

## 音系列における時間間隔の変化の検出

下迫晴加\*・石田時敬\*\*・菊地 正\*\*\*

産業総合技術研究所\*・筑波大学人間学類\*\*・筑波大学心理学系\*\*\*

時間間隔の知覚がビートに基づくのか、間隔の長さに基づくのかを調べるために、聴取者に3タイプの音系列を提示した。連続する間隔が長くなる(減速)、短くなる(加速)、もしくは長短の変化が交互になる系列であった。聴取者には間隔の長さの変化検出が求められた。減速・加速系列では、最初の間隔の長さとのずれが4-9%になった時に変化が検出されたが、ビートからの逸脱はかなり大きかった。交互系列では、連続する間隔の間に大きな差が生じていても、変化の検出が困難であった。時間知覚は間隔の長さに基づいているが、ビートも時間間隔の知覚に影響を及ぼす場合のあることが示唆された。

### Detecting time change of interval durations in auditory sequences

Shimosako Haruka\*, Ishida Tokitaka\*\*, Kikuchi Tadashi\*\*\*

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology \*

College of Human Sciences, University of Tsukuba\*\*

Institute of Psychology, University of Tsukuba\*\*\*

We examined whether perception of time intervals is beat- or interval-based. Listeners heard three types of irregular sequences: each successive interval was either longer or shorter than preceding interval (decelerating and accelerating) or alternating increases and decreases. They were asked to detect time change of interval durations. In decelerating and accelerating sequences, irregularity was detected when the deviation from the first interval was 4-9%, but the deviation from beat was quite large. In alternating sequences, though there was a large difference between the successive intervals, irregularity was hardly detected. These results suggest that perception of time intervals is based on interval duration and beat also affect the interval perception in some patterns.

## はじめに

音楽演奏の表現にはタイミングの変動が重要である。音楽演奏の聞き手が機械的なタイミングからの逸脱を検出する能力は、演奏表現上のタイミングと関係があること、検出能力は音楽訓練の程度に依存しないことが示されている (Repp, 1998; 1999)。タイミングの逸脱検出には、基準となるテンポの確立が必要と考えられる。優れた演奏は正確なテンポに聞こえることが多いが、必ずしも物理的に一定の時間間隔を保っているわけではない。

2つの時間間隔を比較したときの弁別閾は、200 ms から 2000 ms の範囲で6-10%であることが示されている (Getty, 1975)。近年、時間知覚における文脈効果の重要性が示されており、単純な等間隔音系列提示後の時間間隔の知覚を調べたり (Halpern & Darwin, 1982; Schulze, 1989)、音系列全体のテンポを比較する研究が行われている (Drake & Botte, 1993; McAuley & Kidd, 1998)。どちらのタイプの研究においても、時間変化の前に提示される音系列の等間隔数が増えると時間に対する感度が高くなり、弁別閾は2-4%になることが示されている (Drake & Botte, 1993; Halpern & Darwin, 1982)。同じ時間長が繰り返し提示されるため、統計的な平均処理が行われて時間弁別能が向上するという説明 (Drake & Botte, 1993; Schulze, 1989) や、等間隔音系列から内的なタイマーによる予測がはたらき、外的な刺激の周期との比較から時間知覚の文脈効果を説明するもの (Jones & Boltz, 1989) がある。前者のように間隔の長さに基づく interval-based model と、後者のように刺激のタイミングによって定義されるビートに基づく beat-based model のどちらが人間の時間知覚のモデルとして適切であるか、議論されている (Irvy, & Hazeltine, 1995; Pashler, 2001)。

