

博士論文（要約）

リズム同期課題における
対人間協調のダイナミクス

**Dynamics of Interpersonal Coordination
in a Rhythmic Synchronization Task**

岡野 真裕

目次

序文.....	4
第 1 章 研究小史と本論文の目的.....	7
1-1 テンポ維持タッピング課題における動作テンポの逸脱.....	7
1-1-1 同期-継続課題における ITI のばらつきとドリフト	8
1-1-2 ITI ドリフトの振る舞いへの影響要因	10
1-2 アンサンブル演奏における同期とタイミング調節.....	11
1-2-1 同期のタイミング調節に用いられる感覚モダリティ	12
1-2-2 タイミング調節における相互適応のプロセスとリーダー・フォロワー関係.....	15
1-2-3 同期のずれの修正	16
1-3 社会的環境における動作の変調.....	18
1-3-1 観念運動理論と自動模倣	18
1-3-2 社会的環境における課題表象の共有	19
1-4 リズム動作における協調のダイナミクス.....	21
1-4-1 力学系アプローチ	22
1-4-2 協調構造の推定	23
1-5 本博士論文の目的.....	26
1-6 図表	28
第 2 章 2 人組リズム維持課題における対人間協調のダイナミクス （研究 1）	30
2-1 2 人組リズム維持課題における動作テンポの高速化.....	30
2-1-1 要旨	30
2-1-2 背景	31
2-1-3 方法	34
2-1-4 結果	39

2-1-5 考察	42
2-1-6 図表	49
2-2 リズム維持課題のテンポ逸脱における心拍の影響.....	58
2-3 2人組リズム維持課題の結合振動子モデル.....	59
第3章 2人組リズム維持課題における局所的・大域的協調構造（研究2）	60
第4章 総合考察.....	61
引用文献.....	62
謝辞.....	78

序文

音楽演奏における「巧みさ」とはどのようなものであろうか。ある人は「超絶技巧」と呼ばれる、高速かつ精確な身体動作を想像するかもしれない。またある人は、音の強弱やテンポの緩急などによる情感の表現を想像するかもしれない。このような音楽家の演奏技能は、古くから演奏家のみならず、様々な分野の研究者の関心も惹いてきた。これまでのこうした研究の多くは、単独の実験参加者を対象に行われてきた。一方、音楽の演奏形態には、単独演奏（ソロ）のみならず、2人、あるいはそれ以上の人数のグループによる演奏（アンサンブル）も存在する。アマチュア楽団のコンサートでは、個々人の技量そのものは高くないにもかかわらず、楽団全体として鬼気迫る演奏が実現されることがしばしばある。これも音楽演奏の醍醐味の1つである。そのようなアンサンブル演奏を実現するには、パートナーとの調和、協調のため、音量や音程、およびタイミングをパートナー間で調節しあう必要がある。これらに関わる技能も、音楽演奏における「巧みさ」の一要素と言えるだろう。にもかかわらず、音楽学的な研究ではその限りではないが、自然科学・実験科学的な手法を用いた音楽演奏に関する研究では、アンサンブル演奏の技能は、少数の例外を除き、あまり顧みられてこなかった。そのため、アンサンブルに関わる技能の修得や指導においては、演奏者自身や指導者の経験や直観に頼らざるを得ない部分が現在でも多い。とりわけ、演奏者間のタイミングの同期がとれないことや、しばしば観察されるテンポの加速といった現象に対しては、緊張や高揚のためにパートナーを顧みず先走ってしまう者が現れ、他の人もその人について行ってしまうためと考えられてきた。そのため、その対策の指導は「パートナーの音をよく聞くようにする」「落ち着く」「何度も練習して慣れる」といったような、演奏者の心の持ちように原因があることを前提としたものがほとんどである。

しかし、2000 年頃を境に、そのような演奏研究の分野においても、音楽が持つコミュニケーションとしての側面が注目されるようになってきた(Gabrielsson, 2003; 河瀬, 2009). おそらくその背景には、1990 年代前後の行動科学において、特定の環境に置かれたヒトの特徴的な振る舞いに関する知見が多く得られたことが関係すると思われる. たとえば、ヒトは他者の動作に対し、自身の動作を意図せず協調させてしまうことが、様々な実験や行動観察から明らかにされた(Bernieri, Davis, Rosenthal, & Knee, 1994; Bernieri, Reznick, & Rosenthal, 1988; Chartrand & Bargh, 1999). この環境の刺激に対して無意識に動作を協調させてしてしまう性質は、特にリズムカルな動作では顕著に表れ、環境のリズムに対して自身の動作を同期させてしまうことや、状況によっては特定の協調パターンでの動作しか行えなくなるという例が数多く報告されている(Haken, Kelso, & Bunz, 1985; Richardson, Marsh, Isenhower, Goodman, & Schmidt, 2007; Schmidt & O'Brien, 1997; Varlet & Richardson, 2015). このような現象に対しては、1980 年代中頃から、身体運動への力学系アプローチの適用例が増加し、そのダイナミクスを定量的に評価する方法が発達してきた(例: Haken, Kelso, & Bunz, 1985; Schmidt & O'Brien, 1997; Schmidt & Turvey, 1994). さらに近年には、非線形時系列解析の手法の発展により、動作の協調に関して、複数の時間スケールにまたがる協調の様相を定量的に評価・比較することが可能になった(Delignières & Marmelat, 2014; Zebende, 2011). このように、アンサンブル演奏における協調の性質を実験的に検討・考察するためのリソースが、近年ますます充実してきている.

このような背景から、本論文では、アンサンブル演奏という課題環境それ自体が、人間の動作に対してどのような制約を与えうるのか、という観点から、アンサンブル演奏における協調のダイナミクス¹を検討する上での基礎的知見を得ることを目的とし、アンサンブル演奏のモデル動作として 2 人組テンポ維持同期タッピング課題を用

¹ 変数の時間発展（時間と共にどのように移り変わるか）に関する性質や法則性、あるいはそれらを研究する分野のことを、ダイナミクスと呼ぶ.

い、単独で行う場合との課題パフォーマンスの差異、およびその差異の発生機序について検討した。特に、「目標テンポの維持」および「パートナー間の同期」という、アンサンブル演奏の協調の基礎をなすと考えられる2つの要素に着目した。

第1章では、第2章以降の研究の背景について総説した。

第2章（研究1）では、テンポ維持タッピング課題を単独で行う場合と、2人組で互いのタイミングを同期しながら行う場合（2人組テンポ維持同期タッピング課題）との、テンポ逸脱の振る舞いの違いについて検討した。その結果、単独条件では動作テンポが徐々に加速する試行、減速する試行、加減速を繰り返す試行など様々な変動パターンが見られた一方、2人組条件では8割以上の試行でテンポが加速するという偏りが現れることが明らかになった。この現象を引き起こしたプロセスについて、リーダー・フォロワー関係、心拍の影響、および同期のためのタイミング調節の観点から検討し、2人組での加速を再現する結合振動子モデルを提案した。

第3章（研究2）では、研究1で得られたタップ間隔時系列の組について、フラクタル解析を用いてマルチスケールな相関構造を検討した。

第4章では、以上の研究から得られた知見について、総括的に議論した。

第1章

研究小史と本論文の目的

1-1 テンポ維持タッピング課題における動作テンポの逸脱

時間長の知覚と再生に関するまとまったデータを提供した最初期の論文集と考えられるのは、Vierordt (1868) “*Der Zeitsinn nach Versuchen*”である(Lejeune & Wearden, 2009). 彼は時間知覚に関する様々な心理物理的実験を実施し、その成果は Vierordt's Law として知られている。Vierordt's Law とは要約すると、「短い時間長は実際より長く知覚され、長い時間長は実際より短く知覚される」というものである。この法則は、刺激を提示してから一定時間後に1回タップを行い、そのタップからまた同じ時間が経ったときに再度タップを行うという、時間長再生課題により確かめられた(Lejeune & Wearden, 2009).

時間長再生課題を系列的なタッピング課題に拡張した最初の研究と考えられるのは、Stevens (1886)である(Repp, 2005). 彼は指定された一定のテンポでの動作を続ける運動課題とその結果を、初めて報告した。この運動課題は、最初はメトロノームと同期して指タッピングを行い、しばらくするとメトロノームが停止するが、実験参加者はそのまま、メトロノームで指示された元の動作テンポでの動作を継続することを求められる。このような課題の性質から、この運動課題は今日「同期-継続課題 (synchronization-continuation paradigm)」と呼ばれている。Stevens (1886)はこの課題を7名の参加者に、様々なテンポで行わせた。指示されたテンポ（タップ間隔 Inter Tap Interval: ITI）は、最も速い試行では 260 ms, 最も遅い試行では 2,850 ms であった。その結果として、個人差はあるが、長いタップ間隔を指示した場合は継続フェイズのタップ間隔はより長くなりやすく、短いタップ間隔を指示した場合は、より短くなりやすかった、と報告されている。また、このような一定の方向への逸脱だけでなく、1

試行の中でタップ間隔が一定である時期や、徐々に短くなる時期、徐々に長くなる時期が混在している場合もあったことも報告されている。

1-1-1 同期-継続課題における ITI のばらつきとドリフト

このように、同期-継続課題において ITI はばらつきを見せ、場合によっては徐々に目標値から逸脱していく。この逸脱現象 (ITI ドリフト) は古くから知られているが、ITI ドリフトに関わるメカニズムの全容は、現在も明らかになっていない。しかし少なくとも、ヒトの中枢時計が確率的なばらつきを持つということと、そもそも中枢時計自体がドリフトする性質を持っているという点が、ITI ドリフトに関する過去の研究で明らかにされてきている (Collier & Ogden, 2004; Ogden & Collier, 2002, 1999; Repp, 2005)。

このことを実験的に確認する基礎を作ったのは、Wing-Kristofferson モデルと呼ばれる数理モデルである (Wing & Kristofferson, 1973a, 1973b)。Wing-Kristofferson モデルは、次の 3 つの仮定に基づいている：(1) 中枢時計が C_j のインターバルでトリガーパルスを出力する、(2) パルスが出力されてから D_j の運動遅延を経て、参加者が反応 (タップ) する、(3) C_j と D_j は自己相関を持たない乱数である (Wing & Kristofferson, 1973a)。このとき j 番目のタップ間隔は、

$$I_j = C_j - D_{j-1} + D_j \quad \text{式 1-1}$$

で与えられる。また、上の仮定からさらに、次の関係式が導かれる。

$$\gamma_I(1) = -\sigma_D^2 \quad \text{式 1-2}$$

$$\gamma_I(0) = \sigma_C^2 + 2\sigma_D^2 \quad \text{式 1-3}$$

ここで、 $\gamma_I(n)$ は時系列 I のラグ n の自己相関係数、 σ_D^2 および σ_C^2 は、それぞれ運動遅延、中枢時計が持つ分散である。つまり、Wing-Kristofferson モデルにより、ITI 時系列が持つばらつきを、運動のばらつきに由来する成分と、中枢時計のパルス出力間隔のばらつきに由来する成分とに分解することが可能になった。これにより、同期-継続課題の ITI のばらつきには、中枢時計のばらつきの貢献が大きいことが明らかになった(Ivry, Keele, & Diener, 1988; Wing & Kristofferson, 1973a).

ただし、モデルの仮定のうち「 C_j と D_j は自己相関を持たない乱数である」という部分は、実際には成り立たない場合がある可能性が示唆された(Ivry et al., 1988; Ogden & Collier, 2002). 特に時系列が無視できないほどの長期トレンドを含んでいる場合は、この仮定は合理的とは言えない。そのため、測定結果に Wing-Kristofferson モデルを適用する際には、分散が大きすぎる試行のデータは除外する(Duchek, Balota, & Ferraro, 1994), あるいは線形トレンドを除去してからモデルを適用するなどの処置が推奨されてきた(Vorberg & Wing, 1996). その後 Wing-Kristofferson モデルは、Ogden & Collier (2002)により、ドリフトを含む時系列にも適用できるよう拡張された。さらに、ITI 時系列全体の分散を、運動に由来する成分、中枢時計のドリフトに由来する成分、中枢時計のドリフト以外のばらつきに由来する成分の 3 要素に分解することが可能になった(Collier & Ogden, 2004). その結果、目標 ITI がおよそ 333~1579 ms の同期-継続課題では、ITI の分散全体のうち、運動に由来する成分が 9~39%, ドリフトを除いた中枢時計のばらつきに由来する成分が 48~60%, 中枢時計のドリフトに由来する成分が 12~30%ということが明らかになった(Collier & Ogden, 2004). さらに、音楽への傾倒度合いが強い人ほど、ドリフト由来の成分が少なくなることが明らかになった(Collier & Ogden, 2004). 特に、音楽の傾倒度合いが最も強かったグループと最も弱かったグループとでの各成分の大きさの比較では、弱かった方のグループでは、運動由来の成分、ドリフト由来の成分、ドリフトを除いた中枢時計由来の成分が、それぞれ平均 2.24 倍、3.40 倍、1.47 倍の高値を示した(Collier & Ogden, 2004). この結果から、ITI の維持の個

人差の要因としてドリフトは最も顕著な要因の一つであり、音楽経験を含め、どのような要因が、どのようなメカニズムでドリフトの大きさや方向性を変化させるのかという方向性の研究が重要であることが示唆された(Collier & Ogden, 2004).

1-1-2 ITI ドリフトの振る舞いへの影響要因

ITI ドリフトの大きさや方向性を決める要因には、決定論的な要因と、確率論的な要因がある。決定論的な要因に関する代表的な理論としては、アトラクター・テンポの存在が挙げられる(Collier, Broadbent, & Church, 1992, 1994). Collier et al. (1992)は、27種類の目標 ITI(175~825 ms の範囲で、25 ms 刻み)での同期-継続課題を実施した結果、徐々に遅くなりがちなテンポ帯と、速くなりがちなテンポ帯とが、交替で表れることを示した。具体的には、個人差があるものの、平均すると 175~250 ms のテンポ帯では遅く、250~413 ms では速く、413~513 ms では遅く、513~748 ms では速く、748~825 ms では遅くなりやすかった(Collier et al., 1992). 彼らはこの結果を、参加者自身が自由に選んだ好みのテンポでの継続タッピング課題の結果と照らし合わせた。その結果、上記の速くなりやすいテンポ帯と遅くなりやすいテンポ帯の境目に当たる ITI 値の近傍に、参加者が選んだ ITI が集中することが明らかになった(Collier et al., 1994). この結果には、指の固有周期のような機械的な制約(Repp, 2005)や、異なる時間スケールを司る複数の中枢時計の関与(Buhusi & Meck, 2009; Merchant, Zarco, Perez, Prado, & Bartolo, 2011)によるものと考えられる。また、同期-継続課題ではなく快適なテンポでのセルフペースのリズム動作課題における発見ではあるが、Cardiac-locomotor カップリング、すなわち、循環器系と歩行器との結合という現象も関係している可能性がある。これは、歩行や走行、セルフペースタッピングのような動作を快適な動作テンポで行う課題を実施すると、参加者が選ぶテンポが各自の心拍数の倍数とおおよそ一致するという現象である(Iwanaga, 1995; Kirby, Carr, & MacLeod, 1990; Kirby, Nugent, Marlow, MacLeod, & Marble, 1989; Miyaoka, Sato, Takahashi, & Shimada, 1987). この現象が同期-

継続課題においても確認されたという報告は筆者の調べたところでは見つからなかったが、これがドリフトに関係している可能性も考えられる。

一方、確率論的な要因としては、 $1/f$ ノイズの影響が挙げられる。 $1/f$ ノイズとは、パワースペクトル密度関数が周波数に逆比例する性質を持つことからそう呼ばれる動揺パターンで、交通の流れ(Musha & Higuchi, 1976)や太陽黒点の活動(Mandelbrot & Wallis, 1969), DNA シーケンスの構造(Peng et al., 1994)など、様々な領域で発見されてきた ($1/f$ ノイズに含まれる大きな低周波成分が、ドリフトに対応している)。 $1/f$ ノイズはヒトの動作においても、同期-継続課題の ITI 時系列(Gilden, Thornton, & Mallon, 1995)の他、立位姿勢の動揺(N. Yamada, 1995a), 歩行(Lamoth, Ainsworth, Polonski, & Houdijk, 2010)や走行のストライド(Jordan, Challis, & Newell, 2006; Nakayama, Kudo, & Ohtsuki, 2010)など、様々な課題の時系列で発見されている。この $1/f$ ノイズは、システムが特徴的な時間スケールを持たない(Gilden, 2001), あるいは言い換えると、多くの時間スケールを内包していることを反映する(Goldberger et al., 2002)と説明されることがある。また、過去の値が、未来の値に対し長時間影響を及ぼし続けるという数理構造を持つ時系列を考えると、その時系列が $1/f$ ノイズのように振る舞うことがある(松葉, 2007)。さらに、多数のシステムが互いに複雑な相互作用を及ぼし合うとき、自然に創発される揺らぎであるという指摘もある(Delignieres & Marmelat, 2012)。

いずれにせよ ITI ドリフトは、同じ参加者が同じ目標タップ間隔で課題を繰り返し行っても、その量ばかりか、方向性まで異なる結果が得られることがしばしばあることから、その主たる構成要素は、後者の確率論的な要素であると考えられている(Ogden & Collier, 1999)。

1-2 アンサンブル演奏における同期とタイミング調節

「時間芸術」とも呼ばれる音楽にとって、音を時間的に組織化した構造であるリズムは、最も本質的な要素の1つである(Radocy & Boyle, 1979; Thaut, 2005)。その意味で、

