

リズムや強弱の時間パターンがテンポ維持特性に与える影響

永島 亮誠[†] 阪口 豊^{†‡}

[†]電気通信大学 大学院情報理工学研究科 [‡]技能情報学研究ステーション

〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: [†] {ryoseinagashima, yutaka.sakaguchi}@uec.ac.jp

あらまし 音楽演奏の現場では、奏者の意図に関わらず演奏のテンポが速くなる（「走る」）現象がしばしば観察される。この現象の特性は指タッピング課題を用いた実験により実験室内でも検討されてきたが、従来の研究の多くは一定時間間隔のタッピング課題を対象としており、リズムや強弱（アクセント）といった実際の音楽演奏に含まれる時間パタンの要素を考慮していない。本研究では、リズムやアクセントのパタンを含んだタッピングの同期継続課題を用いて、これらの要素がテンポ維持特性に与える影響を実験的に検討した。その結果、一定時間間隔のタッピングではテンポ変化が生じないテンポ設定において、一部のリズムやアクセントパタンを伴うタッピングではテンポが有意に加速あるいは減速することが明らかになった。本研究の結果は、リズムやアクセントのパタン生成プロセスがテンポ維持メカニズムに影響を与えることを示唆する。

キーワード テンポ維持課題、音楽演奏、リズムパタン、アクセントパタン

Rhythm and Stress Patterns Do not Affect Tempo-Keeping Performance of a Finger Tapping Task

Ryosei NAGASHIMA[†] Yutaka SAKAGUCHI[†]

[†] Graduate School of Information Science and Engineering, University of Electro-Communications

1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: [†] {ryoseinagashima, yutaka.sakaguchi}@uec.ac.jp

Abstract The tempo of music performance often drifts (in most cases, it is accelerated) irrespective of the players' intention. Though the characteristics of this phenomenon have been thoroughly investigated using the finger tapping task in the laboratory, most of these studies dealt with tapping with a fixed interval; few studies have considered tapping with different rhythm and stress patterns, which are both important factors of music performance. In the present study, we asked how different rhythm and stress patterns affected the tempo-keeping performance using a synchronization-continuation tapping task. We observed that for some rhythm and stress patterns, the tempo was significantly accelerated or decelerated in the tempo condition where acceleration/deceleration hardly occurred with the fixed-interval tapping. The present finding suggests that the process for generating/executing rhythm and stress patterns could interfere with the tempo-keeping mechanism in our brain.

Keywords Tempo-Keeping Task, Music Performance, Rhythm Pattern, Stress Pattern

1. はじめに

音楽演奏では、演奏のテンポが時間的に変化する現象がしばしば観察される。このようなテンポ変化は演奏者が音楽表現上の理由から能動的に生み出すものであるが（藝術的逸脱: artistic deviation）[1-3]、その一方で、演奏者の意図に関わらずにテンポ変化が生じることもあり、そのような場合多くは、テンポは加速する方向に変化する。このような意図しないテンポ加速

は、演奏家のあいだでは「走る」という表現で共有される普遍的な現象で、だれもが（特に初心者は）よく経験する現象である。

このテンポ加速現象は音楽教育学の分野では古くから指摘されてきた[4-7]。比較的新しい研究として、Mito & Murao [8]はピアノ演奏を題材としてこの現象を実験的に検証している。彼らは学習年数 5-7 年の小学生 6 名に課題曲（4 分の 4 拍子 16 小節）を 3 種の異

なるテンポ（70, 100, 130 bpm: beat per minute）で演奏させ、演奏中のテンポ変化を計測した。その結果、平均小節長（1小節の演奏に要する時間長）は演奏が進むとともに単調に減少し（つまり、演奏は加速し）、70 bpm の条件では、15小節目の小節長が最初の小節の小節長の85%程度にまで短くなることがわかった。なお、加速の程度はテンポ条件により異なり、130 bpm の条件では目立った加速は観測されなかった。

