

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630459

研究課題名(和文) 渦励振ロックイン領域同定のためのクロスフロー・インライン間連成運動モデルの構築

研究課題名(英文) Development of Interaction Model between Cross-flow and In-line Directions to Identify VIV Rockin Region

研究代表者

梶原 宏之 (KAJIWARA, HIROYUKI)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：30114862

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：CCSの一つの形態としてCO2を高深度海盆にパイプを通して注入する方式が提案されているが、表層流による渦励振挙動および内部流体影響についての検討がパイプ疲労寿命の観点から重要な課題である。本研究では、片支持された注入パイプについて、内部流体排出によるクロスフロー方向渦励振の不安定挙動について検討している。まず長手方向構造振動と渦励振励起に関わる構造流体連成モデルを新しく提案し、その妥当性を実験データにより検証している。次に表層流速度と内部流体速度を変えながら、渦励振挙動が不安定となる内部流体臨界速度を求めている。特に内部流体速度の臨界速度に対する大小による渦励振挙動の違いを明らかにしている。

研究成果の概要(英文)：This study devotes efforts to investigate the IFE (Internal Flow Effect) on the CF (Cross-Flow) VIV (Vortex-Induced Vibration) of a cantilevered pipe discharging fluid. In this study, a simple fluid-structure interaction model is proposed which employs a linear structural equation to describe the transverse vibrations and utilizes a distributed wake oscillator to create the VIV effect. The simulations are justified by comparing with experiments for VIV effect and the non-conservative IFE of flexible risers. Then simulations of a flexible riser are performed by varying incoming currents and internal flow rates. The IFE on VIVs are examined by the space-time modifications of riser responses and dominant vibration frequency for which the mode switching and sharing can be identified. When the internal flow velocity is small, the pipe is losing energy to the inner flow and the VIVs can be depressed significantly.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：渦励振 内部流体 クロスフロー方向VIV インライン方向VIV

1. 研究開始当初の背景

近年、海底資源開発への期待が高まっている。たとえば、東京大学の加藤泰浩教授は、著書「太平洋のレアアース泥が日本を救う」の中で、南鳥島沖5000mの海底の泥には豊富なレアアースが含まれており、その揚泥技術の開発の必要性を訴えている。また、温室効果ガスの排出を抑制するために、6000mの海盆への液体CO₂を隔離する海洋CCSでは、その注入技術が求められている。このようなプロジェクトで共通して用いられる水中線条構造物は、その直径(約1m)に対して長さ非常に長く、模型試験での挙動の再現が困難であるため、数値シミュレーション技術の開発が望まれている。

渦励振の研究については、我国では東京大学の鈴木研究室を中心として包括的な研究が行われている。公開資料「ライザー設計におけるVIV評価手法の構築と知見の拡充」においてその一端を知ることができる。ここでは流体力のデータベースの構築を目指している。一方、欧米では渦励振の応答振幅を推定するいくつかの商用ソフトウェアが開発されているが、実際の応答振幅の推定には十数%以上の誤差があることが報告されている。

申請者の研究室では、水中線条構造物の渦励振に関する300件以上の文献調査を行った。その結果、次のような課題の解決が必要であるとの結論を得た。

まず、渦励振は流体流れ方向(インラインIL方向)とその垂直方向(クロスフローCF方向)の2種類の運動の連成現象として現れる。顕著なのはクロスフロー方向の振幅でインライン方向の振幅と1桁違う。ところが、近年、振幅は小さいが2倍の周波数をもつインライン方向の振動が、疲労に関してはクロスフロー方向と同等の影響を与えることが指摘されている。そこで、急な振幅の増大を伴うロックイン現象をモデル化するための連成非線形運動方程式の導出が第1の課題(研究目的)である。

