

論文

動吸振器を用いた超音波洗浄機の騒音低減

長谷川徳慶^{*1)} 神田浩一^{*2)} 中田 修^{*2)} 平間麻子^{*2)} 高田省一^{*2)}

Reduction of the Noise arising from an Ultrasonic Cleaner with Dynamic Absorber

Norichika HASEGAWA, Koichi KANDA, Osamu NAKATA, Asako HIRAMA and Shoichi TAKADA

Abstract We have tried to reduce the noise arising from the resonance of washing liquids (spurious resonance) using a dynamic absorber for ultrasonic cleaners which utilize cavitations. First, in order to investigate the effects of a dynamic absorber, we simulated the vibration of the dynamic system with a mass-spring model. According to the results of the investigation, we have found the following facts. (1) The dynamic absorber of which the mass had a few decade grams have been effective on washing liquids of which the mass had a few decade kilograms. (2) The tolerance of the difference between the resonance frequency of the dynamic absorber system and that of the washing liquid system was a few hundred Hz. (3) A loss factor of 0.1 of dynamic absorber has been enough to reduce the noise arising from the spurious resonance. Secondly, we prepared a damped steel beam as the dynamic absorber and equipped them on the vessel wall of the cleaner taking into account the vibration mode. According to the results of the experiment, the amount of the noise reduction reached 30dB up to 40dB.

Keywords Ultrasonic cleaner, Spurious resonance, Dynamic absorber, Damped steel beam, Loss factor

1. はじめに

キャピテーションを利用する超音波洗浄機は、強力な洗浄力を特長に持つことから産業界では盛んに利用されている。一方、そこから発生する騒音レベルは 80dB を超え、さまざまな方法でその消音対策が試みられている。しかし、抜本的な解決に至っていないのが現状である^{1),2)}。

図1は、縦、横、高さがそれぞれ 30cm, 40cm, 40cm のステンレス製超音波洗浄槽に液深 20cm の水を入れ、振動子を 26 ± 1 kHz の信号で駆動し、そのときに発生する騒音を洗浄槽側面から 1m 離れた地点で測定した騒音の周波数分析である。この中で 4kHz 付近に音圧ピークが観察される。これは、平成 12 年度の技術開発研究によって洗浄液自体の共振（不要共振）に起因する音であることが分かっている³⁾。

この共鳴音は、

定常的でなく、突発的に発生する。

共振に伴う音のため、純音に近い。

洗浄槽の寸法によるが、周波数がおおむね 4 ~ 6kHz である。この周波数帯域は、人間の聴感上は敏感であり、特に大きく聞こえる。

といった特徴を有する。このため、同じ騒音レベルであったとしても、共鳴音が発生する限りは、心理的に大きな負担をもたらすと考えられる。逆にいえば、この音を抑えれば、広帯域の騒音が残ったとしても、心理的には改善されると考えられる。

本研究では、共鳴音の低減を目的とする。この共振は、洗浄液全体が伸縮するようなモードをもつ。数十 cm 程度の超音波洗浄槽を考えると、洗浄液の質量は数十 kg にも及ぶ。この共振をバネ・マス系に置き換えると、数十 kg のおもり