同様の現象は、レバー押しや指タッピング課題を用いた実験により実験室内でも観察されてきた（Reppによる総説[8-9]に詳しい）。初期の研究として、Stevens [10]は、はじめはメトロノームと同期してレバーを押し、メトロノームが停止したあとも同じテンポでレバー押しを継続する課題（同期継続課題：synchronization-continuation task）を用いた実験を報告している。彼は、さまざまなテンポ条件（タッピング間隔として標準条件で360-1500 msの範囲：テンポに換算すると40-167 bpmの範囲）でテンポ維持特性を調べ、速いテンポ条件ではテンポがより速くなりやすく、遅いテンポ条件ではより遅くなりやすいことを報告している。また、Collyer, et al. [11]は、27種類の目標テンポ条件（タッピング間隔として175-825 msの範囲、テンポとして73-343 bpm）において同期継続課題を被験者に課し、テンポが遅くなりがちなテンポ帯と速くなりがちなテンポ帯があることを見出している。この報告によれば、個人差はあるものの、5人の被験者の平均値として、タッピング間隔が250-413 ms および 513-748 ms（テンポとして80-117, 145-240 bpm）の範囲ではテンポが加速しやすく、それ以外の範囲ではテンポが減速しやすかったという。この結果は、タッピング課題において収束しやすいテンポ帯が離散的に存在することを示唆しており、このことから、彼らはヒトの運動時間生成過程には離散的なメカニズムがあると指摘している。

タッピングのテンポ変化をもたらす脳内メカニズムは明らかになっていないが、テンポを一定に保つ基盤として脳内の中枢時計の存在を仮定したうえで、中枢時計の刻む周期が確率的にばらつくとともに、時間的にゆっくりドリフトしていくというモデルが提案されている[12, 13]。従来、テンポ維持課題におけるタッピング間隔の揺らぎは、中枢時計の揺らぎと中枢時計のトリガに基づいて生成される運動指令の時間揺らぎを組み合わせた数理モデル[14]に基づいて議論されてきたが、このモデルではテンポ加速現象で見られる一定のトレンドをもったテンポ変化を説明することができない。この問題に対処したモデルとして、中枢時計が一定のトレンドでドリフトする性質を組み込んだモデル[12]が提案され、そのモデルを用いて実験データを解析して、中枢時計のドリフトとゆらぎの大きさ、

運動出力のゆらぎを評価した研究が行なわれている[13]。ただし、これらの議論では中枢時計のドリフトをもたらす原因については明らかではない。

このように、テンポ維持課題におけるテンポ変化特性は実験、理論の両面からさまざまな検討が行なわれてきたが、これらの検討は一定時間間隔のタッピング課題を対象としたものが中心であった（文献[4,6]ではリズムパターンを含んだ課題が用いられている）。一方で、現実の音楽演奏では、一定の時間間隔で一様に音を刻むことはまれで、リズムパターンや音の強弱（アクセント）パターンを伴って音を出すことが通常である。ヒトがリズム・アクセントパターンを含んだテンポ維持課題を実行する際には、リズムパターンを生成するための脳内メカニズムや時空間的に一様でない運動を実行するための運動計画・実行メカニズムが関与するため、それらがテンポ維持メカニズムに作用してテンポを変化させる可能性が考えられる。実際、リズムや奏法（スタカートやレガート）の違いがテンポ知覚に影響を与えることが指摘されている[15]ほか、経験的に演奏が困難に感じられる箇所やダイナミクス（音量）が変化する箇所をきっかけにしてテンポ加速が生じることから、リズムや奏法の変化およびそれに伴う知覚の変化がテンポ変化（つまり、中枢時計のドリフト）を生み出す原因となることが考えられる。

以上の問題意識に基づき、本研究では、リズムパターンやアクセントパターンが指タッピング課題のテンポ維持特性に与える影響を実験的に検討した。具体的には、9種類のリズムパターンおよび3種類のアクセントパターンを対象として約3分間のテンポ維持課題を課し、テンポ変化の様子を計測した。

