液中における多孔板の気泡生成による自励振動*

岩 堂 卓 三*¹,吉 田 武 司*²

A Self-Excited Vibration of a Perforated Plate by Bubble Formation

T. Iwatsubo

T. Yoshida

A gas and liquid reaction column exists in a petrochemical or a chemical plant, in which many perforated plates, or sieve trays are spaced at regular intervals. In such a column an unstable vibration by fluid force occurs at the sieve trays under a certain condition, and this vibration excites the column structure. For the purpose of investigating the cause and the mechanism of the instability and obtaining the useful data for the tray design, some experiments were carried out by using a visible experimental apparatus, that is, a two-dimensional model of an actual column. From the analysis of tray vibration and bubbling at submerged orifices, it was found that the excitation force which causes the tray vibration is pressure fluctuation of gas after the bubbling synchronizing the tray vibration and a self-excited vibration system is formed between the structural vibration of tray and the pressure fluctuation due to bubble formation.

Key Words : Reaction column, Sieve tray, Instability, Two-dimensional model, Tray vibration, Bubbling, Excitation force, Pressure fluctuation

1. 緒 言

石油精製や一般化学工業等のプラントにおいては気体と液体とを反応させる装置として欄段状に配置された多孔板を有する塔が存在し、主に蒸留塔や吸収塔として広く用いられている。塔内には気液接触の場として直径数ミリ・メートルの孔が無数にあけられた多孔板からなるシーブ・トレイが数十段、等間隔に配置されている。運転時には気体は塔の下方から送り込まれ、トレイの孔を通して上昇する。また液体は塔の上方から流れ込み、シーブ・トレイ上で孔から吹き出す気体と反応しながら一段一段下降していく。このような反応塔装置を運転する際、多孔板部分に起因すると思われる振動が発生し、気液系の混相流状態のもとで塔全体の振動へ波及されるという問題が生じた。

実機の振動発生状況の報告⁽¹⁾によると、特定の運転条件の下でトレイ上の液体の揺動振動や塔内の圧力変動を伴った多孔板トレイの激しい振動が起こり、トレイ板や支持桁等の構造部材に損傷を生じさせることがわかっている。

葉山ら⁽²⁾の研究によれば、気体が多孔部を通過するときの圧損とトレイ上の液体による静水頭を加え合わせた全圧損が通過空気流速の増加に伴って減少する領域が存在することにより不安定振動が発生すると報告されており、これは低流速で顕著である。

またMullerら⁽³⁾によるバブリングとジェッティングの様式の報告はこの現象に関係が深い。液中への気泡吐出には、液深さおよび孔通過空気流速によって図

図1 バブリングとジェッティングの
状態線図⁽³⁾

* 昭和63年10月19日 第66期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和63年3月11日。

*¹ 正員、神戸大学工学部 (〒657 神戸市灘区六甲台町1)。

*² 学生員、神戸大学大学院。

1のような六つの形態が存在する。本研究における実験は、図中に示す斜線領域内に相当するが、この液深ではガス流速の増加に伴って、周期的な気泡生成の行われるperfect bubble領域から気泡が連続して生成される deformed bubble領域へと変化しており、更に連続的になった液中の空気流路面が振動する pulsating jet のような現象も現われることが示されている。

本研究では、この振動現象の発生原因、メカニズムを基礎的に究明するとともに、その励振力特性に対するトレイや構造系の影響を明らかにして、トレイ設計の段階で役立つ資料を提供することを目的としている。そこで、トレイの振動を励起する流体力の基本的な特性を把握するために、孔を一列に配列した二次元可視化欄段実験装置を設計・製作し、定性的な実験および高速ビデオ撮影による可視化実験を行なう。

本論では、これら一連の実験結果を示して振動ピークを持つ空気流速範囲での詳しい振動発生機構やこの現象に影響を与える構造系諸元についての考察を行なう。

2. 弾性トレイ実験

2.1 実験装置

2.1.1 二次元可視化欄段装置 二次元可視化欄段装置の構造を図2に示す。気泡の吐出状態が容易に判別できるように材質にはアクリル材を用い、孔配列を一列にしている。使用流体は、水-空気系とする。これらの物性値は実機で使用されるものとほとんど変わらないと考えてよい。上部から水を送り込み、ダウン・カマーおよび多孔板トレイを伝って下部から放出させる。また空気を下部導入口より送り込み、ト

図2 二次元可視化欄段装置

レイの孔および液中を抜けたのち上部から大気開放させる。水の供給量は一定で約2 liter/min とした。

2.1.2 多孔板トレイ部 多孔板はアクリル板に一例14個の孔をあけたものを用いる。板厚は1mm、2mmおよび3mmの三種類とする。トレイは液深を一定にするための二本の堰と多孔板で構成される。両端を固定支持するのみで、周囲は自由な弾性トレイとする。トレイの諸元を図3に示す。

