

# アクセントは全身を用いたリズムミクな 聴覚 - 運動協調を安定化させる

恵谷隆英<sup>1,a)</sup> 三浦哲都<sup>2</sup> 岡野真裕<sup>1</sup> 田野崎はるか<sup>1</sup> 進矢正宏<sup>3</sup> 工藤和俊<sup>4</sup>

## 概要 :

本研究は、全身を用いたリズムミクな聴覚 - 運動協調の安定性に対するアクセントの影響を検討した。14名の成人が参加し、120 bpm から 480 bpm まで加速するメトロノームに合わせて膝屈伸運動を行った。3種類の音 - 運動の組み合わせ、(1) 大きい音に屈曲、小さい音に伸展を合わせる条件 (大 - 屈条件) (2) 小さい音に屈曲、大きい音に伸展を合わせる条件 (小 - 屈条件) (3) アクセントがない条件 (コントロール条件) を設け、協調の安定性を比較した。課題中に実験参加者の膝関節角度を記録し、 $\theta = \arctan(\dot{\theta} / \ddot{\theta})$  で定義されるビート時刻における位相角の分散を各条件で比較した ( $\theta$  は関節角度、 $\dot{\theta}$  は関節角速度)。結果、大 - 屈条件の分散が他の 2 条件よりも小さく、コントロール条件の分散が他の 2 条件よりも大きいことが示された。以上より、(1) アクセントが全身を用いたリズムミクな聴覚 - 運動協調を安定化させること、また (2) アクセントに対して屈曲運動を合わせた場合に協調が特に安定することが示された。

キーワード : 聴覚 - 運動協調、リズム、知覚、ダンス

## Accent stabilizes auditory-motor coordination of rhythmic whole-body movement

TAKAHIDE ETANI<sup>1,a)</sup> AKITO MIURA<sup>2</sup> MASAHIRO OKANO<sup>1</sup> HARUKA TANOSAKI<sup>1</sup> MASAHIRO SHINYA<sup>3</sup>  
KAZUTOSHI KUDO<sup>4</sup>

### 1. はじめに

ヒトは音楽を聴くとリズムに合わせて手を叩く、足踏みをする、踊るなどのように、音と身体運動のあいだには分ち難い結びつきがある。このような音と身体運動の関係性は、文化によらず世界中にみられる普遍的なものである [1]。また、音と身体運動の結びつきは神経科学的にも裏付けられており、音楽、あるいは音を聴くと聴覚野だけで

なく、補足運動野、前補足運動野などの運動を司る部位も同時に活動することが示されている [2]。

音と身体運動の関係性については、主にメトロノーム音に合わせたタッピングなどの聴覚 - 運動協調課題を通して調べられている。近年、力学系アプローチにより、ヒトには内在的に安定する聴覚と運動の協調パターンが存在することが示された。たとえば、音に対して指の伸展運動を合わせた場合、徐々にテンポを上げていくと相転移を起こすことが示されている [3]。屈曲運動を合わせる条件では相転移が起きにくいことから、聴覚 - 運動協調では音に対して屈曲運動を合わせる方が安定することが示されている。音に対して屈曲運動を合わせる協調パターンが伸展運動を合わせる協調パターンよりも安定するという事実は指だけでなく、手首 [4]、腕 [5]、全身 [6] など、様々な身体部位において観測されている。

<sup>1</sup> 東京大学大学院 総合文化研究科  
Meguro, Tokyo 153-8902, Japan

<sup>2</sup> 早稲田大学 スポーツ科学学術院  
Tokorozawa, Saitama 359-1192, Japan

<sup>3</sup> 広島大学大学院 総合科学研究科  
Higashihiroshima, Hiroshima 739-8521, Japan

<sup>4</sup> 東京大学大学院 情報学環  
Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan

a) etani7@gmail.com

以上のように、ヒトには内在的に安定する聴覚 運動協調のパターンがあることが示されているが、聴覚 - 運動協調の安定性は様々な環境の影響によって変化することも知られている。最も多く報告されているのは、運動に対する制約の影響である。たとえば、重力を人工的に変化させると屈曲運動よりも伸展運動が安定すること [4]、状態 (姿勢) を変化させると安定性が変化することも示されている [8]。他にも神経系、筋骨格系による制約 [9]、外力 [10] など、運動の制約によって聴覚 運動協調の安定性が変化することが報告されている。

