

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630453

研究課題名(和文)大型浮体の弾塑性崩壊挙動の粒子法による再現

研究課題名(英文)Collapse Behavior of Large Floating Structure by Particle Method

研究代表者

飯島 一博(Iijima, Kazuhiro)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50302758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：大型浮体は大型港湾施設、石油ガス生産のための中継基地、空港などのインフラ設備として利用される。このような大型浮体の極限荷重下でのリスク評価は工学者に課される重要な課題である。極限荷重には例えば数万年に一回生じうる極限波浪や津波などが含まれる。本研究ではこのような極限荷重を再現するために非線形手法である粒子法を適用し、構造物の非線形挙動を含む構造要素と連成させることで、大型浮体の極限海象中の挙動解明を試み、開発した手法を縮尺模型を用いた水槽試験により検証した。緊張係留された大型ブイの係留の極限海象下の挙動、超大型浮体の流力弾塑性挙動、洋上大型風車の異常荷重作用時の崩壊挙動を対象とした。

研究成果の概要(英文)：Large floating structures may be utilized as an offshore port facility, a floating terminal for oil and gas exploitation, large infrastructures such as airport, etc. It is a technical challenge posed on engineers to fulfill the accountability by showing the behavior of the large floating structures in a very rare event. The event may include extreme waves that could occur once in several thousands years and Tsunami. In this research, nonlinear hydrodynamic models such as particle method and finite element method (FEM) using nonlinear element are used in a combined manner to clarify the behavior of the large floating structures under the rare event. The method developed in this study was also verified by using a series of tank tests using scaled models. Behavior of large floating buoy moored by tensioned tether, hydro-elastoplastic behavior of large floating structure and collapse behavior of large floating wind turbines are investigated.

研究分野：海洋構造力学

キーワード：risk analysis large floating structure collapse nonlinear behavior particle method scale d model extreme event hydroelastoplasticity

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 大型浮体をとりにくく背景

大型浮体は大型港湾施設、石油・ガス開発のための中継基地、あるいは空港や橋梁などの巨大インフラとしての利用が期待されている。わが国では今世紀初頭にメガフロート技術研究組合による浮体式空港利用に関する実証的試験が行われるなど、大掛かりな研究開発が行われた。当時、技術開発された主要な技術は、空港と係留装置の設計技術、弾性応答のシミュレーション技術、環境影響評価技術、であった。

### (2) 研究の背景

構造物が設計限界を超える条件に晒されたとき、結果的にどのような事象が生じるか?の疑問は、リスク評価の観点から重要な問題である。とりわけ、大きな損失が生じる大型浮体では一層重要度が高い。ところが極限波浪荷重下の大型浮体のリスク(結果)解析はこれまで実施された例がなかった。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、極限荷重下の大型浮体構造物が最終強度を超えて折損する場合の事象を対象として、リスク評価をするための非線形荷重評価手法と有限要素法を組み合わせ、連成解析手法を確立することと、それを用いた現象解明を目的とする。極限的な海象下で、浮体は弾塑性変形し、流体挙動もその変形を受けて変化すると考えられる。このような相互の影響=流弾塑性解析手法の開発を取り上げる。非線形荷重評価手法として主に粒子法のうち SPH 法を用いる。

## 3. 研究の方法

対象構造物として三つの浮体構造物を選んだ。それぞれに対して数値シミュレーション法を開発し、必要に応じて縮尺模型を用いた水槽試験を実施する。

### (1) 緊張係留されたブイ

緊張係留されたブイ構造物を対象とする。ブイの高さを超える波(青波)がブイに作用したとき、ブイは青波によって一旦押し下げられ、青波が過ぎた後に浮力のために再度持ち上げられるため、瞬間的に衝撃的荷重が作用する。衝撃的荷重の下で、リングングと称される大きな過渡応答が生じる。流体力学的に非線形な事象であり、構造的にも圧縮に近い荷重が係留索に作用するために、大撓みが生じる構造非線形の問題である。

流体部分については粒子法を用い、構造部分には大撓み・微小ひずみによる定式化を行った、動的な非線形梁モデルを開発し、これらを連成させたシミュレーション法を開発する。検証のために緊張係留されたブイの縮尺模型による水槽試験を実施する。

