

8

オリンピックに向けたハンマー投のサイバネティック・トレーニング

応
般

太田 憲 (慶應義塾大学政策・メディア研究科)

室伏広治 (中京大学スポーツ科学部)

サイバネティック・トレーニング

スポーツの指導の場では、スキルを理解したコーチによって選手に技術が伝達されるが、一般に高度な技術の指導は容易でない。一方、スポーツ科学から得られた知見に基づいて、選手に有効な運動スキルの学習方法を提示できるほどスポーツ科学は発展していない。また、指導者に恵まれ良いスキルを学ぶことができた選手は良い成績を残していく可能性を持つが、悪い動きを身につけてしまうとなかなか修正することが難しい。このような背景を意識し、サイバネティック・トレーニングでは、コンピュータ上で実現された人工的な脳を介したトレーニング環境を構築する(図-1参照)。たとえば、スイング運動のダイナミクスを考慮し、通常感覚することができないがスキル獲得にとって重要な情報を人工脳が抽出し、それをヒトにフィードバック、または可視化・可聴化して示すことによって学習を促

進する。または、最適な運動指令の情報を与えて直接身体の動かし方を教示する方法が用いられる。これと似ているが、ブレイン・マシン・インタフェース (Brain-machine Interface : BMI) や、ブレイン・コンピュータ・インタフェース (Brain-computer Interface : BCI) では、脳の意図を解釈してあくまでも脳が信号を形成するが、サイバネティック・トレーニングでは人工知能が信号を形成することに違いがある。

この目標を達成するため、まず運動スキルの数理メカニズムを明らかにし、さらにその知見を反映させたスキル獲得の学習支援ツールの開発を行った。ここでは実際に開発したハンマー投のスキル獲得支援システムについて紹介する。

ハンマー投のダイナミクス

ハンマー投の物理的特徴

図-2に示すように、陸上競技における男子ハンマー投は、長さ約1.2m ピアノ線を用いたワイヤを介して接続されたハンマーヘッドとハンドルから構成される質量7.26kgのハンマーを、直径2.135mのコンクリート製のサークルから投擲し、その飛距離を競う競技である。ワイヤとハンドル間はそれぞれリング状の構造をなしている。すなわちワイヤと腕の間には内力である張力のみが作用し、トルクが作用しないこの非駆動関節がハンマー投の運動パターンや力学的な特徴を形成し、このようなシステムの自由度に対して入力の数が少ないシステムは劣駆動系と呼ばれている。ハンマーヘッドの運動軌道はほぼ平面をなしており、その面は傾いている。通常ハンマーヘッドの最下点をローポイント、最上点を

