

令和元年6月13日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14890

研究課題名（和文）氷盤群中の構造物に作用する氷荷重シミュレーションプログラムの開発

研究課題名（英文）Development of Numerical Simulation for Managed Ice Loads acting on Offshore Structures

研究代表者

長谷川 賢太（Hasegawa, Kenta）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：20772130

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：氷海域における掘削の実績もあるモノコラムハル型構造物に作用する全体氷荷重について、多数の氷盤干渉および氷盤の破壊を考慮した数値シミュレーションを開発した。物理エンジンをを用いた3次元個別要素法により多数の氷盤干渉を取り扱い、単純化したポテンシャル流れを仮定して個々の氷盤モデルに流体力を与えた。氷盤破壊は剛体要素を拘束し、氷盤強度から算出した閾値を上回った場合に要素間の拘束を解放させることで表現した。そして、過去に所属機関で実施した氷海水槽試験を再現したシミュレーションを実施した。その結果、当該手法により実験結果と同程度の妥当な氷荷重が得られ、構造物まわりの氷盤挙動も再現しているのを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

北極圏において豊富な石油・天然ガス資源の存在が明らかとなり、国内外で関心が高くなっている。しかしながら、北極海域では海水や冰山による脅威から発見された油ガス田の開発はあまり進んでいない。掘削等に用いられる浮体式構造物はその位置を保持する必要があるため、氷海域での開発にはその周囲で砕氷船が海水を細かく砕く作業を行うことが一般的に考えられているが、それによって生成された小氷盤群中の構造物に作用する氷荷重の推定技術は十分に確立されていない。本研究により、氷海域で用いられる構造物の安全性・稼働性評価技術の向上、環境保全と両立した持続可能な極海域資源開発の進展に資することが期待される。

研究成果の概要（英文）：A numerical simulation was developed for global ice loads acting on a mono-column hull structure, which has been drilled in ice covered area, taking account of the large number of ice interaction and ice failure. We deal with multiple ice interaction by the 3D discrete element method using a physics engine, and give fluid forces to individual ice floe models assuming a simplified potential flow. Ice failure is expressed by disconnecting the constraint between elements connected to each other with a fixed joint function when the constraint force exerted on the joint exceeds a threshold based on ice strength. Simulation which reproduced the past ice tank test was carried out. As a result, it was confirmed that the reasonable ice load equivalent to the experimental result was obtained by this method, and the ice floes behavior around the structure was also reproduced.

研究分野：氷海工学

キーワード：極地工学 海水 小氷盤群 氷荷重 氷板破壊

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、氷海域における資源開発が注目を集めている。米国地質調査によれば、世界の未発見資源のうち石油の13%、天然ガスでは30%が北極圏に存在すると報告されている<sup>①</sup>。我が国企業の関心も高まっており、グリーンランド石油開発株式会社が大手メジャー等と共同して、グリーンランド北東部海域に2カ所の鉱区を落札した例等がある<sup>②</sup>。北極海域において持続可能な資源開発を行うにあたり、最近では夏季を中心に海氷の顕著な減退が見られるものの依然として海氷の存在が、最も大きな脅威の1つである。

(2) 氷海域で掘削リグ等の浮体式構造物を用いる場合、氷荷重の軽減および位置保持向上のため、図1に示すように砕氷船によって海氷を細かく破壊する作業（アイスマネジメント）が実施される。アイスマネジメントによって破壊された氷盤群中における構造物に作用する氷荷重の特徴は以下の点にある。氷荷重に占める慣性力成分は一定の前進速度を有する船体と比べて小さい。したがって、慣性力成分を除いた氷荷重成分の高精度なモデル化が必要であり、特に氷盤間の相互作用が重要である。一般に氷盤の破壊よりも、氷盤の排除に起因する荷重成分が卓越する。場合によっては破壊成分が卓越するために両者を合理的に推定できるモデルが必要である。