一方で、運動ではなく聴覚に対する制約、つまりメトロノームの音情報がどのように安定性に寄与するかについては未だに多くのことが分かっていない。これまでに明らかにされていることとして、メトロノームの音が増加する、つまり運動を協調させるアンカリングの情報が増加すると協調がより安定することが挙げられる [11][12][13]。以上の研究では、音に対して屈曲運動が伸展運動の一方のみを合わせる条件 (シングルメトロノーム条件) と、音に対して屈曲運動と伸展運動の両者を合わせる条件 (ダブルメトロノーム条件) を比較し、後者において協調がより安定することが示されている。しかし、以上の研究で扱われた刺激の最大テンポはそれぞれ 3、3、1.33 Hz (ダブルメトロノーム条件で提示されたメトロノームのテンポは 6、6、2.66 Hz) であったことから、それ以上のテンポについては明らかにされていない。ヒトが知覚可能なテンポには限界があること (平均で 123 ms、個人差を考慮すると 97-170ms) [14] から、速いテンポではダブルメトロノーム条件において協調が困難になると予想される。さらに力学系の理論では、音に対して屈曲運動が引き込まれることが HKB モデルを通して明らかにされている [6][7]。以上の事実は、速いテンポの条件では、ダブルメトロノームにおいて音に対して屈曲運動と伸展運動を交互に合わせるのではなく、すべての音に対して屈曲運動が引き込まれてしまう可能性を理論的に示唆している。つまり、ダブルメトロノーム条件が必ずしも協調を安定化させるとは限らず、協調を安定させるためにはダブルメトロノーム条件であるだけでなく、他の情報が必要であると考えられる。

先行研究によって、ヒトが音の情報に対して空間的な表象を有しており [15]、その表象が運動に影響を与えることが示されている [16]。よって、音の情報 (音高、音圧など) が聴覚 運動協調の安定性に寄与する可能性が示唆されている。

そこで本研究ではダブルメトロノーム条件において、音圧という音情報に焦点を当て、音圧差の有無がどのように聴覚 運動協調の安定性に影響を与えるか検討することを目的とした。

## 2. 方法

### 2.1 実験参加者

14 名の健常な成人 (21-31 歳) が実験に参加した。書面と口頭による教示のあと、すべての実験参加者は実験への参加に同意し、参加同意書に署名した。

### 2.2 実験手続き

実験参加者には、メトロノームに対してリズム的な膝屈伸運動を同期させるように求めた (1 つの音に対して屈曲運動、1 つの音に対して伸展運動)。課題遂行中、実験参加者には両手を身体の前で組むように求め、視覚的な影響を排除するために目の前の暗幕を注視ように指示した。暗幕は実験参加者の 70 cm 前方に、スピーカー (Foster Electric Company Ltd., Japan) を 50 cm 後方、床から 88 cm の位置に設置した。

### 2.3 刺激

実験には 3 種類のメトロノームを用いた。(1) 大きい音と小さい音が繰り返されるもの、(2) 小さい音と大きい音が繰り返されるもの、(3) 同じ大きさの音 (大きい音) が繰り返されるものである。すべてのメトロノームは Matlab を用いて作成し、音は周波数 440 Hz、長さ ms の純音 (サイン波) に統一した。また、各メトロノームは計 220 の音から構成され、120 bpm から 480 bpm まで対数的に bpm が増加するように作成した。音圧差があるメトロノームについては、小さい音と大きい音の振幅の比を 1:9 にした。

### 2.4 実験条件

3 つの音 - 運動の組み合わせ条件と、2 つの開始運動条件より、6 つの条件を設けた。3 つの音 - 運動の組み合わせ条件は、(1) 大きい音に対して屈曲運動、小さい音に対して伸展運動を合わせる条件、(2) 小さい音に対して屈曲運動、大きい音に対して伸展運動を合わせる条件、(3) 屈曲、伸展運動を大きい音に合わせる条件である。2 つの開始運動条件は、(1) 屈曲運動から開始する条件、(2) 伸展運動から開始する条件である。本研究の目的は音 - 運動の組み合わせの影響を検討することであったが、予備実験を行ったところ、開始運動の条件によって結果が異なることが予想された。音 - 運動の組み合わせ、および開始運動の条件のあいだに相互作用がみられる可能性が考えられたため、本研究では開始運動の条件も設けた。すべての実験参加者は以上の 6 条件を 3 セット、合計 18 試行を行った。

### 2.5 実験機器とデータ収集

課題中、関節角度計 (Biometrics Ltd, UK) を用いて実験参加者の右膝の関節角度を記録した (サンプリング周

波数：1000 Hz)。関節角度計は DAQ デバイス (National Instruments, USA) に接続し、LabVIEW を用いてデータを記録した。メトロノームは iPhone 6S (Apple, USA) を用いて再生した。

