

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03152

研究課題名(和文) 氷の衝撃変形・破壊メカニズムの解明とマルチスケール砕氷技術の開発

研究課題名(英文) Elucidation of impact deformation / fracture mechanism of ice and development of multi-scale ice-breaking technology

研究代表者

山田 浩之 (Yamada, Hiroyuki)

防衛大学校 (総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・システム工学群・准教授

研究者番号：80582907

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：身近な氷の破壊現象として、金属製スプーンの裏で氷を叩くことで簡単に割れることが経験的に知られている。しかし、この氷の破壊メカニズムは明らかにされていない。そこで本研究では、氷の変形および破壊の速度依存性に着目する。準静的および打撃インデンテーションにより氷の変形および破壊特性に及ぼす圧子形状や速度などの負荷条件の影響を明らかにすることを目的とした。インデンテーション試験とその時の破壊の観察の総合的な結果から、圧子形状や速度を変化させたインデンテーションにより、氷の変形および破壊特性には内部の変形場が大きく影響することが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

圧子形状と速度の効果でスプーンの裏を使った打撃で簡単に氷が破壊できる現象のメカニズムの一端が明らかになった。これは氷をいかにして簡単に破碎するかアイデアに直結する。しかし、本研究では、1辺20 mmの試験片を用いたため、試験片の寸法が変わると、荷重値やエネルギーの値は変化することが予想される。よって、試験片の寸法効果について検討する必要がある。この効果を理解することで、マルチスケール砕氷技術へと展開が可能となる。最終的に、雷や航空機に着氷した氷の落下などからの保護、砕氷船技術へと展開されることが期待される。

研究成果の概要(英文)：It is empirically known that one of the familiar ice breaking phenomena is hitting the ice with the back of a metal spoon. However, the mechanism of ice fracture has not been clarified. The purpose of this study was to clarify the effects of loading conditions such as indenter shape and indentation rate on the deformation and fracture characteristics of ice by quasi-static and impact indentation. From the comprehensive results of the indentation test and the observation of the fracture at that time, it was clear that the internal deformation distribution has a great influence on the deformation and fracture characteristics of ice by indentation with changing the indenter shape and indentation rate.

研究分野：衝撃工学

キーワード：氷 インデンテーション 打撃 準静的 ひずみ速度 破壊 ハイスピードビデオカメラ 圧子形状

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

氷は、理工学の幅広い分野で研究対象とされてきた。理学分野においては、惑星科学において、宇宙空間の低温領域や地球高層大気に存在する氷微粒子に着目した研究や氷の高速衝突実験が行われ、惑星や衛星の起源の解明に重要な役割を果たしている。一方、工学分野では、氷による災害からの被害低減や氷をいかにうまく利用するかという観点から、氷の変形・破壊に関連した研究が行われている。簡単に氷を割る方法は、経験的にアイスピックのように鋭いものを使うが、スプーンの裏(球状)で叩くと簡単に割れることが知られている。しかし、このメカニズムの詳細はわかっていない。氷の破壊メカニズムについては、未だ未知な部分が多い。

2. 研究の目的

これまで氷の変形・破壊特性については、多くの研究が行われているが、多くが圧縮の単軸試験である。ここで、押込試験(インデンテーション)に注目する。インデンテーションは、材料特性を調べる上で有効な評価手法であり、金属の分野では幅広く利用されている。しかし、氷のインデンテーションによる変形・破壊特性に関する報告例は少ない。アイスピックや金属製スプーンによる破壊メカニズムを理解するためには、インデンテーションにより、圧子形状の効果を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、インデンテーションを用いて、氷の変形および破壊特性に及ぼす圧子形状や速度などの負荷条件の影響について知見を得ることを目的とする。最終的に、マイクロおよびマクロの両観点(マルチスケール)から氷の衝撃変形・破壊メカニズムの解明を行う。