これらの研究のほとんどが、時間変化の前に提

示される文脈として等間隔音系列を用いている。しかし音楽演奏では、物理的に等間隔を保っていないなくても、等間隔に聞こえる場合がある。連続する時間間隔の差が常に閾値下であり、最初は等間隔のように聞こえるが、徐々に時間差が大きくなるような音系列を聴取した場合に、時間間隔の差は検出されるのであろうか。また、連続する時間間隔が長くなったり短くなったり交互に変化するが、2つの間隔の合計が常に一定の長さで保たれる場合には、1音ごとに提示音が内的なビートと正確に一致するため、時間変化の検出が困難にはならないだろうか。

本実験では、時間間隔が常に変化している音系列を用いて、間隔の変化が検出される時の比較基準となるものは何かを明らかにし、音系列における時間間隔の知覚がビートに基づくのか、間隔の長さに基づくのかを検証する。

## 方法

聴取者 健聴者 23 名。

刺激 50 ms の持続時間、1026 Hz の純音から成る一定の強さの音系列を作成した。音系列の最初の間隔はすべての音系列で 500 ms とした。2つ目以降の間隔の長さは、変化の方向、変化量、等間隔の有無の組合せにより変化した。変化の方向は、間隔の長さが少しずつ短くなるもの (加速系列)、少しずつ長くなるもの (減速系列)、長・短の変化が1間隔ごとに交代するもの (加速減速交互系列) の3種類であった。変化量は、連続する間隔の長さ (交互系列の場合は1間隔毎) の差異が 3ms, 5ms, 7ms となる3種類であった。等間隔の有無は、間隔の変化開始前に 500 ms 等間隔の7音が挿入されるか、されないかの2種類であった。全部で 18 種類の音系列が準備された。

**装置** 刺激はシーケンサーソフト「Vision」を用いて、音源(Roland SC88pro)からヘッドホン(Roland RH-120)を通して提示された。聴取者の反応はキーボードのリターンキーを押すことにより、パーソナルコンピュータ(Power Macintosh G4)に MIDI データとして記録された。

**手続き** 音は各聴取者が聞きやすい聴取レベルで提示された。聴取者の課題は、音系列の間隔の長さに変化があったことがわかった時点でキーを押すことであった。音を数えたり、手足を動かすことは禁じられた。キー押し反応により音系列の提示は中止され、次の音系列提示は別のキー押しにより、聴取者の好きなときに開始された。18種類の音系列をランダムな順序にしたものを1ブロックとした。1ブロックの練習後、10ブロックの本試行が行われた。ブロック間には適宜休憩が設けられた。実験の所要時間は約1時間であった。

## 結果

刺激の第1音の提示から聴取者のキー押し反応までの時間から、単純反応時間として200 msを減じた時間を算出し、その直前に提示された音(間隔)に対して反応が行われたものとみなした。ただし、等間隔有系列において、間隔の変化開始前にキー押し反応がみられた場合には、エラーとして分析から除外した。

### 反応時の音数

各音系列について反応までの音数の平均を Fig. 1に示す。分散分析の結果、変化の方向( $F [2, 44] = 45.66, p < .01$ )、変化量( $F [2, 44] = 78.28, p < .01$ )、等間隔の有無( $F [1, 22] = 145.84, p < .01$ )の主効果、および変化の方向×変化量( $F [4, 88] = 8.45, p < .01$ )と変化の方向×等間隔の有無( $F [2, 44] = 5.02, p < .05$ )の交互作用が有意であった。

