

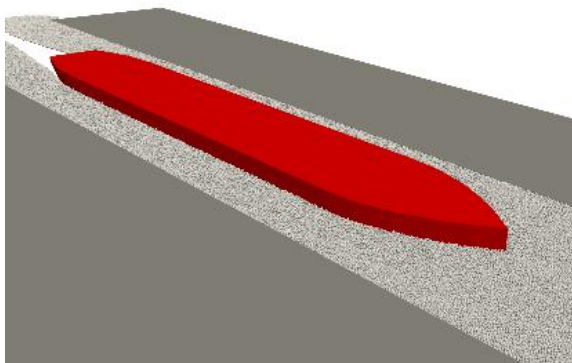
DEM を用いた brash ice channel 中における 船体抵抗の推定

Hull resistance estimation in a brash ice channel using DEM

技術研究所 氷海研究 G

安齋 圭祐

ANZAI Keisuke



概 要

耐氷船の代表的な規格である Finnish-Swedish Ice Class Rules (FSICR)では、Brash ice channel (BIC) を 5 knots で航行可能であることが要求されており、性能の評価には氷海水槽試験が用いられている。しかし、氷海水槽試験による性能評価は多大な時間を要するため、船型開発における課題となっている。そこで、本研究では個別要素法(Discrete Element Method)を用いた性能推定法を開発し、当社の氷海水槽試験と比較、その精度を検証した。

Summary

The Finnish-Swedish Ice Class Rules (FSICR) require ice class vessels to navigate at least 5 knots in a brash ice channel (BIC). Therefore, BIC tests are conducted in ice tanks to evaluate propulsion performance in a BIC. However, ice tank tests require a significant amount of time, which is a major issue in the development of ice class vessels. Regarding this issue, we developed an estimation method for hull resistance in a brash ice channel. In addition, calculation results and tank test results were compared for evaluating the accuracy of the calculation.

1. 緒 言

地球温暖化に伴う海氷の減少によって、北極航路の商業利用に対する関心が高まっている。北極航路のような氷海域で運用される氷海船舶を開発する際には海水との接触を考慮する必要があり、氷海船舶用の規則に基づいて開発が行われている。

氷海船舶は、自力で砕氷航行が可能な「砕氷船」と氷を積極的に割らないものの衝突に耐えることが可能な「耐氷船」に大別される。後者の耐氷船に対する代表的な規則として Finnish-Swedish Ice Class Rules (FSICR)^{1, 2)}が知られており、主に貨物船を対象に広く

適用されている。

FSICR では推進性能に関する要求として、Brash ice channel (BIC)と呼ばれる小さな氷片に覆われた水路の中を 5knots の船速で航行可能とすることが要求されている。FSICR のガイドラインでは BIC 中の推進性能を証明するための推定式が記載されているものの、この推定式は対象の船が大きくなるほど抵抗及び主機出力を過大に評価する傾向がある。また、推定式に代わる性能評価法として氷海水槽試験(図 1)も認められており、特に高い Ice class を取得する際や大型船を開発する際はこちらの方法が取られている。

氷海水槽試験で BIC 中の推進性能を評価する場合、

模型船の作成や水槽内での BIC の再現に多大な時間と労力を要する。そのため、船型開発中タイムリーに BIC 中の推進性能を確認することが困難であり、船型開発を行う上での課題となっている。近年はこのような課題に対し、氷海水槽試験に代わる BIC 中性能評価法として、数値計算に関する研究が行われており、金野ら³⁾や Tokudome ら⁴⁾による物理ベースモデリングを使用した計算、Luo ら⁵⁾による個別要素法 (Discrete Element Method : DEM) を使用した計算などの例がある。

本研究では BIC 中抵抗を推定するための数値計算法の開発を目的として、DEM を用いた BIC 中抵抗推定法を開発し⁶⁾、当社の氷海水槽で行われた試験結果と比較した⁷⁾。なお、当社の氷海水槽試験では専用の治具を用いて FSICR のガイドラインに記載された BIC の断面形状を可能な限り再現している。ここでは、当社の BIC 製氷方法を数値計算上で模擬することで、FSICR のガイドラインに記載されている断面形状を再現した。



