

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03314

研究課題名（和文）氷上を滑るストーンが曲がるメカニズムの解明およびその科学的成果の応用

研究課題名（英文）Clarifying the curling mechanism of a stone moving on ice and its application to curling games

研究代表者

亀田 貴雄（Kameda, Takao）

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：00233974

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：従来の研究では、氷上を進むストーンの曲がり幅にはストーン下部のランニングバンドでの表面粗さが大きな影響を与えている事が判明していた（Kameda et al., 2020）。本研究では新たに、ストーンの曲がり幅にはストーンの総回転数および氷面の状況も影響を与えていることがわかった。また、スウィーピングによるストーンの軌跡変化はペブル上端面での氷温上昇による摩擦力の減少、ペブル上端面での形状変化でその理由を説明できた。ストーンによるペブルの形状変化も明らかにすることができた。ストーンの曲がるメカニズムは、ストーンの旋回運動に関する定式化およびContact area modelを新たに提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の結果、ストーンの曲がりにはストーン下部のランニングバンド（RB）の粗さ（Kameda et al., 2020）だけでなく、氷面の状況（散水の撒く回数、ニッパーの回数）も大きな影響を与えていることが新たにわかった。このため、ストーンが曲がらないカーリングホールではストーン下部のRBの表面粗さを適切な値（平均表面粗さRa 2.5 μm程度）に調整した上で、散水後のニッパーの回数を通常よりも1往復増やすことでストーンが曲がるカーリングホールになることが期待される。この場合、カーリング選手はどこのカーリング場でも同じように練習することができ、カーリングの競技力の向上につながることを期待される。

研究成果の概要（英文）：Previous studies have found that surface roughness in the running band at the bottom of the stone has a significant effect on the curling width of stones moving on ice (Kameda et al., 2020). In this study, we newly found that the total number of stone rotations and ice surface conditions also affect the curling width of stones. The reason for the change in the trajectory of the stones due to sweeping could be explained by the decrease in frictional force due to the increase in ice temperature at the upper surface of the pebbles and the change in the shape of the pebbles at the upper surface. The shape changes of the pebble due to stone passing was also clarified. For the curling mechanism of a stone, we proposed a new formulation on the pivot-slide model with angular momentum changes with time, and also Contact area model.

研究分野：雪氷学

キーワード：カーリング ストーン 曲がるメカニズム スウィーピングの効果 カーリング場の氷面 ペブル

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

カーリングのストーンが曲がるメカニズムについては、Harrington(1924)以来、世界中で20編を超える学術論文が出版されてきているが、定説が存在しない。また、従来の論文では主として、ストーンの前後での摩擦力差により、ストーンが曲がることを提案する論文が多い。

申請者らはカーリング・ストーンの曲がるメカニズムの解明を目指して、4年前から研究を開始した。この結果、ストーンの曲がり幅はストーンが氷面と接触するランニングバンド (RB ; 内径 12 cm, 幅 6 mm 程度の円環部) での表面粗さが最も重要であることを明らかにした (Kameda et al., 2020)。また、ストーンを投げる方向を y 軸とすると、その直交方向へ移動する速度 v_x は一様ではなく、摩擦運動におけるスティック・スリップ運動 (凝着・滑り運動) に似た動きをしていることも発見した。これは旋回運動 (pivot-slide 運動) とも考えられる。しかしながら、氷上を滑るストーンの軌跡の詳細、カーリング場の氷面に形成される小突起 (ペブルという) の詳細な形状とその分布、ストーン通過時のペブル表面での昇温の状況が不明のため、そのようなスティック・スリップ運動の詳細が解明できていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ストーンのスティック・スリップ運動を解明し、カーリングでストーンがなぜ曲がるのか、を明らかにすることである。

現在は、「ストーンがなぜ曲がるのか」という最も基本的なことが不明のため、カーリング選手は経験と勘に頼ってストーンを投けているのが実情である。ストーンが曲がる幅 (以降、「曲がり幅」と記す) はストーンの進行方向の 28.3 m 先で 0.5~1.5 m 程度であるが、曲がり幅は世界各地のカーリング場、個別のストーン、カーリングの競技時間帯によって変化することが知られている。これは野球に例えると、投手の投げるカーブの曲がり幅が球場や個々のボール、ゲームの時間帯によって変わることと同じである。

