

## カーリングストーンの運動解析

駒込 敏弘<sup>\*1</sup>, 服部 一裕<sup>\*1</sup>, 入戸野 太郎<sup>\*1</sup>, 徳本 大<sup>\*1</sup>, 前野 紀一<sup>\*2</sup>

### Motion Analysis for Curling Stone

Toshihiro KOMAGOME<sup>\*1</sup>, Kazuhiro HATTORI<sup>\*1</sup>, Taro NITTONO<sup>\*1</sup>, Masaru TOKUMOTO<sup>\*1</sup>,  
Norikazu MAENO<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> Mayekawa Mfg. Co., Ltd. 2000, Tatsuzawa, Moriya, Ibaraki

<sup>\*2</sup> Professor Emeritus Hokkaido University, Hanakawa Minami 7-2-133, Ishikari, Hokkaido 061-3207

To evaluate the motion of a curling stone on the ice, a velocity change and a curl of the stone have been experimentally analyzed. In 2012, we observed the motion of a curling stone and measured the positions and rotating angles during the motion on the ice by image processing of sequential images of the curling stone obtained by CCD cameras installed over the curling sheet. In this study, we evaluated a velocity change and a curl with acceleration vector, which is decomposed into a tangential component of the direction of velocity related to a velocity change, and a perpendicular component related to a change of direction of the motion, using the data of experiment in 2012. Characteristics of the motion of a curling stone related to the velocity and angular velocity are investigated with parameters such as the tangential and perpendicular acceleration of the stone.

**Key Words** : Curling, Curl ratio, Friction, Ice, Image Processing

## 1. 結 言

カーリングは、15世紀にスコットランドで生まれ、日本においては1998年長野オリンピックで正式種目に採用されて以降、広く認知されてきている。カーリングは、氷上に描かれた的（ハウス）に、ストーンを投げ入れて点数を競い合うスポーツであり、妨害目的での手前へストーンを配置するショット（ガード）や、相手のストーンを弾き出すショット（テイクアウト）等多くの戦術を駆使することから“氷上のチェス”とも呼ばれる。

カーリングでは、氷上でストーンに回転を与えながら滑らせる。回転を伴って運動するストーンは、減速しながら、軌道に曲がり（カール）が生じる。この時発生するカール距離がカーリングの重要な構成要素の一つである。しかしながら、ストーンの速度や角速度とカールとの関係について報告を行っている論文は、データ計測の難しさもあり、世界的にほとんど例が無い。

そこで、我々は2012年に、カーリングストーンの氷上での運動を評価するために、カーリング場（MLP 軽井沢氷研究所カーリング施設）で実験を行った。昨年行った実験の概要および予備的解析結果については既に前報（入戸野ら<sup>(1)(2)</sup>）で報告した。前報<sup>(1)(2)</sup>ではカール比（並進距離とカール距離との比）、摩擦係数、等について平均的かつ概略的な解析を行ったが、今回はより詳細な解析を行った。特に、細かな時間毎に得られているデータを用いて、ストーンの各時刻における接線加速度、法線加速度等および距離を一定としたカール比を求めた。

## 2. カーリングストーンの運動解析

### 2・1 氷上を運動するストーンの位置座標および回転角の測定

我々は、カーリングストーンの氷上での速度と角速度が、ストーンの運動（摩擦、カール）に与える影響を実

<sup>\*1</sup> 非会員, 株式会社前川製作所 (〒302-0118 茨城県守谷市立沢 2000)

<sup>\*2</sup> 非会員, 北海道大学名誉教授 (〒061-3207 北海道石狩市花川南 7-2-133)

E-mail: toshihiro-komagome@mayekawa.co.jp

験的に検証するために、実際のカーリング場におけるカーリングストーンの運動を観測する試験を、2012年に実施した。ストーンの減速と曲がりに強く影響を与えていると考えられる、速度と角速度の2つのパラメータを同時に測定するために、シート上方に設置した2台のCCDカメラを用いて運動するストーンを連続撮像した。撮像データを画像解析することにより、ストーン重心の位置座標と回転角を各時間で算出した。測定の詳細は、入戸野ら<sup>(1)(2)</sup>が報告している。

## 2・2 ストーンの減速と曲がりの評価方法

2・1節で得たストーンの重心座標と回転角から各時刻の速度・角速度および加速度を算出する。ストーンの重心座標の位置ベクトル $\mathbf{r}$ を、時刻 $t$ の関数として式(1)で表現する。

$$\mathbf{r}(t) = (x(t), y(t)) \quad (1)$$

時刻 $t$ の1次微分および2次微分から、それぞれ速度(式(2))及び加速度(式(3))を算出する。

$$\mathbf{v}(t) = \frac{d\mathbf{r}(t)}{dt} = \left( \frac{dx(t)}{dt}, \frac{dy(t)}{dt} \right) = (v_x(t), v_y(t)) \quad (2)$$

$$\mathbf{a}(t) = \frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} = \left( \frac{d^2x(t)}{dt^2}, \frac{d^2y(t)}{dt^2} \right) \quad (3)$$

