

深海水槽と大水深ライザーの挙動評価

宇都 正太郎*、藤原 智*、二村 正*

Deep Sea Basin and Riser Technology

by

Shotaro UTO、Tomo FUJIWARA and Tadashi NIMURA

1. まえがき

近年の資源ナショナルイズムの高まり、及び資源・エネルギーの安定確保の観点から、従来は資源生産が困難と思われていた深海域が注目を集めている。

例えば、在来型エネルギー資源の一つである石油生産について見ると、2005年の時点では、原油の約3割は海洋から生産されている。図-1に示すように近年では技術革新とともに生産の場は、浅海域から深海域に拡大している。海洋における浮体を用いた石油開発の実績は2005年現在で水深2440mに達しており、さらに大水深化を目指した動きが活発である¹⁾。

世界第6位の広さを誇る我が国の領海及び排他的経済水域(EEZ)内には、金、銀、銅やレアメタルなどの金属鉱物資源及びメタンハイドレートが一定程度存在していると見込まれている。平成21年3月に策定された海洋エネルギー・鉱物資源開発計画²⁾では、石油・天然ガスに加えてメタンハイドレート(水深500m以深)及び海底熱水鉱床(水深700-1600m)の開発計画が定められた。今後、これらの開発が着実に進むと予想される。

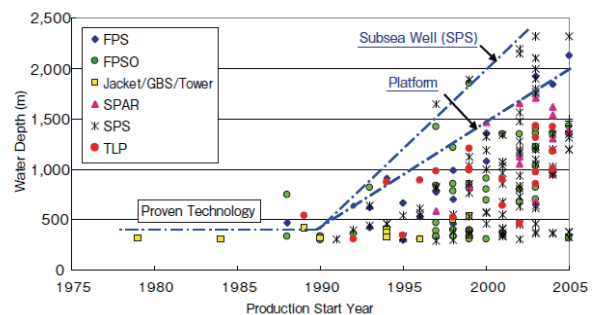


図-1 大水深化する海洋石油開発¹⁾

深海域は資源生産ばかりでなく科学的な調査の場としても注目を集めている。第3期科学技術基本計画及び分野別推進戦略において、国家基幹技術と位置づけられた地球深部探査船「ちきゅう」による深海底掘削は、南海トラフにおける地震発生メカニズムの解明などを目指し、将来的に水深4000mでの掘削を目指している³⁾。

これらの深海域における開発プロジェクトに

* 海洋部門

原稿受付 平成21年 7月 3日

審査済 平成21年 7月12日

共通するコア技術の一つに、ライザー技術がある。ライザー管とは海中・海底と海面上の浮体などの施設をつなぎ、内部を石油、ガスや海水などの流体が通る水中長大管のことをいう。海底熱水鉱床開発においても海底で破碎した鉱石を浮体まで揚鉱するためにライザー技術の使用が考えられている（図-2）。

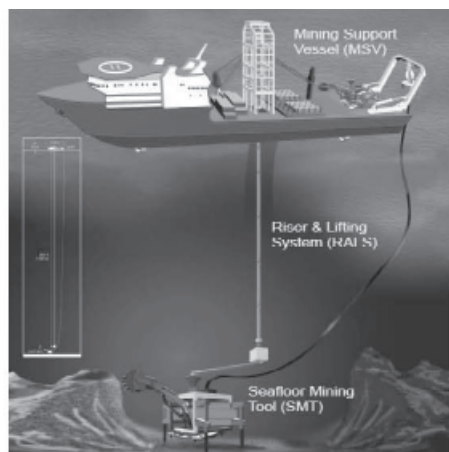


図-2 海底熱水鉱床開発とライザー技術⁴⁾

独立行政法人海上技術安全研究所では、ライザーの安全性評価技術を第二期中期計画期間（H18～22年度）におけるコア技術に位置づけ、様々な深海技術開発のニーズへの対応を図りつつある。2002年に整備された深海水槽はこのためのツールの一つとして位置づけられる。本編では深海水槽について施設の特徴、施設を利用した研究成果の例について報告する。