次に、渦励振は、連成非線形運動方程式にウエイク振動モデルを結合してシミュレーションできる。従来の商用ソフトウェアは、1-DOFウエイク振動モデルを結合したクロスフロー方向のみのシミュレーションを行うことができる。ところが、クロスフロー方向の実験データの取得は行われているが、インライン方向の実験データは文献にはほとんど見られない。そこで、2-DOFウエイク振動モデル中の係数の決定をどう行うかが第2の課題(研究目的)である。

さらに、深海底からの揚泥作業、深海底への注入作業の効率化のために、内部流体移動速度をどれだけ速めても安定性を保てるかのパラメトリックスタディが第3の課題(研究目的)である。

これらの課題を解決できれば、渦励振の挙

動シミュレーションの精度が高まり、水中線条構造物の疲労寿命予測がよりの確に行われるであろう。そして渦励振の国産プログラムの開発の端緒を開くことになると期待できる。

2. 研究の目的

前節で述べた研究背景のもとで、次のような研究目的を設定した。

「渦励振ロックイン領域同定のためのクロスフロー・インライン間連成運動モデルの構築」を目的として、次の具体的課題の検討を行う。

【研究目的1】ロックイン現象を表すクロスフロー・インライン間連成運動のモデリング

【研究目的2】CF方向、IL方向のウエイク係数の決定(ウエイク振動モデルの妥当性の検証)

【研究目的3】内部流体移動速度の限界値の決定

3. 研究の方法

本研究は、代表者が指導した Shuai MENG 氏の学位論文

Nonlinear Vibration Analysis of a Cantilevered Pip Discharging Fluid in the Sea (2013)

の内容を HILS (Hardware-In-the-Loop Simulation) アプローチで追試することを基本的立場とした。これは将来、細長管上端を母船によって運動させる場合に、細長管とウエイク振動モデルからなる制御対象とコントローラ(母船 DPS)による閉ループ系を構成する必要があるためである。Meng 氏のシミュレーションは、Houbolt 法とニュートン・ラフソン法を組み合わせた有次元かつオフラインであること、また検証した実験データは某論文で公表されたものであり、これに向かない。

まず、研究目的1のために、一様流れ中の細長管の無次元運動方程式をCF方向のみとCF-IL両方向に分けて導出し、MATLAB/Simulink 上に実装し、シミュレーション結果を MENG 氏の結果と比較し、シミュレータの妥当性を確保した。

次に、研究目的2のために、本研究で独自にCF方向ばかりでなく、IL方向のロックイン現象を捉えた VIV 実験を行い、シミュレータの妥当性、特にウエイク振動モデルの妥当性の検証を行う。データ取得には、光ファイバと画像処理の2通りを試みる。実験装置(回流水槽)の制約から内部流体を入れる実験は行わないこととした。

