円筒容器におけるスロッシング時の管群に
作用する流体力の評価*新宅 章 治^{*1}, 平松 力^{*2}, 古村 義 彰^{*2}
新谷 真 功^{*2}, 奥谷 明 徳^{*3},Estimation of Hydrodynamic Force Acting on Tube Bundles
in a Circular Tank by SloshingShoji SHINTAKU, Tsutomu HIRAMATSU, Yoshiaki KOMURA,
Masanori SHINTANI, and Akinori OKUYA

This paper deals with the estimation of hydrodynamic forces acting on tube bundles in a circular tank by sloshing. The sloshing phenomena are calculated by the Boundary Element Method (BEM). The hydrodynamic forces acting on the tubes are integrated dynamic fluid pressures around the tubes. When there is one and four tubes in the tank, the displacements of the fluid surface by this analysis agree with the experimental results. This analysis is a vary effective method. By analysis, as the tubes increase, the hydrodynamic force acting on the tubes decrease. The hydrodynamic force is the greatest on the fluid surface and decreases suddenly at the bottom of the tank.

Key Words: Vibration, Sloshing, Boundary Element Method, Hydrodynamic Force, Transient Response

1. 緒 言

今日では、核燃料の多様化を図るとともにウラン資源をより有効に利用し経済性を高めようとする新しい動力炉の開発が進められている。その中でも新形転換炉(以下 ATR)は、わが国がプルトニウムの早期利用を目指して開発を進めている自主開発炉であり、原形炉「ふげん」の設計、建設、運転により実用化に向けての技術的見通しが得られてきている⁽¹⁾。ATR は、燃料集合体の入った圧力管を内部に持つカランドリア管が炉心を上下に貫通している。そのため、ATR 炉心内の管は、地震時に発生する冷却水のスロッシングが発生したとき、その流体力の影響を受ける。そして、その流体力により、管が大きいたわむなどの現象が予想されるため、その流体力について検討することが必要となる。

これまでに、Chen ら^{(2)~(5)} は、静水中にある円柱群が振動しているときの円柱に働く流体力を付加質量という形で評価している。また、笠井ら⁽⁶⁾ は、液体中に

ある角形の棒群が振動しているときの棒に働く流体力を評価し、棒群と液体との連成振動応答解析手法についての研究を行っている。平松・古村⁽⁷⁾ らは、水中にある複数個の同軸二重管が正弦波で加振されたときの共振時の振動の応答について研究を行っている。また、中山ら⁽⁸⁾ は、境界要素法を用いて二次元容器内のスロッシング現象を解明しているが、三次元円筒容器内のスロッシングについては、まだ行われていない。さらに、境界要素法を用いた三次元円筒容器内のスロッシングによる棒に働く流体力と振動特性の解析は、ほとんど見られない。

本論文では、ATR 炉心を対象として、円筒容器内に多数の管が挿入されている場合のスロッシングの振動特性を実験と理論解析より明らかにし、さらに、スロッシング時の容器内の管に作用する流体力を理論解析より評価を行い、実験結果と解析結果より、容器内の管の本数の変化によるスロッシングの振動特性の変化と管に作用する流体力の評価と流体力について考察している。なお、解析手段として、有限要素法などに対し、より少ない入力データで精度の良い解析を行える境界要素法を用いる。

* 平成元年3月10日 東海支部第38期総会講演会において講演、原稿受付 昭和63年4月11日。

^{*1} 准員、(株)小松製作所 (〒107 東京都港区赤坂2-3-6)。

^{*2} 正員、福井大学工学部 (〒910 福井市文京3-9-1)。

^{*3} 准員、アイシン精機(株) (〒448 刈谷市朝日町2-1)。

2. 理論解析^{(8)~(11)}

2.1 支配方程式と境界条件 図1に示すように強制水平方向加振を受ける管を挿入した円筒容器内の流体の運動を考える。容器は直径 D で、静止状態で高さ H まで液体を満している。流体領域 Ω の境界は、自由表面境界 Γ_1 、容器壁 Γ_2 、容器底面 Γ_3 および管壁 Γ_4 である。直交座標系 $O-xyz$ は容器に固定した移動座標系で、 $x-y$ 平面を静止時の自由表面に一致させている。 z 軸は容器の中心線に一致させ、上向きを正とする。また、円筒容器および管は剛体であるとする。

