

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月10日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560225

研究課題名（和文） 剛体容器内の液面スロッシングの内部共振現象に関する研究

研究課題名（英文） A Study on Internal Resonances of Liquid Sloshing in Rigid Tanks

研究代表者

池田 隆（IKEDA TAKASHI）

広島大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：50115523

研究成果の概要（和文）：

本研究では、自由液面を有する正方形断面の剛体容器が水平方向に正弦励振またはランダム励振を受ける場合、容器内に二つの振動モードが同時に発生する液面スロッシングの内部共振現象について、非線形性を考慮した数学的モデルを構築し、数値計算と実験によりスロッシング挙動を明らかにするとともに、スロッシング波高を精度良く予測できることを示した。また、液面スロッシングの内部共振現象を利用した正方形断面容器が構造物の制振装置として有効であることを示した。

研究成果の概要（英文）：

This research investigated the behavior of internal resonances of liquid sloshing in square rigid tanks horizontally subjected to sinusoidal or random excitation. The mathematical model for the phenomena of the internal resonances for two predominant sloshing modes and higher sloshing modes was constructed considering the nonlinearity of sloshing. It was found from numerical and/or experimental results that this mathematical model enabled to clearly show the sloshing behavior of internal resonances and to predict the liquid elevation with high accuracy. Furthermore, it was shown that the internal resonance appearing in square tanks could be utilized more effectively than conventional rectangular tanks to suppress vibrations of machines and structures.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械力学・制御

キーワード：振動学，流体関連振動，スロッシング，液体貯槽，非線形振動，内部共振現象

1. 研究開始当初の背景

(1) 国内外の関連する研究の中での位置づけ

液体貯槽の耐震設計には、過去半世紀にわたり、貯槽内の液体を質量・ばねに置き換えた系が用いられ、Housner (1957)による線形理論が適用されてきた。この理論は小振幅の場合には問題ないが、振幅が大きく非線形性が顕著に現れる場合には適用できなくなる。解

析技術の進んだ現代では、Housnerの理論は時代遅れであり、大振幅のスロッシング現象を精度良く予測するためには、液体を連続体として扱い、非線形理論に基づいた解析が必要である。

関連の学術的研究では、水平励振を受ける長方形断面の容器内に単一のスロッシングモードが発生する場合の研究がほとんどで

ある。一方、ピッチング励振を受ける長方形断面容器内に二つのモードが連成する三次元スロッシングが解析されている(木村ら, 1996)。しかし、正方形断面容器を対象とした研究は極めて少なく、Yoshimatsu・Funakoshiによる論文(2001)だけであり、斜め水平励振を受ける場合のスロッシングの理論解析結果が示されたが、実験的には検証されていない。

一方、鉛直励振を受ける場合のスロッシング現象は、電磁誘導の発見で有名な Faraday が最初に見いだしたことに因んで、“Faraday waves”と呼ばれている。その後、Skalak・Yarymovych(1962)が初めて Faraday waves の理論的解析を行った。これまでに、長方形断面容器内に単一のモードが発生する場合の研究(Frandsen・Borthwick, 1997)、ピッチング励振を受ける長方形断面容器内のパラメトリック振動(木村ら, 1997)、および正方形断面容器に発生する分岐現象(Feng・Sethna, 1989)が報告されているが、正方形断面容器内に発生するスロッシングの振幅に焦点を絞った研究はほとんどないようである。