3. 研究の方法

氷のインデンテーションにおける基本的な変形および破壊特性を調べるため、準静的インデンテーションを実施した。準静的インデンテーションは、万能試験機と本研究で新たに導入した低温保持チャンバーを組み合わせた装置で実施した(図1)。チャンバーは二重壁となっており、壁と壁の間は真空断熱されている。軸との接続部は、フェルトおよび銅製のリフレクターを使用している。フェルトは断熱・保温効果がある。リフレクターは薄い銅板を均等間隔に配置することで、外部からの空気の流入とチャンバー内の冷気の漏れによる温度の乱れを緩やかにし、チャンバー内の温度の安定化を図っている。また、チャンバーには観察用の窓を設けている。冷却時に使用した窒素ガスを再利用し、ガラス窓に吹きかけることで、ガラスが結露するのを防止しながら内部を観察することができる。本研究では、チャンバー内の空間温度が -10°C に到達した後15分間保持し、氷の温度 $-10.1 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ で実験を行った本試験手法で、圧子形状や速度を変化させた場合の変形および破壊における準静的特性を調べる。

一方、アイスピックやスプーン裏での打撃を模擬するために、より速度の大きい氷の打撃インデンテーションを行った。自作した試験装置の模式図を図2に示す。試験装置は、氷を変形および破壊する打撃部、試験片を固定する試験片固定部、打撃部の回転軸となるベアリング部で構成されている。打撃インデンテーションは、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所の氷海船舶試験水槽の一部を使用して試験を行った。この氷海水槽施設は、長さ35m、幅6m、水深1.8mの試験水槽を冷凍室内に設置しており、低温環境で実験を行うことが可能である。本研究では施設の制約上、低温室温度を $-5.2 \sim -0.5^{\circ}\text{C}$ に保ち、試験を行った。

本研究では、圧子角度 90° 、 110° 、 120° 、 140° の円錐圧子、および直径10mm、15mm、20mm、36mmの球圧子を使用した。

氷の変形および破壊の様子は、観察窓の前に設置したデジタルビデオカメラおよびハイスピードカメラを併用して行った。

試験片形状は、全て、1辺20mmの立方体であり、押込む面は、マイクロトームによって研削することで、表面粗さの影響を小さくしている。

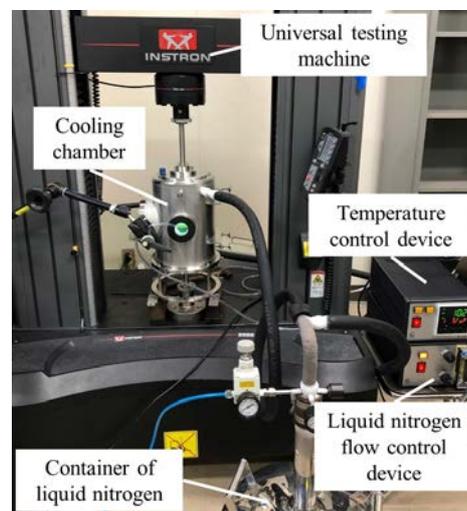


図1 準静的インデンテーション

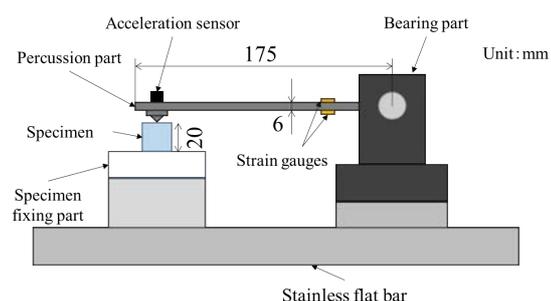


図2 打撃インデンテーション

4. 研究成果

(1) 準静的インデンテーション

一般的に、金属材料などに対してインデンテーションを行った際、変位量の増加に伴い荷重は増加する。氷の準静的インデンテーションでもほぼ同様の結果がみられた。円錐圧子では、変位速度 0.002 mm/s および 0.02 mm/s では押込中の荷重の変動はほとんどないが、変位速度が増加すると、荷重の変動がみられた。一方、球圧子では、円錐圧子のような荷重の変動は見られなかった。そこで、最大荷重を用いてデータをまとめる。