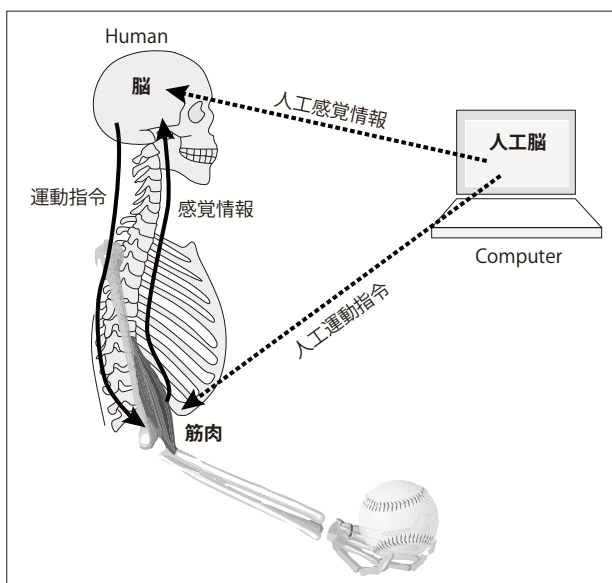


図-1 サイバネティック・トレーニング

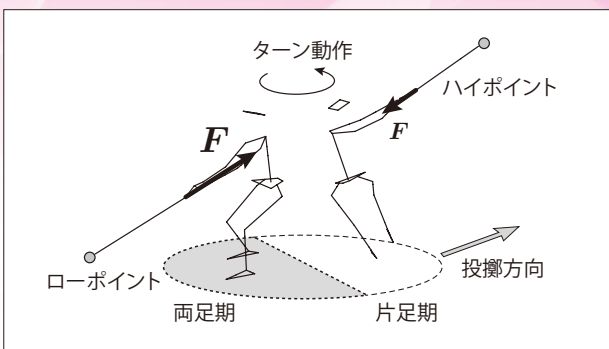


図-2 ハンマー投の特徴

ハイポイントと呼ぶ。ハンマー投ではターンと呼ばれる身体の回転動作を通常3, 4回繰り返す。1回のターンの間に両足期と片足期が構成され、サークルの上方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。投擲サークルを時計に見立ててサークルの上から見て投擲方向を12時とすると、両足期はおおよそ10時から4時ぐらいの間であり、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。このように周期的に加減速を繰り返すが、リリースまでの間は平均的に加速している。国際大会では80m前後の投擲距離で競われるが、この距離の投擲を実現するためにターン動作中にハンマーの張力や地面反力は3000Nを超える。たとえ一瞬ではあったとしても、オリンピックの決勝に残るような選手では約300kgの重さに身体が耐えていることになり、実に驚くべきことである。

この地面に作用する力は身体を通じてハンマーにエネルギーという形で伝達される。投擲や打撃によって投射される他の競技の物体（たとえば円盤や野球のボール）の運動エネルギーと比較するとハンマーの運動エネルギーは著しく高く¹⁾、ハンマー投競技は身体が作り出すエネルギーの大きさと、その高いエネルギー伝達率という観点から非常にユニークな競技といえる。またハンマー投のハンドル部はトルクが作用しない劣駆動系であり、ハンマーの力学的エネルギー増大は内力を媒介したエネルギー伝達以外にはないため、ここではハンマー特有の加速原理について述べていく。

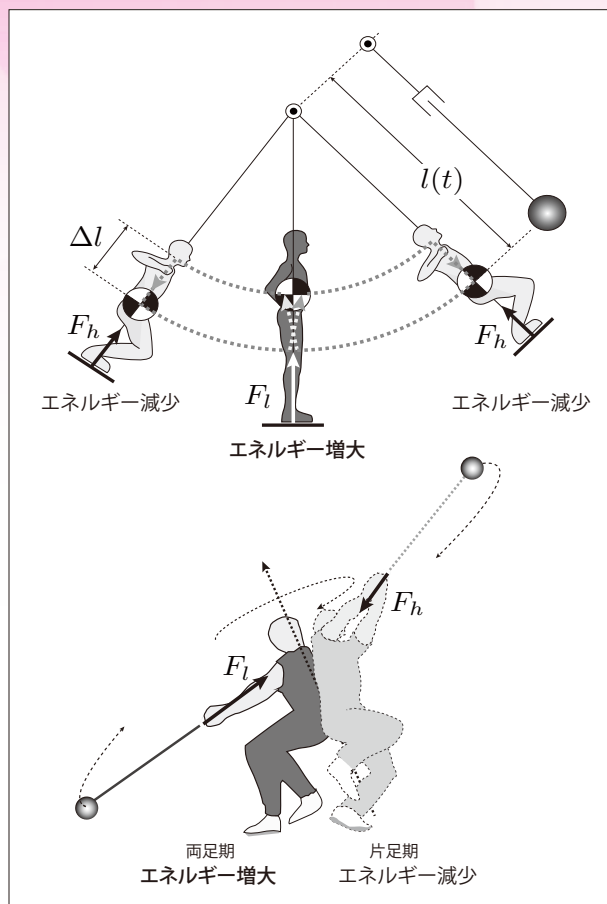


図-3 ブランコとのアナロジー

パラメータ励振に基づくハンマーの加速

ハンマーの加速方法と同様に、直接回転駆動力を与えられないブランコのような系の加速方法としてパラメータ励振がある。そこで、このハンマーの加速方法を理解するため、パラメータ励振の例としてよく取り上げられるブランコの加速方法と比較してみる(図-3)。ブランコの加速方法はブランコを支える糸(実際には鎖や紐)の張力が最大になる最下点で、ブランコを蹴り身体が伸び上がる動作によって加速している。この運動を振り子の長さが変わる可変長振り子と見なすと、最下点でブランコを蹴るように伸び上がる動作によって重心の位置が高くなり、振り子の長さが短くなることに相当する。一方、ブランコが最も高い点ではしゃがみ込む動作によって重心が低くなり、その結果振り子の長さが長くなる。そこで、この現象をエネルギーベースで考察すると、最下点でのその力が F_l のときに、振り子の長さ l が Δl だけ短くなる場合、ブランコに作用する力の向