(2) 着想に至った経緯

2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震時に、液面のスロッシングにより使用済み燃料プールから放射性物質を含んだ水が原子力発電所外へ漏れたという深刻な事故が発生したことは記憶に新しい。学術的に極めて基本的なスロッシング現象の発生が事前に把握されておらず、地震対策が疎かになっていることが露呈された観がある。この事故の原因として、プールの断面形状が正方形に近い形状であることを考慮すると、固有振動数の等しい二つのモード(1,0)と(0,1) (図2参照)が同時に発生したため、それらが合成された波がプールの隅部において設計段階での予測値を超えたことが推察される。このような二つの振動モードが互いに連成する現象は、非線形振動学では内部共振現象として知られている。この事故例はスロッシングの非線形性に起因し、大きい振幅の場合にはこの非線形性は顕著に現れる。このような場合には二つの振動モードが互いに影響し合い、一つのモードのスロッシングが生じる場合とは大きく異なった現象となり、実際に問題となった事故例は非線形スロッシングの内部共振現象として捉えることができることに気づき、本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、液体の入った剛体容器(正方形断面容器、および正方形に近い断面をもつ矩形容器)が水平方向・鉛直方向の正弦励振、または不規則励振を受ける系を対象とし、容器内に二つの振動モードが同時に発生する

液面スロッシングの内部共振現象を調べる。特に、原子力発電所内で使用済み燃料貯蔵プールから放射性物質を含んだ水が溢れるような事故の発生原因を動力的に解明するとともに、スロッシング波高を予測できるシステムを構築し、液体貯槽の新しい耐震基準を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

自由表面をもつ剛体容器内の液面スロッシングを支配する運動方程式を基に、スロッシングの非線形性を考慮して、卓越して発生するスロッシングモードの他に高次のスロッシングモードも組み入れたモード方程式を導き、このモード方程式より周波数応答曲線を表す理論式を求める。この理論式を用いることによって、周波数応答曲線に及ぼす液位、励振の強さ、励振振動数、および容器断面の縦横比の影響を調べることができ、スロッシングの振幅が精度良く予測可能となる。構築した理論解析モデルは近似解析によって得られるので、その妥当性を確かめるため、主として正弦加振実験を行い、理論解析結果と実験結果を比較する。また、液体貯槽の新しい耐震基準を確立するとともに、事故防止策を提案する。

4. 研究成果

以下の3項目に分けて、得られた研究成果について記述する。

(1) 正弦励振を受ける正方形断面容器内のスロッシング挙動

本研究では、図1に示すように、正方形断面容器が斜め水平方向(角度 α)に調和励振 $a\cos\omega t$ を受ける場合、容器内液面のスロッシングの非線形応答を調べた。理論解析では、卓越した2つのスロッシングモード(1,0), (0,1)に加え、5つの高次モードを考慮したモ

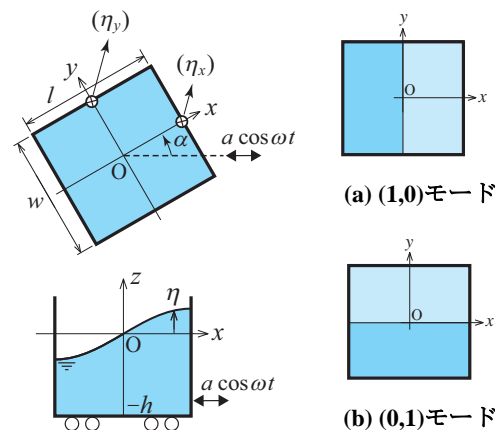


図1 理論解析モデル

図2 スロッシングのモード形状

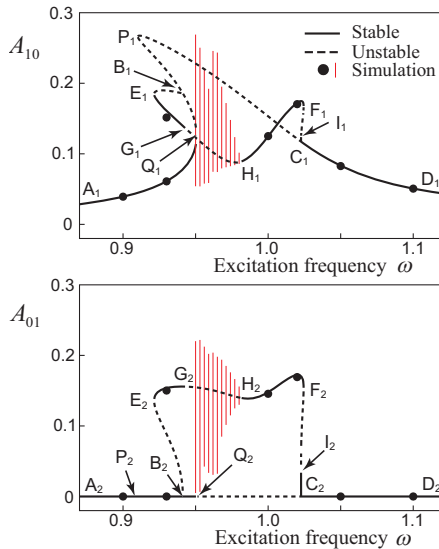
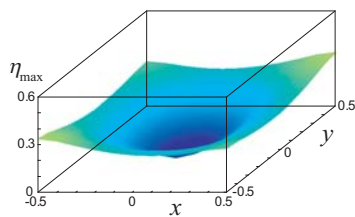
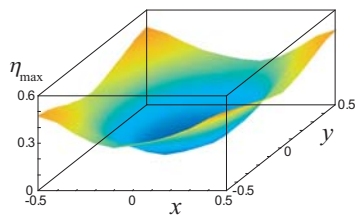