2. 深海水槽の特徴⁴⁾

図-3に深海水槽の模式図を示す。深海水槽は水面の有効直径14m、深さ5mの円形水槽部と、直径6m、深さ30mのピット部で構成されている。ピット部の上限から下限まで自由に昇降する昇降床が備えられており、計測時の水深を変化させることが可能となっている。最大水深は35mである。主な仕様を表-1に示す。

円形水槽部の周囲には吸収式造波装置が備えられており、造波および入射波・反射波の吸収を行っている。また、円形水槽部およびピット部には潮流発生装置が備えられており、潮流中における模型試験を可能としている。円形水槽部及びピット部には3次元水中挙動計測装置が設置されており、画像解析手法により水中での物体の挙動を計測することが可能である。以下では造波装置、潮流発生装置及び3次元水中挙動計測装置について、諸性能を述べる。

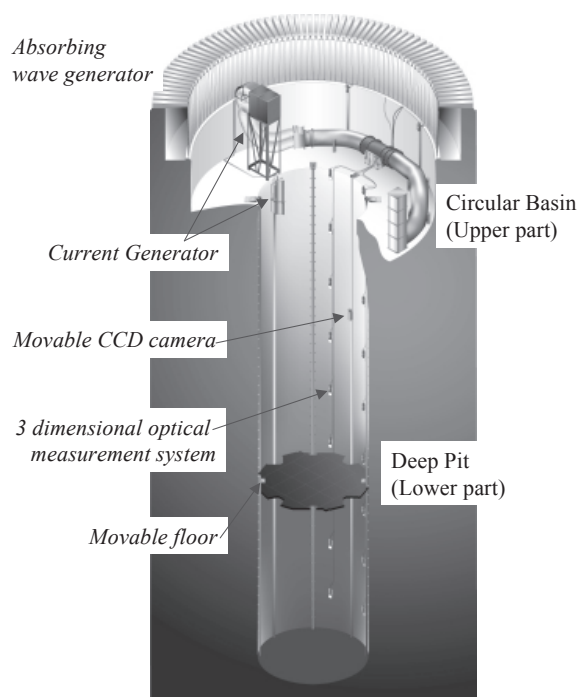


図-3 深海水槽の概要

表-1 深海水槽の主な仕様

円形水槽	直径 16m×深さ 5m (有効水域直径：14m)
深海ピット	直径 6m×深さ 30m
造波装置	台数：128 造波板寸法：幅 0.3m×高さ 2.5m 造波方式： フラップ型スネーク方式 最大波高：0.5m（周期 2sec 時） 周期範囲：0.5～4.0sec
潮流発生装置	上部：最大 0.2m/sec 下部：最大 0.12m/sec
計測台車	主台車：X 方向 副台車：Y 方向（主台車上を走行） Z 方向 昇降範囲 3m
三次元水中挙動計測装置	高解像度デジタルカメラ 20 台（2 台 1 組×10 深度）

2.1 吸収式造波装置

吸収式造波装置は円形水槽部を取り囲む 128 台のフラップ型造波機で構成されている（図-4 参照）。各フラップの前面には波高計が備えられており、造波機の吸収・造波制御は、1)フラップの位置およびフラップの移動速度の情報、2)自分自身および両隣の 3 台の波高データから算出した吸収すべき波の波高、周期および波向き、を元に行っている。

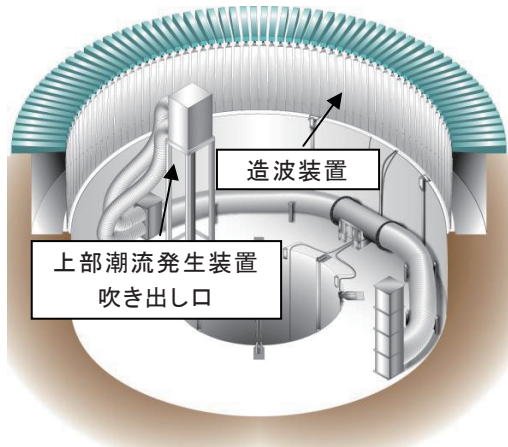


図-4 円形水槽部に設置された造波装置
及び上部潮流発生装置

本造波装置を用いて水槽内に造波した規則波の波高分布を計測した結果を図-5に示す。計測に用いた規則波は周期 0.66～1.50 秒であり、設定波高は 20mm（周期 0.66 秒）及び 50mm（その他の周期）である。