2. 実験方法

2.1. 被験者

本実験は二つの実験から構成され、実験1には10名（男性9名、女性1名）、実験2には5名（すべて男性）の被験者が参加した。被験者はすべて電気通信大学の学生である。予備実験の段階で、楽器演奏経験の乏しい被験者では安定したリズムパターの再生が困難であるケースが多いことが判明したため、本実験は何らかの楽器演奏経験がある被験者のみを対象に行った。被験者には謝礼として1回の実験に対して図書カード1000円分を手渡した。

なお、本実験は、電気通信大学の「ヒトを対象とする実験に関する倫理委員会」の承認（承認番号14005）を受けている。

2.2. 装置

被験者のタッピング動作の記録には、Windows 7 Professional の動作するデスクトップ PC と音楽演奏

用パッド (KORG, padKONTROL) を組み合わせた装置を用いた。被験者はこのパッドの一つのボタンを指先でタッピングすることにより課題を遂行する。PC とパッドは MIDI インターフェースを介して接続され、タッピングイベントのタイミング (Note On/Off) と打鍵速度 (velocity) が MIDI コードにより記録される。これらのデータの記録には、PC 上で動作する DAW (digital audio workstation) ソフトウェア (Steinberg, Cubase Elements Education) を用いた。また、目標とするリズムパタンの生成も同じ DAW ソフトウェアを用いて行った。目標リズム音およびタッピング音は、このソフトウェア上で打楽器音 (音長約 60 ms) を用いて生成し、サウンドカード (Creative Technology, Sound Blaster Audigy Rx) を介してヘッドフォン (Sennheiser, HD650) から被験者に提示した。これら音声信号の音量は、被験者ごとに快適な値に調節した。なお、被験者がパッド上でタッピングしてから音が提示されるまでの時間遅れは 6.0 ms であった。

本稿ではデータの詳細は報告しないが、被験者の生理状態をモニタするため、本実験では呼吸タイミングと心拍数もあわせて記録した。呼吸タイミングは呼気炭酸ガスモニタ装置 (日本光電, OLG-2800 および TG-920P)、心拍数は脈波ピックアップ (Teac, AP-C030) によりそれぞれ計測し、生体アンプ (Teac, Polymate AP1132) を介して別のノート PC (Windows 10) に記録した。2 台の PC で計測したデータの同期をとるため、被験者に提示される音声信号を生体アンプに入力して記録し、収録後に二つの PC で記録されたデータを突き合わせることで時間軸の対応をとった。

2.3. 課題

実験課題には、従来の研究と同様に同期・継続課題を用いた。従来の研究と異なる点は、テンポだけでなくリズムも含めて目標音と同期してタッピングし、また、それを継続する点である (図 1)。本実験では、同期区間の時間長を、一定間隔条件でのタッピング 1 拍分の時間を単位として 32 拍分 (4 分の 4 拍子で 8 小節)、継続区間を 320 拍分 (同 80 小節) とした。

本研究では、Collyer, et al. の報告 [11] においてテンポ変化が生じにくかった (テンポが速くなる領域と遅くなる領域の境目付近にある) 120 bpm を目標テンポに設定して DAW ソフトウェア上で目標リズム音を作成した。しかし、データ解析の過程で生体アンプに記録された音声信号と DAW ソフトウェアに記録された MIDI データを対比させたところ、DAW ソフトウェアで記録されている MIDI イベントの時間間隔が生体アンプに記録されている時間間隔 (こちらが正確) の 91% しかないことが判明した。この事実は実験 1 の途中で判明したが、被験者間で実験条件を一定に保つため、