このような「ストーンの曲がるメカニズム」が解明されると、カーリング競技においてストーンの曲がり幅がほぼ統一されて実施されるようになる。このことはカーリング選手がどこのカーリング場でも同じように練習することができることを意味し、カーリングの競技力の向上につながることを期待される。

3. 研究の方法

本研究で解明する課題とその担当者を以下に示す。

- (1) 氷上を滑るストーンの軌跡に対するストーンの総回転数および氷面の影響の解明 (亀田, 長谷川**)
- (2) カーリングにおけるスウィーピングの効果の解明 (亀田, 齊藤茉由美*)
- (3) カーリングでのスウィープ力の評価 (柳 等)
- (4) 氷上を滑るストーンの振動解析 (白川, 佐藤*)
- (5) カーリング・ストーンが接触する氷上のペブルのマクロ情報測定法の開発 (原田, 大村*)
- (6) 角運動量によるカーリング・ストーンの曲がりのメカニズムの解明 (佐渡**)
- (7) 氷上を滑るストーンによるペブルの形状変化の解明 (柳 敏**, 亀田)
- (8) 氷との接触面積の違いに着目したストーンの曲がりに関する研究 (河野***, 星野***, 亀田)

ここで、*は学生、**は研究協力者。***科研のメンバー外を意味する。

※上記の(1)~(8)の研究は2~3ヶ月に一回、北見工業大学で実施した「カーリングゼミ」で報告してもらい、議論を深めた。

4. 研究成果

- (1) 氷上を滑るストーンの軌跡に対するストーンの総回転数および氷面の影響の解明 (亀田, 長谷川**)

2022年9月14日と15日に札幌市のどうぎんカーリングスタジアムで実施した195本の軌跡データを使って解析した結果、以下の点を解明することができた。この時には表1に示す9種類の氷面に対して実験を実施した。

図1は同じ氷面(D2-1)に対してストーンの総回転数を変化させた時の結果である。ストーンの総回転数が増加するとストーンは曲がりづらくなり、総回転に反比例することがわかった。

図2は9種類の氷面に対するストーンの曲がり幅の結果を示す。同じ氷面で比べると、ストーンはニッパーの回数を増やすと曲がるようになることがわかった。これはニッパーをかけることにより、ストーンと接触する面積が増加し、そのためにストーンを曲げる力がより働くためである。図3は圧力フィルムによるストーンとの接触痕の総面積と曲がり幅との関係を示す。氷面D2とD5は同じ曲線上になったが、氷面D1ではストーンは有意に曲がらなかった。これは氷面D1では散水回数が少ないため、ペブルの分布が不均一になっているため、十分にストーンを曲げる力が働かなかつたためである可能性が考えられる。

表1 どうぎんカーリングスタジアムで準備した氷面 (9種).

D1-1	散水15°C#76 (片道) + ニッパー1往復	D2-1	標準氷面 (散水15°C#76×2 (1往復) + ニッパー1往復)	D5-1	どうぎん標準氷面 (散水15°Cで#76で片道+40°Cで#74で片道+ニッパー1往復)
D1-3	散水1回 (片道) + ニッパー1往復 (D1-1+ニッパー2往復追加)	D2-3	散水1往復+ニッパー3往復 (D2-1+ニッパー2往復追加)	D2-3	どうぎん標準氷面+ニッパー2往復 (ニッパー1往復追加後)
D1-5	散水1回 (片道) + ニッパー5往復 (D1-3+ニッパー2往復追加)	D2-5	散水1往復+ニッパー5往復 (D2-3+ニッパー2往復追加)	D2-5	どうぎん標準氷面+ニッパー3往復 (ニッパー1往復追加後)

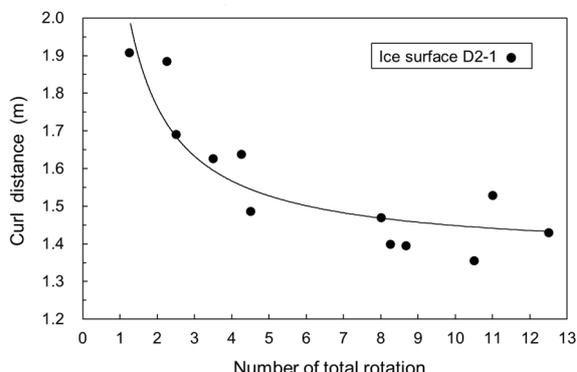


図1 ストーンの総回転数と曲がり幅との関係.

