

令和 5 年 10 月 24 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04955

研究課題名（和文）海水の機械的性質に関する超音波非破壊検査法の適用

研究課題名（英文）Application of ultrasonic nondestructive testing methods to the mechanical properties of sea ice

研究代表者

松沢 孝俊（Matsuzawa, Takatoshi）

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：00443242

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）：海水の材料的特性としての超音波に対する応答を調査した。サンプル用に、純水のほかに添加物により海水を模擬した模型氷を実験室で製氷する手法を確立した。塩分による変化の評価として曲げ試験を行い、一定範囲で曲げ強度の制御が可能とわかった。並行して、道東で実氷を採取し、現場で曲げ強度データを取得した。実験室で製氷したサンプルにつき、まず音速を測定し、純氷より模型氷が低速になることがわかった。また音圧強度の時系列変化を比較したところ、純氷と異なり模型氷では複雑な反射の影響を含むことがわかった。これらは模型氷が海水同様にブラインを含むためと考えられ、今後はその定量的な関係性を詳しく追求したい。

研究成果の学術的意義や社会的意義

氷の超音波応答を見る先行研究はほとんどなく、特に海水では計測も困難であってデータがない。そこで、海水の代わりに海水構造を模擬した模型氷を用いるという点は例がなく、そのデータを取得したことは意義が大きい。製氷を伴う実験では、製氷方法及び環境が氷質に大きく影響する。実験のために氷質を制御可能な環境を構築したことは、今後の類似研究にも応用でき有用である。得られた氷質と音圧データを照らし合わせると、実氷について最低限の計測をすれば非破壊で強度を推定することが可能となる。実氷データは今まで計測が困難で蓄積が極端に少ないが、非破壊手法が実現すればデータ拡充と計測の安全性に寄与するところ大である。

研究成果の概要（英文）：The response of sea ice to ultrasound as a material property was investigated. A method was established for making model ice samples in the laboratory that simulate sea ice with additives. Cantilever bending tests were conducted to evaluate changes due to salinity, and it was found that flexural strength of model ice could be controlled within a certain range. In parallel, sea ice samples were collected in East Hokkaido, and flexural strength data were obtained in the field. Sound velocity was measured for the model ice samples made in the laboratory, and it was found that the speed of sound was lower for model ice than for pure ice. The time series of sound pressure intensity was also compared, and it was found that, unlike pure ice, model ice contains complex sound reflection effects. These results may be because model ice contains brine as well as sea ice, and we would like to pursue the quantitative relationship regarding brine volume in more detail in the future.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：海水の機械的性質 超音波探傷法 海水構造

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年の船舶運航では、環境負荷を極小化する観点で、エネルギー効率に様々な規制が課されている。一般に、風や波は船速の低下や燃料消費量の増加をもたらすため、船舶の設計から運用にかけて、風や波が存在する実海域における運航性能(実運航性能)を正しく推定する必要がある。しかし、氷の存在する海域での定量的推定手法は未確立である。なぜなら、氷自体が複雑な材料で、詳細な挙動が未解明なためである。氷がもたらす船速の低下や燃料消費量の増加は、氷が船舶に与える抵抗に起因する。氷中航行で船が氷を排除する際、特に破壊に費やすエネルギー(馬力)は非常に大きく、搭載主機のサイズ決定に大きく影響するため、氷の破壊に関するパラメータの正確な推定手法は必要不可欠である。

(2) 今までに海氷の機械的性質の計測は多数行われてきた。海氷は周囲の環境の影響を受けやすく、生成過程や経時変化によって特性が大きく異なるので、実データの蓄積が必要不可欠である。しかし、実氷の機械的性質の計測は大掛かりで、船舶等でサンプルを採取すること自体にも困難を伴い、計測点数の確保には多くの試験航海と長期間を要するのが現状である。従って、氷海域の工学的諸問題にあたっては、効率的な計測法を開発して早急に多量の計測数を確保し、実氷の機械的性質に対する理解を学術的に深めることが非常に重要である。