図 3 および図 4 に円錐圧子および球圧子による準静的インデンテーションで得られた氷の最大荷重と変位速度の関係を示す。本研究では、最大荷重は氷試験片が破壊した際の荷重と同義である。最大荷重は、圧子角度や球直径が大きいほど増加する傾向を示した。変位速度が増加すると、円錐圧子では、変位速度 0.002~0.02 mm/s の間では荷重が低下し、変位速度 0.2 mm/s で一度増加し、その後変位速度 2 mm/s で再び低下した。一方、球圧子では、変位速度 0.02 mm/s で荷重が最も大きくなり、その後変位速度の増加に伴い、荷重は低下した。

本試験では、デジタルビデオカメラとハイスピードカメラを用いて破壊の様相の可視化を試みた。しかし、デジタルビデオカメラでは、性能上、氷内部の亀裂の進展の観察は困難であった。そこで、変位速度 2 mm/s においてハイスピードカメラで撮影した圧子角度 90° および 140° 円錐圧子による氷の破壊の様相の一例を図 5 に示す。なお、画像の上には、圧子先端と氷表面が接触してから時間を、下にはその際の変位量を示している。各圧子とも圧子の接触点付近に小さな亀裂が発生し、時間の経過とともに亀裂が進展して破壊に至る様子が観察された。円錐圧子では押込みの初期 (90° の 0.10~0.30 s (変位 0.20~0.60 mm), 140° の 0.10~0.18 s (変位 0.20~0.36 mm)) に亀裂がほとんど進展せず、停滞している様子が観察された。変形が進み、亀裂が再び進展し始めると、そのまま破壊に至る。一方、球圧子では破壊までの時間が短く、このような亀裂の停滞はほとんど観察されなかった。また、円錐圧子と球圧子を比較すると、球圧子の方が早期に破壊が生じることがわかった。