### (2) 極限波浪中の超大型浮体

次に、超大型浮体の弾塑性変形を対象とする。超大型浮体は小さな浮体が集まったものと考え、複数の小浮体としてモデル化を行い、

粒子法によって浮体間の非線形な流体力学的相互干渉効果を含む波浪荷重評価を行う。各浮体は弾性梁要素でつながっているとしてモデル化を行い、大型浮体の流弾塑性解析を行う。

また、大型浮体の崩壊挙動は事象として新しく、崩壊挙動の解明が必要であるために、縮尺模型を開発し、水槽試験を行った。さらに、流体力学的挙動の部分についても、別の手法による検証計算が必要であるために、ポテンシャル理論に基づいたランキンソース法による荷重評価を用いた、時刻歴応答解析法の開発も行う。

### (3) 大型浮体式風車のタワーの崩壊

最後に極限荷重下の大型浮体式風車の崩壊事象を対象とする。大型浮体で支持された風車構造では、支持基盤である浮体構造物に鋼製のタワーが搭載され、その頂部にローターやナセルの重量物が載っている。ローターに作用する荷重は通常はブレードのピッチ制御により、異常荷重が作用しないように設計されているが、ピッチ制御が故障した場合に、異常荷重が作用しタワーの基部が崩壊する可能性がある。

この計算の場合には異常荷重の原因が風荷重である。風荷重のモデル化に際しては、FAST として知られる、翼素理論と運動量理論に基づいたシミュレーションプログラムと、ポテンシャル理論に基づいた DYNABEAM と称する、研究代表が作成したプログラム連成させ、さらに弾塑性要素を組み込むことで、ピッチ制御失敗時の異常荷重下の大型浮体式風車のタワー構造の崩壊事象を取り扱う。

## 4. 研究成果

研究の対象構造物として三つの浮体構造物を選んだ。それぞれに対して数値シミュレーション法を開発し、必要に応じて縮尺模型を用いた水槽試験を実施した。研究対象ごとに成果を示す。

### (1) 緊張係留されたブイ

図 1 に示すような緊張係留されたブイ構造を計算対象とした。流体領域には粒子法の一つである SPH を利用し、係留構造のモデルには大撓みを考慮した非線形梁を用いた。まず波高が小さい領域からスタートして、徐々に波高を大きくした。

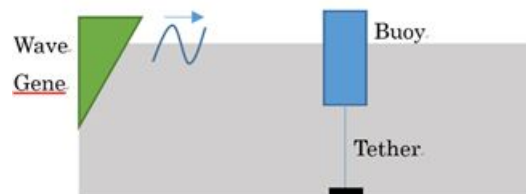


図 1: 緊張係留されたブイ

図 2 には数値シミュレーションによって得られた張力変動の推定結果を示す。青波によって一旦係留索がスラックし(図中の矢印)、それに引き続いて、係留索中にスナ

ップ荷重が生じている様子が再現されている．図3には粒子法（SPH）によるシミュレーションの様子を示した．

より詳細な結果を学会発表論文 [10]，ならびに雑誌論文 [11] に示した．

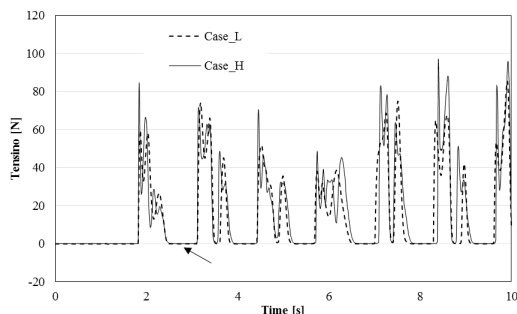


図 2 張力変動の様子

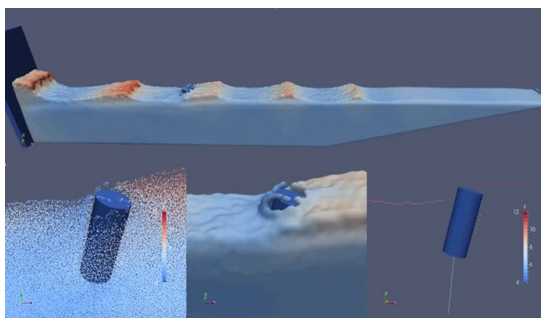


図 3 SPH によるシミュレーションの様子．

### (2) 極限波浪中の超大型浮体

図4には超大型浮体の粒子法（SPH）による流体モデルを示す．SPHによれば大波高中の現象が再現できる．一方で，長い距離を波が進行する場合には，波高の減衰が無視し得ないこともわかった．