容器内部の流体は非粘性、非圧縮性であるとし、流れは非回転であると仮定すると、速度ポテンシャル ϕ より、座標系 $O-xyz$ に対する相対流速 U は次式で表される。

$$U = \text{grad } \phi \quad \dots\dots\dots (1)$$

支配方程式は次式の非圧縮性流体の連続の式である三次元ラプラス方程式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

自由表面 Γ_1 での境界条件は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mu \phi + A_x x + g \eta = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 μ は自由表面の振動の減衰係数を、 A_x は容器に付加される強制水平加速度を表す。 x は x 座標である。 $A_x x$ は容器の移動を表す速度ポテンシャルを時間に関して1階微分したものに相当する。 η は図1に示すような自由表面の静止位置からの変位、 g は重力の加速度である。また自由表面 Γ_1 でのもう一つの境界条件は次のように表される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $(\partial/\partial n)$ は法線方向の微分を表す。

容器壁 Γ_2 、容器底面 Γ_3 、および管壁 Γ_4 上での境界条件は、容器は剛体を仮定しているの、それぞれ次のように表される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

このようにスロッシングは式(2)~(5)と適当な初期条件によって表される線形初期値境界値問題に帰着される。ラプラス方程式(2)とノイマン形の境界条件式(4)、(5)とは、境界積分方程式に変換される。得られた積分方程式は、動的境界条件式(3)から導かれる重み付き残差方程式と連立することによって、数値的に解くことができる。

2.2 支配方程式の境界積分方程式への変換 領域 Ω 内の支配方程式である三次元ラプラス方程式を

積分方程式に変換すると、次式で表される。

$$\frac{1}{2} \phi_i = \int \frac{\partial \phi}{\partial n} \phi^* d\Gamma - \int \phi \frac{\partial \phi^*}{\partial n} d\Gamma \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 ϕ^* は三次元ラプラス方程式の基本解で、

$$\phi^* = \frac{1}{2\pi r} \quad \dots\dots\dots (7)$$

であり、 r は次式で与えられる。

$$r = \sqrt{\{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2\}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

したがって、式(6)に境界条件である式(4)、(5)を代入することにより、次式の ϕ と η に関する積分方程式が得られる。

$$\frac{1}{2} \phi_i + \int \phi \frac{\partial \phi^*}{\partial n} d\Gamma - \int \frac{\partial \eta}{\partial t} \phi^* d\Gamma = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

次に、自由表面上の境界条件である式(3)は重み付き残差法によって重み付き残差方程式に変換する。それには、式(3)の両辺に重み関数 $w(x, y)$ を乗じ、境界 Γ_1 において積分することにより次式を得る。

$$\int w \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} + \mu \phi + A_x x + g \eta \right\} d\Gamma = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

2.3 離散化 式(6)、(10)を離散化を行うため、考えている系の表面を図2のように多数の三角形要素に分割する。境界要素は、各要素内において関数値が

図1 円筒容器と座標系

図2 要素分割

平面的に変化するものとして近似する線形要素を使用する。つまり各要素内において、 ϕ, η, w の各関数値および x は次式の一次関数で表される。

$$\phi = \xi_1 \phi_1 + \xi_2 \phi_2 + \xi_3 \phi_3 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \xi_1 \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_1 + \xi_2 \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_2 + \xi_3 \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_3 \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\eta = \xi_1 \eta_1 + \xi_2 \eta_2 + \xi_3 \eta_3 \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$w = \xi_1 w_1 + \xi_2 w_2 + \xi_3 w_3 \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$x = \xi_1 x_1 + \xi_2 x_2 + \xi_3 x_3 \quad \dots\dots\dots (15)$$

ただし、

$$\xi_3 = 1 - \xi_1 - \xi_2 \quad \dots\dots\dots (16)$$

また、 (x, y, z) と (ξ_1, ξ_2, ξ_3) との関係は次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (17)$$