速度の大きさ $V$ 及び速度ベクトルが $x$ 軸となす角度 $\theta$ を以下で定義する。

$$v(t) = \sqrt{v_x(t)^2 + v_y(t)^2}, \quad \theta(t) = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}(v_x(t)/v_y(t)) \quad (4)$$

時刻 $t$ の $\mathbf{r}$ の単位接線ベクトル $\mathbf{s}(t)$ と単位法線ベクトル $\mathbf{n}(t)$ を、 $\mathbf{s}(t) = \mathbf{v}(t)/|\mathbf{v}(t)|$ および、 $\mathbf{n}(t) = \mathbf{s}'(t)/|\mathbf{s}'(t)|$ (ただし、 $\mathbf{s}'(t) = d\mathbf{s}(t)/dt$ である)で定義する。単位接線ベクトルは $\mathbf{r}$ の軌跡の接線方向のベクトル、単位法線ベクトルは接線に垂直なベクトルである。

時刻 $t$ および $t+\Delta t$ における、 $\mathbf{r}$ の軌跡(破線)、速度ベクトルと単位接線ベクトル・単位法線ベクトルとの関係を図1に示す( $\Delta t$ は微小時間)。速度ベクトルと接線ベクトルは平行である。

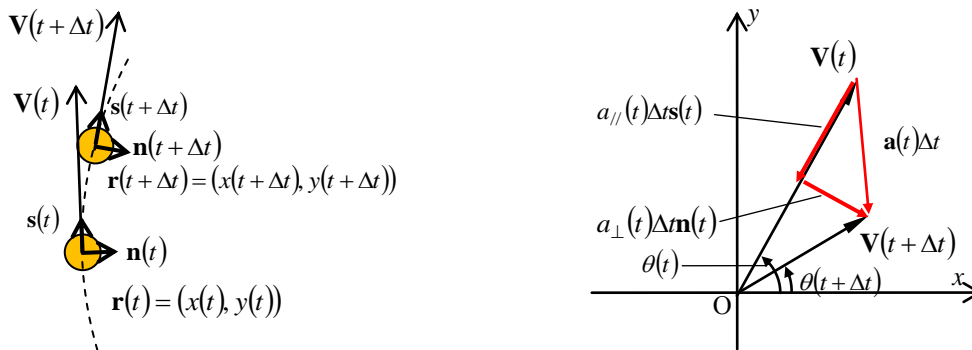


Figure1 Motion of a curling stone (left), angle  $\theta$ , Velocity vector  $\mathbf{V}$ , acceleration vector  $\mathbf{a}$  and its components (right)

時刻 $t$ および $t+\Delta t$ の速度と加速度の間には、式(5)が成立する。

$$\mathbf{V}(t+\Delta t) = \mathbf{V}(t) + \mathbf{a}(t)\Delta t \quad (5)$$

加速度ベクトルが分かれば、ストーンの重心の運動を記述できる。

加速度ベクトル $\mathbf{a}(t)$ は、接線成分(接線加速度)と法線成分(法線加速度)に分解でき、式(6)となる。それぞれの加速度は、図1より幾何学的に求められ、式(7)と式(8)となる。

$$\mathbf{a}(t) = a_{//}(t)\mathbf{s}(t) + a_{\perp}(t)\mathbf{n}(t) \quad (6)$$

$$a_{//}(t) = \frac{1}{\Delta t}(V(t + \Delta t)\cos(\theta(t) - \theta(t + \Delta t)) - V(t)) \quad (7)$$

$$a_{\perp}(t) = \frac{1}{\Delta t}(V(t + \Delta t)\sin(\theta(t) - \theta(t + \Delta t))) \quad (8)$$

加速度ベクトルの接線成分  $a_{//}$  は接線加速度である。速度の進行方向成分の時間変化を示す。一方、加速度ベクトルの法線成分  $a_{\perp}$  は法線加速度である。運動する物体の曲がりの強さに比例する。加速度ベクトルを接線成分と法線成分に分離することで、物体の運動を速さの変化量と曲がりの変化量に分けて考えることができる（例1：法線加速度が常に0の場合、物体は直線運動となる。例2：接線加速度が0で法線加速度が一定の場合、物体は等速円運動となる。）。本定義では、ストーンの速さが増加するときは接線加速度が正となり、速さが減少するときは負となる。また、ストーンの軌跡が右曲がりの場合は法線加速度が正、左曲がりであれば負となる。