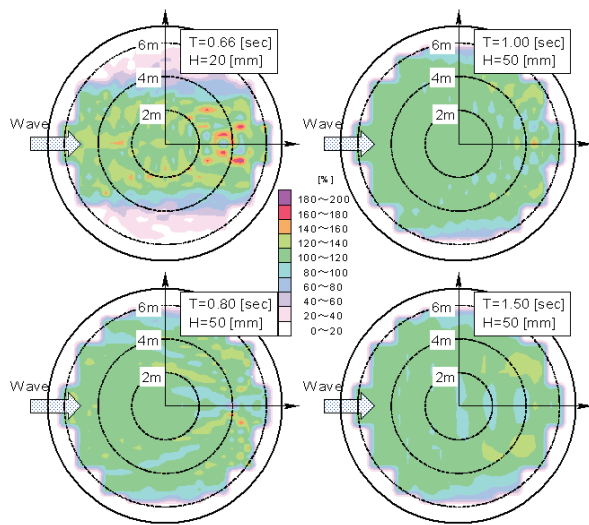


図-5 波高分布

図の左側から造波し、右側で吸収している。図-5は波高分布をカラー表示しているが、最も広い範囲の緑色は水槽中央部での波高と一致している領域を、それ以外は水槽中央部との波高差が大きくなっている領域をそれぞれ示している。水槽中央部直径 4m の範囲に模型を設置すると想定すると、周期 0.8 秒以上でほぼ満足のいく波高分布が得られている。

2.2 潮流発生装置

ライザー管の安全性を評価するうえで、潮流中での渦励振（VIV）を含む応答解析は最も重要な課題

の一つである。このために深海水槽には2種類の潮流発生装置が装備されている。

深海水槽の水槽形状は円形であることから、水槽全域にわたり一様流を起こすことは困難である。そこで、ライザー管の縮尺模型などを通常設置する水槽中央部の狭い範囲において、一様流を起こすことを目的として、円形水槽部に設置する上部潮流発生装置（図-4参照）と、ピット部にも設置可能な下部潮流発生装置を製作した。

2.2.1 上部潮流発生装置

上部潮流発生装置はインペラ、吹き出し口、吸込み口、及び両者を接続するパイプによって構成されている。吹き出し口の開口部寸法は 1600mm×1060mm である。図-6は流速約 0.2m/s の流れを起こした場合の流速の時系列である。ただし計測位置は水槽中央部であり、吹き出し口から 2m の位置である。インペラ起動後約 1 分から、流速の変動幅が小さい安定した流れが起きていることがわかる。流れの変動成分の分散値は平均流速の 5%以下に収まっており、良質な流れを再現することが可能である。

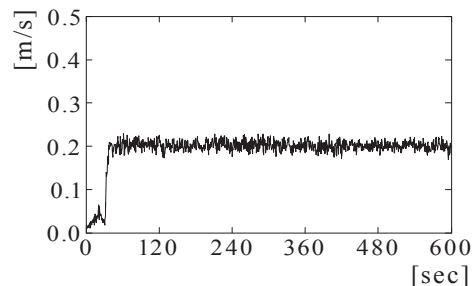


図-6 上部潮流発生装置による流速の時系列

2.2.2 下部潮流発生装置

下部潮流発生装置は深海水槽のピット部にも設置可能な小型ユニットであり、吹き出し口の開口部寸法は 690mm×490mm である。平均流速とインペラ回転数の関係を図-7に示す。

深海水槽では本装置を 6 台保有しており、上部潮流発生装置との組み合わせにより多様なプロファイルの流れを再現することが可能である。図-8に鉛直方向に 5 台（上部 1 台、下部 4 台）の装置を組み上げた例を示す。深さ方向に 4.5m の範囲で流れを起こすことが可能である。また水平方向に組み合わせることによって、水面付近に幅広く流れを起こすことも可能であり、様々な実験に対応することができる。