そして、式(11)から式(16)を用いて、式(6)を選点法にて、式(9)を重み付き残差法にて解き、 ϕ と η に関する2組の連立代数方程式を導く。

2.4 時間増分手法

得られた2組の連立方程式を各時間ステップおきに解いていくため、増分手法を導入する。いま、時刻 t_0 における値を下付き添字0をつけて表し、時刻 $t_0 + \Delta t$ における値を、添字なしで表すことにすると、時刻 $t_0 + \Delta t$ における ϕ, η は二次以上の微小項を無視することにより次式で与えられる。

$$\phi = \phi_0 + \Delta \phi \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\eta = \eta_0 + \Delta \eta \quad \dots\dots\dots (19)$$

しかし、自由表面での ϕ は、液面の変動分を考慮しなければならないために次式となる。

$$\phi = \phi_0 + \Delta \phi + \Delta \eta \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_0 \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここで、線形化された自由表面での連続の式

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (21)$$

を用いて、

$$\phi = \phi_0 + \Delta \phi + \Delta \eta \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} \right)_0 \quad \dots\dots\dots (22)$$

となり、この式を自由表面での ϕ として使用する。 ϕ と η の時間変化に関しては差分法を用い、時間 Δt の間では $(\partial \phi / \partial t)$ 、 $(\partial \eta / \partial t)$ の値は時間 t に関して線形に変化するものと仮定すれば、時刻 $t_0 + \Delta t$ における $(\partial \phi / \partial t)$ 、 $(\partial \eta / \partial t)$ は次のように近似される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t} \Delta \phi - \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_0 \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t} \Delta \eta - \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} \right)_0 \quad \dots\dots\dots (24)$$

2.5 連立一次方程式の作成

2.4 節で述べた増

分手法を用いることによって、 ϕ と η に関する連立方程式から、次の $\Delta \phi$ と $\Delta \eta$ に関する連立一次方程式が導かれる。

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \phi \\ \Delta \eta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (25)$$

式(25)より得られる $\Delta \phi, \Delta \eta$ を式(18)、(19)、(22)～(24)に代入すれば、時刻 $t_0 + \Delta t$ における ϕ, η 、 $(\partial \phi / \partial t)$ 、 $(\partial \eta / \partial t)$ が求められる。以下、時間を Δt ずつ進めながら方程式(25)を計算することにより、スロッシング現象の数値シミュレーションを行うことができる。

2.6 初期条件と入力波

スロッシングのシミュレーションを行うために、次のような初期条件を与える。時刻 $t=0$ において、流体は完全に静止しているとすると、初期条件は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \eta = 0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial t} &= \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \end{aligned} \right\} \text{at } t=0 \quad \dots\dots\dots (26)$$

また、加振加速度は、次のように与える。

$$A_x(t) = -X_0 \omega^2 \sin \omega t \quad \text{for } t \geq 0 \quad \dots\dots (27)$$

ここで、 X_0 は加振振幅、 ω は加振円振動数である。

2.7 管に作用する流体力の評価

管に作用する流体力は、シミュレーション解析により求められた管壁面上での動液圧を、管の周りに対して積分して求められる。式で表すと次のようになる。

$$F(Z') = \iint P(R, \theta, Z') R \cos \theta d\theta dZ \quad \dots\dots (28)$$

ここで、 $F(Z')$ は Z' 点での流体力を、 R は管の半径を表し、 $P(R, \theta, Z')$ は管の表面上の動液圧で、下端中央に原点を持つ極座標で表したものである。

2.8 正弦3波共振法⁽¹²⁾による流体力と波高の評価

数値計算により定常応答を求め、流体力の最大値や自由表面最大波高などを評価することが設計において必要である。しかし、定常応答まで計算により求めることは計算時間の関係で非常に時間がかかるため、動的応答解析法の中の擬共振法を用いて評価を行うことにする。擬共振法はスロッシングの一次固有周期と等しい周期の正弦波を n 波分だけ入力したときの応答を計算する手法である。ここでは、正弦波を3波分だけ入力して計算を行うこととする。その計算結果より、管の本数による管に作用する流体力の最大値の評価、自由表面最大波高および容器側壁に作用する流体力の最大値の評価を行い、管の本数による影響を検討する。