図 1 当社の氷海水槽における BIC 試験の様子
Fig.1 Brash ice channel test in the Japan Marine United Ice Model Basin

2. Brash ice channel

Brash ice channel は多くの氷海船舶が同じ航路を行き来することで成形される、小さな氷片に覆われた水路である。氷片群は水路の中央から端部へ向かうにつれて厚くなり、FSICR のガイドラインに記載された理想的な断面形状では、2 deg の傾斜が付いているとされている (図 2)。ここで、 B は船幅、 H_M は BIC の中

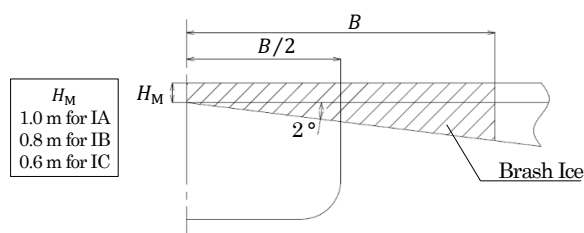


図 2 FSICR のガイドラインに記載された BIC の断面形状
Fig.2 Cross-sectional shape of the brash ice channel from FSICR guidelines

央厚さである。また、 H_M の値は目標とする Ice class (IA, IB, IC) によって異なる。

3. 計算方法

本研究では船舶が BIC 中を航行する際に受ける抵抗 R_{ch} を BIC 中の氷片から受ける抵抗 R_i と水の抵抗 R_w に分割して考える ((1)式)。DEM による計算では水の抵抗については考慮せず、氷片から受ける抵抗 R_i のみを対象として計算を行った。

$$R_{ch} = R_i + R_w \quad (1)$$

BIC は小さな氷片が密集して構成されていることから粒状体として考えることができる。そこで、氷片を球に置き換えて BIC 中抵抗試験を再現し、DEM によって氷片の運動を計算することで R_i を推定した。また、本研究では水槽試験と同様のスケールで計算を行った。

3.1 氷片の運動計算

抵抗推定にはオープンソースの DEM 計算ツール LIGGGHTS⁸⁾を使用した。DEM によって求められる「船体-氷」、「氷-氷」間の接触力、氷片に働く流体力と浮力を考慮した運動方程式 ((2)式) を逐次計算することで氷片の運動と船体を受ける抵抗を求めた。

$$\rho_i V_i \mathbf{a} = \mathbf{F}_{DEM} + \mathbf{F}_w + \mathbf{F}_{buoy} \quad (2)$$

ここで、 ρ_i は氷の密度、 V_i は氷片の体積、 $\mathbf{a}$ は加速度、 $\mathbf{F}_{DEM}$ は DEM で求めた接触力、 $\mathbf{F}_w$ は氷片が受ける流体力、 $\mathbf{F}_{buoy}$ は氷片にかかる浮力である。

3.1.1 DEM による接触力 : $\mathbf{F}_{DEM}$

DEM は粒状体を解析対象として、物体を粒子の集まりに近似して、粒子間の相互作用を計算することで全体の力学的挙動を解析する計算法である。元来は土木工学分野において土の運動を解析するために Cundall ら⁹⁾によって開発された手法だが、現在では土に限らず粒状体の解析に広く活用されている。

本計算ではチャンネル内の氷片を球状の粒子に置き換え、Hertz のモデル¹⁰⁾に基づいて接触力を計算した。また、球に置き換えられた氷片は実際の氷片に比べて回転しやすくなるため、Constant Directional Torque (CDT) モデル¹¹⁾に基づく転がり抵抗を与えることで氷片の回転を抑制した。