2.1.3 空気供給部 11.5m³/min、265mm Aqプロアを使用し、直径50mmのパイプを通して空気を多孔板下部に送り込む。空気供給量はインバータによりプロアのモータ回転速度を変えて変化させる。図4に実験装置の概略を示す。

図3 トレイ部諸元

図4 実験装置概略図

2.2 計測装置 図5に計測装置の概略を示す。

図5 計測装置概略図

空気流速の計測は、プロアと欄段装置間のパイプにピトー管を設置してパイプ内流速測定を行ない、多孔部での流速に換算する。トレイの振動数は、抵抗線ひずみゲージをトレイ中央部に貼り付けて測定する。ひずみゲージによって検出した信号は直流アンプで増幅して記録する。また気体室の変動圧力は半導体小形圧力変換器を気体室（トレイ下30mm）に取り付けて測定する。

2・3 実験および解析方法

2・3・1 トレイ諸元の影響 表1に示すトレイ条件で、気体室内の変動圧力および多孔板トレイの振動を孔通過空気流速別に測定する。空気流速は気泡が出はじめる速度から2m/sステップで20～24m/sまで増加させる。

2・3・2 振動発生機構の検討 図6に示すような測定位置における変動圧力の測定を行なう。同時にトレイ振動も測定する。またトレイが振動しないように固定したときの変動圧力も空気流速をパラメータにして測定する。

2・3・3 可視化実験 トレイ振動と気泡発生状況を高速撮影ビデオ（200 scenes/sec）を用いて孔通過空気流速別に撮影する。またトレイを固定して静止させたときの状況も同様に撮影する。

2・3・4 解析方法 各実験で記録した信号は高速フーリエ変換器で解析する。変動圧力およびトレ

イ振動の各データについては、その周波数スペクトルをパラメータ別にグラフ化する。また測定位置による両者の相互関係を見るために、卓越振動数と位相差を測定し考察する。

3. 実験結果および考察

3・1 弾性トレイ実験の結果および考察

3・1・1 トレイ諸元の影響 トレイの板厚2mmについて、孔通過空気流速を変化させたときの気体室内の圧力変動とトレイ振動を測定した結果を図7および図8に示す。なお図中の一点鎖線は低流速での圧損の負勾配特性による不安定振動の変化で、別系統の振動であるから区別して示した。

図7 孔通過流速に対する気体室内の圧力変動
(板厚2mm, 液深60mm, 6mmφ円孔, ピッチ15.5mm)

図8 孔通過流速に対するトレイ振動
(板厚2mm, 液深60mm, 6mmφ円孔, ピッチ15.5mm)

図6 圧力測定位置

表1 実験項目別トレイ条件

Items of experiment		Number of holes	Tray thickness	Hole diameter	Depth	Pitch
Influences of various tray conditions	Infl. of tray thickness and depth	14	1mm	6mmφ	60mm	15.5mm
		↑	↑	↑	30mm	↑
		↑	2mm	↑	60mm	↑
		↑	↑	↑	30mm	↑
		↑	3mm	↑	60mm	↑
	Infl. of hole diameter	↑	↑	↑	30mm	↑
		14	2mm	4mmφ	60mm	15.5mm
		↑	↑	10mmφ	↑	↑
	Infl. of pitch	14	2mm	6mmφ	60mm	25mm
	Exam. of mechanism of tray vibration	14	2mm	6mmφ	60mm	15.5mm
		↑	3mm	↑	↑	↑

圧力変動、トレイ振動ともに空気流速 13m/s 付近でピークを示す31Hzの振動が生じており、問題とする振動の顕著な例を示していると言える。この場合（孔径6mm、板厚2mm、液深60mm、孔間ピッチ15.5mm）を標準ケースとして、これからトレイ条件を様々に変えて行なったトレイ振動の測定結果を以下に示す。

図9は孔径を変えたときの卓越振動数の流速に対する変化を示している。孔径の違いによって共振流速とそのときの振動数が違っていることがわかる。孔径の大きい方が高流速において振動ピークを持ち、卓越振動数も大きい。

図10は板厚を変えたときの卓越振動数の変化である。板厚は系の固有振動数を決定し、振動に与える影響はトレイ条件のうちで最も大きい。板厚を大きくしてトレイ剛性を高めるほど系の固有振動数は上昇し、共振流速は高まる。

図11は液深の影響を示している。トレイ上の液体を含めたトレイの固有振動数はこの液深に左右され、液体の減少によって固有振動数は上昇する。

図9 孔径別の卓越振動数への影響
 (トレイ板厚2mm)

図10 板厚別の卓越振動数への影響
 (孔径6mm)