ストーンの角速度  $\omega$  および角加速度  $\alpha$  は、測定した回転角  $\phi$  により以下の式で求める。回転角は、時計回り方向を正とする。

$$\omega(t) = d\phi(t)/dt \quad (9)$$

$$\alpha(t) = d\omega(t)/dt \quad (10)$$

### 2・3 データの処理方法

2・1 で測定した重心座標と回転角から、各時刻  $t_n$ （そのカメラで  $n$  個目のデータを取得した時刻）の速度・角速度および加速度を次の式で算出した。ただし、データ個数を  $N$  とすると、速度は  $2 \leq n \leq N-1$  の範囲で、加速度は  $3 \leq n \leq N-2$  の範囲で定義される。また、 $t_1 = 0, \mathbf{r}(t_1) = (0,0), \phi(t_1) = 0$  となるよう、原点を調整した。

$$\mathbf{V}(t_n) = \frac{\mathbf{r}(t_{n+1}) - \mathbf{r}(t_{n-1})}{t_{n+1} - t_{n-1}} \quad (11)$$

$$\mathbf{a}(t_n) = \frac{\mathbf{V}(t_{n+1}) - \mathbf{V}(t_{n-1})}{t_{n+1} - t_{n-1}} \quad (12)$$

$$\omega(t_n) = \frac{\phi(t_{n+1}) - \phi(t_{n-1})}{t_{n+1} - t_{n-1}} \quad (13)$$

$$\alpha(t_n) = \frac{\omega(t_{n+1}) - \omega(t_{n-1})}{t_{n+1} - t_{n-1}} \quad (14)$$

これらの式と式 (4), (7), (8) から、更に式を変形する。

$$\mathbf{V}(t_n) = (V_x(t_n), V_y(t_n)) = \left( \frac{x(t_{n+1}) - x(t_{n-1})}{t_{n+1} - t_{n-1}}, \frac{y(t_{n+1}) - y(t_{n-1})}{t_{n+1} - t_{n-1}} \right) \quad (15)$$

$$a_{//}(t_n) = \frac{1}{t_{n+1} - t_{n-1}} (V(t_{n+1})\cos(\theta(t_{n-1}) - \theta(t_{n+1})) - V(t_{n-1})) \quad (16)$$

$$a_{\perp}(t_n) = \frac{V(t_{n+1})}{t_{n+1} - t_{n-1}} \sin(\theta(t_{n-1}) - \theta(t_{n+1})) \quad (17)$$

前報<sup>(1)(2)</sup>では、2台のカメラで取得したデータを連結してデータ処理したが、タイムスタンプ取得方法に起因する時刻測定誤差およびカメラ間のデータ連結に起因する座標算出誤差を低減するため、各カメラのデータは独立したものとして処理を行う。

### 2・4 カール比の算出

前野ら<sup>(3)</sup>が導入したカール比を本データで計算した。ある基準位置からカール比計算点へストーンが移動した際の、カール比  $C$  の定義は以下の式である。

$$C = \Delta X / \Delta Y \quad (18)$$

ここで、 $\Delta X$  は、基準位置の軌跡の接線を  $y$  軸に取ったときの、カール比計算点における  $x$  座標（カール距離）、 $\Delta Y$  はカール比計算点の  $y$  座標である。カール比は以下の式で表され、4 つの変数により記述される。

$$C = C(\Delta t, V, F_x, F_y) = \left( \frac{F_x \Delta t^2}{2m} \right) / \left( V \Delta t + \frac{F_y \Delta t^2}{2m} \right) \quad (19)$$

ここで、 $F_x$  はストーンに加わる外力の  $x$  軸成分、 $F_y$  は  $y$  軸成分、 $m$  はストーン質量である。入野らの報告<sup>(1)</sup>では  $C \ll 1$  が成立しており、その場合は  $C$  を以下のように変形できる。

$$C = \left( \frac{a_{\perp} \Delta t^2}{2} \right) / \left( V \Delta t + \frac{a_{\parallel} \Delta t^2}{2} \right) = \frac{a_{\perp} V^2}{2 a_{\parallel}^2 L} \left( 1 \pm \sqrt{1 + \frac{2 a_{\parallel} L}{V^2}} \right)^2 \quad (20)$$

ただし、 $L = V \Delta t + a_{\parallel} \Delta t^2 / 2$  として時間項を消去した。式 (20) は、 $a_{\perp}, a_{\parallel}, V, L$  の 4 つの変数を持つ関数である。

前報<sup>(1)(2)</sup>では、カール比を算出する際に  $L$  を一定としておらず、比較が不正確であった。今回  $L = 0.5 \text{ m}$  で一定として、カール比を求めた。

### 3. 解析結果

本章では、データ解析を行った結果について記載する。3・1 節では、取得したデータから加速度・角加速度を求める処理の実例を示す。130 投のデータにおいて、速度  $V$  と角速度  $\omega$  の処理範囲をそれぞれ  $0.2 \text{ m/s} \sim 3.0 \text{ m/s}$ 、 $-0.5 \text{ rad/s} \sim 3.0 \text{ rad/s}$  と定めて、ストーンの速度・角速度と接線加速度 (3・2 節)、法線加速度 (3・3 節)、および角加速度 (3・4 節) との関係性を求めた。また、移動距離一定 ( $L = 0.5 \text{ m}$ ) としたカール比を算出した (3・5 節)。