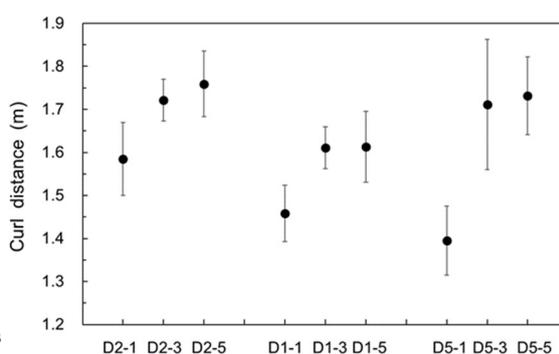


図2 9種類の氷面と曲がり幅との関係.

(2) カーリングにおけるスウィーピングの効果の解明 (亀田, 齊藤茉由美*)

①氷面でのペブルの形状変化

カーリング場の氷面は紫外線硬化性樹脂を用いてレプリカを作成し、光学顕微鏡 (キーエンス社製 VHX-5000) で表面観察し、3次元形状測定システム (フィルメトリクス社製 Profilm3D) でペブルの立体構造を観察した。スウィーピングをかけていない氷面、スウィーピングを1往復かけた氷面、スウィーピングを5往復かけた氷面の3種類の氷面の同一ペブルの観察を行った。

図4はペブルの高さ測定結果であり、スウィーピングによりペブルの高さが減少することがわかった。図5はペブルをVHX-5000とProfilm3Dで観察した結果を示す。図5dより、ペブルの摩耗とスウィーピングによって付けられた条痕がペブル上端面および氷面で確認できた。また、150倍で観察した図5dおよび5hではスウィーピングにより、ペブル上端面の稜が摩耗し、丸くなったことがわかった。

②ストーンの軌跡の変化

図6は、3種類のスウィーピング (曲げ, 直進, 押し) によるストーンの曲がり幅の変化を示す。曲がり幅は男女ともに曲げスウィープが最も曲がる結果となり、男性選手では平均 $0.059 \pm 0.07\text{m}$, 女性選手では平均 $0.052 \pm 0.11\text{m}$ 余分に曲がるようになった。押しスウィープ、直進スウィープでは曲がり幅が小さくなる傾向があった。押しスウィープでは平均 $-0.063 \pm 0.04\text{m}$ (女性), 平均 $-0.025 \pm 0.05\text{m}$ (男性) と曲がらない結果になった。従って、スウィーピングの仕方によって約 $\pm 0.05\text{m}$ の曲がり幅に変化を与えることができることがわかった。

図7は同じ3種類のスウィーピングによるストーンの到達距離の変化を示す。到達距離は直進スウィープ、曲げスウィープの時に伸びる傾向にあった。最も伸びたスウィーピングは曲げ (女性) で平均すると $1.415 \pm 1.37\text{m}$ 伸びることがわかった。ただし、標準偏差 (±) が示すようにスウィーピングによる到達距離の伸びはばらつきが大きかった。

これらのスウィーピングによるストーンの軌跡変化の理由は、ペブル上端面での氷温上昇による摩擦力の減少、ペブル上端面での接触面積の減少で説明できることがわかった。

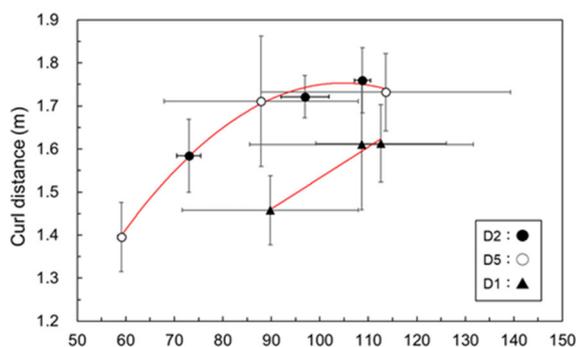


図3 氷面でのストーンとの接触痕の総面積とストーンの曲がり幅との関係.

