

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 6月21日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560802

研究課題名（和文） 内部流によるパイプの自励振動について

研究課題名（英文） Self-induced vibration of pipe with inner flow

研究代表者

國分 健太郎（KOKUBUN KENTAROH）

独立行政法人海上技術安全研究所・洋上再生エネルギー開発系・主任研究員

研究者番号：50358404

研究成果の概要（和文）：母船から吊り下げられ、下端から海水を取水して内部流がある弾性管の偏微分運動方程式を求めた。変数分離解析の結果、コリオリ力の項を省略すると実数解が存在してモードが存在する。しかし、数値シミュレーションでは自励共振及び共振現象を確認できなかった。また、パイプの上端に流速計とポンプを取り付け、水槽の水を汲み上げて、排水をまた水槽に戻す実験装置を製作し、内部流速及び加振周波数を変化させたが、数値シミュレーション同様自励振動及び共振現象を確認できなかった。

研究成果の概要（英文）：The authors obtained the equations of motion of an elastic pipe which is hung from a mother ship and contains inner flow of sea water sucked up at bottom end of the pipe. Separation of variables derived real solutions i.e., eigenmodes from the equations of motion with neglecting Coriolis force. Numerical simulation, however, showed neither self-induced vibration nor resonance. The authors made an experimental device which consists of a pipe, a flow velocimeter and a pump, and sucks up water from basin and backs the drainage to the basin. The model test with variation of inner flow velocity and forced oscillation frequency, however, showed neither self-induced vibration nor resonance, too.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	400,000	120,000	520,000
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2012年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：海中・海底工学

1. 研究開始当初の背景

内部に流体が流れている弾性管の横振動は、管の一端が固定支持され他端が自由の場合、管内定常流速が一定値（臨界流速）を超えると自励的に励振されることが知られて

おり¹⁾、陸上では、内部流による弾性送水管の自励振動が報告されている。このように、管内定常流により発生する送水管の振動現象は、石油パイプラインなどにおける破損事故の原因を研究することから始まり、流体力

が作用するはりの不安定振動現象として研究されてきた。一般に海水中では、周囲の流体によるダンピングが大きいため、このような現象は起こりにくいと考えられる。しかし近年では、大量の深層水取水を行うことのニーズが増大しており²⁾、洋上 LNG 液化用プラントの冷却を目的とした取水管 (図 1、2) では、フラッターによる自励振動が起こり得る事が、実験的に確認されている。³⁾

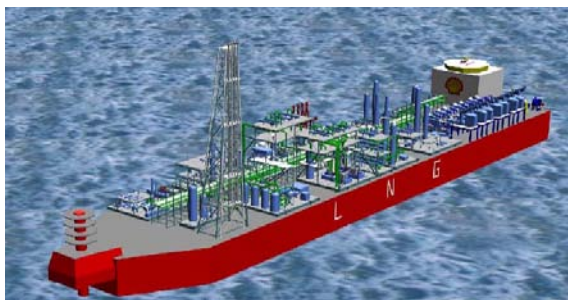


図 1 洋上 LNG 液化用プラントのイメージ³⁾

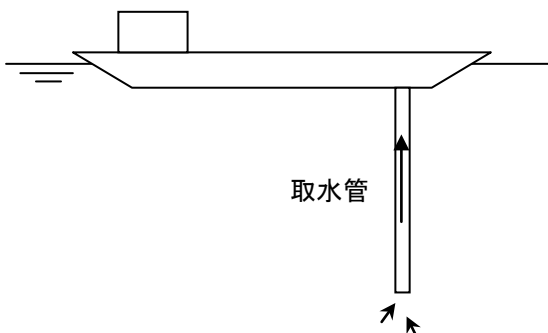


図 2 LNG プラント冷却用取水管

応募者は過去に、宇宙におけるテザー衛星⁴⁾や海中のライザーなどの線状構造物の運動と制御の研究を実施してきており、近年では、内部流体の影響を考慮したライザーの縦弾性挙動予測の研究を実施した。⁵⁾この研究では、掘削用ライザーの下端が切り離されたハングオフ状態を対象とした。ライザー内部に海水が満たされている状態を想定し、ライザーの鉛直方向の運動と内部水柱の相対運動に起因する摩擦の影響を考慮した縦弾性挙動の解析を行った。

本研究では、内部流体に流速がある場合を想定し、自励振動を含めた弾性管の撓み振動の予測が可能にすることを目指した。

参考文献

- 1) 「細長い弾性管の内部流れによる横振動」、吉沢正昭、他 3 名、日本機械学会論文集中 (C 編)、52 巻 474 号、710-717 頁、1986
- 2) 「LNG FPSO 用深層水取水管の成立性の検討」、前田健策、他 6 名、日本船舶