## 2.6 解析

解析は Matlab を用いて行った。本研究では、協調の安定性の指標として、運動の位相角の分散を算出した。

はじめに 10 Hz のローパスフィルタを用いて角度データを平滑化した。次に、角度を微分することで角速度を求め、各試行において、各ビート間で角度と角速度を標準化 (Zスコア化) した。次に、 $\theta = \arctan(\dot{\theta} / \theta)$  で定義される各ビートの発音時刻における位相角を算出した ( $\dot{\theta}$  が角速度、 $\theta$  が角度)。最後に、位相角を 10 種類のテンポ範囲に分割し、各テンポ範囲における位相角の分散を算出した。

すべての試行において、屈曲と伸展における位相角が求まることから、本研究では屈曲と伸展を合わせて 1 つのサイクルとし、屈曲と伸展における分散を平均し、1 サイクルにおける協調の安定性の指標とした。また、本研究では学習効果をみるのが目的ではなかったため、3 セットの平均値を代表値として扱った。

## 3. 結果

### 3.1 位相角の分散

各条件における位相角の分散を比較した。球面性検定の結果に応じて、Greenhouse-Geisser の による自由度の調整を行った。3 要因分散分析 (組み合わせ [大 - 屈; 小 - 屈; コントロール]、開始条件 [屈曲; 伸展]、テンポの範囲 [60-; 69-; 79-; 91-; 105-; 120-; 138-; 159-; 183-; 210-bpm]) の結果、組み合わせ ( $F(1.21, 15.74) = 10.1232, p = 0.0042$ )、開始条件 ( $F(1, 13) = 14.6831, p = .0021$ )、テンポ ( $F(2.01, 26.19) = 58.4843, p < .001$ ) の主効果が有意となった。また、組み合わせ  $\times$  開始条件 ( $F(1.9, 24.68) = 3.4998, p = .0481$ )、組み合わせ  $\times$  テンポ ( $F(2.91, 37.86) = 4.2070, p = .0122$ ) の一次交互作用が有意となった。他の交互作用はすべて有意でなかった。

組み合わせの主効果について多重比較を行ったところ (図 1)、大 - 屈の分散は他の 2 つの条件よりも有意に小さく、コントロールの条件は他の 2 つの条件よりも有意に大きかった ( $p < .05$ )。また、開始運動の主効果について多重比較を行ったところ、伸展運動から開始した条件における分散が屈曲運動から開始した条件の分散よりも有意に大きかった ( $p < .05$ )。つまり、組み合わせについては大 - 屈が最も易しく、次に易しいのが小 - 屈、最も困難であったのがコントロールであること、そして開始条件については屈曲運動と比較して伸展運動から開始する条件の方が困難であることが示された。

次に、組み合わせ  $\times$  テンポの範囲 (10 種類のテンポを

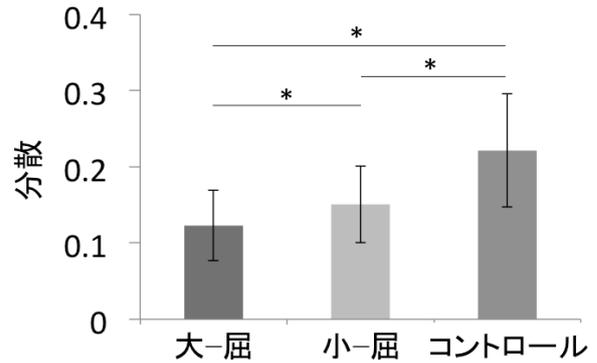


図 1 位相角の分散 (\*  $p < .05$ )

以下 T1-T10 と表記) について多重比較を行った。結果、T5 (60- bpm から 105- bpm) までには有意な差は認められなかった。T6 (120- bpm) では大 - 屈が他の 2 つよりも有意に小さく、T7 (138- bpm) ではコントロールが他の 2 つよりも有意に大きく、T8 (159- bpm) では大 - 屈が他の 2 つよりも有意に小さく、小 - 屈がコントロールよりも有意に小さい結果となった ( $p < .05$ )。T9 (183- bpm) と T10 (210- bpm) では有意差は認められなかった。次に、組み合わせ  $\times$  開始条件について多重比較を行った結果、屈曲開始運動においては屈 - 大が他の 2 つよりも有意に小さく、伸展開始では、コントロールが他の 2 つよりも有意に大きい結果となった ( $p < .05$ )。

以上の結果をまとめると、(1) アクセント情報が聴覚運動協調を安定化させること、(2) アクセントに屈曲運動を合わせると特に安定することが示された。

## 4. 考察

位相角の分散を比較した結果、(1) アクセントがあると協調パフォーマンスが安定すること、(2) アクセントに対して屈曲運動を合わせるとより安定することが示された。