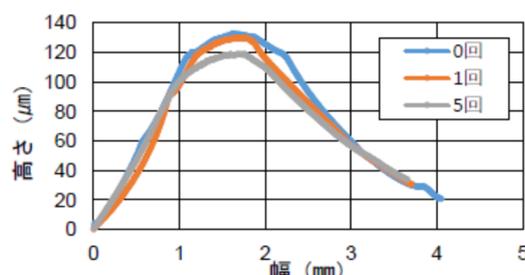


図4 スウィーピングによるペブルの高さ変化.

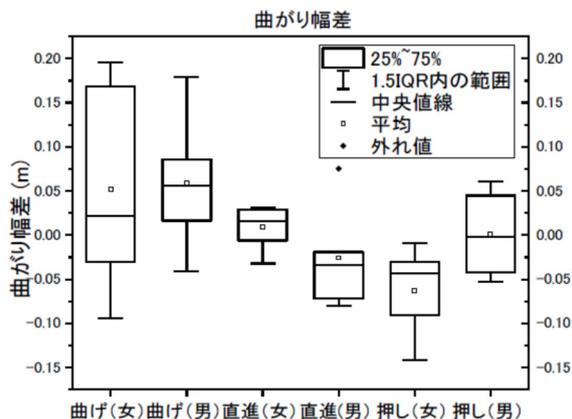


図6 スウィーピングによる曲がり幅の変化

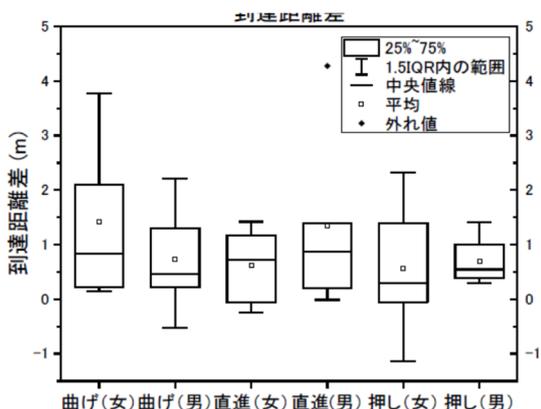


図7 スウィーピングによるストーンの到達距離の変化

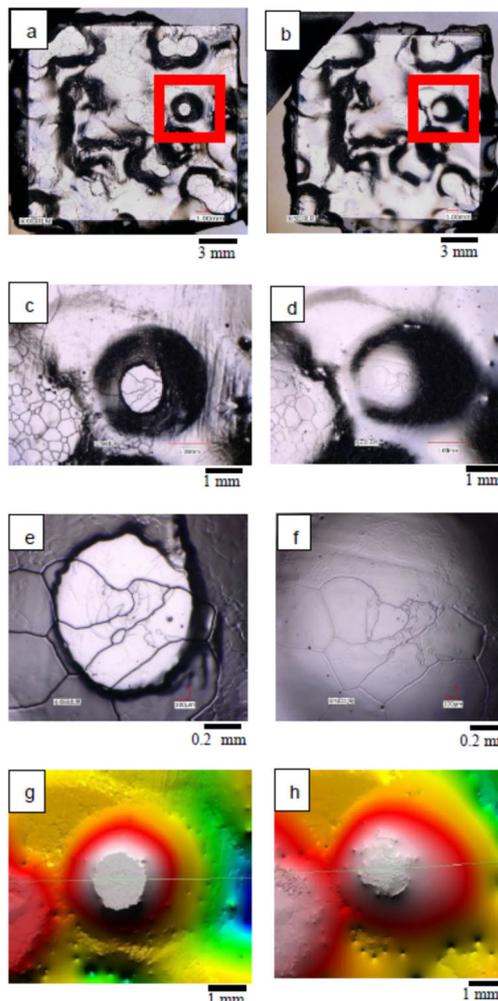


図5 a~fは VHX5000での観察結果

- a: スウィーピング 0回 (20倍)
- b: スウィーピング 5往復 (20倍)
- c: スウィーピング 0回 (50倍)
- d: スウィーピング 5往復 (50倍)
- e: スウィーピング 0回 (150倍)
- f: スウィーピング 5往復 (150倍)
- g, hは Profilm 3Dによるペブルの観察結果
- g: スウィーピング 0回
- h: スウィーピング 5往復