### 2. 研究の目的

(1) 非破壊で海氷の機械的性質を計測する手法を開発することが本研究の最終的な目標である。海氷の機械的性質に関するデータの蓄積を阻む要因は、計測に関する作業性・作業効率の低さにある。例えば、砕氷と関係が深い曲げ強度を計測する場合には、試験片を切り出して梁曲げ試験を行う必要があり、これを多点で実施するのは実質難しい。また、切り出すことによる計測値への影響が避けられず、作業者の技量等に依存する面もあり、データの不確実性を排除するのは困難である。これを解決するため、非破壊手法を検討する。

(2) 実氷の結晶構造は様々であるので、特定の結晶を有する氷を実験室で生成することが系統的な検討をするためには不可欠である。このような人工的な氷をここでは模型氷と呼ぶが、本研究で特に重要となる結晶の粒度及び曲げ強度について、制御しつつ製氷する手法を確立する。また、従来の機械的性質の計測法として例えば ITTC 法があるが、これに準拠した計測機器及び計測データの蓄積を用いて、検証を行うことで実用的な評価を行う。

### 3. 研究の方法

(1) 実験室における定量的評価により海氷構造の非破壊検査の基礎を確立する。本研究では、建築構造物等で行われている非破壊検査法を応用することを考える。海氷に接した振動子から超音波を放射し、その反射の感度、周波数特性及び配向性を比較することで、機械的性質との相関を解明する。これが可能なのは、海氷の機械的性質が一定のパラメータ群で説明され、そのミクロな因子が材料的欠陥と同等の挙動を示し、欠陥に対する超音波の反射特性に影響を及ぼすと考えられるからである。

(2) 海氷の機械的性質を説明するパラメータ群には、厚さ、温度、結晶サイズ、配向性、多種の含有物の濃度及び混合具合等がある。これらを実験室での製氷において調整するため、マイナス 20 度程度の低温環境を得られる実験空間を構築し、様々な製氷方法を試行して安定的に所要の氷サンプルを得られる手法を確立する。得られた氷サンプルに対して各種計測を行い、計測結果の不確実性や誤差要因、また本研究及び将来の計測データの定量的評価に資する基礎データを取得する

### 4. 研究成果

(1) 海氷の材料的特性としての超音波に対する応答を系統的に調査するため、実験用の氷を製氷する環境を整備した。まず、マイナス 20 °C からマイナス 5 °C に室温を調整できる冷凍庫(図 1)において、氷片を削り出し整形する資機材を設置した。氷の成長過程を側面から観察できる水槽を設計製作した。上記資機材を用いて製氷を繰り返し、実験時の低温室やインキュベータの運転方法を確立するためのデータを取得した。

(2) 氷核散布により垂直構造を持つ純氷の製氷を試み、約半日の冷却により氷厚 50mm 程度のサンプルを得られるようになった。海水を模して凝固点降下を示す溶剤(プロピレングリコール)

を混入した水で、純氷について確立した手法で製氷し、純氷と同様に氷厚 50mm 程度のサンプル（図2）を得られるようになった。これらの結晶は、図3に示すように海水と同様の垂直構造である。曲げ強度を確認するため、片持ち梁試験と3点曲げ試験を各サンプルについて実施した。海水を模擬するという目的で模型氷を製氷した場合、その性状をコントロール可能になった。



