有限要素法による超音波洗浄槽の音響モードの解析

非会員 劉 穎* 正員 山淵 龍夫*

Finite Element Simulation of Acoustic Modes in an Ultrasonic Cleaning Tub

Ying Liu*, Non-member, Tatsuo Yamabuchi*, Member

In an Ultrasonic cleaning tub, modes with high sound pressure, which are effective for cleaning, are called acoustic modes. In this paper, we show the effect of the presence of a washing object, when a stainless block which is fixed to the bottom of an Ultrasonic cleaning tub.

キーワード：超音波洗浄槽，有限要素法，音響モード，振動子，洗浄物

Keywords: Ultrasonic cleaning tub, Finite element method, Acoustic mode, Vibrator, Washing object

1. はじめに

超音波洗浄槽は古くから使用されているが，槽内に発生する音圧分布については，あまり明らかにされておらず，実用的な洗浄槽を作る場合は，経験に基づき，試行錯誤的に行われている。前報⁽¹⁾では，洗浄槽内に生じるモードに対して，洗浄槽の大きさ，槽壁の厚さ，材質の影響について，前報⁽²⁾では，洗浄槽の底面に振動子と想定するステンレスのブロックを取り付けた場合，音響モードへの影響について，それぞれ解析を行ったが，本報では，洗浄槽の底面にステンレスのブロックを取り付け振動子と想定し，洗浄物も槽内に入れたとき，音響モードへの影響について調べる。

2. 有限要素表示式

実際の洗浄効果はキャピテーションによるものであるが，ここでは，線形の槽板の振動系と音響系が結合した3次元の有限要素モデルを用いて解析を行う。有限要素法解析により得られた連立方程式は次のようである。

$$\left. \begin{aligned} ([S] - \omega^2[M])\{U\} - [\Gamma]\{P\} &= \{0\} \\ ([\hat{S}]/(\hat{\rho}\omega^2) - [\hat{M}]/(\hat{\rho}c^2))\{P\} - [\Gamma]^T\{U\} &= \{W\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで， $\{U\}$ ：系全体の節点変位ベクトル， $\{P\}$ ：系全体の節点音圧ベクトル， $[S]$ ， $[M]$ ：振動系の剛性，質量行列， $[\hat{S}]$ ， $[\hat{M}]$ ：音響系のイナータンス，エラストランス行列， $[\Gamma]$ ：結合行列， $\hat{\rho}$ ：水の密度， c ：水中の音速， $\{W\}$ ：音圧駆動ベクトル。

本来は，洗浄槽の全領域を解析しなければならないが，ここでは，洗浄槽を1/4部分に分割し，1/4部分のx-z面

とy-z面に，(ゼロ，ゼロ)，(剛壁，ゼロ)，(ゼロ，剛壁)，(剛壁，剛壁)という4種類の境界条件をそれぞれ設定し，それぞれ解く。このように，4種類の解を合わせると，全領域の解が求められる。ここでは，簡単のため，(剛壁，剛壁)の境界条件を採用した。図1に，計算を行った洗浄槽モデルの断面図と要素分割を示す。ステンレス槽の厚さは1.2mm，ステンレス槽の厚み方向は1要素である。(x, y, z)方向の内部寸法は(5, 4, 7)cm，要素分割は，(10, 8, 16)である。ここで用いたステンレスの物理定数は，ヤング率 $15 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ ，ポアッソン比0.295，密度 7800kg/m^3 である。z方向上部の水面が空気と接する面で音圧をゼロと置いている。駆動は水中の要素の1面を速度駆動で行うものとする。

3. 超音波洗浄槽内に生じる音響モード

本論文では，音響モードの基本的な性質の解明を目的としているので，対象モードは低次モードに限定した。ここで計算を行っているモデルでは，計算精度を考慮し共振周波数は31kHz程度までを対象とした。洗浄槽内生じるモードの中に，水中の大部分の音圧が大きい，洗浄に有利なモー

図1 超音波洗浄槽のx-z断面，y-z断面，x-y断面の断面図と要素分割

Fig. 1. Cross-sectional diagrams showing elements of ultrasonic cleaning tub for x-z, y-z, and x-y cross sections.

* 富山大学工学部

〒930-8555 富山県富山市五福 3190

Faculty of Engineering, Toyama University

Gofuku 3190, Toyama 930-8555

図2 水で満たされた洗浄槽の音響モード図 ($y=0$ における x - z 断面)

Fig. 2. Diagram of acoustic modes ($y=0$, x - z cross sections).