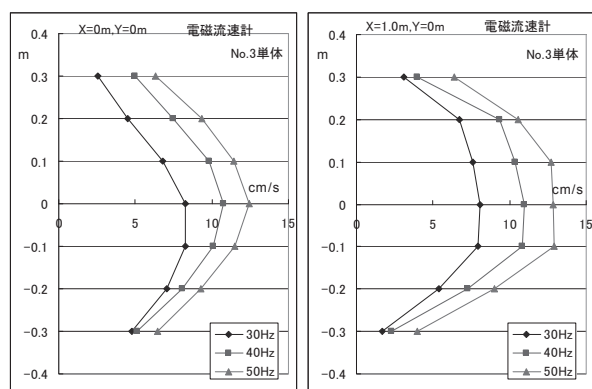


図-7 下部潮流発生装置による平均流速とインペラ回転数の関係（左：水槽中央部、右：水槽中央部から主流方向に1m後方）

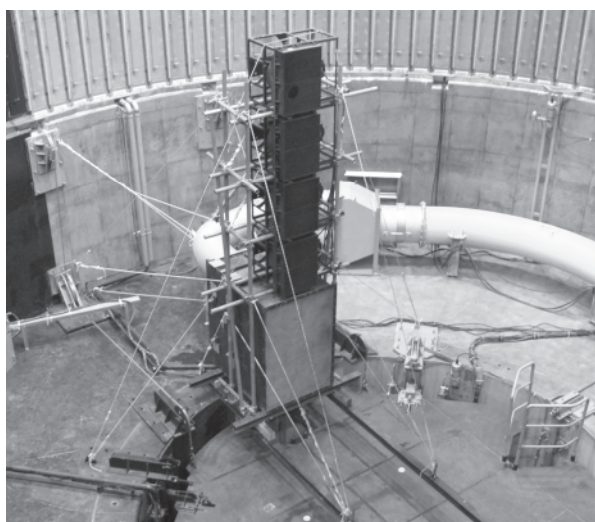


図-8 潮流発生装置の組み合わせ利用

2.3 3次元水中挙動計測装置

深海水槽で行う水中線状構造物の実験では実機の縮尺模型として、細径のパイプを用いることが多い。従って、多くの場合、その挙動や歪みを計測するために、模型内に加速度計や歪みゲージ等のセンサーを導入することが困難である。そこで非接触で運動を計測するために3次元水中挙動計測装置が、円形水槽部及びピット部に設置されている。

3次元水中挙動計測装置は、模型に設置されたマーカーを2台1組のCCDカメラを用いてステレオ撮像することにより、マーカーの3次元位置を計測するものである。なお、マーカーには反射テープを用いており、水中ライトで照らし出している。

図-9にCCDカメラと水中ライトの写真及び水槽断面に対する計測範囲を示す。計測精度は、CCDカメラの画像中心から離れるに連れ、また、カメラと

マーカーとの距離が離れるに従い、その精度は落ちる。精度は計測範囲の大部分で、 $\pm 0.5\text{mm}$ 以下であるが、各カメラの計測範囲下端では $\pm 1\text{mm}$ 程度である。