3. 実験

3.1 実験装置 図3に実験で使用した実験装置の概略図を示す。円筒容器の材質はアクリルである。円筒容器の外径は250 mmで、厚さは6 mmである。そして、水位は380 mmで一定とする。挿入する管の本数は0, 1, 4, 9本の4通りとする。図4に4本と9本の管の配置を示す。管の材質はポリエチレンで、外径23 mm、厚さ2 mmである。管はそれぞれ両端を固定する。実験より、空気中での管の一次固有振動数は88.8 Hzで、水を入れたときの一次固有振動数は40.0 Hzである。

3.2 実験方法

(1) 固有振動数の計測 実験モデルの載った加振台を水平方向に正弦波ステップ掃引加振を行う。そして、加振台の変位を入力、容器内の流体の自由表面の応答を出力とした伝達関数を求め、伝達関数の大き

さのピーク値と伝達関数の位相から固有振動数を決定する。

(2) 固有モードの計測 スロッシングの固有モードは、軸対称モードと非軸対称モードとを有するが、水平動に対して励起されるのは、非軸対称モードのみであるので、ここでは、非軸対象モードの計測を行う。計測方法は、固有振動数の測定とほぼ同じである。直径加振軸上にある各測定点ごとに伝達関数の大きさのピーク値を測定し、その中の最大値で全部のピーク値を正規化する。そして、位相の正負を考慮し、正規化した値を縦軸に測定点の座標を横軸に取るにより、モード図を作成する。

(3) 一次振動モードの減衰比の計測⁽¹³⁾ 計測方法は、加振台をスロッシングの一次固有振動数で水平方向に正弦波加振し、スロッシングの一次モードを十分に成長させた後加振を止め、そのときからのスロッシングの自由振動応答を解析器を用いて記録する。スロッシングの減衰比は、粘性減衰によるものであると考えて、縦軸に倍振幅の対数を、横軸に波数をとった片対数グラフの直線のこう配より求める。

(4) 過渡応答実験 解析手法の妥当性を検討するために、過渡応答実験を行う。入力波は正弦波とし、各振動モードでの入力波の振動数は各固有振動数と一致させる。

- (1) Calandria Tank Model (2) Calandria Tube Mode
(3) Fluid Surface Displacement Measurement
(4) Bridge Box (5) Dynamic Strain Amplifier
(6) Power Amplifier (7) Sweep Signal Generator
(8) Universal Counter (9) Digital Spectrum Analyzer
(10) Floppy Disk Digital Data Recorder
(11) Non-Touch Displacement measurement
(12) Non-Touch Displacement Sensor
(13) Shaker Table (14) Electro Magnetic Exciter

図3 実験装置の概略図

図4 管の配置

4. 解析結果

4.1 解析手法の妥当性の検討 図5に、系の共振周波数を入力したときのスロッシングの時刻歴応答の計算結果と実験結果とを比較のために、管が0本の場合の例を示す。図5中で、実線は実験値を表し、丸印のプロットはその時刻における計算値を表す。実験値と計算値との間には良い一致が見られ、本解析手法によるスロッシング現象のシミュレーションが実際の現象をよく表していることを示している。しかし、液面振幅が増すごとに計算値と実験値との差が大きくなっているが、この原因として、実験での加振正弦波波形は、数値計算での波形ほどきれいな波形でなかったこととさらに解析上の誤差が考えられる。

4.2 流体力分布について 図6に管が4本の場合の管に働く流体力のx方向成分の分布形状の時間的变化の一例を示す。図6より、その分布形状は自由表面で最大となり、深さ方向に急激に減少する傾向を示し、管の下部付近では流体力はほとんど作用していないことがわかる。さらに、管の本数が変化しても、流体力の分布形状はほとんど変わらないという結果を得ている。

4.3 正弦3波共振法による容器および管に働く流体力の応答特性 図7に正弦3波共振法によるスロッシングの過渡応答の計算結果を示す。図7中の丸印のプロットは、 $(x, y) = (R, 0)$ (ただし、 R は容器内半径)での液面振幅の時刻歴を表し、四角のプロットは、管に働く流体力の x 方向成分を表す。図7より、加振を始めたときは流体力とスロッシングとの間に位相差があるが、その位相差はすぐになくなり、スロッシングと同期し、スロッシングの振幅が極大となるところで管に働く流体力も極大になることがわかる。