図3 洗浄物を入れた場合の音響モード図 ($y=0$ における x - z 断面)

Fig. 3. Diagram of acoustic modes, when a washing object is immersed ($y=0$, x - z cross sections).

図4 ステンレスのブロックを底面に取り付けた場合の音響モード図 ($y=0$ における x - z 断面)

Fig. 4. Diagram of acoustic modes, when a stainless block is fixed to the bottom of an Ultrasonic cleaning tub ($y=0$, x - z cross sections).

図5 ステンレスのブロックを底面に取り付け、洗浄物を入れた場合の音響モード図 ($y=0$ における x - z 断面)

Fig. 5. Diagram of acoustic modes, when a stainless block is fixed to the bottom of an Ultrasonic cleaning tub and a washing object is immersed ($y=0$, x - z cross sections).

ドを音響モードと名付けた。まず、図2に、水で満たされた洗浄槽の音響モードを示している。各モードは卵形をしており、水中の大部分の音圧が大きい。次に、図3に、直方体要素1つ(1-1,1-1,8-8の位置1ブロック)を洗浄物と考え、洗浄物の機械的境界条件が自由な場合の音響モードを表している。洗浄物の材質はステンレスと想定する。何も入れない場合の図2と比べ、モードの形に乱れは少なく、共振周波数に変化が見られる。図3(3),(4)は図2(3)が2つのモードに分離したものである。この様に、洗浄物は小さいにもかかわらず、影響は大きい。次に、底面に振動子を付けた影響を調べるため、図4にステンレスブロックを付けたときの音響モードを示す。四角形の黒くなった部分は取り付けられたステンレスのブロックで、ブロックの高さは2cm、大きさは4×4要素(1要素は0.5cm)である。図2と比べ、卵形のモードの底面に接する部分の形が崩れ、共振周波数も低下している。これは、元のモードから、別のモードに変わったことを意味する。最後に、図5に、ステンレスのブロックを底面に取り付け、直方体要素1つ(1-1,1-1,8-8の位置1ブロック)を洗浄物と考えた場合の音響モードを表示している。同じく、洗浄物の機械的境界条件は自由で、材質はステンレスである。これは実際の超音波洗浄槽に最も近いと考えられる。図4と比べ音響モードには大きな乱れは無いが、図5(3),(4)は図3と同様にモードの分離が起こっている。共振周波数は変化しており、モードによって変化量に差があるのが分かる。ここでは示していないが、槽内の音響モードは、洗浄物の境界条件、洗浄物の材質、入れられた位置によって変化し、洗浄物の影響が大きいということが観測される。

4. まとめ

超音波洗浄槽内に生じるモードは、洗浄槽の寸法、槽壁の厚さ、材質、振動子と想定するステンレスのブロック、洗浄物により、変化することが分かった。実際の洗浄槽は、寸法は大きく、駆動は振動子を直接付けるものや、輻射板に取り付けて底部に置くものがある。さらに、洗浄物は種々の形状や材質のものがあ、位置も定まってい。実用に向けての設計に役立てるには、これらの点を考慮して説明していくことは今後の課題である。

(平成16年2月10日受付,平成16年6月28日再受付)

文 献

- (1) Y. Liu, T. Yamabuchi, A. Taira, T. Yosizawa, S. Hirobayashi, and E. Andou: "Finite Element Simulation of Coupling Mode in Ultrasonic Cleaning Tub", *J. Acoust. Soc. Japan*, Vol.59, No.7, pp.363-369 (2003-7) (in Japanese)
劉 穎・山淵龍夫・平 明徳・吉沢寿夫・広林茂樹・安藤英一:「超音波洗浄槽の結合振動モードの有限要素シミュレーション」, 日本音響誌, 59, 7, pp.363-369 (2003-7)
- (2) Y. Liu, T. Yamabuchi, T. Yosizawa, and S. Hirobayashi: "Finite Element Analysis of Sound Mode in Ultrasonic Cleaning Tub attached Block to the Bottom", *IEEJ Trans. EIS*, Vol.124, No.2, pp.582-583 (2004-2) (in Japanese)
劉 穎・山淵龍夫・吉沢寿夫・広林茂樹:「駆動部分の影響を考慮した超音波洗浄槽の音響モードの有限要素解析」, 電学論 C, 124, 2, pp.582-583 (2004-2)