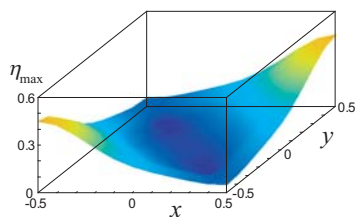
図3 振幅応答曲線 ($\alpha=0^\circ$ の場合)



(a) $\omega=1.02$



(b) $\omega=0.953$

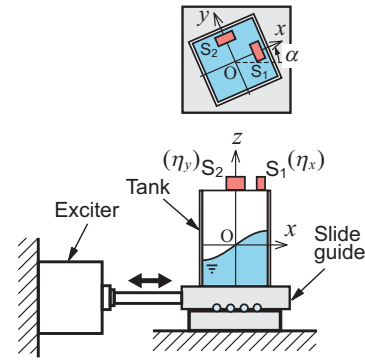


(c) $\omega=0.930$

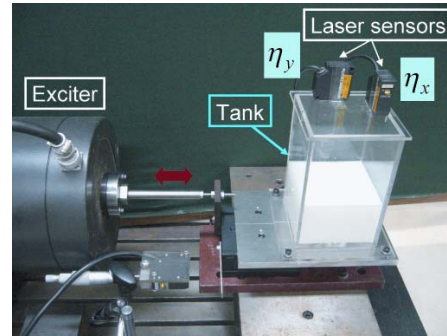
図4 最大波高 η_{max} の分布図 (図3の場合)

一方程式を誘導して、共振曲線を解析的に求め、実験結果と比較した。特に、(1,1)モードが解の精度の向上に大きな役割を果たすことを指摘し、次の成果を得た。

① 図3に示すように、容器の取付け角度 α が 0° で、 $h/l=0.6$ (h :液位、 l :容器の横幅)の場合、変位励振により(1,0)モードが励起され、特定の励振振動数範囲において、スロッシングの非線形性に起因して(0,1)モードが発生し、



(a) 概略図



(b) 写真

図5 実験装置

そのモードにエネルギーが吸収され、(1,0)モードの振幅は小さくなる。図4(a), (b), (c)は、それぞれ図3の $\omega=1.02$, 0.953 , 0.930 の場合の最高波高 η_{max} の分布図を示す。図4(b), (c)では、2つのスロッシングモードが比較的大きな振幅で発生するため、それぞれ液体の溢流が容器の四隅、および対向する二隅で起こる可能性が高い。

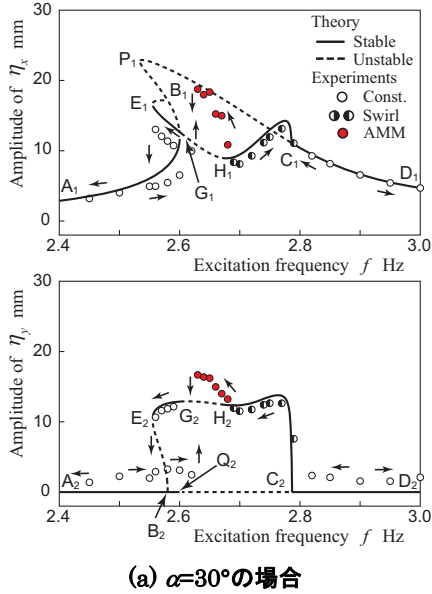
② α が 45° まで変化するにつれ、容器の各辺に沿う方向に励振の成分が直接作用すると同時に、モード間の内部共振の影響が強くなり、複雑な形状の共振曲線となる。