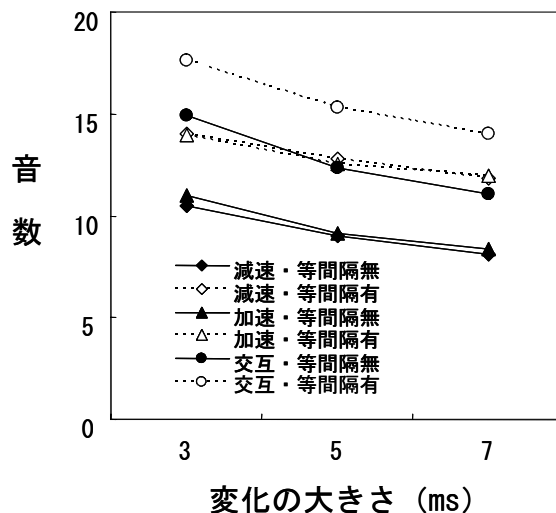


Fig. 1 反応時までの音数

LSD 検定の結果、加速系列および減速系列よりも加速減速交互系列の方が、変化量に関しては、差異が小さいほど聴取者が反応するまでの音数は多かった( $p < .05$ )。等間隔無系列と比較して有系列の場合に、聴取者が反応するまでの音数が多くなった( $p < .05$ )。ただし、時間間隔の変化開始時からの音数については、等間隔無系列と比較して等間隔有系列の場合に、聴取者が反応するまでの音数は少なくなった。

### 直前の間隔との時間差

加速・減速系列の場合、変化検出時と直前の間隔との時間差は常に3 ms, 5 ms, 7 ms のいずれかになる。加速減速交互系列の場合は、変化開始からの隣接する間隔が常に500 ms より長いものと短いものとが交互になる。交互系列における検出時と直前の間隔の時間差は、絶対値で30 ms から64 ms の範囲になった(Fig.2)。等間隔無系列と比較して有系列の場合に、検出時と直前の間隔の時間差は短かった。変化量は大きいほど検出時と直前の間隔の時間差も大きくなる傾向にあった。

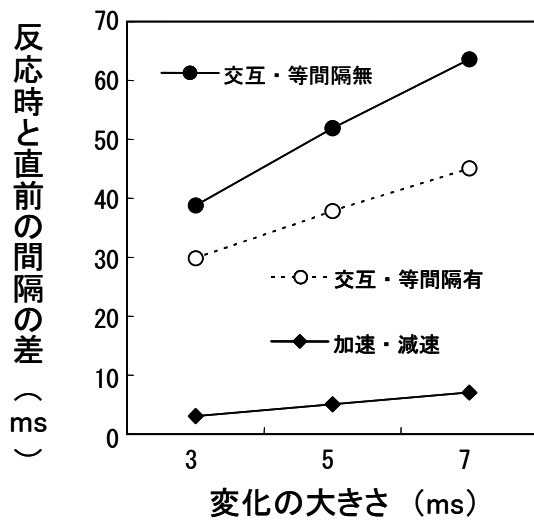


Fig. 2 反応時と直前の間隔の長さの差

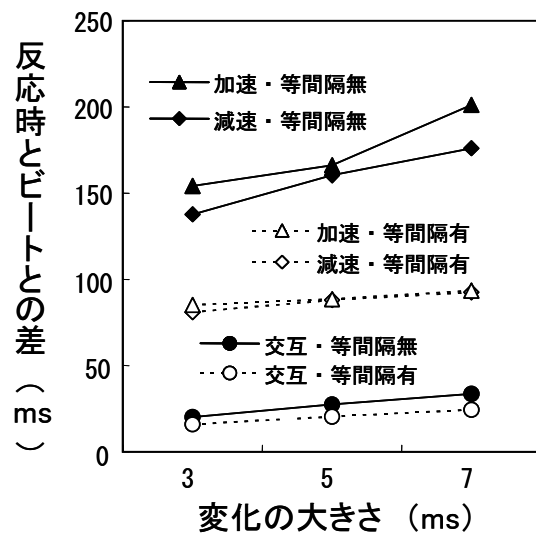


Fig. 3 反応時とビートとの差

#### 最初の間隔を単位とするビートからのずれ

加速・減速系列における変化検出時の音のオンセットと、最初の間隔を単位とするビートからのずれ (500 ms の倍数との差) の平均を Fig.3に示す。変化検出時のビートからのずれは、等間隔有系列ではおよそ 80-90 ms, 等間隔無系列ではおよそ 140-200 ms の範囲にあり、かなり大きい。等間隔無系列では変化量が大きいほどビートからのずれが大きくなる傾向がみられるが、有系列の場合は変化量による違いはほとんどみられない。