3.1.2 氷片が受ける流体力： F_w

氷片が移動する際に水から受ける流体力 F_w を(3)式より求めた。

$$F_w = -\frac{1}{2}\rho_w v_i |v_i| (\pi r^2) C_w \quad (3)$$

ここで、 ρ_w は水の密度、 v_i は氷片の速度、 r は氷片の半径、 C_w は抵抗係数である。

3.1.3 氷片にかかる浮力： F_{buoy}

氷片にかかる浮力 F_{buoy} を(4)式より求めた。

$$F_{buoy} = (0 \quad 0 \quad (\rho_w V_w - \rho_i V_i)g) \quad (4)$$

ここで、 V_w は氷片の没水容積、 g は重力加速度である。

3.2 BIC のモデル化

本研究では、当社の BIC 製氷方法を数値計算上で模擬することで、FSICR のガイドラインに記載されている断面形状を再現して計算を行った。

3.2.1 当社の BIC 作成法

当社の氷海水槽試験では、図 2 で示した BIC の断面形状と同じ形状のモールド（図 3）を用いて氷片を並べることで、2 deg.の傾斜を再現している。水槽内で BIC を作成する過程を図 4 に示す。

3.2.2 計算上における BIC 生成法の再現

水槽試験と同様の手順で粒子を並べることで、計算上で図 2 と同様の形状を持った BIC を再現した（図 5）。その手順を以下に示す。

- ① 計算空間上にチャンネルを構成する平坦氷とモールドを設置する(図 6-1)。
- ② モールド内に氷片を充填し、平板で上から押し付ける。この際、モールドを左右に細かく動かすことで氷片を平らに均す(図 6-2)。
- ③ モールドと平板をゆっくりと離す(図 6-3)。

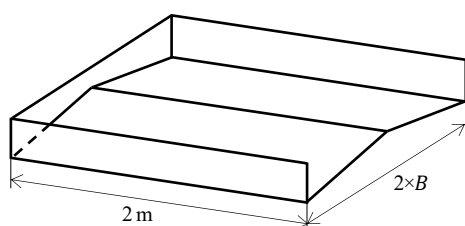


図 3 BIC 作成年モールドの概略図
Fig.3 Outline of the mold for arranging BIC

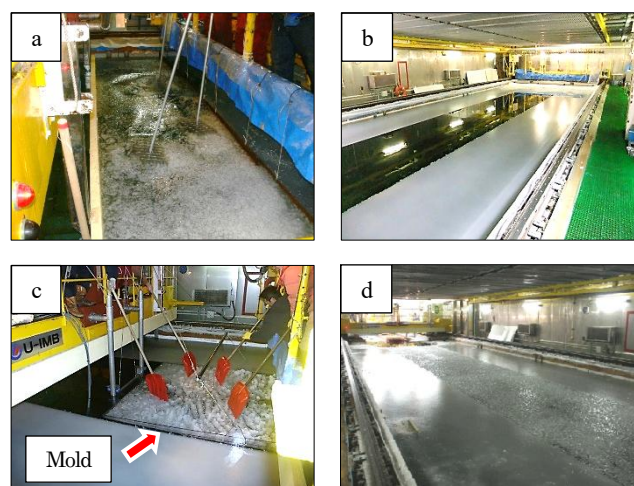


図 4 BIC 作成の流れ (a: 平坦氷を砕いて氷片を作成する、b: 水路を作成する、c: モールドを使用して水路の中に氷片を並べる、d: 完成した BIC)

Fig.4 Procedure for making a brash ice channel (a: making brash ice pieces from a level ice, b: making an open channel, c: arranging the brash ice pieces in the channel using the mold, d: the completed BIC)

図 5 計算上で再現した BIC の断面形状
Fig.5 Cross-section of the BIC in DEM simulation

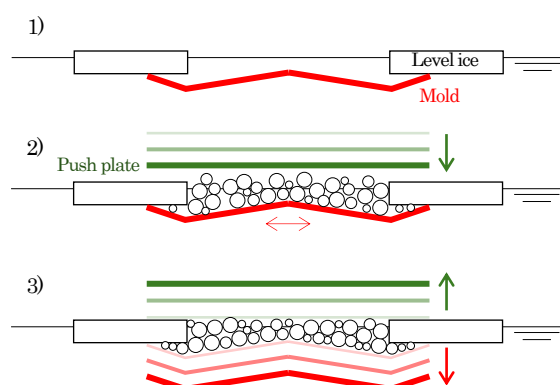


図 6 計算上で BIC を作成する際の氷片（粒子）の並べ方
Fig.6 Ice pieces arrangement method for making brash ice channel in the calculation.