#### 3・1 データ処理実例

時計方向に回転しながら氷上を運動しているストーンの位置座標  $x, y$  および回転角  $\phi$  を算出した処理の一例を図 2 (a) に示す (データ番号 #2, カメラ 2 での取得分)。 $y$  座標および回転角  $\phi$  が時間と共に増加している。ストーンの回転方向は時計回りであり、回転角が増加している。

このデータから、式 (4), (13), (15) で求めた、ストーンの速度絶対値  $V$ 、速度ベクトルの角度  $\theta$ 、角速度  $\omega$  を図 2 (b) に示す。ストーンが  $0.8 \text{ m/s}$  から  $0.2 \text{ m/s}$  まで減速する一方、角速度は  $0.8 \text{ rad/s}$  程度を維持しており、速度に比べて減少割合が小さい。速度  $V$  が減少、速度ベクトルの角度  $\theta$  が変化しており、運動の方向が変化 (カール) しながら減速していることがわかる。

式 (14), (16), (17) で計算した接線加速度  $a_{\parallel}$ 、法線加速度  $a_{\perp}$  および角加速度  $\alpha$  を図 2 (c) に示す。接線加速度絶対値は、法線加速度絶対値より大きく、ストーンを曲げる力より減速させる力が多い。負の接線加速度は摩擦による減速、正の法線加速度は右方向のカールを、負の法線加速度は左方向のカールを意味する。法線加速度が正なので、軌道は右曲がりである。図 2 (a) と併せ、時計回りに回転しながら運動するストーンが、右曲がりの軌道を描く現象を表現できている。

全体的には一方向に曲がるが、細かくみると蛇行しながら運動するデータも見られたので紹介する。蛇行した軌跡のデータの例を図 3 に示す。ストーンが蛇行している軌跡が見られた原因として、カメラを取り付けた架台の振動や氷とバンドの間で不純物を噛んだ可能性も考えられるが、摩擦力が多数のペブルによる摩擦力の総和 (合力) であることを考えれば、この結果は、ストーン重心に働く合力が、時間および場所により変動していることを示していると解釈するのが自然である。

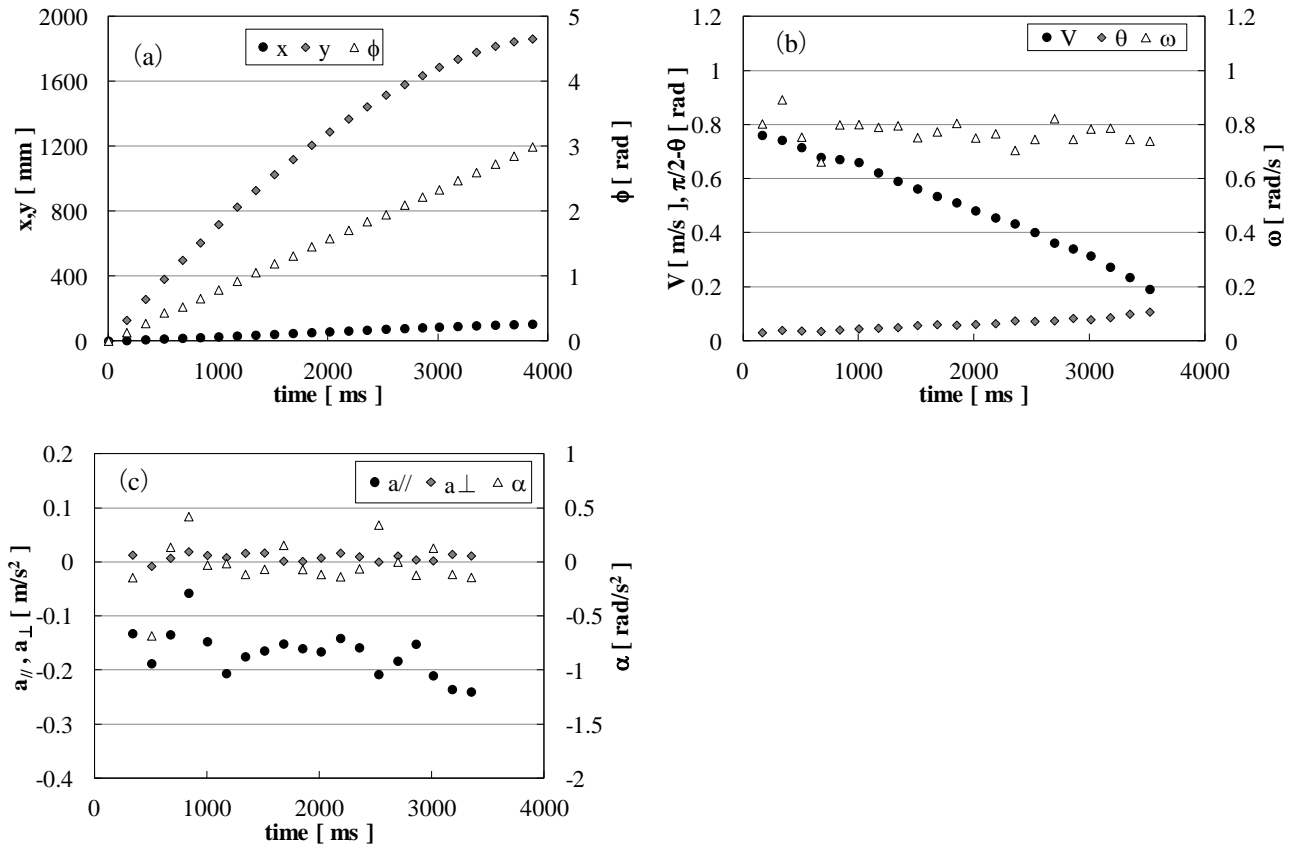


Figure 2 (a) Change of positions and rotating angles of a curling stone with time, (b) Change of velocity and angular velocity of a stone with time, (c) Change of acceleration and angular acceleration of a stone with time