(3) 報告者が所属している機関では、これまでに簡易モデルを用いた解析を行い、氷盤群中において掘削船に作用する氷荷重を試算し、氷盤寸法と氷荷重の関係を考察している<sup>④</sup>。本モデルは時間平均荷重モデルであり、氷盤の水平面内の運動影響は考慮されているが、氷盤の局所的な破壊は考慮されていない。また、国内では物理ベースモデリングの手法を用いて多体問題として接触問題のシミュレーションを実施した例がある<sup>⑤</sup>。本モデルでは氷盤を剛体と仮定しており、その破壊は考慮されていない。国外においては氷盤破壊に関する理論モデルを組み込んだ物理ベースモデリングに基づくシミュレーションが行われている<sup>⑥</sup>が、未だ開発途上にある。

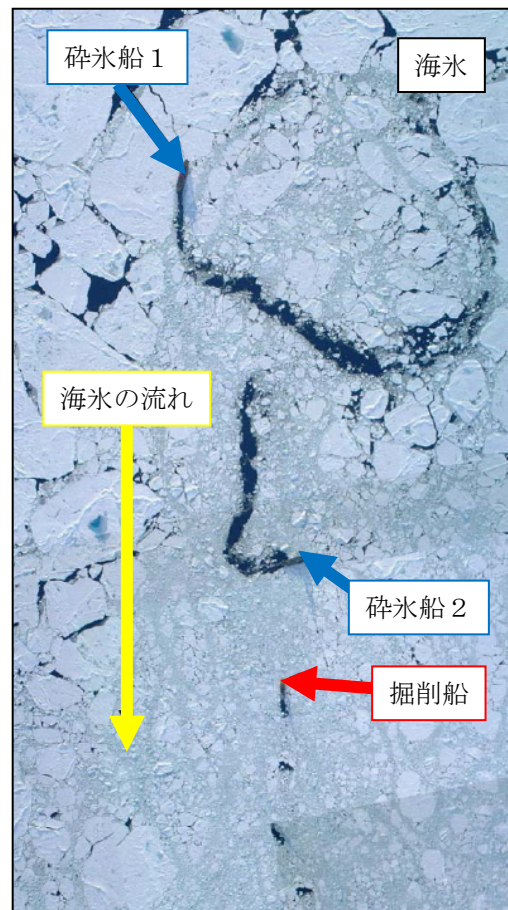


図1 アイスマネジメント<sup>③</sup>

### <引用文献>

- ① The USGS Circum-Arctic Resource Appraisal for the work (2008)
- ② [http://www.govmin.gl/images/stories/petroleum/exploration\\_exploitation/2012-13/P\\_M\\_N0\\_uk\\_20-12-2013.pdf](http://www.govmin.gl/images/stories/petroleum/exploration_exploitation/2012-13/P_M_N0_uk_20-12-2013.pdf)
- ③ Keinonen, A., Shirley, M., Lilesrom, G. and Pilkington, R., 2006. Transit and Stationary Coring Operations in the Central Polar Pack. Proceedings of ICETECH06., p. 8.
- ④ Uto, S., Matsuzawa, T. et al. "Station Keeping in Ice - Ice Tank Experiment and Estimation of Ice Load on Ship-shaped Floating Structure under Managed Ice Condition -, Proceedings of POAC' 15 (2015)
- ⑤ Konno, A., "Resistance Evaluation of Ship Navigation in Brash Ice Channels with Physically Based Modeling", Proceedings of POAC' 09 (2009)
- ⑥ Metrikin, I. et al., "Numerical Simulation of a Floater in a Broken-ice Field - Part II: Comparative Study of Physics Engines, Proceeding of OMAE 2012-83430 (2012)

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では、氷盤群中の構造物に作用する氷荷重推定を目的とする。物理ベースモデリング及び3次元個別要素法をカップリングさせることにより、氷盤の破壊影響を考慮した時間領域シミュレーションプログラムの開発を行う。