3.2.3 粒子（氷片）サイズ

BIC の性状を表す重要なパラメータである氷片サイズについて、本研究では当社の BIC 試験実績を基にサイズを決定した。当社の BIC 試験では氷厚約 10 mm の平坦氷を砕いて氷片を作成しており、氷片の形状や大きさにはばらつきがある。このような氷片を球に置き換えるため、本研究では氷片と同体積の球の半径を算出し、これを氷片サイズを代表する値として用いた。

BIC 試験の際に無作為に抽出した 7358 個の氷片を対象に、氷片サイズの確率分布を解析した。その結果を図 7 に示す。青いヒストグラムは氷片サイズの度数

分布、橙の実線は累積相対度数、黒の破線は氷片サイズの平均と標準偏差（表 1）を基に算出した対数正規分布の累積相対度数である。Bonath ら¹²⁾の実施したフィールドテストの結果から、実際の海水の大きさは対数正規分布に従うことが示唆されている。スケールや氷片の生成過程は異なるものの、BIC 試験における氷片サイズの分布も海水と同様に対数正規分布に従うと考えられる。図 7 より、対数正規分布が試験結果とよく対応することが確認できたため、対数正規分布を用いて氷片サイズを決定することにした。

本研究では 3 種類の大きさの氷片を混合して BIC を生成した。図 8 に示すように、確率密度関数の両端 5% を特異値として除外すると、氷片サイズの最小、最大値はそれぞれ 5.74 mm, 15.35 mm となる。この区間を 3 等分し、それぞれの区間における期待値を半径とする 3 種の球状氷片を用いた。氷片の半径と混合比率を表 2 に示す。

3.3 計算パラメータ

本研究で用いた氷の物性や抵抗係数等のパラメータの一覧を表 3 に示す。この内、反発係数 e と転がり抵抗係数 μ_r は試行錯誤によって水槽試験と抵抗が一致するように調整した。

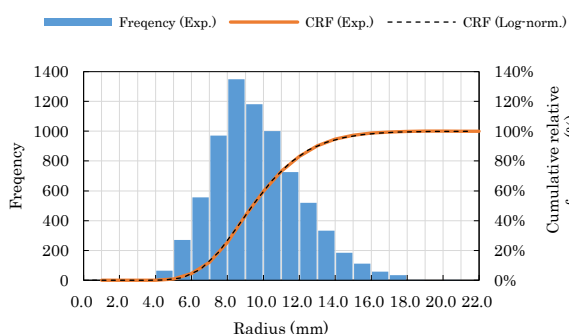


図 7 当社海水水槽試験における氷片サイズの分布
Fig.7 Ice pieces size distribution of the JMU ice tank test

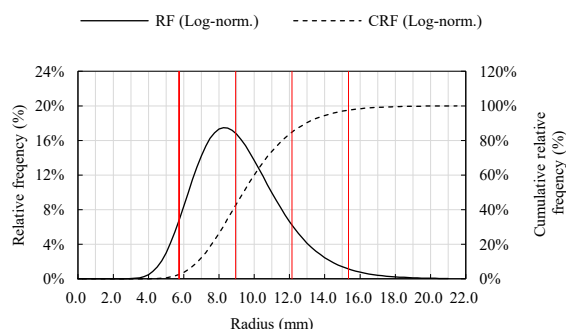


図 8 対数正規分布に基づく氷片サイズの設定
Fig.8 Decision of ice pieces size based on a log-normal distribution

