

平成 30 年 5 月 17 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05870

研究課題名(和文) 柔軟構造宇宙機の高精度指向・姿勢安定化に及ぼす内部攪乱の影響

研究課題名(英文) Influence of internal disturbance on the high precision pointing and stabilization of attitude of flexible spacecrafts

研究代表者

千葉 正克 (Chiba, Masakatsu)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10179955

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：モデルⅠ 液体を円筒タンク内部に有し衛星本体に2つの梁を有する柔軟宇宙機モデルの連成振動解析・柔軟宇宙機本体を剛体円筒タンクに、アンテナ等の柔軟付属物を2本の梁にモデル化し、内部液体は表面張力によるメニスカスを考慮した。衛星本体と2つの梁及び内部液体の並進運動又はピッチング運動の連成振動を解析した。さらに衛星本体と2本の梁の結合部の回転ばねの影響を調べた。
モデルⅡ 弾性ダイヤフラムでカバーされた球形タンクの連成固有振動解析及び実験、並びに鉛直方向加振を受ける場合の動的安定性に関する実験及び解析を行った。解析では平面ダイヤフラムを扱い、実験では半球ダイヤフラムも扱った。

研究成果の概要(英文)： Model I Flexible spacecraft with liquid in tank on-board. Hydroelastic free vibration was analysed by considering the main body of the spacecraft as a rigid tank, the flexible appendages as two elastic beams, and on-board liquid as an ideal liquid considering the meniscus of free surface.

Model II Semi-spherical tank covered with elastic diaphragm. Coupled free vibration and dynamic stability were investigated in both experimentally and theoretically. In the analysis, plane membrane diaphragm was considered, while in the experiment semi-spherical diaphragm was also tested.

研究分野：構造力学

キーワード：流体関連振動 スロッシング 膜カバー 柔軟宇宙機

1. 研究開始当初の背景

人工衛星や宇宙探査機では、姿勢・軌道制御のため内部に液体燃料を含む**球形のタンク**を有しており、姿勢の変更や、例えばホイールやジャイロ等の衛星内部機器の振動攪乱によって生じる**液体の運動(スロッシング)**は、近年の衛星ミッションの高度化に対して大きな障害となる。例えば、地球表面の精密な画像写真の撮影を目的とする衛星や天文観測衛星では、数千分の1°以内(1秒角以内)の指向精度が要求されている。

軌道上では、推進剤排出のため、ブラダークやダイヤフラムなどの膜材で液体を覆うか、表面張力で液体を捕捉する。これまでの研究では、推進系としての排出効率に関する研究が主で、指向性能に関係する動特性はほとんど研究されていない。これは、スロッシングの研究が盛んであった1970年前後では近年のような秒角(1/3600度)以下の指向精度要求がなかったため、考える必要もなかったからである。

従って、そのような環境での**柔軟宇宙機構造-液体連成振動系**の基本的な挙動特性を把握すること、並びに揺動の抑制は、宇宙機の高精度姿勢制御及びミッション要求に対する信頼性の向上という観点から、工学的に非常に重要な課題であり、宇宙天文学の発展と宇宙を利用した理工学分野の拡大に繋がる。

2. 研究の目的

資源探査や天文観測を目的とする人工衛星では、数千分の1°以内の姿勢擾乱又は指向精度が要求されているが、衛星内部にはジャイロ、制御用ホイール、冷凍機、パドル駆動用モーター等の振動擾乱要素があり、その達成はかなり難しい。また、実機において低振動数のゆっくりとした振動が残留しているとの報告もあり、現在未解決の問題である。本研究では、その原因の1つには、これらの攪乱により励起される、搭載されている液体燃料の運動(スロッシング)があると考え、モデルによる理論解析を行い、並行して「球形タンク+液体+膜」システムに対して、地上でできる範囲で実験を行い、そのダイナミクス特性を明らかにし、姿勢擾乱等に及ぼすスロッシングを抑制する為の知見を得る。

3. 研究の方法

宇宙機と内部液体との連成挙動を解明するモデルとして、以下の3つの項目に分類した。

内部液体を有する柔軟宇宙機の連成振動解析(Fig. 1, Fig. 2)

・並進運動、ピッチング運動、アンテナ等付属物のヒンジばねについて調べた。

宇宙機本体を内部に液体を有する円筒タンクに、太陽電池パドルのような柔軟付属物を2本に弾性梁にモデル化し、本体-液体-梁の連成システムを *Rayleigh-Ritz* 法を用いて解いた。内部液体は理想流体とし、表面張力による自由液面のメニスカスも考慮した。

