

超音波消泡システムの開発

Development of Foam Breaking System in Ultrasonics

技術本部 中村末茂*¹ 安部貞宏*¹

岩田久雄*²

名古屋機器製作所 伊藤靖史*³

食品機械プラントの充填機において、飲料の種類によって充填時に泡が多く発生するものがあり、容器からこぼれて充填量の不足等の問題が起こる。そこで、本研究では各種の物理的・機械的消泡技術のメカニズムやエネルギー効率を検討し、超音波を用いることによる消泡が最も効果的であることを見いだした。また、音波の放射効率が高い縞(しま)モード振動の矩(く)形板や反射板等を用い、放射領域の拡大や瓶開口部に合せた集音化を行った。これにより、非常に高い音圧レベル155~160 dBを放射する超音波消泡システムを開発した。さらに、充填機の構造にマッチングする装置を試作し、実機に装着して消泡の有効性を確認した。

Some of the filling machines in a food machine plant generate a large amount of foam at the time of filling depending on the type of drink, and causes the drink to overflow, bringing about problems such as the drink content falling short of the specified level, etc. In this research, therefore, the mechanism and energy efficiency of various physical and mechanical defoaming technologies have been thoroughly investigated and it has been found that the ultrasonic defoaming is the most effective method. Moreover an expansion of the radiation zone and sound collection consistent with the bottle opening (mouth) have also been carried out by using the stripe mode vibration rectangular plate with high sound wave radiation efficiency, reflective plate, etc. As a result, an ultrasonic defoaming system capable of radiating high-level sound pressure between 155 and 160 dB has been developed. Furthermore, a device has been produced for trial manufacture to match with the structure of the filling machine, and installed into an actual machine in order to confirm the defoaming effectiveness.

1. はじめに

食品機械プラントでは自由界面を有する液体の流動を取扱うことが多く、発生する泡は多種多様の問題を起す。例えば、飲料を充填して容器から泡があふれた場合は、充填量の不足や容器の封栓部を汚して微生物発生の元となる。また、酸化で味が変わるビール等は、容器上部の空気を炭酸ガス等で置換して封栓するが、液面上に泡があるとガス置換が不十分となる。これらの泡を消す方法には、大別して消泡剤等の薬品を用いる化学的消泡と機械力や電磁波等を利用した物理的・機械的消泡がある。

本研究は対象の液体が飲料であることから物理的・機械的消泡技術を選択し、泡問題の解決や機械の能力向上につながる効果的な消泡システムについて検討したので報告する。

2. 泡の強さ

純水では泡は安定しない(生成しても短時間で破泡)が、石けん等を添加すると安定した泡ができる。一般に泡の安定状態は、泡膜の気液界面に界面活性物質が吸着することで保たれる⁽¹⁾。

飲料では、含有するたんぱく質が界面活性物質に相当する。

泡の強さ(破泡の難易度)は消泡システムの消費エネルギーを検討する上で重要であるが、泡の強さを表す一般的な物理量はない。ここでは、機械的な外力に対する抵抗力として次のように表現する。

泡では界面力が内側に作用するため、周囲圧力より高い内部圧力 P_B が発生して力学的にバランスしている。

泡の内部圧力 P_B は、表面張力 σ と泡径 d_B から次式で求められる。

$$P_B = \frac{0.8\sigma}{d_B} \quad (1)$$

泡が外力を受けて変形し、膜が薄くなって破れると仮定すると、式(1)が泡の変形に対する抵抗力となる。

3. 各種の物理的・機械的消泡技術の検討

消泡技術は、メカニズムから機械力と電磁波(光、熱)等の物理力に分類される。ここでは消泡実験を通じて消泡メカニズムを明確にするとともに、消費エネルギーについて検討する。

3.1 実験装置(図1)及び方法

透明な容器に入れた供試液体中の発泡器($\phi 1$ mmの多孔板)に窒素ガスを吹込んで発泡させ、上方の開口部から表1の装置を用いて各種の機械力及び物理力を付与する。消泡後は容器内に残留した泡まつの径及び容量を測定する。