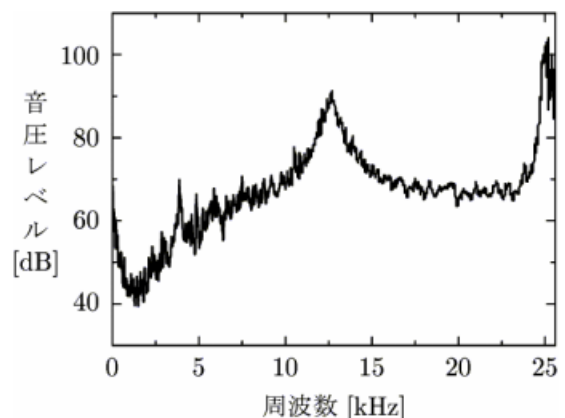


図1 超音波洗浄層からの騒音

*1) 計測応用技術グループ(現東京都総務局) *2) 光音計測技術グループ

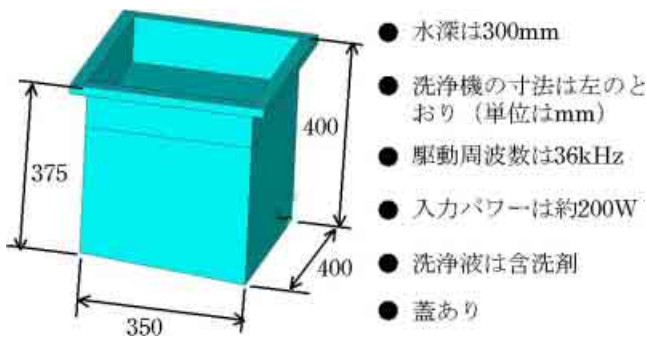


図2 実験に用いた超音波洗浄槽の外観図

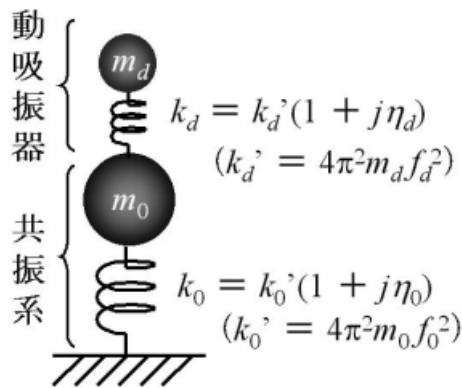


図3 動吸振器のバネ・マスモデル

が数 kHz の共振周波数で振動するようなモデルとなる。ここに、この共振を抑えることの難しさがある。そこで、本研究では、共振を抑えるのによく用いられる動吸振器を応用して共鳴音の低減を試みる。

2. 実験方法

2.1 実験に用いた超音波洗浄槽

実験に用いた超音波洗浄槽の外観図を図2に示す。ほぼ直方体型をしたステンレス製洗浄槽である。槽壁の厚さは、全槽壁について2mmである。

2.2 動吸振器の設計

2.2.1 パラメータ値の最適化

動吸振器をバネ・マス系モデルで表現すると、図3のようになる。共振系(洗浄液)に対し、動吸振器に対応するもうひとつのバネ・マスが付随するようなモデルとなる。動吸振器は、それ自体と共振系との共振周波数を同じにすることで、共振を抑えるものである。

表1 動吸振器のバネ・マス系モデル

	質量	バネ定数	損失係数
共振系 (洗浄液)	m_0	k_0	η_0
動吸振器	m_d	k_d	η_d

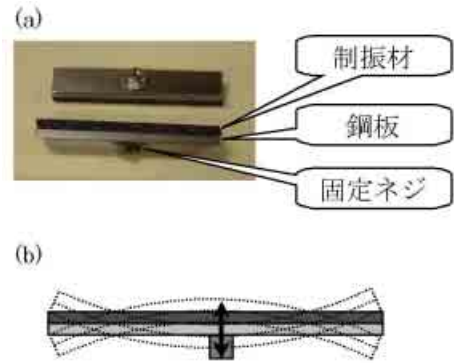


図4 動吸振器として作製した梁状制振鋼板

図3において考慮すべきパラメータを表1にまとめる。なお、ひとつのバネ・マスに伴う共振周波数 f は、質量とバネ定数との間に図3に示す関係があることから、バネ定数の代わりに共振周波数をパラメータとすることができる。

動吸振器の効果は、共振系質量に駆動力 F_0 を加え、それに対する共振系質量の振動振幅 A_0 で見ると、共振時は、同じ F_0 に対して A_0 が大きくなることからピークが現れる。動吸振器の効果が見えるほど、この共振ピークは抑えられていく。なお、図3のバネ・マス系について、 F_0/A_0 を求めると、

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} \left[\frac{F_0}{A_0} \right] &= k_0 + k_d - m_0 \omega^2 \\ &\quad - \frac{k_d^2 [k_d (1 + \eta_d^2) - m_d \omega^2 (1 - \eta_d^2)]}{(k_d - m_d \omega^2)^2 + (k_d \eta_d)^2} \\ \operatorname{Im} \left[\frac{F_0}{A_0} \right] &= k_0 \eta_0 + k_d \eta_d - \frac{k_d^2 \eta_d (k_d - 2m_d \omega^2 + k_d \eta_d^2)}{(k_d - m_d \omega^2)^2 + (k_d \eta_d)^2} \end{aligned} \quad (1)$$

(ただし、 $\omega = 2\pi f$)

