

## 解説

# ハンマー投の力学と新しいトレーニング方法の開発

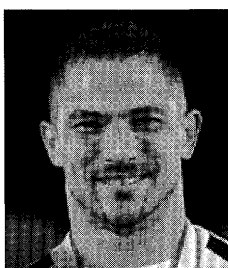
## Dynamics of Hammer Throw and Novel Training Method for Sports

## 執筆者プロフィール



太田 憲  
Ken OHTA

◎1995年筑波大学大学院博士課程単位取得退学。同年(独)理化学研究所フロンティア研究員。2002年Max Planck Institute for Human Cognitive and Brain Sciences 研究員等を経て2006年より現職、博士(体育科学)。  
◎研究・専門テーマは、スポーツバイオメカニクス、スポーツ運動計測、生体の運動制御  
◎正員、(独)日本スポーツ振興センター 国立スポーツ科学センター・スポーツ科学研究部(〒115-0056 東京都北区西が丘3-15-1/E-mail: ohta@jiss.naash.go.jp)



室伏 広治  
Koji MUROFUSHI

◎2008年中京大学大学院体育学研究科博士課程修了。ミズノトラッククラブ所属。中京大学非常勤講師。博士(体育学)。  
◎研究・専門テーマは、スポーツバイオメカニクス、ハンマー投の科学  
◎ミズノ(株)  
(〒101-8477 東京都千代田区神田小川町3-22)

### 1. はじめに

これまでのスポーツ科学では、実験や競技会等の実際のパフォーマンスを解析することによって運動の仕組みを解明し、競技力向上に寄与しようとしてきた。しかし、仮に最適な運動を計算できたとしても、選手やコーチへの言語を介したスキル伝達は容易ではない。そこで、われわれは言語による伝達ではなく、スキルに関係する物理情報を運動中に感覚情報としてフィードバックすることによってトレーニングを支援するシステムを構築し、感覚的・潜在的な学習を可能とするシステム開発を目指している。

本稿では、ハンマー投の基本的な力学について述べ、現在筆者らが取り組んでいるその力学を考慮した新しいスポーツのトレーニング方法について述べる。

### 2. ハンマー投競技の概要

ハンマー投競技(図1)については、一度は映像などをご覧になってご存知の方もいらっしゃると思うが、どのような競技であるかご理解いただくために、簡単に概要を述べる(高速度撮影した動画は、<http://www.kojimurofushi.net/study/movement.html>を参照されたい)。陸上競技のハンマー投は、加減速を繰り返しながらハンマーヘッドを加速し、投擲距離を競う競技である。したがって、ハンマーのリリース時の速度ベクトルによってほぼ投擲距離が決定されるため、繰り返し行われるターンと呼ばれる回転動作によってハンマーを加速することが技術の重要課題となる(図2)。

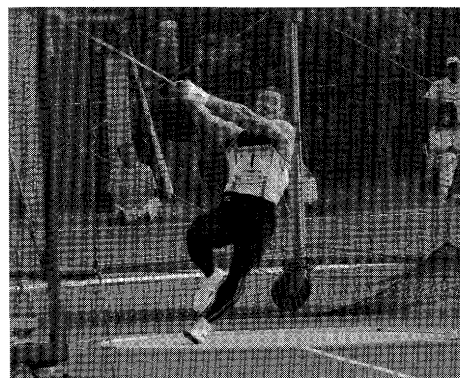


図1 ハンマー投競技

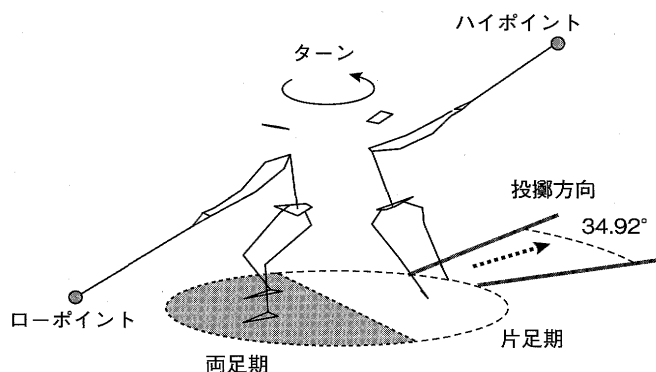


図2 ハンマー投の基本的な局面。両足期と片足期

男子の場合、ワイヤとハンドルを含めて全質量 7.26kg、長さ約 1.2m のハンマーを、直径 2.135m のサークル内から投擲する競技である。現在、男子の世界記録は 86.74m、日本記録は 84.86m である。リリースしたハンマーが角度  $34.92^\circ$  のラインの内側に入った場合が有効試技となる。

