

208 定在波音場を利用した物体に付着する液滴の除去法に関する研究

Study on removal technique of water adhering to object using acoustic standing waves.

○中島憲彦, 橋本芳樹 (㈱カイジョー),
小池義和 (芝浦工業大学), 上羽貞行 (東京工業大学精研)

Norihiko NAKAJIMA, Kaijo Corporation, 3-1-5, Sakae-cho, Hamura-shi, Tokyo
Yoshiki HASHIMOTO, Kaijo Corporation
Yoshikazu KOIKE, Shibaura Institute of Technology
Sadayuki UEHA, Tokyo Institute of Technology

This paper describes how droplets adhering to the surface of an object disperse in the aerial standing wave field. We found that a droplet on a surface once moved into the space of the minimum sound pressure at a distance of one-fourth wavelength from the surface and then exploded. We applied this phenomenon to the lead frame dryer and succeeded in removing droplets from the lead frame efficiently by making the quasi standing wave field with the flexural vibration plate.

Key Words: droplets, removal, explosion, acoustic standing waves

1. はじめに

現在、リードフレームの乾燥方法には、スポンジなどを利用して直接拭き取る方法と熱やエアなどを利用して非接触で乾燥する方法がある。スポンジなどを用いて直接拭き取る方法では、凹凸のあるリードフレームの拭き取りが不可能であり、非接触で乾燥する方法では、熱やエアなどを用いて乾燥するため、ランニングコストが高いという問題がある。そのため、省エネかつクリーンなエネルギーを利用した乾燥装置の実現が市場から求められている。

そこで筆者らは強力超音波を用いた空中定在波音場を利用して、リードフレームの表面に付着した液滴を飛散除去する方法を提案した。本論文では、液滴が飛散するメカニズムを実験的に解明し、本方式によるリードフレームの除液効果を検討するため、リードフレームの挿入方法、搬送速度、親和性、形状をパラメータにして、それぞれの最適な除液条件を実験的に明らかにしたので、その結果について報告する。

2. 同相ピストンモード音源を用いた液滴の飛散実験¹⁾

2.1 実験装置

同相ピストンモード音源を用いた空中定在波音場中で、液滴が飛散する位置を検討するため、Fig.1 に示す装置を用いて実験を行った。ここで、ホーンの駆動周波数は 19.7kHz、ホーン先端振動振幅は $50 \mu\text{m}_{pp}$ 一定、Fig.1 中の①~③は次に示す通り液滴を設置する位置である。ただし、ここで使用した液体は水である。

- ① 空間に設置した $\phi 0.53\text{mm}$ の棒の先に液滴を付着
- ② ホーンに対向した反射板の表面に液滴を付着
- ③ ホーンと反射板との間に平行に設置したリードフレームの表面に液滴を付着

2.2 音圧分布

マイクロフォンを用いて、音源と反射板との間に形成する空中定在波音場の音圧分布を測定した。その結果を Fig.2 に示す。ここで、音源と反射板との距離 d は 27.5mm 一定である。この距離は $n\lambda_a/2$ (n は整数、 λ_a は空気中の音波の波長) に相当し、音源と反射板との間の平均音圧が極大となるための条件²⁾ でもある。

2.3 液滴の飛散位置と飛散状況の観察

(1) 空間中の液滴の飛散

Fig.1 中の①に示すように空間に液滴を置いて、液滴が飛散する位置を観察した。液滴を Fig.2 中の音圧の腹 b から徐々に音圧の節 c まで移動させ、その様子をデジタルビデオカメラで連続的に撮影した結果を Fig.3 に示す。

Fig.3 より、音圧の節 (粒子速度の腹) に相当する位置で、液滴が飛散することを確認した。また、この位置は液滴が浮揚する位置²⁾ と一致している。

(2) 物体に付着している液滴の飛散

Fig.1 中の②に示すように反射板に液滴を付着させ、物体自体が空中定在波音場の反射板として作用する場合について、液滴が飛散する様子を撮影した。反射板から 29mm の距離に設置した音源を、徐々に 28mm に移動させた時の反射板に付着した液滴の飛散状況を Fig.4 に示す。

Fig.4 より、反射板に付着している液滴は、一旦、反射板より $\lambda_a/4$ 離れた空中定在波音場の音圧の節にあたる空間、すなわち、Fig.2 中の音圧の節 a に移動してから、飛散することが明らかになった。この現象は次のように説明できる。