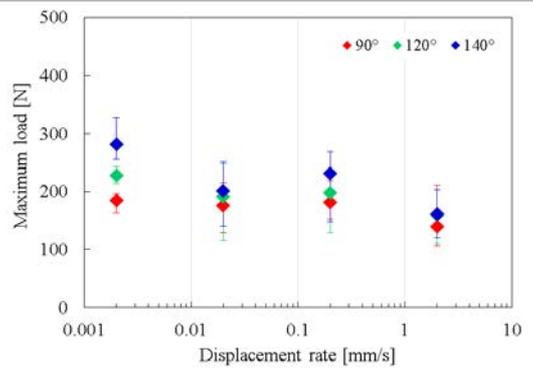


図 3 円錐圧子における氷の最大荷重 (破壊荷重) と変位速度の関係

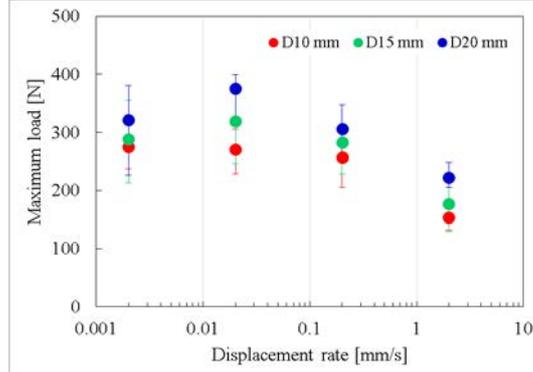


図 4 球圧子における氷の最大荷重 (破壊荷重) と変位速度の関係

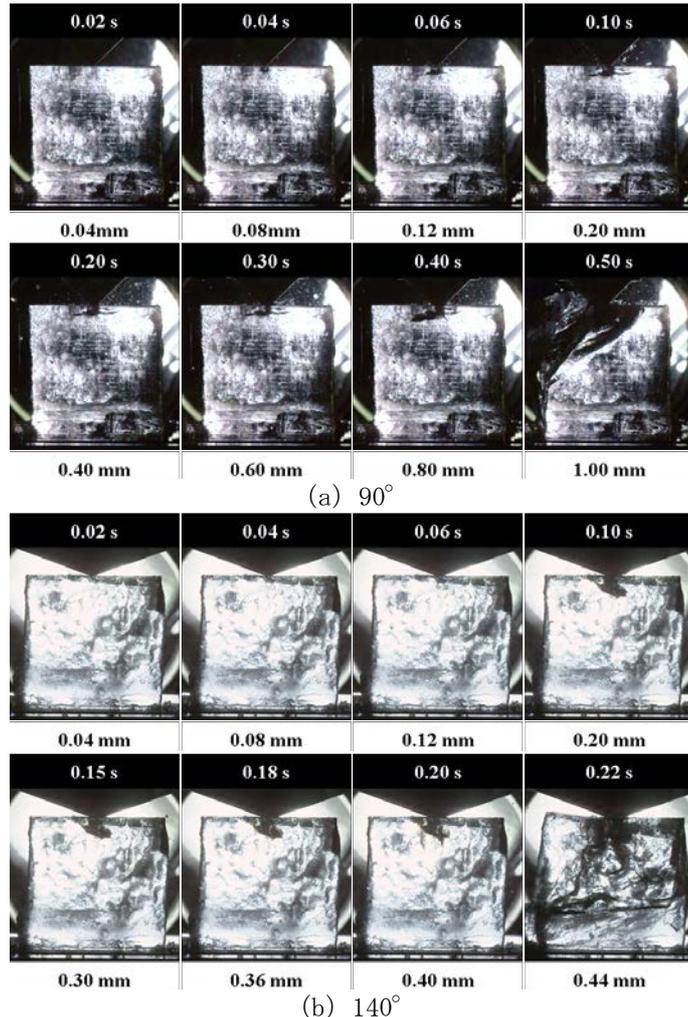


図 5 円錐圧子による氷の破壊の様相 (変位速度 2 mm/s)

(2) 打撃インデンテーション

打撃初期の0.4 msまでの円錐圧子(90° および140°)と球圧子(直径10 mm および直径36 mm)の荷重-時間関係で、荷重は周期的に大きく振動した。そこで、振動の原因を調べるため、打撃インデンテーションで得られた荷重-時間関係に高速フーリエ変換(FFT)を用いて周波数分析を行った。比較のため、宙吊りにした平板をハンマーで打撃し、FFT解析により測定した平板自身の固有振動も測定した。それぞれの周波数のピーク値は圧子によらず同じ値を示した。打撃インデンテーションにおける周波数の2つのピーク値が、平板の1次モードおよび3次モードの値とほぼ一致した。よって、打撃インデンテーションにより得られた荷重は、平板が氷に接触した際に加わる荷重と打撃部の固有振動が重畳したものであると推察される。打撃インデンテーションによる計測では、平板の3次モードより高い周波数もみられたことから、さらに高次のモードも影響していると考えられる。