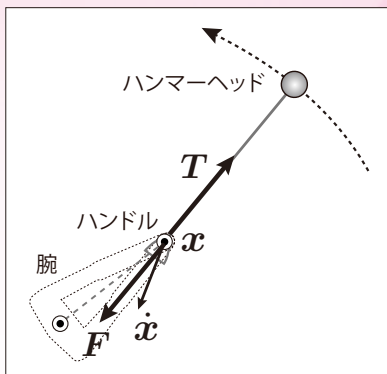


図-4 ハンマーの物理モデル

きが上向きなのでエネルギーは $F_l \Delta l$ だけ増大する。

一方、最上点でかがむ動作によって振子の長さが Δl だけ長くなり、最上点での張力を F_h とすると今度はエネルギーが $F_h \Delta l$ だけ減少する。しかし、重力や向心力の違いにより最下点と最上点での張力の間には $F_l > F_h$ の関係があるため、ブランコが一周運動する間に $2(F_l - F_h) \Delta l$ だけエネルギーが増大することによって、次第にブランコのエネルギーは増大していく。

一方、ハンマーをより遠くへ飛ばす問題を、リリース前までにハンマーにより多くの力学的エネルギーを蓄えておく問題と置き換える。ただし、ブランコと異なり一定の長さの変化を与えるわけではないので、ここでは、単位時間あたりのハンマーのエネルギー変化に注目し、効率よくハンマーにエネルギーを供給する問題を考える。ここで、ハンマーはヘッドと質量を無視したワイヤから構成されていると考え、ハンマーの構造に着目すると、直接回転駆動力を与えることができず、張力以外にはハンマーには外力が作用しない。したがって張力を通して伝わる力が、ブランコ同様唯一のハンマーの動力源となっている。そこで、ハンマーの力学的エネルギーの時間微分を計算すると、その変化はハンマーのハンドル部分に作用する力ベクトル F (張力の反対向きで、身体側を向く) と、ハンドル部分の速度ベクトル \dot{x} との内積 $F^T \dot{x}$ で決まる (図-4 参照)。これはハンドル部分から供給される単位時間あたりのエネルギーなので、ここではこれをエネルギー供給率と呼ぶこととすると、ハンマーのエネルギー変化は、ハンドル部分を経由したエネルギー供給率だけで決

定される。力 F は常に身体側に作用するので、ハンマーを引っ張ればエネルギーが増え、ハンマーに引っ張られれば減少することになる。ブランコのスイングと同様に、回転運動を直接駆動するトルクを与えることができず、また、ターン動作中、両足が接地しハンマーにエネルギーを供給することができる両足期と、片足しか接地できず逆にハンマーのエネルギーが身体に吸い取られてしまいエネルギーが減少する片足期が交互に構成されるため、ハンマーは必然的にパラメータ励振のように振る舞うことになる。

このように、ブランコにおける蹴る動作にはハンマー投におけるハンマーを引っ張る動作が対応している。すなわち、常にハンドル部分には向心力が作用し、ハンマーの張力が最大となる最下点 (ローポイント) でハンマーを身体全体で引っ張り、両足期から片足期に移行する最上点 (ハイポイント) 近辺で今度は逆に身体がハンマーに引っ張られるが、ブランコの場合と同様にローポイント側での張力 F_l とハイポイント側での張力 F_h に差もあり ($F_l - F_h$)、結果各ターンごとのエネルギーの増加分は減少分を上まわり、ハンマーのエネルギーを平均的に増大させている。

回転方向のパラメータ励振

ここで、張力が必ず法線方向 (ワイヤ軸方向) に作用することを考慮すると、法線方向の運動だけが必要とされ、単にローポイントで引っ張りハイポイントでできるだけエネルギーを失わないような動作を行っていけばよいように思える。しかし、ローポイントでよりエネルギーを増大させるためには、ローポイントを迎える前により大きな張力にしておけばよいので、ハンマーの角速度を事前に増大させておくことが重要となる。すなわち、張力はほとんどが向心力で占められ角速度の二乗に比例するので、ハンマーの角速度を事前に増大させておくことによってより効率よくハンマーを加速できることになる。

そこで先ほどと同様に、角速度を増大させる問題をハンマーの回転のエネルギーを増大させる問題に置き換えて考えるが、ここではハンマーを質点と見

なしており、ハンドル部分を回転の中心と見なしたハンマーの回転のエネルギーは仮想的なものとなる。回転のエネルギーは変化は同様に、ハンマーの接線方向の加速度とハンマーの質量との積 F_{θ} と、接線方向の速度 v_{θ} との積によって決定され、これはハンマーのハンドル部分では逆方向の運動によって制御され、別な言い方をすると、ハンマーの回転のエネルギーはハンマーの角加速度ベクトルと角速度ベクトルとの内積で決定される。以上から、接線方向の運動も加速にとっては重要で、接線方向でもパラメータ励振が生じている。

