

# 体の縮みが可制御性に及ぼす影響について

## How the Body Shrink Influences Controllability of Skillful Movements

古川康一<sup>1</sup> 升田俊樹<sup>2</sup> 西山 武繁<sup>3</sup> 忽滑谷 春桂<sup>3</sup>

Koichi Furukawa<sup>1</sup>, Toshiki Masuda<sup>2</sup>, Takeshige Nishiyama<sup>3</sup> and Haruka Nukariya

<sup>1</sup>嘉悦大学 <sup>2</sup>チェリスト

<sup>1</sup>Kaetsu University <sup>2</sup>Cellist

<sup>3</sup>慶應義塾大学 大学院政策・メディア研究科

<sup>3</sup> Graduate School of Media and Governance, Keio University

**Abstract:** In this paper, we investigate how the body shrink influences controllability of skillful movements in playing ball games as well as in playing the string instruments. Body shrink may be brought either by getting sudden muscle weakness or by overstraining. A typical defect caused by the body shrink is losing body control caused by loosening power delivery path like uncontrollable kites with sudden wind lost. This power delivery loosening in turn is brought by the body shrink. We give an explanation of this defect in terms of the whip dynamics in biomechanics. We point out the difficulty of discerning this uncontrollability because of the subtle feeling of the phenomena. An interactive interview is conducted to extract hidden points of interests among authors consisting of an amateur and professional cello players and two discussion mediators (facilitators). We found several related issues such as the importance of the bow holding by pinching and the relationship between taking the action-reaction law into account and avoiding the loosening of the power delivery path. These new points give hints how to avoid the problem discussed in this paper.

## 1 はじめ

体の縮みは、四肢を使う運動にとって大きな障害となる。ここで、体の縮みは、必ずしも力みによる縮こまりを意味しない。いろいろな原因での体の縮小変形を、ここでは縮みと言うことにする。後で述べるが、縮みは力の伝達経路上でのゆるみを誘発し、そのゆるみが運動の障害の原因となる。たとえば、スイング系のスポーツ（野球のバッティング、テニス、ゴルフなど）、あるいは、弦楽器の演奏において、バット、ラケット、クラブ、あるいは弓を保持して操作を行う際に、体が縮んでしまうと、その制御がうまくいかない。本論文では、この問題を取り上げる。ここで、「可制御性」の用語について、断らなければならない。現代制御理論において、可制御性、可観測性は、厳密に定義された用語であり、ここでの言葉の意味と異なる。本稿での「可制御性」は、より広い意味で用いており、制御系自身が変化して、制御が出来なくなってしまうような場合を想定している。凧揚げや操り人形がその例である。凧揚げは風を受けている間は十分に制御でき、安定して揚がっているが、一旦風を失うと、墜落してしまう。操

り人形では、糸をゆるめすぎると、その先の手足をうまく操ることが出来ない。これらは、制御対象自身の糸が変化して、そのせいで制御できなくなってしまう。

体の縮みは、ちょうど操り人形での糸のゆるめすぎと同じ効果をもたらす。操り人形では、糸の張りが手足の制御のための必要条件となるが、体が急激に縮まるとその瞬間に力を伝える筋肉の経路がゆるみ、運動制御を失う。一方、力の伝達経路のゆるみを筋肉の緊張状態で表現すると、腰、体幹、肩、上腕、前腕、指先に至るパス上のどこかでの拮抗筋の不活性化による運動連鎖の中断、ということになる。

ゆるみは自覚することが困難で、そのためパフォーマンスの障害になっても見過ごされることが多い。可制御性の観点からは、ゆるみは、二通りの悪影響を及ぼす。第1は、制御対象の質的变化により、制御が不可能になる場合である。第2は、目的とする動作のための脳から筋肉への指令に対して、量的な誤差を生じさせる原因となる場合である。

本稿では、体の縮みと、それに伴うゆるみを取り上げ、それがパフォーマンスに対してどのような影響を及ぼすのかを論じるとともに、その回避のため

の方策についての考察を行う。

## 2 ゆるみの具体例

### 2.1 チェロ演奏での移弦

ゆるみによるパフォーマンスの劣化の顕著な例は、図1のようなフレーズにおいて、弓の上向(アップ)で高弦へ移弦する時に出現する。この例では、C線のD、Gに引き続くHに移る際のG線への移弦時に、ゆるみが発生する。このときのゆるみにより、つぎのEの音が強く弾けない。