次に、図8に容器内に挿入されている管の本数と容

図5 管が0本の場合のスロッシングの時刻歴応答

図6 管に働く流体力の x 方向成分(管が4本の場合)

器側壁での最大波高との関係を示す。図8より、容器内に挿入される管の本数が増加するに従って、容器側壁での最大波高は減少している。同様な結果が、図9の容器内に挿入されている管の本数と側壁に働く最大動液圧との関係にも見られる。図8, 9より、容器内に挿入される管の本数が増加することによって、スロッシングが小さくなることを表していると考えられる。

(a) 管が1本の場合

(b) 管が4本の場合

図7 管に作用する流体力と液面振幅

図8 管の本数と容器側壁での最大波高との関係

5. 実験結果

5.1 固有振動数 正弦波ステップ掃引加振実験により得られた伝達関数の例を図10に示す。管が4本の場合について示している。図11にスロッシングの固有振動数と管の本数との関係を示す。

5.2 固有モード 正弦波ステップ掃引加振実験により得られた実験モデルのスロッシングの固有モードの例を図12に示す。管が4本の場合について示している。

図9 管の本数と容器側壁での最大動液圧との関係

(a)

(b)

図10 管が4本の場合の伝達関数

5.3 減衰比 各実験モデルのスロッシングの一次振動モードの減衰比と管の本数との関係を図13に示す。

5.4 振動特性に及ぼす管の本数の影響 管の本数の増加にともないスロッシングの固有振動数の二次、三次に相当する大きさのピークの鋭さが失われ、位相は緩やかに変化していることがわかった。特に9本の場合の三次に相当するピークは、ほとんど判別できなくなっていることがわかった。これは、共振現象が起こりにくくなっているためと考えられる。

図11より、一次の固有振動数は管の本数の増加とともに減少する傾向にあり、二次、三次の固有振動数は一度下がった後、再び上昇するという傾向にあることがわかる。まず、一次モードについては次のように考えられる。一次モードは、容器の両端にモードの腹

図11 管の本数と固有振動数との関係

(a) 一次モード

(b) 二次モード

図12 固有モード図(管が4本の場合)

図 13 管の本数と一次の減衰比との関係

を持つために左右間への流体の流動量が多い。この場合、管はその流動を妨げる障害物となることより、流れが遅くなり、自由表面形状の変化にかかる時間が長くなるために、管の増加はスロッシングの固有振動数を減少させると考えられる。これは、図 13 の管の本数と一次振動モードの減衰比の関係において、管の本数の増加に従って、減衰比が大きくなることと一致している。二次、三次モードについては次のように考えられる。これらのモードは容器中央付近にモードの腹を持つため左右間への流体の流動量は少ない。よって、管は流動を妨げる障害物よりも、自由表面の面積を小さくするものとなり、同じ液深の場合、自由表面の面積が小さくなるほどスロッシングの固有振動数は大きくなる⁽¹⁴⁾ことから、管の増加は二次、三次の固有振動数を増加させると考えられる。

管の本数が 1 本、4 本(図 12)、9 本の場合において、スロッシングの固有モードは管の本数によりあまり影響を受けないことがわかった。図 13 より、一次振動モードの減衰比は管の本数が 1 本から 4 本までは急に大きくなっており、さらに管の本数が増えても減衰比は大きく変化していないことがわかる。しかし、0 本で 0.4%，9 本で 0.8% と減衰比が 2 倍にはなっているが、その大きさは非常に小さいことがわかる。

以上より、管の増加にともない、スロッシングの一次固有振動数は小さくなり、減衰比は大きくなることから、管の増加はスロッシングの一次の振動応答を抑える方向に作用するものと考えられる。

6. 結 言

本論文より、次のことが明らかになった。

(1) 円筒容器内に管群が挿入されている系において、境界要素法を用いて、スロッシングのシミュレーションプログラムを開発し、計算を行った。そして、加振振幅が小さいとき、解析結果と実験結果は良い一致を示した。

