

## 人間と機械のリズムの調和に関する基礎研究

A basic research on harmonious interaction between man and machine

2001009



研究代表者	独立行政法人理化学研究所	研究員	竹市博臣
共同研究者	九州大学 芸術工学研究院	教授	中島祥好

### [研究の目的]

リズムは、「ひきこみ」という言葉にも示されるように、ものの動きや情報の流れにおける調和の基本である。人間においては音楽・言語といったコミュニケーションの基盤、機械においては動作と制御の基本であろう。リズムを持った刺激に対して、人間の心と脳は鋭敏に反応し、脳波・脳磁場に現れるような形でリズムを生みだすが、脳内のリズム情報処理に関する基礎研究は限られている。本研究では、心理学的な錯覚を応用したリズム刺激聴取時の脳波・脳磁場を分析することにより、リズム情報の時空間的脳内表現を、脳活動の計測と数理学的手法を組みあわせて解明する。

### [研究の内容, 成果]

リズムを持つ刺激に対する脳の定常反応 (Galambos et al., 1981) に関する研究は少ないが、刺激によって得られる入力リズムの規則性と人間にとっての知覚リズムの規則性の調和が、脳活動では、どこでどのようなタイミングで表現されているのかを明らかにした研究はない。本研究では、単純な(要素的な)リズム刺激によって引き起こされる錯覚現象を用いることで、物理的なリズムと知覚されるリズムを分離し、それぞれに対応する脳活動を観測することを試みた。

本研究では、実験参加者に対して、隣接する3音で定義される2つの空虚時間 T1 (第一音から第二音までの無音区間) および T2 (第二音から第三音までの無音区間) を刺激として呈示した。実験参加者が、T1 と T2 が等しい時間間隔と知覚されるか、等しくない時間間隔と知覚されるかを判断するという課題を行っている場合、および、刺激を受動的に聴取している場合の脳波・脳磁場加算平均波形を解析の対象とし、リズムパターンの要素である3音が、等しい間隔からなる等リズムと知覚されるときに脳活動と、不等リズムと知覚されるときに脳活動がどのような関係にあるのかを分析した。

この、隣接する3音で定義される2つの空虚時間という刺激は、「時間同化錯覚」と呼ばれる錯覚を引き起こすことが、長年の精神物理学的研究により知られている (Nakajima, ten Hoopen, and van der Wilk, 1991; Miyauchi and Nakajima, 2005; ten Hoopen et al., 2006)。すなわち、 $-80 \leq T1 - T2 \leq 50$  [ms] なる関係が満たされる場合は、 $T1 \neq T2$  であってもほとんどの場合  $T1 = T2$  と知覚される。とくに、 $T1 < T2$  においては、あたかも T2 が時間的に縮小したかのような速いリズムが知覚され、この現象は「時間縮小錯覚」とよばれる。そこで、物理的にはさまざまな、多くの場合  $T1 \neq T2$  となる T1 および T2 の組み合わせから、主観的には  $T1 = T2$  と等リズムに知覚されるパターン、および主観的にも  $T1 \neq T2$  と不等リズム

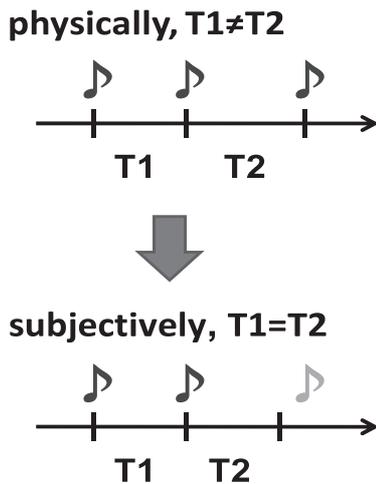


図1 刺激の模式図

に知覚されるパターンをつくり出すことができる(図1)。

Mitsudo et al. (2009) は、この錯覚に着目して3音からなるパターンを刺激として呈示し、実験参加者が刺激を聴取判断または単純聴取する際の脳波計測を行った。T1を80, 120, 160, 200, 240, 280, 320[ms]の7段階に変え、T2を200[ms]に固定し、他いくつかのダミーパターンを含めた。その結果、刺激に対して複数の誘発反応(event-related potential, ERP)が得られたが、なかでも刺激パターン全体が呈示された直後に、SNcT (slow negative component) とよばれる緩徐成分が右前頭部より記録された。SNcTは、実験参加者が刺激が等リズムかどうかを判断する場合には得られたが、受動的に単純聴取する場合には得られなかった。また、判断する場合でも、不等リズムと判断する場合の方が、等リズムと判断する場合に比べて大きな振幅が得られた。さらに、Mitsudo et al. (2010) は、同様にT1=120, 200, 280[ms], T2=200[ms]に条件をしばって、実験参加者が刺激を聴取判断または単純聴取する際の脳磁場計測を行った。本研究では、これら既存のデータに同じ計測条件で追加計測されたデータを合わせて分析の対象とした。