となる。

表1に示すパラメータのうち共振系(洗浄液)に関するパラメータについては、平成12年度技術開発研究の実験から、

質量 m_0	: 20kg
共振周波数 f_0	: 4540Hz
損失係数 η_0	: 0.001

と固定する。

2.1.2 動吸振器の作製

動吸振器には、図4に示す梁状制振鋼板を使用した。具体的には梁状の鋼板に制振材を貼付したもので、この曲げモードを利用して動吸振器とした。洗浄槽壁へ固定するために、中央部にネジを取りつけた。

この制振鋼板を利用するにあたり、共振周波数 f_d を調整する必要がある。そのため、まず、任意の長さの制振鋼板を

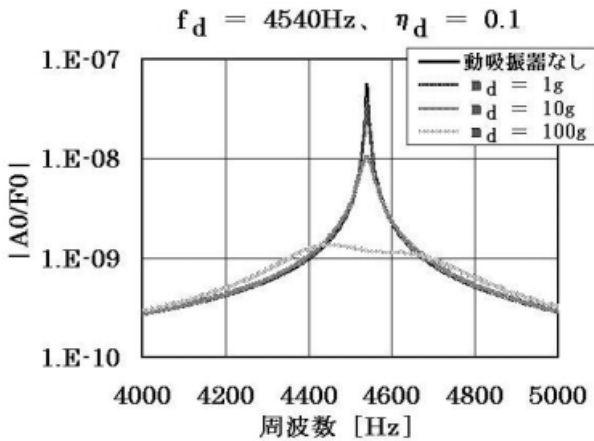


図5 動吸振器による効果の質量依存性

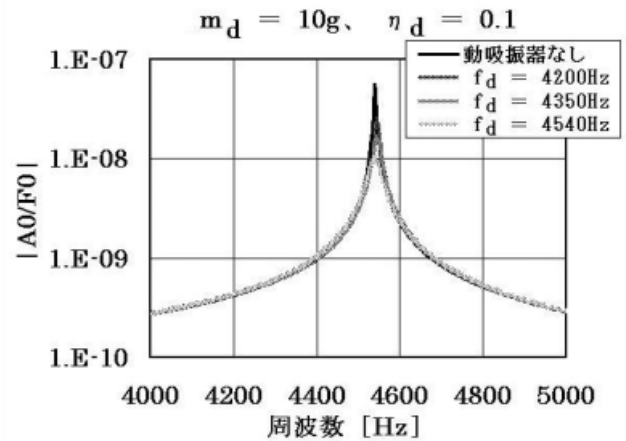


図7 動吸振器による効果の共振周波数依存性(動吸振器の質量:10g)

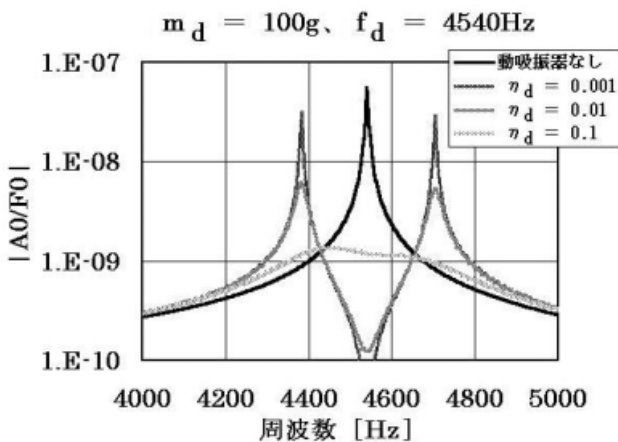


図6 動吸振器による効果の損失係数依存性

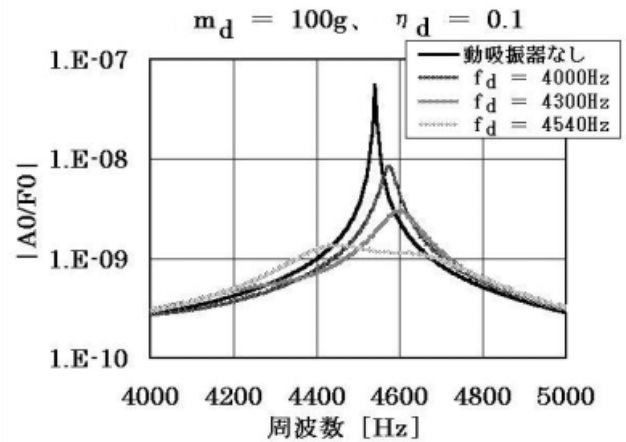


図8 動吸振器による効果の共振周波数依存性(動吸振器の質量:100g)