その後も同じ設定で実験を継続した。したがって、本実験における目標テンポは、正確には 131 (= 120 / 0.91) bpm である。131 bpm というテンポは、Collyer, et al. の報告 [11] でテンポ減速が生じる領域に含まれているが、Mito & Murao [8] の実験では 130 bpm の条件でテンポ変化が明確に生じなかったことから、当初の意図と整合した実験設定であったと考えられる。

2.4. 条件

本実験では、タッピング間隔が一定である統制条件のほかに、合計 12 種類のリズムおよびアクセントパターンでタッピングを行なう実験条件を設けた。1 セッションの実験時間の都合から、これら 12 条件を二つに分け、それぞれに統制条件を加えた 7 条件を一組にして二つの実験を構成した。図 2 に二つの実験で用いたリズムとアクセントのパターンを示す。いずれの実験でも条件 a は統制条件であり、実験 1 では b-g のすべてがリズムの異なるパターン、実験 2 では b-d がアクセントの異なるパターン、e-g がリズムの異なるパターンである。

2.5. 手続き

各実験条件での課題に慣れるために、本試行に入るまえに同期区間 8 小節、継続区間 8 小節の練習課題を

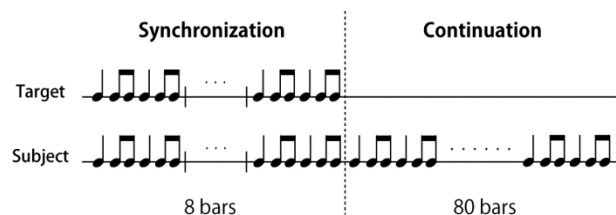


図 1 同期継続課題の手続き

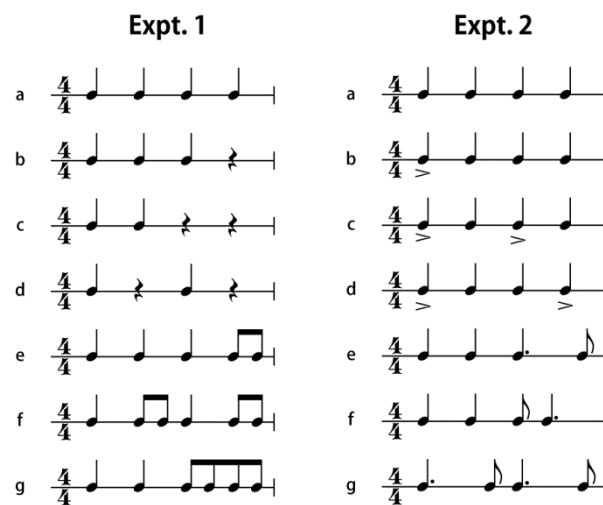


図 2 実験で用いたリズムパターン

課した。被験者がリズムパターンを理解したことを確認したのち、同期区間 32 拍分、継続区間 320 拍分の本試行を行った。本試行に要した時間は 3 分弱である。

同じことを図 2 の a-g の順序で 7 条件に対して行ったのち、再び、同じ順序で同じ試行を繰り返した（すべての被験者で実験順序は同一）。したがって、各被験者は各条件に対して 2 試行ずつ（合計 14 試行）行なうことになる。実験全体に要した時間は、準備の時間も含めておよそ 1 時間であった。

3. 実験結果

3.1. 実験 1

上述したように、実験の各試行では継続区間 80 小節分のデータ取得を企図していたが、実際には 80 小節分すべてのデータを正しく取得できていない試行があったため、70 小節までを解析の対象とした。

図 3 に、条件 a（統制条件）における継続区間 70 小節のあいだの小節長（その小節の 1 拍目と次の小節の 1 拍目のあいだの時間差）の変化を示す。この図の横軸は小節番号、縦軸は目標テンポでの小節長を 1 としたときの相対的な小節長を表す（値が大きいほどテンポが遅いことを意味する）。図中の各線は、本実験の全 20 試行（10 人×2 試行）のデータを示している。