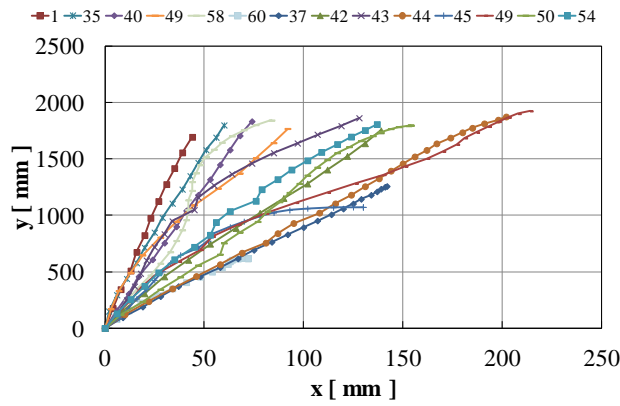


Figure 3 Meandering trajectories of a curling stone

### 3・2 接線加速度の算出結果

接線加速度  $a_{//}$  の速度依存性を図 4 (a) に示す。データのバラツキが大きいので、データの傾向を把握しやすくするため、角速度範囲を 1 rad/s 毎に分けた後に、0.2 m/s 毎にデータを平均化した (図 4 (c))。例えば 0.2 m/s のデータは、 $0.2 \pm 0.1$  m/s の範囲のデータを平均している。エラーバーは、データの標準偏差である (以後のデータのエラーバーもデータ標準偏差を示す)。ただし、各範囲でデータ数が 8 個に満たない平均データは、今回は除外した。図 4 (c) では、接線加速度はどの角速度範囲でも、速度が小さいほど接線加速度絶対値が大きくなり、ストーンが遅くなるほど減速が大きくなる傾向を示している。

接線加速度の角速度依存性を図 4 (b) に示す。傾向を見やすくするため、速度範囲を 4 つに分けた後に、0.2 rad/s 毎にデータを平均化した (図 4 (d))。接線加速度のデータ平均値は、速度範囲毎に絶対値が異なるが、角速度に対して値はそれほど変化しない。