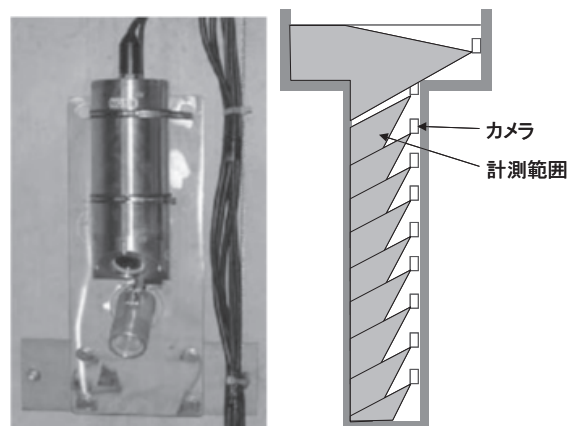


図-9 水中ライト付きカメラ（左）、計測範囲（右）

3. 深海水槽を用いたライザーの挙動評価

深海水槽を用いたライザーの挙動評価の例として、浮体動揺によるライザー管の弾性応答、及び潮流中におけるVIV（渦励振）挙動に関する成果を示す。

3.1 海洋肥沃化装置「拓海」の取水管の弾性応答に関する模型実験⁵⁾

海洋肥沃化装置「拓海」は、海洋深層水を利用した新たな漁場の造成を目的として2003年5月に相模湾に設置された浮体構造物である。浮体下部に長さ175m、直径1mの深層水汲み上げ用のライザー管を有し、水深約1000mの設置海域に係留されている。図-10に拓海の概要を示す。

本実験では取水管の弾性応答を模擬することが可能な弾性模型（ポリカーボネート製、縮尺25分の1、全長7m、外径42mm）を設計製作した。本模型の上端部を強制動揺装置に取り付け、浮体運動に相当する変位を与えることによってライザー管模型の挙動を計測した。模型の上部は2本のチェーンで接続されている（図-10の枠内参照）。

図-11は3次元水中挙動計測装置による模型の弾性応答計測結果を示す。ただし上端を角度振幅4.6度で加振させており、図の左側は2本のチェーンが作る面内の回転(Pitch)を、右側は直交する面内で回転(Roll)をそれぞれ与えた結果である。