この図から、課題遂行中のテンポは時間的に細かく変動するものの、長い時間で見れば、一部の例外を除いてテンポはほぼ一定に維持されていることがわかる。したがって、131 bpm というテンポ設定では、当初の想定どおり、一定時間間隔タッピングのテンポ変化が生じないことが確かめられた。

なお、この図からもわかるように、本実験では 1 人の被験者の再生テンポが例外的に目標テンポから大きく逸脱していた。この被験者のデータは他のリズム条件においても他の被験者と異なる振る舞いを示したことから、以降の分析の対象から取り除くこととした。

図 4 は、継続区間における相対的小節時間長の試行間平均（N = 18）を 7 つの条件に対してそれぞれ示したものである。図中の太い線は平均値、細い線は標準誤差範囲を示す。図の縦軸の目盛間隔は 2.5 % であり、点線は 5 % 増加／減少したレベルを示している。この図からわかるように、条件 c, e, f では再生テンポが目標テンポから遅くなっている傾向が読み取れる。

この傾向を統計的に検証するために、第 2 から第 70 までの各小節の小節長と第 1 小節の小節長との違いを順序検定により検定した（順序検定を用いたのは、比較する小節間で等分散性が成立しなかったからである）。図 5 は検定結果の p 値の変化を図示したものである。図の縦軸は p 値の対数値を表しており、条件ごとの 3 本の線はそれぞれ有意水準 5%, 1%, 0.1 % を表す。