③ 容器の取付け角度が $\alpha=0^\circ$ からずれると、振幅が零でない分枝が2本に分かれ、安定な分枝上では一定振幅の旋回運動が発生し、ホップ分岐が生じた後に周期性のある振幅変調運動、およびカオス振動が発生する。

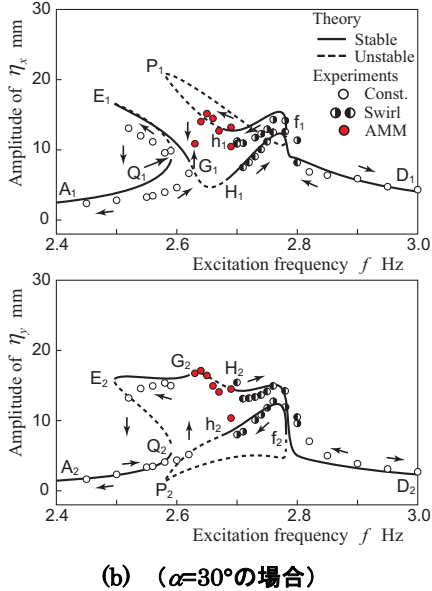
④ 図5に示す実験装置を製作し、実験を行った。図6(a), (b)は、それぞれ $\alpha=0^\circ$, 30° の場合に得られた実験結果を示し、理論解析結果も重ねて図示している。理論結果は実験結果と定量的によく一致しており、構築された理論解析モデルは妥当であることが確かめられた。

(2) ランダム励振を受ける正方形断面容器内のスロッシング挙動

正方形断面容器が斜め水平方向に不規則励振を受ける場合、容器内液面のスロッシングの非線形応答を調べた。上記(1)の理論解析モデルを用いて、モンテカルロ法を適用した



(a) $\alpha=30^\circ$ の場合



(b) ($\alpha=30^\circ$ の場合)

図6 実験結果と理論結果の比較

数値シミュレーションより液面変位の二乗平均値を求め、対応する線形系と比較した結果、次の成果を得た。

① 狭帯域不規則励振が作用する場合、励振方向角 α が 0° のとき、直接的に励振される(1,0)モードのスロッシングが連続して発生するが、(0,1)モードのスロッシングは狭帯域不規則励振の中心周波数 Ω の特定の範囲において非線形連成により間欠的に振動する(図7参照)。

② 励振方向角 α が 0° から 45° まで変化するにつれ、(1,0)モードと(0,1)モードの二乗平均値 $E[\eta_{\max}^2]$ は対応する線形系の場合の値(一点鎖線)と大きく異なる。励振方向角が 40° 付近になると、(1,0)モードよりも小さい励振エネルギーが作用する(0,1)モードの方が二乗平均値は大きい値を示す(図8参照)。

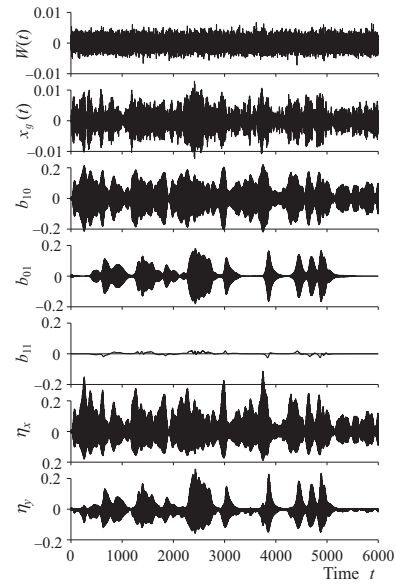


図7 数値シミュレーション波形 ($\alpha=0^\circ$ の場合)