表 1 氷片サイズの平均値及び標準偏差
Table 1 Mean and standard deviation. of ice pieces size

radius	Mean	9.68 (mm)
	S.D.	2.42 (mm)
ln(radius)	Mean	2.24
	S.D.	0.25

表 2 計算に使用した氷片サイズ
Table 2 Ice pieces size for calculation

Radius (mm)	7.65	10.32	13.35
Mixing ratio (%)	42.0	44.6	13.4

表 3 計算パラメーター一覧
Table 3 List of calculation parameters

Young modules	E	11.1 (MPa)*
Poisson ratio	ν	0.33**
Restitution coef.	e	0.5
Friction coef.	μ_k	ice-ice = 1.35*** ice-hull = 0.10* ice-mold = 0.00
Density of the water	ρ_w	1008 (kg/m ³)*
Density of the ice	ρ_i	920 (kg/m ³)*
Rolling resistance coef.	μ_r	0.9
Water resistance coef.	C_w	0.4****

* Based on tank test of JMU
** Based on pure ice property¹³⁾
*** Based on Konno³⁾
**** Based on (JSFM, 1998)¹⁴⁾

4. 実験と計算の比較

4.1 試験/計算条件

氷海水槽試験及び数値計算を用いて BIC 中を航行する際に氷から受ける抵抗 R_i をそれぞれ求め、その結果を比較した。

本研究で用いた対象船型の一覧を表 4 に示す。A 船型は船首端が尖った細長い放物線型、B 船型は船首端が丸まった楕円型の 2 次元的な数式船型である。また、C, D, E 船型はそれぞれ異なる特徴を持った実践的な貨物船の船首形状を備えている。5 種の船型のうち、D 及び E 船型については複数の喫水条件で試験を行った。BIC 試験では喫水が十分深い場合には氷片は船側へ押し分けられるが、喫水が浅くなると船底へと沈み込むようになり、氷片流れの傾向が変わる。そこで、十分に喫水が深い条件を深喫水条件、アスタリスクで示した喫水が浅い条件を浅喫水条件として扱うこととした。

表 4 供試船型一覧 (模型スケール)
Table 4 List of test model vessels (dimensions are in model scale)

Name	Bow-shape	Length (mm)	Breadth (mm)	Draft (mm)	Velocity (m/s)	Scale
A	Parabola	6487	1000	404.4	0.383	1/45
B	Ellipse	6487	1000	404.4	0.383	1/45
C	LEADGE-Bow®	6487	1000	404.4	0.383	1/45
D	SP-Bow®	6487	1000	404.4, 214.9 ^{*1}	0.383	1/45
E	Bulbous Bow	5742	1000	338.7, 184.2 ^{*1} , 155.2 ^{*2}	0.462	1/31
*1, *2: shallow draft condition						

氷海水槽試験では計画通りの BIC の厚さを実現できるように氷の量を調節しているが、寸分違わず制御することは困難である。また、数値計算においても、BIC の厚さの制御は粒子の供給量による間接的な制御となるため、直接的に設定することは難しい。一方、両評価法を比較するためには、基本的な試験条件である BIC の厚さを揃える必要がある。そこで、それぞれの評価法について複数の BIC 厚さで R_i を求め、BIC の平均厚さ H_{av} との関係から Ice class IA, IB, IC 相当の抵抗を推定して比較した。

4.2 結果と考察

氷海水槽試験と数値計算によって算出した氷から受ける抵抗 R_i の比較を図 9 に示す。図の横軸は氷海水槽試験の結果、縦軸は数値計算の結果であり、各マーカーの色は供試船型ごとの結果を示している。また、白抜き三角形と四角形の点は D 及び E 船型の浅喫水条件における結果を示している。

数値計算による抵抗推定精度について、深喫水条件では実験と良く対応した結果が得られたが、浅喫水条件では 30% 程度抵抗を過小評価する傾向が見られた。

深喫水条件について、A 及び B 船型の船首周りにおける氷片流れの比較を図 10 に示す。氷海水槽試験結果より、A 船型は氷片をスムーズに側方へ押し分けることが可能だが、B 船型は氷片が船首端に堆積してしまうという傾向が見られた。数値計算でも同様の傾向を示しており、抵抗だけでなく氷片の流れについても良く再現できていることが確認できた。