なお、消去した泡容量当たりのエネルギー ϵ 及びエネルギー密度 I は、次のようにして求める。

$$\epsilon = I \cdot A_B \cdot t_i / V_B \quad (2)$$

超音波の場合：

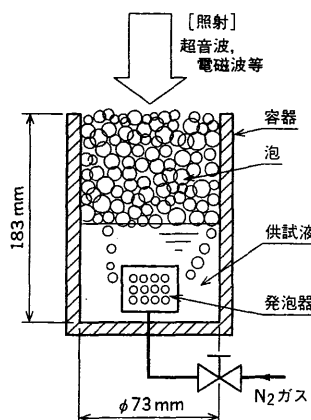


図1 消泡実験装置 発泡器に窒素ガスを吹込んで液体を泡立て、上方から各種エネルギーを照射する。
Test equipment of bubbles breaking

*1 名古屋研究所産器・エンジン研究室主務

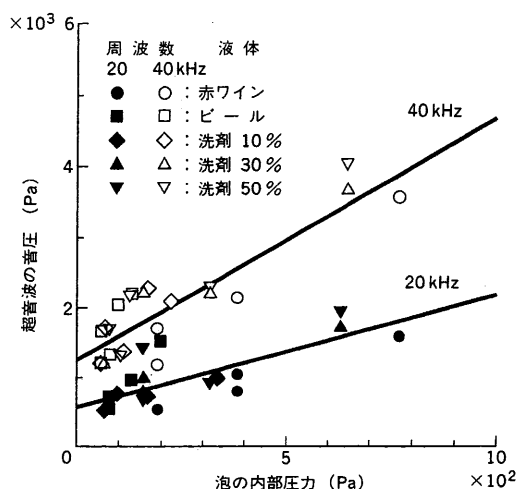
*2 名古屋研究所機械物理研究室

*3 産機技術部食品包装機械設計課

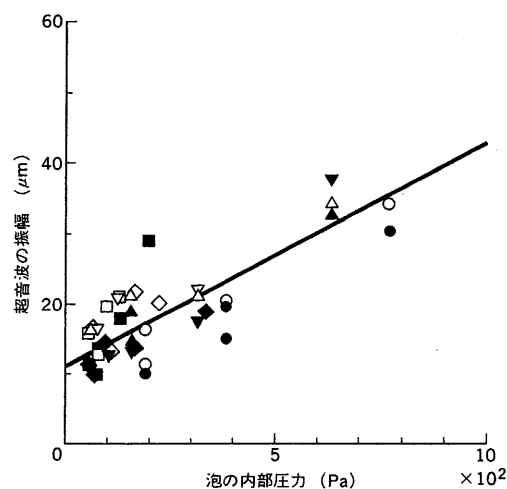
表1 消泡装置の仕様

Specification of equipment at bubbles breaking

消泡装置	メーカー	仕様
超音波	BRANSON(株)	発振周波数: 20, 40 kHzの2機種 最大振幅: 60 μm (出力可変)
赤外線	ノリタケカンパニー リミテッド	出力: 400 W (表面温度 400°C) サイズ: 150×150 mm (全波長タイプ)
炭酸ガス レーザー	三菱電機(株)	出力: 0.5~3.25 kW 公称波長: 9.6, 10.6 μm



(a) 超音波の音圧で整理



(b) 超音波の振幅で整理

図2 超音波による消泡 泡の内部圧力が高いと大きな消泡エネルギーが必要であり、消泡は超音波の振幅で一義的に決まる。

Bubbles breaking of ultrasonics method

$$I = P_s^2 / \rho_a \cdot C \quad (3)$$

赤外線、炭酸ガスレーザーの場合:

$$I = W_{\text{out}} / A_B \quad (4)$$

ただし、 W_{out} はヒータ表面の値、炭酸ガスレーザーでは出力とビーム径から求める。

3.2 超音波による消泡実験

超音波を照射すると、液体の種類には無関係に液面上にあるもののほとんどが瞬時に消泡する(液の破壊は、2000 こま/sの高速カメラでも撮影できないほど速い)。実験において、残存した泡径と表面張力から内部圧力、泡上面基準での音圧レベルの実測値から音圧及び振幅を求めたものを図2(a), (b)に示す。