以上より、接線加速度に対して、角速度が与える影響より速度が与える影響が大きいといえる。

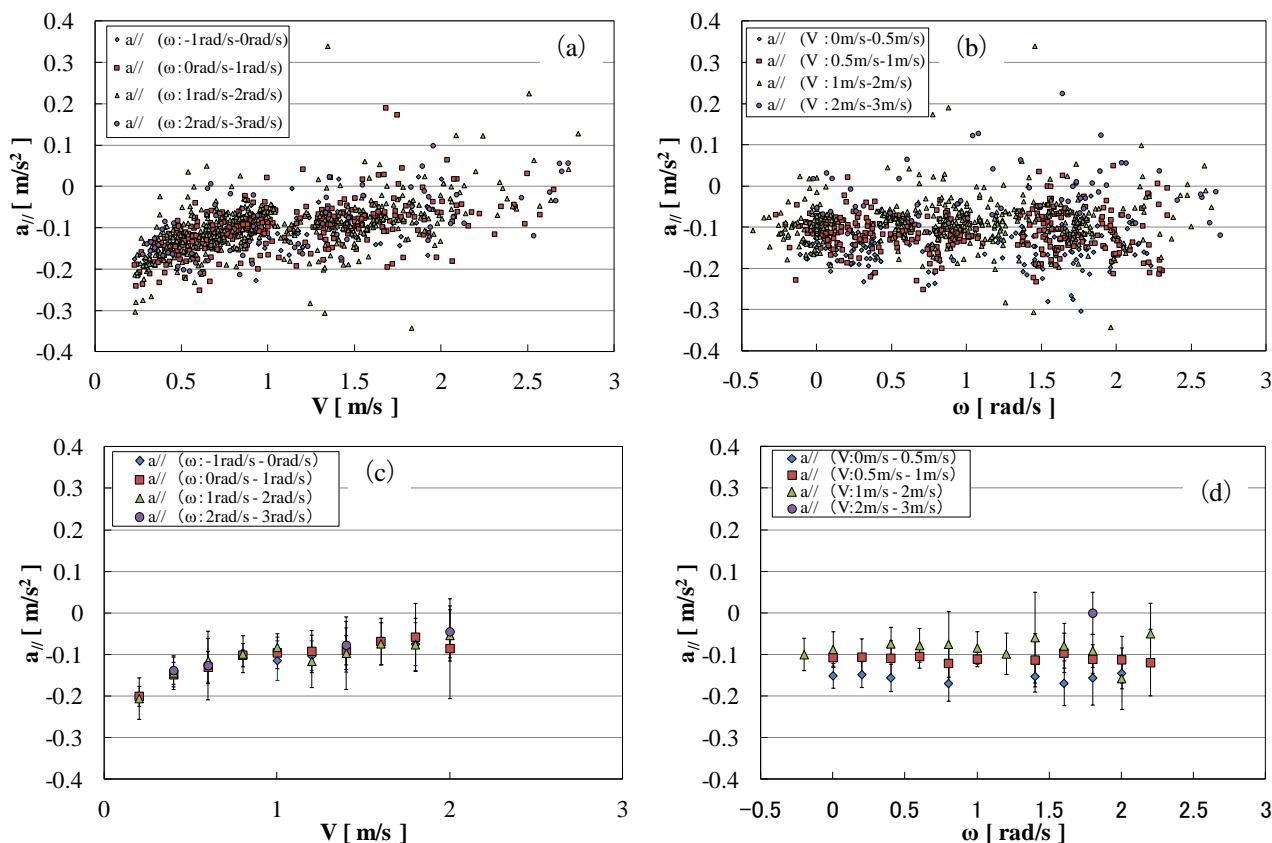


Figure 4 (a) Tangential acceleration against velocity, (b) Tangential acceleration against angular velocity, (c) Average tangential acceleration against velocity, (d) Average tangential acceleration against angular velocity

### 3・3 法線加速度の算出結果

法線加速度の速度依存性を図 5 (a) に示す. データのバラツキが大きいので, 傾向を把握しやすくするため, 3・2 と同様に角速度範囲を 4 つに分け, 速度 0.2 m/s 毎にデータを平均化した (図 5 (c)). 図 5 (c) では, 角速度と法線加速度の符号が等しくなる傾向がある. すなわち, ストーンが時計回りに回転していれば右に曲がり, 反時計回りであれば左に曲がる傾向がある.

法線加速度の角速度依存性を図 5 (b) に示す. 速度範囲を 4 つに分け, 角速度 0.2 rad/s 毎にデータを平均化したグラフを図 5 (d) に示す. 角速度の増加とともに, 法線加速度のバラツキは大きくなり, 標準偏差値が増加している. これは, 前述したストーン軌跡の細かな蛇行に対応しており, 各ペブルからの摩擦力の総和が時間および場所により変動していることに対応していると考えられる.

以上より, 法線加速度に対して, 速度が与える影響より角速度が与える影響が大きい傾向があるといえる.