海洋工学会講演会論文集第 8 号 93-96 頁、2009

- 3) Kuiper, G., Metrikine, A., and, Efthymiou, M., “Experimental Investigation of the Dynamic Behaviour of a Water Intake Riser,” OMAE2007-29401, *Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, OMAE2007, June 10-15, 2007, San Diego, California, USA
- 4) Kokubun, K., and Fujii, H. A., “Deployment/Retrieval Control of a Tethered Subsatellite under Effect of Tether Elasticity,” *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol.19, No.1, pp.84-90, 1996
- 5) 「内部流体を考慮したハングオフライザーの縦弾性振動」、國分健太郎、他 7 名、日本船舶海洋工学会講演会論文集第八号、61-64 頁、2009

2. 研究の目的

研究期間内で、内部流がある弾性管の自励振動の定式化、解析、数値シミュレーションプログラム開発、実験による検証までを実施した。それにより、弾性管の曲げ剛性、管径等を与えた場合に、弾性管の自励振動が生じる内部流の臨界流速及び自励振動の振幅と振動数を求める事が目的であった。

3. 研究の方法

(1)平成 22 年度

①内部流がある弾性管の自励振動の運動方程式の導出では、内部流は管の影響を受け、管内流速は管の運動と無関係に決められないので、管の横たわみが有限であるとした理論的扱いが必要となる。よって、内部流体、弾性管共に連続体でモデリングし、大たわみ理論を採用した。対象は、母船からつり下げられている取水管で、下端から海水を取水するものとした。

②はじめに基本的な現象を理解するために、運動は管軸 (鉛直軸) とそれに直交する一軸で形成される 2 次元面内に限られると仮定し、ハミルトンの変分原理を用いて運動方程式を導出した。

運動方程式の変数分離を行った。内部流のある弾性管の固有モードは、運動方程式およびその境界条件式が、自明でない (零でない) 解を持つための条件式から求められる。管内流速を与え、固有周期を解析的に調べた。

③次に 2 次元の定式化と同様に、内部流体、弾性管共に 3 次元の連続体でモデリングし、大たわみ理論及びハミルトンの変分原理を

用いて運動方程式を導出した。

(2)平成 23 年度

① 3次元運動方程式を差分化し、解の安定性を考慮しつつ数値シミュレーションプログラムを開発した。

②数値シミュレーションにより解析解の検証を行った。

③数値シミュレーション結果の有効性を検証するために、弾性模型を用いた実験を行った。実験は(独)海上技術安全研究所の深海水槽(深さ35m)を用いて行った。模型(パイプ)の長さは6mとした。パイプ上端は耐圧ホースで吸引ポンプとつなぎ、ポンプからの排水は水槽に戻る。吸引ポンプの出力を調整して管内流速を変え、自励振動の振幅と周波数を調べた。なお本実験ではパイプ上端は静止した状態で計測を行った。結果を解析解及び数値シミュレーション結果と比較した。

(3)平成 24 年度

①数値シミュレーションプログラムを改良し、浮体の動揺による弾性管上端の運動を考慮できるように拡張した。

②浮体の動揺に相当する運動を弾性管の上端に与える強制加振模型実験を行った。模型(パイプ)は、前年度に設計製作したものを使用した。パイプ上端を強制加振装置に接続し、強制加振の周期を変えた。吸引ポンプの出力を調整して管内流速を変え、模型の撓み振動の固有周期との共振現象に対する管内流の影響を調べた。結果を数値シミュレーション結果と比較した。

③数値計算結果の精度の向上を目的とした補助的な実験として、模型の内部摩擦計測実験、流速計の検定実験、模型に働く遠心力計測実験を行った。

4. 研究成果

(1)平成 22 年度

①母船からつり下げられ、下端から海水を取水する弾性管の、管軸(鉛直軸)とそれに直交する一軸で形成される2次元面内の運動方程式は、次式ようになる。

$$\begin{aligned} & \rho_r A_r \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v}{\partial x} T_x \right) \\ & + \rho A q^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - 2\rho A q \frac{\partial^2 v}{\partial t \partial x} + C_d \frac{1}{2} \rho D \frac{\partial v}{\partial t} \left| \frac{\partial v}{\partial t} \right| \\ & + C_a \rho \frac{\pi}{4} D^2 \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 ρ は密度、 A は断面積、 E はヤング率、 I は断面二次モーメント、 q は内部流速、 C_d は抵抗係数、 D は直径、 C_a は付加質量係数であり、左辺第4項は遠心力を、第5項はコリオリ力を、第8項は内部流からの反力を示す。

②内部流のある弾性管の固有モードは、運動方程式およびその境界条件式が、自明でない(零でない)解を持つための条件式から求められる。この条件は、コリオリ力よりも遠心力の影響が主の場合に満たされる。