- ① 反射板の表面は音圧が極大になるため、反射板に付着した液滴は、音圧が極小になる反射板表面から $\lambda_a/4$ 離れた空間に移動させられる。

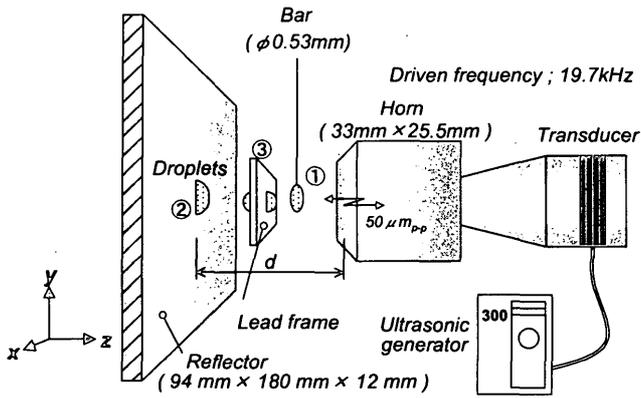


Fig.1 Experimental setup.

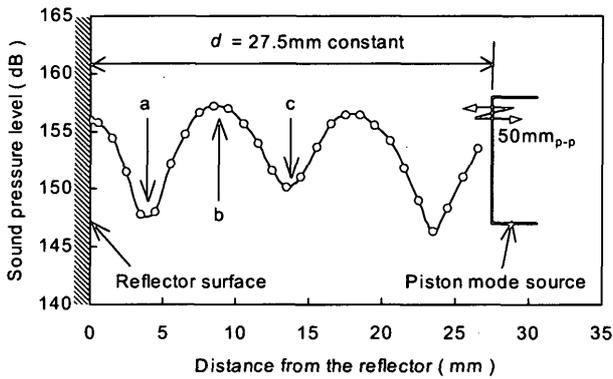


Fig.2 Distribution of sound pressure.

- ② 音圧が極小になる空間は粒子速度が極大になるため、この空間に移動させられた液滴は、この粒子速度により飛散する。
- (3) リードフレームに付着している液滴の飛散

Fig.1 中の③に示すように、液滴を付着したリードフレームを音源と反射板との間に平行に設置させ、その除液効果を実験的に検討した。

その結果、音源と反射板との間に形成された空中定在波音場はリードフレームによって乱され、音圧が下がり、リードフレームの除液効果は低下した³⁾。またリードフレームの形状毎にリードフレームを設置する位置を変更しなければならないなどの問題もあるため、実用的でない判断した。

そこで筆者らは、リードフレームに付着した液滴を除去するため、空中定在波音場の拡大と音圧の増強を目的に、同相ピストンモード音源から縞モードたわみ振動板音源に変更して検討を進めた。

3. 縞モードたわみ振動板音源を用いた液滴の飛散実験

3.1 実験装置

音源を同相ピストンから縞モードたわみ振動板⁴⁾に変更して、液滴が飛散する位置とその量を検討した。その実験装置を Fig.5 に示す。ここで、音源の駆動周波数は 19.7kHz、先端振動振幅は 15 μm_{p-p}一定、使用した縞モードたわみ振動板は、長辺の長さ 373.1mm、短辺の長さ 120.4mm、厚さ 5mm、材質はジュラルミンの板である。また Fig.5 中の①~③は液滴を設置する位置である。

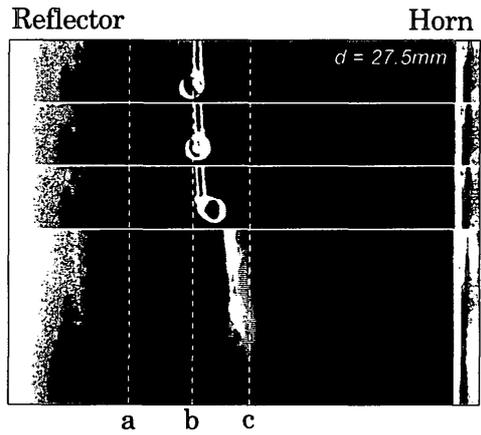


Fig.3 Exploding situation of a water droplet in the acoustic standing wave field.

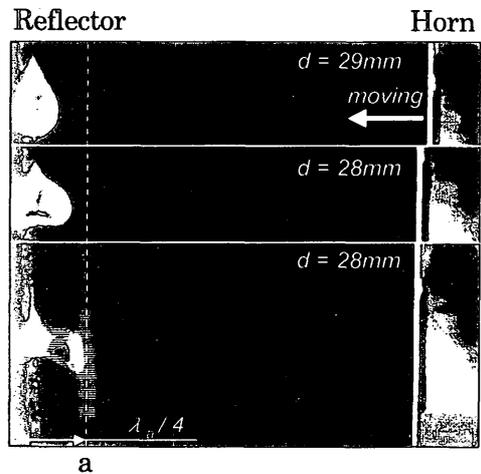


Fig.4 Exploding situation of a water droplet adhering to the reflector.

