

運動の上達と自己組織化

工藤和俊（東京大学大学院情報学環・学際情報学府、准教授）

はじめに

筆者の研究室がある駒場キャンパスでは、生協食堂前で踊る学生の姿が日常風景になって久しい。踊っているのはストリートダンスである。学生たちはロックやヒップホップなど現代的な音楽に合わせて、ビートに乗るように弾み

踊る。年甲斐もなく真似しようとするフォークダンス世代にはこれがなかなか難しい。音楽のテンポが速いことに加えて、リズムを合わせようとすれば動きが単調になり、動きを複雑にしようとすればリズムが崩れてしまうからだ。

ストリートダンスの熟達差

実際にストリートダンスの上手な人はそうでない人に比べてどこが違うのだろうか？ 一見して分かるように、動きのレパートリーや滑らかさが異なる。加えてダンスの熟練者は、「リズム感」が違うと言われたりする。この「リズム感」とはどのようなものか検討するために、我々は次のような実験を行った。

実験に用いた課題は、「ダウン」および「アップ」と呼ばれるストリートダンスの基本運動である（図1A）。両課題はどちらもメトロノームの拍に合わせた立位での膝屈伸運動であり、「ダウン」課題では拍と膝関節の屈曲位相を同期させるのに対し、「アップ」課題では伸展位相を同期させる。ストリートダンスの熟練者および未熟練者がこの課題を40拍/分から180拍/分までのテンポで実施したところ、熟練者は（当然ながら）すべてのテンポにおいて「ダウ

ン」および「アップ」課題を安定して遂行することができた。いっぽう未熟練者は、「ダウン」課題であれば180拍/分という速いテンポであっても遂行可能であった。しかしながら、同じ膝屈伸運動であっても音と運動の位相が異なる「アップ」課題を遂行しようとする状況が一変した。すなわち、120拍/分までの比較的遅いテンポであれば行うことができたものの、140拍/分以上になると拍と膝屈曲が同期する「ダウン」の運動へと意図せず切り換わってしまう相転移現象が観察された（図1B,C）。

これらの違いは、非線形力学系モデル（Haken-Kelso-Bunzモデル）におけるパラメータダイナミクスとして表現できる。このような力学系モデルは、（運動要素の振る舞いに関する個別の指定なしに）特定の制御パラメータ変化によって各要素が自律的に相互作用し運動パ

ターンが組織化されることを示唆していることから、運動の自己組織化モデルと呼ばれる。

自己組織化モデルで記述可能な運動の切り替わりは、音と運動の同期課題だけでなく、体肢間協調課題や対人間協調課題にも認められる一般的な特徴であり、特定の身体部位に依存しない (Miura et al., 2016)。その意味で、熟練者ではない一般の人々が様々な運動課題を遂行しようとする際の普遍的な「制約」であるといえ

る。この制約のために、たとえばストリートダンス運動では未熟練者が音に同期させることのできる運動局面が限定されたり、あるいは意図しない動きが音に同期してしまうことにより、「ぎこちない」パフォーマンスになってしまう。いっぽう熟練者は練習の積み重ねによってこの制約から解放され、同時に滑らかで洗練された表現への自由を獲得しているといえる。

ドラム演奏の非線形力学系モデル

同様のことは、熟練ドラム奏者を対象とした研究からも示唆されている (Fujii et al., 2010)。一般に、人間には利き手があり、非利き手の動きは利き手に比べて遅くぎこちなくなる。このような左右差は、両手ですばやく安定した演奏を行うための制約となる。我々の研究では Haken-Kelso-Bunz モデルを拡張することにより、熟練ドラマーと非ドラマーの違いをモデル上のパラメータ操作によって再現することができた (図2A)。このとき、モデルにおける手機能の左右差を表す項 ($\Delta \omega$) のみを変化させ、

雑音 (ノイズ) 項を含めた残りの変数をドラマーと非ドラマーとで一致させても両者の違いが再現できることが確認された。さらにモデル上で算出された左右手の機能差項 ($\Delta \omega$) と実験的に計測された両手タッピングの最大周波数差 ($\Delta \Omega$) が高い相関を示すことから、モデルにおける左右差項が実際の左右差に強く関連していることが確認できた (図2B)。したがって、すばやく安定した両手交互ドラミング動作の上達とは、この左右差という制約からの解放としてモデル化できる。