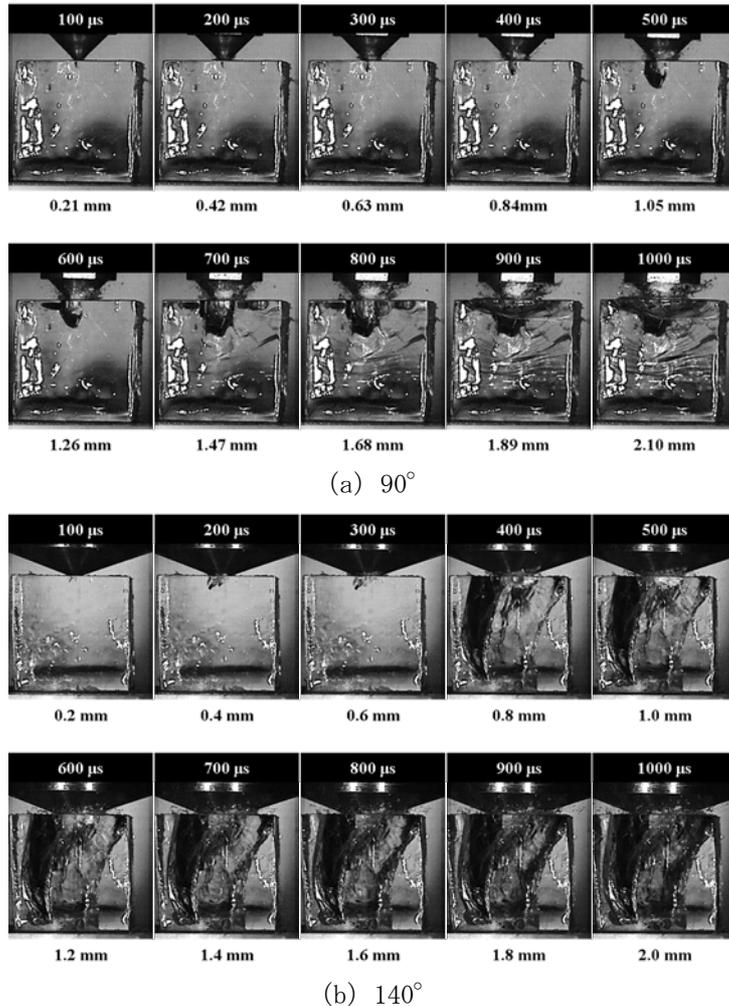


図6 円錐圧子による氷の破壊の様相(変位速度約2.0~2.2 m/s)

円錐圧子打撃において、ハイスピードカメラで撮影した映像から切り取った静止画の一例を図6に示す。両圧子とも、圧子先端と氷の接触点から亀裂が徐々に進展し、氷が破壊されていく様子を確認することができる。準静的インデンテーションと同様に、円錐圧子よりも球圧子の方が氷の破壊に至るまでの時間は短くなっている。また、球圧子では円錐圧子と異なり、亀裂が試験片横方向に進展するものも確認された。

(3) 考察

準静的インデンテーションおよび打撃インデンテーションの結果から、氷の変形および破壊に及ぼす荷重方法および圧子形状の影響について変位速度やひずみ速度の観点から考察する。本研究で行った準静的インデンテーションと打撃インデンテーションは、試験温度に差があるため一概には同じ条件とは言えないが、速度依存性の比較として評価する。また、単軸試験と比較するため、インデンテーションにおける代表ひずみ速度の概念を導入する。

円錐圧子における準静的インデンテーションにおける最大荷重と代表ひずみ速度の関係を調べた。本研究で実施した準静的インデンテーションの代表ひずみ速度は約 10^{-3} ~ 10^0 s^{-1} となった。ひずみ速度 10^{-3} ~ 10^{-1} s^{-1} における氷の最大圧縮強度は、ひずみ速度の増加に伴い強度が小さくなるという負の速度依存性を示すことがわかっている。そこで、圧子下のひずみ速度と応力の関係について考える。応力が負の速度依存性を示す区間が存在する場合、高ひずみ速度領域から低ひずみ速度領域に亀裂が進展する際に応力値が増加する方向に亀裂が進むことになる。この応力値が障壁となり、押込直後に生成した亀裂が、一度停滞したのではないかと推察される。氷が破壊に至るには、亀裂の停滞後さらに荷重を加える必要があるため、ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} および 10^0 s^{-1} で最大荷重が大きくなったのではないかと考えられる。準静的インデンテーションにおけるひずみ速度 10^{-1} s^{-1} および 10^0 s^{-1} の荷重変位曲線では、破壊荷重に至るまでに荷重の低下が見られるものが多かった。荷重の低下は亀裂の生成および進展によるものと考えられる。そこで、荷重変位曲線において初めに荷重が低下した際の荷重(亀裂進展荷重)と代表ひずみ速度