弾性ダイヤフラムでカバーされた半球タンク又は円筒タンクの連成振動解析と実験(Fig. 3) ・半球ダイヤフラムでの実験、平面ダイヤフラムでの実験

アクリル製の半球タンクとのシリコン製の半球又は平面ダイヤフラムを用いた。

鉛直方向加振を受ける弾性ダイヤフラムでカバーされた半球タンク又は円筒タンクの動的安定性に関する解析と実験(Fig. 3) ・半球ダイヤフラムでの実験、平面ダイヤフラムでの実験 試験タンクを電磁加振機で加振した。

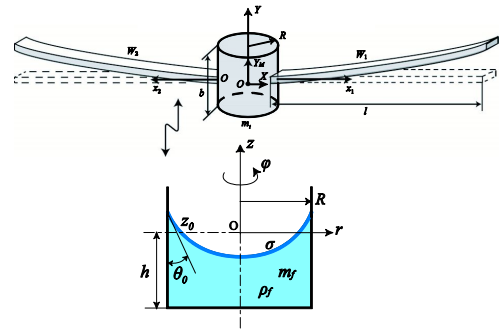


Fig. 1 内部液体を有する柔軟宇宙機の連成モデル：並進運動()

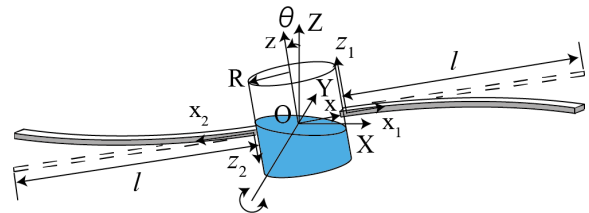


Fig. 2 内部液体を有する柔軟宇宙機の連成モデル：ピッチング運動()

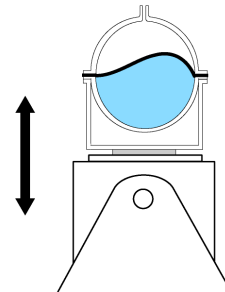


Fig. 3 弾性ダイヤフラムでカバーされた半球タンク又は円筒タンクの連成振動及び、鉛直加振を受ける場合の動的安定性に関する解析と実験(、)

4. 研究成果

内部液体を有する柔軟宇宙機の連成振動解析：並進運動

i 固定された剛体円筒タンク内液体のスロッシング特性

- ・接触角 $=90^\circ$ で固有振動数が最大となる。
- ・振動モードは接触角により僅かに変化する。

ii 空間に浮遊したタンク内液体のスロッシング特性

- 空間に固定されたタンクの場合と比べ、
- ・固有振動数は僅かに高くなる。
- ・液体のスロッシングは空間に浮遊している宇宙機本体の運動に影響し、発生させる運動の方向は接触角 $=90^\circ$ の前後で反対方向となる。
- ・液体のスロッシングが空間に浮遊している宇宙機本体の運動に及ぼす影響は、タンクの質量比と液位が大きい程顕著になる。

iii 液体がない場合の連成システム

- ・宇宙機本体の質量比が大きい場合、宇宙機本体は殆ど運動せず、システムの固有振動数は固定-自由の境界条件を有する梁の固有振動数となる。
- ・一方、宇宙機本体の質量比が小さい場合、システムの固有振動数は自由-自由の境界条件を有する梁の固有振動数となる。

iv 液体を有する場合の連成システム

- ・内部液体を理想流体としたことにより、液体の運動が卓越する振動数と宇宙機本体、またはアンテナ等の付属部が卓越する振動数が近づき、連成振動が発生する可能性がある。
- 論文(5)にまとめた。