二次モードでの振動が卓越しており、共振周波数は約0.4Hzであることが実験結果からわかる。またPitch方向は2本のチェーンが吸収するため

に、浮体の回転運動が Roll 方向に比べてライザー管に伝わっていない。

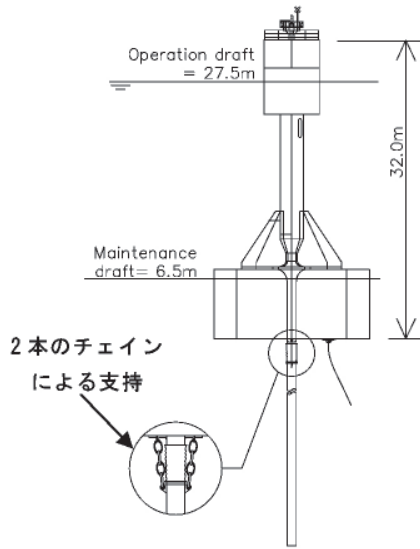


図-10 拓海概略図

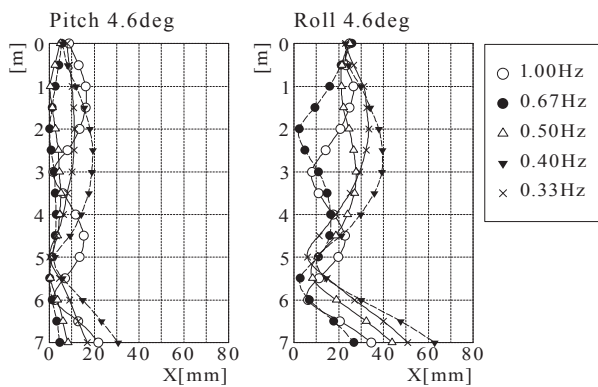


図-11 「拓海」ライザー管模型の振幅分布

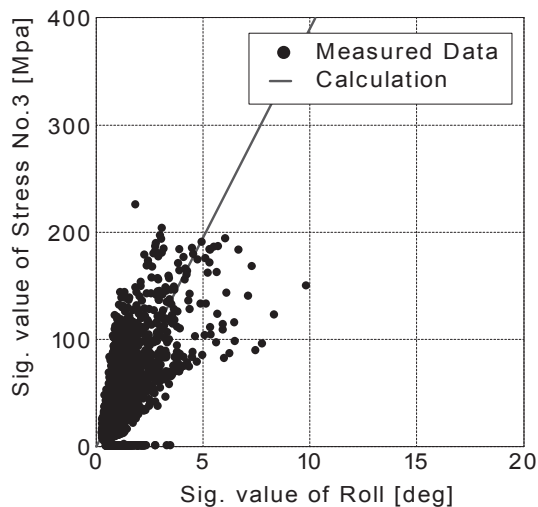


図-12 「拓海」ライザー管の実機応力計測結果と推定結果の比較

実験結果と有限要素解析を元に実機ライザー管の応力を推定した。実機計測結果と推定結果の比較を図-12に示す。実機計測は上端から80mの深さの位置において、歪みゲージを用いて行われた。図は Roll 運動の有義値と応力の有義値を比較したものであり、実験値にばらつきが大きいものの、傾向を良く推定可能であることがわかる。以上から模型実験及び数値シミュレーションを組み合わせることによって、実機ライザー管の弾性挙動の推定が可能であることを示した。

また別途行われた LNG FPSO 用深層水取水管の模型実験では、弾性応答によって取水管に作用する曲げモーメントの応答関数が、計算結果と良く一致することが示されている⁶⁾。

3.2 潮流中 VIV 挙動に関する模型実験⁷⁾

ライザー管に流れが作用すると、渦放出による比較的高い周波数の振動 (VIV: Vortex-Induced Vibration) が発生し、疲労寿命に大きな影響を及ぼすことが知られている。このためライザーの VIV 挙動を精度良く推定する事はライザーの安全性を評価する上で重要な課題の一つである。

本実験では長さ 30m、直径 12.7mm のライザー管を模擬したパイプを用いて、潮流中での VIV 挙動を計測した。実験の設置状況を図-13に示す。

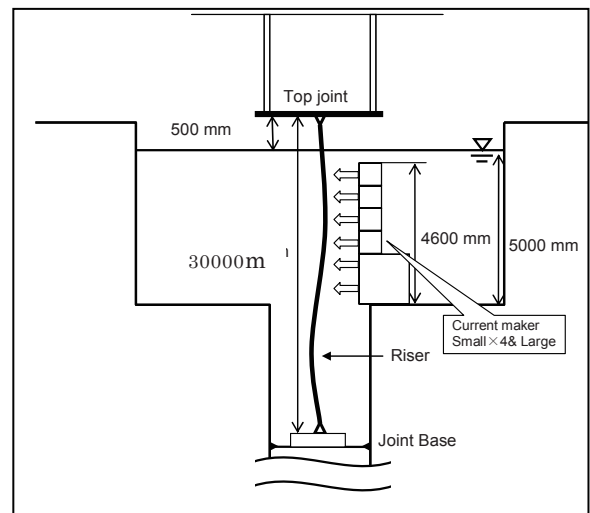


図-13 潮流中 VIV 挙動に関する模型実験
セットアップ

図-8に示したシステムを用い、水面から水深4.5mの間に一様流を発生させた。

ライザー模型の VIV 振幅の深さ方向の分布について、数値計算と比較した結果を図-14に示す。水中線状構造物 VIV 解析ツール VIVANA⁸⁾を用い

た数値計算の結果とよい一致が得られている。

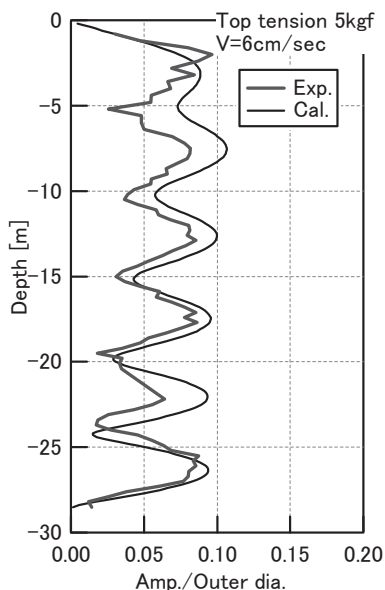


図-14 VIV 振幅の深さ方向分布の比較

次に VIV 発生時の卓越周波数及び振幅を比較した。結果を図-15 及び 16 に示す。ただし上端に張力を約 4kgf と約 5kgf かけた場合の結果を示した。実験と計算の一致は良好である。