ハンマーの運動は回転運動が中心であるが、ハンマーヘッドの運動が構成する面は傾いており、通常ハンマーヘッドの最下点をローポイント、最上点をハイポイントと呼ぶ(図2)。この面の向きは投擲動作の間一定ではなく、水平面に対するこの面の傾きは、投擲動作の開始時に約  $25^\circ$  ぐらいからリリース時の約  $40^\circ$  ぐらいまでに変化していく。選手によっては面に垂直な軸の方位も変化する。すなわち、投擲サークルを時計に見立てサークルの上から見て投擲方向を 12 時とすると、ターン中のローポイントの方位がおおよそ 8 時の方向から 6 時の方向に移動する場合もある。投擲動作は現在 4 回ターンが中心であるが、1 回のターンの間に両足期と片足期が構成され、サークルの上から見て反時計方向に回転する選手の場合は、左足が軸足となって片足期と両足期を通じて常に接地している。おおむね両足期はおおよそ 10 時から 4 時ぐらいまでで、両足期のローポイントあたりでハンマーヘッド部分が加速し、ハイポイントになる片足期には減速している(図2)。このように周期的に加減速を繰り返すが、回転ごとにハンマーは結果的に加速している。ハンマーのハンドル部分においては、トルクを直接与えることができない。したがって、ハンドルから伝わるワイヤに与える張力だけでハンマーを加速し、加減速を繰り返して励振運動のように次第にハンマーが加速される<sup>(1)</sup>。

国際大会の上位進出者では、リリース時にハンマーヘッドは 28m/s 以上の速度、16rad/s 以上の角速度、ワイヤ部分には 3 000N 以上の張力がおおよそ作用し、それにもないほぼ同じ大きさの床反力が両足に作用する。なお、世界記録を出すためには約 30m/s の初速度を必要とし、世界記録前後の投擲では 0.1m/s の速度差が 0.5m 程度の距離の差に反映される。

計測した運動中のハンマーの角速度、角加速度、速度と曲率半径の一例を図3に示す。これらのデータはモーションキャプチャを用いて計測した位置座標から計算した。

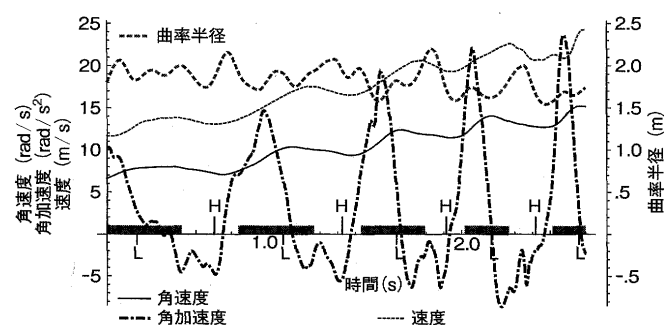


図3 ハンマーの角速度、角加速度、速度、曲率半径

フォースプラットフォームから判断した両足期は時間軸上の灰色の太線で示した。ハイポイントとローポイントはハンマーの位置が最高点と最下点の位置であり、対応する時間に H と L の記号で示した。図3に示したように、角速度は加減速しながら次第に大きくなっている。曲率半径は同様に振動しながら運動全体としては短くなっている。また、角速度と速度はほぼ同位相であるが、速度の極大値は角速度のそれより若干遅れている。両足期と角加速度が正になっている期間はほぼ一致しているが、若干角加速度変化の位相のほうが先行している。