### 4.1 アクセントの影響

位相角の分散を比較した結果、アクセントのないコントロール条件における位相角の分散がアクセントのある 2 つの条件 (大 - 屈、小 - 屈) よりも大きくなること、すなわち仮説通り、アクセントがあると協調の安定性が向上することが示された。

先行研究では、ダブルメトロノーム条件がシングルメトロノーム条件よりも安定することが示されていた [11][12][13]。しかし、本研究では先行研究よりも速いテンポの条件を検討したところ、アクセントがない条件では協調が安定しなかったことから、ダブルメトロノーム条件は必ずしも聴覚 - 運動協調を安定化させるとは限らないことが示唆された。

アクセントがない条件において協調が困難になった理由

として考えられるのは、本研究で用いた聴覚刺激のテンポ (120–480 bpm、125–500 ms) が、同じ音が再生された場合にヒトが運動を合わせられる聴覚刺激の最大テンポを超えていたという可能性である。先行研究によって、指を用いたメトロノームに対する協調可能な最大テンポが、1:1 のタッピングでは 160–220 ms [17]、2:1 のタッピング (2 つの音に対して 1 回のタッピング) では 97–170 ms (平均 123 ms) であることが示されている。また、メトロノームなどのビートを知覚している際にはビートと脳波 (EEG) が同期するが [18]、IOI が 100–160 ms になると脳波の同期が失われることも示されている [19]。本研究で使用した最大テンポが、ダブルメトロノーム条件では 8 Hz (480 bpm、IOI は 125 ms) であったことから、テンポの速さが聴覚運動協調を困難にしたと考えられる。

次に、同じ時間間隔で呈示されているにも関わらず、アクセントがある場合に協調が安定した理由について考察する。まず、実験参加者はアクセントがある条件において、2 つの音を 1 つのまとまりとして捉え、そのまとまりに対して屈曲運動 (あるいは伸展運動) を協調させていた可能性が考えられる。そのことによって、結果的に協調が容易になったと考えられる。その場合、音脈分凝 (auditory stream segregation) という現象が寄与していた可能性が考えられる。音脈分凝とは、音脈が複数に分離して聴こえる現象を指す [20]。たとえば、高い音と低い音が繰り返し再生される場合、音の間隔 (ITI, Interonset-interval) が長いときには高い音と低い音が繰り返される 1 つのまとまり (音脈) として知覚されるが、ITI が短くなると高い音と低い音が 2 つの異なる音脈として知覚される [21]。音脈分凝は、音の高さだけでなく音の大きさについても同様に発生することが示されている [22]。つまり、本実験においてもアクセントがある条件では、速いテンポでは大きい音のまとまり、小さい音のまとまりというように、刺激が 2 つの音脈に分かれて知覚されることで、実質的にはアクセントがない条件と比較して半分のテンポで刺激を知覚し、運動を協調させていたと解釈できる。

以上をまとめると、アクセントが聴覚運動協調の安定性を向上させたプロセスとして、(1) 速いテンポで提示される音に運動を協調させることは困難であるが、(2) アクセントがあると音脈分凝が起き 2 つの異なる音のまとまりとして、つまり半分のテンポでメトロノームを知覚し、(3) 片方のまとまり (大きい音のまとまり、あるいは小さい音のまとまり) に対して屈曲か伸展を合わせるという方略をとることが可能になり、協調が安定したと解釈できる。

#### 4.2 特定の音が特定の運動を組織化する理由

位相角の分散を比較した結果、アクセントがある条件の中でも、アクセントに屈曲を合わせる条件が、アクセントに伸展を合わせる条件よりも安定することが示された。

以上の理由として、ヒトが音に対して持っている空間的な表象が寄与している可能性が考えられる。ヒトは空間、時間、量を共通の神経系で処理する、つまりヒトは空間、時間、量について表象を共有していると考えられている [23]。そして、音の高さに対しても方向など空間的な表象を有していることが確かめられている [15]。現時点では、音圧に対してヒトがどのような空間的な表象を有しているかは明らかにされていないが、1 つの可能性として、ヒトは大きな音に対して下方向、小さな音に対して上方向の空間的な表象を有しており、それが大きな音に対して下方向への注意を強め、屈曲運動 (下方向への運動) を合わせやすくした可能性が考えられる。空間の表象が単純反応課題だけでなく [15]、運動計画にも影響を与えることがすでに示されていることから [16]、表象が本研究の結果に寄与していた可能性は十分に考えられる。