図から次のことが分かる。

(1) 泡の内部圧力が高い(泡径が小さい)ほど、消泡に大きなエネルギー(音圧)が必要である。

(2) 超音波エネルギーを振幅で整理すると、周波数とは無関係に表現できる。

以上の結果から超音波の消泡メカニズムは、次のように推定できる。

空気中を伝搬する粗密波の音波が泡膜に到達すると、その圧力変化で膜が変形する。膜が変形すると界面に吸着している界面活性物質の密度にむらが生じ、表面張力大の水分子が界面に露出し、純水同様の状態となって膜が破れる。

音波として非可聴域の超音波を用いる理由は、消泡に必要な音圧レベルが非常に高く、騒音源となるためである。

3.3 赤外線及び炭酸ガスレーザーほかによる消泡実験

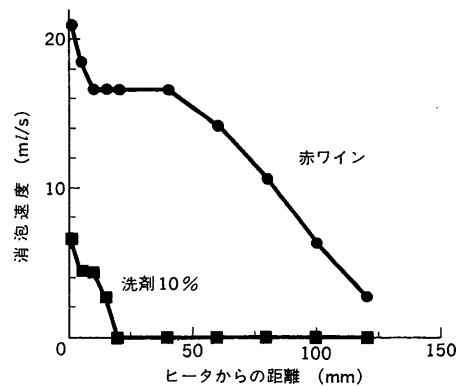
本法による消泡状況は、赤外線等を照射すると泡の上面から順次破泡する。この時の一定時間における消泡容量から、消泡速度を求めた実験結果を図3(a), (b)に示す。

この消泡方法には、次の特徴がある。

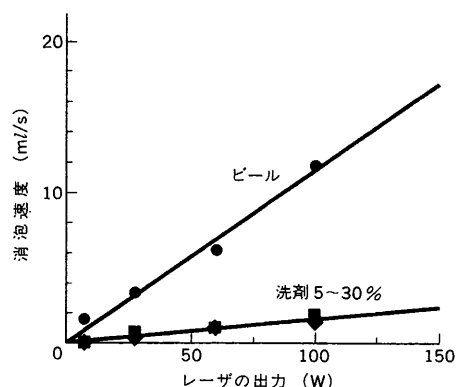
- (1) 液体の種類によって消泡速度に差異がある。
- (2) 消泡は泡径にほとんど影響を受けない。
- (3) ヒータとの距離及びレーザー出力と消泡速度が関連する。

本法は液体の種類で消泡速度に差異が生じることから、供試液の吸光スペクトルを調べた。これによると同一エネルギーで消泡速度の高い液体は、波長9.6 μm 近傍(レーザーの発振波長と一致)での吸光度が大きかった。

また、泡の破泡プロセスは、重力作用での膜内液の流出や表面



(a) 赤外線消泡



(b) 炭酸ガスレーザー消泡

図3 赤外線と炭酸ガスレーザーでの消泡速度
液体の種類や電磁波の波長によって消泡速度に有意差がある。
Bubbles breaking of infrared rays and carbonic acid gas LASER

表2 消泡エネルギー
Energy of bubbles breaking

消 泡 手 段		消泡エネルギー		特 徴
		I (W/m ²)	e (W·h/ml)	
機械力	超 音 波	2.42×10^3	5.01×10^{-6}	◇消泡が瞬時 ◇泡径が消泡効果に影響
	赤 外 線	1.24×10^4	3.13×10^{-3}	◇広域波長出力の方が有利
電磁波	炭酸ガスレーザー	3.80×10^5	1.77×10^{-2}	◇液体含有の物質が消泡効果に影響
	マイクロ波	消泡せず		◇消泡効果に泡径が影響しない