これは野球やゴルフのスイングで腕とバットやクラブの運動では位相遅れがあるのと同様に、ハンマー投でも同様に腕に回転を与えて、腕とハンマーの間にもわずかかではあるが位相が生じ、その位相差がハンマーの角速度を増大する。このように法線方向の引っ張りの運動ばかりでなく、接線方向でも加速減速を起こすパラメータ励振によってハンマーを加速し、さらに法線方向よりも接線方向の加速を事前に行っておくことによって、より有効な加速ができることが分かる。

次章では、この原理を考慮した聴覚フィードバックシステムについて述べる。

ハンマー投のサイバネティック・トレーニング

サイバネティック・トレーニングの目的

ハンマー投の加速メカニズムをパラメータ励振とのアナロジーで議論したが、このような運動スキルの理解を実際の技術改善に結びつけていきたいと考えている。筆者の1人は実際にこの加速メカニズムを考慮し、接線方向のエネルギーを増大させるためにハンマー投にも生じるムチ運動を意識することによってハンマー投の飛距離向上に結びつけた経験がある。スポーツ工学の科学的知見が競技力向上に貢献した例と言える。しかしながら、一般には技術を改善しようと試みて、どの程度改善されているかを自分自身で確認することは困難な場合が多い。多く

の場合、技の構造を理解した研究者やコーチによる評価や翻訳を通して選手に技術が伝達されるが、一般に高度な技術の獲得は容易でない。結局、指導者に恵まれよいスキルを学ぶことができた選手はよい成績を残していく可能性を持つが、悪い動きを身につけてしまうとなかなか修正することが難しい。また、スポーツ工学では、スキルの学習や獲得のメカニズムは主たる研究の対象外としてきた。学習を問う脳神経科学でも運動スキルの学習のメカニズムではまだ分からないことが多いのが現状である。そこで、我々はこのような現状を考慮し、スキルの伝達ではなく練習中に実際にライブで自分の運動をモニタリングするツールを開発することによりスキルの向上に寄与しようと試みている。

ところで、ハンマー投の運動ではワイヤ軸方向の運動は選手にとってその良し悪しが認知しやすい運動である。これはハンドルで感じる張力の大きさが大きく、加速の結果それが向心力として直接張力に反映されるためである。したがって、この情報をわざわざモニタリングする必要はない。一方、それに直交する接線方向に加速度を与えても、ハンマーの質量と比べてワイヤの質量が小さいことから作用する力は非常に小さく（モデルでは無視した）、それを法線方向の力と分離して直接力として感じることは困難である。ところが、接線方向のダイナミクスも向心力の増大に寄与することから、単にローポイントで牽引動作をするだけでなく、二重振子の性質を利用した巧みなムチ運動を行うことが重要であり（ターン動作中、腕とハンマーがなす角度は最大でもわずか5～10度程度である）、この感覚しにくい接線方向の運動の状態をモニタリングすることができれば、スキルトレーニングとしての技術改善に役立つと考えられる。そこで、我々はハンマーに慣性センサと呼ばれる加速度センサとジャイロセンサを組み込み、無線を介した計測制御が可能なモーションセンサを利用し、スキル向上にとって意味のある情報を抽出し、それを音として出力して運動しながら自身のスキルをモニタリングするスキルトレーニングのためのシステムを開発した。これを利用する

ことによって、たとえば練習中に、「力を込めて投擲しているにもかかわらず、ハンマーにエネルギーが効率よく伝達されていない」、「リラックスして投擲したほうが、ハンマーにエネルギーがよく伝達されている」などのようなことが実際に確認でき、学習を強化する効果が期待できる。これは一種のスキルの可視化であり、モニタリングである。