図1 高弦への移弦に伴うゆるみの発生例。

なぜここでゆるみが発生してしまうのであろうか。C線からG線、あるいは、そのすぐ後のD線からA線への移弦のし方に問題がある。この移弦を肩の回内と肘の上行によって行うと、肘の角度が固定されたまま手首と肩を結んだ回転軸の周りを回転し、それに伴って手先が僅かながら手元に引き付けられ、結果として肩と手首の距離が縮まり、右手にゆるみが発生する。さらに、移弦時に手首によって弓の方向を調節しないと、弓の先が上がってしまい、弦との接触ポイントがコマから遠くなってしまふ。この状況では、強い音を出すための弦上での最適な弓の位置を維持できないので、強い音を出すことが出来ない。

### 2.2 左手の大きなポジション移動

左手の高音への大きなポジション移動において、姿勢を崩して前かがみになると、実際の左手の移動距離は当初の予測に比べて短くなる。その結果、左手のジャンプの量を若干短縮するための調節機能が働き、その結果ゆるみが発生する。

### 2.3 ゴルフのダウンスイング

ゴルフのダウンスイングでのゆるみの発生は、上記の左手の大きなポジション移動の場合とよく似ている。ゆるみは、クラブを保持している利き手とゴルフボール間で発生し、姿勢を崩して利き手の肩が下がることによって、その距離が縮まる。グリップを保持している利き手とボールの間の距離が縮まると、アドレス時の距離より短くなるので、だふりが

発生しがちになる。

以上の三つの例に共通する事柄は、ゆるみに縮みが伴っている点である。ゆるみと縮みが同じ現象の表裏の関係にあることは、前章ですでに指摘したとおりである。縮みは骨格系の縮小変形を意味しており、一方、ゆるみは骨格系に張られた力の伝達経路に関する状態である。骨格系の縮小は、そこに張られた力の伝達経路のゆるみをもたらす。

## 3 ゆるみの生体力学的解釈

ゆるみの生体力学的解釈は、上にも述べたように、鞭モデルによって説明できる。以下に、鞭モデルの概略を紹介する[1][2][3]。図2は、鞭モデルを展開するための座標系を表す。

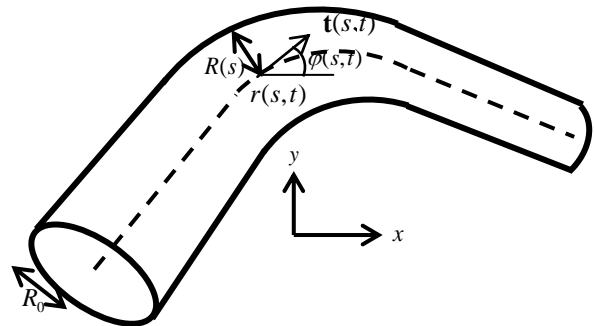


図2 鞭の力学モデルのための座標系

図2において、 $R_0$ は鞭の元でのロッドの半径で、 $R(s)$ は鞭の元からの中心線のこの長さ $s$ の位置でのロッドの半径である。 $r(s, t)$ は、位置 $s$ での時刻 $t$ における座標の極座標表示である。 $t(s, t)$ は、位置 $r(s, t)$ での接線ベクタである。 $\phi(s, t)$ は、接線ベクタの $x$ 軸に対する角度である。いま、点 $(x, y)$ で鞭を輪切りにしたときの円盤にかかる力を考える。 $F = Fe_x + Ge_y$ を力、 $M$ を力のモーメント、 $\rho$ を密度、 $A = A(s)$ を $s$ における断面積とする。第1に、並進に対するニュートンの運動方程式より、

$$\rho A \ddot{x} = F' \quad (1)$$

$$\rho A \ddot{y} = G' \quad (2)$$

が得られる。ここで、円盤にかかる力はその前後の力の差なので、 $s$ に関する微分( $F'$ など)を取る(これに対して、 $\ddot{x}$ などのドットは、時間微分を表す)。さらに $M = Me_z$ を円盤の $z$ 方向の曲げモーメントとし、 $I$ を座標 $(x, y)$ での断面2次モーメントとし、 $E$ をヤング率(バネの強さ、スティッフネスと同じ)とすると、

$$M = EI\phi' \quad (3)$$

が成り立つ。すると、回転運動に対するニュートンの運動方程式から、

$$\rho I \ddot{\phi} = (EI \phi')' + Gc \cos \phi - F s \dot{\phi} \quad (4)$$

が成り立つ。この式の右辺の第1項は、鞭の弾性による反発力であり、第2、3項は、回転運動による遠心力を表わす。

いま、無限長の鞭を考え、 $-\infty$ で水平方向を向いていて、そこでの張力を $\alpha$ とする。この境界条件で上の連立微分方程式(1), (2), (4)を解くと、

$$x(s, t) = s - 2\gamma \tanh\left(\frac{s - ct}{\gamma}\right), \quad (5)$$

$$y(s, t) = s - 2\gamma \operatorname{sech}\left(\frac{s - ct}{\gamma}\right) \quad (6)$$