### 【従来のアプローチ - 脳活動の頭皮上分布の違いの比較】

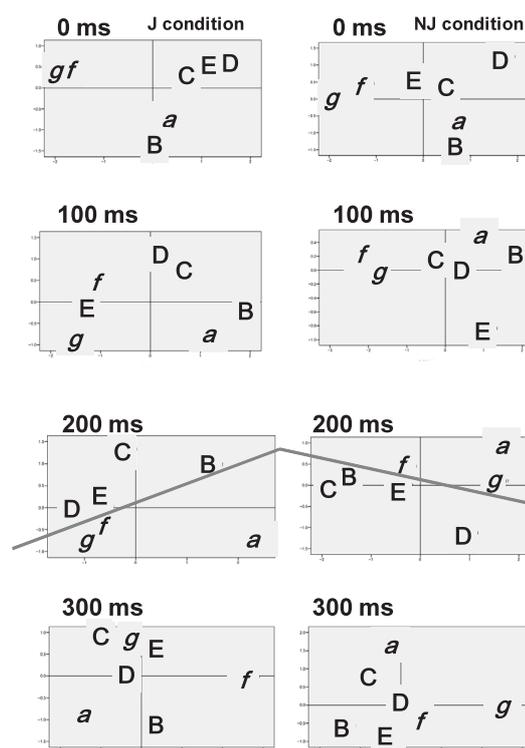
等リズム判断と不等リズム判断がおおむね拮抗するT1=280[ms]の波形について、実験参加者ごとに、等リズムと判断された場合の脳波の選択的加算平均波形および不等リズムと判断された場合の脳波の選択的加算平均波形を計算し、まずそのそれぞれについて各時点における記録電位間の標準得点を求めた。これは、各時点における脳活動の頭皮上分布を求めることに相当する。続いて、判断が分かれる波形どうし、およびすべての波形どうしのそれぞれについて、ユークリッド距離の自乗和を求め、前者の後者に対する比を「分離度」と定義した。もし等リズムと判断される場合と不等リズムと判断される場合で頭皮上分布に違いがないとすれば、この比は単純に距離を求めたペアの数の比となるので、およそ0.5に近い値となるはずである。他方もし等リズムと判断される場合と不等リズムと判断される場合で頭皮上分布に違いがあれば、違いに応じて0.5より大きな値をとるはずである。分離度を時間の関数として求めると、第二音呈示後から増大の傾向を示し、第三音呈示150[ms]後に最大値0.53をとる。Mitsudo et al. (2009)で報告されたSNcT同様に、第三音呈示後に高原状態となった。同様のタイムコースはバチャタリヤ距離と呼ばれる情報量を、等リズムと判断された場合の選択的加算平均波形と不等リズムと判断された場合の選択的加算平均波形の間で計算しても、脳波データ・脳磁場データについて、等リズムかどうかを判断する場合の加算平均波形と受動的に単純聴取する場合の加算平均波形の間で計算しても得られる。これらの分析から、刺激呈示直後のボタン押し反応をする前の段階で、等リズムと判断される場合と不等リズムと判断される場合で脳活動が異なること、換言すれば、等リズムと不等リズムの判断は比較的「初期・低次の」認知的情報処理に基づいて行われていることが示唆される。

しかし、こうした分析にはいくつかの限界が

ある。まず、実験参加者の等リズム・不等リズムの判断に関するデータがなければ選択的加算平均を行うことができないので、こうした分析はできない。実験参加者にリズム判断に関する課題を課すことが不可欠である。他方、リズムに関する情報処理は、日常においては明確な判断をしなくても自動的に行われるものであり、日常的に行われる自動的な情報処理の解明には困難を伴う。工学的な応用においても、有用なのはリズム判断そのものではなく、リズムを持った刺激を扱いながら他の何かを行っているとき（たとえば、組み立て流れ作業をしているとき）のリズム知覚の解明であろう。また、波形を時系列上で直接比較する方法は、対象とする刺激のリズムパターンが異なる場合には直接相互に比較することができないので、等リズム・不等リズムの脳内表現がどのようになっているのかを明らかにすることはできない。

**【本研究で開発したアプローチ — 相関行列の距離に多次元尺度構成法を適用する】**

そこで、第二音（T1）が呈示された後 400 [ms] の区間について、100 [ms] ずつの窓を設け、そのそれぞれの窓において、判断条件および単純聴取条件のそれぞれについて、T1 の値つまり刺激の時間パターンごとに脳波の加算平均波形の電極間の相関行列を求め、その相関行列間のユークリッド距離を、心理学的な多次元尺度構成法を用いて視覚化した。その結果を図 2 に示す。第二音（T1）呈示後 200 [ms] 経過すなわち第三音（T2）呈示直後の 100 [ms] の窓においてのみ、主に等リズムと判断されるパターンと主に不等リズムと判断されるパターンの明瞭な分離が認められた。注目すべきなのは、この結果が判断条件（左側）のみならず、単純聴取条件（右側）でも認められたということである。このことから、等リズムと不等リズムの判断は比較的「初期・低次の」認知的情報処理に基づいて自動的に行われていることが示唆される。等リズムか不等リズムかという判断



a~f は T1 を示し、a: 80, B: 120, C: 160, D: 200, E: 240, f: 280, g: 320 [ms] である。a, f, g の小文字で示されている刺激パターンは主に不等リズムと、B, C, D, E の大文字で示されている刺激パターンは主に等リズムと知覚される。左側の J condition は判断条件の結果、右側の NJ condition は単純聴取条件の結果である。布置の左肩の数字は相関行列計算窓の起点の、第二音（T1）呈示後の経過時間を表す。