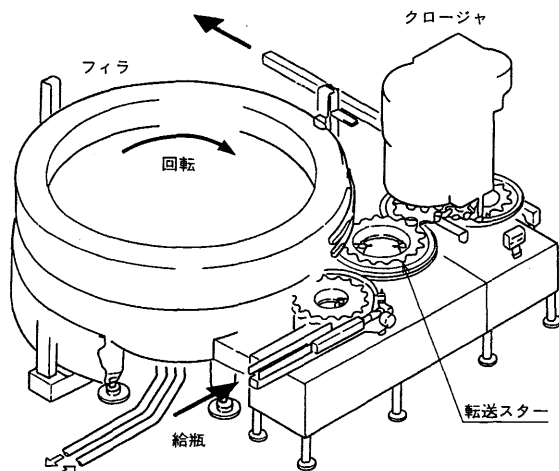


図4 充てん機 回転の中で飲料が瓶に充てんされて排出し、クロージャで封栓するまでの間で泡がこぼれる場合がある。
Filling machine of drinks

からの蒸発で膜が薄くなり、ゆらぎ等の外部刺激で破れる。

吸光スペクトル分析と破泡プロセスから電磁波（赤外線、炭酸ガスレーザー）による消泡メカニズムは、泡膜内の有機物が赤外線を吸収して熱に変換し、破泡プロセスを促進すると推定できる。それゆえに、液体に含有する有機物質の種類によって消泡効果に有意差が生じたのである。

3.4 消泡方法とエネルギー効率

実験の結果から、消泡エネルギー等を表2にまとめた。

表で示すように、超音波を利用した方が最も小さいエネルギーで消泡できる（効率的）。また、赤外線等の利用では、広波長帯域を出力する方がエネルギー効率が良いことが分かる。

4. 超音波消泡システムの開発

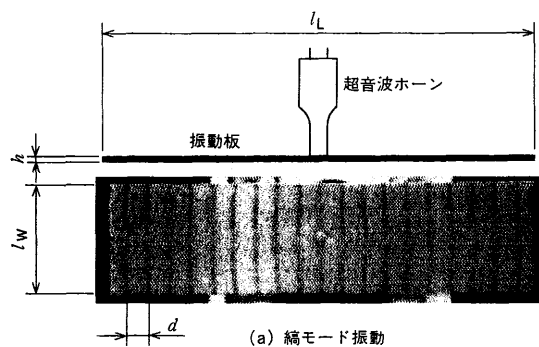
消泡実験から最も高効率の超音波消泡技術を食品機械プラント、特に充てん機に適用することを検討した。

瓶用充てん機（図4）は、空瓶がフィラに供給されて回転中に飲料を充てんする。フィラから排出した充てん瓶は転送スターの回転部を通り、クロージャで封栓する。この機械で瓶から泡がこぼれるのはフィラ排出～クロージャの区間であり、そこに消泡システムが必要となる。

消泡システムの設計には、成長する泡（泡量の時間変化）と瓶の移動を考慮しなければならない。

炭酸飲料等をコップにつく際に分かるように、泡は液中で発生して成長・浮上する。また、ホーンから放射する超音波は指向性が高く、その直下でしか消泡効果がない。

そこで、ホーンに矩形の振動板を結合して超音波音源の拡大（距離の拡張）を図るとともに、開口部の小さな瓶でも有効に音



(a) 縞モード振動
〔共通〕 $l_W = 76.5$ mm, $h = 2.0$ mm



(b) $d = 15.4$ mm, $l_L = 300.5$ mm



(c) $d = 15.3$ mm, $l_L = 298.5$ mm



(d) $d = 15.2$ mm, $l_L = 296.5$ mm

図5 振動板の縞モード インキを塗布した板を振動させると、縞モード振動の腹部にインキが集まり、縞で発生モードが変わる。
Nodal pattern of rectangular plate at vibration

波を利用する集音を検討した。なお、炭酸飲料で発生する泡の径が約 $\phi 1$ mm 前後であることから発生音圧レベルは、155～160 dB（音圧は1200～2000 Pa）以上を設計条件とした。

4.1 超音波音源の拡大化

音源に使用する中心駆動の矩形振動板は、その寸法や駆動周波数で種々の振動モードが現れる。

この中で屈曲共振モードの節が振動板の長辺に垂直で、等間隔の縞（しま）状に現れるモード〔図5（a）〕が最も放射効率が良い⁽²⁾⁽³⁾。この縞モード振動板の形状は、周辺自由な矩形断面棒の屈曲振動に関する理論から求められる。