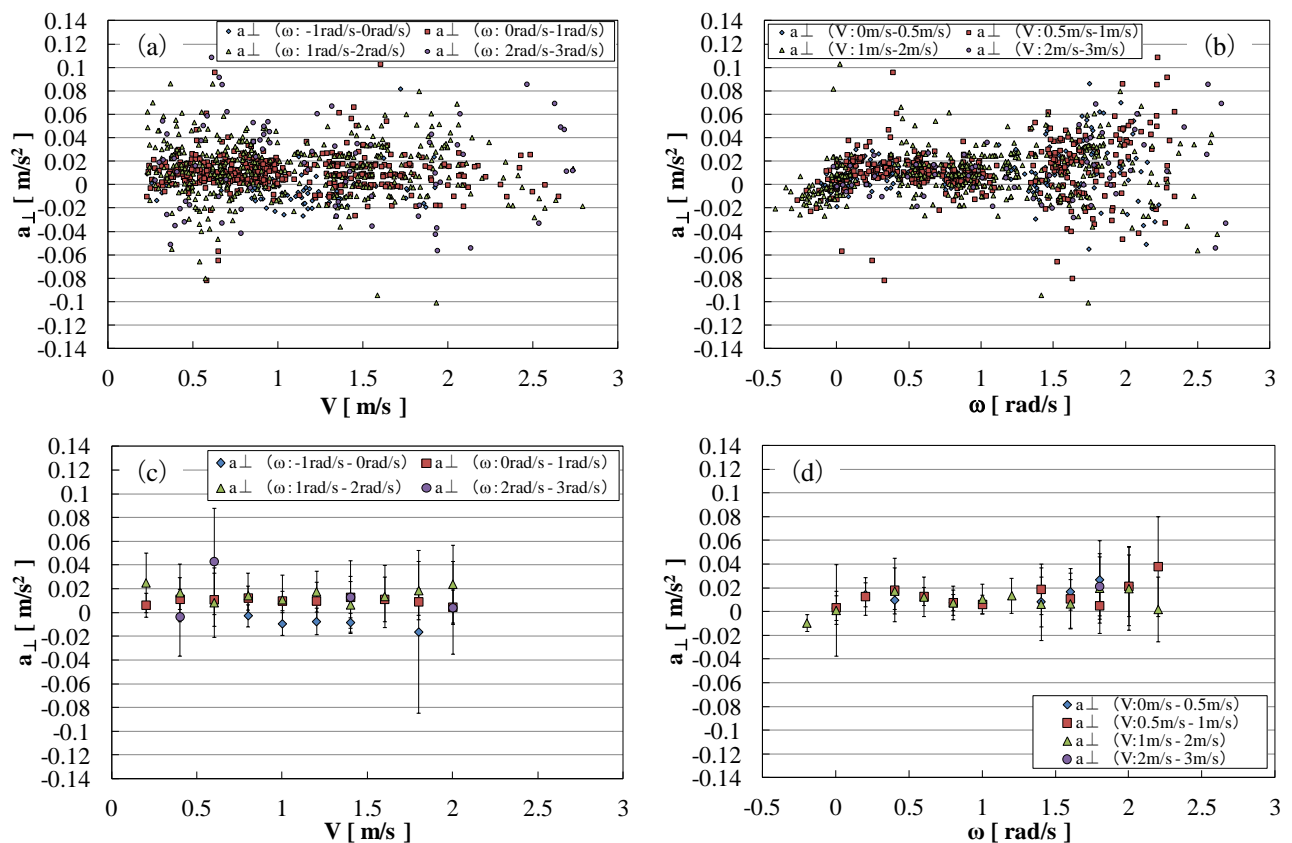


Figure 5 (a) Perpendicular acceleration against velocity, (b) Perpendicular acceleration against angular velocity, (c) Average perpendicular acceleration against velocity, (d) Average perpendicular acceleration against angular velocity

### 3・4 角加速度の算出結果

角加速度の速度依存性を図 6 (a) に、データを 4 つの角速度範囲に分けて、速度 0.2m/s 毎に平均化したグラフを図 6 (c) に示す. 角加速度の角速度依存性を図 (b) に、データを 4 つの速度範囲に分けて、角速度 0.2 rad/s 毎に平均化したグラフを図 6 (d) に示す. 値の絶対値に対してエラーバーが大きい.