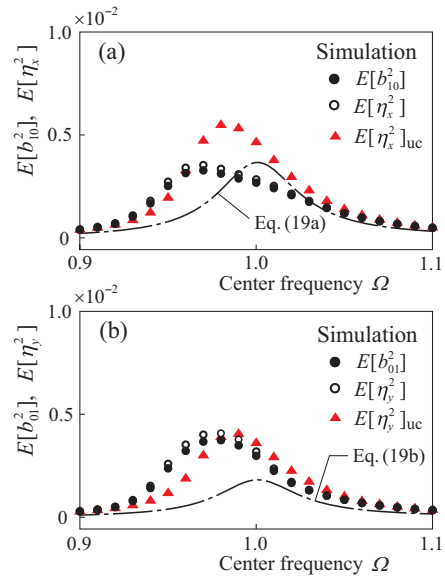
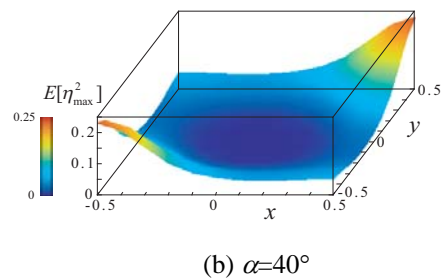


図8 二乗平均応答曲線 ($\alpha=40^\circ$ の場合)



(b) $\alpha=40^\circ$

図9 液面の2乗平均値 $E[\eta_{\max}^2]$ の3D分布 (図8の $\Omega=0.98$)

③ 励振方向角が 0° からずれる一般の場合には、(1,0)モードと(0,1)モードが同時に発生するため、液体の溢流が容器の四隅で起こる可能性が高い(図9参照)。

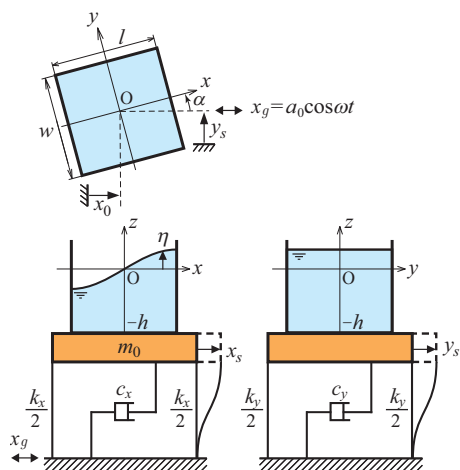


図 10 理論解析モデル（水平励振）

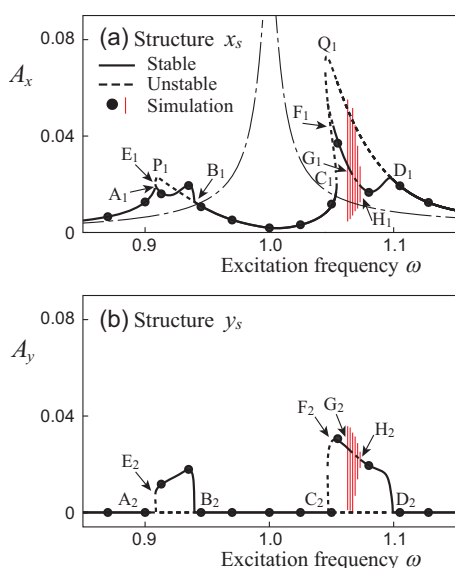


図 11 構造物の x, y 方向の振幅応答曲線

(3) 内部共振現象を利用した制振装置の有効性

正方形断面容器を有する弾性構造物が水平方向または鉛直方向の正弦励振を受ける系を対象とし、卓越した2つのスロッシングモード(1,0), (0,1)が励起される場合に、構造物と液面スロッシングの共振曲線を理論的、実験的に調べた結果、次の成果を得た。