(3)カーリングでのスウィープ力の評価 (柳 等)

カナダ製のスウィーピング力計測器の SmartBroom によるスウィープ力の測定データの妥当性を検証する実験を行った。SmartBroom で測定したスウィープ力のデータとフォースプレートで測定したデータを比較した。学生カーリング選手5名に、SmartBroom を使ってフォースプレート上の10秒間全カスウィープを3回行わせた。フォースプレート測定した垂直方向の力の平均値 (F_v) と SmartBroom で測定したスウィープ力との関係を調べたところ、 F_v は Push force と有意な相関関係があることがわかった。SmartBroom の Push force はスウィープ・パフォーマンスを評価する指標の一つとしても問題ないといえるかもしれない。一方、 F_v は Pull force とは有意な関係がなかった。効果的なスウィープは Push force と Pull force の差が小さいことといわれる。Pull force にカーリング選手の競技レベルや経験年数がどう影響するか今後は調べる必要があることがわかった。

(4)氷上を滑るストーンの振動解析 (白川, 佐藤*)

2022年9月にどうぎんカーリングホールおよび2022年11月にアルゴグラフィック北見カーリングホールでの実験結果の解析を進めた。結果、以下の知見が得られた。

- ・アイスメーカーによる氷面状態の違いは、カーリングストーンの振動や曲がりに影響を与えていることがわかった。これは北見のリンクは札幌に比べ軸方向の加速度標準偏差が大きい。札幌は軸周りの角速度が大きい。北見のリンクは停止前に角速度の急変が見られる。回転速度が早くなると、加速度標準偏差の値がわずかに小さくなることもわかった。
- ・100-200 Hzの周波数帯域では、回転速度の早い場合に早い段階での振動減衰がみられることがわかった。これは、重心に比べ、RB上の方が加速度標準偏差の値が大きいためである。この知見はスペクトルや時間周波数解析でも確認できた。

(5)カーリング・ストーンが接触する氷上のペブルのマクロ情報測定法の開発 (原田, 大村*)

カーリング場の氷表面の最上端面を形成するペブルの接触面を画像として転写して記録し、

その画像をコンピュータで解析することとして、次の2つの方法を試した。

1) 圧力測定フィルムを用いた方法（基本測定法）

2) 近接イメージセンサ型スキャナーを用いる方法（短時間・広範囲・容易法）

方法1)については圧力フィルムは微圧用4LW、積載荷重物は加圧面形状が直径100mmの円で重量約12kgのステンレス円柱、加圧時間2分の持続圧加圧で記録することで、記録範囲が明確でノイズが少ないその後の画像処理にも適切な良好な転写画像が得られることがわかった。そのため、これ以降の実験では、この方法でストーンと接触するペブルの個数、面積、直径の頻度分布、空間的な偏りを測定した。

方法2)については、同じ近接イメージセンサを搭載のスキャナーでも、製品によって搭載するセンサの性能や付随する照明の機能に優劣があることも分かった。

方法1),2)のどちらの方法にも共通することとして、その記録画像だけでは氷面上のどのペブルを転写したものかを同定したり、記録模様のひとつひとつがひとつのペブルに対応しているのかが不明であり、「接触するペブルの個数」や「単位面積あたりの接触ペブルの数」という量を算出する際の問題となった。それに対しては照明方法を工夫することでアイスシート表面のペブルの凹凸が陰影をもった画像として鉛直上方からデジタルカメラで撮影し、その画像と方法1)で得られた画像とを重ね合わせて調べることで、これまでの問題が解決できた。