図 2 相関行列の多次元尺度構成法の結果

が刺激呈示直後の 100 [ms] 以内に行われているという結果は、Nakajima et al. (2004) の処理時間仮説とも合致するものである。処理時間仮説では、知覚される空虚時間の長さは、物理的な空虚時間の長さ  $t$  に付加的な処理時間  $\alpha$  を加えた  $t+\alpha$  でおおむね説明できるとされており、精神物理学的研究から  $\alpha$  は 80 [ms] もしくはそれより短いと推定されている。

相関行列の間の距離からその表現を推定する方法には、以下のような特長がある。まず、脳波記録チャンネル間の共変動を捉えながらその位相ないしは時間パターンにとらわれず、リズムパターンの関係を比較することができる。また、相関行列は主成分分析を施すことで、簡単に情報の圧縮を行うことができる。さらに、脳波・脳磁図の見方として、コヒーレンス・位相同期等に比べて単純であるということ

が指摘できる。

#### [今後の研究の方向, 課題]

相関行列の距離に多次元尺度構成法を適用するというアプローチをとることにより, 実験参加者に明示的なリズム判断を求めることなく, そのリズムがどのように知覚されているのかを明らかにすることができる。今後, さまざまな場面でのリズム知覚が調和的であるのかどうかを調べる技術として有効であろうと思われる。また, このアプローチは, 脳波・脳磁図に限らずさまざまな時系列データに適用可能であり, それら時系列データの関係を明らかにするのに非常に有用なツールである。今後言語音・演奏音など, さまざまなリズムを包含する時系列データに本手法を適用することでも, 人間にとって調和的なリズムの工学的研究を進展させてゆきたいと考えている。

今後の課題として, 相関行列が作る空間に関する数理的分析があげられる。今回相関行列の距離を求めるのに単純な自乗和(ユークリッド距離)を用いているが, これが最適な方法といえるかどうか, さらに検討を要する課題である。

#### [引用文献]

- Galambos, R., Makeig, S., Talmachoff, P. J.: A 40-Hz auditory potential recorded from the human scalp. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 78, 2643-2647 (1981)
- ten Hoopen, G., Sasaki, T., Nakajima, Y., Remijn, G., Massier, B., Rhebergen, K.S., and Holleman, W.: Time-shrinking and categorical temporal ratio

perception: evidence for a 1:1 temporal category. *Music Perception*, 24, 1-22 (2006)

- Mitsudo, T., Nakajima, Y., Remijn, G. B., Takeichi, H., Goto, Y., and Tobimatsu, S.: Electrophysiological evidence of auditory temporal perception related to the assimilation between two neighboring time intervals. *NeuroQuantology*, 7, 114-127 (2009)
- Mitsudo, T., Nakajima, Y., Uehara, T., Nagaike, A., Remijn, G. B., Takeichi, H., Goto, Y., and Tobimatsu, S.: The neural mechanism of auditory temporal assimilation. *Proceedings of the Auditory Research Meeting, Acoustical Society of Japan*, 40, 365-366 (2010)
- Miyauchi, R. and Nakajima, Y.: Bilateral assimilation of two neighboring empty time intervals. *Music Perception*, 22, 411-424 (2005)
- Nakajima, Y., ten Hoopen, G., Sasaki, T., Yamamoto, K., Kadota, M., Simons, M., and Suetomi, D.: Time-shrinking: the process of unilateral temporal assimilation. *Perception*, 33, 1061-1079 (2004)
- Nakajima, Y., ten Hoopen, G., and van der Wilk, R.: A new illusion of time perception. *Music Perception*, 8, 431-448 (1991)

#### [成果の発表, 論文等]

- Nakajima, Y. and Takeichi, H.: Explicit and implicit temporal judgments visualized by similarities in electrophysiological signal subspaces. *Proceedings of the Auditory Research Meeting, Acoustical Society of Japan* 40, 795-799 (2010)
- Takeichi, H., Nakajima, Y., Mitsudo, T., and Tobimatsu, S.: Processing and representing temporal patterns in the brain: Classifier analysis and scaling. to be presented at *13th International Rhythm Perception and Production Workshop*, Leipzig, (2011.7)
- Nakajima, Y. and Takeichi, H.: Human Processing of short temporal intervals as revealed by an ERP waveform analysis. Manuscript in preparation.