この運動の状態を音に変換する方法は聴覚フィードバックと呼ばれ、バイオフィードバックなどに用いられてきた方法の1つである。我々はこれを運動をモニタリングするためのツールとして用いており、運動スキルに関連した運動感覚をより研ぎ澄ませるための人工的な感覚（第六感）として位置づけている。すなわち、運動のスキルにとって非常に重要であるが感覚・知覚することが困難な情報を、センサなどの計測データから数理モデルを通して音などの感覚情報にリアルタイムで変換し、人間の自己組織化によって学習する能力に任せて運動スキルの向上に寄与しようとしている。このような方法は可聴化や聴覚ディスプレイ（Auditory Display）とも呼ばれ、ドイツの研究者たちを中心に運動ソニフィケーション（Movement Sonification）と称してさまざまな応用が試みられている^{2)~4)}。

ところで運動スキルといっても多岐にわたるが、一般にダイナミックな運動ではムチ運動のように一定の運動パターンが観察される。これはその運動が身体や用具のダイナミクスに強く拘束されているためと考えられ、その多くの場合、本稿で扱ったように運動スキルの主要構造は数理的に記述可能となる。そこで、その運動スキルを言語などによる顕在的な形式で伝達するのではなく、潜在的・感覚的な学習方法でヒトに伝達するという研究の目標を定め、このような新しいスキルの獲得を支援する仕組みをサイバネティック・トレーニングと呼んでいる^{5) 6)}。ただしここで扱う聴覚フィードバックは運動スキルの伝承ではなく、運動をモニタリングすることによって運動スキル獲得を促進するための方法として用いられている。



図-5 ハンマー投のためのサイバネティック・トレーニング

システムの概要

ここでは我々が開発したハンマー投のサイバネティック・トレーニングのためのシステムを紹介する。システムの概要を図-5に示す。慣性センサとそのデータを記録するメモリなどを組み込んだ小型モーションセンサ（ロジカルプロダクト社製、1kHz、45×30×20mm、約25g）をハンマーのワイヤ部分に固定した。このモーションセンサはタブレット端末またはPCから無線で制御可能で、運動中も含めて計測データを無線で送信することができる。モーションセンサから無線で送信されるデータはタブレット端末のカメラ、またはワイヤレスカメラで撮影した動画と同期してタブレット端末に保存され、同期再生することができる。一方、ワイヤレスモーションセンサのデータはワイヤレススピーカに直接送信され、計測された信号はDSP（Digital Signal Processor）による高速な処理によって音の情報に変換される。これらの無線の通信やDSPによる信号処理等に要する時間は1ms以内を実現し、ワイヤレススピーカから出力される音にほとんど遅れを感じない程度である。

ハンマーの接線方向のエネルギー供給率を可聴化しモニタリングするシステムを実現するため、ワイヤレスモーションセンサによって計測した信号から回転のエネルギー変化率を計算する。平面内の運動のハンマーの回転のエネルギー変化率を計算すると、それはハンマーの角加速度ベクトルと角速度ベ



図-6 モーションセンサを用いたトレーニング風景

クトルとの内積に比例するので、これを音情報に変換する。これらの信号はジャイロセンサから計測される角速度を用いてDSPによって音の高低に変換し、1ms以下の遅れでスピーカから音が出力されるシステムを構築した。なお、エネルギー変化率は正負を含む信号であるので、異なる位置に配置された2つのスピーカによって正負の信号を区別して表現している。音の信号はそのエネルギー変化率の大きさに応じて、信号のピッチ情報に変換する。たとえば、最も簡単な方法としてはV-F変換を施すが、エンジン音を用いるなどの工夫も行っている。タブレット端末では、慣性センサの情報を利用したさまざまな情報が提供され、カメラで撮影した動画と同期して再生が可能である。

この信号を利用してハンマー投の投擲スキルを改善するトレーニングツールとして聴覚フィードバックシステムを開発した（システムの概要は文献7）も参照されたい）。このように回転のエネルギー変化率を聴覚情報に変換し、それを選手がモニタリングすることを通じて運動スキルの学習を促進するサイバネティック・トレーニングを実現した。図-6には、このシステムを使ったロンドン・オリンピック前の合宿でのトレーニング風景を示した。

これを利用した筆者の1人は、科学と現場が近年近くなり始めたと感じている。以前は現場に持ち込めるような機材がなかったが、このようにウェアラブルなものになれば、運動中にも邪魔にならない。

サイバネティック・トレーニングは、現場と理論のコラボレーションを実現する未来志向のトレーニング方法である。しかし、運動中に抽出されたデータが選手にとって本当に必要な情報なのかはよく考えなければならない。もしくはコーチにとって本当に有益な情報なのか、しっかりと目的を定めなければ、このような高機能デバイスを作成したとしても意味をなさない。運動中に知る必要のある情報、運動後に知りたい情報など、まだまだ現場と科学者が共同で整理することが重要であると感じている。