## 5. 結論

本研究より、全身運動を対象とした聴覚運動協調課題において、(1) アクセントがあると協調が安定すること、(2) アクセントに対して屈曲運動を協調させるとより安定することが示された。

謝辞 本研究は、公益財団法人ヤマハ発動機スポーツ振興財団による研究助成 (平成 29 年度) を受けた。

## 参考文献

- [1] Brown, S. (2003). Biomusicology, and three biological paradoxes about music. *Bulletin of Psychology and the Arts*, 4(1), 15–17.
- [2] Merchant, H., Grahn, J., Trainor, L., Rohrmeier, M., Fitch, W. T. (2015). Finding the beat: a neural perspective across humans and non-human primates. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 370, 20140093.
- [3] Kelso, J. A. S., DelColle, J. D., Schner, G. (1990). Action-perception as a pattern formation process. In M. Jeannerod (Ed.), *Attention and performance XIII* (pp. 139–169). Erlbaum, Hillsdale, NJ.
- [4] Carson, R. G., Oytam, Y., Riek, S. (2009). Artificial Gravity Reveals that Economy of Action Determines the Stability of Sensorimotor Coordination. *PLoS ONE*, 4(4).
- [5] Carson, R. G. (1995). The dynamics of isometric bimanual coordination. *Experimental Brain Research*, 105(3), 465–476.
- [6] 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.
- [7] Miura, A., Kudo, K., Nakazawa, K. (2013). *Action perception coordination dynamics of whole-body rhythmic movement in stance: A comparison study of street dancers and non-dancers*. *Neuroscience Letters*, 544, 157162.

- [8] Carson, R. G., Riek, S. (1998). The influence of joint position on the dynamics of perception-action coupling. *Experimental Brain Research*, 121, 103–114.
- [9] Carson, R. G. (1996). Neuromuscular-skeletal constraints upon the dynamics of perception-action coupling. *Experimental Brain Research*, 110(1), 99–110.
- [10] Riek, S. (2004). The effects of viscous loading of the human forearm flexors on the stability of coordination. *Human Movement Science*, 23, 431–445.
- [11] Byblow, W. D., Carson, R. G., Goodman, D. (1994). Expressions of asymmetries and anchoring in bimanual coordination. *Human Movement Science*, 13, 3–28.
- [12] Fink, P. W., Foo, P., Jirsa, V. K., Kelso, J. A. S. (2000). Local and global stabilization of coordination by sensory information. *Experimental Brain Research*, 134, 9–20.
- [13] Kudo, K., Park, H., Kay, B. a, Turvey, M. T. (2006). Environmental coupling modulates the attractors of rhythmic coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32(3), 599–609.
- [14] Repp, B. H. (2003). Rate Limits in Sensorimotor Synchronization With Auditory and Visual Sequences: The Synchronization Threshold and the Benefits and Costs of Interval Subdivision. *Journal of Motor Behavior*, 35(4), 355–370.
- [15] Chiou, R., Rich, A. N. (2012). Cross-modality correspondence between pitch and spatial location modulates attentional orienting. *Perception*, 41(3), 339–353.
- [16] Rinaldi, L., Lega, C., Cattaneo, Z., Girelli, L., Bernardi, N. F. (2016). Grasping the sound: Auditory pitch influences size processing in motor planning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 42(1), 11–22.
- [17] Repp, B. H. (2005a). Rate limits of on-beat and off-beat tapping with simple auditory rhythms: 1. Qualitative observations. *Music Perception*, 22(3), 479–496.
- [18] Fujioka, T., Trainor, L. J., Large, E. W., Ross, B. (2012). Internalized Timing of Isochronous Sounds Is Represented in Neuromagnetic Beta Oscillations. *Journal of Neuroscience*, 32(5), 1791–1802.
- [19] Carver, F. W., Fuchs, A., Jantzen, K. J., Kelso, J. (2002). Spatiotemporal analysis of the neuromagnetic response to rhythmic auditory stimulation: Rate dependence and transient to steady-state transition. *Clinical Neurophysiology*, 113(12), 1921–1931.
- [20] Bregman, A. S. (1990). *Auditory Scene Analysis*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- [21] Bizley, J. K., Cohen, Y. E. (2013). The what, where and how of auditory-object perception. *Nature Reviews Neuroscience*, 14(10), 693–707.
- [22] van Noorden, L. P. A. S. (1975). *Temporal coherence in the perception of tone sequences*. Unpublished doctoral dissertation. University of Eindhoven, Eindhoven, Netherlands.
- [23] Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: Common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), 483–488.