浅喫水条件について、E 船型の船首周りにおける氷片の流れ比較を図 11 に示す。氷海水槽試験では船底一面を氷片が覆っているが、数値計算では船底部が完全には覆われておらず、氷片流れが再現できていないことが確認できた。船底に流入する氷片量が減少すると、それに伴って氷片にかかる浮力に起因する抵抗も減少するため、氷片流れの差が浅喫水条件において抵

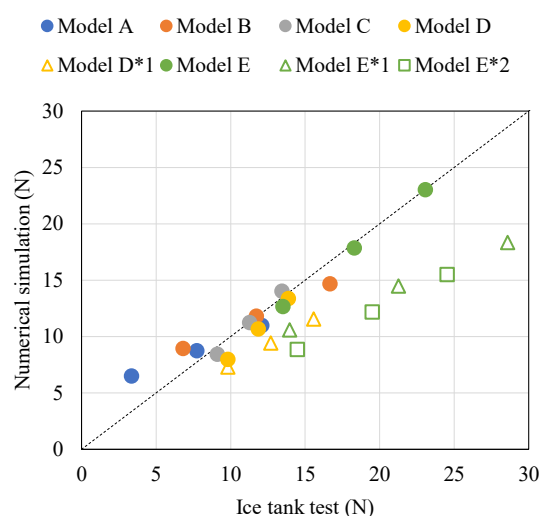


図 9 氷海水槽試験と数値計算による氷から受ける抵抗 R_i の比較

Fig.9 Comparison of the ice resistance obtained from the ice tank tests (horizontal axis) with that predicted by the numerical simulations (vertical axis)

抗を過小評価した一因であると考えられる。

上記の結果より、十分に喫水が深く、氷片が船底まで沈み込まない条件であれば、本計算法は船型開発時の性能評価に実用可能であると考えられる。一方、喫水が浅い条件では、30%の誤差を見込んだ修正を加えることで抵抗を推定することは可能であると思われるが、氷片流れが再現できていないことから、本研究で示した以上の誤差が生ずる可能性がある。そのため、氷片流れをより正確に再現できる様な計算精度の向上が必要であると考えられる。

浅喫水状態で氷片流れを再現できなかった原因について、浅喫水状態では船首から船底に向かう水流の影響で氷片が沈み込みやすくなると思われるが、本計算法では船体周りの流場の影響を考慮していないために、この現象を再現できなかったためであると考えられる。そこで、CFD と DEM の連成によって流場の影響を考慮することで、氷片流れの再現性、ひいては抵抗推定精度を向上させることができると考える。

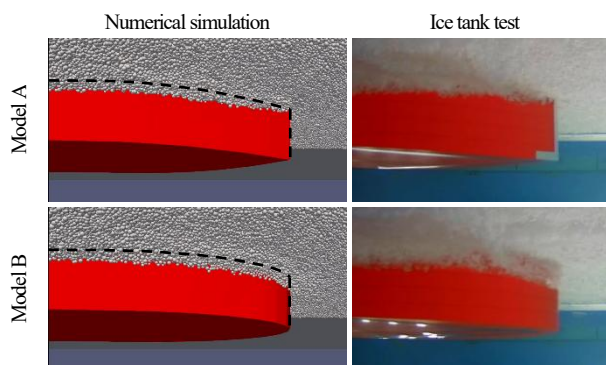


図 10 深喫水条件における氷片流れ (A 及び B 船型)
Fig.10 Flows of ice pieces under the deep draft condition (Models A and B)

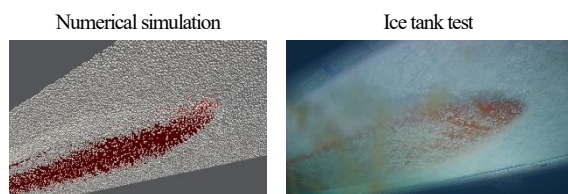


図 11 浅喫水条件における氷片流れ (E 船型、喫水条件*2)
Fig.11 Flow of ice pieces under the shallow draft condition (Model E*2)