図12は孔間ピッチを変えたときの影響を示している。ピッチが大きくなると孔数が減少するため孔径を小さくした場合と同様の傾向を示し、共振流速は小さくなり卓越振動数も低くなる。

3・1・2 振動発生機構の検討 図6に示した測定位置における圧力変動とトレイ振動の卓越振動数を2mmおよび3mmのトレイについて空気流速別に調べた結果、両者の卓越振動数は測定位置に関係なく各流速で同じ値を示し、気泡生成がトレイ振動に同期してい

図11 液深の卓越振動数への影響
 (板厚2mm, 孔径6mm)

図12 孔間ピッチの卓越振動数への影響
 (板厚2mm, 孔径6mm)

図13 各圧力変動に対するトレイ振動の位相遅れ

ることが確かめられた。板厚 2 mm、3 mm のどちらのトレイを用いた場合についても同様であり、トレイ振動が生じているときは常にこれと同じ振動数で気泡吐出が行なわれている。そこで、各測定位置別圧力変動に対するトレイ振動の位相遅れ、および気体室内の圧力変動に対するトレイ振動の位相遅れを測定した結果、それぞれ図13、図14に示すようになった。孔上の圧力変動は、気泡吐出の振動数または連続した気体流路面の脈動の振動数と考えてよい。

これから流速 13 m/s での空力弾性振動の振動ピーク時における各変動の時間的変化を表わしたものを図15に示す。気泡形態については可視化実験結果を参照した。トレイ振動と孔中および気体室内の圧力変動は同位相で、これらと孔上の圧力変動との位相差が 90° となっている。トレイ下部の気体室における圧力変動は、気泡生成に伴う圧力の低下の時間的変化である。図15において気体の噴出速度が増加する(A)点から(B)点にかけては下部気体室内の圧力は低下し、噴出速度

図14 気体室内の圧力変動に対するトレイ振動の位相遅れ

図15 振動ピークにおける気泡吐出と圧力変動の時間的変化
(孔通過空気流速: 13 m/s)

が最小になる (C) 点においては圧力も最小になる。したがってこの圧力変動は気泡生成に追従するものである。次にトレイ上部の孔上圧力変動について評価する図15において (A) 点では気泡生成が加速を始め、(B) 点では気体が抜けていくことにより気体流路面内の圧力が低下し、このときの圧力損失がトレイに下向きの加振力を与える。(C) 点から (D) 点にかけてはトレイの復原による気泡の押し上げに伴って、トレイ上部の圧力が上昇する。加振力の大きさはトレイ下部から上部への圧力損失の大きさに比例し、孔上の圧力変動の振幅でもある程度評価できると思われる。この振動ピークを示す空気流速から遠ざかるにつれてトレイ振動に追従した気泡生成が行なわれなくなり、変動圧力も小さくなって、系の固有振動数と一致した規則正しいエネルギーの伝達関係が薄れる。

以上の考察は図16に示すような自動振動のフィードバック系として考えることができる。エネルギー源はブローからの供給空気で、エネルギーの変換機構がトレイからの気泡吐出、これに伴う圧力変動が励振力となってトレイ振動を引き起こす。そしてトレイ振動が気泡吐出を同期させるような自動振動系を形成している。

また、トレイが振動しないように固定して行なった実験の結果、孔通過空気流速をパラメータとした気体室内圧力変動の周波数スペクトルは図17に示すようになった。すべての流速範囲で卓越した周波数成分が現れておらず周期的な気泡生成が行なわれていないことがわかる。したがって、トレイが剛体であるような場

図16 トレイの自動振動のブロック線図

図17 トレイを静止させたときの気体室内の圧力変動

表2 可視化実験における観察結果

Gas velocity(m/s)	Bubbling pulsation(Hz)	Tray vibration(Hz)	Flow regimes
5	10	13	Perfect bubble. Periodic weeping.
8	21	22	Slightly deformed bubbling. Weeping decreases.
10	22	26	Deformed bubble. Weeping stops. Bubble grows large.
12	24	27	Continuous deformed bubbling.
14	25	29	Bubble is soon broken.
16	30	30	Surface of gas flow pulsates.
18	30	30	Pulsating jet. Violent gas jet.
20	?	32	Pulsating jet.
22	?	33	Pulsating jet.

