

氏 名	須 藤 誠 一
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成元年 2 月 8 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 4 6 年 3 月 東北学院大学工学部応用物理学科卒業
学 位 論 文 題 目	液体スロッシングにおける気液界面流動に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 橋本 弘之      東北大学教授 小林 陵二 東北大学教授 神山 新一      東北大学教授 谷 順二

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

液体を入れた容器が振動外力を受ける場合に発生する液体スロッシング現象は工業技術の進展に伴って、宇宙工学、耐震工学、海洋工学、造船工学、化学工学などのいろいろな分野で重要な問題となってきた。しかし、従来の液体スロッシングの研究は各分野の興味の振動数および加速度あるいは変位の特定領域に偏在しており、かつ流体力学的観点からの系統的な研究が行われていない。特に、低振動数領域（数 Hz～数十 Hz）における非線形液面応答や液体自由界面に発生する流動についてはほとんど不明であり、さらに振動数および加速度の高い加振領域（数 Hz～数百 Hz,  $10\text{m/s}^2 \sim 200\text{m/s}^2$ ）における研究はその実験的困難さおよび現象が複雑なための理論的取り扱いの困難さ故に極めて少数の報告しか知見されず、液体自由界面の崩壊機構、気泡混入機構、気泡群の形成を伴う液体圧力変化などは全く不明である。以上のような現状から、広い範囲の振動数および加速度領域にわたった液体スロッシング現象の基本的な流動機構の解明が必要とされている。

よって、本論文では、各種容器に広範囲にわたった振動数及び加速度の縦振動あるいは水平振動を加え、種々の液体深さにおける液体界面の波動、界面の崩壊機構、液滴および気泡群の形成、気泡および気泡群の挙動、気体注入によって起こる液体自由界面の変動、液体が磁性流体である場合の印加磁場による界面振動特性などの界面流動機構を液体工学的手法によって究明し、得られた結果の知識を学問的に系統化し、また各種産業機器および産業施設の設計製造に関する基礎資料として寄与することを目的としている。

## 第2章 縦振動による液体自由界面の崩壊

本章では、部分的に液体で満たされた容器が縦振動を受ける場合に、液体自由表面に発生する界面流動現象を把握する目的で実験的研究を行なった。その結果、液体自由表面の挙動が加振振動数と加振加速度の組み合わせによって区別される特徴的な応答を示すことを明らかにした。すなわち、図1に示すように任意の加振振動数で見れば、加振加速度の上昇とともに液体自由表面は波動運動、液体崩壊、液滴の飛び出し、液滴の飛び出しを伴う低振動数の波動運動へと順次移行して行くことが明らかである。さらに、液体自由表面の崩壊が縦振動によって発生した1/2分数調波が比較的高い加振加速度によって液柱として成長し、その液柱上に軸対称不安定波が発達し、液滴として切断する過程から成り立っていることを明らかにした。

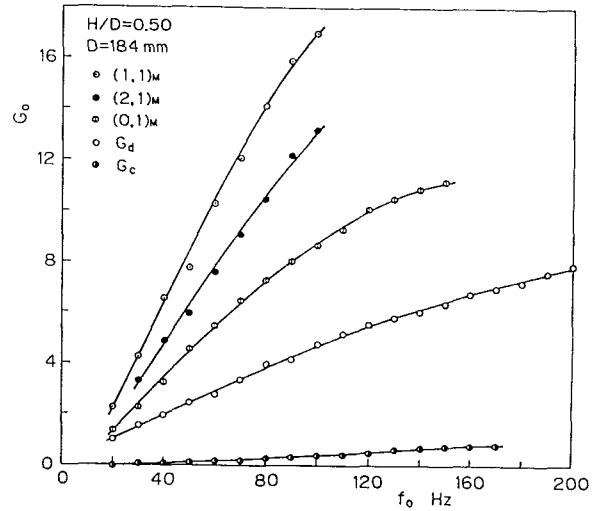


図1 円筒容器内の液体自由界面の縦振動特性

## 第3章 縦振動による気泡の混入と気泡群の形成

縦振動がある加振条件を越えた場合、容器内の液体界面上に発生した1/2分数調波が成長することによって液滴が界面上に飛び出し、液体自由界面は崩壊する。このような液体自由界面の崩壊は液体上部に存在する気体を液体内部に持ち込み、液体界面および液体内部は複雑な流動機構を呈する。本章では、液体上部に存在する気体が液体内に混入する一過程を数値計算により解析し、気体混入機構を明確にし、縦振動液体中の単一気泡の挙動および多数の微小気泡の集合によって形成された気泡群の挙動を究明し、大きな体積を持つ気泡群(図2)が浮力によって液体内に留まることができる