3.2 音圧分布

縞モードたわみ振動板音源と反射板との間には、疑似定在波音場が形成される。この疑似定在波音場の音圧分布を数値計算と実測により検討した。

振動板と反射板との距離 d_z は、式 (1) より算出し、 $d_z = 47\text{mm}$ ($n = 5$) に設定した。

$$d_z = n \cdot \left(\frac{1}{2} \lambda_z \right) = \frac{n}{2} \cdot \frac{\lambda_a}{\sin \theta} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad \dots (1)$$

ここで、 λ_z は振動板に垂直な方向での音波の波長、 θ は放射角 $\cos^{-1}(\lambda_a / \lambda_x)$ である。式 (1) は、音源と反射板との間の平均音圧が極大となるための条件⁵⁾ でもある。

疑似定在波音場の $y-z$ 面と $z-x$ 面の音圧分布を境界要素法で計算した。その結果を Fig.6 に示す。ここで、色の白黒は音圧の高低を表し、白色は高い音圧を示している。尚、Fig.6 中の一点鎖線 A-A は音源の中心軸である。

Fig.6 中の一点鎖線 A-A 上の音圧をマイクロフォンで測定した結果を Fig.7 に示す。Fig.7 より、音圧の計算値と測定値はほぼ一致し、計算値の妥当性が示された。このことから疑似定在波音場は、中心軸上の $y-z$ 面とこの $y-z$ 面から平行に $\lambda_x/2$ 毎に

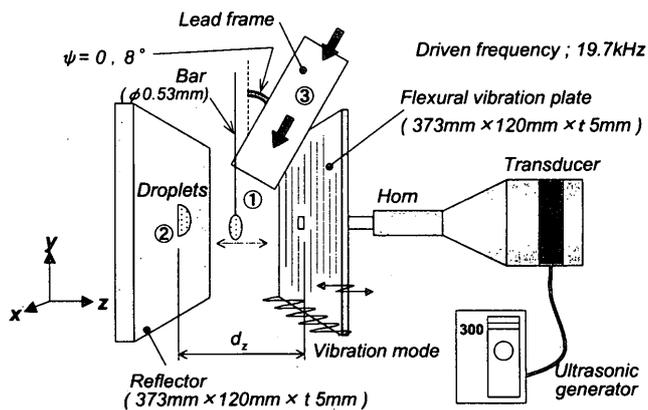


Fig.5 Experimental setup.

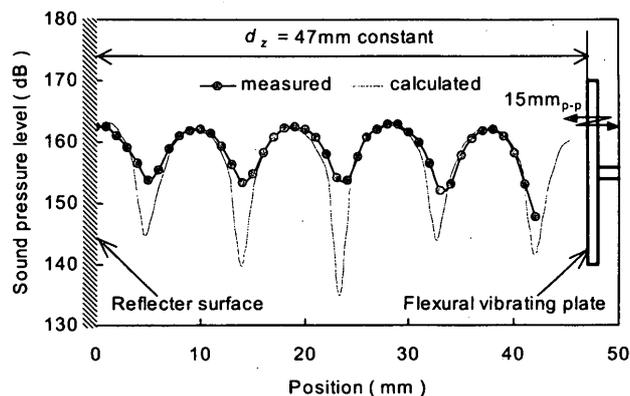


Fig.7 Distribution of sound pressure.

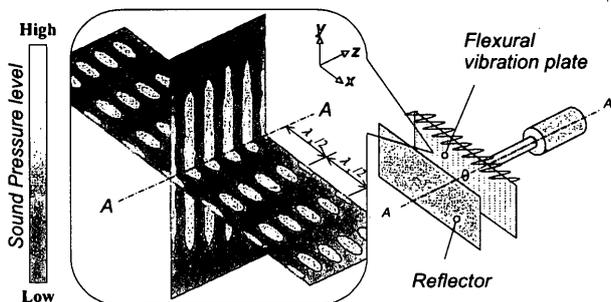


Fig.6 Distribution of sound pressure calculated by a boundary element method.

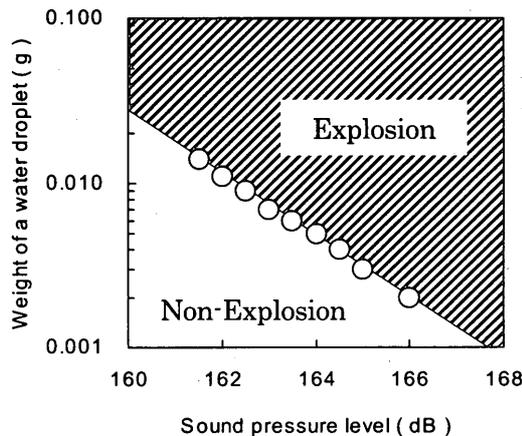


Fig.8 Weight of a water droplet vs. sound pressure level.