### 3. ハンマー投の力学

投擲動作中のハンマーの運動の特徴は、回転運動を中心として加減速を繰り返しながらエネルギーを増大させている励振現象である。そのハンマーの運動を励起するメカニズムをフラフープ型振り子モデルで考察することができる<sup>(2)</sup>。ここでフラフープ型振り子とは質量集中と糸に置き換えたモデルであるが、縄跳びをイメージしたほうがよいかもしれない。すなわちハンマーを単振り子とみなし、その回転中心(ハンドル部分)が一定の傾き(角度  $\alpha$ )を持つ平面内を運動する振り子とみなす(図4)。このハンマーの回転方向のダイナミクスを調べると、ハンマーヘッドが回転している方向とは逆向きにハンドル部分を加速することによってハンマーの角速度は増加する(図5)。さらに、周期的な運動を仮定し、この回転方向の運動方程式は非線形復元力を有するマシュー方程式に変形することができ、実際の投擲でも選手はパラメータ励振を利用してハンマーを加速していることがわかってきた<sup>(3)</sup>。また、このパラメータ励振を上手に利用する場合、重力の効果と同期するように反対向きに加速するのが効率のよい方法であることも明らかになってきた。すなわち、ハンマーヘッドの位置がハイポイントからローポイントへ向かう点 A 付近で、最も大きな反対方向への加速力 ( $F_q$ ) を加えるとよい。

このパラメータ励振を利用した回転の加速メカニズムからも、ローポイントと呼ばれる点 B 付近で最も遠心力が増大することになり、その結果、毎回ローポイントで最も大きな張力がハンドル部分に作用することになる。そこで

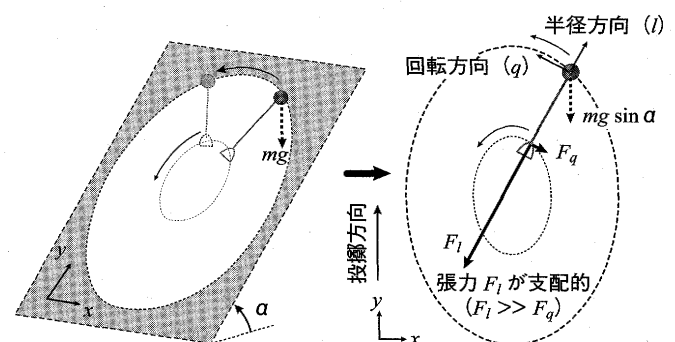


図4 ハンマーのフラフープ型振り子モデル

次に半径方向（ワイヤ軸方向）のダイナミクスを調べると、張力（ $F_t$ ）とハンドル部の引張速度（ $v_t$ ）の積がハンマーのエネルギー変化率であることから、この張力が最も大きいローポイント付近でハンマーをさらに身体側にぐっと引張ることによって、ハンマーのエネルギーが効率よく増大する。一方、ハイポイントを迎える片足期には大きな張力を与えることができないため、引張りの力が弱くなり片足期にはエネルギーが失われるが、ローポイントと比べて遠心力が弱まることから、そのエネルギー損出分を抑えられ、回転ごとにエネルギー回復が達成され、次第にハンマーのエネルギーが増大する。

したがって、ハンマーを加速するポイントは回転方向とワイヤ軸方向の二つのダイナミクスから導かれ、A付近でのハンマーの速度と反対方向のハンドル部の加速と、最下点のB付近での身体側への引張りであることが数理的に明らかになった。

ところで実際の投擲運動では、最大で約3000Nにも及ぶ大きな地面反力が足部に作用している。この地面反力は身体を通してハンドル部の張力として伝えられ、ハンドル部にはやはりほぼ同等の力が作用する。これに比べて、回転方向にハンドル部分に作用する加速力は小さく、張力の情報に埋もれてしまい、選手にとって回転方向の加速感がわかりにくいという性質がある。また、ハンマーの速度方向とは反対向きのハンドル部の加速力が、ハンマーの角速度を増大するという事実は、選手の感覚からすると一般には直感に反しており、通常加速するためにはハンマーヘッドと同じ速度方向にハンドル部を引っ張ってしまう傾向にある。

