

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

非会員 劉 穎* 正員 山淵 龍夫*
非会員 吉沢 寿夫* 正員 広林 茂樹*

Finite Element Analysis of Sound Mode in Ultrasonic Cleaning Tub attached Block to the Bottom

Ying Liu*, Non-member, Tatsuo Yamabuchi*, Member, Toshio Yoshizawa*, Non-member, Shigeki Hirobayashi*, Member

Excited modes in cleaning tub are mainly composed of vibration mode and sound mode. The sound mode (named E mode) contributes to cleaning. It is found that E modes are influenced by material constants and thickness of tub wall. In this paper, we have investigated the influence on the sound mode when the stainless block is put to the bottom of the cleaning tub. It has been found as to E_{112} mode that the sound mode nearby the bottom approaches to the sound mode when the bottom is rigid body.

キーワード：超音波洗浄槽，有限要素法，結合モード，音響モード，振動子

Keywords: Ultrasonic cleaning tub, Finite element method, Coupling mode, Sound mode, Vibrator

1. はじめに

超音波洗浄槽はよく使用されるが，槽内の音圧分布は洗浄槽の槽壁と水との強い結合振動のため，あまり明らかにされていない。前報(1)では，洗浄槽内に生じるモードについて，洗浄槽の大きさ，槽壁の厚さ，材質の影響についての解明を行ったが，本報では，槽壁底部に振動子を想定した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調べる。

2. 有限要素表示式

実際の洗浄効果はキャビテーションによるものであるが，ここでは，線形の槽壁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。

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。洗浄槽は，対称性から，1/4部分のみを解析してい

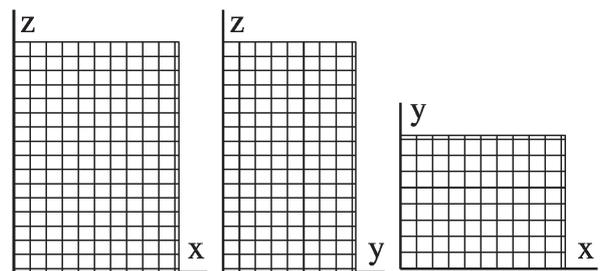


図1 超音波洗浄槽の断面図と要素分割

Fig. 1. Cross sectional view of cleaning tub and element division

る。対称面は， $x-z$ 面と $y-z$ 面である。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. 音響Eモード

洗浄槽内には(1)で，対称面の音響境界条件が(剛壁，剛壁)の場合，水中の大部分の音圧が大きい，洗浄に有利なモードが生じることを示し，音響モード E_{lmn} と名づけた。このモードは，音響境界条件をゼロとした場合に生じる音響モード EZ_{lmn} と対応していることを示した。図2には，音響モード $E_{111} \sim E_{113}$ を示す。個々の図は $y=0$ における $x-z$ 断面の音圧等高線図で，ここで記号 l, m, n は，

* 富山大学工学部
富山市五福 3190
Faculty of Engineering, Toyama University
Gofuku3190, Toyama

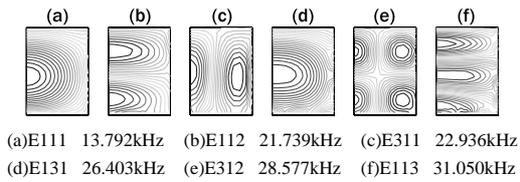


図2 音響モード図 (y=0における x-z 断面)
 Fig. 2. Excited sound modes (y=0,x-z cross section).

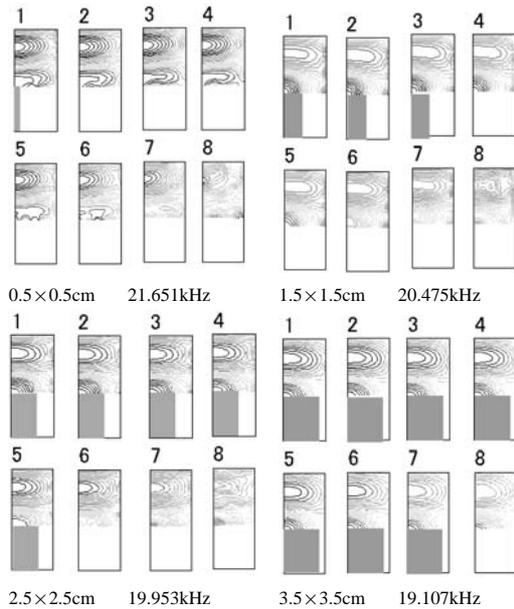


図3 ブロックの面積変化による E₁₁₂ モード
 Fig. 3. The influence of block area on E₁₁₂ modes (height 5cm).

