

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601
研究種目：基盤研究(A) (一般)
研究期間：2015～2017
課題番号：15H02326
研究課題名(和文) Floating Logistics Terminalに関する技術開発

研究課題名(英文) R&D of a Floating Logistics Terminal

研究代表者

高木 健 (Takagi, Ken)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：90183433

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 25,000,000円

研究成果の概要(和文)：ブラジル沖等の熱帯海域における海底油田・ガス田開発のために、新たな陸上インフラを構築するよりも、経済的かつ環境にやさしい新方法として、全てのインフラを浮体上に持ち不要になれば撤去可能なFloating Logistics Terminal (FLT)を提案し、その実現に必要な技術開発を実施した。このコンセプトでは堤防を設置しないため、浮体の動揺と浮体間に生じる水面の動きが重要になるが、これらについて理論と実験の両面からアプローチし、設計に有用な多くの知見を得た。

研究成果の概要(英文)：Rather than building a new onshore infrastructure for tropical waters such as offshore of Brazil etc., as a new economical and environmentally friendly method, we proposed a Floating Logistics Terminal (FLT) which carries all infrastructures on the body and is completely removable when it becomes unnecessary, and implemented the necessary technology to realize it. In this concept, since the break water is not constructed, the motion of the floating bodies and the movement of the internal water surface among floating bodies are important. We tackled them both theoretically and experimentally, and obtained many useful knowledge for the design of FLT.

研究分野：海洋工学

キーワード：浮体構造物 海上物流 発展途上国 海洋開発

1. 研究開始当初の背景

我が国のエネルギー確保は大変重要な課題である。石油・天然ガスは再生可能エネルギー等の代替エネルギーが普及するまでは、我が国が確保しなければならない重要な資源である。また、従来は、資源は海外から購入すれば良いと考えられていたが、最近では自らの技術力で探査や生産にも携わり、海外への富の流出を極力防ぐべきと考えられている。その中でも、石油・天然ガスの約 1/3 を算出する海底油田・ガス田の開発は海運・造船業界を擁する我が国にとっては海洋技術を磨き新たな産業進出を果たすべき重要なターゲットである。そのような海底石油・ガス田の中でも近年発見されたブラジル沖の海底油田は大変大きな市場の創出が期待されており、ブラジル側からも大型浮体技術や環境技術など日本の強みを活かした新たな生産技術の提案が望まれている。

ブラジル沖の海底油田の開発海域は広大で、生産技術の一部として陸上から生産現場へのロジスティクスが重要である。我が国の業界からは陸からの距離が遠いプレサルトの油田に対して浮体式ハブ構想（中継基地）を提案しているが、これだけでは十分ではない。ブラジル東北地方の所謂 Brazilian Equatorial Margin (BEM) は陸からの比較的距離が近い海域に小さな油田が多数発見されているが、最寄りの陸地に陸上インフラがない。

海底石油・ガス開発では石油ガスの積み下ろしだけでなく、リグの生活物資、燃料・ケミカル、メンテ部品、あるいはドリリングに必要な資材などの輸送も必要であり、これらを一時的に保管する倉庫・タンクなどの施設も要求される。さらには、作業員の輸送や場合によっては居住施設も必要になる。本研究では、このような場合に、新たな陸上インフラを構築するよりも、経済的かつ環境にやさしい新方法として、全てのインフラを浮体上に持ち不要になれば撤去可能な Floating Logistics Terminal (FLT) を提案し、その実現に必要な技術開発を実施することとした。

2. 研究の目的

我が国はメガフロート技術開発（1995～2002年）、外洋上プラットフォーム研究開発（2007～2010年）を実施して、大型浮体技術を保有するが、実プロジェクトには結びついておらず、宝の持ち腐れになっている。本研究で提案する FLT はこれらのプロジェクトで蓄積された大型浮体技術を甦らせブラジルの期待に応えようとするものである。ただし、我が国の大型浮体技術は、日本近海の限定された海域を目標に開発したものであり、かつ環境に対する意識も当時とは大きく異なる。そこで、熱帯域における FLT として成立させるためには以下の技術が必要と考えた。