条件 c および e については p 値が安定的に有意水準以下にあることから、これら二つの条件では、テンポは有意に減速したと結論できる。

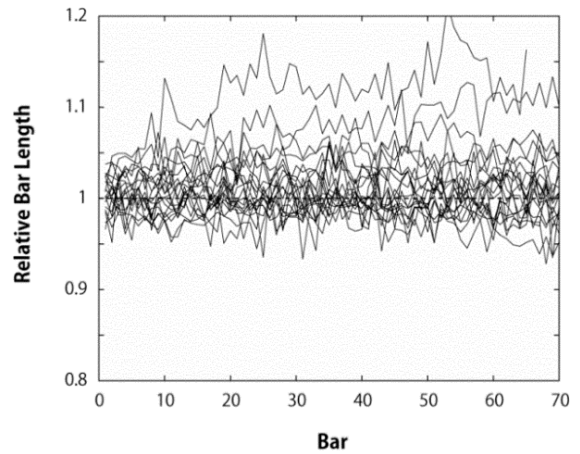


図 3 実験 1：条件 a（統制条件）での小節長の変化

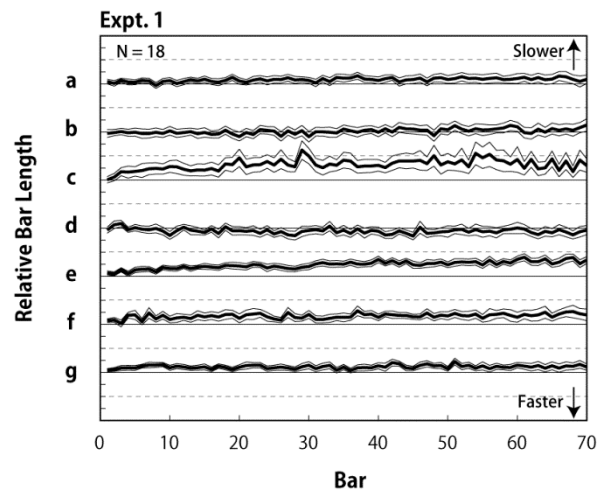


図 4 実験 1：7 条件における平均小節長の変化

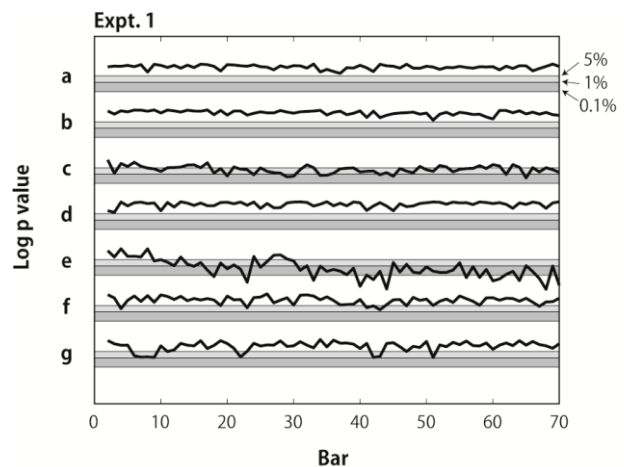


図 5 実験 1：小節長差の p 値の変化

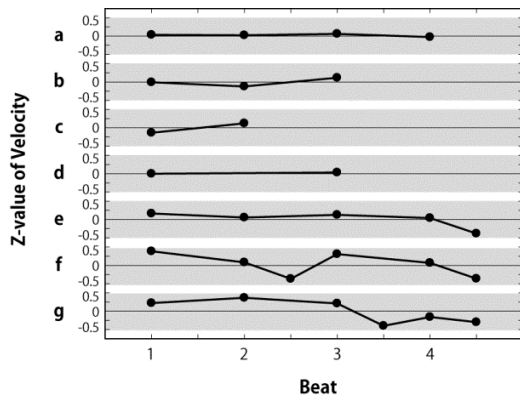


図 6 実験 1：打鍵速度のリズムパターン依存性

図 6 は、タッピングの正規化打鍵強度（velocity の値を試行ごとに z 値化したもの）の平均値を打点ごとに示したものである。この図の横軸は各打点の時間的位置（図 2 に示したリズムパタンの打点位置に対応）を、縦軸は打点ごとの正規化打鍵強度の小節間平均（70 小節×9 人×2 試行）を表している。図中の灰色部分は z 値の絶対値が 0.5 以下の範囲を表す。この図を見ると、リズムパターンに応じて打鍵強度の時間パターンが変化していることがわかる。統制条件である条件 a では、すべての拍の打鍵強度が一定であるのに対し、8 分音符を含む条件 e, f, g では、連続する八分音符のうち最初のみが強く、その後は弱いことが読み取れる。詳細は記載しないが、Kruskal-Wallis 検定により、条件 a, d 以外のすべての条件において打点間に有意な強度差があることを確認した。

このように、実験 1 では被験者に対して打鍵強度に関する指示を出さなかったにもかかわらず、打点ごとに打鍵強度の違いが生じた。その理由としては、八分音符のタッピングにおいて短い時間間隔で運動するという運動遂行上の特性が考えられるが、四分音符のみの条件 b, c でも有意な打鍵強度差が生じたことは、リズムパタンの導入によりタッピング課題が小節単位で分節されて実行されていたことを示唆する。

3.2. 実験 2

図 7 は、図 4 と同様に、継続区間における小節長の試行間平均を 7 つのリズム・アクセント条件に対してそれぞれ示したものである。実験 1 と同様に、条件 a（統制条件）ではテンポが一定に保たれている一方、アクセントを導入した条件 b, c, d では小節長が短くなる（テンポが加速する）傾向、付点音符を導入した条件 f, g では逆に小節長が長くなる（テンポが減速する）傾向が見られる。

これらの傾向を統計的に検証するため、小節長の違いに関する p 値の時間変化を調べた（図 8）。その結果、条件 b, g において安定的な有意差が生じていることが

確認できた（図 7 では条件 c, d でも明確な加速傾向が見えるが、被験者間のばらつきが大きく、試行数 $N = 10$ では有意水準に達しなかった）。

このほか、詳細は示さないが、実験 2 においても、条件 a 以外のすべての条件において小節内の打点間で正規化打鍵強度に有意な差が見られた。この実験では、条件 b, c, d において明示的にアクセントを指示しているため、これらの条件で打鍵強度差が生じるのは自明であるが、アクセント指示のない条件 e, f, g でも強度変化が見られたことから、実験 1 の結果とあわせて、リズムパターンを含んだタッピング課題では打鍵強度の自律的な変調を伴うことが多いことがわかる。