加速減速交互系列の場合は、連続する2間隔の合計が 1000 ms の倍数となり、1音おきに正確なビートにのった音が提示されていた。ビートにのった音の直後に反応した場合は、その前の音のビートのずれに対する判断とみなして調べたところ、ビートからのずれはおよそ 16 - 34 ms の範囲にあった。分散分析の結果、変化量 ( $F [2, 44]=172.97, p<.01$ )、等間隔の有無 ( $F [1, 22]=125.34, p<.01$ ) の主効果、変化量×等間隔の有無 ( $F [2, 44]=18.03, p<.05$ ) の交互作用が有意であった。LSD 検定の結果、変化量に関しては

差異が大きい方が、等間隔有系列と比較して無系列の場合にビートからのずれが大きいことが示された ( $p<.05$ )。

#### 最初の間隔との時間差

変化検出時の間隔の長さとは最初の間隔の長さ (500 ms) との差の平均を、各音系列について Fig. 4に示す。分散分析の結果、変化の方向 ( $F [2, 44]=21.74, p<.01$ )、変化量 ( $F [2, 44]=151.26, p<.01$ )、等間隔の有無 ( $F [1, 22]=100.88, p<.01$ ) の主効果、および変化の方向×変化量 ( $F [4, 88]=4.50, p<.01$ )、変化の方向×等間隔の有無 ( $F [2, 44]=33.64, p<.05$ )、変化量×等間隔の有無 ( $F [2, 44]=33.64, p<.05$ ) の交互作用が有意であった。LSD 検定の結果、加速減速交互系列と比較して加速系列および減速系列の方が、最初の間隔の長さとの差が大きかった ( $p<.05$ )。変化量に関しても、差異が大きいほど反応時と最初の間隔の長さとの差が大きかった ( $p<.05$ )。等間隔有系列と比較して無系列の方が、反応時と最初の間隔の長さとの差は大きかった ( $p<.05$ )。

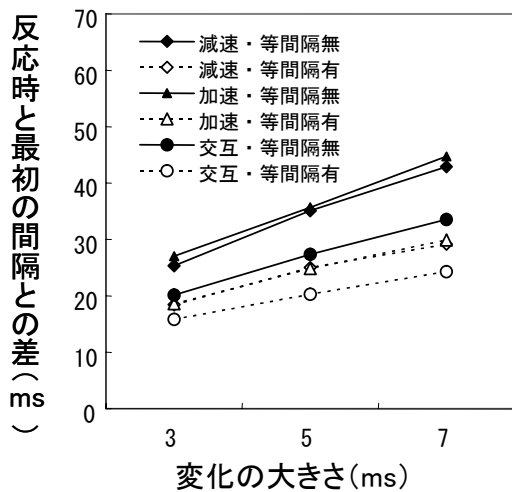


Fig. 4 反応時と最初の間隔の差

## 考察

音系列における時間間隔の変化の検出が何を比較基準として行われるかを明らかにするため、少しずつ時間間隔が変化する音系列を用いて変化検出を求め実験を行った。

聴取者は、微妙に時間間隔が変化する 18 種類の音系列を聴取して判断を行った。連続する間隔の長さの変化量が小さいほど判断に要する音数が多く、等間隔音系列が挿入された場合は挿入されない場合と比較して全体に音数が増えていたため (Fig. 1), 音系列の違いにかかわらず、いつも同じ程度の音数で適当に判断を行っていたわけではないといえる。各音系列の時間間隔に対する判断が可能であったとすると、加速・減速系列の場合、連続する間隔の差は常に閾値下であるため、時間的に近い間隔同士を比較して判断を行ったとは考えられない。