離れて存在する y z 面に強力な定在波音場が形成されていることがわかった。液滴の飛散はこの擬定在波音場の音圧の節で起こると考えられる。

3.3 液滴の飛散位置と飛散状況の観察³⁾

(1) 空間中の液滴の飛散

疑似定在波音場中、液滴が飛散する位置を確認するため、Fig.5 中の①に示すように、液滴を疑似定在波音場中の空間に置いて実験を行った。

その結果、予想通り、液滴が飛散する位置は、中心軸上の y z 面とこの y z 面から平行に $\lambda_x/2$ 毎に離れて存在する y z 面中に形成される疑似定在波音場の音圧の節にあたる空間であることを確認した。

(2) 物体に付着している液滴の飛散

Fig.5 中の②に示すように反射板に液滴を付着させ、物体自体が疑似定在波音場の反射板として作用する場合について実験的に検討した。

その結果、同相ピストンモード音源の場合と同様に、物体に付着している液滴は、一旦、物体より $\lambda_z/4$ 離れた疑似定在波音場の音圧の節にあたる空間に移動し、飛散することが明らかになった。

(3) リードフレームに付着している液滴の飛散

Fig.5 中の③に示すように、疑似定在波音場を乱すことなくリードフレームに付着した液滴を音圧の節にあたる空間に運ぶため、液滴が飛散可能な y z 面中にリードフレームを挿入し、飛散可能な液滴の量と音圧極大値との関係を実験的に検討した。

その結果を Fig.8 に示す。但し、リードフレームの挿入角度は $\phi = 0^\circ$ である。

Fig.8 より、音圧が高ければより小さな液滴まで飛散することができるが、音圧が一定の場合、飛散可能な液滴の大きさには下限があることがわかった。

4. リードフレームの除液効果

リードフレームに一樣に液体を付着させ、リードフレーム全面が必ず疑似定在波音場の音圧の節にあたる空間を通過するように、Fig.5 中の③に示すように、リードフレームを挿入角度 $\phi = 8^\circ$ で音場中を搬送させ、除液効果を実験的に検討した。

本実験の除液効果の評価基準として、除液率 = (除液後にリードフレームから取り除かれた液体の重量) / (除液前にリードフレームに付着している液体の重量) $\times 100(\%)$ を定義した。これは、除液率が高いほど、除液効果も高いことを表している。

ここで、使用したリードフレームを Fig.9 に示す。リードフレームの形状は開孔率 60%、31%、20% と 5mm の厚さを持つ凹凸形状の計 4 種類である。リードフレーム表面の親和性は、接触角 10 度 ~ 20 度の親水性と 60 度 ~ 90 度の疎水性の 2 種類を使用した。

4.1 搬送速度

Fig.9 中の④のリードフレームを用いて、リードフレームの搬送速度と除液効果との関係を実験的に検討した。その結果を Fig.10 に示す。

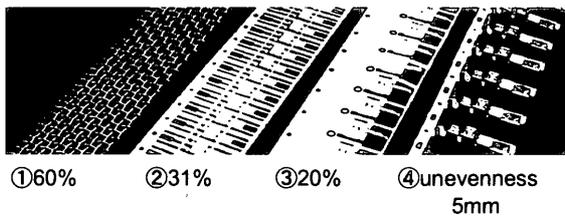


Fig.9 Lead frame forms and punched space ratio.

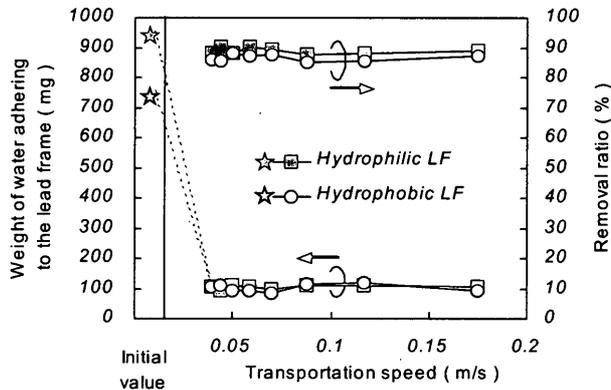


Fig.10 Weight of residual water, removal ratio vs. transportation speed.