さらに、研究目的3については、Meng 氏の研究協力者として参加していただき、共同研究を行った。

4. 研究成果

(1) 研究目的 1 に関して

片支持された細長管について、次の手順で実施した。

①ハミルトン原理からCF方向、CF-IL方向の運動方程式（分布系偏微分方程式）の導出とその無次元化

②その時間・空間依存を分離したモード展開結合係数の支配方程式（集中系常微分方程式）の導出とその行列表示

③モリソン式による流体力の表現と渦励振を励起するウェイク振動モデルの設定

④MATLAB/Simulink 環境における②と③に基づく渦励振シミュレータの開発。

紙幅の都合で上記①②③の結果は省略するが（200 頁に及びWEB で公開予定）、上記④の結果として次の Simulink 図を得た。

CF 方向

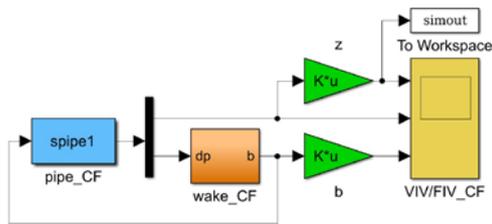


図 1 CF 方向 VIV シミュレータ

CF-IL 方向

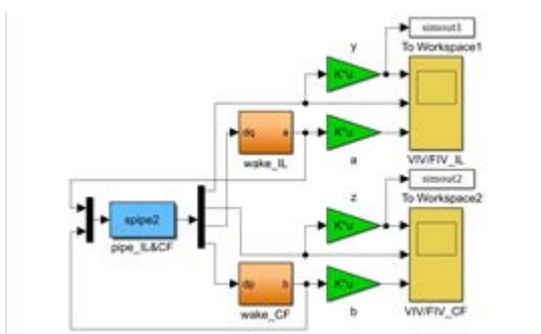


図 2 CF-IL 方向 VIV シミュレータ

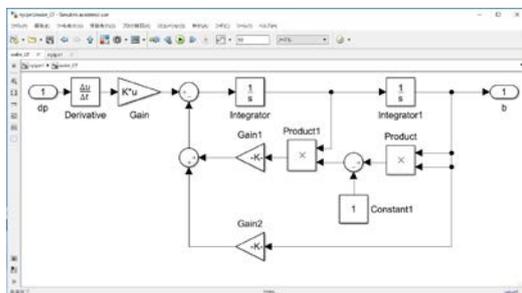


図 3 ウェイク振動モデル

以上のシミュレータの妥当性は、MENG 氏のプログラムによる結果とほぼ一致することを確認した。

(2) 研究目的 2 に関して

九州大学が所有する高速回流水槽を用いて、ロックイン現象を計測する実験を行った（図 4）。供試管は、長さ 0.8m、内径・外径 7mm/8mm のアルミ製で、流速は 0.05m/s～0.25m/s の範囲で計測した。その下端はいわゆる 8 の字を描くが、これを高速度カメラで撮影し、2次元運動解析ツールを用いて下座標の時系列を取得した（図 5）。