メガフロートは基本的には堤防に守られ

た湾内でしか成立しないが、熱帯海域の生物多様性保護のため堤防設置なしで、且つ経済的に FLT を成立させる技術

周辺が全く開発されていない海域へ浮体施設を設置する場合、撤去後に自然環境の完全修復が可能な浮体技術

に関しては浮体の減揺が技術的チャレンジになる。そこで、複数浮体を組み合わせ波下側に静穏域を構成することを考えた。この場合、波下側浮体の動揺がどの程度かを数値計算と模型試験のレベルで確認することや浮体間の水面に発生が予測される水面の同調現象をどのように避けるのかを理論的に把握することが、本研究テーマの第一の目的である。に関しては撤去の容易な係留系としてサクシオンパイル適用の可能性の検討や環境影響の検討を実施することが目的である。これ以外に、FLT の有用性を確認するため、BEM のロジスティクスの調査や波浪条件や海底の状況などの環境条件を調査することを目的とした。

3. 研究の方法

ブラジル沖の海底油田の開発状況から、浮体式積出港の設置候補海域を数か所抽出し、その海域の海象・気象条件を調査した。この調査には現地のニシモト教授が協力してくれた。一般に石油・ガス開発においては稼働率 90%以上が求められるので、これらの環境条件より、どの程度の減揺が必要かを計算して開発目標を定めた。

また、BEM の開発規模や必要なロジスティクスの情報を調査し、必要な浮体の寸法を決めた。この概略検討に基づき、国際的に良く使われている市販ソフト ANSYS AQWA を使用して、浮体の動揺振幅等を数値計算した。この計算結果を確認するため、東京大学生産技術研究所の海洋工学水槽において、1/100 スケールの模型実験を実施し、数値計算の精度を確認した。さらに、極限的な状況として、想定外の波浪条件にさらされた場合の浮体の崩壊挙動についても検討するとともに、BEM のような浅海域に係留した場合の浅海影響についても調査した。

一方、浮体の係留はドルフィン係留として、サクシオンケーソンの適用可能性を検討した。これは、浮体を 2 次元モデルとして扱い、東京大学大学院新領域創成科学研究科が所有する波浪水槽において実験を実施して求めた波浪漂流力と波浪強制力に対して文献として公表されているサクシオンケーソンの実験値から必要なケーソンサイズを検討した。

これとは別に、浮体間の水面に生じる可能性のある水面同調についても検討した。この検討には理論的なアプローチとして、固有関数展開法を用いた。この手法により見つけた水面同調が発生する可能性のある周波数に関して、前述の数値計算ソフトで水面同調をシミュレーションし、その大きさを確認する

とともに、同調を回避する浮体の配置を検討した。

4. 研究成果

ブラジル沖の海底油田の開発状況から、浮体式積出港の設置候補海域を調査した。その結果、ブラジルの東北部の熱帯海域に調査が完了しているが開発が行われていない海底油田の候補が数か所あることが分かった。また、その海域に近い陸上の港についても Web 等から情報を調査した。また、候補海域の水深や土質の状況も文献やヒアリングを基に調査した。これらの環境条件より、沖側に大きなメイン浮体を設置し、海岸側に小型のサブ浮体を置く配置で箱型浮体により堤防を設けないコンセプトが実行可能なことが概ね分かった。Fig.1 にこのコンセプトの



Figure 1 – Schematic of the FLT.