が得られる。ただし、 $\gamma^2 = \frac{\delta^2(c^2 - 1)}{\delta c^2 - \alpha}$ である。ここ

で、 $c = \sqrt{E/\rho}$ は鞭を伝わる音の速度、 $\delta$ は鞭の断面積の縮小率、 $\alpha$ は鞭の始点での張力である。この式を Mathematica により数値計算した結果を図3に示す。この図から分かるように、鞭運動は途中でループの出来る軌跡となっている。この式の意味は、以下の通りである。速度が最大になる点  $s$  が時間  $t$  に比例している。すなわち  $s = ct$  成り立つ。さらに、その係数  $c = \sqrt{E/\rho}$  は、ヤング率  $E$  の平方根に比例する。すなわち、剛性を4倍に高めると、その伝達速度は2倍になる。

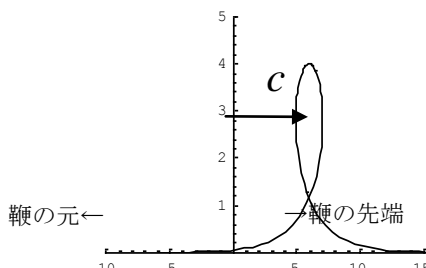


図3 鞭の運動方程式の解が示す軌跡

この性質を利用すると、剛体の剛性を調節することによって、鞭の波動の伝播速度を変化させることが可能となる。鞭の運動方程式の解が示唆するもう1つの点は、剛性、すなわちスティッフネスの重要性である。鞭力学は、スティッフネスが鞭全体を通して、一定の値にな

っていることを要請する。この2点は、鞭力学をスキルに応用する際にとくに重要になる。

鞭運動を起こさせるためには、大きな力を与えられた方向へ瞬間的に発生させなければならない。その力としては、足腰と体幹での脊柱周りのトルクが最も適していると考えられる。また、そのトルクの伝達速度は鞭のスティッフネスの平方根に比例するが、身体のスティブネスは、体のバネの強さである。とくに、肩、肘、手首の関節での強いスティッフネスが必要になる。鞭の理論では、鞭の材質が一定のスティッフネスを持っていることを仮定しているが、ヒトの身体では、とくに関節部分でのスティッフネスは一定でなく、関節回りの筋肉の活性状態により、それらは大きく変動すると考えられる。スティッフネスは、鞭が曲がることに対する反発力であり、それは力を入れすぎても抜き過ぎてもいけない。力を入れ過ぎるとしなやかな運動が実現しない。一方、力を抜きすぎると、そこでバネの反発力が無くなってしまい、その関節の先が振り子運動になってしまう。その結果、波動現象としての高速の力の伝達がそこで途切れてしまう。一方、骨格系の縮みによってもたらされるゆるみは鞭の経路上のスティッフネスの著しい減少を招き、その結果、鞭の力の伝達が中断される。このことが、ゆるみによる著しいパフォーマンス低下を説明している。

#### 4 縮みと可制御性

縮みによる可制御性の阻害を議論するためには、その前提として鞭運動による運動の可制御性を論じなければならない。鞭モデルの解(5)、(6)が示すように、鞭の軌道 $((x(s, t), y(s, t)))$ は、鞭の始点での張力 $\alpha$ および鞭を伝わる音速 $c = \sqrt{E/\rho}$ によって

決まる。もちろん、鞭モデルの身体運動への当てはめは近似であるので、このことが正確に成り立つわけではないが、身体での力の与え方、およびスティッフネスの調節によって、手先の起動がある程度制御できることが理解できるであろう。

一方、縮みは可制御性に悪影響を及ぼす。その影響の仕方には二通りある。第1は、制御を失う場合である。骨格系が著しく収縮すると、前章で述べたように、関節でのスティッフネスが極端に下がり、鞭の力の伝達が途切れる。そうすると、鞭運動による運動制御が利かなくなる。このような制御の喪失は、凧が向かい風を失って墜落するのに似ている。







ゆるみが発生すると、ゴルフやテニスなどでは手打ちになり、弦楽器演奏では、手弾きになる。

## 8 ゆるみと作用反作用の法則

アップでの高弦移弦は、「作用反作用の法則」問題[9]と混同しやすい。実際、第1著者は、論文[9]において、図1の課題の問題点として、回転運動に対する作用反作用の法則の維持の困難性を指摘した。しかし、実際には本論文で指摘した、ゆるみその原因と考えられる。もちろん、この課題の困難性は、これら2つの原因に因るものと考えられるが、その比重としては、むしろゆるみの原因の方が大きいのではないかと考えられる。ゆるみは、それによって弓の制御が出来なくなり、力の伝達を不可能にするからである。一方、作用反作用の法則は、力の伝達が出来た上で、維持すべき問題である。