内部液体を有する柔軟宇宙機の連成振動解析：並進運動、ヒンジばねの影響

i 液体がない場合の連成システム

- ・宇宙機本体の質量比が大きくなると固有振動数は低くなる。ヒンジばね定数が小さいと梁の運動が卓越する最低次の固有モードは、単純支持-自由梁のモードに近づき、剛体運動に近い挙動を示すため、固有振動数が低くなる。また、ばね定数が大きくなる程指示条件は固定支持に近づき、固有振動数は高くなる。
- ・宇宙機本体の変位に注目すると、各振動モードでの宇宙機本体の変位は本体の質量比が大きくなると小さくなり、1次モードの変位は大きいが高くなるにつれて変位は小さくなる。また、変位の方向は奇数次と偶数次モードで反対となる。

ii 液体を有する場合の連成システム

- ・ヒンジばね定数を変化させると、アンテナ等の付属部が卓越する振動数が変化し、液体の運動が卓越する振動数と宇宙機本体、連成

振動が発生する領域が発生する。

論文(4)にまとめた

内部液体を有する柔軟宇宙機の連成振動解析：ピッチング運動

- ・宇宙機本体の慣性モーメントが大きくなると固有振動数は低くなり、梁の根元の回転(変位)は小さくなる。

論文(3)と学会発表論文(1)にまとめた。

平面弾性ダイヤフラムでカバーされた半球タンク内液体の連成振動解析 論文(2)にまとめた。

平面又は半球ダイヤフラムでカバーされた半球タンク内液体の動的安定性：実験論文(6)と(7)にまとめた。

平面ダイヤフラムでカバーされた半球タンク内液体の動的安定性：解析

- 発生するパラメトリック不安定の領域に及ぼすダイヤフラムの張力の影響を調べた結果、張力を大きくすると中心振動数は高くなり、領域の広がり係数は小さくなること、不安定振動が発生しにくくなることが分かった。

論文(1)にまとめた。

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 7件)

(1) M. Chiba, S. Shigematsu:

Dynamic stability of liquid in a hemispherical tank covered with a plane diaphragm, contributing to *J. Sound & Vibration*, Vol. , pp. - (201) 査読あり

(2) M. Chiba, S. Shigematsu:

Liquid sloshing in a hemispherical tank covered with a plane diaphragm, contributing to *J. Fluids & Structures*, Vol. , pp. - (201) 査読あり

(3) M. Chiba, H. Magata:

Influence of liquid sloshing on the pitching dynamics of flexible space structures, contributing to *J. Sound & Vibration*, Vol. , pp. - (201) 査読あり

(4) M. Chiba, H. Magata:

Influence of liquid sloshing on dynamics of flexible space structures: Effect of torsional rigidity of flexible appendages, contributing to *Aerospace Science & Technology*, Vol. , pp. - (201) 査読あり

(5) M. Chiba, H. Magata:

Influence of liquid sloshing on dynamics of flexible space structures, *J. Sound & Vibration*, Vol. 401, pp. 1-22 (2017) 査読あり

(6) M. Chiba, R. Murase, R. Kimura, Y. Yamamoto, K. Komatsu:

Experimental studies on the dynamic stability of liquid in a spherical tank covered with diaphragm under vertical excitation, *J. Fluids and Structures*, Vol. 61, pp. 218-248 (2016) 査読あり

(7) M. Chiba, R. Murase, Y. Nambu, K. Komatsu:

Dynamic Stability of Liquid in a Spherical Tank Covered with Membrane under Vertical Harmonic Excitation, *Int. J. Aerospace System Engineering*, Vol. 2(2), pp. 34-39 (2015) 査読あり

〔学会発表〕(計 4 件)

- (1) 2018. 3. 13 柔軟宇宙機の運動に及ぼすタンク内液体のスロッシングの影響：ピッチング運動、間賀田 秀健, 千葉 正克, 南部 陽介、日本機械学会 関西支部第93期定時総会・講演会(寝屋川)、711
- (2) 2017. 10. 26 平面膜でカバーされた球形タンク内液体のスロッシング振動解析、千葉 正克、重松 宗志、南部 陽介、第61回宇宙科学技術連合講演会(新潟)、2F14
- (3) 2016. 3. 10 膜面を有する球形タンク内液体のパラメトリック不安定特性に及ぼす膜厚と張力の影響、重松宗志、千葉正克、南部陽介、日本機械学会関西学生会 平成27年度学生員卒業研究発表講演会(大阪)、15A23
- (4) 2015. 5. 21 Dynamic Stability of Liquid in a Spherical Tank Covered with Membrane under Vertical Harmonic Excitation, M. Chiba, R. Murase, Y. Nambu, K. Komatsu, The 8th Asian-Pacific Conference on Aerospace Technology and Science 2015, Jeju, Korea, 140251

* (4)の論文は Best Paper Award を受賞した。

6. 研究組織

(1)研究代表者

千葉 正克 (CHIBA Masakatsu)
大阪府立大学・工学研究科・教授
研究者番号：10179955