前節で論じた「一定のテンポを保つ」という運動課題は、音楽演奏にとって最も基礎的な技能の1つと言える。その一方で、前節で述べた内容から明らかなように、生演奏では発音のタイミングに必ずばらつきが生じる。さらに、ロマン派以降の楽曲の演奏で顕著なように、演奏者はしばしば意図的に、発音のタイミングや演奏のテンポに大小の揺らぎを持たせる。演奏においてタイミングを意識的に揺らがせることは、*expressive timing* と呼ばれ、ピアノのソロ演奏を中心に研究されてきた(Clarke, 1982; Gabrielsson, 1987; Repp, 1992; Shaffer, Clarke, & Todd, 1985; Windsor & Clarke, 1997)。これらの研究のように、ソロの演奏であれば演奏者は自ら意のままにこのタイミングを決めることが出来る。一方、アンサンブル演奏では他の演奏者との調和のため、タイミングの調節が不可欠である(Davidson, 1997)。Rasch (1979)は、吹奏楽および弦楽三重奏の実演におけるパート間の発音タイミングを分析した結果、同期のずれ(発音タイミングの差)のばらつきは、標準偏差にして23~50 ms程度であったことを報告している。Rasch (1979)が分析した音源はほぼ一定のテンポでの演奏だったが、Shaffer (1984)は *expressive timing* を伴うピアノデュオの演奏でも、同期のずれのばらつきは同程度であったと報告している。これらの研究を除くと、アンサンブル演奏におけるタイミングの研究は従来あまり行われてこなかった。しかし2000年頃、音楽演奏をコミュニケーションという立場から捉え直す研究の流れが生まれ始め、近年徐々にその数が増加している(Gabrielsson, 2003; 河瀬, 2009)。本節では、演奏におけるタイミング調節に関する近年の研究について、アンサンブル演奏に関するものを中心にレビューする。

1-2-1 同期のタイミング調節に用いられる感覚モダリティ

1-2-1-1 同期タッピング課題における聴覚キューの優位性

同期のためのタイミング情報は、主に聴覚と視覚から知覚される。これら2つの感覚を比較すると、視覚は空間的情報の知覚に対し、聴覚は時間的情報の知覚に対し優位であるとされる(Repp & Penel, 2002)。

実際、同期タッピング課題のタイミングには聴覚刺激の影響が強いことが多くの研究から示唆されている(詳細なレビューは Repp, 2005a; Repp & Su, 2013 を参照されたい)。例えば Repp & Penel (2002)は、500 ms 間隔で提示される視覚・聴覚キューに同期してのタッピング課題で、1 試行の刺激系列の中に 1 回だけ間隔が異なるキューを混ぜ、そのキューが早かったか遅かったか、それとも同じ間隔であったかを答えさせる実験を行った。刺激提示条件には聴覚・視覚が単体で提示される条件 (unimodal 条件) と、基本的に両方同時に提示されるが片方だけの提示タイミングがずれる条件 (bimodal nonconflict 条件)、および両方のタイミングが逆方向にずれる条件 (bimodal conflict 条件) を設定し、これらでの正答率を比較した。その結果、unimodal 条件では聴覚刺激の方が、間隔のずれを正しく検出しやすかった。Bimodal でも、聴覚刺激のずれの方に判断が引っ張られた。また、Repp & Penel (2004)は、一定の時間間隔で提示される聴覚キュー (ターゲット) に同期してのタッピング課題で、ターゲットに先行または遅れたタイミングで視覚キュー (ディストラクター) を与えた時の影響を検討した (視覚キューがターゲット、聴覚キューがディストラクターの条件も行った)。その結果、聴覚キューがディストラクターである時の方が、ターゲットとの同期のずれのばらつきが大きくなった。他にも、等間隔の刺激 4 回に対し 1 回タップする同期タッピング課題 (1:4 タッピング課題) を行った場合、課題が遂行できる最も短い刺激間隔が、聴覚刺激ではおよそ 97~170 ms であったのに対し、視覚刺激では 413~540 ms と、4 倍近く異なったという報告もある(Repp, 2003b)。これらの結果から、同期のためのキューの知覚には、視覚と比べ聴覚の方が有利であることが示唆される。

1-2-1-2 実際の演奏環境における視覚情報の活用

前項のような実験室的課題の結果から考えると、音楽における同期にとって視覚情報はさほど有用でないように一見思われる。しかし以下に示すように、実際の演奏における測定や、それを模した環境での課題の結果からは、参加者は視覚情報も相当用

いていることが示唆されている²

Katahira et al. (2007)は、2人組で好みのテンポで同期しながらドラムパッドを叩く課題を、対面で互いの動作が見える条件と、2人の間にカーテンを挟み視覚を遮蔽した条件とで行い、両条件間での同期のずれを比較した結果、遮蔽条件の同期のずれは、対面条件と比較して大きかったことを示した。Kawase (2014)は、ピアノデュオ演奏のフェルマータ³部における凝視行動のパフォーマンスへの影響について、互いの姿が見えない条件、胴体のみが見える条件、頭部だけが見える条件間での、演奏者間の打鍵タイミングのずれを測定した（聴覚フィードバックはどの条件でも利用できた）。その結果、互いの姿が見えない条件のずれは平均で約 160 ms で、他の条件（約 50~60 ms）より有意に打鍵タイミングのずれが大きかった。実験室的課題における聴覚刺激系列とタップタイミングのずれは、刺激のテンポにもよる差や個人差はあるが、おおむね 50 ms 以内の結果が報告されることが多い(Aschersleben, Gehrke, & Prinz, 2001; Aschersleben & Prinz, 1995; Repp, 2003a, 2004)。Kawase (2014)の互いが見えない条件での平均値は temporal coherence boundary を越えているが、視覚情報を用いることにより、expressive timing を伴う演奏においても、タイミングのずれを実験室的課題とほぼ同程度まで抑えることができたと言える。

以上から、実験室における等間隔の刺激系列に対する同期タッピング課題では、聴覚がタイミング調節に大きな役割を果たすことが示されているが、より実際の演奏環境に近い課題、特に expressive timing を伴う課題環境では、視覚情報の重要性が増すことが示唆されている。

²本研究では視覚的相互作用については考慮しなかったため、ここでは簡単な紹介にとどめる。

³ 曲の終止部や場面・フレーズの切り替わりでよく用いられる、時間の流れが止まったかのような表現。フェルマータ記号の付いた音符や休符は、長めに伸ばされることが多い。

1-2-2 タイミング調節における相互適応のプロセスとリーダー・フォロワー関係

では、アンサンブルの演奏者たちは、知覚したタイミング情報を用いて、どのような情報処理を行っているのでしょうか。先行研究はこの問いに対して、タイミングの予測と、相互的な微調整の重要性を示唆している。

Keller, Knoblich, & Repp (2007)は2人組でのピアノ連弾課題を用い、自分自身が弾いた他パートの録音と共に行う条件と、他人が弾いた他パートの録音と共に行う条件とで、同期のずれ、およびそのばらつきを比較した結果、自分自身の録音との同期の方が、ずれもばらつきも有意に小さいことを示した。Loehr & Palmer (2011)も2人組でのピアノ連弾課題を用い、同じ曲を1人で自由に弾いてもらったときのテンポの差が大きいペアでは、そうでないペアと比較して同期のずれや、打鍵間隔のパートナー間相関が低くなることを示した。Pecenka & Keller (2011)は2人組タッピング課題でこのLoehr & Palmer (2011)の結果を再現したとともに、テンポ変化に対する予測能力（テンポが徐々に変化するビート系列との同期タッピング課題から測定された）が、タッピング課題の同期のずれやばらつきの大きさに影響することを示した。さらに、Konvalinka, Vuust, Roepstorff, and Frith (2010)は、2人組の参加者での同期タッピング課題を実施した。Konvalinkaらはパートナー間の結合の条件を、(1) 結合なし（互いの音は聞こえず、メトロノームと同期して同時にタッピングする）、(2) 単方向の結合（片方は自身と他方の音が聞こえ、他方は自身の音しか聞こえない）、(3) 双方向の結合（互いに自身の音もパートナーの音も聞こえる）の3条件に変化させ、各条件間での同期の度合いと相互相関係数（ラグ：0 および ± 1 ）の際を検討した。同期の度合いは、(2)のみが(1)および(3)と比較して有意に低かった。相互相関係数は、(1)ではいずれのラグでも非有意。 (2)ではラグ ± 1 のみが有意な正の相関。 (3)ではラグ ± 1 で有意な正の相関、ラグ0で有意な負の相関が認められた。このことから、タイミングの協調を成功させるには、タイミングが予想できるだけでなく、相互適応のプロセスが重要である

ことが示唆された。

その一方で、より実環境に近い状況での振る舞いを計測した研究では、リーダー・フォロワーというべき関係が創発しているという報告もある。演奏現場におけるリーダー・フォロワーの典型例は指揮者とオーケストラであるが、演奏者の側においても、たとえば Sloboda (1985) によると、旋律のパートは他のパートより数十ミリ秒ほど先行して演奏される傾向がある。また、演奏タイミングに関して直接的な報告はされていないが、Badino, Ausilio, Glowinski, Camurri, & Fadiga (2014)はプロの弦楽四重奏団の頭部動作を測定し、4 人の頭部動作時系列のすべての組み合わせに統計的因果解析を適用したところ、一般にリーダーとされる第一バイオリン奏者の動作の影響力が最も強かったことを報告している。

1-2-3 同期のずれの修正

同期のずれの修正に関する近年のモデルでは、Phase correction（位相修正）と Period correction（周期修正）という、2 つの独立したプロセスの存在が仮定されている。前者は中枢時計における目標タップ間隔の計画を更新しないプロセスで、後者は中枢時計の目標タップ間隔を更新するプロセスである。この 2 つのプロセスを明確に区別して表現した最初のモデルは、次に示す Mates (1994a, 1994b)のモデルである（これ以前のモデルについては Repp (2005a)および Repp & Su (2013)を参照されたい）：

$$T_n = T_{n-1} - \beta(T_{n-1} - IOI_{n-1}) \quad \text{式 1-4}$$

$$a_{n+1} = a_n - \alpha a_n + T_n - IOI_n \quad \text{式 1-5}$$

ここで、 T_n は中枢時計が計画している n 番目のタップ間隔、 IOI_n はメトロノームのビート間隔、 a_n は n 番目のタップとメトロノームビートの同期のずれ、 α, β はそれぞれ位相修正と周期修正の強度のパラメータを表す。式 1-4 と式 1-5 から明らかなように、

このモデルでは位相修正はタップとビートの同期のずれに基づいて行われ、周期修正はタップ間隔とビート間隔の差に基づいて行われると考えられている⁴。また、このモデルと前節で述べた Wing-Kristofferson モデルを対比して、位相修正と周期修正を比較すると、前者は比較的遠心性のプロセス、後者はより中枢に近いプロセスと考えられている(Repp, 2001)。

Mates (1994a, 1994b)のモデルは知覚情報処理の立場から、ビート間隔やタップ時刻のずれといった、タップに伴い発生する離散的な数列を記述しているが、中枢時計の位相や周期の連続的な時間発展に着目する力学系アプローチの立場(1-4-1で述べる)から、位相と周期の修正を記述したモデルもある。その最初のモデルは Large & Jones (1999)による次のモデルである。

$$\phi(t) = \frac{t - t_x}{p}, \quad t_x - \frac{p}{2} < t < t_x + \frac{p}{2} \quad \text{式 1-6}$$

$$\phi_{n+1} = \phi_n + \frac{t_{n+1} - t_n}{p} - \eta_\phi F(\phi_n) \quad (\text{mod}_{-0.5 \ 0.5} 1) \quad \text{式 1-7}$$

$$p_{n+1} = p_n + p\eta_p F(\phi_n) \quad \text{式 1-8}$$

式 1-6 において t はタップが行われた時刻、 p は目標となっているタップ間隔(周期)、 t_x は周期 p のタップの中での位相を定義するための時間の定義域である。これにより、時刻 t に行われたタップの位相 $\phi(t)$ が定まる。式 1-7 は位相修正を表し、 t_n および ϕ_n は、 n 回目のタップが行われた時刻および相対位相、 $F(\phi_n)$ は相対位相 ϕ_n に対しどれだけ

⁴ ただし後に Schultze, Cordes, & Vorberg (2005)が、周期修正も、位相修正と同様に直前の同期のずれに基づいて行われると仮定してモデルを修正し、この方がテンポ変化を伴うビートに対する同期課題の結果をよく説明できたと指摘している。また、Jacoby & Repp (2012)は、Mates (1994a, 1994b)のモデルでは行動データを説明できない場合があることを指摘している。

の修正を返すかを表す位相応答関数, η はビートとの結合強度をそれぞれ表す. 式 1-8 は周期修正を表し, p_n は n 回目のタップと $n+1$ 回目のタップの間隔である. Loehr, Large, & Palmer (2011) は, テンポ変化を伴うピアノ連弾課題のような, ビートとタップの関係が 1:1 のみでない場合が含まれる, タッピングより音楽的な課題においては, 上記の力学系アプローチからのモデリングの方が結果をよく説明できることを示した. 近年は, このモデルを 3 人以上のアンサンブルを記述する物に拡張したものも提案されている (Drew, Dolch, & Castro, 2015).

1-3 社会的環境における動作の変調

模倣や同調は, 他の動物種との比較において, ヒトの最も特徴的な振る舞いの 1 つである (Iacoboni, 2008; Rizzolatti & Craighero, 2004). 人々が会話や何らかの作業を共同で行うと, 発話のリズム (Condon & Sander, 1974), 身振りや姿勢 (Bernieri et al., 1994, 1988), 顔の表情 (Chartrand & Bargh, 1999; Meltzoff & Moore, 1977) など, 様々な側面で意図的・非意図的に模倣や同調が行われる. 音楽のアンサンブル演奏においても, 演奏者の発音タイミングだけでなく, 身体動作が同期する (Goebl & Palmer, 2009; Keller & Appel, 2010). このような模倣や同調が起こる背景は, 観念運動理論 (ideomotor theory) や, 課題表象の共有 (task co-representation) といった観点から説明されている.

1-3-1 観念運動理論と自動模倣

観念運動理論の基本的なコンセプトは, 「動作と知覚が表象を共有している」ということである (Greenwald, 1970; Hommel, 2009; Prinz, 1997; Shin, Proctor, & Capaldi, 2010). 実際, 動作の観察が, 実行に影響を与えるという証拠は多く得られている (Heyes, 2011). たとえば Brass, Bekkering, Wohlschläger, & Prinz (2000) は, 提示された刺激に従って参加者に指を動かしてもらう課題を行った. 彼らの最初の実験では, 参加者はモニターに手と同時に表示される数字に従った動作 (symbolic cue 条件: 1 が表示されれば人差

し指, 2 が表示されれば中指を上げる), またはモニターに単独で提示される手と同じ動作 (finger-movement 条件: 人差し指または中指を上げる) を求められた⁵. その結果, symbolic cue 条件で, 表示された数字 (参加者が上げるべき指) とモニターで上がっている指が一致した試行ではベースラインの試行 (モニターの指が動作しない) と比較して反応が有意に早くなった一方, 一致しない試行では反応が有意に遅くなった. 次の実験も上記の実験と基本的に同じであるが, symbolic cue 条件を廃し, その代わりに上げるべき指を数字でなく, モニター上の手の指に×印を描いて指示するよう変更した条件を新たに加えた (spatial finger cue 条件). 結果は最初の実験と同じく, ×印が描かれた指とモニター上で上げられている指が一致した試行ではベースライン試行より反応が早く, 一致しない試行では遅くなった. このように, 自身が行うべき動作と同じ動作を観察すると反応が早くなり, 行うべきでない動作を観察すると反応が遅れた. このことは, 動作の知覚が動作の実行に影響を及ぼしたという点で, 観念運動理論を指示している. 観念運動理論にはミラーニューロンシステム⁶と呼ばれる神経科学的な証拠も提出されており, これがヒトや霊長類の模倣動作の基礎を成していると考えられている (Iacoboni, 2008; Rizzolatti & Craighero, 2004).

1-3-2 社会的環境における課題表象の共有

Sebanz, Knoblich, & Prinz (2003)は, 選択反応課題を 2 人同時に行うと, 反応時間が遅くなったと報告した. この実験で, 参加者は 2 人組で隣り合って, または単独でモニターの前に座った. モニターには人差し指に指輪を着けた手が表示され, 単独の参加者での実験では, 片方の条件では指輪が緑色ならば左のボタンを, 赤色ならば右の

⁵ Finger-movement 条件ではモニターの手と異なる動作をするトライアルは実施されていない.

⁶ di Pellegrino, Fadiga, Fogassi, Gallese, & Rizzolatti (1992)は, マカクザルの脳の F5 野 (運動前野; 運動の計画を作成すると考えられている領域) の神経細胞の一部が, 運動を実際に行うときだけでなく, 運動を観察している時にも発火することを示した.

ボタンを押すことが参加者には求められた。この設定の下、一部の試行では、この人差し指は参加者が押すべき方のボタンを指さし (compatible 条件)、他の試行では、参加者が押すべきでない方のボタンを指さした (incompatible 条件)。この課題はサイモン課題と呼ばれ、compatible 条件と比較して、incompatible 条件では反応時間が長くなることが知られている (Craft & Simon, 1970)。Sebanz et al. (2003) の発見は、この課題を 2 人組で行った場合の振る舞いであった。2 人組での課題では、各参加者は 1 色のみに反応することが求められた。たとえば、左側の参加者は緑の指輪が現れたときのみボタンを押し、赤の指輪が現れたときはボタンを押さないことが求められた。このとき右側の参加者も同様に、赤の指輪が現れたときのみボタンを押し、緑のときはボタンを押さないことが求められた。この課題設定で、反応すべきでない方の参加者をモニターの手が指さす (incompatible 条件) と、反応すべき参加者の方を指さす (compatible 条件) とときよりも、反応時間が遅くなった。さらに、この 2 人組課題と同じ設定の課題を 1 人で行った場合は、compatible 条件と incompatible 条件で反応時間に有意差はなかった。これらの結果から、2 人組課題の incompatible 条件で反応が遅れた原因として、刺激そのものの性質というより、参加者がもう 1 人いることが影響した可能性が示唆される。Sebanz et al. (2003) は、incompatible 条件では「これはパートナーが反応すべき刺激である」という誤ったイメージが浮かび、これが本来の動作イメージと干渉するために反応が遅れたと解釈している。この研究や他の関連研究を総合して、Knoblich & Sebanz (2006) は、ヒトは他人の運動指令を自身の運動指令であるかのように無意識のうちに表象し、同じ表象を共有してしまうことにより課題パフォーマンスが低下するようだと結論した⁷。上記のパートナーがいると incompatible 条件の反応が遅くなる現象 (Joint Simon effect: JSE) の出現には、パートナーの人間らしさ (あるいは参加者がパートナーを人間と信じているか) が影響することが示されている。たとえば、パー

⁷ このパートナー間で共有された表象は、shared representation (Knoblich & Sebanz, 2006)、あるいは co-representation (van der Wel & Fu, 2015) などと呼ばれる。

トナーが隣ではなくモニターの中において、その手だけが見えているという状況では、パートナー役の手が生身の人間の手である場合には JSE が認められた一方、パートナー役の手が木偶人形の手だった場合には、JSE が消失した(Tsai & Brass, 2007). また、参加者に「人間のパートナーが別室にいる」と教示した条件と「パートナーはコンピュータのプログラムである」と教示した条件の比較でも、前者では JSE が認められたのに対し、後者では消失した(Tsai, Kuo, Hung, & Tzeng, 2008). ヒト型のロボットと隣り合って座り課題を行った実験でも、ロボットが人間のように外界の刺激に対して自律的に反応するよう作られたものであると教示された参加者には JSE が認められたのに対し、ロボットが決められたタイミングでボタンを押すようプログラムされていると教示された参加者には JSE は認められなかった(Stenzel et al., 2012). これらの結果は、社会的な要素が JSE に影響することを示唆しており、その意味で JSE は、Social Simon effect と呼ばれることもある(Stenzel et al., 2012; Tsai & Brass, 2007; Tsai et al., 2008)⁸.