このように、実験 2 においても、一定時間間隔のタッピングではテンポ変化が生じないテンポ設定において、リズムパターンやアクセントパターンがテンポ維持特性に有意な影響を与えることが示された。

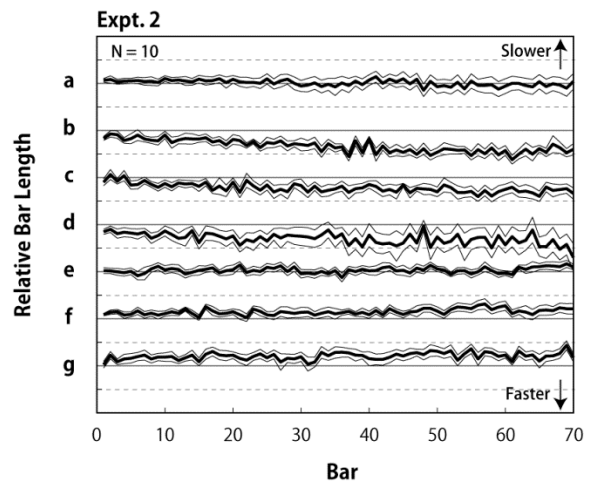


図 7 実験 2：7 条件における平均小節長の変化

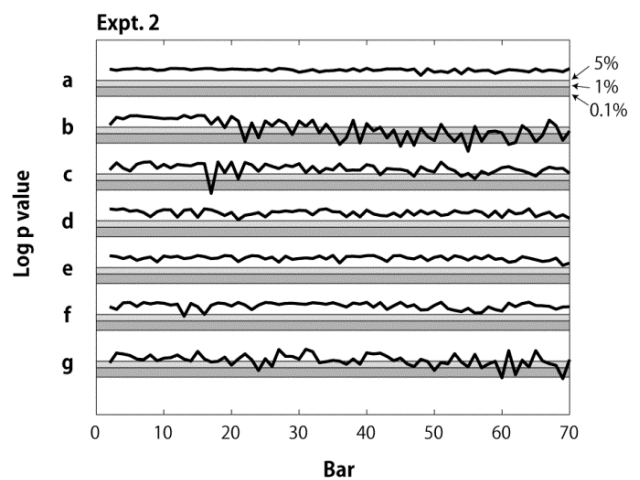


図 8 実験 2：小節長差の p 値の変化

4. まとめと考察

本研究では、リズムパターンや強弱（アクセント）パターンを有するタッピング課題を題材として、ヒトのテンポ維持特性を調べる実験を行った。その結果、リズムや強弱の時間パターンがテンポ維持特性に有意な影響を及ぼすことが確かめられた。

この現象に関してもっとも重要な問題は、このようなテンポ変化現象を引き起こす脳内メカニズムである。今回の実験において、加速傾向を示したのはアクセントを含む条件（実験 2 条件 b-d）であり、減速傾向を示したのは二拍分連続して休みのある条件（実験 1 条件 c）と八分音符を含む条件（実験 1 条件 e-g および実験 2 条件 e-g）であった。ただ、これらの結果のみから、テンポの加速あるいは減速をもたらす原因を推測することは困難である。今回の実験結果を手がかりに、リズムパターンを系統的に操作する、あるいは、基準となるテンポを変えるなどして実験条件を増やし、いかなる本質的なパラメータがテンポ変化に関与しているかを解き明かす必要がある。