### 3. 研究の方法

(1) 数値シミュレーション手法には様々なものがあるが、氷盤群中の氷荷重評価には多数の剛体運動を物理法則に即して効率的に計算できる物理ベースモデリングが適している。この手法は物体の衝突、摩擦を含めた運動を解くための手法の1つであり、コンピュータグラフィックスやゲームプログラミングの分野での研究が盛んである。近年では、オープンソースによる物理エンジンと呼ばれるライブラリの精度が向上したことから、工学領域のシミュレーションにも取り入れられるようになってきている。本研究では氷盤や構造物の衝突問題をオープンソー

スの物理エンジンである Bullet<sup>①</sup>を利用した。

(2) 構造物は氷海域で掘削の実績もあるモノコラムハル型を対象とした。図2に示す形状は報告者が過去に実施した氷海水槽試験で用いた構造物模型の形状と同じで、逆円錐の形をしている。本研究では構造物の動揺を考慮せず、固定構造物に作用する氷荷重を取り扱う。シミュレーションでは氷海水槽試験と同様に一方方向に一定速度で構造物を動かし、氷荷重を計算する。

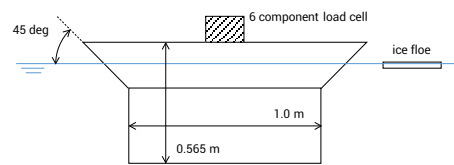


図2 モノコラムハル型構造物模型

(3) 氷盤モデルは四角柱として、個々に単純化した流体力を与えた。構造物周りの流れは簡略化したポテンシャル流れを仮定して、氷盤の没水体積や相対流速、相対流速に対する投影面積等から浮力、圧力抗力、摩擦抗力、回転方向の抵抗を各時間ステップで計算し外力として与える。氷盤モデルは6自由度の運動を可能とした。

(4) 氷盤モデルは四角柱の分割要素を対象とする領域に順に並べ、隣り合う要素間を完全に拘束することで一枚の氷盤として表現した。各拘束点に作用する拘束力が氷盤強度に基づいた閾値を超過した時に拘束を解放して氷盤の破壊を表現した。本手法は多数の瓦礫の挙動を取り扱う建物の倒壊シミュレーション<sup>②</sup>等で用いられている。本研究では、特に卓越すると考えられる曲げ破壊とその他に圧縮破壊、せん断破壊を考慮する。

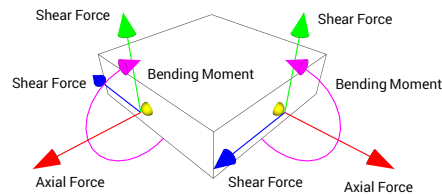
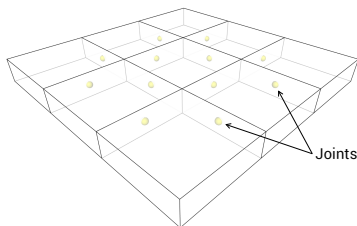


図3 氷盤モデルの全体 (左) と要素 (右) イメージ

<引用文献>

- ① Coumans, E., 2017. Bullet Physics Library version 2.86, [Online] Available at: <http://bulletphysics.org/> [Accessed 1 December 2017].
- ② Hamano, T., Onosato, M., & Tanaka, F., 2016. Performance Comparison of Physics Engines to Accelerate House-Collapsing Simulations, Proceedings of the IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics, pp. 358-363.

4. 研究成果

(1) 計算パラメータとして必要となる氷盤と構造物の適切な反発係数を得るために、構造物と単体の氷盤の衝突について数値シミュレーションと氷海水槽試験の結果を比較 (図4) した。その結果、反発係数がある際に氷海水槽試験では見られない荷重の細かい変動が生じることが分かり、反発係数はゼロが適当であることが確認できた。