(2) 円筒容器内に管群が挿入されている系において、正弦 3 波共振法による解析結果より、スロッシングによる自由表面の応答波高や管に作用する流体力は、挿入されている管の本数の増加につれて小さくなっていくことがわかった。また、管に作用する流体力は自由表面近傍で最も大きく、流体の深さ方向に急激に減少することがわかった。

(3) 実験結果より、管の本数の増加にともなって、耐震設計上重要であるスロッシングの一次固有振動数は小さくなり、また減衰比は大きくなっていくことがわかった。

最後に、数値計算には、福井大学情報処理センターと京都大学大型計算機センターを使用したことを記し、関係諸氏に深く感謝する。

文 献

- (1) 原子力委員会, 原子力白書, (1984), 118.
- (2) Chen, S. S., *Nucl. Eng. Des.*, **35**(1975), 399.
- (3) Chen, S. S., *Nucl. Eng. Des.*, **30**(1974), 223.
- (4) Chen, S. S., *Trans. ASME, J. Mech. Des.*, **100**(1978), 540.
- (5) Lin, W. H. and Chen, S. S., *J. Sound Vib.*, **74**-3(1981), 441.
- (6) 笠井・加賀・盛山, 機論, **49**-440, C(1983), 525.
- (7) 平松・古村, 機論, **52**-474, C(1986), 448.
- (8) Nakayama, T., and Washizu, K., *Int. J. Numer. Methods Eng.*, **17**-11(1981), 1631.
- (9) Nakayama, T., ほか 名, *Developments in Boundary Element Method*, **3**(1984), 191, Elsevier Applied Science Publishers.
- (10) 中山, 数理科学, No234(1982), 53.
- (11) 登坂・中山, 境界要素法の基礎, (1987)170, 日科技連.
- (12) 日本機械学会編, 振動工学におけるコンピュータアナリシス, 223(1987), コロナ社.
- (13) 亘理, 機械力学, (1982), 15, 共立出版.
- (14) 日本機械学会編, 機械工学便覧, (1987), A 5-126.

討 論

〔質問〕 藤田 勝久・伊藤 智博

〔三菱重工業(株)高砂研究所〕

(1) 応答解析にのみ言及されているが、固有振動特性(固有振動数、振動モード)の解析値はいかがか。

(2) 図7(a)では、藤田らの論文(付1)でも二重円筒につき解析解が示されているので、比較されてはいかがか。

(3) 質問者らもすでに二重円筒アニュラス部のスロッシング特性について報告したように(付1)、外径寸法を固定して内径を徐々に大きくすると、一次の固有値は低下傾向を示す。一方、二次、三次は逆に上昇傾向を示す。貴論文の図11は、ちょうど同じ傾向を示し、管群は等価な単一内筒に力学的に近似することができ、本数を増加させることは、内筒の径を等価的に増加させた場合に近づくとも言えるのではないか。

〔回答〕 (1) 今回は、応答解析について検討を行っている。固有振動特性については実験でのみ検討を行い、解析値については検討を行っていない。

(2) 本解析結果は、付図1に示すように実験結果との比較を行っており、両者がほぼ一致しているという結果を得ている。さらに本解析結果は、柴田、曾我部ら(付2)による解析値との比較もされており、この解析値からも挿入している管の外径とタンク内径との比(0.0966)を考慮すると本解析結果は妥当であると考え

付図1 実験結果と解析結果との比較(管が1本の場合)

られる。また、貴論文の解析解の計算を行ってみたいところ、本解析結果とほぼ一致した。

(3) 本実験の管群における等価な単一内筒径を求める必要があるが、貴論文の図2と式(8)により、等価な単一内筒径の増加に伴い、本論文の図11での一次、二次、三次の固有振動数の変化と同様な傾向を示すことができ、本実験での管群は等価な単一内筒に力学的に近似することができると思われる。

(付1) 藤田・ほか2名、二重円筒アニュラス部のスロッシングの地震応答、機論, 52-476, C (1986), 1132-1140.

(付2) 日本機械学会, P-SC 10 流体関連振動分科会成果報告書(1980-12), 316.