このように、具体的なメカニズムはわからないものの、本研究の結果は少なくともリズム・アクセントパターン生成プロセスがテンポ維持メカニズムに影響を与えることを示唆する。冒頭での議論のように、テンポ維持の基盤メカニズムとして中枢時計の存在を仮定するのであれば、長時間にわたって時間間隔を管理する中枢時計メカニズムの調整機構に、リズムやアクセントといった局所的な時間パターンを生成する機構が外部入力として作用する可能性が考えられる。

本研究では、テンポドリフト現象に関わる因子としてリズムパターンに着目したが、このほかにもこの現象に関わる因子は考えられる。演奏家のあいだでは、演奏が難しい箇所や苦手意識のある箇所がテンポ加速のきっかけになることがよく言われる。このような経験的事実は、テンポ加速現象には、リズムパターン生成・実行という信号生成・運動制御に関わる因子だけでなく、緊張感などの情動的因子が関わっている可能性を示唆する。また、クレッシェンド、デクレッシェンドといった大きな時間単位での強弱変化（ダイナミクス）もまたテンポ加速現象に関わっている可能性が考えられる（ただし、文献[6]ではダイナミクスの影響はなかったと報告されている）。曲の盛り上がりに応じて音量を上げると同時に演奏速度を加速した際、その後に演奏速度をもとに戻すことができず加速が積み重なってしまうことはしばしば経験されることである。音楽演奏の現場におけるこのようなテンポ変化現象の全貌を理解するには、これらの因子による効果をそれぞれ実験室内で再現し、その特性を明らかにすることが重要である。

本研究の一部は科学研究費補助金（26280101）の援助を受けて行った。

文 献

- [1] Seashore, C.E. (1938). *Psychology of Music*, McGraw-Hill, New York.
- [2] Povel, D.J. (1977). Temporal structure of performed music: Some preliminary observations. *Acta Psychologica*, 41(4), 309–32.
- [3] Gabrielsson, A. (1974). Performance of rhythm patterns. *Scandinavian Journal of Psychology*, 15(1), 63–72.
- [4] Drake, A. (1968). An Experimental Study of Selected Variables in the Performance of Musical Durational Notation. *Journal of Research in Music Education*, 16(4), 329–338.
- [5] Kuhn, T., & Gates, E. (1975). Effect of Notational Values, Age, and Example Length on Tempo Performance Accuracy. *Journal of Research in Music Education*, 23(3), 203–210.
- [6] Kuhn, T. L. (1977). Effects of dynamics, halves of exercise, and trial sequences on tempo accuracy. *Journal of Research in Music Education*. 25(3), 222–227.
- [7] Killian, J. (1985). The effect of differential feedback on tempo performance and perception, *Contributions to Music Education*, (12), 22–30.
- [8] Repp, B. (2005). Sensorimotor synchronization: a review of the tapping literature. *Psychonomic bulletin & review*, 12(6), 969–92.
- [9] Repp, B., & Su, Y.-H. (2013). Sensorimotor synchronization: A review of recent research (2006–2012). *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(3), 403–452.
- [10] Stevens, L. (1886). On the time-sense. *Mind, os-XI* (43), 393–404.
- [11] Collyer, C., Broadbent, H., & Church, R. (1992). Categorical time production: Evidence for discrete timing in motor control. *Perception & Psychophysics*, 51(2), 134–144.
- [12] Ogden, T., & Collier, G. (2002). Inference on variance components of autocorrelated sequences in the presence of drift. *Journal of Nonparametric Statistics*, 14(4), 409–420.
- [13] Collier, G., & Ogden, T. (2004). Adding Drift to the Decomposition of Simple Isochronous Tapping: An Extension of the Wing-Kristofferson Model. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30(5), 853.
- [14] Wing, A., & Kristofferson. (1973). Response delays and the timing of discrete motor responses. *Perception & Psychophysics*, 14(1), 5–12.
- [15] Geringer, J. M., Madsen, C. K., MacLeod, R. B., & Droe, K. (2006). The effect of articulation style on perception of modulated tempo. *Journal of Research in Music Education*, 54(4), 324–336.