## 9 おわりに

本論文では、体の縮みとそれに伴う力の伝達系のゆるみが高度な技巧を要するパフォーマンスへ及ぼす悪影響について論じた。ゆるみは、感覚的に捉えにくく、そのため、その困難性を認識することが容易ではない。自己診断をどのように行えばよいのか、また、ゆるみを除去するにはどうすればよいのかの明確な解答は得られていない。それらは、今後の課題である。本論文では、ゆるみ現象を鞭モデルによって説明したが、鞭モデル自身、しなやかな運動を説明しているが、あくまで近似でしかなく、ここでもゆるみ現象をすべて説明することは出来ないと思われる。

第1著者が本論文の執筆中にゴルフの練習場で気付いたのが肩の返しによるダウンスウィングの実現であるが、この方法はチェロの演奏にも応用でき、本論文で取り上げた上向運弓での高弦への移弦課題への応用も可能であることが明らかになった。本方法の詳細な検討は、今後の課題である。

本論文の第2章で指摘した、縮みを原因とする第2の不具合、すなわち、目的とする動作のための脳から筋肉への指令に対して、量的な誤差を生じさせる原因となる場合については、十分な考察が出来なかった。この問題自身、縮みは原因となるが、果たしてゆるみが原因となるのかも、不確かである。この問題は、切り離して論じるべきかもしれない。

鞭モデル自身について言えば、実際の人体でのしなやかな動きは、運動連鎖と呼ばれる、体幹、胸郭、肩、腕へと、つぎつぎに運動が伝わっていくモデル[10][11][12]のほうがより適切であろう。鞭モデルで言えば、運動連鎖は、力が途中で追加されるようなアクティブな鞭と考えられる。これらのモデルによ

る解析は、今後の課題である。

## 謝辞

本研究は、平成24年度~26年度にわたる科研費「ルールアブダクションとアナロジーによるスキル創造支援」(課題番号24500183)によってサポートされた。ここに深謝する。

## 参考文献

- [1] [McMillen 03] McMillen, T. and Goriely, A.: Whip Wave, *Physica D Nonlinear Phenomena*. Vol.184, Issues 1-4, pp.192-225, (2003)
- [2] [Furukawa 05] Furukawa, K., Kinjo, K., Shimizu, S., Sawai, K. and Yoshinaga, S. : On Modeling Bow Arm Movement in Cello Playing by Whip Motion, *Proc. of the 3rd European Medical and Biological Engineering Conference, Prague*, (2005)
- [3] 古川康一、清水聡史、金城敬太、澤井啓吾：鞭力学による協調動作のモデル化、第27回バイオメカニズム学術講演会、神戸学院大学、(2006)
- [4] 忽滑谷 春佳、諏訪 正樹：ナラティブ生成を目的としたインタラクティブなインタビュー手法の提案 - 建築学科の設計課題を例にして、人工知能学会身体知研究会、SKL-11-01, (2011)
- [5] 西山武繁、諏訪正樹、佐山由佳、浦上咲恵、泉二肇：身体と意識の開拓を促す文房具のデザイン：2つのメモツールに関する考察、人工知能学会身体知研究会、SIG-SKL-09-04、pp.27-35, (2011)
- [6] 古川康一、升田 俊樹、松原 正樹、小林 郁夫、西山武繁：スキル獲得におけるブレイクスルーに関する一考察、人工知能学会2010年度全国大会、(2010)
- [7] ペドロ・デ・アルカンタラ著、小野ひとみ監訳、今田匡彦訳：音楽家のためのアレクサンダー・テクニーク入門、春秋社、(2011)
- [8] 吉田始史著、高松和夫監修：仙骨姿勢講座、BAB ジャパン、(2006)
- [9] 古川康一、升田俊樹、西山武繁：弦楽器の運弓動作の省エネ奏法について、人工知能学会2012年度全国大会、(2012)
- [10] 植野研、古川康一：ピークタイミングシナジーによる動作スキル理解、人工知能学会論文誌、Vol.20, No.3, pp.237-246 (2005)
- [11] 中野薫：日本テニススウィング革命、幻冬舎ルネッサンス、(2009)
- [12] 山岸茂則編：運動連鎖~リンクする身体、実践 Mook・理学療法プラクティス、文光堂、(2011)