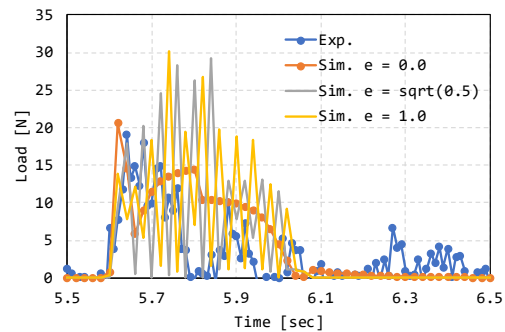


図4 反発係数による荷重の時刻歴

(2) 氷盤破壊が発生しない条件下 (30cm 角の氷盤) の数値シミュレーションにおいて、氷盤群の初期配置が氷荷重に影響を与える可能性があることが分かり、氷盤の初期配置を変化させて計算を実施した。Case A (図5) として氷海水槽試験の環境を再現した初期配置と定期的に氷盤群を配置した後に若干のランダム性を与えたもの (図6左: Case B)、Sway 方向に隙間も持たせて定期的に配置したもの (図6中: Case C)、Surge 方向に隙間も持たせて定期的に配置したもの (図6右: Case D) の4種類の初期配置で比較を行った。Case Aは、氷海水槽試験で撮影

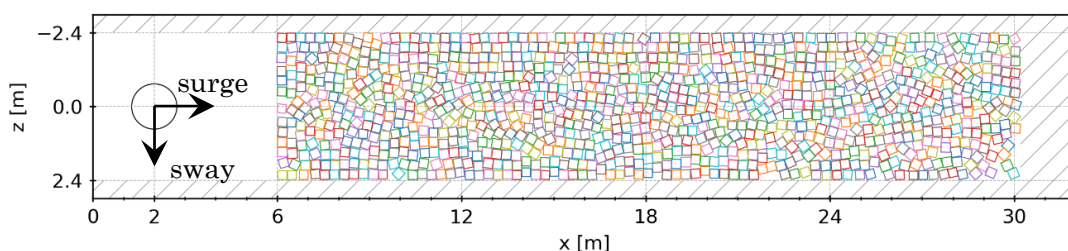


図5 氷盤モデルの全体 (左) と要素 (右) イメージ

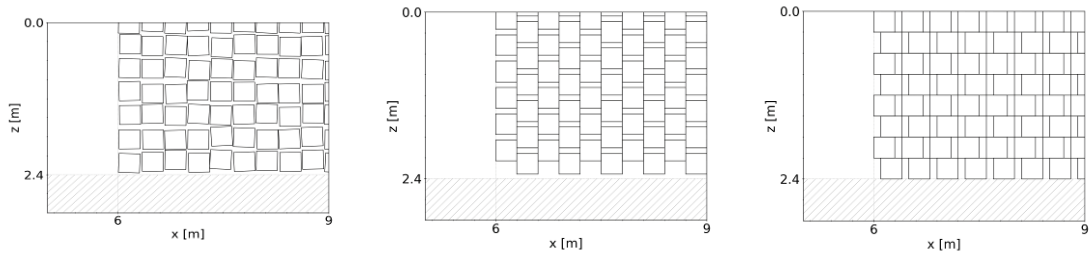


図6 氷盤の初期配置 (左: CaseB、中: CaseC、右: CaseD)

した模型氷の初期配置映像から watershed アルゴリズム<sup>①</sup>等を用いて個々の氷板位置や回転を取り出した。比較した結果から、氷盤の初期配置による氷荷重の変化と共に、特に氷盤の挙動と氷荷重の関係性が示唆され重要な知見を得た。構造物と接触した氷盤は、まず水平方向へ逃げようとするが他の氷盤が障害となり水平方向に動けなくなると鉛直方向(水中)へ流れ構造物の周りから排除される。更に構造物の周辺に氷盤が堆積してくると上記のような氷盤の排除に起因する荷重が増加し、その堆積が緩和されると荷重が減少する。