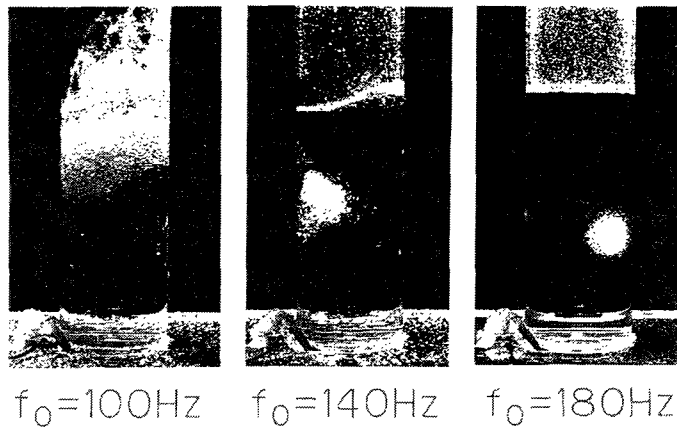


図2 縦振動液体内に形成された気泡群の写真

原因は気泡群が1つの大きな気泡として、その固有振動数と加振振動数が一致して気泡の共振状態が実現され、大振幅で振動することによる Bjerknes の運動浮力が大きくなるためであることを明らかにした。さらに、振動液体内に気泡を注入することによって液体自由界面におよぼす気泡の影響についても究明した。

#### 第4章 縦振動液柱内に発生する圧力振動特性

液体スロッシングにおける界面流動現象の解明のためには、液体自由界面の波動や混入気泡によって形成された気泡群の挙動のほかに、縦振動容器内の液体に発生する圧力振動を調べる必要がある。したがって、本章では縦振動する円筒容器内の液体の流動をより深く理解するため、容器内の液体深さを種々変化させ、さらに、加振加速度をも種々変化させた場合の縦振動液体内の圧力振動特性を究明した。特に、円筒容器内の液体自由界面が縦振動によって崩壊して気泡群を形成する場合の液体内の圧力変動を実験によって詳細に調べ、圧力変動の振幅の時間変化や最大振幅の発生条件などを定量的に明らかにした。また、実験結果と理論的考察との対比によって、圧力変動、液体自由界面の変動および容器壁の振動の時間変化に対する急激な変化は、液体内のボイド率が増加し、液体スロッシングが液体-気体-容器振動系の共振状態に近づくために起こることを明らかにした。

#### 第5章 縦振動する矩形容器内の二層液体の挙動

二層以上の混じり合わない液体を含有する容器が振動する場合、それらの液体の挙動は工業および工学上の観点から重要な問題となる。そこで本章では、二層液体スロッシングの基本的な問題として水平断面が矩形の容器（四角柱容器）が混じり合わない二層の液体で部分的に満たされ、その容器が鉛直方向に調和振動を受ける場合の液体自由界面および二層液体界面に発生する波に関して界面張力を考慮した線形近似による三次元理論解析を展開した。さらに、角柱容器内の混じり合わない二つの液体の深さを種々変化させ、容器縦方向に加振させた実験を行ない、理論結果と実験値を比較し、両者の良好な一致から本理論の妥当性が証明された。次に、理論解析において対象としている加振振幅の領域を越えた実験を行ない、液体自由表面ならびに二層液体界面の両者が崩壊するとき上層液体がちぎれて多数の液滴となり下層液体に混じり込むこと、およびその液滴の大きさは同一モードの液体自由表面崩壊波のとき、加振振幅を一定とした場合には加振振動数の増加とともに増大することを明らかにした。

#### 第6章 水平振動する円筒容器内の液体の挙動

前章までは、振動外力が液体を含有している容器に対して縦方向に作用する場合の液体応答について調べた。本章では、前章までの研究成果を踏まえて、従来の研究ではなされなかった比較的広い範囲の加振振動数および加振加速度（あるいは加振振幅）における水平方向の加振に対して、円筒容器内の液体の自由界面および液体内部の複雑な流動特性を究明した。すなわち、比較的加振振動数が低く、かつ加振振幅が比較的大きい場合、加振振動数の2倍で振動する大振幅の高調波、および加振振動数の1/2倍で振動する分数調波が発生することを示し、比較的高い加振振動数の領