① 図 10 に示すように、構造物が水平方向の地盤変位 $a_0 \cos \omega t$ の正弦励振を受ける場合、正方形断面容器内の(1,0)と(0,1)のスロッシングモードが内部共振に起因して同時に発生するため、長方形断面容器の場合よりも構造物の2つのピークが抑えられる(図 11 参照)。しかし、図右側ピーク付近では G 点、H 点でホップ分岐が起こり、振幅変調運動が発生する。図 11 中に、振幅変調運動の振幅の振れを縦の赤線で示す。この振幅変調運動は、容器断面形状を正方形から少しずつらすことに

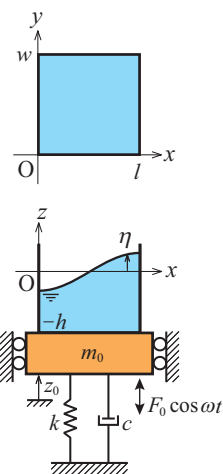


図 12 理論解析モデル（鉛直励振）

よって消滅する。また、励振振動数に依存して、構造物にはふれ回り運動と直線運動の振動が発生する。

② 図 12 に示すように、構造物が鉛直方向に励振力 $F_0 \cos \omega t$ を受ける場合、液位が低い場合の方が、構造物の振動が広い励振振動数範囲で抑えられるため、制振性能が優れている。しかし、同調条件にずれが存在する場合、振幅変調現象が発生するため、制振性能が悪化する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Ikeda, T., Harata, Y., Ibrahim, R.A., Nonlinear liquid sloshing in square tanks subjected to horizontal random excitation, Nonlinear Dynamics, 査読有, Vol.72, No.1-2, 2013, pp.493-453.
- ② Ikeda, T., Takashima, M., Harata, Y., Autoparametric resonances of elastic structures coupled with two sloshing modes in a square liquid tank, Transaction of the ASME, J. Computational Nonlinear Dynamics, 査読有, Vol.8, No.1, 2013, pp. 011007-1 – 011007-13. DOI: 10.1115/1.4006531
- ③ Ikeda, T., Ibrahim, R.A., Harata, Y., Kuriyama, T., Nonlinear liquid sloshing in a square tank subjected to obliquely horizontal excitation, J. Fluid Mechanics, 査読有, Vol. 700, 2012, pp. 304-328. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/jfm.2012.133>
- ④ Ikeda, T., Nonlinear dynamic responses of elastic structures with two rectangular liquid tanks subjected to horizontal excitation, Trans. ASME, J. Computational and Nonlinear Dynamics, 査読有, Vol. 6, No. 2, 2011, pp. 021001(15 pages). DOI: 10.1115/1.4006531

- ⑤ Ikeda, T., Autoparametric interaction of a liquid surface in a rectangular tank with an elastic support structure under 1:1 internal resonance, *Nonlinear Dynamics*, 査読有, Vol.60, No.3, 2010, pp.425-441.
DOI: 10.1007/s11071-009-9606-9

[学会発表] (計 15 件)