1-4 リズム動作における協調のダイナミクス

前項で述べたように、パートナーが存在する場合、人々は自身の動作を無意識に変調させてしまう。リズムカルな動作を行う課題でもこのような動作の変調は認められ、それは位相ロッキング（相対位相が特定の値へ集中する）という形で現れる。本項では、このようなリズム動作における協調がどのようなダイナミクスを示すか、また、そのダイナミクスがどのように記述・解析されてきたのかについて述べる。

⁸ ただし、JSE は社会的な要素を仮定しなくとも説明できるという批判（Referential coding 説）もある。Referential coding 説は、自身が行うべきタスクと無関係だが類似した事象が存在していると、その事象と自身のタスクの表象とを区別しなければならず、このことが反応の遅延を招くと指摘している(Dolk et al., 2011, 2014; Dolk, Hommel, Prinz, & Liepelt, 2013). パートナーの存在は、その類似した事象と捉えることができる。もっとも、パートナーとの相互作用がある社会的文脈における JSE が自他の統合を反映するであろうことには、Dolk et al. (2014) も同意している。

1-4-1 力学系アプローチ

リズムミカルな運動課題における協調では、運動とリズム刺激の相対位相において、 0° （同位相）と 180° （逆位相）での位相ロッキングがしばしば観察される。他の相対位相値を維持して動作が行われることはほとんどない一方、この2種類の相対位相値は、あたかも引力を持つかのように、一度達成されると維持されやすく、そこから逸脱しても再び達成され、またしばらく維持される⁹。このようなダイナミクスは、簡単な微分方程式で表すことが出来る場合がしばしばある。動作の時間発展の法則性についてこのような方法で理解しようとする方法論は、力学系アプローチと呼ばれる。

身体運動への力学系アプローチの初期の成果で、現在に至るまで最も強い影響力を持つ例の1つとして、Haken, Kelso, & Bunz (1985)のモデル（HKB モデル）が挙げられる。彼らは両手の人差し指をリズムミカルに内・外転させ続ける運動を行うとき、対称的な動作（両腕の同名筋を同時に活動させる）と、交互の動作（両腕の同名筋を交互に活動させ、片方が最大内転位るとき他方は最大外転位）とが安定することを示した。さらに、動作をより素早く行くと、交互の動作が維持できなくなり、対称的な動作になってしまう（相転移）ことを示し、これを次の微分方程式（HKB モデル）で表現した。

$$\dot{\phi} = -\frac{\partial V}{\partial \phi} \quad \text{式 1-9}$$

$$V(\phi) = -a \cos \phi - b \cos 2\phi \quad \text{式 1-10}$$

ここで ϕ は両指の位相差を表し、対称的な動作は $\phi = 0^\circ$ 、交互の動作は $\phi = 180^\circ$ に対応

⁹ このような値を「アトラクター」と呼ぶことがある。

する。V はポテンシャル関数と呼ばれ、式 1-9 のように定義することで、 φ の安定性（その値の維持されやすさ）を図示するために用いられる。また、 b/a の値は動作の速さに対応している（速い動作ほど b/a が小さい）。図 1-2 に、様々な b/a に対する $V(\varphi)$ を図示した。動作が比較的遅いとき（ b/a が 0.25 より十分大きいとき）は、 $\varphi = 180^\circ$ はポテンシャルが谷になるため維持されるが、動作が速いとき（ $b/a < 0.25$ のとき）は、 $\varphi = 180^\circ$ のポテンシャルは山となるため、摂動や外乱がわずかでも位相差を維持できなくなり、動作は $\varphi = 0^\circ$ へ相転移する。HKB モデルは上記のように、元々1人の参加者の両手運動の協調ダイナミクスのモデルとして提案されたが、このような直接の神経接続がない個人間の協調や、メトロノームのビートと膝の屈伸運動のような知覚・運動同期課題も、HKB モデルのダイナミクスに従うことが示されている(Miura, Kudo, Ohtsuki, & Kanehisa, 2011; Schmidt, Carello, & Turvey, 1990).

1-4-2 協調構造の推定

本研究では同位相での協調課題のみを行ったが、同位相での動作協調の中でも、背景にある参加者間の結合のプロセスは多様である。特に本研究で取り扱うタッピングなどの時系列データでは、どのような時間スケールでの結合が、その協調を形成しているのかという点が重要である。

1-4-2-1 大域的な時間スケールにおける協調：複雑性の一致

ここまでに論じてきたタッピングや指の内外転のような課題における同期は、Mates (1994a, 1994b)や Large and Jones (1999)のモデルおよびHKBモデルから明らかなように、直前の同期のずれや位相差に基づいて次のタイミングや位相の調節が決定するという点で、局所的な時間スケールの結合に基づいて協調が形成されている。一方、このような局所的な時間スケールでの結合が困難であっても、時系列の大域的な性質としては協調が実現されるという例が、近年提出されている。その一例が、Stephen, Stepp,

Dixon, & Turvey (2008)が示した complexity matching (複雑性の一致) である。Stephen らは参加者に、1 秒から 1.5 秒の範囲のランダムな間隔のビート系列 (カオティック・メトロノーム) に対してできるだけ同期してタップを行う、という課題を行わせた。カオティック・メトロノームのビート間隔は 1 試行の中でも毎回異なり、参加者にはそのタイミングを正確に予測することはできなかった。にもかかわらず、カオティック・メトロノームのビート間隔と、それに対する参加者のタップ間隔は、時系列の「複雑性」という大域的な次元では、 $r(242) = 0.99$ もの極めて強い相関を示した。複雑性の一致は、カオティック・メトロノームとの同期課題だけでなく、両手に取り付けた振り子の振動課題の位相差のばらつき (Fine, Likens, Amazeen, & Amazeen, 2015)、カオティックな軌道を描く腕の動作との同期課題 (Washburn, Kallen, Coey, Shockley, & Richardson, 2015)、2 人組での交互タッピング課題 (Coey, Washburn, Hassebrock, & Richardson, 2016) や会話のリズム (Abney, Paxton, Dale, & Kello, 2014) などでも観察されている。ここでいう複雑性は、非線形時系列解析の分野では、時系列の変動の持続性とも呼ばれる。すなわち、今一度大きな (小さな) 値が出現したとき、その次に大きな (小さな) 値が続けて出現しがち (持続的) か、それとも逆に次は小さな (大きな) 値が出現しがち (反持続的) か、ということである。未来の値の予測という観点で言えば、反持続的な時系列や、一定の方向へのドリフトを示すほど持続的な時系列は予測が比較的容易な時系列と言える一方、持続的ではあるが一定方向へのドリフトを示すほどではない時系列は、予測が難しい。このような意味で、持続性は時系列の「複雑性」の指標となる。時系列の持続性は、パワースペクトル密度関数の傾き (PSD スロープ) や、トレンド除去変動解析 (Detrended Fluctuation Analysis: DFA) を用いて定量される (Delignieres et al., 2006; Peng, Havlin, Stanley, & Goldberger, 1995)。DFA は、解析対象の時系列の累積和からなる時系列を、様々な時間長のデータ窓で分割し、その

データ窓の中の局所トレンドを除去した上で、分散を求める解析手法である¹⁰。累積和時系列の分散はデータ窓の時間長 n を底とする指数関数に従い増大し、その両対数プロットの傾き α が時系列の持続性を表す¹¹。

1-4-2-2 大域的協調の背後にある相互作用

では、複雑性の一致はどのような相互作用から生まれるのであろうか。この問題に対する定説は現在のところ存在しないが、2つの説明が提唱されている。

1 つは、複雑性の一致が、局所的な結合を含む複数の時間スケールにわたる協調により実現されるという説である。Delignières and Marmelat (2014) は、1 人の参加者による両手同期タッピング課題と振り子の同期振動課題、および 2 人組の参加者による振り子の同期振動課題を実施した。彼らはその相対位相を DFA とトレンド除去相互相関解析 (Detrended Cross-Correlation Analysis: DCCA) を用いて解析した。DCCA は DFA と類似したアルゴリズムにより、2 つの時系列の間の相関を、様々な時間スケールにおいて検討する解析手法である (Podobnik & Stanley, 2008)。DCCA は比較的新しい解析手法であるため、出力される値の解釈の仕方は未だ定説が確立されていないが、実験的な操作がどのような時間スケールの協調に影響を及ぼしたかを評価する有用な方法である (Coey, 2015)。Delignières and Marmelat (2014) は DCCA および確認のための他の解析の結果として、複雑性の一致は、局所的な協調プロセスによっても創発しうることを示唆した。彼らはさらに、次数 1 の自己回帰モデル、つまり極めて局所的な情報のみを持つ時系列に結合を与えるだけで、長期的な動揺や複雑性の一致は説明できることも示した。Hunt, McGrath, & Stergiou (2014) や Rhea, Kiefer, D'Andrea, Warren, & Aaron (2014) も、視覚的・聴覚的カオティック・メトロノームが知覚される環境下での歩調のダイナミクスの解析から、複雑性の一致が局所的な結合から創発しうるこ

¹⁰ 詳細なアルゴリズムはエラー! 参照元が見つかりません。で述べる。

¹¹ PSD スロープの値を $-\beta$ とするとき、 α との関係は、 $\alpha = (\beta + 1)/2$ となる。

を示唆している。

もう 1 つの説明は、*strong anticipation* と呼ばれる仮説である。*Strong anticipation* は Dubois (2001)により導入されたコンセプトで、内部モデルに依存しない予測方式であるとしばしば、説明される(こうした説明において、内部モデルを用いた予測は、*strong anticipation* と対照させ、*weak anticipation* と呼ばれている；Stepp & Turvey, 2010)。たとえば、2 台の半導体レーザーを組み合わせ、トランスミッター側にそれ自身のレーザーの遅延フィードバックが入力され、レシーバー側には無視できる程度の遅延でトランスミッターからのレーザーが入力されるというシステムを作ると、レシーバー側のビームは予測的同期とでも言うべき振る舞いを見せる。すなわち、レシーバーが出力するビームの強度の波形が、トランスミッターが出力するビームの強度の波形を先取りするような形になる(Stepp & Turvey, 2010)。Washburn et al. (2015)は、2 人組の参加者の片方（コーディネーター）に、他方（プロデューサー）のカオティックな腕の動作を模倣させる課題を実施したところ、コーディネーターに与えるプロデューサーの腕の位置のフィードバックに遅延を与えてもなお、両参加者の腕の動作が実時間でほぼ同期できることを発見した（ラグ 0 の相互相関係数が有意な正の値を示した）。プロデューサーの腕の動作のダイナミクスはリアプノフ指数により、十分にカオティック（特定のパターンを持たない）であったことが示された。つまり、コーディネーターはカオティックな動作を、フィードバックに遅延を与えられてもなお予測していたことになる。以上に示したような予測は、内部モデルによるものとしては説明できない。そこで *strong anticipation* 仮説は、内部モデルのように局所的な過去の状態を用いるのではなく、システムが持つ大域的な性質（あるいは統計的な性質）に適応することによって、未来の局所的な値を予測して同期する、という予測プロセスを提案している。

1-5 本博士論文の目的

本研究の目的は、アンサンブル演奏における協調のダイナミクスを、「目標テンポの

維持」および「パートナー間の同期」の2つの観点から明らかにすることである。目標の動作テンポを維持するという課題に関する研究は、1-1 に示したように、単独の参加者における研究に限られてきた。アンサンブル演奏の同期に関する研究も、1-2 に示したように、タイミング情報をどの感覚モダリティから受け取っているか、またはタイミング調節における感覚運動協調のプロセスの記述に限られ、テンポの維持に関する考察は行われてこなかった。1-3 に示したとおり、ヒトは集団環境に置かれると、動作を意図せず変調させてしまい、単独で行うときと同様には振る舞えないことがある。このことは、ソロ演奏とアンサンブル演奏とで、演奏テンポの揺らぎの振る舞いが異なる可能性を示唆している。

そこで本研究では、アンサンブル演奏のモデル動作として2人組での同期-継続タッピング課題を、パートナー間の同期も求める形で実施した。得られた ITI 時系列について、テンポ維持のパフォーマンス、およびパートナー間の協調構造を解析することにより、アンサンブル演奏という環境制約が演奏者のタイミング調節ダイナミクスに及ぼす影響について検討した。

1-6 図表

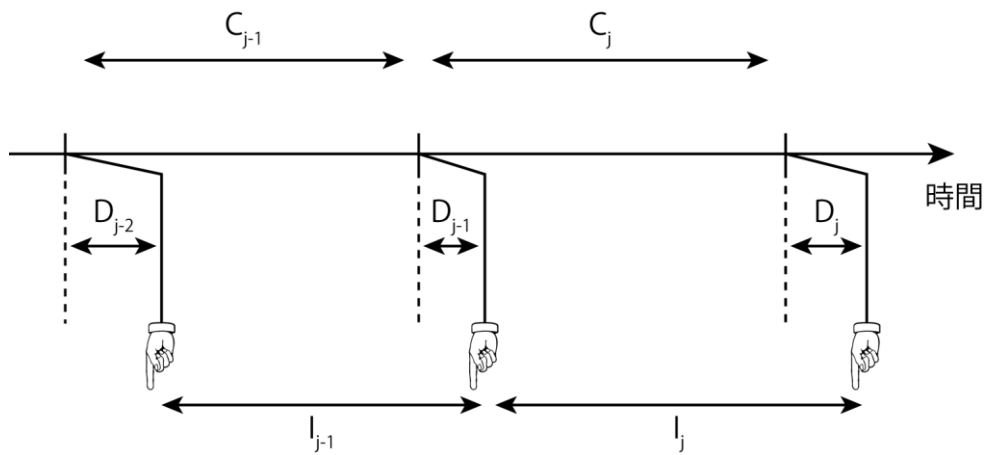


図 1-1 Wing-Kristofferson モデルの概要. C は中枢時計が計画したタップ間隔, D は中枢時計がタップ動作をトリガーしてから実際にタップが行われるまでの遅延, I は実際のタップ間隔を表す. ここから, $I_j = C_j - D_{j-1} + D_j$ の関係式が導かれる.

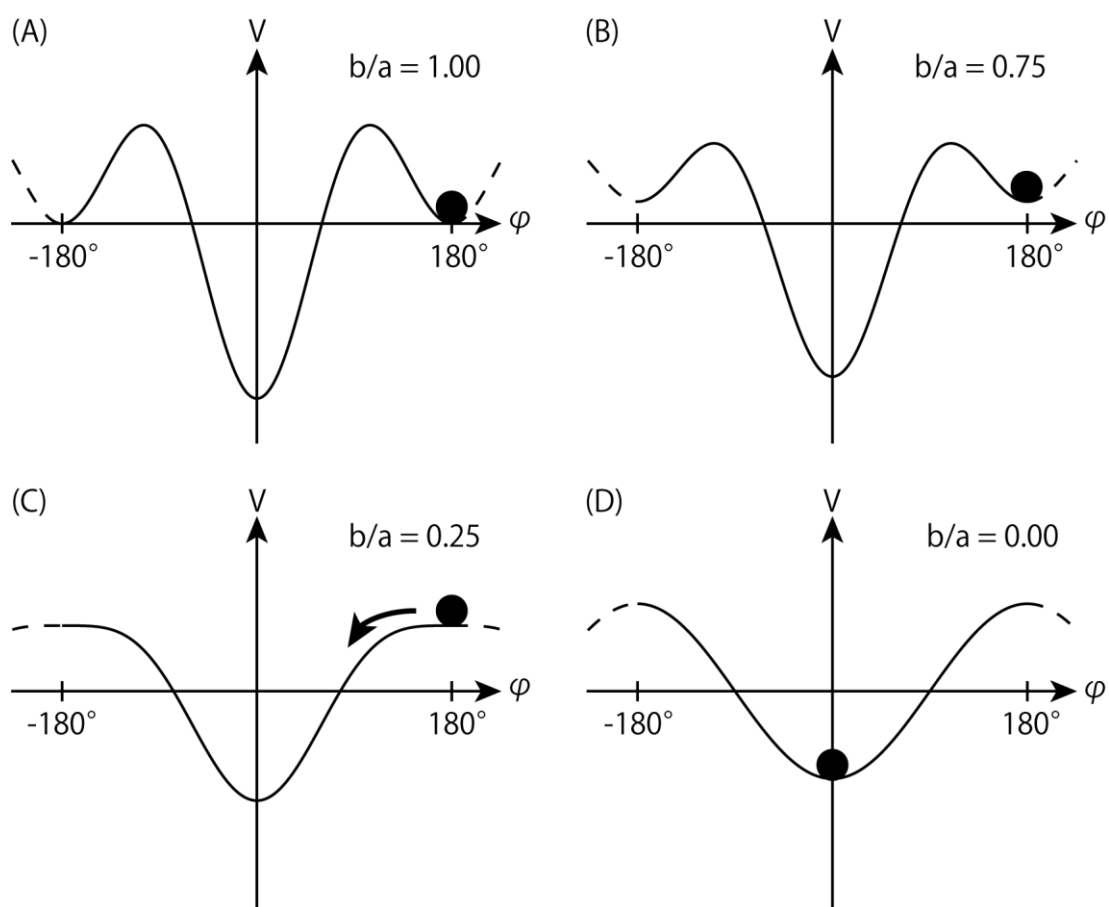


図 1-2 HKB モデルのポテンシャル関数式 1-10) の図示. 位相差 φ の動揺は, 図中の黒いボールの動揺に喩えられる. ボールはポテンシャル (位置エネルギー) の低い所へ落ちようとするが, (A)や(B)のように b/a の値が大きいと, $\varphi = 180^\circ$ の周りに壁があるため, $\varphi = 180^\circ$ が維持される. b/a を小さくしていくと $\varphi = 180^\circ$ の谷が徐々に浅くなり, $b/a = 0.25$ では平坦に(C), さらに小さくなると山になる(D). すなわち, 摂動や外乱が小さくても, それをきっかけにボールが $\varphi = 180^\circ$ から抜けだし, $\varphi = 0^\circ$ の谷へ落ちやすくなる. 指の内外転の運動では, b/a が速度に対応するパラメータである. HKB モデルではこのようにして, $\varphi = 0^\circ, 180^\circ$ が維持されやすい位相差であり, かつ動作を速めると 180° の維持が難しくなることをモデル化している.