今後は、すべてのハンマーや円盤などにセンサ搭載型の道具を投擲する競技会を実際に開催し、その情報を試合会場の観客のスマートフォンやタブレット端末などにWi-Fiで提供するなどして、これを競技会のエンタテインメント性を向上させる道具にも利用できるのではないかと筆者らは考えている。

サイバネティック・トレーニングの可能性

一般に身体の構造はリンク機構でモデル化され、このリンク機構という共通した構造が身体運動を拘束することから、外力が作用しないなど末端の負荷が少ない運動の場合は運動連鎖などとも呼ばれるムチ運動という共通した運動パターンが観察される。なぜなら、特に末端側（遠位側）のリンク間のエネルギー伝達では内力、とりわけ向心力が支配的で、この内力が媒介するエネルギー伝達では、リンク間の位相遅れが必要となるからである。特に身体の末端では、筋肉はこの伝達を促すように作用し、あくまでも添え物である。このようにハンマー投に限らず多くの運動では、身体と環境（ここでは道具も環境とする）間でのエネルギー伝達の最大化が運動を強く支配する。たとえば、ハンマー投では身体からハンマーへのエネルギー伝達が制御の主要な目的関数となる。ゴルフスイングでは腕からゴルフクラブへ、そしてクラブからボールへのエネルギー伝達が、ランニング動作やジャンプ動作では逆に身体が床（環境）から効率よくエネルギーを受け取ること

が課題となる。

ハンマー投では約 3000N もの力が身体各部に作用するにもかかわらず、よい投擲の場合「不思議なことにすべてのタイミングがピタリと揃うと身体にかかる負荷をまったく感じない⁸⁾」。ハンマー投に限らず、このような理想の運動がより多く実現できるようなトレーニング支援装置の開発を目指し、2020年の東京オリンピック・パラリンピックでこの装置を利用した選手がメダルを獲得する日を夢見ている。

参考文献

- 1) Hazen, Z. : Kinetic Energy in Various Thrown Projectiles, http://www.sports.sfc.keio.ac.jp/~kenohta/Hammer_Throw/Kinetic_Energy.html (2013).
- 2) Effenberg, A. : Movement Sonication, Effects on Perception and Action. *MultiMedia, IEEE*, Vol.12, pp.53-59 (2005).
- 3) Dubus, G. and Bresin, R. : Sonication of Physical Quantities Throughout History, A Meta-study of Previous Mapping Strategies, *Proceedings of the 17th International Conference on Auditory Display* (2011).
- 4) Brock, H., Schmitz, G., Baumann, J. and Effenberg, A. O. : If Motion Sounds, Movement Sonication Based on Inertial Sensor Data, *Procedia Engineering*, Vol.34, pp.556-561 (2012).
- 5) 太田 憲, 室伏広治: ハンマー投の力学と新しいトレーニング方法の開発, *日本機械学会誌*, Vol.113, No.1095, pp.109-112 (2010).
- 6) 太田 憲, 梅垣浩二, 室伏広治, 羅 志偉: ハンマー投のダイナミクスに基づくサイバネティック・トレーニング, *バイオメカニクス研究*, Vol.17, No.1, pp.22-36 (2013).
- 7) 高橋史忠, 大下淳一: 第3部, アスリートの神秘を電子技術が解き明かす (特集: スポーツ未開の大陸), *日経エレクトロニクス*, Vol.1087, pp.54-65 (2012).
- 8) 室伏広治: 深部感覚と運動スキル, *体育の科学*, Vol.63, pp.124-136 (2013).

(2014年8月4日受付)

太田 憲 kenohta@sfc.keio.ac.jp

1995年筑波大学大学院博士課程体育科学研究科単位取得退学。1995年博士(体育科学)。1995年理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センター。2002年Max Planck Institute for Human Cognitive and Brain Science。2006年国立スポーツ科学センターを経て、現在慶應義塾大学政策・メディア研究科特任准教授。

室伏広治

1997年ミズノ(株)。2004年アテネオリンピック、男子ハンマー投優勝。2011年世界陸上競技選手権大会(大邱)、男子ハンマー投優勝。2008年中京大学大学院体育学研究科博士課程修了、博士(体育学)。2010年中京大学大学院体育研究科研究員客員教授。2011年中京大学スポーツ科学部競技スポーツ科学科准教授。2014年10月より東京医科歯科大学スポーツサイエンスセンター教授。