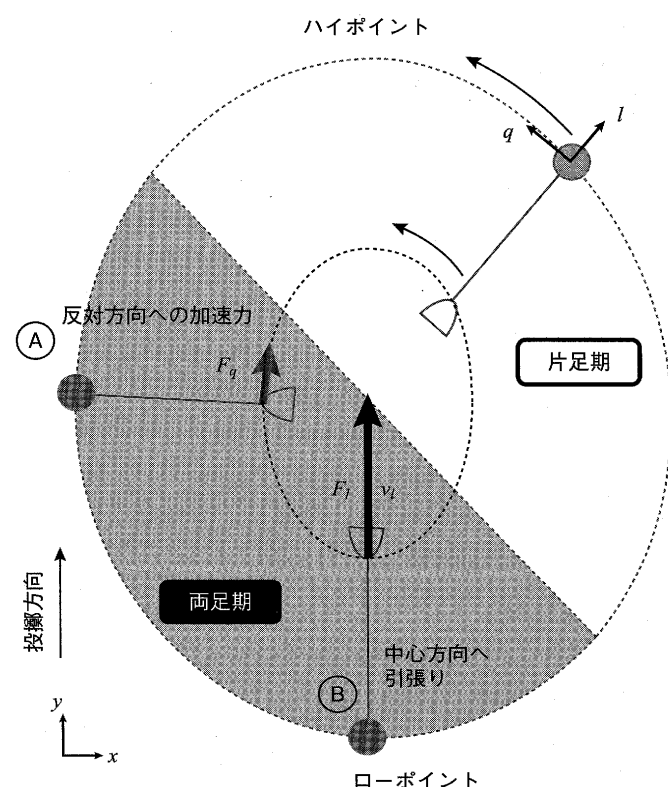


図5 パラメータ励振とエネルギー回復を利用した加速

## 4. サイバネティック・トレーニング

一般に、スポーツのスキルは非常に動的であるがゆえに、身体や道具のダイナミクスが顕在化し、運動スキルとそのダイナミクスが密接に関係してくる。また、仮にそのダイナミクスを完全に記述し最適な運動を計算できたとしても、選手やコーチにスキルを伝達することは容易ではない。一方、コーチは主として言語によって技術を伝達・伝承するが、選手とコーチ間に共通感覚や経験がない場合に新しい技術を伝達することは困難な場合がある。そこでわれわれはそのような言語による伝達ではなく、運動中に感覚情報としてスキルに関係する情報をフィードバック情報として選手に与えるトレーニングシステムを開発している。

このシステムは、人や道具のダイナミクスを解明し、その数理モデルを介したフィードバックやフィードフォワードによって、運動スキルを感覚的、潜在的（無意識的）に学習する、新しいトレーニングシステムである。われわれはこの考えに基づくトレーニングをサイバネティック・トレーニングと呼んでいる（図6）<sup>(4)</sup>。このように、スポーツのスキルを数理モデルで記述することによって、より精緻な制御がオンラインで実現可能となり、バーチャルリアリティーや動力学シミュレータなどの最新技術と融合することも可能となる。これは言語による伝達ではなく、感覚的にスキル獲得をアシストするシステムである。

このシステムを構築するうえで重要なことは、単なる計測情報の垂れ流しではなく、運動のダイナミクスを調べたうえでスキル獲得に有効な情報をフィードバックすることである。ハンマー投の場合、遠心力を反映している張力情報はハンドルを通して感覚しているので、わざわざ選手にフィードバックを与える必要はない。ところが、張力方向に直交する加速力は、張力に比して10分の1程度の大き