図 4 回流水槽を用いた VIV 実験

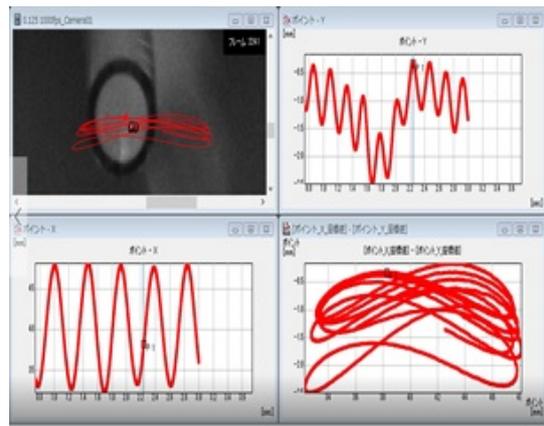


図 5 VIV 実験の画像処理結果

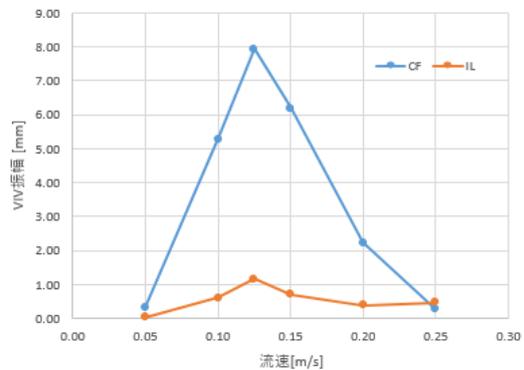


図 6 VIV ロックイン領域の実験結果

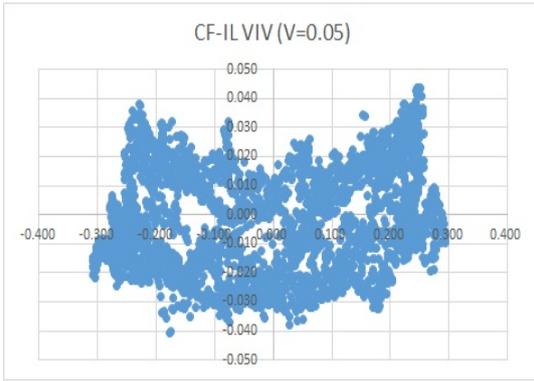


図 7 a 流速 0.05m/s の場合の下端運動

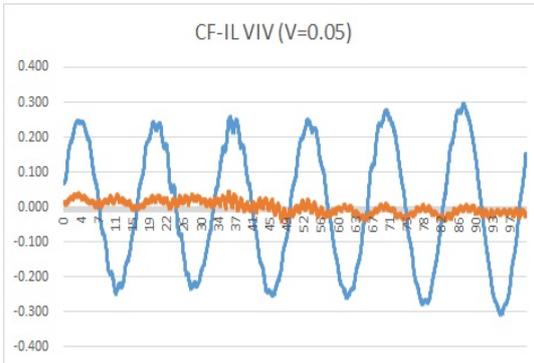


図 7 b 図 7 a の CF 方向・IL 方向振幅波形

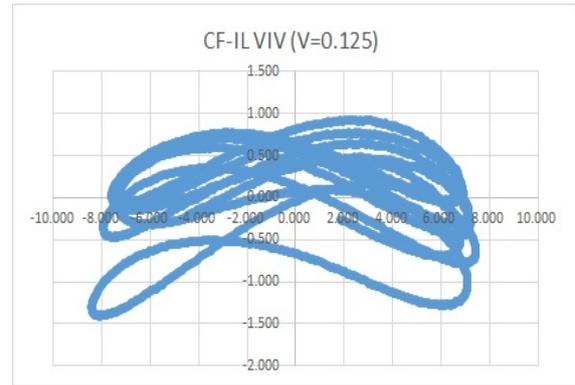


図 9 a 流速 0.125m/s の場合の下端運動

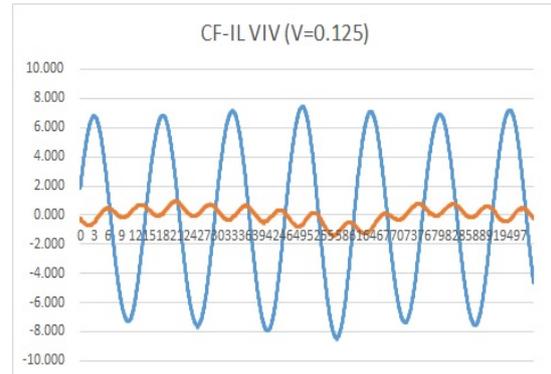


図 9 b 図 9 a の CF 方向・IL 方向振幅波形

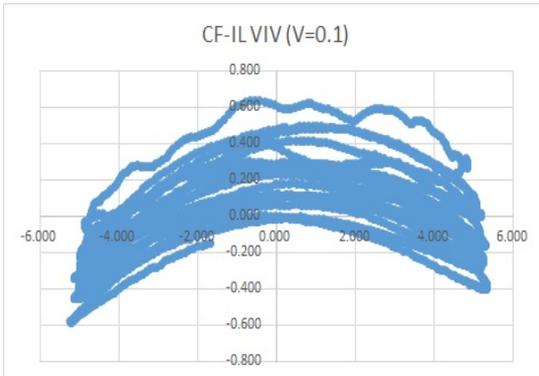


図 8 a 流速 0.10m/s の場合の下端運動

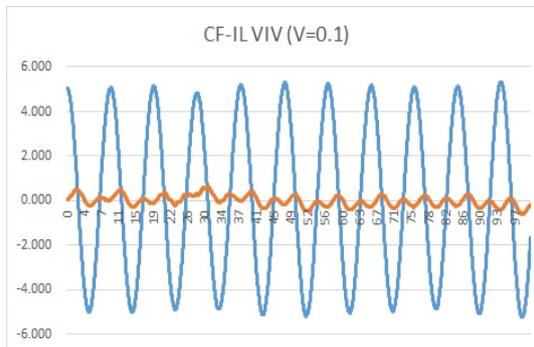


図 8 b 図 8 a の CF 方向・IL 方向振幅波形

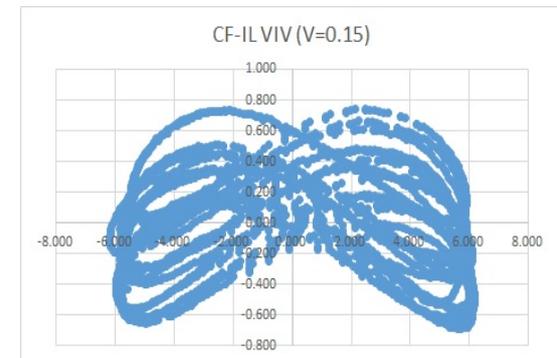


図 10 a 流速 0.125m/s の場合の下端運動