第2章

2 人組リズム維持課題における対人間協調のダイナミクス

(研究 1)

2-1 2 人組リズム維持課題における動作テンポの高速化

2-1-1 要旨

同期-継続課題を単独で行った場合、タップ間隔 (ITI) は当初指示された基準 ITI から徐々に逸脱していく。ヒトはペアあるいは集団環境に置かれたとき、様々な運動 (選択反応課題, リズミカルなボディスウェイ, コンサート会場での拍手など) において、自身のタイミングを無意識に調節してしまうことが知られており、このことは、ペア環境が ITI の逸脱にも影響を及ぼす可能性を示唆している。そこで筆者は、ソロおよびペアでの同期-継続課題を、3 種類の基準 ITI 条件 (800, 500, 300 ms) で実施し、動作テンポ維持のパフォーマンスが基準 ITI およびソロ・ペアによって変化するかについて検討した。その結果、いずれの基準 ITI 条件でも、ソロと比較して、ペアでは ITI がより短くなった。参加者を、各組の中でソロが速かった方の参加者と遅かった方の参加者の 2 グループに分け、ペアとソロの ITI の相関について検討したところ、速い参加者のグループでは、ソロ条件とペア条件の ITI が強く相関した。さらに回帰分析から、ペア条件での ITI の短縮には、速い参加者、遅い参加者の両方のタイミング調節が関与していることが示唆された。これらのことから、参加者はペア条件においては、自身のタップと言うより、自身のタップとパートナーのタップのうち早く起こったものを手がかりに、内部時計の位相を修正している可能性が考えられた。結論として、ペアという環境は、ITI の逸脱を減少の方向に偏らせることが明らかになった。

2-1-2 背景

他者との協調は、ヒトが持つ最も特徴的な性質の一つである。ヒトが自身の動作を外界の刺激に意図的・非意図的に協調させることは、多くの研究が報告している (Knoblich, Butterfill, & Sebanz, 2011; Schmidt, Fitzpatrick, Caron, & Mergeche, 2011; Schmidt & Richardson, 2008)。特に非意図的な協調を指して、対人協調、あるいは社会的協調と呼ぶことがある。

ヒトは集団環境において、他者の行動に応じて自身の行動の調節や、他者の行動の模倣を行うことがある。たとえば、揺り椅子に座って揺れる2人が互いを見合うと、2人の揺れは、見合っていない場合と比較して、意図せず同期する局面が増える (Richardson et al., 2007)。会話中の人々は、相手の動作や表情を模倣する (Chartrand & Bargh, 1999)。コンサートホールの聴衆の拍手は、近くの人同士で同期する (Néda, Ravasz, Brechet, Vicsek, & Barabási, 2000)。人々はこのように、他者が存在する環境で、意図せず自身の振る舞いを変化させてしまうことがある。本研究では、他者との協調が必要な環境における、指定された一定のテンポで動作を続ける課題のテンポ維持パフォーマンスの変化について検討した。

指定された一定のテンポで動作を続ける能力は、同期-継続課題（以下、テンポ維持課題）というパラダイムにより測定される。テンポ維持課題は、次のようにして行われる：参加者は最初、メトロノームのビートに同期しての動作（指タッピングなど）を求められる。課題が始まってしばらく経つとメトロノームが停止するが、参加者はそのまま続けて、最初にメトロノームで指定されたテンポをできるだけ維持して、動作を続ける。単独の参加者がテンポ維持タッピング課題を行った場合のタップ間隔（Inter Tap Interval:以下、ITI）は、最初にメトロノームで指定されたテンポ（以下、基準 ITI）から徐々に逸脱していく (Repp, 2005)。動作テンポが速くなりやすいか遅くなりやすいかは、基準 ITI によって異なる。たとえば Madison (2001)は、400～2,200 ms の基準 ITI でのテンポ維持タッピング課題を実施した結果、400 ms の条件では徐々に

テンポが速くなった試行が多かったのに対し、他の条件では、速くなった試行と遅くなった試行の割合はおおよそ同等であったことを示した。また、Collyer, Broadbent, & Church (1992) の実験では、基準 ITI が 250~413 ms の条件では動作 ITI が徐々に速くなりがちであったのに対し、748~825 ms の条件では徐々に遅くなりがちであった。一方、異なる基準 ITI であっても共通に見られる現象として、ITI 時系列に長周期の動揺が見られることが挙げられる(Delignières, Lemoine, & Torre, 2004; Gilden, 2001; Roberts, Eykholt, & Thaut, 2000; Torre, Balasubramaniam, Rheaume, Lemoine, & Zelaznik, 2011; M. Yamada & Yonera, 2001; N. Yamada, 1995b)。たとえば Torre et al. (2011) が示した結果には、50~100 秒程度の周期での ITI の増減が観察できる。

同期-継続課題を 2 人組に拡張した課題を用いた研究も、近年増加している。これらの研究は主に、パートナー間のタイミングのずれに基づいた局所的なタイミング調節に主眼を置いてきた。たとえば、Konvalinka, Vuust, Roepstorff, & Frith, (2010) はパートナー間の結合環境を双方向（両方の参加者が互いのパートナーのビートを聞くことができる）、単方向（片方の参加者のみがパートナーのビートを聞くことができる）、非結合（いずれの参加者にもパートナーのビートが聞こえない）に設定して、2 人組の同期-継続課題を行った。Konvalinka et al (2010) は、双方向条件における ITI 時系列組の相互相関関数において、ラグ 0 では有意な負の相関、 ± 1 のラグでは正の相関が見られたことを報告しており、これを「hyper-followers パターン」、すなわち、両方の参加者がフォロワーとして振る舞っている状態と呼んだ。Konvalinka et al. (2010) が典型例として提示した ITI 時系列にもテンポ逸脱は見られ、特に双方向条件では徐々に ITI が減少していくものが提示されていた。しかし Konvalinka et al. (2010) の目的はテンポ逸脱の検討ではなかったため、この点については議論されていない。また、1 試行あたりのタップの回数も 32 回で、20 秒以下で課題が終了するものであったため、Torre et al. (2011) が示したような長周期の増減や、音楽演奏という数分にわたる課題におけるテンポ逸脱との関係を論じるには、データ長が不十分であると考えられる。2 人組

での同期-継続課題や類似の課題を扱った研究は他にもあるが、筆者が調査した限りでは、いずれの研究も 1 試行の時間は数十秒以内であった (Fairhurst, Janata, & Keller, 2013, 2014; Keller, Pecenka, Fairhurst, & Repp, 2012; Kleinspehn-Ammerlahn et al., 2011; Loehr & Palmer, 2011; Pecenka & Keller, 2011; Spiro & Himberg, 2012 など. このうち Spiro & Himberg, 2012 は、減少トレンドを持つ ITI 時系列を示している). このため、2 人組での同期-継続課題のテンポ逸脱の振る舞いを、単独での同期-継続課題と比較して同じと言えるかは不明であった. 十分な時間長をもつ 2 人組のリズム課題を実施した唯一の研究として Hennig (2014) が挙げられる. 彼らは 1 試行につきおよそ 8 分にわたる同期タッピング課題を実施した. Hennig (2014) も、減少トレンドを持つ ITI 時系列を典型例として提示している. しかし、Hennig は快適なテンポで同期タッピングをするよう教示していたため、同期-継続課題のように、元のテンポを維持するという意識が参加者にはなかった可能性がある.

以上のように、2 人組での同期-継続課題や、これに類似した課題では、減少トレンドを持つ ITI 時系列が典型例として提示されることがしばしばある. しかし、音楽のアンサンブル演奏のように、基準テンポとパートナー間同期の両方を維持することを求められるタッピング課題において、ITI の逸脱がどのような振る舞いを見せるかは明らかでない. 本研究では、単独および 2 人組での同期-継続課題の実験を実施し、(1) 基準 ITI, および (2)課題を単独で行うか、2 人組で同期も維持しながら行うかによって ITI 逸脱の振る舞いに変化するかについて検討した. その結果、ソロ条件でのタッピングでは徐々に加速した試行、減速した試行、加速と減速を繰り返す試行など様々なパターンが観察された一方、ペア条件では 8 割以上の試行で、タッピングのテンポが徐々に加速した (図 2-1). この加速は、どのようなプロセスによりもたらされたのだろうか. 1 つの可能性は、片方の参加者のリーダーシップ、すなわち、各組の中で速くタップしがちな方の参加者 (速い参加者) がリーダー、そのパートナー (遅い参加者) がフォロワーとなり、速い参加者のペースで進んだというプロセスである. も

しそうであるとすれば、速い参加者のタップは遅い参加者のタップより常に先行しがちであったと考えられる。しかし、両者のアシンクロニー（タップ時刻の差）値の時系列はゼロをまたいで小刻みに動揺していた（図 2-2）。また、ペア条件における ITI 時系列の組は、互いに逆位相に揺らいでいた（図 2-3）。これは Konvalinka et al. (2010) で議論された「hyper-followers パターン」の特徴であり、したがって、上記のような一方通行的なリーダーシップからは、本実験のデータを説明できないと考えられる。

もう 1 つの仮説は、パートナー間の双方向的なタイミング調節が、ペア条件でのタッピングの加速をもたらしたというものである。感覚運動同期に関する先行研究において、参加者らはペース信号やパートナーとの同期を保つために、自身の中枢時計の位相の修正を行うことが明らかにされてきた(Repp, 2005; Repp & Su, 2013)。ペース信号の前後に外乱トーンを挿入したときの反応を観察した実験では、ターゲットトーンの後外乱トーンが鳴る場合より、ターゲットトーンに数十ミリ秒先行して鳴った場合の方が、位相修正の反応が、大きかったことが報告されている(Repp, 2004)。さらに、感覚運動同期の課題の参加者の典型的な反応傾向として、ターゲットトーンより数十ミリ秒ほど先行してタップを行うという傾向（アシンクロニーの平均が負値をとることから、negative mean asynchrony: NMA と呼ばれる）が知られている(Repp, 2005)。つまり、hyper-followers となった参加者組において、位相修正反応の非対称性や NMA が組み合わさることで、タッピングの加速をもたらされた可能性がある。そうであるとすれば、タイミングのエラーに基づいて次なるタップタイミングが修正された度合いは、速い参加者でも遅い参加者でも同等であると考えられる。この仮説にもとづき、我々は単回帰分析および重回帰分析を行い、参加者間での ITI 差が ITI の変化率にどの程度影響したかについて検討した。

2-1-3 方法

2-1-3-1 実験参加者

26 名の健康な成人が実験に参加した。参加者の平均年齢は 24.2 ± 2.2 （平均±標準偏差）であった。参加者は、2 名を除いて、楽器の扱いへの熟達は無かった（熟達者の 2 名は経験年数 5 年と 10 年のアマチュアドラム奏者であった。この 2 名で 1 ペアを作った）。

2-1-3-2 装置

参加者のタップの取得および音声フィードバックのために、2 台の電子ドラムキット（WAVEDRUM Mini, KORG）を用いた。音色番号は 48（Cajon）に設定した。参加者は WAVEDRUM の外部センサーに取り付けられた $9.3\text{cm} \times 6.5\text{cm}$ のプラスチック板を叩いた。外部センサーを叩くと発生する電圧を、16-bit AD 変換器（USB-6218 BNC, National Instruments）を用い、サンプリング周波数 1000 Hz で記録した。参加者の前にあるモニターには残り時間を表すゲージが表示され、参加者は集中力を保つため、ゲージを見ることを許された。参加者の目の前のスピーカーからは、各自のタップに対応する音出力され、モニターの下の方のスピーカーからは、メトロノームの音出力された。参加者間の視覚的コンタクト、および実験者の視線による不快感を避けるため、参加者の間および参加者と実験者の間に間仕切りを設置した。

2-1-3-3 手続き

参加者は 2 人組で実験室へ入り、装置の前の椅子へ座り、実験手続きについての説明を受け、叩き方の練習を行った。続いて 1 人目のソロ条件の第 1 ブロックの 1 試行目が開始された。1 試行あたりの課題時間は、Torre et al. (2011) が示した長周期の動揺を考慮し、200 秒とした。まず基準 ITI を示すメトロノームのビートが提示され、参加者はメトロノームと同期してのタッピングを始めた。メトロノームは 10 秒で停止するが、参加者はその後も、メトロノームで提示された基準 ITI をできるだけ維持したまま、残りの時間もタッピングを続けることを求められた。基準 ITI は 800, 500, 300

ms (beat per minute: BPM に換算すると、それぞれ 75, 120, 200 BPM) の 3 種類とした。基準 ITI の選定は、約 1000~2000 ms の ITI を境にタイミングを司る神経基盤が異なると言われること(Repp, 2005; Repp & Su, 2013)から 1000 ms 以内のものとした。その範囲で、音楽演奏で多く見られるテンポ帯である 60 ~ 200 beats per minute をカバーし、なおかつ速くなりやすいテンポと遅くなりやすいテンポを含むことを念頭におき選定した (Madison (2001)や Collyer et al. (1992) から、ソロ条件では 800 ms は速くなる者・遅くなる者の割合が同じまたは遅くなる者の方がやや多い程度、500 ms と 300 ms は速くなる者の割合が多くなると考えられた)。ソロ条件で片方の参加者が課題を遂行している間、他方の参加者は休憩とした。1 人目の参加者のソロ 1 試行目が終わると、続いて 2 人目のソロ 1 試行目を開始し、交代で 3 種類のテンポの試行を行った。提示するテンポの順番は参加者組間でカウンターバランスをとった。ソロ条件の第 1 ブロックが完了すると、続いてペア条件の第 1 ブロックを開始した。ペア条件では参加者は、「合奏で同じパートを担当するように、できるだけ基準 ITI を維持しながら、2 人の同期も維持する」よう求められた。3 種類の基準 ITI のペア試行が完了すると、以下同様に、ソロ条件の第 2 ブロック、ペア条件の第 2 ブロック、ソロ条件の第 3 ブロックと続けた。このようにして、参加者は各基準 ITI でのタッピングを、ソロで 3 回、ペアで 2 回ずつ行った。

2-1-3-4 タップオンセットの検出

取得したセンサーの波形から、次の手順でタップタイミングを検出した：直流成分の除去および全波整流を行い、100-300 Hz のバンドパスフィルターを通して高周波ノイズを除去した後、ヒルベルト変換を用いて包絡線を求めた。この包絡線の波形について、「閾値以上の値を持ち、かつ直前の 50 ms のデータ窓内の全てのサンプル点が閾値未満の値を持つ」という条件を満たすサンプル点に対応する時刻をタップオンセットと見なして抽出した。

2-1-3-5 統計解析

まず、得られたタップオンセットの時系列を微分し、ITI 時系列を取得した（後述の式 2-1）。結果の項で述べるように、ソロ条件の ITI は基準 ITI の周辺を長周期で動揺したのに対し、ペアの ITI はほぼ単調に減少する傾向があった。そこで、最後の 31 タップ分の ITI を、対応する基準 ITI で除算し、標準化 ITI を求めた。この標準化 ITI の平均値を、2 要因反復測定分散分析（ANOVA）により比較した。要因計画は 3（基準 ITI：800, 500, 300 ms）×2（人数：ソロ, ペア）であった。

続いて、同じ最後の 31 タップ分の ITI の、ソロ条件とペア条件との相関について検討した。この際、参加者を各参加者組の中で、ソロ条件の ITI がより短くなった方の参加者（速い参加者）と、そうでない方の参加者（遅い参加者）の 2 グループに分類した。

さらに、各参加者のタップ間隔の調節に、パートナー間の相互作用がどの程度貢献したか、また、参加者組の中でリーダー・フォロワーの関係があったかについて検討するため、単回帰分析および重回帰分析を行った。目的変数は $\Delta ITI(n)$ 、説明変数は $\Delta ITI(n-1)$ および $ITI_{Async}(n)$ とした。これらの変数の定義は、それぞれ式 2-2、式 2-3 の通りである。

$$ITI(n) = t(n+1) - t(n) \quad \text{式 2-1}$$

$$ITI_{Async}(n) = ITI(n) - ITI_{Partner}(n) \quad \text{式 2-2}$$

$$\begin{aligned} \Delta ITI(n) &= ITI(n+1) - ITI(n) \\ &= \{t(n+2) - t(n+1)\} - \{t(n+1) - t(n)\} \end{aligned} \quad \text{式 2-3}$$

ここで $ITI(n)$ 、 $t(n)$ 、 $\Delta ITI(n)$ 、 $ITI_{Async}(n)$ 、 $ITI_{Partner}(n)$ は、それぞれ ITI、タップタイミング、 ΔITI 、 ITI_{Async} 、そしてパートナーの ITI の、 n 番目の値を表す（式 2-3 からわか

るように、 $\Delta ITI(n)$ の直前に起こる ITI_{Async} のインデックスは n である)。まず、 $\Delta ITI(n-1)$ および $ITI_{Async}(n)$ のそれぞれを説明変数とし、単回帰分析を行った。結果の項で述べるように、単回帰分析から得られた決定係数は $ITI_{Async}(n)$ を説明変数に用いた場合の方が高かった。また、両方の説明変数を用いて重回帰分析を行った。その際に、一般に説明変数を増やすと決定係数がわずかに上昇することを考慮し、得られた決定係数の上昇が有意であるか検討するため、 $\Delta ITI(n-1)$ をランダムに並び替えて作成したダミー変数を用いた重回帰分析も行った（パーミュテーション・テスト）。パーミュテーション・テストでは、 $\Delta ITI(n-1)$ の代わりにダミー変数を入力した重回帰分析を行った。すなわち、比較に使用した回帰モデルは以下の3つである。

$$\Delta ITI(n) = \beta * ITI_{Async}(n) \quad \text{式 2-4}$$

$$\begin{aligned} \Delta ITI(n) = \beta_1 * ITI_{Async}(n) + \beta_2 * dummy(n-1) \\ + \beta_3 * ITI_{Async}(n) * dummy(n-1) \end{aligned} \quad \text{式 2-5}$$

$$\begin{aligned} \Delta ITI(n) = \beta_1 * ITI_{Async}(n) + \beta_2 * \Delta ITI(n-1) \\ + \beta_3 * ITI_{Async}(n) * \Delta ITI(n-1) \end{aligned} \quad \text{式 2-6}$$