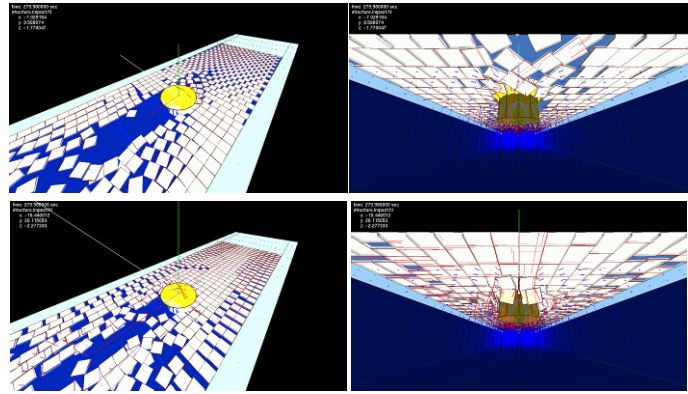


図7 初期配置の違いが氷盤の挙動に与える影響 (左上: Case C 俯瞰図、右上: Case C 正面図、左下: Case D 俯瞰図、右下: Case D 正面図)

(3) また、氷盤間の摩擦係数 (fii) や氷盤と構造物の摩擦係数 (fis) が氷荷重および氷盤の挙動に与える影響について、氷盤破壊が生じない条件下 (30cm 角の氷盤) で計算し、氷海水槽試験結果と比較を行うことで両者の氷盤挙動や堆積の様子が近くなると氷荷重もよく推定できることが分かった。氷盤間の摩擦係数よりも氷盤と構造物の摩擦係数の方が平均氷荷重に与える影響が大きくなり (図8)、氷荷重を大きく過小評価した条件の氷盤の軌跡と妥当な結果を示した軌跡を見ると、氷盤の沈み込みが大きく異なることが確認できる (図9)。氷海水槽試験と同様な氷盤挙動を再現できる摩擦係数等を用いることで、氷荷重を良好に推定できることが確認できた (図10)。

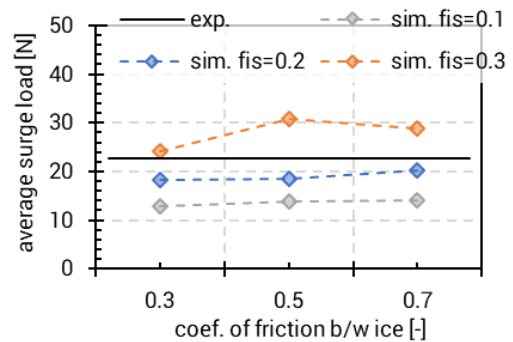


図8 摩擦係数と平均氷荷重の関係

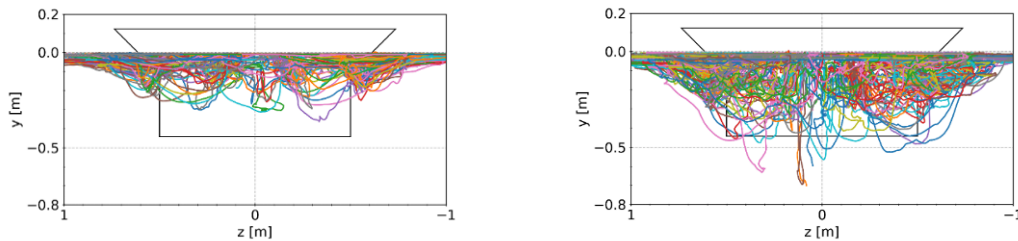


図9 構造物の前下方における氷盤の軌跡 (左: fis=fii=0.1、右: fis=fii=0.3)

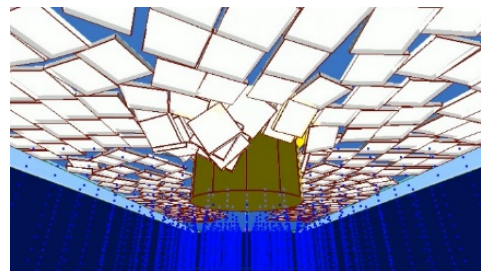


図10 構造物の前下方における氷盤の堆積の様子 (左: 氷海水槽試験、右: fis=fii=0.3)