(6) 角運動量によるカーリング・ストーンの曲がりのメカニズムの解明（佐渡**）

図8はストーンランニングバンドが角度 θ に位置するペブル*i*と衝突し、*i*点を中心に旋回運動を起こし、ストーン質量中心がGからG'に移動している状態を表わしている。衝突前後の*i*点周りの角運動量の時間変化（旋回角運動量-（質量中心角運動量+自転角運動量））は、*i*点に関する摩擦力のモーメントの総和に等しいという1階差分方程式が得られる。図8に示す質量中心GとG'を結ぶ曲線は直線近似でき、曲がり δx_c は直線GG'の*x*成分となるので次式が得られる。

$$\delta x_c = -2rs \sin\left(\theta - \frac{\delta\psi}{2}\right) \sin\frac{\delta\psi}{2}$$

$\delta\psi$: ストーンの旋回角度。

この式は、今まで誰もが提案しなかったストーンがペブルと1回衝突時の曲がり算定式である。ストーンの並進速度 v_i が遅くなるとストーンがペブルを横切る時間が増加し、旋回角度 $\delta\psi$ は大きくなり、良く曲がること示されている。

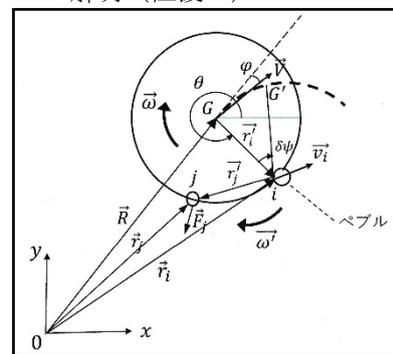


図8 ストーンのRBがペブルと衝突する直前・直後の状態。

(7) レプリカを用いたペブルの形状変化（柳敏**, 亀田）

カーリング場の氷面をストーンが通過することでペブルの形状がどのように変化するかを氷面のリプリカ試料とProfilm3Dを使って詳細に明らかにすることができた。得られた成果は学術論文として出版した（Yanagi et al., 2024）。

(8) 氷との接触面積の違いに着目したストーンの曲がりに関する研究（河野***, 星野***, 亀田）

ストーンがペブルを通過する際、ペブルはストーン前面と後面で接触する可能性がある。ペブルの上端面の高さは、ストーンが通過するごとに平均で1.1 μm 低下するとの報告があるため（柳ら, 2021）、ストーン後面では新たにランニングバンド（RB）と接触するとペブルが現れたり、ペブルが削られることにより、ストーンと接触するペブルの上端面の面積が広がる可能性がある。これらのことにより、ストーンの前側よりも後側でRBとペブルの接触する面積が大きくなり、それがストーンの前後にはたらく力の差を生じさせる可能性を検討した。成果はContact area modelとしてまとめ、学術論文として出版した（河野ら, 2024）。