超大型浮体の解析には従来のポテンシャル理論に基づいた手法にもメリットがあることを見直し，改めてランキンソース法と弾塑性構造モデルによる時間領域での流体構造連成解析も行った．

図5に縮尺模型を用いた水槽試験の様子を示す．図中の写真中央部に浮体の模型が位置しており，浮体中央部には崩壊を表す機構がとりつけられている．浮体の長さは実機で600mを想定した．

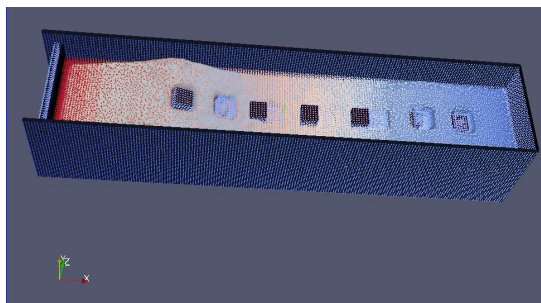


図 4 超大型浮体の流体モデル



図 5 超大型浮体の縮尺模型

図6には実験で得られた崩壊の時刻暦とシミュレーションによる予測値（今回はポテンシャル理論）の比較結果を示す．図中の縦軸は崩壊機構で計測された相対回転角を表している．極限波が浮体に到達すると，崩壊が進行し，最終的に崩壊事象が停留していることがわかる．また，流力弾塑性シミュレーションは実験結果をよく再現していることがわかる．

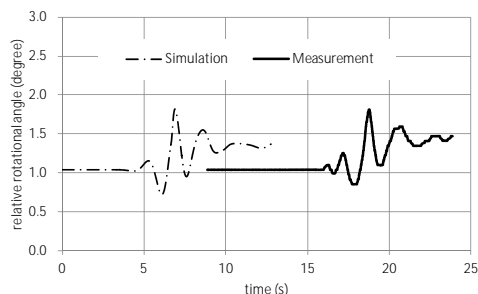


図 6 崩壊を表す相対角の時刻暦

### 超大型浮体の崩壊現象に関して

- 崩壊は，荷重が最終強度を越えるごく短時間に生じること．
- 荷重の振幅が大きいくほど，崩壊量は増加すること．
- 一方で，荷重が一定量を超えると崩壊の増加率は低減する傾向があること．
- 最大縦曲げモーメントが崩壊強度を 20% ほど上回る場合でも，塑性変形角は 1 度にも満たず，崩壊が大規模には生じないこと．

が明らかになった．

より詳細な結果を，学会発表論文 [10]，[11] に示した．なお，学会発表論文 [10] は発表した国際会議の Best student paper award として表彰を受けた．

### (3) 大型浮体式風車のタワーの崩壊

図7に対象とする構造物を示す．5MW級の大型風車を搭載した，スパー型の喫水 110m ほどの大型浮体構造物である．ブレードのピッチ制御が正常に作動している場合には，風速 18m/s 程度の風環境下で高々 400kN ほどの風スラスト力であるが，ブレードのピッチ制御が故障した場合には，3 倍弱程度の風スラ

スト荷重が風車タワーに作用する。タワーの基部では最大モーメントが生じるために、同箇所で崩壊が生じる可能性がある。

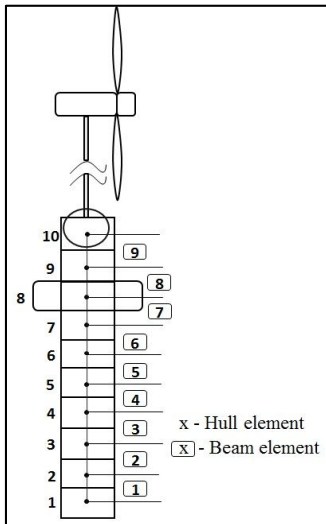


図 7 大型風車のモデル

風荷重を FAST として知られる、シミュレーションコードで評価し、流体 - 構造連成プログラムである DYNABEAM を連成させた。崩壊を表現する弾塑性要素をタワー基部に追加した。

