1000 m ³ of gas	73.5	56.2

結 言

気相の運動エネルギーによって段上の泡沫層が旋回流動するトレイのいくつかについて，その形状を紹介し，圧力損失ならびに物質移動効率を簡単に比較考察した。またその応用例についても述べた。その結果つぎのことが明らかになった。

1. 乾き圧力損失は旋回ジェットトレイ，キッテルトレイで小さく，旋回流トレイでやや大きい。これらを多孔板のそれと比較すると旋回型のトレイの乾き圧力損失がかなり小さい。これは段上におけるガスの旋回性が影響しているためであろう。
2. 全圧力損失はキッテルトレイと旋回流トレイがほとんど同じである。しかし旋回流トレイの方がガス流速の大きい範囲まで操作できる。
3. 物質移動効率は同一の基盤で比較するのが困難である。液相抵抗支配系の酸素放散実験の結果によるとキッテルトレイは低ガス流速において高効率を示すが，旋回流トレイは高ガス流速まで高効率で操作できる。
4. キッテルトレイを工業規模の装置に使用したガス吸収の例によって旋回型のトレイの有利性が示された。

段塔は多くの気液および液々間の物質移動操作に使用されている。したがって段塔に要求される条件も種々存在する。一方段塔に使用されるトレイも泡鐘板，多孔板をはじめ数多くのものが開発されている。これらはいずれも異なった特徴を持ち，さらに同種のトレイでも孔径，開孔比などの形状の変化によってその特性は変化する。

使用される系および場合によってトレイに要求される条件が異なるため，数多くあるトレイに一般的な優劣をつけることは意味がない。したがって使用目的によってトレイを使い分けるのが良いのであろう。そのためには各種のトレイの特性を十分明らかにする必要があるが，泡鐘板，多孔板を除けば十分とはいえないようである。

旋回型のトレイについても他のトレイと比較して圧力損失が小さいとか気液の処理量が多いとかの特徴はわかっているものの，その特性が十分解明されているとはいえない。

旋回型のトレイ間の特性の差異を明らかにするためにも、さらにこの種のトレイの優秀性を立証するためにも、もっと多くのデータを蓄積することが必要であろう。

〔付記〕 本研究を進めるにあたって岡山大学高橋照男教授から種々ご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

Nomenclature

A_c : cross-sectional area of column	[cm ²]	ΔP_T : total pressure drop through a tray	[g/cm ²]
A_h : total hole area	[cm ²]	ΔP_σ : pressure drop due to the surface	
D : equivalent diameter of hole	[cm]	tension of liquid acting on hole	[g/cm ²]
E_{ML} : Murphree plate efficiency based on		R_e : Reynolds number of gas phase	[—]
liquid phase	[%]	T : equivalent thickness of tray	[cm]
f : friction factor	[—]	U_c : gas velocity based on cross-sectional	
G : gas flow rate	[m ³ /m ² hr]	area of column	[cm/sec]
g : gravitational acceleration	[cm/sec ²]	U_h : gas velocity based on hole area	[cm/sec]
h_l : liquid holdup on tray	[g/cm ²]	W_h : liquid velocity based on hole area	[cm/sec]
k, k_b : coefficients	[—]	ζ : coefficient	[—]
L : liquid flow rate	[m ³ /m ² hr]	θ : angles of guide in hole	[—]
ΔP_b : pressure drop through the foaming		ρ_g : density of gas	[g/cm ³]
layer on a tray	[g/cm ²]	ρ_l : density of liquid	[g/cm ³]
ΔP_d : pressure drop through a dry tray	[g/cm ²]	σ : surface tension of liquid	[g/sec ²]

Literature cited

- 1) B. Pollard : *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **35**, 69 (1957)
- 2) B. Pollard : *Chemistry and Industry*, November, 1414 (1958)
- 3) V. G. Fastovskii, Yu. V. Petrovskii and R. A. Akuchurin : *Khim. Prom. (U. S. S. R.)*, No. 2, 169 (1959)
- 4) K. Hoppe, G. Krüger and H. Ikier : *British Chemical Engineering*, **12**, 715 (1967)
- 5) K. Hoppe, G. Krüger and H. Ikier : *British Chemical Engineering*, **12**, 1381 (1967)
- 6) I. P. Slobodyanik and B. A. Zadoroznij : *Известия Высших Ученых Заведений Пищевая Технология*, No. 6, 123 (1967)
- 7) 特許公報 : 昭27—4313号
- 8) T. Takahashi and Y. Akagi : *Kagaku Kogaku (Japan)*, **31**, 600 (1967)
- 9) T. Takahashi, Y. Akagi and Z. Ohira : *The Preprint of 32th Annual Meeting (SCEJ)*, No. 2, 118 (1967)
- 10) T. Takahashi and Y. Akagi : *Memoirs of the School of Engineering, Okayama University*, **2**, 50 (1967)
- 11) 特許公報 : 昭38—2956号
- 12) J. Forgive : *The Preprint of International Symposium on Distillation, The Dome, Brighton, England*, 135 (1960)
- 13) T. Takahashi, Y. Akagi and Y. Bando : *Preprint of Hiroshima Meeting of Soc. of Chem. Eng. (Japan)*, 33 (1964)
- 14) C. A. Hunt, D. N. Hanson and C. R. Wilke : *A. I. Ch. E. Journal*, **1**, 441 (1955)
- 15) S. Saito and S. Maeda : *Kagaku Kogaku (Japan)*, **26**, 1093 (1962)
- 16) K. Hiratsuka, S. Masuda and N. Hashimoto : *Kagaku Kogaku (Japan)*, **30**, 38 (1966)
- 17) Yu. G. Zelinskii et al : *Khim. Prom. (U. S. S. R.)*, No. 2, 122 (1961)
- 18) J. Bähr : *Brennstoff-Chem.* **36**, 129 (1955)