図1 製氷用冷凍庫

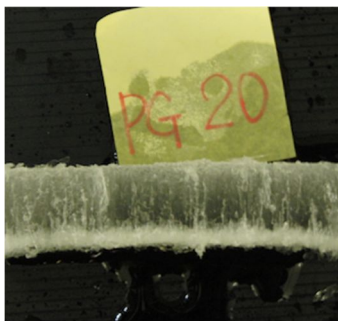


図2 模型氷の例

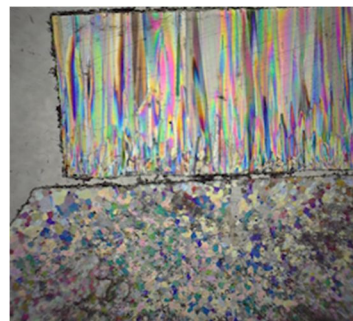


図3 模型氷の結晶構造

(3) 北海道ウトロ港内とサラマ湖内において海水と海氷のサンプル採取し、曲げ試験（片持ち梁試験及び3点曲げ試験）を行なった（図5）。氷にはブライン（凝縮された高塩分水）が含まれており、曲げ強度は純氷より低い値を示した。海氷の塩分は低く、結晶は粒状と柱状が混在していた。氷厚と曲げ強度の関係を、溶剤を混入した模型氷での系統試験結果と比べたところ、図5に示すように、両者の傾向は一致し、模型氷が海氷の性状を再現できていることが確認された。



図4 ウトロにおける片持ち梁試験

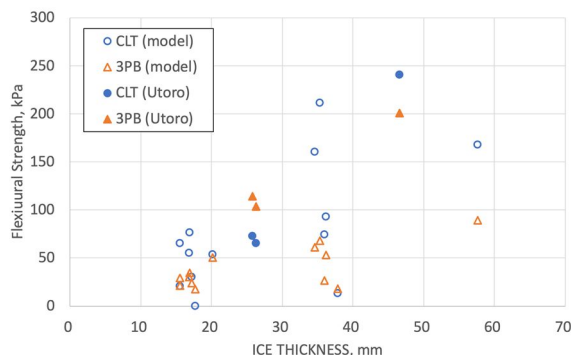


図5 海氷と模型氷の氷厚と曲げ強度分布

(4) 海氷のような構造を持つ氷に対する超音波応答を観察するため、複数条件の模型氷を製氷して、それらについて計測を行った。塩分が異なる3種類の擬似海水から製氷した模型氷について音速及び曲げ強度を計測すると、おおよそ純氷より低い値を示した（図6）。結果の妥当性は定性的には確認できたが、塩分が2%と3%の模型氷で違いは見られなかった。曲げ強度も差は少なく、計測時の温度管理が精確でなかったことの影響と考えられる。加えて、各試験片についてエコーグラフすなわち距離に対する音圧強度の変化（図7）を描いて比較した。模型氷では氷とブラインの境界で擾乱が生じ、純氷に比べて非常に複雑なグラフになる。このことは定性的に確認できたが、より詳しく関係性を把握するためには、ブラインの分布やサイズの情報が必要になる。MRI等の手法が有効であり、今後そうした分析を行うことが望ましい。

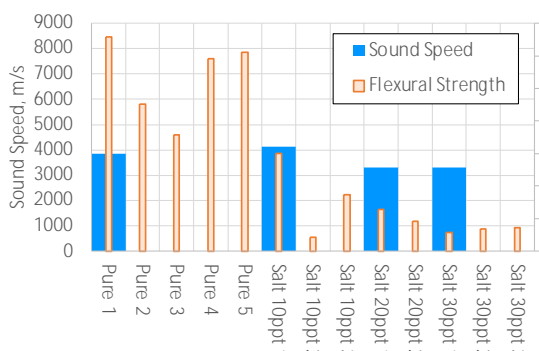


図6 塩水氷の音速と曲げ強度の計測データ

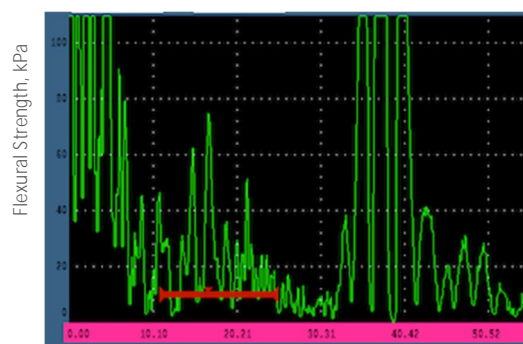


図7 塩水氷のエコーグラフ例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------