合にはトレイ振動を生じさせる励振力は存在していないと言える。

3・2 高速ビデオ撮影による可視化実験 板厚2mmのトレイ(孔径6mm、液深60mm)を用いたときの気泡吐出の振動数とトレイの振動数を高速ビデオ撮影によって調べた結果、表2のようになった。気泡形態については図1で示したバブリングとジェッティングの概要⁽³⁾によっている。撮影した気泡吐出形態はこれまで測定に基いて示した一連の考察の裏付けとすることができた。またトレイが振動しないように固定したときは、すべての空気流速範囲において気体流路が連続的な旋回流となっており、周期的な気泡生成は見られなかった。

4. 結 言

化学プラントの反応塔などに見られる棚段塔装置内部の多孔板トレイの流体励起振動について、実験的な解析を行なった結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 気体室の圧力変動の卓越振動数は、多孔部通過空気流速の増加に伴い、トレイ振動の卓越振動数とともに比例して増大する。
- (2) トレイの固有振動数を励起する流体力は気泡生成の同期によって生じる圧力変動であり、トレイを静止させたとき、すなわちトレイが剛体であるような場合には、圧力変動に卓越した成分が現れない。
- (3) 流体も含めた構造系としてのトレイ振動は、気泡生成の同期を伴ってこれと連成した自励振動系を形成している。
- (4) 棚段塔内の個々のトレイに対して独立した振動系を形成しており、トレイが一段の場合でも気泡生成による流体励起振動は生じる。
- (5) 板厚、液深、孔数、孔径、孔間ピッチ等のトレイ条件の違いによってトレイ振幅、卓越振動数に若干

の変化が見られ、これらの選択によってトレイを安定化させる傾向を持たせることができる。

- (6) 可視化実験の結果、トレイの振動に追従する気泡生成状況が確認できた。振動の消滅する高流速においては気泡生成がトレイ振動に追従できなくなり、連成系が失われていることがわかる。またトレイを静止させた場合では、すべての流速範囲において周期的な気泡生成および脈動が見られない。

最後に、本研究を進めるに当たって数多くの資料を提供して下さり、適切なご討論、ご助言をいただいた三菱重工業株式会社高砂研究所所長 白木万博博士、振動音響研究室長 藤田勝久博士に深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) 藤田・矢野・白木・山崎、昭和60年度非定常空気学懇談会 (1985-7)
- (2) 葉山・田村、機講論、No.700-10 (1970-3) 21
- (3) Muller, R.L., Prince, R.G.H., Chemical Engineering Science, Vol.27 (1972) 1583

討 論

〔質問〕 石原 国彦

〔川崎重工業(株)技術研究所〕

工業上よく直面する振動問題であるので興味深く拝見した。以下の点についてご教示願いたい。

(1) 穴から空気が噴出する場合、通常同流速であれば穴径が小さいほど渦の流出振動数が高くなると思われるが、図9では逆になっている。その理由をお示し願いたい。

(2) 貴論文でいう共振ピークとは、トレイの振動と流体励振力との相互作用に基づく自励機構によって生ずるものと思われるが、図9で穴径により共振ピークの周波数が異なっているのは、穴径の違いでトレイの固有振動数が変化したものと考えてよいのか。

(3) 貴論文の主題である自励振動機構が、トレイ穴上部の圧力変動とトレイの振動との位相差によるものであることは理解できるが、気体室内の圧力変動がトレイ振動となぜ同相であるのか説明していただきたい。通常自励機構を調査する場合、トレイの振動と気体室内圧力変動の位相差を測定するが、貴論文結果はそれが無意味であることを示しており、今後の参考にしたい。

〔回答〕 説明の便宜上、(1)、(2)はまとめて回答する。

(1)、(2) トレイ全体の面積に占める孔面積の割合の相違はトレイの固有振動数に若干の変化を与えるものと考えられる。しかし、本研究ではトレイ系の固

有振動数に対してはトレイ自身の質量およびトレイ上の液体の付加質量を考慮する必要があり、気泡吐出しの行われている状況下では大孔径ほど付加質量が小さくなり、系の固有振動数は高くなる。本研究の結果より、気泡吐出しはトレイの振動に追従するものであるから、孔径が大きいときは気泡吐出しが同期する共振振動数も小孔径のものに比べて高くなる。しかし、共振現象の顕著な6mm径のものに比べて4、10mm径のものは振幅、変動圧力ともに格段に小さく、顕著な共振現象を示しているとは言えない。したがって6mm径以外では系の固有振動数に合った気泡吐出しの周波数成分による選択共振がわずかながら現れていると考えられる。

(3) 本研究で得た振動発生機構における励振力は、トレイ自身の上下運動に伴った気体室内の体積変化による圧力変動ではなく、気泡生成の同期によって生じる圧力変動すなわち圧力損失の影響によるものである。図15に示すように、気泡生成時の気体流路面内の圧力降下がトレイに加振力を与え、気体室内の圧力変動はその気泡生成に追従するものであって、トレイ振動とは直接的な関係を持たない。したがって、本研究におけるような弾性振動の再現においては直接的な加振力を与える生成気泡内の圧力変動とトレイ振動間の位相差を調査する必要があり、トレイ加振応答に見られるような位相差関係が質問中の両者間では明確でない。