ダミー変数を用いた重回帰分析は 1000 回行い、得られた決定係数の平均値を、単回帰分析および本来の順序の $\Delta ITI(n-1)$ を用いた重回帰分析から得られた決定係数と比較した（基準 ITI の各条件内での、式 2-4～式 2-6 の回帰式タイプを要因とする 1 要因分散分析）。比較を行う前に、決定係数は z 変換を行った。

さらに、もし各参加者組内での速い参加者がパートナーを一方的にリードしていたとすれば、遅い参加者の $ITI_{Async}(n)$ の偏回帰係数 β_1 の絶対値は、速い参加者より大きくなることが予想される。そこで、速い参加者と遅い参加者で偏回帰係数が異なるかを、2 要因混合計画 ANOVA により比較した。要因計画は 3（偏回帰係数： $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ ） \times 2（参加者タイプ：速い参加者、遅い参加者）とした。

いずれの比較においても、有意水準は 5%とした。有意な効果が認められた要因に

ついて、Bonferroni テストによる事後検定を行った。球面性の仮定が棄却された場合の自由度の補正には、Greenhouse-Geisser 補正を用いた。全ての ANOVA は SPSS ver. 20.0 (IBM Japan, Tokyo, Japan) を用いて行った。

2-1-4 結果

2-1-4-1 ソロ条件とペア条件の ITI の比較

参加者のうち一人はパートナーとのシンクロを維持できなかったため、該当するペアは分析から除外した。以下、残った 12 ペア (24 名) の分析結果について記述する。

図 2-1 は、得られた ITI 時系列の典型例である。この例のように、ソロ条件での ITI は基準 ITI から徐々に離れていったが、この例のように最終的に基準 ITI 付近に戻ってくるものもあるように、長周期の変動が見られた。一方、ペア条件の ITI は、メトロノームの停止後から徐々に減少していったものが多かった (800, 500, 300 ms 条件の各 24 試行中、それぞれ 18, 15, 21 回)。図 2-4 に、各参加者の ITI の 20 秒ごとと平均値の集合平均の推移を示した。ソロ条件では、ITI は基準 ITI から徐々に離れていったが、平均的には目標 ITI の近傍に留まった (ただし個人差が大きかった)。一方ペア条件の平均 ITI は、時間の経過にしたがい単調に減少していき、ソロ条件と比べると個人差は小さかった。

図 2-5 に、最後の 31 タップの標準化 ITI の平均値と標準偏差を示した。2 要因反復測定 ANOVA の結果、基準 ITI の主効果、人数の主効果、およびこれらの交互作用が全て有意であった (それぞれ $F(2, 46) = 10.02, p < .001$, $F(1, 23) = 23.65, p < .001$, $F(2, 46) = 3.88, p = .028$)。事後比較では、全ての基準 ITI において、ペア条件の ITI はソロ条件の ITI より有意に短かった (800 ms; $t(23) = 3.86, p = .001$, Cohen's $d = .82$; 500 ms; $t(23) = 4.06, p = .001$, Cohen's $d = .86$; 300 ms; $t(23) = 2.46, p = .022$, Cohen's $d = .46$)。ソロ条件内における基準 ITI 間の比較では、800 ms と 300 ms, および 500 ms と 300 ms の間に有意差が認められた (それぞれ $t(23) = 4.47; t(23) = 4.53, ps = .001$)。ペア条件内に

おける基準 ITI 間の比較では、120 bpm と 200 bpm の間に有意差が認められた ($t(23) = 2.68, p = .033$).

2-1-4-2 ソロ条件とペア条件の ITI の相関

上記の結果から、ペア条件では ITI が単調に減少しがちであることが示唆された。続いて、参加者内でソロ条件とペア条件の ITI 逸脱の間に相関が認められるかを検討した。この際、各参加者組を、ソロ条件の最後の 31 タップ分の ITI に基づき、速かった方の参加者（速い参加者）および遅い方の参加者（遅い参加者）のグループに分け、それぞれのグループについて相関を検討した。その結果、速い参加者のペア条件の ITI は、ソロ条件とおおよそ同程度であった一方、遅い参加者では、ペア条件ではソロ条件より ITI が短くなっていた（図 2-5）。すなわち、速い参加者はソロ条件とペア条件でほぼ同じペースでタップしていたのに対し、遅い参加者は、ペア条件ではソロ条件よりも速くタップしていたことが示唆された。速い参加者におけるソロ条件とペア条件の相関係数は、800 ms, 500 ms, 300 ms の各条件で、それぞれ $r(12) = .64, p = .03$; $r(12) = .56, p = .06$; $r(12) = .79, p < .01$ であった。一方、遅い参加者における相関係数は、 $r(12) = .41, p = .19$; $r(12) = .23, p = .48$; $r(12) = .82, p < .01$ であった。

2-1-4-3 ペア条件における ITI 減少の要因：リーダーシップか相互調節か？

ソロ条件とペア条件の相関の解析から、ペア条件のタップは、各参加者組のうちソロがより速くなりがちな方の参加者（速い参加者）のペースとほぼ同等のペースで進んでいたことが示唆された。そこで、ペア条件の ITI の短縮が、速い参加者が遅い参加者を一方的にリードしたために起こったのか、それとも相互調節のプロセスにより起こったのかを検討するため、各試行における全タップについて、ITI 調節量 ($\Delta ITI(n)$) を目的変数とした単回帰分析および重回帰分析を行った。説明変数は、個人内の調節量として自身の直前の ITI 調節量 ($\Delta ITI(n-1)$: 個人内の調節を反映)、および直前の

パートナーとの ITI 差 ($ITI_{Async}(n)$: 参加者間の調節を反映) とした (式 2-1~式 2-3).

単回帰分析の結果, $\Delta ITI(n-1)$ による決定係数は, 800, 500, 300 ms の各基準 ITI に対し, それぞれ .41, .37, .37 であった. 一方, $ITI_{Async}(n)$ による決定係数は, 800, 500, 300 ms の各基準 ITI に対し, それぞれ .55, .45, .36 であった. 2 要因反復測定 ANOVA の結果, 基準 ITI の主効果, 説明変数タイプ的主効果, およびこれらの交互作用はいずれも有意であった (それぞれ $F(2, 94) = 26.34, p < .001$, $F(1, 47) = 13.90, p = .001$, $F(1.72, 80.90) = 21.19, p < .001$).

事後比較の結果, $ITI_{Async}(n)$ の決定係数は 800 ms と 500 ms の条件では有意に高かった一方, 300 ms の条件では決定係数の差は非有意であった (それぞれ $t(47) = 7.21, p < .001$; $t(47) = 3.40, p = .001$; $t(47) = .21, p = .65$). また, テンポの単純主効果は, どちらの説明変数に対して有意であった ($\Delta ITI(n-1)$ および $ITI_{Async}(n)$ に対し, それぞれ $F(2, 94) = 6.22, p = .003$; $F(1.78, 83.51) = 30.09, p < .001$).

続いて, 両方の説明変数を投入した際の決定係数の増加度合いについて検討するため, 重回帰分析を行った. 表 2-1 に, その結果の要約を示した. 調整済み決定係数は, 800, 500, 300 ms の各条件に対し, それぞれ .59, .51, .48 であった. パーミュテーション・テストの結果, いずれの基準 ITI でも, 回帰式タイプ ((a): $ITI_{Async}(n)$ による単回帰モデル, (b): ダミー変数を用いた重回帰モデル, (c): 本来の順序の $\Delta ITI(n-1)$ を加えた重回帰モデル) の主効果が有意であった (800, 500, 300 ms の各条件に対し, それぞれ $F(1.02, 47.71) = 13.64$, $F(1.01, 47.35) = 24.10$, $F(1.01, 47.41) = 44.04$, $ps < .001$). 事後比較の結果, 各回帰式タイプ間の効果量 (Cohen's d) は次の通りであった (いずれも 800, 500, 300 ms 各条件の順): (a) vs (b); .05, .04, .02; (a) vs (c); .31, .49, .70 ($ps < .001$; 図 2-7). 標準化偏回帰係数については, 基準 ITI が短いほど β_1 の絶対値は小さく, β_2 の絶対値は大きくなった (表 2-1). 速い参加者と遅い参加者間での偏回帰係数の比較 (図 2-8) では, 参加者タイプ的主効果はいずれの係数についても非有意であった ($\beta_1, \beta_2, \beta_3$ それぞれに対し $F(1, 46) = .71$, $F(1, 46) = 2.29$, $F(1, 46) = .19, ps > .05$). 一方, テンポの

主効果は、 β_1 と β_2 に対して有意（それぞれ $F(2, 92) = 20.81$, $F(1.63, 75.1) = 15.41$, $ps < .001$), β_3 に対して非有意であった（ $F(2, 92) = 2.66$, $p = .08$). 交互作用はいずれの係数に対しても非有意であった（ β_1 , β_2 , β_3 それぞれに対し $F(2, 92) = .88$, $F(2, 92) = .66$, $F(2, 92) = .63$, $ps > .10$).

2-1-5 考察

本研究の目的は、目標とする動作テンポ（基準 ITI）および同時にタッピングを行う人数が、同期-継続課題の ITI 逸脱に与える影響について検討することであった。

基準 ITI を 800, 500, 300 ms とした実験の結果は、ペア条件においては、ソロ条件と比較して、負の方向への ITI 逸脱（すなわち動作テンポの高速化）がより顕著に見られた、というものであった。単独での同期-継続タッピング課題に関する先行研究から、基準 ITI を 300 ms とした場合にはソロ条件でもタッピングのテンポは速くなりやすいことが予想されたが(Collier et al., 1992; Madison, 2001), ペア条件ではより速くなりやすいことが示唆された。さらに、単独の同期-継続課題でしばしば観察される長周期の動揺(Torre et al., 2011)は、ペア条件では観察されなかった。ペア条件ではむしろ、1 試行の 200 秒間の間、ITI 時系列にはほぼ単調減少のトレンドが観察された。

また、各参加者組のペア条件における最後の 31 タップの ITI の平均値には、各参加者組のうちソロでより速くなりがちな方の参加者（速い参加者）のソロ条件の最後の 31 タップの ITI の平均値と、有意な相関が認められた。すなわち、各組から速い参加者を選んで作ったグループでは、ソロ条件とペア条件の最終的な動作テンポがおおよそ同等になった（図 2-6(A)）。一方、各参加者組のうちソロでより速くなりがちな方ではない参加者（遅い参加者）のグループでは、ソロ条件とペア条件の最終的な動作テンポは必ずしも相関しなかった。

これらの結果から、ITI の短縮する程度は、主に各参加者組のうちの速い参加者に依存することが示唆された。このことを単純に解釈すれば、速い参加者がリーダーと

なり遅い参加者のテンポを速める方へ導いたと考えられるが、次に述べる回帰分析の結果は、両者ともタッピングのテンポの増加に対して同程度に貢献していたことを示唆するものであった。まず、パートナー間の ITI 差 (ITI_{Async}) は個人内のタイミング調節量 (ΔITI) に有意な影響を持っていた。このことは、パートナー間で、互いのタップタイミングを同期させるための調節があったことを示唆している。 $ITI_{Async}(n)$ を説明変数とした単回帰分析で得られた決定係数は、基準 ITI が長いほど大きかった。このことはパートナー間のタイミング調節が可能なマージンを反映していると考えられる。この結果 $ITI_{Async}(n)$ と $\Delta ITI(n-1)$ を説明変数とした重回帰分析でも再現された： $ITI_{Async}(n)$ の相対的な重要性は、基準 ITI が長いほど大きかった(図 2-7 および図 2-8)。特に、速い参加者と遅い参加者の間で、偏回帰係数に有意差は認められなかった。このことは、パートナー間の調節と個人内の調節の相対的な重みが、速い参加者と遅い参加者の間で異なつたとは言えないことを示唆している。また、 $ITI_{Async}(n)$ の偏回帰係数の符号が負であったことから、自身の今の ITI がパートナーと比べ長ければ次の ITI は短くし、今短ければ次は長くした、という調節を行っていたことを示している。以上から、ペア条件における ITI の減少は、速い参加者が遅い参加者を一方的にリードしたと言うより、相互的なタイミング調節のプロセスの結果として発生したと考えられる。ペアでのタッピング課題を扱った研究は近年増加しているが、ソロ条件とペア条件での ITI 逸脱を、1 試行につき数分にわたる課題で検討したものは、これまで無かった。また、社会的相互作用や対人間協調が動作タイミングを変調させることは多くの先行研究が示唆しているが(Konvalinka et al., 2010; Néda et al., 2000; Oullier, de Guzman, Jantzen, Lagarde, & Kelso, 2008; Richardson et al., 2007 など)、本研究のように、一定の動作テンポを保つように教示したにもかかわらず動作テンポが単調増加する例も、これまで報告されていない。

2-1-5-1 ペア条件におけるテンポ加速をもたらしたプロセス

一般に、ソロの同期-継続課題における ITI 逸脱の一因として、 $1/f$ ノイズの関与が指摘されている(Repp, 2005). $1/f$ ノイズは大きな低周波成分を持ち、指タッピングタスクで観察される(Delignières, Torre, & Lemoine, 2008; Madison, 2004)のみならず、歩行(Lamoth et al., 2010)や走行(Jordan et al., 2006; Nakayama et al., 2010)のストライド、静止立位における動揺(N. Yamada, 1995a)、心拍変動(Goldberger et al., 2002; Ivanov et al., 1999; Peng et al., 1995)など、様々な生体信号でしばしば観察される。しかし $1/f$ ノイズによる逸脱は特定の方向には偏らないため、本研究で観察されたような一方向への逸脱の説明には適さないと考えられる。

では、ペア条件の試行では、どのような要因が動作テンポの加速を引き起こしたのであろうか。1 つの仮説として、参加者は自身の内部時計の位相を、自身のタップタイミングというより、自身のタップとパートナーのタップのうち、早かった方のタイミングに基づいてリセットしていたということが考えられる。実際、メトロノームに対する同期タッピング課題で、メトロノームのビートの前後に外乱のトーンを与えた研究では、外乱のトーンがメトロノームのビートに先行する条件で、参加者のタップタイミングが顕著に影響を受けた（外乱のトーンが無いタップより早く叩くようになった）ことが報告されている(Repp, 2003a, 2004). この外乱トーンの効果は、同期-継続課題で、本来タップすべきタイミングの前後に外乱トーンを与えても認められた(Repp, 2006). このようなプロセスは、早い参加者群においてソロ条件とペア条件の最終的な動作テンポが関連したこととも合致すると考えられる。また、一定の力を発揮する課題でも、ペア条件では発揮力が徐々にエスカレートすることが知られている(Shergill, Bays, Frith, & Wolpert, 2003). この力発揮のエスカレーションに関して、運動制御の予測的な性質のために、外部のものが生成した力が同じ強さであっても、自身が生成する力はより弱いと感じる、という説明がなされている(Shergill et al., 2003). このようなプロセスは、外部刺激の顕著性を高める役割を果たしていると考えられる(Bäb, Jacobsen, & Schröger, 2008; Blakemore, Wolpert, & Frith, 1998; Martikainen, Kaneko,

& Hari, 2005). 同じプロセスが2人組の同期-継続課題でも働くとすれば、自身のタイミングへの感受性よりパートナーのタイミングへの感受性が高まった状態で、パートナーのタップが自身のタップに先行した場合の帰結として、ITIの減少が説明できる可能性がある。

一方、本実験における参加者は、一組の結合振動子として考えることも出来る。十分な強度で結合した振動子間では、しばしば引きこみが発生する。結合が双方向的であれば、対になった振動子は両者の固有周波数の中間の周波数で振動し、単方向的な結合であれば、両者は片方の固有周波数で強制的に振動させられる (Pikovsky, Rosenblum, & Kurths, 2001). 本研究のペア条件におけるタッピングのテンポは、各参加者組の中で速い参加者のソロ条件のテンポとほぼ同等であった (図 2-6). その意味では、実験者はリーダー・フォロワーの役割を指定しなかったが、速い参加者は各参加者組においてリーダーとして振る舞ったと言えるかもしれない。もしそのようなリーダー・フォロワー関係が存在したならば、その関係は試行中に自然発生したと考えられる。しかし、 $ITI_{Async}(n)$ の偏回帰係数には、速い参加者・遅い参加者の両群間で有意な差は認められなかった (図 2-8). このことは、どちらの参加者も同程度にパートナーのタップへの適応をしていた、すなわち、どちらの参加者も、各組の下位システムとして等価であったことを示唆している。

2-1-5-2 生態学的な解釈

タッピング課題における振る舞いとしてよく知られた現象として、Negative Mean Asynchrony (NMA), すなわち、メトロノームとの同期タッピング課題において、本来タップすべき時刻 (メトロノームのビートのオンセット) より数十ミリ秒ほど早くタップしてしまう現象がある (Repp, 2005; Repp & Su, 2013). NMA の解釈の1つとして、参加者はメトロノームのビートとタップタイミングそのものを合わせていると言うより、タップから得られる感覚フィードバックをメトロノームのビートに合わせて