用意し、その機械アドミタンスを測定する。その反共振周波数が f_d となる。制振鋼板の長さ l と f_d との間には、その断面構造が同じであれば

$$f_d \cdot l^2 = (\text{一定}) \quad (2)$$

という関係があることから、特定の断面構造を持つ制振鋼板については、先のデータを利用し、長さを変えることで f_d を調整することができる。

2.3 洗浄槽からの騒音の測定

本研究で着目する共鳴音は、非定常な音である。一方で、洗浄液の液温は、駆動時間とともに上昇し、共振条件が変化する。以上から、液温が安定するまで駆動し続けた後に、5~10分間の平均音を測定した。なお、安定した際の液温は、約30であった。

測定箇所は、洗浄槽のうち大きな壁面(40cm×40cmの面)の中心から30cm離れた点である。

3. 結果

3.1 動吸振器の効果

式(1)を用い、 $|A_0/F_0|$ から動吸振器の効果をシミュレートした。

3.1.1 動吸振器の質量による効果

動吸振器の質量 m_d を変化させたときの共振の抑制効果を図5に示す。動吸振器の共振周波数 f_d を4540Hz、損失係数 η_d を0.1で固定し、質量 m_d を1g, 10g, 100gと変化させた。

図5から、動吸振器の質量 m_d が大きいほど、共振抑制の効果が大きいことが分かる。また、数十kgの共振を抑えるのに、数十gの動吸振器で十分な効果があることが分かる。

3.1.2 動吸振器の損失係数による効果

動吸振器の損失係数 η_d を変化させたときの共振の抑制効果を図6に示す。動吸振器の質量 m_d を100g、共振周波数 f_d を4540Hzで固定し、損失係数 η_d を0.001, 0.01, 0.1と変化させた。

図6から、動吸振器の損失係数 η_d が大きいほど、共振抑制の効果が大きいことが分かる。また、共振を抑えるのに、動吸振器に0.1程度の損失係数が必要であることが分かる。

3.1.3 動吸振器の共振周波数による効果

動吸振器を作製する際、その共振周波数を共振系(洗浄液)のそれと正確に合わせることは困難である。実際には、多少のずれが生じると考えられる。そこで、動吸振器の共振周波数がずれたときの共振の抑制効果を検討する。

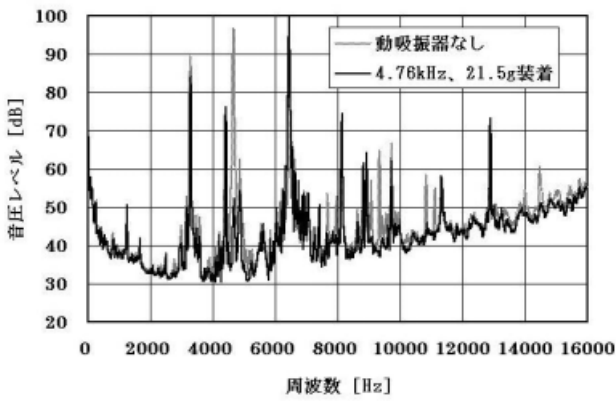


図9 動吸振器を1つ貼付した場合の騒音

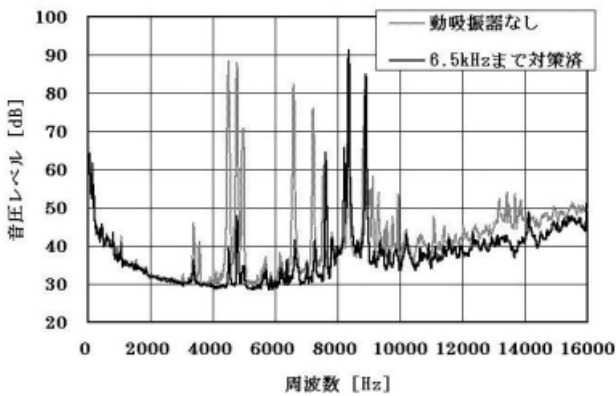


図10 6.5kHzまで対策した場合の騒音

動吸振器の共振周波数 f_d を変化させたときの共振の抑制効果を図7に示す。動吸振器の質量 m_d を 10g, 損失係数 η_d を 0.1 で固定し, 共振周波数 f_d を 4200Hz, 4350Hz, 4540Hz と変化させた。