縞モードの節間隔 d は板の材料常数 C_0 と固有振動数 f 等から

$$d = (\pi C_0 \cdot h / 2 f)^{1/2} \quad (5)$$

$$C_0 = \left[\frac{E}{12 \rho (1 - \nu^2)} \right]^{1/2} \quad (6)$$

振動板の長手方向のみ縞モードを発生させるには、加振点からの曲げ振動に対するインピーダンスが、長手方向を極小、幅方向を極大にする必要がある。したがって、板中央を加振点とした場合に縞モードが発生する振動板の形状は、

$$l_L = (N_{\text{even}} - 1/2) d \quad (7)$$

$$l_W = N_{\text{odd}} \cdot d \quad (8)$$

しかし、縞モード振動する矩形板を理論的に製作することは困難である。以下に、縞モード振動板の製作手順を記述する。

- (1) 一般的な物性値から式(5)、(6)で縞間隔 d を求める。
- (2) d と式(7)、(8)から使用材料における振動板を製作する。

(3) 振動板を加振して振動モードから d を実測する。なお、 d は板にインキを塗布し、発生する模様 (図 5) から測定する (黒色のインキの集まりが振動の腹部)。

(4) 実測の d から所定寸法の振動板を製作する。

上記の手順で、純アルミと高力アルミ合金の板材料について実験したところ、明らかに厚さや材質で理論値と実測値に差が生じた。また、 l_L をパラメータにして縞モード振動の発生状況を調べたところ [図 5 (b)~(d)]、縞間隔の誤差が約 0.1 mm あると縞モードが発生しないことが分かった。

超音波音源の拡大から振動板は、より大きなものが望まれる。今回の実験では、板厚 3 mm の高力アルミ合金にて最大 585×93 mm の振動板が製作可能であった (振動板を大きくすると、低周波の可聴音が発生するようになる)。

4.2 超音波の集音化

縞モードで屈曲振動すると、それぞれ隣接する振動モードの腹からは位相が 180° ずれた音波を放射し、干渉によって減衰が起こる。そのために、振動板の各節線に沿って板を垂直に置く隔壁板が用いられる⁽⁴⁾。また、瓶開口部の大きさに音波を集中させるには、放物面状の反射板 [図 6 (a)] で実現できる。

この構造において振動板の 1 つの腹から放射した音波は、隔壁板間 (隔壁ブロック) を通って反射板で下方の 1 点に集音され、振動の腹と同数で 1 列に並んだ点音源列が長手方向に得られる。このときの振動板からの放射音響パワーと集音点での音圧レベルは、式 (3) から予測することができる。

今回用いた板材で集音点の音圧レベルを試算すると、振動振幅が $6 \mu\text{m}$ で 159 dB、 $6.5 \mu\text{m}$ で 160 dB となる。

4.3 充てん機への適用

前述したように瓶は回転移動するので、集音点はその軌跡に沿う必要はあるが、反射板の形状が三次元的になることから製作が難しい。この問題は、次のようにして解決した。

隔壁ブロックを振動板の音波放射面と直角に平行移動すれば [図 6 (a) の X 軸に平行]、集音点は同じ高さで振動板からの距離のみが変化する。このことを利用して隔壁ブロックを、瓶の移動軌跡に沿うように d_1 ずつ変化させて設計する [図 6 (b)]。

このようにして設計・試作した消泡装置は、非常に高い音圧レベル分布が得られることが実測により判明した [図 6 (c)]。この値は予測どおりで、消泡に十分な音圧レベルである。

4.4 実機でのフィールド実験

試作した消泡装置を炭酸飲料を製造している充てんラインに装着し、その効果を調査した。

瓶口から泡まつがあふれる条件でフィラを運転していたものが、消泡システムの作動で瓶口以下に泡まつが抑えられた。また、あるものは瓶の中まで消泡することが確認できた。

フィールド実験により超音波消泡システムを充てん機に適用することで、成長する泡まつ抑制に効果のあることが判明した。また、飲料の種類及び機械条件の変更で泡立ち条件変化への対応は、消泡装置 (音波の照射領域) を適正な位置へ容易に設定可能な構造とすることで解決できるめどを得た。