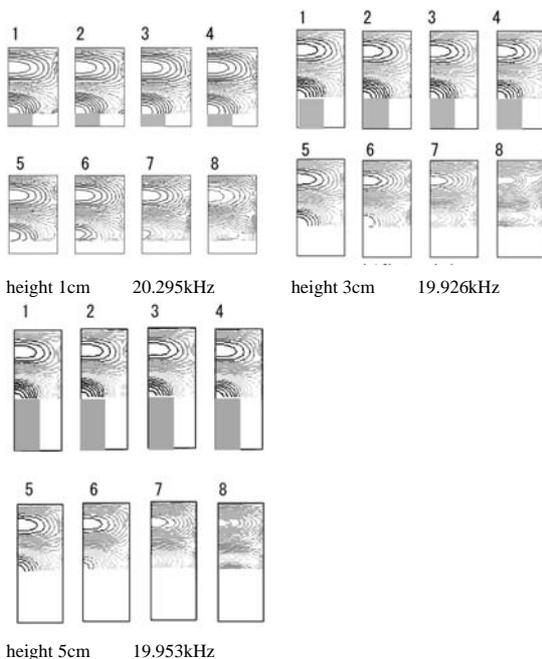


図4 ブロックの高さ変化による E₁₁₂ モード
 Fig. 4. The influence of block height on E₁₁₂ modes (area 2cm×2cm).

$l, m = 1, 3, 5, \dots, n = 1, 2, 3, \dots$, なる数字で, 全体領域の卵形モードの個数を表す。

4. 駆動部の影響

実際の駆動は, 洗浄槽の底面に多数の振動子を直接取り付け輻射板とすることが一般的に行われている。E_{lmn} モードは, 卵形をしており, 外側で音圧が最小となっている。このため, E_{lmn} モードは, このモードが接する壁面の厚さ, 密度に影響を受ける。特に底面に, 振動子が取り付けられた場合には影響は大きいと考えられる。そこで, 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する。ブロックの大きさや高さを変化させた場合に, E₁₁₂ モードを例として, 音響モードへの影響について調べる。なお, 対称面の音響境界条件は (剛壁, 剛壁) を採用する。

図3には洗浄槽の底面に高さ5cmのブロックを取り付け, 大きさを中心軸から 1×1, 3×3, 5×5, 7×7 要素 (1要素は0.5cm) に変化させた場合の E₁₁₂ モードを示している。四角形の黒くなった部分は取り付けられたブロックである。個々の図は y=0 における x-z 方向の8断面の音圧等高線図である。これらの図から, ブロックが大きくなるにつれ, 二つの卵形のモードのうちに, 底面に接する部分の形が半分の卵形に近づき, 音圧等高線が底面に垂直に入るようになっているのが観測される。共振周波数も 2kHz 程度減少する。

図4にはブロックの大きさを 4×4 要素に固定し, 高さを 1, 3, 5cm に変化させた場合の E₁₁₂ モードを示している。いずれも, 二つの卵形のモードのうちに, 底面に接する部分の形が半分の卵形に近づき, 音圧等高線が底面に垂直に入るようになっているのが見られる。ただし, 図3と比べ, ブロックの高さの影響は, あまり顕著ではなく, 5cm 程度で飽和傾向が見られる。

ステンレスのブロックを洗浄槽の底面に取り付けることにより, 卵形のモードの形は崩れ, 音圧等高線は底面に垂直に入るのは, 底面の厚くなった部分が剛体に近づくということを示唆する。したがって, 実際の洗浄槽の場合, 一定の間隔で振動子を底面全体に取り付ける場合は, その底面は剛体に近いものとなることは予想できる。

5. まとめ

洗浄槽の底面に振動子を想定したステンレスのブロックを取り付けたことにより, ある程度の大きさで, 底面が剛体に近づくことが E₁₁₂ モードで確認された。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し, 共振周波数も 2kHz 程低下している。振動子で駆動する洗浄槽の設計には, 参考になるものと考えられる。

(平成15年7月28日受付)

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", *The journal of the Acoustical Society of Japan*, Vol.59, No.7, pp363-369 (2003-7) (in Japanese)
 劉 穎・山淵龍夫・平 明德・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」, 日本音響学誌, 59, 7, pp.363-369 (2003-7)