域で発生する同心円状の共振波および加振振動数のちょうど1/2の振動数で応答する方位角波の波の波長は加振振動数の増加とともに減少することを示した。さらに、液体自由表面の流れを可視化し、容器壁と容器中心軸において発生する循環流の速度を定量的に計測した(図3)。また、液体-容器系のパラメトリック共振の近傍で比較的高い加速度で液体自由界面の崩壊を励起した場合に、液体自由界面上に多数の浮遊する液滴が形成されることを明らかにした。

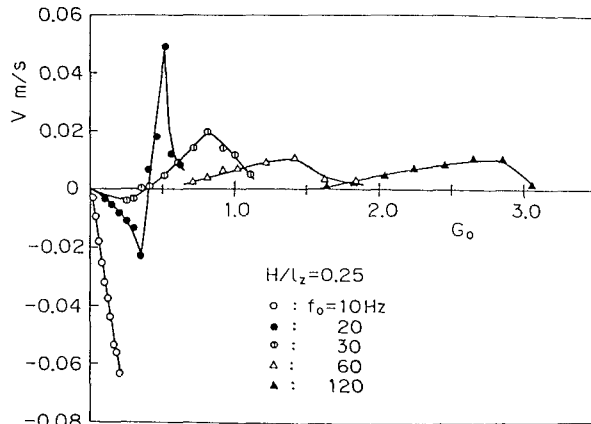


図3 水平振動する円筒容器内の液面における流れの速度

## 第7章 水平振動スロッシングにおけるカオス的液面挙動

おもに物理学の分野において、確率論的とは別に、決定論的な法則から解として不規則な時空間的な振る舞いの導かれることが明らかになり、このような決定論的方程式に従いながら不規則な振る舞いをする解はカオスと呼ばれるようになった。この予測可能性に限界を示唆するカオスに対する研究が重要視され、現在では広い分野で非線形系の運動が調べられ、カオスが見つけられている。液体スロッシングの研究においても Gollub と Meyer がしきい値以上の加振振幅で円筒容器内液体をスピーカーで縦加振した場合に液面振動応答がカオス状態となることを示したが、直接液面変動を計測しておらず、液面振動の挙動の分岐図などのデータは得られていない。また、水平振動スロッシングにおいてもこのようなデータは全く得られておらず、わずかに一次モードの固有振動数近傍における巡回運動がカオス的挙動を示すという報告を知見するのみである。そこで、本章では、部分的に液体で満たされた円筒容器を水平方向に加振し、液体自由表面に発生する波動を光学的に検知し、加振加速度の増加に伴って波動が規則的な振動から不規則なカオス的挙動へと遷移する過程を明らかにした(図4に加速度による波動応答の一例を示す)。

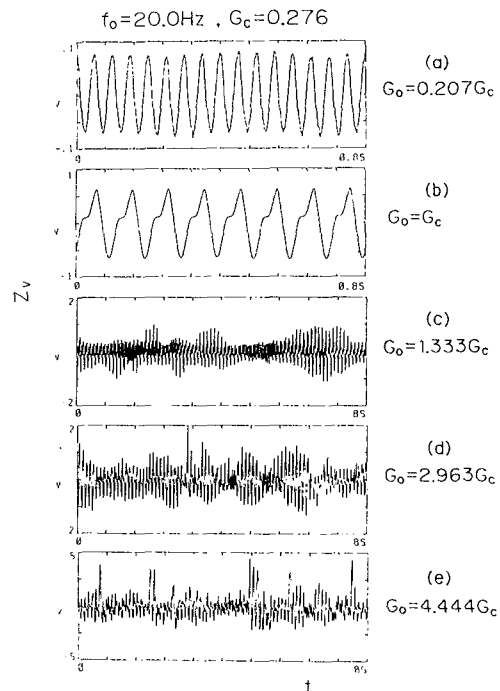


図4 液面波動の振動出力波形

## 第 8 章 磁場下における水平振動磁性流体スロッシング

本章では、最近注目されている磁性流体を使用した液体スロッシングの実験を磁場印加の状態で行ない、磁性流体スロッシングの特性を明らかにした。まず始めに、液体スロッシングを調べるため前段階として長方形容器内に磁性流体を部分的に満たし、その液体自由界面に対して平行に磁場を作用させた場合の界面変形の発生と成長の様子を寸法の異なる種々の容器を用いて実験的に究明し、それらの実験結果を合理的に説明