- ①池田 隆, 原田祐志, 高山信裕, 二つの正方形容器を用いた同調液体ダンパーの制振解析, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2012, #324 in CD-ROM(11 pages), 2012.9.19, 慶應義塾大学.
- ②Ikeda, T., Harata, Y., Ninomiya, S., Vibration control of 2DOF structures utilizing sloshing in square tanks, *Proceedings of the ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, #70188 in CD-ROM (11 pages), 2012.8.13, Chicago, USA, 査読有.
- ③Ikeda, T., Harata, Y., Ibrahim, R.A., Nonlinear responses of liquid surfaces in square tanks subjected to horizontal, random excitation, *Proceedings of the International Conference on Structural Nonlinear Dynamics and Diagnostics*, CD-ROM (4 pages), 2012.4.30, Marrakech, Morocco, 査読有.
- ④池田 隆, 原田祐志, 二宮翔太, 関口泰久, 正方形液体容器による 2 自由度柔軟構造物の制振解析 (実験との比較), 日本機械学会中国四国支部第 50 期総会・講演会講演論文集 No.125-1, #604 in CD-ROM (2 pages), 2012.3.8, 広島大学.
- ⑤門田洋平, 池田 隆, 原田祐志, 関口泰久, ランダム励振を受ける正方形容器内の液面スロッシングの非線形応答解析, 日本機械学会中国四国支部第 42 回卒業研究発表講演会, #710 in CD-ROM (2 pages), 2012.3.7, 広島大学.
- ⑥池田 隆, 原田祐志, 高橋尚士, 原田祐志, 石田幸男, 円筒型同調液体ダンパーによる風車タワーの制振解析, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2011, #419 in CD-ROM (10 pages), 2011.9.7, 高知工科大学.
- ⑦池田 隆, 原田祐志, 高山信裕, 関口泰久, オートパラメトリック共振を利用した同調液体ダンパーによる柔軟構造物の制振解析, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2011, #419 in CD-ROM (10 pages), 2011.9.6, 高知工科大学.
- ⑧池田 隆, 原田祐志, 二宮翔太, 関口泰久, 正方形液体容器による 2 自由度柔軟構造物の制振解析, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2011, #310 in CD-ROM(10 pages), 2011.9.5, 高知工科大学.

- ⑨ Ikeda, T., Takashima, M., Harata, Y., Autoparametric resonances of elastic structures coupled with two sloshing modes in a square liquid tank, *Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, #47808 in CD-ROM (10 pages), 2011.8.31, Washington DC, USA, 査読有.

- ⑩池田 隆, 高橋尚士, 原田祐志, 石田幸男, 同調液体ダンパーによる風車タワーの制振解析, 日本機械学会中国四国支部第 49 期総会・講演会講演論文集 No.115-1, pp.149-150, 2011.3.5, 岡山理科大学.
- ⑪池田 隆, 二宮翔太, 原田祐志, 関口泰久, 正方形液体容器を有する塔状構造物の非線形ふれ回り振動, 日本機械学会中国四国支部第 49 期総会・講演会講演論文集 No.115-1, pp.277-288, 2011.3.5, 岡山理科大学.
- ⑫池田 隆, 高島正喜, 原田祐志, 関口泰久, 鉛直励振を受ける柔軟構造物と正方形容器内液面の非線形連成振動 (実験結果との比較), 日本機械学会中国四国支部第 49 期総会・講演会講演論文集 No.115-1, pp.143-144, 2011.3.5 発表, 岡山理科大学.
- ⑬池田 隆, 高島正喜, 関口泰久, 鉛直励振を受ける柔軟構造物と正方形容器内液面の非線形連成振動, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2010, #230 in CD-ROM (6 pages), 2010.9.15, 同志社大学.
- ⑭池田 隆, 栗山 佑, 関口泰久, 斜め水平励振を受ける正方形容器内液面の非線形応答, 日本機械学会 2010 年度年次大会講演論文集 No.10-1, pp.91-92, 2010.9.6, 名古屋工業大学.
- ⑮ Ikeda, T., Vibration suppression of elastic structures utilizing internal resonance of liquid sloshing in a rectangular tank, *Proceedings of the ASME 2010 Pressure Vessels & Piping Division Conference*, #230 in CD-ROM(6 pages), 2010.7.21, Bellevue, Washington, USA, 査読有.

[図書] (計 1 件)

- ①池田 隆, 他, 機械工学ハンドブック, (非線形振動: 分担執筆), 2011, pp.63-72, 朝倉書店

6. 研究組織

(1)研究代表者

池田 隆 (IKEDA TAKASHI)
広島大学・工学研究院・教授
研究者番号: 50115523

(2)研究分担者 (3)連携研究者 なし

(4)研究協力者

Raouf, A. Ibrahim
Wayne State University ・ Mechanical Engineering Department ・ Professor