5. ま と め

- (1) 各種の物理的・機械的消泡技術の中で、超音波が最もエネルギー効率が高い。
- (2) 超音波の消泡は、その振動振幅が大きいほど消泡力が高い。
- (3) 超音波消泡システムの超音波領域の拡大と集音は、縞モード

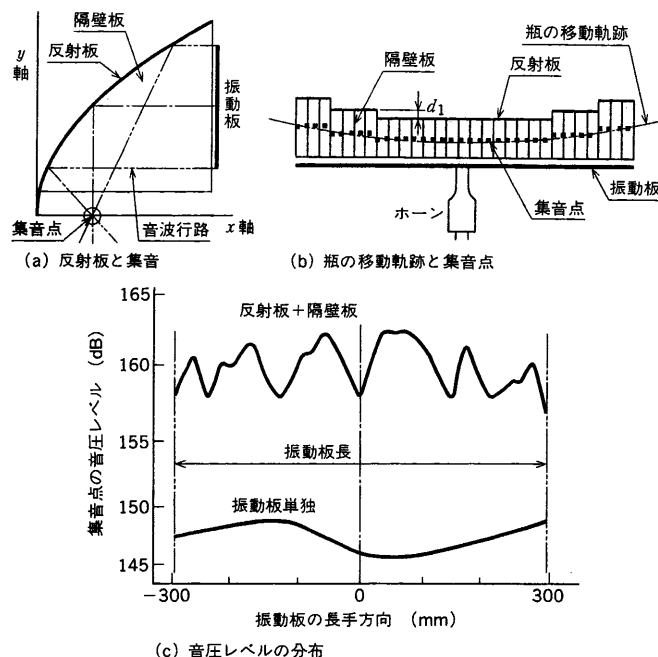


図 6 反射板での集音 放物面状の反射板と隔壁板を用いて、充てん機の転送スターに対応 (瓶の移動軌跡) の自由な集音点の設計ができ、音圧レベルで 158 dB 以上が得られる。
Concentrated sound of reflection plates

振動する矩形板と隔壁板、反射板の組合せで実現でき、155~160 dB の音圧レベルが得られる。

(4) 試作した超音波消泡装置を実機の充てん機に装着し、消泡効果の有効性を確認した。

現在、製品化を推進中である。さらに、排水処理プラント等への展開も合せて検討中である。

記号と単位

A_B : 超音波等の照射面積 (m^2)	N_{even} : 板の長さ方向の節数 = 偶数
C_0 : 振動板の材質に固有な常数 (m/s)	N_{odd} : 板の幅方向の節数 = 奇数
d : 縞モードの節間隔	P_B : 泡の内部圧力 (Pa)
d_B : 泡の直径 (ϕ cm)	t_i : 超音波等の照射時間 (h)
E : ヤング率 (kgf/m^2)	V_B : 消泡した泡量 (ml)
f : 音波の周波数 (Hz)	W_{out} : 出力電力量 (W)
h : 振動板の厚さ (m)	ϵ : 単位消泡量当たりのエネルギー ($\text{W} \cdot \text{h}/\text{ml}$)
I : エネルギー密度 (W/m^2)	ν : ポアソン比
l_L : 振動板の長さ (m)	ρ : 板材の密度 (kg/m^3)
l_w : 振動板の幅 (m)	σ : 液の表面張力 (dyn/cm)

参考文献

- (1) 界面化学研究会, 泡トラブルと消泡技術, 兵庫経営開発センタ (1983)
- (2) 山根ほか, 屈曲振動板と反射板とを用いた空中超音波音源, 日本音響学会誌 32 巻 2 号 (1976) p.83
- (3) 山根ほか, 高次モード曲げ振動板, 縦共振ホーン及び磁気ひずみ振動子からなる空中用強力超音波音源とその応用, 日本音響学会誌 23 巻 3, 4 合併号 (1967) p.134
- (4) 天野ほか, 強力空中超音波による泡の破壊の基礎実験, 日本大学理工学部, 学術講演会論文集 (1988) p.527