概略図を示す。

荷役量や方式の概略を仮定し、典型的なロジスティクスの情報により、浮体の概略寸法を検討した結果、超大型浮体は必要なく一般の PSV 等が接舷できる大きさが有れば良いこ

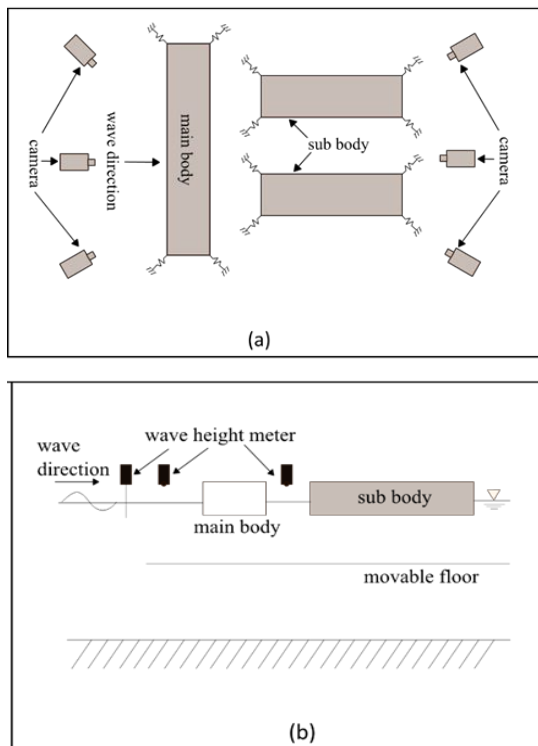


Figure 2 – Schematic of the FLT experiment; (a) top view and (b) side view of the experimental apparatus.

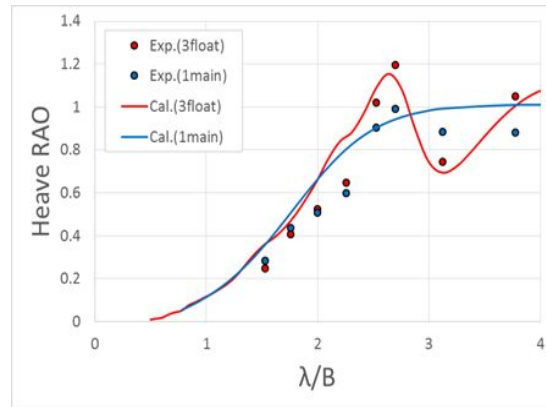


Figure 3 – Heave RAO for the Main Body in deep water. Case 1 refers to the Main Body motion with all Sub Bodies moored close each other; Case 2 refers to the Main Body motion itself.

とが分かった。そのため、コスト削減効果をねらって中古 VLCC や中古バルクタンカーを利用する方針とし、そこから浮体寸法を概略設定した。このコンセプトでは、陸側の浮体は必要なロジスティクスに合わせて数を増やすことが可能であるが、最も基本的な状態として、沖側の Main 浮体と 2 つの Sub 浮体との組み合わせについて数値計算と水槽実験を実施した。Fig.2 に水槽実験の概略を示す。

FLT 全体の浮体動揺振幅は汎用ソフトである ANSYS AQWA を用いて計算を実行した。また、東京大学生産技術研究所所有の海洋工学水槽にてメイン浮体と 2 つのサブ浮体を組み合わせた時の動揺実験を実施し、3 浮体間の干渉影響等の実験結果を得た。この結果、数値計算に使用している ANSYS AQWA の精度が把握できた。計算結果と実験値を比較した一例を Fig.3 に示す。

その成果を利用し、浮体のアレンジ等を変える計算を行った。その結果、メイン浮体に表れるサブ浮体配置の影響は小さいこと、メイン浮体のロール拘束によってサブ浮体の運動は余り変化しないこと、サブ浮体の運動振幅はメイン浮体との間隔によって大きく

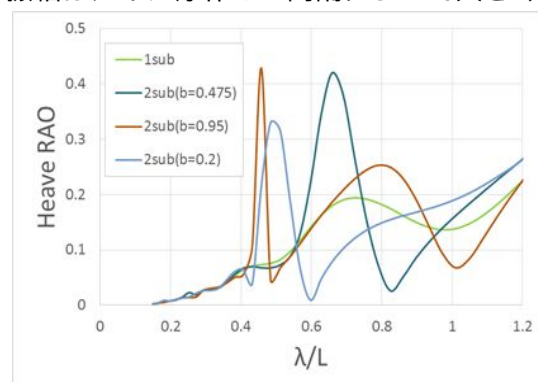


Figure 4 – Heave RAOs of the Main Body for variation of gap between Sub Bodies.