図7から, 共振周波数 f_d がずれるほど, 共振抑制の効果が小さくなることが分かる。効果が期待できるのは, この場合 100Hz 程度のずれの範囲であると見積もることができる。

次に, 動吸振器の質量 m_d を 100g とした場合について, f_d を変化させたときの共振の抑制効果を図8に示す。損失係数 η_d を 0.1 で固定し, 共振周波数 f_d を 4000Hz, 4300Hz, 4540Hz と変化させた。

図8から, 動吸振器の質量 m_d が 10g のときよりは, 共振周波数 f_d が大きくずれていても効果があることが分かる。つまり, 共振周波数のずれに対する許容度が広がっていることを示している。

3.2 動吸振器による騒音の低減

3.2.1 特定周波数の動吸振器を1つ装着した場合

図9は, 動吸振器を装着しない場合と, 共振周波数 f_d が 4760Hz, 質量 m_d が 21.5g である動吸振器を1つ装着した場合それぞれについて, 洗浄槽からの騒音を周波数分析した結果である。動吸振器は, 40cm × 40cm の槽壁のほぼ中央に装着した。

図9を見ると, 動吸振器の共振周波数に相当する 4.7kHz 付近の音圧が, 40dB 程度低減している様子が確認できる。

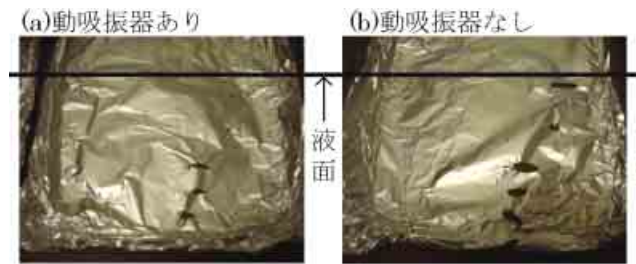


図11 洗浄効果の確認

また, 装着した動吸振器の質量は 21.6g であり, 数十 g の動吸振器で十分な騒音低減効果があることが確認できる。

3.2.2 6.5kHz まで対策した場合

次に, 6.5kHz まで対策した場合の周波数分析図を図10に示す。この場合, 数十 g 程度の動吸振器を, 共振周波数に注意しながら 10 個弱装着している。また, 周波数によって洗浄液のモードが異なるため, それぞれのモードにおける振動の腹に相当する部分に注意して動吸振器を装着している。

図10から分かるように, 対策を施した周波数帯域においては, 大きな共鳴音は観測されなかった。8kHz を超える帯域に大きな共鳴音が観測されるが, この帯域は, 人間の聴感上はそれほど敏感ではない。実際, 図10の音を聞いても, 耳栓等なしに不快感なく作業ができるものであった。

3.3 洗浄効果

動吸振器を装着した場合の洗浄効果を確認した。具体的には, 動吸振器を装着した場合とそうでない場合でアルミニウム箔を入力パワー 200W で駆動中の洗浄液に 1 分間浸し, 侵食の程度で洗浄効果を確認した。その様子を図11に示す。

図11から, 動吸振器を装着することによって洗浄効果がやや低下していることがわかる。これは, 使用した動吸振器である梁状制振鋼板は高次モードを有し, それが, 洗浄効果の大きい高周波数の振動を抑制しているためと考えられる。

4. まとめ

超音波洗浄機から発せられる共鳴音について, 動吸振器による効果を確認することができた。その中で, 数十 kg の共振系 (洗浄液) に対し, 数十 g の動吸振器で十分な効果があることが分かった。

一方, 動吸振器を装着しても洗浄効果を維持すること, また, 液温の上昇や洗浄物の出入れに伴う洗浄液の共振条件が変化しても, 騒音低減の効果を維持することは, 今後の課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 安藤英一: 超音波 TECHNO, Vol.9, No.8, 44-48(1997).
- 2) D.H.McQueen: Ultrasonics, Vol.26, 286-290(1988).
- 3) 長谷川徳慶: 電子情報通信学会技術研究報告会〔超音波〕, Vol.101, No.514, 19-24(2001).

(原稿受付 平成 16 年 8 月 6 日)