するための理論的考察を行なった。次に、磁場による液体自由界面の制御の観点から、水平振動する容器内の磁性流体の界面に発生する波動の振幅は磁場の強さの増加とともに減少すること、磁性流体一円筒容器系をその系の固有振動数で加振することによって生成された浮遊液滴の数は磁場の強さの増加とともに減少し、その減少量は磁場と加振方向が直角な場合に比べて磁場方向と加振方向が一致する場合に著しい(図5)ことなどを明らかにした。

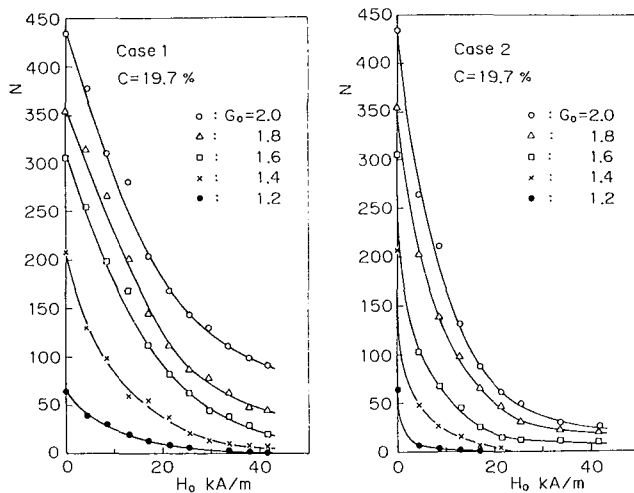


図5 磁場による浮遊液滴数の変化

## 第 9 章 結 論

本章は、液体スロッシングにおける気液界面流動に関する研究を総括し、各章で得られた知見を簡潔にまとめたものである。

## 審査結果の要旨

液体スロッシング現象は各種飛翔体の液体燃料制御や液体貯蔵タンクの地震対策などに関連してその基本特性の解明が重要視されている。本論文は振動する各種形状容器内の気液界面現象の安定化や液面制御に必要な加振条件を確立することを目的とした一連の研究成果をまとめたもので、全編9章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、容器が縦振動するとき、加振加速度の上昇とともに、液体表面が波動、液滴の発生、液滴を伴う大振幅波などの特徴的な応答を示すことを系統的に明らかにしている。これは液面制御に対し有用な成果である。

第3章では、縦振動による気泡の混入と気泡群の形成について実験的に明らかにするとともに、気体が液体内に混入する過程を数値計算により解析し、振動液体中の気泡群の挙動を解明した。これは優れた知見である。

第4章では、縦振動液柱内に発生する圧力の振幅の時間変化や最大振幅の発生条件などを定量的に明らかにしている。また、実験と理論の対比によって、液体中のボイド率の増加が液体-気体-容器からなる振動系の共振状態に強く関与することを実証している。

第5章では、縦振動する長方形容器内の二層液体の挙動に対する三次元理論解析を展開している。また、混じり合わない二つの液体の種々の深さに対する実験と理論結果が良好に一致することから二つの液体界面の不安定性を支配する要因を明確に提示している。

第6章では、水平振動する円筒容器内の液体自由表面の流れを可視化し、容器内に発生する循環流を定量的に示している。また、液体-容器系の共振振動数の近傍で加振した場合に、自由界面上に多数の液滴が浮遊し、自由界面の変動に大きな影響を与えることを定量的に明らかにしている。

第7章では、水平加振の円筒容器内の液体自由表面に発生する波動を光学的に検知し、加振加速度の増加に伴って界面が規則的な振動からカオスの挙動へと遷移する過程を明らかにしている。これは有用な知見である。

第8章では、磁場下における磁性流体の界面に発生する液滴の数は磁場の強さの増加とともに減少し、その減少量は磁場方向と加振方向が一致する場合に著しいことなどを明らかにし、磁場による液面制御の可能性を実証している。これは実用的な成果である。

第9章は結論である。

以上要するに本論文は、従来不明であった液体スロッシングにおける気液界面流動現象について詳細な解明を行い、各種のタンクの液面制御や安全設計に重要な基礎資料を多数提示したもので、液体工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。