の関係を図7に示す。亀裂進展荷重は、圧子角度によらず、両対数図で線形に低下する傾向がみられた。よって、最初に荷重の低下が認められた際の荷重は、代表ひずみ速度が増加するほど小さくなることがわかった。この結果は、単軸圧縮試験の結果と定性的に一致する。ひずみ速度 10^{-1} s^{-1} および 10^0 s^{-1} では、生成した亀裂に対して試験片が大きいため、試験片の端面まで亀裂が進展（破壊）するに至らず、その後続く押し込みにより最大荷重（破壊荷重）が高くなったと考えられる。

球圧子では、円錐圧子と同様に内部のひずみ速度場の時間変化をFEM等で検討し、その変化から代表ひずみ速度を導出するような研究結果はこれまでに報告されていない。そのため、円錐圧子と同じ式を用いて代表ひずみ速度を評価することは難しい。そこで、変位速度と試験片高さから代表ひずみ速度を仮定する。図8に球圧子による最大荷重と代表ひずみ速度の関係を示す。球圧子の最大荷重は、ひずみ速度 10^{-3} s^{-1} で最大となり、その後ひずみ速度の増加に伴い低下する傾向を示した。ひずみ速度 $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ における最大荷重は、単軸圧縮試験の最大圧縮強度とひずみ速度の関係と定性的に一致した。球圧子では、破壊に至るまでの時間が短く、円錐圧子のような亀裂の停滞はほとんど観察されていないが、球圧子でも円錐圧子と同様に亀裂が停滞している可能性は否定できない。しかし、球圧子は円錐圧子と比較して接触面積が大きいため、本研究で使用した試験片では、単軸圧縮試験と同じように広い変形場が形成されることにより短時間で破壊が生じ、ハイスピードカメラでは亀裂の停滞が観察されなかったと推察される。

(4) まとめ

圧子形状や速度を変化させたインデンテーションにより、氷の変形および破壊特性には内部の変形場が大きく影響することがわかった。特に、圧子形状と速度の効果でスプーンの裏を使った打撃で簡単に氷が破壊できる現象のメカニズムの一端が明らかになった。しかし、本研究では、1辺20 mmの試験片を用いたため、試験片の寸法が変わると、荷重値やエネルギーの値は変化することが予想される。よって、試験片の寸法効果について検討する必要がある。この効果を理解することで、マルチスケール砕氷技術へと展開が可能となる。