(4) 氷盤の破壊を表現するために小さい要素を拘束し一枚の氷盤とした。多くの物理エンジンは拘束条件を解く際、計算が発散しないように拘束条件に若干の許容を持たせる。使用したBulletはBaumgarte安定化法<sup>②</sup>という手法を用いている。これは一種のばねとダンパーを拘束点に与えるように考えられる<sup>③</sup>。よって、これが氷盤の弾性率に与える影響を調べるために氷海水槽試験で行っている強度試験(PDM: Plate Deflection Method)を数値シミュレーション上で再現した。一枚の大きな氷盤(5.4m角)を小さい要素(Le)で分割し、外周の要素は動かないように完全に拘束する。そして、氷盤の中心に荷重を加えて、荷重と氷盤のたわみ量から弾性率を求める。図1-1は横軸にBaumgarte安定化法で使われるパラメータの一つConstant Force Mixing( $\Sigma$ )を取り、感度解析を行った結果である。 $\Sigma$ を調整することで目標の弾性率を得ることができる一方で、要素サイズが小さくなると弾性率も小さくなることが分かった。

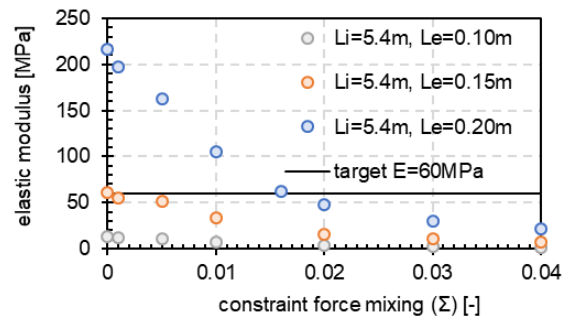


図1-1 安定化パラメータ $\Sigma$ と弾性率の関係

(5) 氷盤破壊が発生する60cm角の氷盤を対象に本手法による計算と氷海水槽試験を比較し、その有効性を確認した。図1-2に全体氷荷重の氷海水槽試験と数値シミュレーション結果の時系列データおよびボックスプロットを示す。数値シミュレーションでは、60cm角の氷盤モデルを3種類のサイズの剛体要素(Le=60/20/15cm)で結合し計算した結果を示している。Le=60cmは氷盤モデルの破壊をシミュレーション上で考慮しない条件となる。時系列データから、(2)で述べたように構造物周りでの氷盤挙動によって不規則にピーク荷重が発生していることが分かる。平均値や四分位範囲はいずれのシミュレーション結果も試験結果と同程度の値となったが、Le=60cmでは発生しているピーク荷重が大きく最大氷荷重は試験結果の2倍以上となった。これは氷盤の破壊に起因する荷重が氷盤の排除に要する力より小さく、氷海水槽試験では氷盤が構造物模型と接触し排除される過程で氷盤破壊(図1-3)が生じたためである。小さい破片は排除に要する力も小さくなり、ピーク荷重が低下する。氷盤モデルの破壊を考慮した数値シミュレーション結果において、Le=20cmと15cmで大きな差は見られなかった。比較した氷海水道試験で製氷された模型氷はPDMの結果から特性長が約35cmであり、それよりも小さい剛体要素であることが一つの要因と考えられる。以上から、本手法により全体氷荷重の平均値やはらつき、最大値が氷海水槽試験結果と良く合っていることが示され、その有効性を確認することができた。