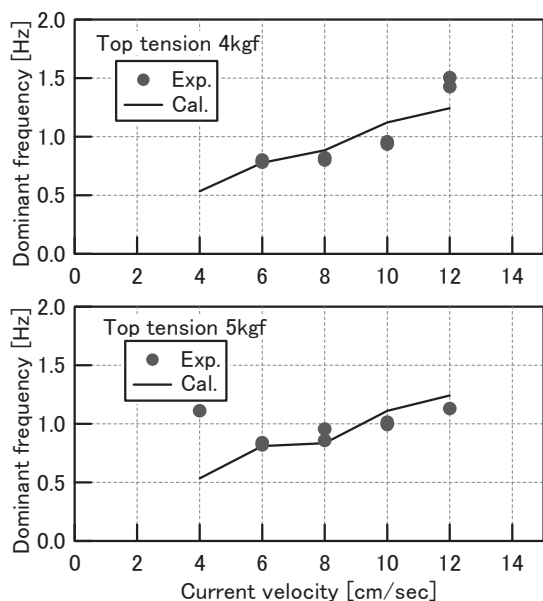


図-15 VIV 発生時の卓越周波数の比較
(上段：上端張力 4kgf、下段：同 5kgf)

4. おわりに

本稿では海上技術安全研究所の深海水槽の特徴及び水槽を利用した研究成果の例について記述した。

当所では深海水槽における模型実験技術を核とし、数値シミュレーションと組み合わせることによって、ライザーの安全性評価を含む、様々な深海技術に関する研究開発ニーズに対応していきたいと考えている。なお海洋肥沃化装置「拓海」の模型実験はマリノフォーラム 21 (MF21) との共同研究として実施されたものであることを付記する。

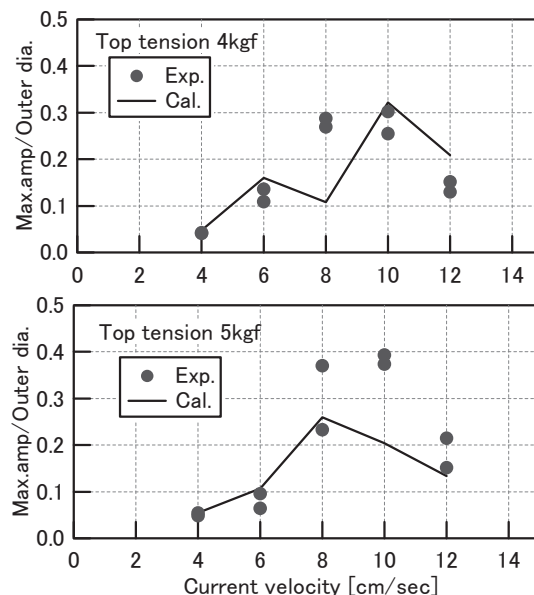


図-16 VIV による VIV の最大振幅の比較
(上段：上端張力 4kgf、下段：同 5kgf)

参考文献

- 1) JOGMEC、海洋工学ハンドブック第 3 版 (2005 年 3 月)
- 2) <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/090324/index.htm> (2009 年 3 月)
- 3) <http://www8.cao.go.jp/cstp/kihon3/bunyabetu.html> (2006 年 3 月)
- 4) 田村他、大水深ライザーシステムの安全性に関する研究、海上技術安全研究所報告第 7 巻、第 3 号 (2007 年)
- 5) Maeda K. et al., Strain Measurement on Riser Pipe Compared with Model Test and Calculation, Proc.26th OMAE (2007 年 6 月)
- 6) 前田他、LNG FPSO 用深層水取水管の成立性の検討、日本船舶海洋工学会講演会 (2009 年 5 月)
- 7) 藤原他、深海水槽における潮流中ライザー V I V 挙動に関する模型実験、日本船舶海洋工学会講演会 (2009 年 5 月)
- 8) http://www.sintef.no/Home/Marine/MARINTEK/Software-developed-at-MARINTEK/VIVAN_A