上達のプロセス

運動の学習はかつて、繰り返しによる運動パターンの記憶定着であると考えられていた。それに対し、これら一連の研究は、運動の学習が「パターンの記憶」ではなく、「制約からの解放/自由の獲得」であることを意味している。

さらに、これらの力学系モデルのパラメータを操作して熟達化のプロセスを再現してみる

と、練習に伴ってパフォーマンスが急激に向上する時期や、練習してもパフォーマンスがなかなか向上せず停滞してしまう、「学習のプラトー」と呼ばれる時期が現れる (図2C)。すなわち学習の停滞 (「伸び悩み」) とは、順調な学習のプロセスにおいて必然的に現れる現象であって、学習の「つまづき」ではない可能性が

ある (Kudo et al., 2011)。このような見方は、「伸び悩み」の原因を「やる気」や「自意識 (たとえばパフォーマンスが順調に向上したことによる慢心)」を含めた「こころ」の中に求め、「こころ」の問題として扱う立場とは異なる。その

意味で、熟達化への自己組織化アプローチは、「制約からの解放/自由の獲得としての運動学習」という見方をもたらずに留まらず、ひいては「こころの解放」にもつながるのではないかと考えている。

References

- Fujii, S., Kudo, K., Ohtsuki, T., & Oda, S. (2010) Intrinsic constraint of asymmetry acting as a control parameter on rapid, rhythmic bimanual coordination: A Study of professional drummers and nondrummers. *Journal of Neurophysiology*, 104(4), 2178-2186.
- Kudo, K., Miyazaki, M., Sekiguchi, H., Kadota, H., Fujii, S., Miura, A., Yoshie, M., & Nakata, H. (2011) Neurophysiological and dynamical control principles underlying variable and stereotyped movement patterns during motor skill acquisition. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 15(8), 942-953.
- Miura, A., Kudo, K., Ohtsuki, T., & Kanehisa, H. (2011) Coordination modes in sensorimotor synchronization of whole-body movement: A study of street dancers and non-dancers. *Human Movement Science*, 30(6), 1260-1271.
- Miura, A., Fujii, S., Okano, M., Kudo, K., & Nakazawa, K. (2016) Finger-to-beat coordination skill of non-dancers, street dancers, and the world champion of a street-dance competition. *Frontiers in Psychology*, 7:542.