図 8 にはタワー基部の崩壊事象に関するシミュレーション結果を示す。時刻 50s においてピッチ制御の故障が生じ、過大な荷重が作用すると想定した。ところが、浮体の剛体運動による慣性力が重畳した結果、実際に最大の縦曲げモーメントがタワー基部に生じたのは時刻 75s 程度であり、この瞬間に崩壊が進行する様子が再現された。シミュレーションで風速を増加させるなどして、崩壊特性の傾向を調べた。極限荷重がある大きさを超えた場合、崩壊は停留することなく進行し、タワーが崩落した。

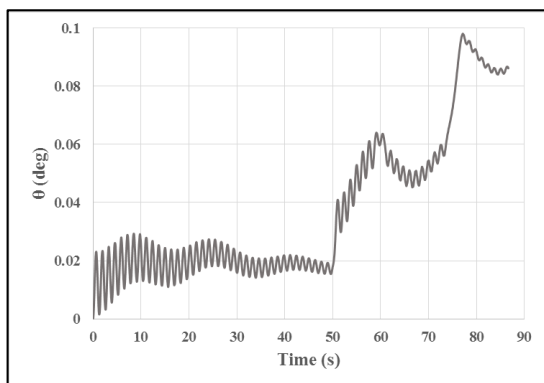


図 8 大型風車の崩壊挙動

大型風車の異常荷重作用時のタワー基部の崩壊に関して、以下のことがわかった。

- 浮体の剛体運動による慣性力と風荷重が重畳することで、異常荷重作用からわ

ずかに時間を隔てた後、タワー基部に最大モーメントが発生すること。

- 超大型浮体の場合と異なり、瞬時に大きな崩壊が生じる傾向があり、必ずしも停留せず、タワーの崩落が生じること。
- これは超大型浮体の場合には連続的に静水圧による復原力で支持されているために、崩壊の進行に伴い荷重が低減する傾向があるのに対して、風車の場合には荷重が低減するメカニズムが作用しにくい性質があるためであること。

より詳細な結果を、学会発表論文、に示した。

#### 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)

C. Ma, K. Iijima, Y. Nihei and M. Fujikubo: "Theoretical, experimental and numerical investigation into nonlinear motion of a tethered buoy system", Journal of Marine Science and Technology, 2016, Vol.21:1-22. 査読あり, doi:10.1007/s00773-015-0362-x

[学会発表](計 6 件)

C. Ma, K. Iijima and M. Fujikubo: "Ring-like behavior in tethered buoy system by numerical simulation technique coupling between FE and SPH", Proceedings of the 3<sup>rd</sup> international conference on Violentflows (VF2016), 2016, Namba, Osaka.

M. Sakai, K. Iijima, K. Goda and M. Fujikubo: "Experimental and Numerical Investigation into Collapse Behavior of VLFS", Proceedings of the 3<sup>rd</sup> international conference on Violentflows (VF2016), 2016, Namba, Osaka.

S.Srinivasamurthy, K. Iijima and M. Fujikubo: "Development of Coupled Simulation between FAST and Hydro-structural Code for FOWT", 平成 28 年度日本船舶海洋工学春季講演会, 2016, 博多。

S.Srinivasamurthy, K. Iijima, Y. Nihei and N. Hara: "Coupled Simulation between FAST and Hydro-Structural Code for a Flexible FOWT Considering Blade Pitch Control Malfunction", Proceedings of 35<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2016), Busan, Korea.

K. Iijima, M. Sakai, M. Fujikubo and A.

Tatsumi: "Hydro-elastoplastic Analysis for Predicting Collapse Behavior of VLFS under Large Waves", Proceedings of 35<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2016), Busan, Korea.

M. Sakai, K. Iijima and M. Fujikubo: "Design of a Scaled Model for Collapse Behavior of a Large Floating Structure under Extreme Loads", 平成 27 年度日本船舶海洋工学会春季講演会, 神戸.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.naoe.eng.osaka-u.ac.jp/naoe/naoe4>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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