引用文献

- Harrington L.E. (1924): An experimental study of the motion of curling stones. *Proc. Trans. R. Soc. Canada*, **18**(3), 247-259.
- Kameda, T., D. Shikano, Y. Harada, S. Yanagi and K. Sado (2020): The importance of the surface roughness and running band area on the bottom of a stone for the curling phenomenon. *Scientific Reports*, **10**, 20637. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76660-8>
- 河野義樹, 星野洋平, 亀田貴雄 (2024): 氷との接触面積に着目したカーリングストーンの曲線軌跡形成メカニズムに関する検討. 日本機械学会論文集, 90(930), DOI: 10.1299/transjsme.23-00309
- Yanagi, S., T. Kameda, Y. Harada and K. Sado (2024): Characteristics of pebble shape and the amount of pebble abrasion measured with a replica reproduced on a curling rink. *Scientific Reports*, **14**, 11463. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62247-0>
- 柳敏, 亀田貴雄, 斉藤麻由美, 原田康浩, 佐渡公明 (2019): カーリング・リンクにおけるストーン通過時のペブル上端面の摩耗, 雪氷研究大会 (2021・千葉一オンライン), 89.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Satoshi Yanagi, Takao Kameda, Yasuhiro Harada & Kimiteru Sado	4. 巻 14
2. 論文標題 Characteristics of pebble shape and the amount of pebble abrasion measured with a replica reproduced on a curling rink	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-024-62247-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 河野 義樹, 星野 洋平, 亀田 貴雄	4. 巻 90
2. 論文標題 氷との接触面積に着目したカーリングストーンの 曲線軌跡形成メカニズムに関する検討	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.23-00309	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 亀田貴雄, 長谷川稔, 原田康浩, 山崎英威
2. 発表標題 ストーンの軌跡に対する氷面とストーンの総回転数の影響
3. 学会等名 雪氷研究大会（2023・郡山）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 亀田貴雄, 長谷川稔, 原田康浩, 山崎英威
2. 発表標題 ストーンの軌跡に対する氷面とストーンの総回転数の影響
3. 学会等名 第4回冬季スポーツ科学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大村玄, 原田康浩, 亀田貴雄
2. 発表標題 カーリングリンク氷面に形成されるペブルの広域測定法 - イメージスキャナを用いた測定と解析 -
3. 学会等名 第4回冬季スポーツ科学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大村玄, 原田康浩, 亀田貴雄
2. 発表標題 カーリングリンク氷面に形成されるペブルのイメージスキャナを用いた広域測定法の検討
3. 学会等名 第39回寒地技術シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤航, 白川龍生, 亀田貴雄
2. 発表標題 デジタルフィルタを用いた回転速度の異なるカーリングストーンの加速度解析
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2023・郡山)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 亀田貴雄, 長谷川稔, 原田康浩, 齊藤茉由美, 佐渡公明, 奈良浩毅
2. 発表標題 氷上を滑るカーリングストーンの軌跡の特徴
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2022・札幌)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 斉藤茉由美, 亀田貴雄, 柳敏
2. 発表標題 カーリングにおけるスウィーピングの効果の解明 2.
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2022・札幌)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤航, 白川龍生, 亀田貴雄
2. 発表標題 小型無線センサによるカーリングストーンの加速度・角速度の測定
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2022・札幌)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柳敏, 亀田貴雄, 斉藤茉由美, 原田康浩, 星野洋平, 佐渡公明
2. 発表標題 カーリング・ストーンの前側ランニングバンドによるペブルの摩耗・変形量
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2022・札幌)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐渡公明
2. 発表標題 角運動量保存則を用いたカーリング・ストーンの曲がり (2)
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2022・札幌)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 亀田貴雄、斉藤茉由美、山浦高伸、原田康浩、柳 敏、奈良浩毅、佐渡公明
2. 発表標題 氷上を進むカーリング・ストーンの軌跡に対する氷面の影響
3. 学会等名 雪氷研究大会（2021・千葉-オンライン）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 斉藤茉由美、亀田貴雄、山浦高伸、柳 敏
2. 発表標題 カーリングにおけるスウィーピングの効果の解明
3. 学会等名 雪氷研究大会（2021・千葉-オンライン）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柳 敏、亀田貴雄、斉藤茉由美、原田 康浩、佐渡 公明
2. 発表標題 カーリング・リンクにおけるストーン通過時のペブル上端面の摩耗
3. 学会等名 雪氷研究大会（2021・千葉-オンライン）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐渡公明
2. 発表標題 角運動量保存則を用いたカーリング・ストーンの曲がり
3. 学会等名 雪氷研究大会（2021・千葉-オンライン）
4. 発表年 2021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	柳 等 (Yanagi Hitoshi) (60344553)	北見工業大学・工学部・教授 (10106)	
研究分担者	原田 康浩 (Harada Yasuhiro) (80198928)	北見工業大学・工学部・准教授 (10106)	
研究分担者	白川 龍生 (Shirakawa Tatsuo) (50344552)	北見工業大学・工学部・准教授 (10106)	

	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
研究協力者	佐渡 公明 (Sado Kimiteru)		
研究協力者	柳 敏 (Yanagi Satoshi)	北海道釧路明輝高等学校・教諭	
研究協力者	長谷川 稔 (Hasegawa Minoru)	北見工業大学・技術部・技術職員 (10106)	

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
---------	---------