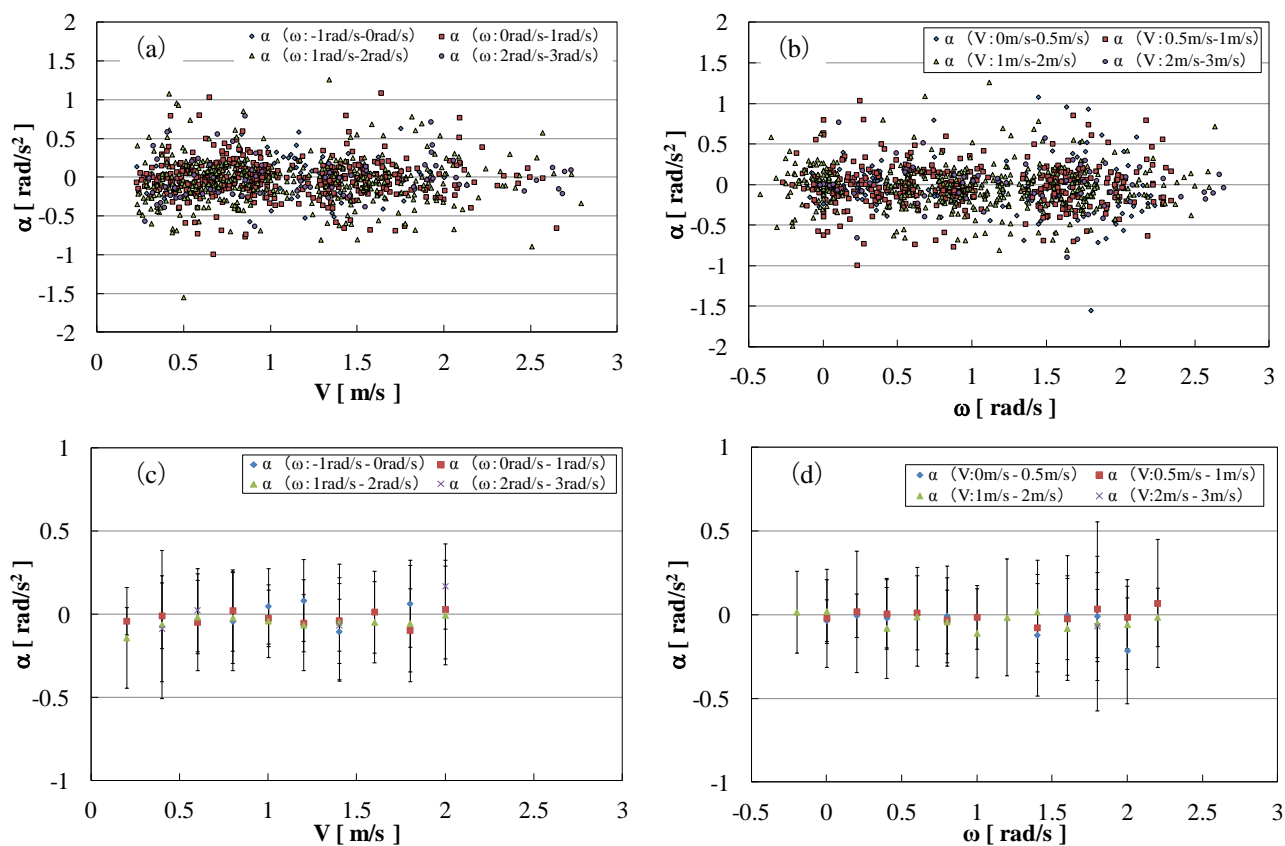


Figure 6 (a) Angular acceleration against velocity, (b) Angular acceleration against angular velocity, (c) Average angular acceleration against velocity, (d) Average angular acceleration against angular velocity

### 3・5 カール比の算出結果

$L=0.5\text{ m}$  として、データを基に算出したカール比  $C$  を図 7 に示す. これはデータを速度 0.4 m/s 毎の範囲に分け、更に各範囲内で角速度 1.0 rad/s 毎に分割し、それぞれの小範囲で速度およびカール比の平均操作を行った結果である. ただし、各データポイントは一定速度範囲内の平均値であることに注意しておく.

この図から、速度が小さいときにカール比が大きくなる傾向がある. この傾向は前報<sup>(1)(2)</sup>と合致している. 相違点として、今回は測定範囲  $L=2\text{ m}$  程度であったのに対し、今回は  $L=0.5\text{ m}$  一定としたため、カール比は前報<sup>(1)(2)</sup>に比べ値が小さい. また、負の値を示すカール比があるが、理由として、画像処理の分解能に由来するストーン重心位置の計測誤差や、ストーン軌道の蛇行 (図 3 参照) による座標軸のずれ等が考えられる.



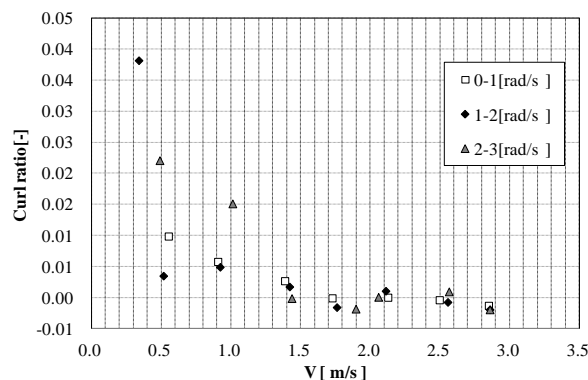


Figure 7 Curl ratio calculated with data of positions of a curling stone ( $L=0.5$  m)

#### 4. 結 語

カーリングストーンの氷上での運動を評価するために、ストーンの減速および曲がりを実験的に解析した。2012年に実際のカーリングシートにおいてストーンの運動を CCD カメラで観測し、画像解析により運動中の位置座標および回転角を連続撮像により測定した。得られたデータから算出した加速度を運動軌跡の接線成分と法線成分に分け、ストーンの速度および角速度とそれぞれの加速度との関係を実験的に求めた。また、距離を一定としてカール比を算出した。その結果を以下にまとめる。

- (1)画像解析技術を用いて取得した、カーリングストーンの重心座標および回転角より、基礎的な運動パラメータ（速度、加速度、角速度、角加速度）を得た。
- (2)重心座標の軌跡を見直すことにより、ストーンが蛇行しながら運動している場合があることを確認した。
- (3)加速度を運動軌跡の接線成分および法線成分に分けることで、ストーンの速さの変化と、運動の向きの変化を別々に評価した。
- (4)接線加速度に対しては、角速度より速度が与える影響が大きいことを確認した。
- (5)法線加速度に対しては、速度より角速度が与える影響が大きいことを確認した。角速度  $1.2\text{rad/s}$  以上の範囲では、値のバラつきが大きく、蛇行しながら運動していることが伺える。
- (6) $L=0.5$  m として、カール比を算出した。カール比は速度が小さい範囲で大きい値を示した。

#### 5. 謝 辞

本試験を行うに当たり、公益社団法人日本カーリング協会、MLP 軽井沢氷研究所カーリング施設、MAYEKAWA CURLING CLUB に多大なる御協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

#### 文 献

- (1) 入野太郎・門脇仁隆・駒込敏弘・徳本大・服部一裕・前野紀一，“カーリングストーンの氷摩擦係数とカール比の測定” 日本機械学会シンポジウム：スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2012 講演論文集 (2012), pp.205-209.
- (2) 入野太郎・門脇仁隆・駒込敏弘・徳本大・服部一裕・前野紀一，“カーリングの実験的研究—カーリング・ストーンのカール比の測定—” 雪氷, Vol. 75, No. 3 (2013), pp.137-146.
- (3) Maeno, N., “Dynamics and Curl Ratio of a Curling Stone”, Sports Engineering, Vol. 16(2013), DOI 10.1007/s12283-013-0129-8.