Fig.10 より、搬送速度が 0.03m/s から 0.175m/s の間では除液率がほぼ一定になることがわかった。Fig.8 に示す通り、ある音圧に対して、飛散可能な液滴の大きさに下限があるため、音波照射後、液滴は瞬時に飛散されるが、その後さらに音波照射しても飛散できない大きさの液滴が残ると考えられる。本実験の音波放射時間では飛散できない大きさの液滴がほぼ一定量残るため、搬送速度に関係なく除液率もほぼ一定になると考えられる。

4.2 親和性

Fig.9 中の①～④の形状で、それぞれ表面が親水性および疎水性のリードフレームを用いてリードフレームの親和性の影響について検討した。その結果を Fig.11 に示す。

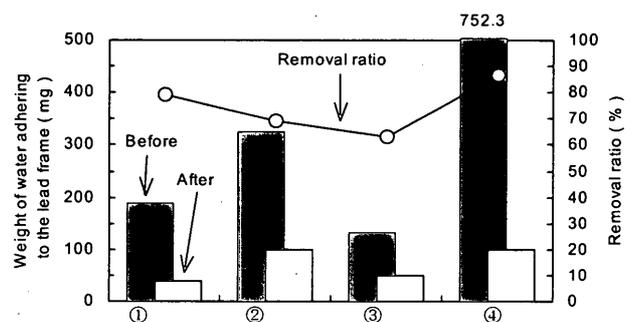
Fig.11 中の黒い棒グラフは除液前にリードフレームに付着している水の重量を示し、白い棒グラフは除液後にリードフレームに残存した水の重量を示している。折れ線グラフは除液率を示している。

Fig.11 より、リードフレームの形状に関係なく、親水性のリードフレームのほうが除液効果は高くなることがわかった。これは、除液後にリードフレームに残る水の量が、親和性に関係なくほぼ同じ量になるのに対し、除液前に付着していた水の量は親水性のほうが多いため、見かけ上、除液率は上がると考えられる。

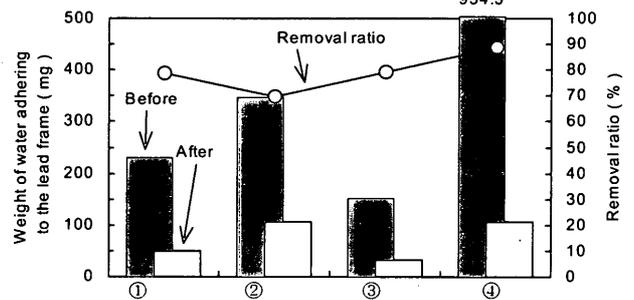
4.3 形状

Fig.9 中の①～④の形状のリードフレームを用いて、形状の違いによる除液効果を検討した。

Fig.11 より、リードフレームの形状が平面なものより 5mm 程度凹凸のあるほうが除液効果は高くなることがわかった。このときの除液率は約 90% を実現した。



(a) Hydrophobic Lead frames



(b) Hydrophilic Lead frames

Fig.11 Weight of water adhering to the lead frames, removal ratio vs. lead frame forms.

5. まとめ

強力超音波を用いた空中定在波音場を利用して、リードフレームの表面に付着した液滴を飛散除去する方法を検討した。その結果、物体表面に付着した液滴が飛散するメカニズムとリードフレームの乾燥法について、次のことが明らかになった。

- (1) 物体表面に付着した液滴は物体表面で飛散するのではなく、一旦 1/4 波長離れた空中定在波音場の音圧の節にあたる空間に運ばれてから飛散することが明らかになった。
- (2) リードフレーム両面に付着した液滴は、振動板のたわみ振動の腹毎に形成された強力な擬定在波音場の音圧の節にあたる空間を利用して、有効に除液できることが明らかになった。
- (3) 擬定在波音場を利用したリードフレームの除液効果は、
 - ① リードフレームの搬送速度が 0.03m/s から 0.175m/s の間で、除液効果はほぼ一定。
 - ② リードフレームの表面が疎水性より親水性のほうが、除液効果は高い。
 - ③ リードフレームの形状が平面なものより 5mm 程度凹凸があるほうが、除液効果は高い。このときの除液率は約 90% を実現した。
 であることが明らかになった。

参考文献

- 1) 中島, 橋本, 小池, 上羽, 音響講論, pp.1123-1124(1998)
- 2) R.R.WHYMARK, Ultrasonics, pp.251-261(1975)
- 3) 中島, 橋本, 小池, 上羽, 音響講論, pp.875-876(1999)
- 4) 山根, 川村, 日本音響学会誌(2), pp.83-91(1976)
- 5) 伊藤, 川村, 音響講論, pp.701-702(1983)