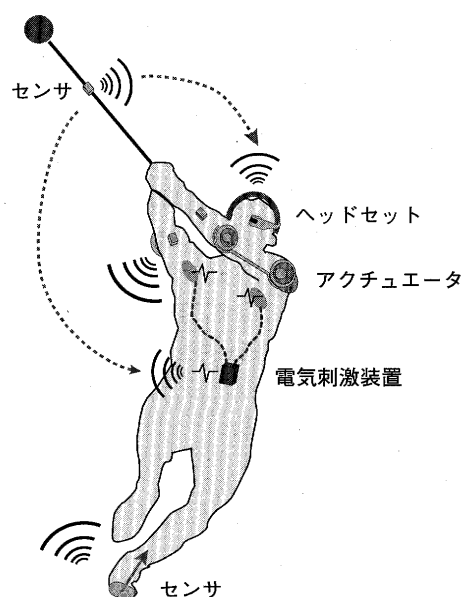


図6 サイバネティック・トレーニングのイメージ

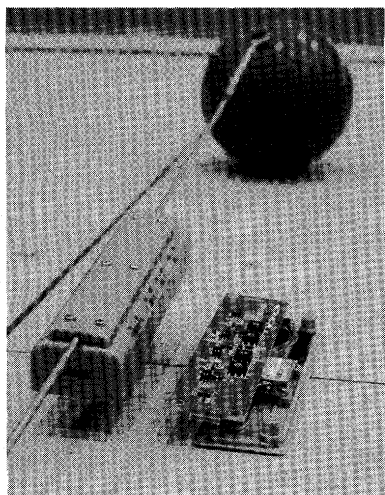


図7 ハンマー投用センサ



図8 実験風景

さと非常に小さく、張力情報に埋もれてしまい、その力を分離して認識するのは一般に困難である。このような理由から角加速度（半径方向の加速度）情報を直接感覚することは一般に困難なことから、この情報を聴覚フィードバック情報として与えるモニタリングシステムを構築した。このようなシステムを練習で用いれば、たとえば、選手が最大努力でハンマーを回転させているわりにはエネルギー伝達がうまくいかないといった状態を練習で避けることができる。また、このシステムを利用してリアルタイムで運動をモニタリングし、また直接感覚できない情報をフィードバックすることによって、バーチャルな感覚器官（第六感？）として作用することが期待される。

さてハンマー投の場合、われわれは加速度計やジャイロセンサを用いて運動を計測している（図7）。このセンサをワイヤ上に配置し、無線を利用し聴覚フィードバックを与えるシステムを構築した。現在は、フィードバック情報として角加速度情報（ハンドル部の回転方向の加速度情報）を音情報に変換し、PCに接続されたスピーカからフィードバックし、この情報をモニタリングすることによって、スキルの獲得をアシストすることを目指している。

この聴覚フィードバックは一種のバイオフィードバックでありモニタリングシステムであるが、より積極的な制御を狙ったフィードフォワード的なトレーニングもわれわれの研究目標のターゲットにある。すなわち、医療工学ではすでに研究の進んでいる機能的電気刺激（Functional electrical stimulation: FES）法のスポーツへの応用である。FES法はもともと上位運動ニューロンを障害された脳血管障害者および脊髄損傷者に対する四肢の運動をコントロールすることを目的とした電気刺激法であり、一種の力覚フィードバックである。この方法によって、直接運動スキルを教示するシステムである。

## 5. おわりに

実際のスポーツのコーチが語る言葉は、抽象的、感覚的な言葉が多いのではないだろうか。そのほうが、選手にとっ

て理解しやすいと思われる。しかし、選手・コーチ間であっても新しいスキルを獲得するときは、共有する共通感覚がない場合、言語によってスキルを伝達することは容易ではない。このような問題点を補うために、われわれはトレーニングを支援するシステムとしてサイバネティック・トレーニングを提唱している。このシステムは、スキルに関する科学者の言葉を選手に伝達するためのシステムであるが、これはコーチの代替ではなく、あくまでも感覚的、潜在的（無意識的）な学習を支援する未来のトレーニングシステムである。

本稿では、ハンマーの数理解析を行い、ハンマーを加速する基本的原理を明らかにし、その技術をトレーニング支援システムに応用しようとしている。ここでも紹介したハンマーの数理解析は、筆者の実際の練習での新しいスキル獲得に非常に役立っている。しかしながら、理論をそのままスポーツのスキルとして身体で具現化するのには、一般に困難である。そこで、このようなシステムがスキル獲得のための支援装置として利用されることを夢見ているが、その日も遠くはないと思われる。

（原稿受付 2009年11月6日）

### ●文献

- (1) Murofushi, K., Sakurai, S., Umegaki K. and Takamats. J. Hammer Acceleration due to Thrower and Hammer Movement Patterns, *Sports Biomechanics*, **6-3** (2007), 301-314.
- (2) Caughey, T. K., Hula-hoop: An Example of Heteroparametric Excitation, *American Journal of Physics*, **28-2** (1960), 104-109.
- (3) 太田 憲・梅垣浩二・室伏広治・羅 志偉, 振り子モデルによるハンマー投運動の解析, 日本機械学会ジョイント・シンポジウム2009講演論文集, (2009-12), 447-452.
- (4) 太田 憲・梅垣浩二・室伏広治, 小型センサを用いたハンマー投のトレーニングサイバネティック・トレーニングを目指して, *スポーツ工学 (JSEA 機関誌, 特集北京オリンピック)*, **4** (2009), 7-12.