いる、という説明がある(Rosenbaum, 2010). このようにして、NMA は実験参加者の同期のばらつきを減少させることに貢献していると考えられている(Repp, 2005). NMA に関する他の見方としては、参加者が周期的なキューに対し、キューに対する応答を返していると言うより、キューのタイミングを予測して先回りの反応していることを反映しているという解釈もある. 本研究のようにランダムなばらつきを持つキュー系列（パートナーのタップ）に対して、予測的に反応することは反直感的ではあるが、Washburn, Kallen, Coey, Shockley, & Richardson (2015)は、知覚の遅延を拡大した状況であっても、予測的な反応が可能であることを示した（もっとも、彼女らの用いた課題は空中に円を描く課題であるが）. 本研究の参加者が、自身のパートナーのタップをペース信号と見なしていたとすれば、NMA, 上で述べた位相リセット、そしてばらつきの少ない時計が存在しないことが、結果としてタッピングのテンポを加速させた可能性がある. このように考えると、本研究におけるタッピングの加速は、自動的な予測プロセスや、同期を維持するという共通の目標を果たすための適応プロセスが過剰に働き、望まざる結果が招かれたものと解釈できる. この意味で、本研究の結果は、各参加者組の協調における協力と相互依存とを反映していると言えるだろう. そうであれば、課題のパフォーマンス（動作テンポをどれだけ維持できたか）と、参加者組の社会的関係（仲が良いか悪いか、あるいは同調傾向の強いパーソナリティか否か、など）との相関についての検討は、興味深いと考えられる. このように、2 人組での同期-継続課題は、たとえば音楽のアンサンブル演奏のような、集団での時間的なタスクのダイナミクスを検討する上で興味深い方法論であると考えられる. 実際、アンサンブル演奏のテンポは、演奏中に徐々に加速していくことがしばしば観察され、このことは「演奏が/テンポが『走る』（英：*rushing*）」と呼ばれている(Colson, 2012). 「走る」現象の原因としては、演奏者の興奮や緊張、リズム感の欠如、トレーニング不足といった、演奏者自身の内的な性質が挙げられることが多い(Colson, 2012). しかし本研究の結果は、演奏者の外部にある要因、すなわち、アンサンブル演奏に内包さ

れている、パートナー間の同期を保つという環境制約も、「走る」一因になり得ると言うことを示唆している。

2-1-5-3 関連すると考えられる神経基盤

本研究で用いたような、およそ 1 秒以下のインターバルでのタイミング生成課題では、外部ペーシング信号の有無にかかわらず、小脳と大脳基底核が最も大きく貢献していると考えられている(Repp & Su, 2013)。単独・セルフペースでのタッピング課題での、ペーシング信号ありの課題と比較しての特徴的な脳活動としては、前頭一頭頂一側頭ネットワークの賦活(Jantzen, Oullier, Marshall, Steinberg, & Kelso, 2007)、および近心一中心領域の β バンドでの結合(Serrien, 2008)が知られている。しかし、ペアでのタッピング課題における脳活動の特徴は、現在の所ほとんど研究されていない。ただし適応的バーチャルパートナー（参加者のタップと自身のビートのタイミング差に応じて、次のビートのタイミングを適応的に変化させるシステム）を用いた擬似的なペアタッピング課題の神経相関は研究されている。この課題では、帯状回後部、楔前部、海馬、腹内側前頭皮質、補足運動野といった中央部の領域が、参加者がバーチャルパートナーとよく同期できていると感じたときに有意に賦活することが明らかになっており、この賦活は単独のタッピング課題では観察されなかった(Fairhurst et al., 2013; Repp & Su, 2013)。これらの正中線上の皮質領域の賦活は、協力の成功や、快適な社会的情動の経験と関連していると考えられている(Fairhurst et al., 2013)。Fairhurst et al. (2013)はさらに、前部島皮質、下・上前頭回、腹外側前頭皮質、下部頭頂葉といった外側一前頭領域が、同期が崩れたと参加者が感じたときに賦活したことを示した。これらの領域の賦活は課題の難度や認知的制御と関連すると考えられている(Fairhurst et al., 2013)。本研究で観察された ITI の逸脱は、参加者は動作を基準 ITI に適合させることには失敗したことを示している。パートナーのタップがキューとして作用したとすれば、参加者の認知的負荷は軽減され、その結果、上記の外側一前頭領域の活動は低

下していた可能性がある。

2-1-5-4 結論

本研究から、同期–継続課題を2人組で、パートナー間の同期も保ちながら行くと、ITIが徐々に減少（すなわち動作テンポが加速）することが明らかになった。ITI減少の背景にあるプロセスの解明にはさらなる検討が必要であるが、主要な要因の1つとして位相リセットという相互タイミング調節が関与している可能性が示された..これまで、同期–継続課題におけるITIの逸脱は、中枢時計が持つ避けがたい性質であると考えられてきた(Repp, 2005). Ogden and Collier (1999)は、単独の同期–継続課題で観察されるITI逸脱にとっては、決定論的な逸脱ではなく、確率論的な逸脱が重要な要素であると指摘した。それゆえ同期–継続課題におけるタイミングを扱った先行研究では、統計値などに対するITI逸脱の影響を除くため、微分や様々なトレンド除去手法、あるいはWing and Kristofferson (1973)のモデルを拡張したものが利用されてきた(Collier & Ogden, 2004; Repp, 2005). そのため、タイミング課題の数値モデル研究においても、 $1/f$ ノイズや高次の自己相関を仮定するなどして、確率的なITI逸脱を前提として与える方針がとられてきた(Hennig, 2014; Madison, 2004). しかし本研究の結果は、2人組という環境下での結果のように、状況によっては「ITIが徐々に減少する」という現象が決定論的に、再現性を持って観察されるということを示している。この課題の追究により、相互タイミング調節と社会的相互作用に関するさらなる知見が得られると考えられる。

2-1-6 図表

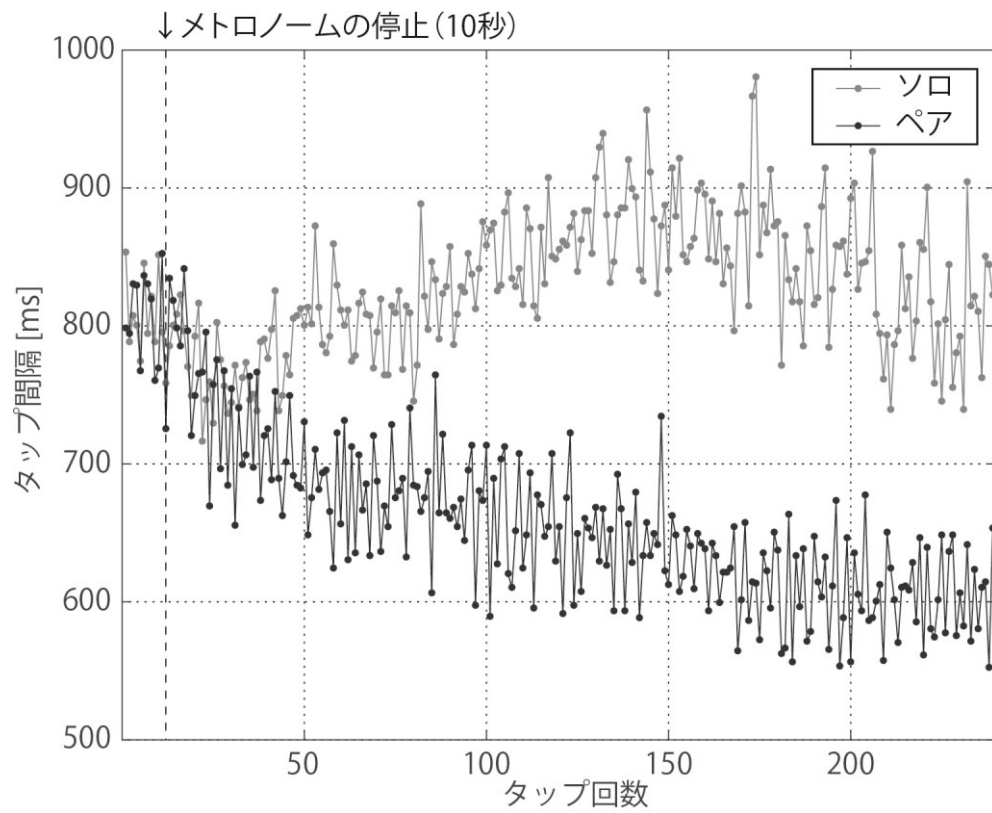


図 2-1 タップ間隔時系列の典型例. ソロ条件では基準 ITI 周辺での長周期での増減が見られた一方, ペア条件ではほぼ単調に減少していく傾向があった.

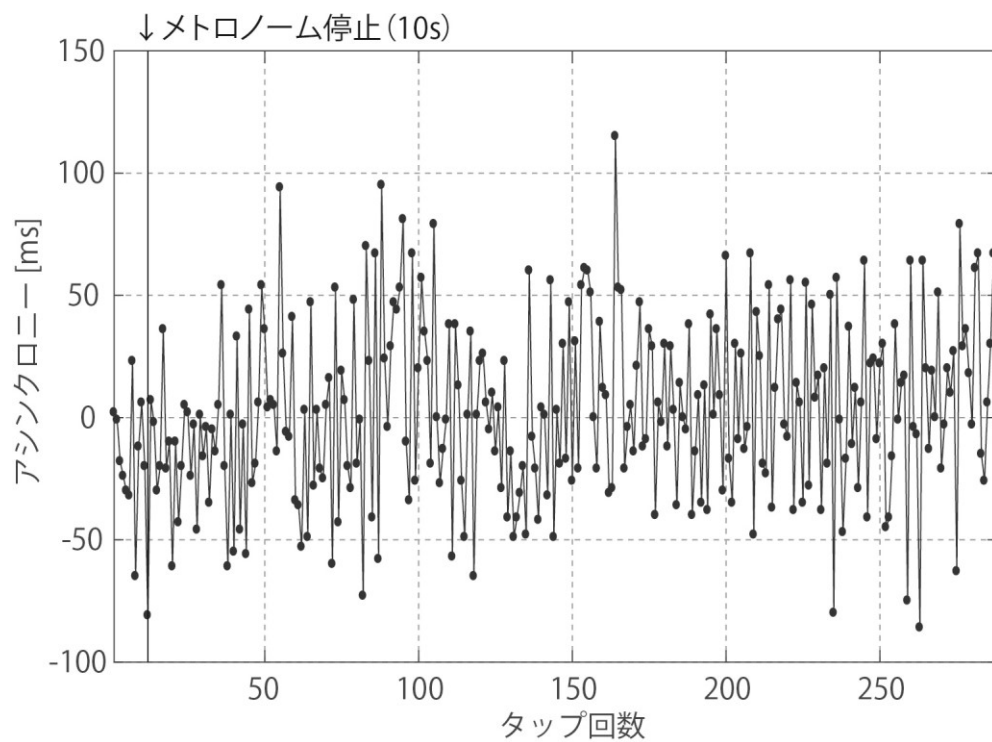


図 2-2 速い参加者のアシンクロニー（タップ時刻の差）の時系列の典型例．アシンクロニーはゼロをまたいで小刻みに振動していたことから，速い参加者がリーダーとして先行し，遅い参加者がフォロワーとなっていたわけではないことが示唆された．

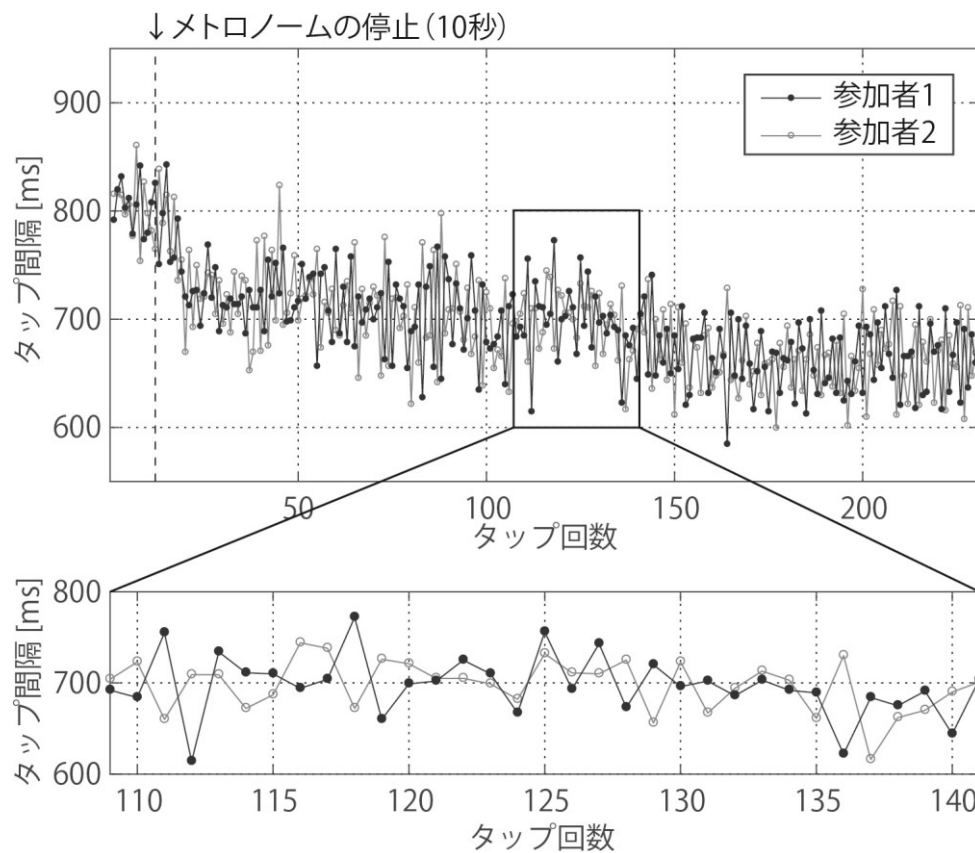


図 2-3 同じ試行の 2 人分の ITI 時系列を重ね描きしたもの（典型例）。両者の ITI がほぼ逆位相に揺らいでいることが読み取れる。この ITI の変動パターンは Konvalinka et al. (2010) が hyper-follower パターンと呼んだ、ペアの両者が相互にタイミングを調節しているときに特有なパターンである。

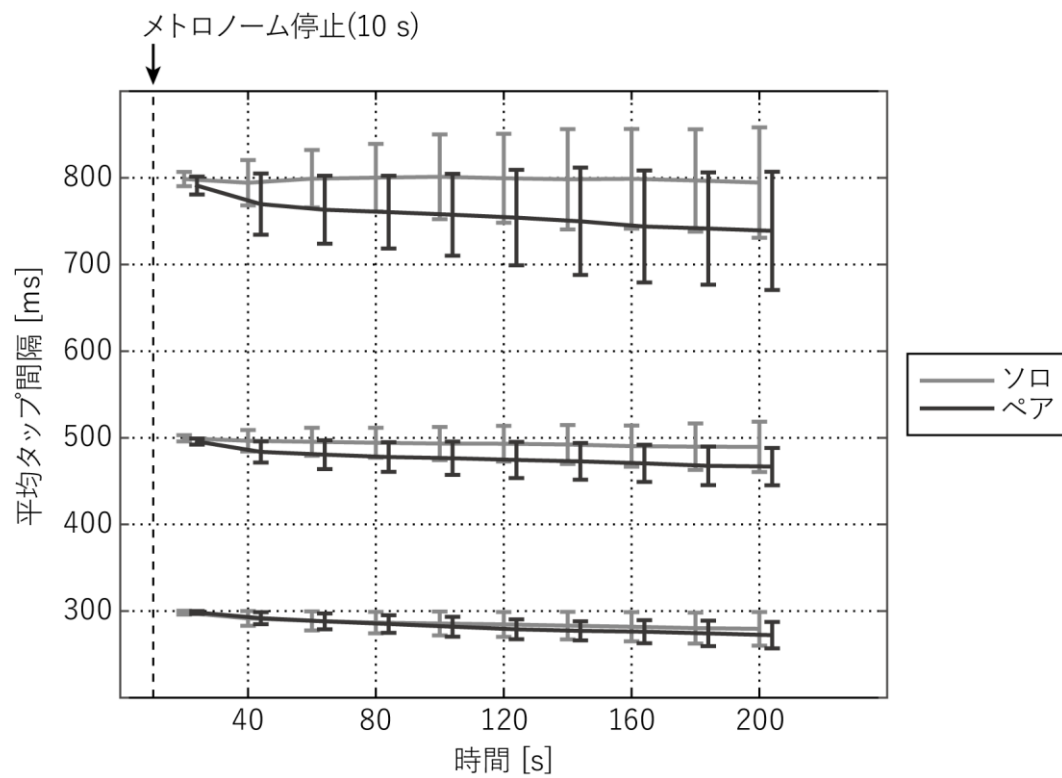


図 2-4 20 秒ごとの平均 ITI の推移 (平均値±標準偏差). 800 ms 条件では, ソロの ITI は平均すると基準 ITI の周辺に留まった. その一方, ペアの ITI は単調に減少した. 500 ms 条件と 300 ms 条件では, ソロ・ペアの両方とも徐々に減少する傾向があったが, ペア条件ではさらに減少した.