各音系列はどれも、等間隔音系列を挿入する方がしない場合と比較して、時間間隔の変化の検出成績が優れていた。これまでの研究と一致する結果であり (Halpern & Darwin, 1982; Schulze, 1989; Drake, & Botte, 1993), 音系列の最初の部分が時間間隔の知覚に極めて重要であることが示され

た。物理的に等間隔を保った音系列を聴取することで、変化検出のための基準がより明確に形成されるといえる。それでは基準となったのは、ビートなのであろうか、間隔の長さなのであろうか。

もしビートからのずれが判断基準であるならば、すべての音系列において変化検出時のビートからのずれがほぼ等しくなると予想される。しかし実験の結果、変化検出時のビートからのずれは音系列によって大きく異なるものであった (Fig. 3)。加速・減速系列の場合は等間隔音系列が挿入されていても、反応時のビートからのずれは 80-90 ms 程度ある。2つの時間間隔の弁別閾が 6-10% であることを考えると 16-18% のずれはかなり大きく、内的に形成されたビートと外的な刺激との比較により判断が行われたとは考えにくい。

最初の間隔の長さが基準であるとする、反応時の時間差は約 15-45 ms の範囲にあり (Fig. 4), ビートからのずれほど音系列による大きな違いはみられない。等間隔音系列の検出成績が無系列と比較してよいことを考えると、最初の1つの間隔だけではなく、最初からいくつかの間隔の平均を基準と考える方がより妥当といえる。

しかし、加速減速交互系列の場合は加速・減速系列と違って長短の変化が交互にあるため、検出時と直前との差が 30-60 ms とかなり長い。弁別閾よりも長い時間差が提示されていても、変化を検出できない場合がみられたのである。交互系列では1音おきに 1000 ms を単位とする規則正しい間隔で常に音が提示される。個々の間隔の長さのずれは 1000 ms 単位の等間隔音の提示によって知覚されにくくなる、つまり、内的なビートも時間間隔の知覚に影響を及ぼしている可能性がある。

時間間隔の変化を検出する基準としては最初のいくつかの間隔の長さが重要であるが、音系列の間隔の構成によっては、間隔の長さだけでなく

内的なビートも形成されて時間間隔の知覚に影響を及ぼすと考えられる。音楽演奏において個々の間隔の長さは異なっているとしても、強拍と弱拍とで間隔の長短の繰り返しが生じ、連続する間隔の合計がほぼ等しくなるため、正確なテンポの演奏に聞こえるのではないかと予想される。

## 文 献

Drake, C., & Botte, M. C. 1993 Tempo sensitivity in auditory sequences: Evidence for a multiple-look model. *Perception & Psychophysics*, **54**, 277-286.

Getty, D. J. 1975 Discrimination of short intervals: A comparison of two models. *Perception & Psychophysics*, **18**, 1-8.

Halpern, A. R., & Darwin, C. J. 1982 Duration discrimination in a series of rhythmic events. *Perception & Psychophysics*, **31**, 86-89.

Irvy, R. B., & Hazeltine, R. E. 1995 Perception and Production of temporal intervals across a range of durations: Evidence for a common timing mechanism. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **21**, 3-18.

Jones, M. R., & Boltz, M. 1989 Dynamic attending and responses to time. *Psychological Review*, **96**, 459-491.

McAulley, J. D., & Kidd, G. R. 1998 Effect of deviations from temporal expectations on tempo discrimination of isochronous tone sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **24**, 1786-1800.

Pashler, H. 2001 Perception and production of brief durations: Beat-based versus interval-based timing. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and Performance*, **27**, 485-493.

Repp, B. H. 1998 Variations on a theme by Chopin: Relations between perception and production of timing in music. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **24**, 791-811.

Repp, B. H. 1999 Detecting deviations from metronomic timing in music: Effects of perceptual structure on the mental timekeeper. *Perception & Psychophysics*, **61**, 529-548.

Schulze, H. H. 1989 The perception of temporal deviations in isochronic patterns. *Perception & Psychophysics*, **45**, 291-296.