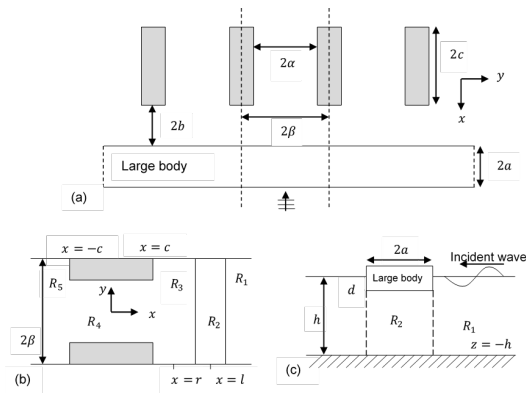


Figure 5 – Schematic diagram: (a) top view of body arrangement, (b) top view of the channel problem, (c) a section of big body.

変わること、サブ浮体の運動振幅に表れるピークはサブ浮体間の干渉影響によることなど、流体力学的相互干渉の性質を整理することができた。この計算の一例をFig.4に示す。

係留に関しては、サクシヨンケーソンを基礎として利用したフェンダー係留方式の検討を行った。この検討により、設置のターゲットとしているブラジルの熱帯海域では、もっとも係留力が大きくなるメイン浮体の係留に関して、現存するサクシヨンケーソン（洋上風車等で使用）と同等のものを利用することで係留が可能なが分かった。

上記の検討とは別に浮体間にできる内水面の同調現象について、固有関数展開法を応用して検討した。この計算においては、水面

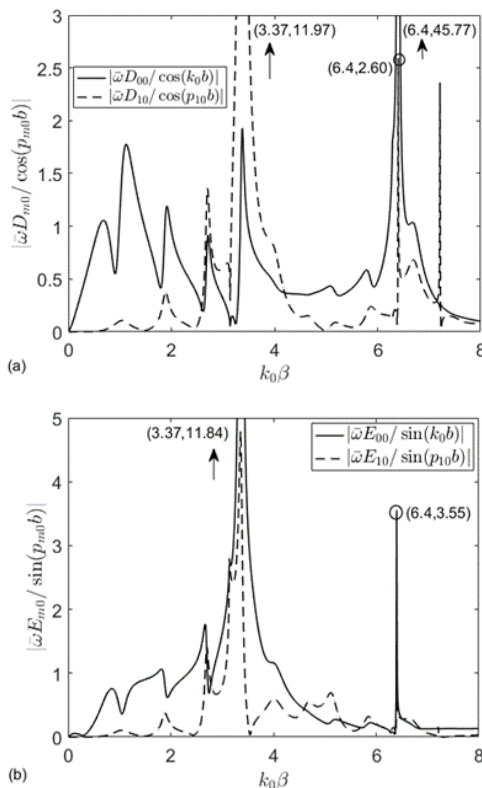


Figure 6 – (a) D_{m0} and (b) E_{m0} versus $k_0\beta$ for $b/\beta = 0.5$.

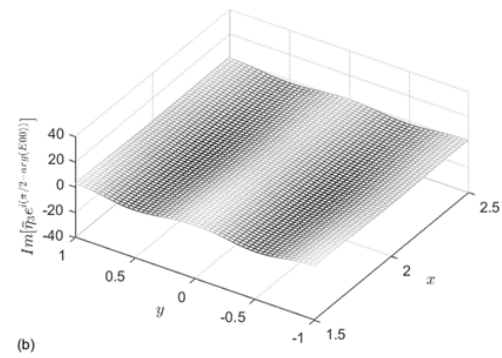
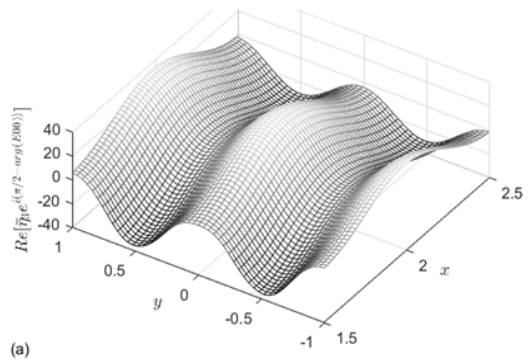