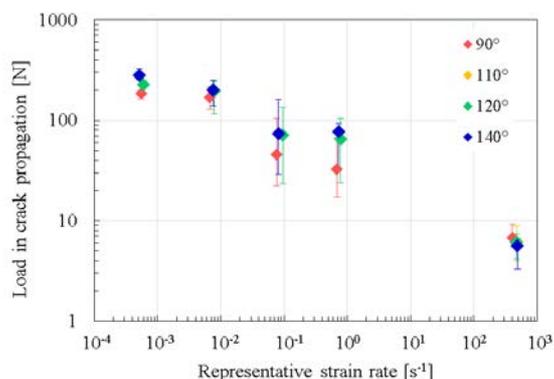


図7 円錐圧子の準静的および打撃インデンテーションにおいて最初に亀裂が進展する荷重と代表ひずみ速度の関係

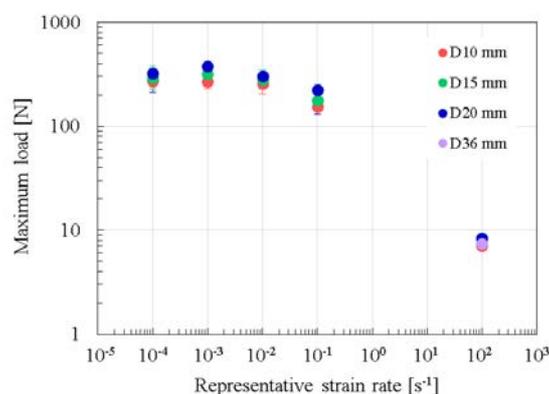


図8 球圧子の準静的および打撃インデンテーションにおいて最初に亀裂が進展する荷重と代表ひずみ速度の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 中尾友紀, 山田浩之, 藤原浩幸, 小笠原永久
2. 発表標題 打撃試験における氷の変形・破壊現象に及ぼす先端圧子形状の影響
3. 学会等名 日本材料学会第68期学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Nakao, Hiroyuki Yamada, Hiroyuki Fujiwara, Nagahisa Ogasawara
2. 発表標題 Measurement of Impact Deformation in Ice Using Percussion Test
3. 学会等名 Proceedings of 10th International Symposium on Impact Engineering 2019 (ISIE 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田浩之, 中尾友紀, 小笠原永久
2. 発表標題 準静的インデンテーションによる氷の変形および破壊評価
3. 学会等名 第57回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中尾友紀, 東園望美, 山田浩之, 小笠原永久
2. 発表標題 円錐圧子を用いた打撃試験における氷の変形・破壊特性評価
3. 学会等名 日本機械学会山梨講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中尾友紀, 山田浩之, 小笠原永久
2. 発表標題 準静的インデンテーションによる氷の変形および破壊現象の計測
3. 学会等名 日本機械学会M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田浩之, 中尾友紀, 小笠原永久
2. 発表標題 高速度カメラを用いた氷の打撃破壊の観察
3. 学会等名 高速度イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東園望美, 中尾友紀, 山田浩之, 小笠原永久
2. 発表標題 円錐圧子打撃による氷の変形・破壊特性評価
3. 学会等名 第51回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中尾友紀, 山田浩之, 小笠原永久
2. 発表標題 氷の打撃インデンテーションに及ぼす変形場の影響
3. 学会等名 日本材料学会第69期学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroyuki Yamada, Ryo Tanaka, Yuki Nakao, Hiroyuki Fujiwara, Nagahisa Ogasawara
2. 発表標題 Observation of Impact Fracture in Ice by Simplified Percussion Test
3. 学会等名 Proceedings of 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tanigaki Kenichi, Hiroyuki Yamada
2. 発表標題 Numerical Study of Elastic Wave Propagation in Flanged Cylindrical Bar
3. 学会等名 Proceedings of 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中尾友紀, 山田浩之, 藤原浩幸, 小笠原永久
2. 発表標題 打撃試験による氷の衝撃変形および破壊現象の計測
3. 学会等名 日本機械学会M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷垣健一, 山田浩之
2. 発表標題 フランジ付きスプリット・ホプキンソン棒法を用いた低強度材料の衝撃圧縮試験に関する数値解析
3. 学会等名 日本機械学会第31回計算力学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田浩之, 中尾友紀, 藤原浩幸, 小笠原永久
2. 発表標題 平板打撃試験による氷の衝撃変形および破壊現象の計測
3. 学会等名 日本実験力学会2018年度年次講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷垣健一, 山田浩之
2. 発表標題 フランジ付きSHPB衝撃試験装置の応力波伝播解析
3. 学会等名 日本機械学会第30回計算力学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小川欽也, 山田浩之
2. 発表標題 空間差分測定を用いたSHPB法による衝撃押込試験
3. 学会等名 日本機械学会M&M2017材料力学カンファレンス
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田中綾, 山田浩之, 藤原浩幸, 小笠原永久
2. 発表標題 氷の打撃試験に関する基礎的検討
3. 学会等名 第49回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田浩之
2. 発表標題 鋭い圧子押込みにおける動的ひずみ速度に関する一考察
3. 学会等名 日本実験力学学会2017年度年次講演会
4. 発表年 2017年

〔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
研究分担者	小笠原 永久 (Ogasawara Nagahisa) (60262408)	防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・システム工学群・教授 (82723)	
研究分担者	小林 秀敏 (Kobayashi Hidetoshi) (10205479)	大阪大学・基礎工学研究科・教授 (14401)	
研究分担者	谷垣 健一 (Tanigaki Kenichi) (40631875)	大阪大学・基礎工学研究科・助教 (14401)	
研究分担者	松沢 孝俊 (Matsuzawa Takatoshi) (00443242)	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 (82627)	