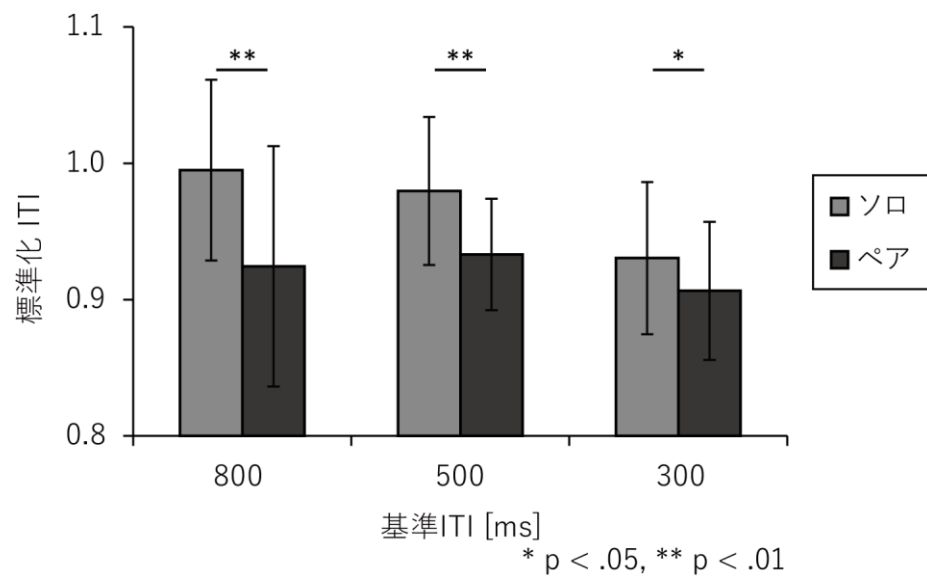
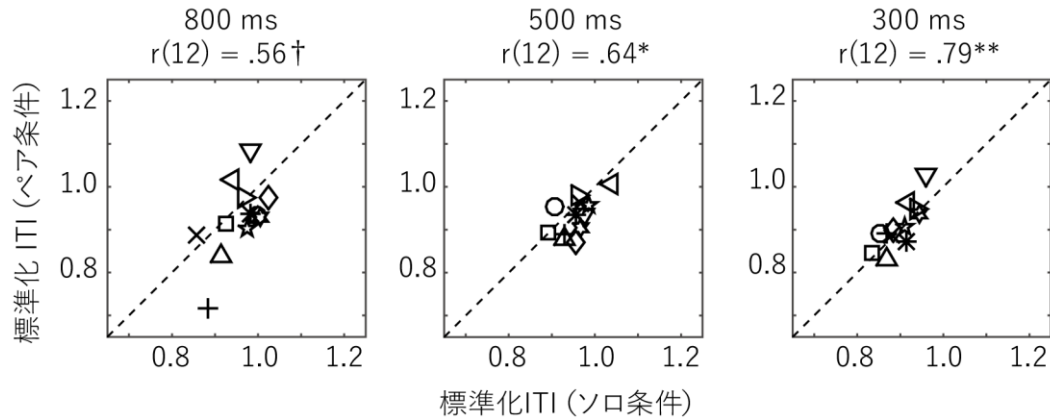
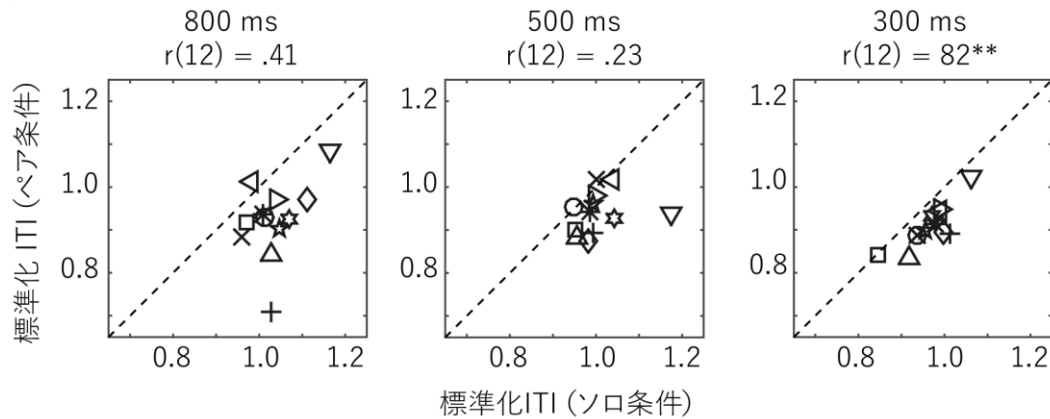


図 2-5 最後の 31 回のタップにおける標準化 ITI の比較 (平均値±標準偏差)。標準化 ITI は、測定された ITI を、対応する基準 ITI で除算したもの。いずれの基準 ITI でも、ペア条件の ITI はソロ条件と比較して短くなった。

(A) 各組内でソロが速かった方の参加者



(B) 各組内でソロで遅かった方の参加者



† $p < .10$, * $p < .05$, ** $p < .01$

図 2-6 ソロ・ペア条件における、最後の 31 タップの標準化 ITI の相関。各パネルにおいて、同一のマーカーは同一組の参加者を示す。この図において各組の参加者は、ソロ条件での ITI によって、各組内で速かった方の参加者のグループ、および遅かった方の参加者のグループに分類されている。(A) ソロ条件で速かった方の参加者は、ソロ条件とペア条件の ITI の相関が有意または有意傾向であった。また、彼らの ITI はソロ＝ペアの直線の近傍に分布した。つまり彼らは、ペア条件でもソロ条件とほぼ同等のペースでタップしていたと考えられる。(B) 一方、遅かった方の参加者の ITI はソロ＝ペアの直線の下部に分布した。つまり、彼らはペア条件では、ソロ条件より速いペースでタップしていたと考えられる。

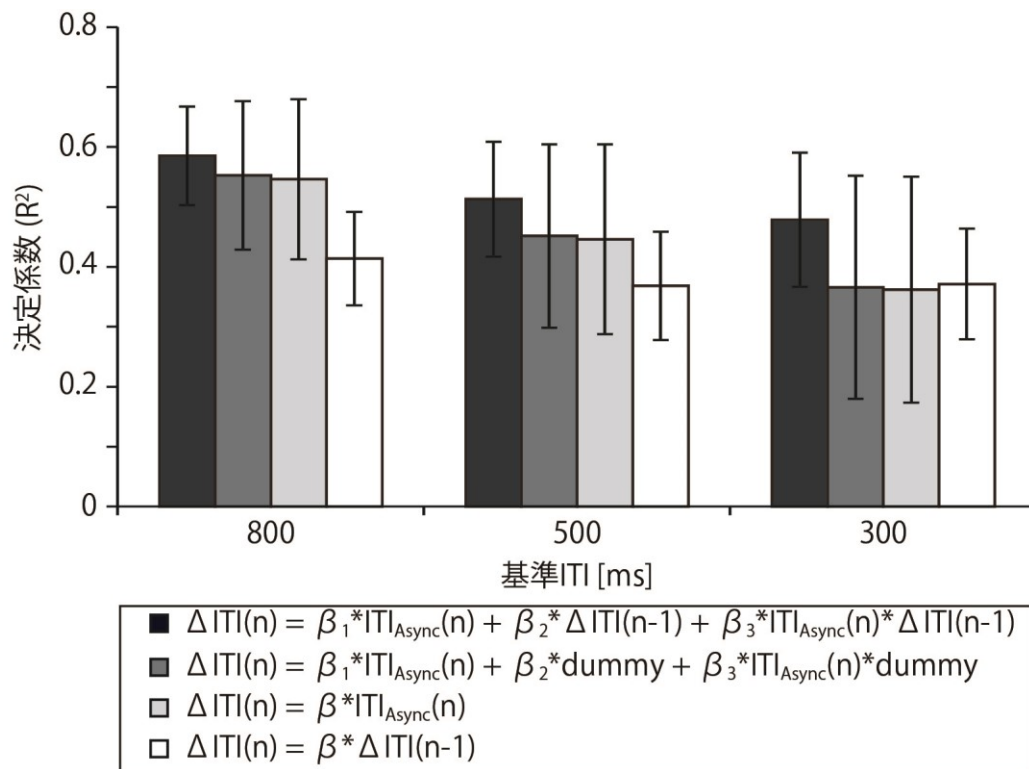


図 2-7 ペア条件における回帰分析から得られた決定係数. 各色のバーは, 対応する回帰モデルの決定係数 (R^2) を表す (平均値 \pm 標準偏差). 「dummy」は, 同じ試行・同じ参加者の $\Delta ITI(n-1)$ の順序をランダムに並べ替えたダミー変数を指す. 基準 ITI が長いほど, $\Delta ITI(n-1)$ の R^2 への貢献度が減少したことが示唆される. このことは, 参加者がパートナーのタップに応じて次のタップを調節できるマージンの長さに関連すると考えられる.

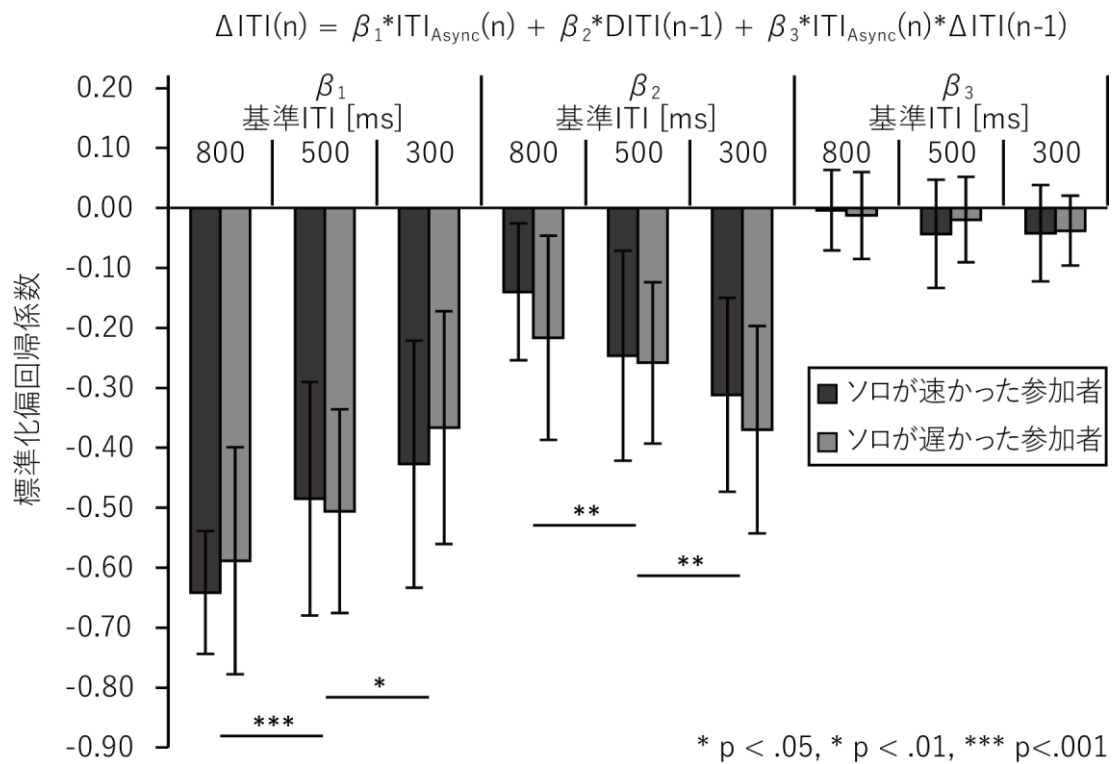


表 2-1 重回帰分析から得られた標準化偏回帰係数の要約. 回帰式は次の通り :

$$\Delta ITI(n) = \beta_1 * ITI_{Async}(n) + \beta_2 * \Delta ITI(n-1) + \beta_3 * ITI_{Async}(n) * \Delta ITI(n-1)$$

		R^2	β_1	β_2	β_3
800 ms	Mean	.59	-.61	-.18	-.01
	Max	.80	-.13	.02	.23
	Min	.37	-.87	-.64	-.25
500 ms	Mean	.51	-.50	-.25	-.03
	Max	.69	.03	.11	.12
	Min	.23	-.81	-.66	-.32
300 ms	Mean	.48	-.40	-.34	-.04
	Max	.77	.07	-.01	.19
	Min	.27	-.80	-.70	-.19

2-2 リズム維持課題のテンポ逸脱における心拍の影響

本節については、5 年以内に雑誌等で刊行予定のため、非公開とする。

2-3 2 人組リズム維持課題の結合振動子モデル

本節については、5 年以内に雑誌等で刊行予定のため、非公開とする。

第3章

2 人組リズム維持課題における局所的・大域的協調構造

(研究 2)

本章については，5 年以内に雑誌等で刊行予定のため，非公開とする．

第4章

総合考察

本章については、5 年以内に雑誌等で刊行予定のため、非公開とする。

引用文献

- Abney, D. H., Paxton, A., Dale, R., & Kello, C. T. (2014). Complexity matching in dyadic conversation. *Journal of Experimental Psychology: General*, 143(6), 2304–2315.
<http://doi.org/10.1037/xge0000021>
- Aschersleben, G., Gehrke, J., & Prinz, W. (2001). Tapping with peripheral nerve block. *Experimental Brain Research*, 136(3), 331–339. <http://doi.org/10.1007/s002210000562>
- Aschersleben, G., & Prinz, W. (1995). Synchronizing actions with events: The role of sensory information. *Perception & Psychophysics*, 57(3), 305–317. <http://doi.org/10.3758/BF03213056>
- Badino, L., Ausilio, A. D., Glowinski, D., Camurri, A., & Fadiga, L. (2014). Neuropsychologia Sensorimotor communication in professional quartets. *Neuropsychologia*, 55, 98–104.
<http://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.11.012>
- Bäß, P., Jacobsen, T., & Schröger, E. (2008). Suppression of the auditory N1 event-related potential component with unpredictable self-initiated tones: Evidence for internal forward models with dynamic stimulation. *International Journal of Psychophysiology*, 70(2), 137–143.
<http://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2008.06.005>
- Bernieri, F. J., Davis, J. M., Rosenthal, R., & Knee, C. R. (1994). Interactional Synchrony and Rapport: Measuring Synchrony in Displays Devoid of Sound and Facial Affect. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 20(3), 303–311. <http://doi.org/10.1177/0146167294203008>
- Bernieri, F. J., Reznick, J. S., & Rosenthal, R. (1988). Synchrony, pseudosynchrony, and dissynchrony: Measuring the entrainment process in mother-infant interactions. *Journal of Personality and Social Psychology*, 54(2), 243–253. <http://doi.org/10.1037/0022-3514.54.2.243>
- Blakemore, S. J., Wolpert, D. M., & Frith, C. D. (1998). Central cancellation of self-produced tickle sensation. *Nature Neuroscience*, 1(7), 635–640. <http://doi.org/10.1038/2870>

- Brass, M., Bekkering, H., Wohlschläger, A., & Prinz, W. (2000). Compatibility between observed and executed finger movements: comparing symbolic, spatial, and imitative cues. *Brain and Cognition*, 44(2), 124–43. <http://doi.org/10.1006/brcg.2000.1225>
- Buhusi, C. V., & Meck, W. H. (2009). Relativity theory and time perception: Single or multiple clocks? *PLoS ONE*, 4(7). <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0006268>
- Chartrand, T. L., & Bargh, J. A. (1999). The chameleon effect: the perception-behavior link and social interaction. *Journal of Personality and Social Psychology*, 76(6), 893–910. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10402679>
- Clarke, E. . (1982). Timing in the performance of Erik Satie’s “Vexations.” *Acta Psychologica*, 50(1), 1–19. [http://doi.org/10.1016/0001-6918\(82\)90047-6](http://doi.org/10.1016/0001-6918(82)90047-6)
- Coey, C. A. (2015). *Complexity and Coordination : Power-Law Scaling in the Temporal Coordination of Complex Systems*. doctoral dissertation, University of Cincinnati, United States.
- Coey, C. A., Washburn, A., Hassebrock, J., & Richardson, M. J. (2016). Complexity matching effects in bimanual and interpersonal syncopated finger tapping. *Neuroscience Letters*, 616, 204–210. <http://doi.org/10.1016/j.neulet.2016.01.066>
- Collier, G. L., & Ogden, R. 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), 853–872. <http://doi.org/10.1037/0096-1523.30.5.853>
- Collyer, C. E., Broadbent, H. a., & Church, R. M. (1992). Categorical time production: Evidence for discrete timing in motor control. *Perception & Psychophysics*, 51(2), 134–144. <http://doi.org/10.3758/BF03212238>
- Collyer, C. E., Broadbent, H. A., & Church, R. M. (1994). Preferred rates of repetitive tapping and categorical time production. *Perception & Psychophysics*, 55(February 1993), 443–453.
- Colson, J. F. (2012). *Conducting and Rehearsing the Instrumental Music Ensemble*. Lanham, Maryland: Scarecrow Press.

- Condon, W. S., & Sander, L. W. (1974). Synchrony Demonstrated between Movements of the Neonate and Adult Speech. *Child Development*, 45(2), 456–462. <http://doi.org/10.2307/1127968>
- Craft, J. L., & Simon, J. R. (1970). Processing symbolic information from a visual display: interference from an irrelevant directional cue. *Journal of Experimental Psychology*, 83(3), 415–420. <http://doi.org/10.1037/h0028843>
- Davidson, J. W. (1997). The social in musical performance. In D. J. Hargreaves & A. C. North (Eds.), *The social psychology of music* (pp. 209–228). New York: Oxford University Press.
- Delignières, D., Lemoine, L., & Torre, K. (2004). Time intervals production in tapping and oscillatory motion. *Human Movement Science*, 23(2), 87–103. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2004.07.001>
- Delignieres, D., & Marmelat, V. (2012). Fractal Fluctuations and Complexity: Current Debates and Future Challenges. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 40(6), 485–500. <http://doi.org/10.1615/CritRevBiomedEng.2013006727>
- Delignières, D., & Marmelat, V. (2014). Strong anticipation and long-range cross-correlation : Application of detrended cross-correlation analysis to human behavioral data. *Physica A*, 394, 47–60. <http://doi.org/10.1016/j.physa.2013.09.037>
- Delignieres, D., Ramdani, S., Lemoine, L., Torre, K., Fortes, M., & Ninot, G. (2006). Fractal analyses for “short” time series: A re-assessment of classical methods. *Journal of Mathematical Psychology*, 50(6), 525–544. <http://doi.org/10.1016/j.jmp.2006.07.004>
- Delignières, D., Torre, K., & Lemoine, L. (2008). Fractal models for event-based and dynamical timers. *Acta Psychologica*, 127(2), 382–97. <http://doi.org/10.1016/j.actpsy.2007.07.007>
- di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (1992). Understanding motor events: a neurophysiological study. *Experimental Brain Research*, 91(1), 176–180. <http://doi.org/10.1007/BF00230027>
- Dolk, T., Hommel, B., Colzato, L. S., SchÅ¼tz-Bosbach, S., Prinz, W., & Liepelt, R. (2014). The joint Simon effect: a review and theoretical integration. *Frontiers in Psychology*, 5(September), 1–10.

<http://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00974>

Dolk, T., Hommel, B., Colzato, L. S., Schütz-Bosbach, S., Prinz, W., & Liepelt, R. (2011). How “social” is the social Simon effect? *Frontiers in Psychology*, 2(MAY), 1–9.

<http://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00084>

Dolk, T., Hommel, B., Prinz, W., & Liepelt, R. (2013). The (not so) social Simon effect: a referential coding account. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 39(5), 1248–60. <http://doi.org/10.1037/a0031031>

Drew, D., Dolch, K., & Castro, M. (2015). A Model for Tempo Synchronization in Music Performance. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 75(6), 2540–2561. <http://doi.org/10.1137/140992357>

Dubois, D. M. (2001). Incursive and hyperincursive systems, fractal machine and anticipatory logic. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 573, pp. 437–451). AIP. <http://doi.org/10.1063/1.1388710>

Duchek, J. M., Balota, D. a., & Ferraro, F. R. (1994). Component analysis of a rhythmic finger tapping task in individuals with senile dementia of the Alzheimer type and in individuals with Parkinson’s disease. *Neuropsychology*, 8(2), 218–226. <http://doi.org/10.1037/0894-4105.8.2.218>

Fairhurst, M. T., Janata, P., & Keller, P. E. (2013). Being and feeling in sync with an adaptive virtual partner: brain mechanisms underlying dynamic cooperativity. *Cerebral Cortex (New York, N.Y. : 1991)*, 23(11), 2592–2600. <http://doi.org/10.1093/cercor/bhs243>

Fairhurst, M. T., Janata, P., & Keller, P. E. (2014). Leading the follower: an fMRI investigation of dynamic cooperativity and leader-follower strategies in synchronization with an adaptive virtual partner. *NeuroImage*, 84, 688–697. <http://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.09.027>

Fine, J. M., Likens, A. D., Amazeen, E. L., & Amazeen, P. G. (2015). Emergent Complexity Matching in Interpersonal Coordination : Local Dynamics and Global Variability. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 41(2), 1–15. <http://doi.org/10.1037/xhp0000046>

Gabrielsson, A. (1987). Once again: The theme from Mozart’s piano sonata in A major (K. 331). *Action and Perception in Rhythm and Music*, 55, 81–103.