Figure 7 – Free surface deformation of the region R_3 at $k_0\beta = 6.40$ for $b/\beta = 0.5$. (a) Real part and (b) Imaginary part. big body.

の 2 次元的広がりを考慮する必要があるが、計算負荷を低減するため、サブ浮体が無限個ある場合を仮定し、サブ浮体間及びメイン浮体間の距離に着目して、同調現象の可能性について検討を行った。Fig5 にモデル化された浮体配置を示す。

同調現象は様々な周波数と浮体間距離の組み合わせによって発生の可能性があり、またその組み合わせによって同調現象の深刻さも異なる。この手法により、様々な組み合わせを効率的に検討することができるようになったので、サブ浮体配置とメイン浮体配置について内水面に同調現象が発生する危険な浮体アレンジを把握することができた。今後の FLT 設計ではこの危険な配置を避ける

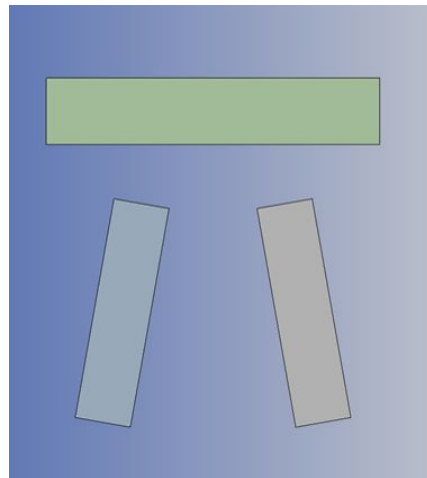


Figure 8 – Example of the non-parallel arrangement of the sub bodies.

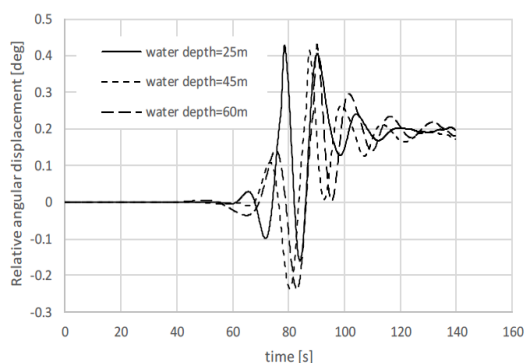


Figure 9 – Time histories of relative angular displacement amidships of a VLFS installed at various water depth for a given magnitude of the vertical bending moment.

ことになる。

Fig.6 に、同調現象の大きさを推定する際に重要なパラメータである固有関数の振幅を波浪の存在する周波数範囲で描いたものを示す。図中のピークが同調の可能性がある周波数を示すが、これらの結果から、浮体間距離と周波数の関係が理解できた。Fig.7 にはこのピークに相当する周波数における水面変位を描いた図である。この図より同調現象が起こる際に水面がどのような形状（モード）になっているのかも理解できたとともに、理論的に予測される結果とおおむね一致することも確認できた。さらに、この同調現象を避ける浮体配置として Fig.8 に示すような非並行配置を提案し、ANSYS による数値計算で水面変位を抑えられることを確認した。