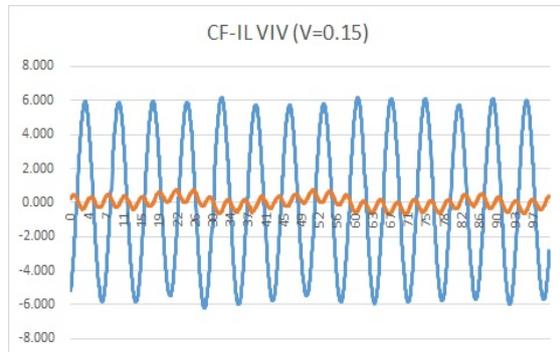


図 10 b 図 10 a の CF 方向・IL 方向振幅波形

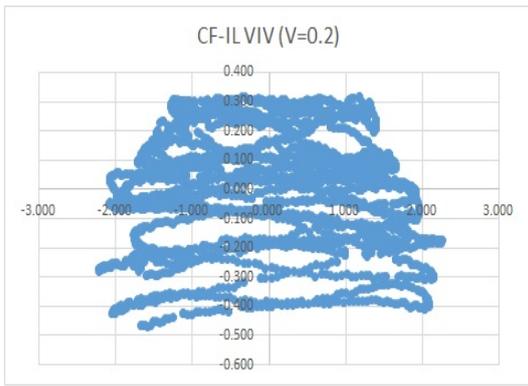


図 11a 流速 0.2m/s の場合の下端運動

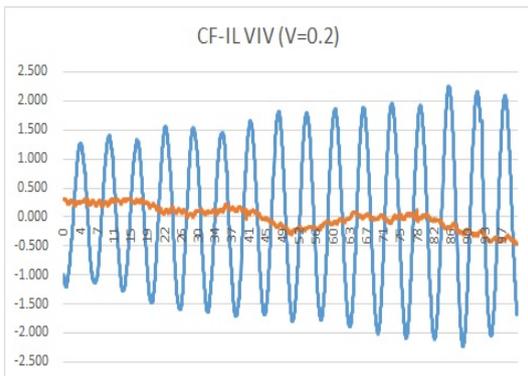


図 11b 図 11a の CF 方向・IL 方向振幅波形

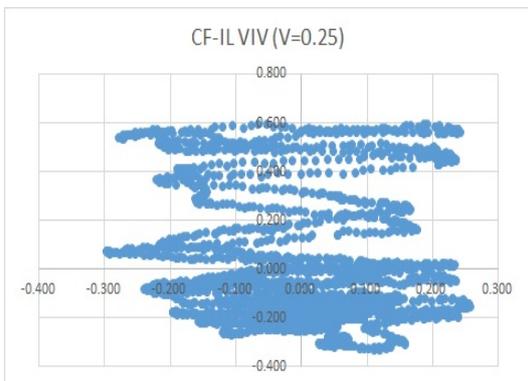


図 12a 流速 0.25m/s の場合の下端運動

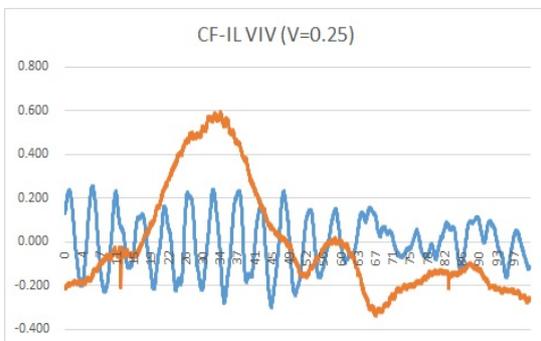


図 12b 図 12a の CF 方向・IL 方向振幅波形

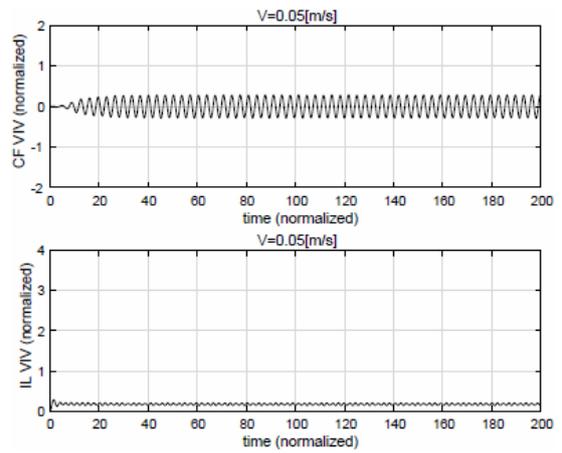


図 13 流速 0.05m/s のシミュレーション

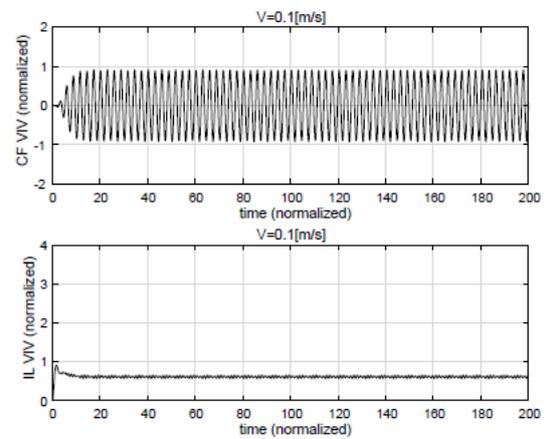


図 14 流速 0.10m/s のシミュレーション

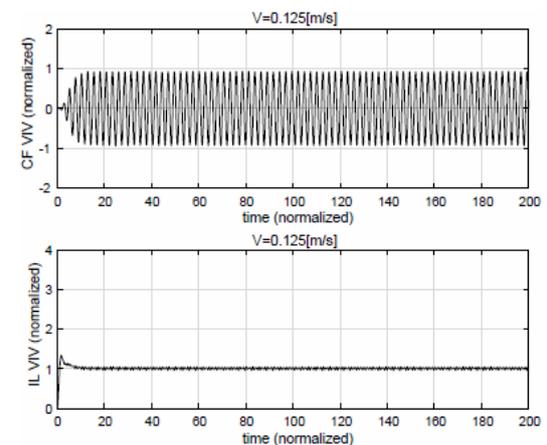


図 15 流速 0.125m/s のシミュレーション

当該実験の計測結果は、図 6 および図 7～12 のように得られた。これらから実験においてロックイン現象を捉えることができた。