5. 結言

本研究では BIC 中抵抗を推定するための数値計算法の開発を目的として、DEM を用いた BIC 中抵抗推定法を開発し、当社の氷海水槽で行われた 5 種類の船型における試験結果と比較した。また、このうち 2 種類の船型については喫水の浅い条件でも試験を実施した。その結果は以下のとおりである。

- ・ 喫水が深い条件では、精度よく抵抗を推定することができた。
- ・ 喫水が浅い条件では抵抗を 30%程度過小評価する傾向が見られた。
- ・ 船体表面上を氷片が流れる様子について、喫水が深い条件では実験と同じように氷片が流れていたが、喫水が浅い条件では氷片が船底に沈み込んでいく様子を再現することができなかった。

上記の結果より、本計算法は喫水が深い条件であれば船型開発に活用可能な精度で抵抗を推定できることが確認できた。この成果を活用することで、船型開発の効率化が期待される。今後の課題として、喫水が浅い条件における抵抗推定精度を向上させるため、CFD と DEM の連成計算を導入することで流場の影響を考慮する必要があると考える。

参考文献

- 1) TRAFICOM : GUIDELINES FOR THE APPLICATION OF THE 2017 FINNISH-SWEDISH ICE CLASS RULES、TRAFI/708629/03.04.01.01/2018、(2019)
- 2) Finnish Transport and Communications Agency : Ice Class Regulations and the Application Thereof、TRAFICOM/68863/03.04.01.00/2021、(2021)
- 3) 金野祥久、吉本和弘：物理ベースモデリングに基づく brash ice channel 航行船舶の抵抗評価手法の開発、日本船舶海洋工学会論文集、第 10 巻、p p49-56、(2009)
- 4) Taiki Tokudome、Yuya Yoshida、Akihisa Konno : Fluid Force Modelling Affecting on Ice Piece for Ship Navigation in Broken Ice Fields、Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions、(2021)
- 5) Wanzhen Luo、Dapeng Jiang、Tiecheng Wu、Chunyu Guo、Chao Wang、Rui Deng、and Sai shuai Dai : Numerical simulation of an ice-strengthened bulk carrier in brash ice channel、Ocean Engineering、Vol. 196、106830、(2020)
- 6) 安齋圭祐、水野滋也、山内豊：断面形状を考慮した Brash Ice Channel 中の抵抗推定計算、日本船舶海洋工学会講演会論文集、第 37 号、pp241-246、(2023)
- 7) Keisuke Anzai、Shigeya Mizuno、Yutaka Yamauch : Comparison of Ice Resistance in Brash Ice Channel between Numerical Simulation and Ice Tank Tests、Proceedings of The 40th International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans 2026、pp87-90、(2026)
- 8) LIGGGHTS® Open Source Discrete Element Method Particle Simulation Code | CFDEM®project、<https://www.cfdem.com/liggghts-open-source-discrete-element-method-particle-simulation-code>、(参照 2026-10-05)。
- 9) P. A. Cundall、O. D. L. Strack : A discrete numerical model for granular assemblies、Geotechnique、29、No. 1、pp.47-65、(1979)
- 10) Catherine O'Sullivan : 粒子個別要素法 Particulate Discrete Element Modelling: A Geomechanics Perspective、鈴木輝一訳、森北出版、第 1 版、

-
- (2014)
- 11) Jun Ai、Jian-Fei Chen、J. Michael Rotter、Jin Y. Ooi : Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations、Powder Technology、Vol. 206、Issue 3、pp269-282、(2011)
 - 12) Victoria Bonath、Vasiola Zhaka、Bjørnar Sand : Field measurements on the behavior of brash ice、Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions、(2019)
 - 13) 野沢和夫 : 氷海工学-砕氷船・海洋構造物設計・氷海環境問題-、成山堂書店、初版、(2006)
 - 14) 日本流体力学会 : 流体力学ハンドブック 第2版、p.445、ISBN 4-621-04461-3、丸善出版、(1998)
-



安齋 圭祐