この研究ではブラジル沖などの熱帯海域では荒天は無いことを前提に FLT を提案しているが、ごく稀にとても厳しい海象に見舞われる可能性もある。このような場合に浮体がどのような挙動を示すのかについても検討した。そのため、超大型浮体が設計海象を超える極限海象に晒された場合の、崩壊挙動を解析するための、シミュレーションモデルと崩壊度合いを推定するための解析解を提案した。シミュレーションでは流体領域についてはランキンパネル法を構造領域には弾塑性梁を用い、両領域を連成させた。これにより、極限海象下で超大型浮体は局部的な崩壊は生じるものの、広域的かつ不安定な崩壊には至らないことが明らかになった。また、波浪中縦曲げモーメント自体は水深の影響を大きく受けるが、波浪中縦曲げモーメントが一定である条件の下で、水深の差が崩壊現象に与える影響は小さいことを示した。Fig.9 にその計算例を示す。

これらの研究に加え、熱帯域における海洋生態系モデルについては、シンガポール沖での実際の海底地形データを用いて小型浮体を係留した場合について生物影響評価シミュレーションを実施し、浮体構造物周り・下部の環境影響評価を実施した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

1) Iijima, K., Fujikubo, M., Analytical Formula for Collapse Extent of VLFS under Extreme Vertical Bending Moment, Submitted to Journal of Marine Science and Technology, 査読有り. (Submitted)

2) Takagi, K., Mondal, R. and Wada, R. : Wave Motion in Internal Water of a Floating Logistics Terminal, Journal of Marine Systems & Ocean Technology, 査読有り, Volume 12, Issue 4, pp 243-251, 2017

3) Mondal, R. and Takagi, K. : Wave scattering by a fixed submerged platform over a step bottom, Journal of Engineering for the Maritime Environment, 査読有り, DOI:10.1177/1475090217718922, 2017

4) Yamamoto, M., Wada, R., Kamizawa, K., Takagi, K. : The FLT Concept, Journal of Marine Systems & Ocean Technology, 査読有り, Vol.12, Issue 3, pp104-116, 2017

5) Mondal R., Takagi, K. and Wada, R. : Diffraction problem of a floating breakwater with an array of small ports, Journal of Marine Science and Technology, 査読有り, Vol.22, No.3, pp.459-469, 2017

〔学会発表〕(計 6 件)

1) Iijima, K., Tatsumi, A., Fujikubo, M., Elasto-plastic Beam Afloat on Water Subjected to Waves, Proceedings of ASME 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 査読有り, OMAE2018, OMAE2018-78646, 2018.

2) Takagi, K., Wada, R., Kamizawa, K., Yamamoto, M., Mondal, R., and Tabeta, S. : A Concept of Small Footprint Logistics Terminal Utilizing Floating Bodies, Proc. of 5th Marine-Port Technology and Development Conference, 査読無し, Singapore, pp.241-249, 2017.

3) Sakai, M., Iijima, K., Fujikubo, M., Hydro-elastoplasticity analysis of VLFS under extreme loads, Proceedings of TEAM2016, 査読無し, Mokpo, Korea, 2016

4) Mondal, R., Takagi, K. : Wave Interaction with Submerged Body in Presence of Uneven Bottom, Proc. of Techno-Ocean 2016, 査読無し, Kobe, pp.668-671, 2016.

5) Wada, R., Mondal, R., Kamizawa, K. and Takagi, K. : Optimum Design of Multi-Body Floating Logistics Terminal, Proc. of the 2nd Offshore Technology Conference Asia, 査読有り, OTC-26546-MS, pp.1-8, 2016.

6) 神澤謙、高木健、和田良太、R.Mondal : FLT の多浮体相互干渉による動揺軽減に関する研究、日本船舶海洋工学会講演会論文集、査読無し、第 21 号、pp145-149、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)

6. 研究組織

(1)研究代表者

高木 健 (TAKAGI, Ken)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号： 90183433

(2)研究分担者

鈴木 英之 (AUZUKI, Hideyuki)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号： 00196859

尾崎 雅彦 (OZAKI, Masahiko)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任教授

研究者番号： 30529716

多部田 茂 (TABETA, Shigeru)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号： 40262406

飯島 一博 (Iijima, Kazuhiro)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号： 50302758

(3)研究協力者

Nishimoto, Kazuo

サンパウロ大学・工学部・教授