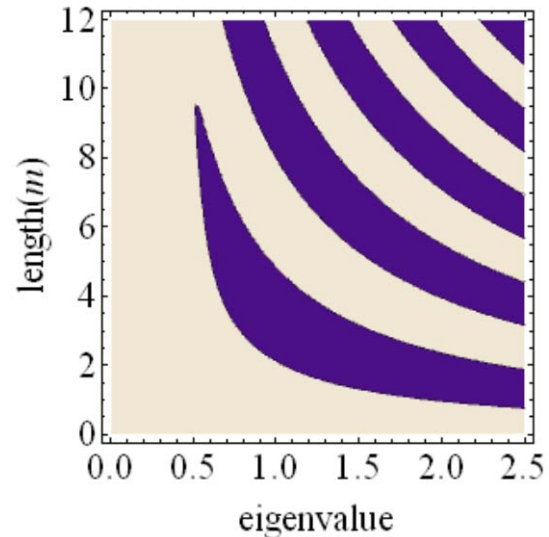


図-3 モードの判別図

図-3は、横軸に固有値、縦軸にパイプ長さをとった場合の、内部流速が1.96m/sで張力は一様に平均値としたパイプの条件式のコンター図である。色の薄い所が正、濃い所が負、境界が零であり、一番左の境界からそれぞれ1次モード、2次モード、・・・を示している。例えば長さ6mのパイプの1次モードの固有値は約0.6、2次モードのそれは約0.8であり、長さが10mになると、3次モードから始まることが判る。

管内流速を様々に変え、固有周期を解析的に調べた。

③2次元の定式化と同様に、内部流体、弾性管共に3次元の連続体でモデリングし、大たわみ理論及びハミルトンの変分原理を用いて運動方程式を導出した。平面内運動と平面外運動の方程式は独立で同形であった。よって平面内運動の方程式のみを考慮した。

(2)平成 23 年度

①運動方程式を差分化し、解の安定性を考慮しつつ数値シミュレーションプログラムを開発した。

②数値シミュレーションにより解析解の検証を行ったが、自励振動の発生は確認されなかった。

③数値シミュレーション結果の有効性を検証するために、弾性模型を用いた実験を行った。模型(パイプ)の長さ、ヤング率、外径、内径はそれぞれ、6m、 $4.93 \times 10^8 \text{N/m}^2$ 、0.028m、0.025mであった。吸引ポンプの出力を調整して管内流速を最大2.98m/sまで変化させたが、シミュレーション同様自励振動の発生は観察されなかった。

(3)平成 24 年度

①数値シミュレーションプログラムを改良し、浮体の動揺による弾性管上端の運動を考慮できるように拡張した。

②浮体の動揺に相当する運動を弾性管の上端に与える強制加振模型実験を行った。模型(パイプ)は、前年度に設計製作したものを使用した。パイプ上端を強制加振装置に接続し、強制加振の周期を変えた。また、吸引ポンプの出力を調整して管内流速を最大2.98m/sまで変化させた。模型の撓み振動と内部流の振動の共振現象に対する管内流の影響を調べた。実験の様子を写真-1に示す。



写真-1 実験の様子

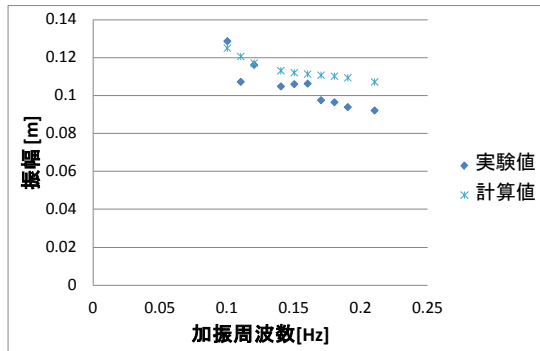


図-4 加振開始120秒後のパイプ下端の振幅(内部流有り)

図-4に、上端を振幅0.1mで強制加振した場合の、加振開始120秒後のパイプ下端の振幅を示す。ここで、横軸は加振周波数であり、内部流速は1.96m/sであった。計算値と実験値はほぼ良い一致を示すが、固有周波数の0.16Hzでは計算値、実験値共に共振は見られない。

③数値計算結果の精度の向上を目的とした補助的な実験として、模型の内部摩擦計測実験を行い、内部摩擦係数を求めた。また、流速計の検定実験を行い、キャリブレーション定数を確認した。また、模型に働く遠心力計測実験を行い、遠心力の大きさを確認した。

(4)まとめ

内部流がある弾性管の自励振動の定式化、解析、数値シミュレーションプログラム開発、実験による検証までを実施した。

運動方程式を変数分離して、内部流のある弾性管の固有モードを求めたが、数値シミュレーション、実験共に、固有モードの自励及び共振現象は確認出来なかった。

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0件)

〔学会発表〕(計1件)

1) 國分健太郎、パイプの振動に対する内部流の影響、海上技術安全研究所研究発表会、平成25年6月25日、東京

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

特に無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

國分 健太郎 (KOKUBUN KENTAROH)

独立行政法人海上技術安全研究所・洋上再生エネルギー開発系・主任研究員

研究者番号：50358404

(2) 研究分担者

二村 正 (NIMURA TADASHI)

独立行政法人海上技術安全研究所・洋上再生エネルギー開発系・主任研究員

研究者番号：00425753