一方、シミュレータにおいても、図 13～図 18 のように、ロックイン現象を捉えることができた。

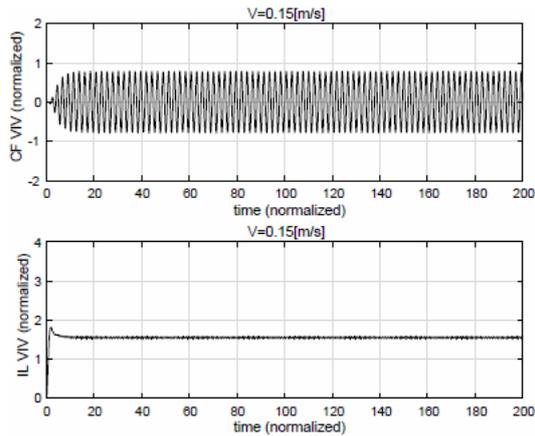


図 16 流速 0.15m/s のシミュレーション

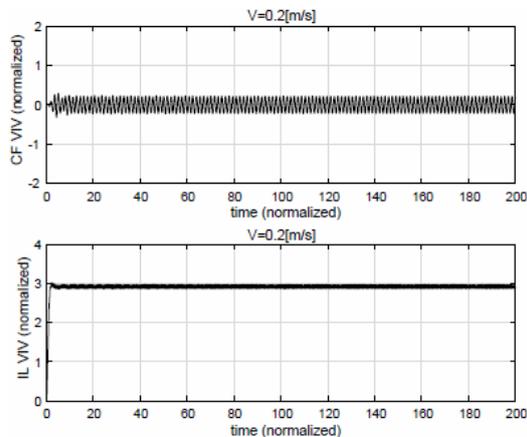


図 17 流速 0.20m/s のシミュレーション

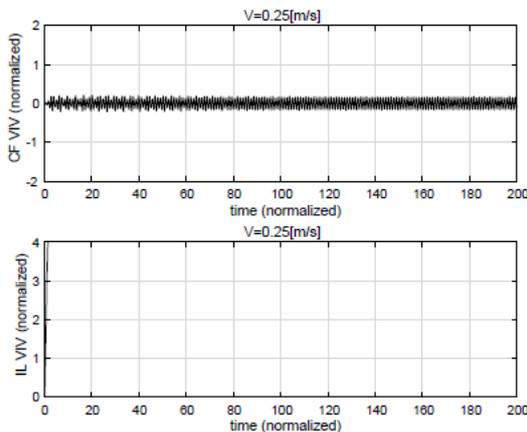


図 18 流速 0.25m/s のシミュレーション

ただし、実験結果の画像解析と光ファイバによる計測データの解析には更なる検討が必要である。

(3) 研究目的 3 に関して

Meng 氏との共同研究として、片支持された注入パイプについて、内部流体排出によるクロスフロー方向渦励振の不安定挙動について検討した。

まず長手方向構造振動と渦励振励起に関わる構造流体連成モデルを新しく提案し、その妥当性を実験データにより検証した。

次に表層流速と内部流体速度を変えながら、渦励振挙動が不安定となる内部流体臨界速度を求めた。特に内部流体速度の臨界速度に対する大小による渦励振挙動の違いを明らかにできた。

以上の結果は、国際ジャーナル Ocean Engineering に採択された、

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 1 件)

Shuai Meng, Hiroyuki Kajiwara, Weijing Zhang: Internal flow effect on the cross-flow vortex-induced vibration of a cantilevered pipe discharging fluid, Ocean Engineering, vol. 139, pp74-84 (2017)

[学会発表] (計 1 件)

Shuai Meng, Hiroyuki Kajiwara: Flow-Induced Vibration of a Vertically Cantilevered Pipe Undergoing Vortex-Induced Vibration, OMAE2015 (2015)

[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]

ホームページ等

<http://cacsd2.sakura.ne.jp/>において公表予定

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梶原 宏之 (Hiroyuki Kajiwara)

研究者番号: 30114862

九州大学大学院・工学研究院・教授

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

孟 帥 (Shuai Meng)

上海交通大学・助教