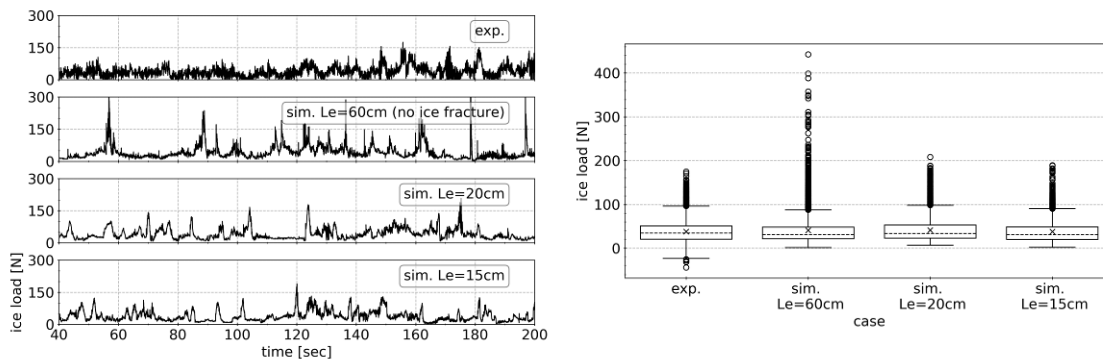


図1-2 全体氷荷重のシミュレーションおよび氷海水槽試験結果  
(左:時系列、右:ボックスプロット)

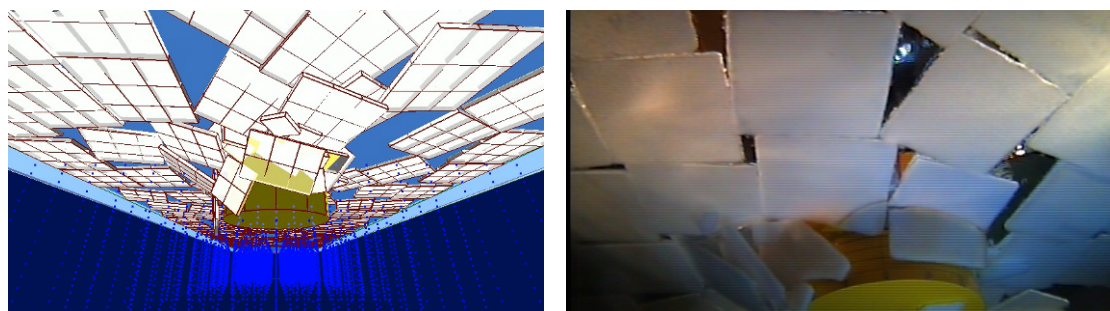


図1-3 構造物前下方における氷盤の様子(左:シミュレーション、右:氷海水槽試験)

<引用文献>

① Meyer, F., 1992, Color image segmentation, Proceedings of the International Conference on Image Processing and Its Applications, 303-306.

- ② Baumgarte, J., 1972. Stabilization of constraints and integrals of motion in dynamical systems, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1(1), pp.1-16.
- ③ Li, X., Andrews, S., Jones, B., & Bargteil, A., 2018. Energized Rigid Body Fracture, Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1(1), 9p.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 4件)

- ① K. Hasegawa, S. Uto, H. Shimoda, D. Wako, T. Matsuzawa, Non-smooth DEM Simulation for Interaction of Conical Structure and Managed Ice Floes using Breakable Ice Element, The 25<sup>th</sup> International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 国際学会査読有, 2019
- ② K. Hasegawa, S. Uto, H. Shimoda, D. Wako, T. Matsuzawa, Influence of Initial Arrangement of Ice Floes on Ice Loads in Non-smooth Discrete Element Method Simulation, The 34<sup>th</sup> International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans, 国際学会査読無, 2019
- ③ K. Hasegawa, S. Uto, H. Shimoda, D. Wako, T. Matsuzawa, Numerical and Experimental Investigations of Managed Ice Loads acting on Fixed Conical Structure, The 28<sup>th</sup> International Ocean and Polar Engineering Conference, 国際学会査読有, 2018
- ④ K. Hasegawa, S. Uto, H. Shimoda, D. Wako, T. Matsuzawa, Non-smooth Discrete Element Method simulation on Single Ice Floe-Structure Interaction and Comparison with Result of Ice Tank Test, The 33<sup>rd</sup> International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans, 国際学会査読無, 2018

〔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〕

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8桁)：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：