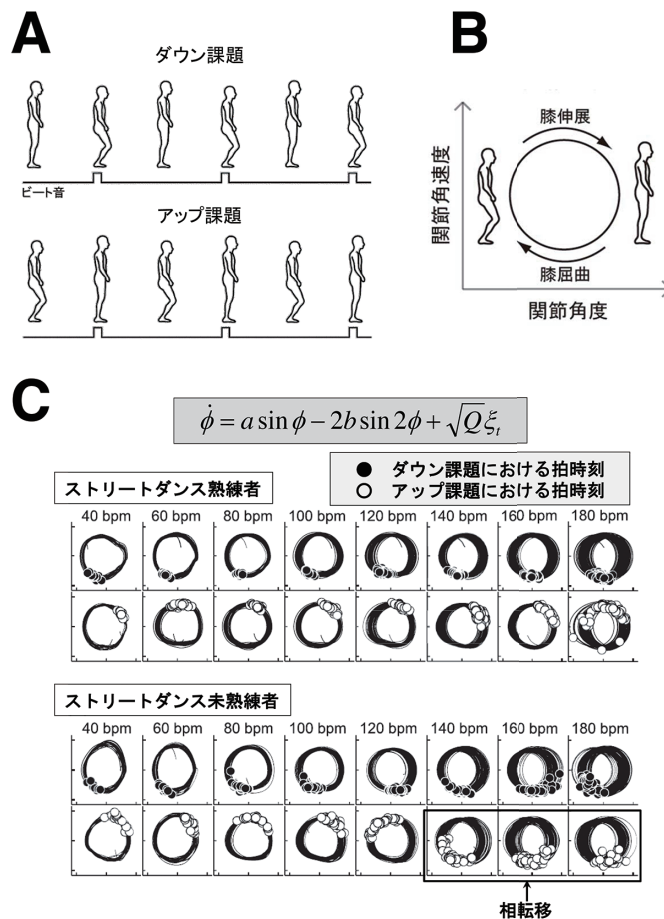


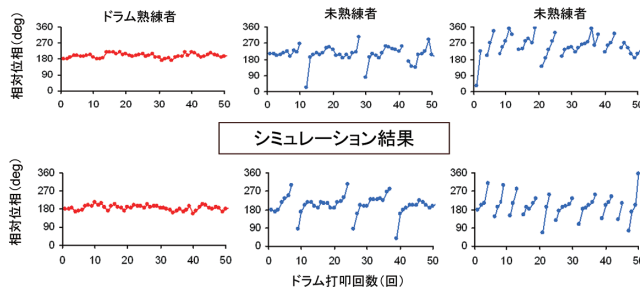
図1. A. ストリートダンスにおけるダウン課題とアップ課題。B. 膝関節の角度-角速度プロット。C. ストリートダンス熟練者および未熟練者におけるダウンおよびアップ課題のパフォーマンス。

ストリートダンス熟練者および未熟練者が40拍/分 (bpm) から180拍/分のテンポでダウン課題（膝の屈曲と拍が同期）およびアップ課題（膝の伸展と拍が同期）を行った。このとき未熟練者では、ビート音が140拍/分になるとアップ動作を遂行しようとしているにも関わらず、ダウン動作に切り替わってしまった。この振る舞いは力学系モデルにおける分岐現象（相転移）として理解できる。式中の ϕ は音と運動の位相差、 Q はノイズの大きさ、 ξ_t は白色ガウス分布に基づく確率変数、 a および b は速度および熟練度に依存する分岐パラメータを表す。

A

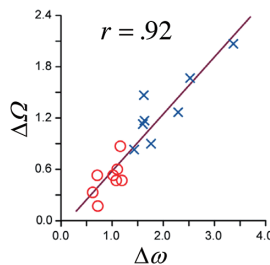
$$\dot{\phi} = a \sin \phi - 2b \sin 2\phi - c \sin(\phi - \psi) - \Delta\omega - d \cos \phi + \sqrt{Q} \xi_t$$

観察結果



シミュレーション結果

B



C

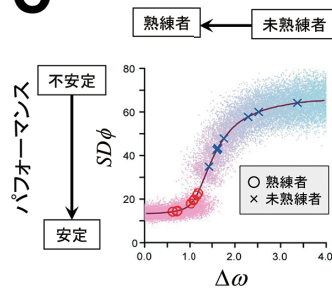


図2 A. 両手交互ドラム演奏における左右手運動の相対位相およびそのシミュレーション結果。B. 力学系モデルから算出された左右差 ($\Delta\omega$) と左右手の最大周波数差として実験的に計測された左右差 ($\Delta\Omega$)。C. 学習に伴うパフォーマンス変動の減少。

ドラム動作における相対位相 (ϕ , 左右手動作の位相差) の非線形微分方程式モデルを作成し、左右差項 ($\Delta\omega$) を系統的に変化させることで、熟練ドラム奏者および非ドラム奏者の動作パターンを再現することができた。 a, b, c, d, Q, ψ は定数、 ξ_t は白色ガウス分布に基づく確率変数。このとき $\Delta\omega$ と $\Delta\Omega$ の間には高い相関が認められた。また力学系モデルにおいて $\Delta\omega$ を線形に減少させることにより、シグモイド型のパフォーマンス曲線が描かれた。このモデルでは、学習に伴いパフォーマンスが急激に安定化する時期を経て、パフォーマンス向上の停滞期が現れる。



工藤 和俊 (くどう・かずとし)

[生年月] 1967 年 2 月 25 日

[最終学歴] 東京大学大学院総合文化研究科博士課程修了 (学術博士)

[専攻領域] 身体運動科学、運動学習／制御論

[主たる著書・論文]

Ota, K., Shinya, M., & Kudo, K. (2015) Motor planning under temporal uncertainty is suboptimal when the gain function is asymmetric. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 9:88.

Miyata, K. & Kudo, K. (2014) Mutual stabilization of rhythmic vocalization and whole-body movement. *PLoS ONE*, 9(12): e115495.

工藤和俊 (2013) 協応する身体. 知の生態学的転回第 1 巻 身体：環境とのエンカウンター (佐々木正人 編), 東京大学出版会, pp. 115-131.

[所属] 情報学環 先端表現情報学コース / 文化人間情報学コース

[所属学会] 日本体育学会、日本スポーツ心理学会、日本生態心理学会、日本神経科学会