- Gabrielsson, A. (2003). Music Performance Research at the Millennium. *Psychology of Music*, 31(3), 221–272. <http://doi.org/10.1177/03057356030313002>
- Gilden, D. L. (2001). Cognitive emissions of 1/f noise. *Psychological Review*, 108(1), 33–56. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11212631>
- Gilden, D. L., Thornton, T., & Mallon, M. W. (1995). 1/F Noise in Human Cognition. *Science*, 267(5205), 1837–1839. <http://doi.org/10.1126/science.7892611>
- Goebel, W., & Palmer, C. (2009). Synchronization of Timing and Motion Among Performing Musicians. *Music Perception*, 26(5), 427–438. <http://doi.org/10.1525/mp.2009.26.5.427>
- Goldberger, A. L., Amaral, L. A., Hausdorff, J. M., Ivanov, P. C., Peng, C. K., & Stanley, H. E. (2002). Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99 Suppl 1, 2466–2472. Retrieved from http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=11875196
- Greenwald, A. G. (1970). Sensory feedback mechanisms in performance control: With special reference to the ideo-motor mechanism. *Psychological Review*, 77(2), 73–99. <http://doi.org/10.1037/h0028689>
- Haken, H., Kelso, J. A., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51(5), 347–56. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3978150>
- Hennig, H. (2014). Synchronization in human musical rhythms and mutually interacting complex systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(36), 12974–12979. <http://doi.org/10.1073/pnas.1324142111>
- Heyes, C. (2011). Automatic imitation. *Psychological Bulletin*, 137(3), 463–483. <http://doi.org/10.1037/a0022288>
- Hommel, B. (2009). Action control according to TEC (theory of event coding). *Psychological Research*,

- 73(4), 512–526. <http://doi.org/10.1007/s00426-009-0234-2>
- Hunt, N., McGrath, D., & Stergiou, N. (2014). The influence of auditory-motor coupling on fractal dynamics in human gait. *Scientific Reports*, 4, 5879. <http://doi.org/10.1038/srep05879>
- Iacoboni, M. (2008). *Mirroring People: New Science of How We Connect with Others*. New York: Farrar, Straus and Giroux.
- Ivanov, P. C., Amaral, L. A., Goldberger, A. L., Havlin, S., Rosenblum, M. G., Struzik, Z. R., & Stanley, H. E. (1999). Multifractality in human heartbeat dynamics. *Nature*, 399(6735), 461–465. <http://doi.org/10.1038/20924>
- Ivry, R. B., Keele, S. W., & Diener, H. C. (1988). Dissociation of the lateral and medial cerebellum in movement timing and movement execution. *Experimental Brain Research*, 73(1), 167–180. <http://doi.org/10.1007/BF00279670>
- Iwanaga, M. (1995). Harmonic relationship between preferred tempi and heart rate. *Perceptual and Motor Skills*, 81(1), 67–71. <http://doi.org/10.2466/pms.1995.81.1.67>
- Jacoby, N., & Repp, B. H. (2012). A general linear framework for the comparison and evaluation of models of sensorimotor synchronization. *Biological Cybernetics*, 106(3), 135–54. <http://doi.org/10.1007/s00422-012-0482-x>
- Jantzen, K. J., Oullier, O., Marshall, M., Steinberg, F. L., & Kelso, J. A. S. (2007). A parametric fMRI investigation of context effects in sensorimotor timing and coordination. *Neuropsychologia*, 45(4), 673–684. <http://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.07.020>
- Jordan, K., Challis, J. H., & Newell, K. M. (2006). Long range correlations in the stride interval of running. *Gait and Posture*, 24(1), 120–125. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2005.08.003>
- Katahira, K., Nakamura, T., Kawase, S., Yasuda, S., Shoda, H., & Draguna, M. R. (2007). The role of body movement in co-performers' temporal coordination. In *The inaugural International Conference on Music Communication Science* (pp. 72–75). Sydney, Australia.
- Kawase, S. (2014). Gazing behavior and coordination during piano duo performance. *Attention*,

- Perception & Psychophysics*, 76(2), 527–40. <http://doi.org/10.3758/s13414-013-0568-0>
- Keller, P. E., & Appel, M. (2010). Individual Differences, Auditory Imagery, and the Coordination of Body Movements and Sounds in Musical Ensembles. *Music Perception*, 28(1), 27–46. <http://doi.org/10.1525/mp.2010.28.1.27>
- Keller, P. E., Knoblich, G., & Repp, B. H. (2007). Pianists duet better when they play with themselves : On the possible role of action simulation in synchronization. *Consciousness and Cognition*, 16(1), 102–111. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.concog.2005.12.004>
- Keller, P. E., Pecenka, N., Fairhurst, M., & Repp, B. H. (2012). Relations Between Temporal Error Correction Processes and the Quality of Interpersonal Coordination. In *Proceedings of the 12th International Conference on Music Perception and Cognition and 8th Triennial Conference of the European Society for the Cognitive Sciences of Music* (p. 527).
- Kirby, R. L., Carr, S. E., & MacLeod, D. A. (1990). Cardiac-locomotor coupling while finger tapping. *Perceptual and Motor Skills*, 71(3), 1099–1104. <http://doi.org/10.2466/pms.1990.71.3f.1099>
- Kirby, R. L., Nugent, S. T., Marlow, R. W., MacLeod, D. A., & Marble, A. E. (1989). Coupling of cardiac and locomotor rhythms. *Journal of Applied Physiology*, 66(43), 323–329.
- Kleinspehn-Ammerlahn, A., Riediger, M., Schmiedek, F., von Oertzen, T., Li, S.-C., & Lindenberger, U. (2011). Dyadic drumming across the lifespan reveals a zone of proximal development in children. *Developmental Psychology*, 47(3), 632–644. <http://doi.org/10.1037/a0021818>
- Knoblich, G., Butterfill, S., & Sebanz, N. (2011). Psychological Research on Joint Action. In *The Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 54, pp. 59–101). Elsevier. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-385527-5.00003-6>
- Knoblich, G., & Sebanz, N. (2006). The Social Nature of Perception and Action. *Current Directions in Psychological Science*, 15(3), 99–104. <http://doi.org/10.1111/j.0963-7214.2006.00415.x>
- Konvalinka, I., Vuust, P., Roepstorff, A., & Frith, C. D. (2010). Follow you, follow me: continuous mutual prediction and adaptation in joint tapping. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*

- (2006), 63(11), 2220–2230. <http://doi.org/10.1080/17470218.2010.497843>
- Lamoth, C. J. C., Ainsworth, E., Polonski, W., & Houdijk, H. (2010). Variability and stability analysis of walking of transfemoral amputees. *Medical Engineering and Physics*, 32(9), 1009–1014. <http://doi.org/10.1016/j.medengphy.2010.07.001>
- Large, E., & Jones, M. (1999). The dynamics of attending: how people track time-varying events. *Psychological Review*, 106(1), 119–159. Retrieved from <http://psycnet.apa.org/psycinfo/1999-10188-005>
- Lejeune, H., & Wearden, J. H. (2009). Vierordt's The Experimental Study of the Time Sense (1868) and its legacy. *European Journal of Cognitive Psychology*, 21(6), 941–960. <http://doi.org/10.1080/09541440802453006>
- Loehr, J. D., Large, E. W., & Palmer, C. (2011). Temporal coordination and adaptation to rate change in music performance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 37(4), 1292–309. <http://doi.org/10.1037/a0023102>
- Loehr, J. D., & Palmer, C. (2011). Temporal coordination between performing musicians. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 64(11), 2153–2167. <http://doi.org/10.1080/17470218.2011.603427>
- Madison, G. (2001). Variability in isochronous tapping: Higher order dependencies as a function of intertap interval. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(2), 411–422. <http://doi.org/10.1037//0096-1523.27.2.411>
- Madison, G. (2004). Fractal modeling of human isochronous serial interval production. *Biological Cybernetics*, 90(2), 105–112. <http://doi.org/10.1007/s00422-003-0453-3>
- Mandelbrot, B. B., & Wallis, J. R. (1969). Some long-run properties of geophysical records. *Water Resources Research*, 5(2), 321–340. <http://doi.org/10.1029/WR005i002p00321>
- Martikainen, M. H., Kaneko, K. I., & Hari, R. (2005). Suppressed responses to self-triggered sounds in the human auditory cortex. *Cerebral Cortex*, 15(3), 299–302. <http://doi.org/10.1093/cercor/bhh131>

- Mates, J. (1994a). A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence. I. Timing and error corrections. *Biological Cybernetics*, 70(5), 463–73. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8186306>
- Mates, J. (1994b). A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence. II. Stability analysis, error estimation and simulations. *Biological Cybernetics*, 70(5), 475–484.
- Meltzoff, A. N., & Moore, M. K. (1977). Imitation of Facial and Manual Gestures by Human Neonates. *Science*, 198(4312), 75–78. <http://doi.org/10.1126/science.198.4312.75>
- Merchant, H., Zarco, W., Perez, O., Prado, L., & Bartolo, R. (2011). Measuring time with different neural chronometers during a synchronization-continuation task. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(49), 19784–19789. <http://doi.org/10.1073/pnas.1112933108>
- 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), 1260–71. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2010.08.006>
- Miyaoka, Y., Sato, S., Takahashi, Y., & Shimada, K. (1987). Influence of Heartbeat on Voluntary Movement. *Perceptual and Motor Skills*, 65(3), 875–878. <http://doi.org/10.2466/pms.1987.65.3.875>
- Musha, T., & Higuchi, H. (1976). The 1/f fluctuation of a traffic current on an expressway. *Japanese Journal of Applied Physics*, 15(7), 1271–1275. <http://doi.org/10.1143/JJAP.15.1271>
- Nakayama, Y., Kudo, K., & Ohtsuki, T. (2010). Variability and fluctuation in running gait cycle of trained runners and non-runners. *Gait and Posture*, 31(3), 331–335. <http://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.12.003>
- Néda, Z., Ravasz, E., Brechet, Y., Vicsek, T., & Barabási, A. L. (2000). The sound of many hands clapping. *Nature*, 403(6772), 849–50. <http://doi.org/10.1038/35002660>
- Ogden, R. T., & Collier, G. (2002). Inference on variance components of autocorrelated sequences in the presence of drift. *Journal of Nonparametric Statistics*, 14(4), 409–420. <http://doi.org/10.1080/10485250213111>

- Ogden, R. T., & Collier, G. L. (1999). On detecting and modeling deterministic drift in long run sequences of tapping data. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 28(3–4), 977–987.
<http://doi.org/10.1080/03610929908832337>
- Oullier, O., de Guzman, G. C., Jantzen, K. J., Lagarde, J., & Kelso, J. a S. (2008). Social coordination dynamics: measuring human bonding. *Social Neuroscience*, 3(2), 178–192.
<http://doi.org/10.1080/17470910701563392>
- Pecenka, N., & Keller, P. E. (2011). The role of temporal prediction abilities in interpersonal sensorimotor synchronization. *Experimental Brain Research*, 211(3–4), 505–515.
<http://doi.org/10.1007/s00221-011-2616-0>
- Peng, C. K., Buldyrev, S. V., Havlin, S., Simons, M., Stanley, H. E., & Goldberger, A. L. (1994). Mosaic organization of DNA nucleotides. *Physical Review E*, 49(2), 1685–1689.
<http://doi.org/10.1103/PhysRevE.49.1685>
- Peng, C. K., Havlin, S., Stanley, H. E., & Goldberger, A. L. (1995). Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos (Woodbury, N.Y.)*, 5(1), 82–7. <http://doi.org/10.1063/1.166141>
- Pikovsky, A., Rosenblum, M., & Kurths, J. (2001). *Synchronization—a universal concept in nonlinear sciences*. New York: Cambridge University Press.
- Podobnik, B., & Stanley, H. E. (2008). Detrended Cross-Correlation Analysis: A New Method for Analyzing Two Nonstationary Time Series. *Physical Review Letters*, 100(8), 84102.
<http://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.084102>
- Prinz, W. (1997). Perception and action planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9(2), 129–154. <http://doi.org/10.1080/713752551>
- Radocy, R. E., & Boyle, D. J. (1979). *Psychological Foundations of Musical Behavior*. Tokyo: CHARLES C THOMAS PUBLISHER.
- Rasch, R. A. (1979). Synchronization in performed ensemble music. *Acustica*, 43, 121–131.

- Repp, B. H. (1992). Diversity and commonality in music performance: An analysis of timing microstructure in Schumann's "'Träumerei.'" *The Journal of the Acoustical Society of America*, 92(5), 2546. <http://doi.org/10.1121/1.404425>
- Repp, B. H. (2001). Processes underlying adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization, 20, 277–312.
- Repp, B. H. (2003a). Phase attraction in sensorimotor synchronization with auditory sequences: effects of single and periodic distractors on synchronization accuracy. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 29(2), 290–309. <http://doi.org/10.1037/0096-1523.29.2.290>
- Repp, B. H. (2003b). 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. <http://doi.org/10.1080/00222890309603156>
- Repp, B. H. (2004). On the nature of phase attraction in sensorimotor synchronization with interleaved auditory sequences. *Human Movement Science*, 23(3–4 SPE. ISS.), 389–413. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2004.08.014>
- Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: a review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(6), 969–992. <http://doi.org/10.3758/BF03206433>
- Repp, B. H. (2006). Does an auditory distractor sequence affect self-paced tapping? *Acta Psychologica*, 121(1), 81–107. <http://doi.org/10.1016/j.actpsy.2005.06.006>
- Repp, B. H., & Penel, A. (2002). Auditory dominance in temporal processing: New evidence from synchronization with simultaneous visual and auditory sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(5), 1085–1099. <http://doi.org/10.1037/0096-1523.28.5.1085>
- Repp, B. H., & Penel, A. (2004). Rhythmic movement is attracted more strongly to auditory than to visual rhythms. *Psychological Research*, 68(4), 252–70. <http://doi.org/10.1007/s00426-003-0143-8>
- Repp, B. H., & Su, Y.-H. (2013). Sensorimotor synchronization: A review of recent research (2006–2012).

- Psychonomic Bulletin Review*, 20(3), 403–452. <http://doi.org/10.3758/s13423-012-0371-2>
- Rhea, C. K., Kiefer, A. W., D’Andrea, S. E., Warren, W. H., & Aaron, R. K. (2014). Entrainment to a real time fractal visual stimulus modulates fractal gait dynamics. *Human Movement Science*, 36, 20–34. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2014.04.006>
- Richardson, M. J., Marsh, K. L., Isenhower, R. W., Goodman, J. R. L., & Schmidt, R. C. (2007). Rocking together: dynamics of intentional and unintentional interpersonal coordination. *Human Movement Science*, 26(6), 867–91. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2007.07.002>
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 169–92. <http://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230>
- Roberts, S., Eykholt, R., & Thaut, M. H. (2000). Analysis of correlations and search for evidence of deterministic chaos in rhythmic motor control by the human brain. *Physical Review. E*, 62(2), 2597–2607. <http://doi.org/10.1103/PhysRevE.62.2597>
- Rosenbaum, D. A. (2010). *Human Motor Control, 2nd Edition*. Academic Press.
- Schmidt, R. C., Carello, C., & Turvey, M. T. (1990). Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 16(2), 227–47. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2142196>
- Schmidt, R. C., Fitzpatrick, P., Caron, R., & Mergeche, J. (2011). Understanding social motor coordination. *Human Movement Science*, 30(5), 834–45. <http://doi.org/10.1016/j.humov.2010.05.014>
- Schmidt, R. C., & O’Brien, B. (1997). Evaluating the Dynamics of Unintended Interpersonal Coordination. *Ecological Psychology*, 9(3), 189–206. http://doi.org/10.1207/s15326969eco0903_2
- Schmidt, R. C., & Richardson, M. J. (2008). Dynamics of interpersonal coordination. In A. Fuchs & V. K. Jirsa (Eds.), *Coordination: Neural, Behavioral and Social Dynamics* (Vol. 2008, pp. 281–308). Berlin Heidelberg. http://doi.org/10.1007/978-3-540-74479-5_14

- Schmidt, R. C., & Turvey, M. T. (1994). Phase-entrainment dynamics of visually coupled rhythmic movements. *Biological Cybernetics*, 70(4), 369–76. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8148414>
- Schultze, H.-H., Cordes, A., & Vorberg, D. (2005). Keeping Synchrony While Tempo Changes: Accelerando and Ritardando. *Music Perception*, 22(3), 461–477.
- Sebanz, N., Knoblich, G., & Prinz, W. (2003). Representing others' actions: just like one's own? *Cognition*, 88(3), B11–B21. [http://doi.org/10.1016/S0010-0277\(03\)00043-X](http://doi.org/10.1016/S0010-0277(03)00043-X)
- Serrien, D. J. (2008). The neural dynamics of timed motor tasks: Evidence from a synchronization-continuation paradigm. *European Journal of Neuroscience*, 27(6), 1553–1560. <http://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2008.06110.x>
- Shaffer, L. H. (1984). Timing in solo and duet piano performances. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 36(4), 577–595. <http://doi.org/10.1080/14640748408402180>
- Shaffer, L. H., Clarke, E. F., & Todd, N. P. (1985). Metre and rhythm in piano playing. *Cognition*, 20(1), 61–77. [http://doi.org/10.1016/0010-0277\(85\)90005-8](http://doi.org/10.1016/0010-0277(85)90005-8)
- Shergill, S. S., Bays, P. M., Frith, C. D., & Wolpert, D. M. (2003). Two Eyes for an Eye : The Neuroscience of Force Escalation. *Science*, 301(5630), 187–187.
- Shin, Y. K., Proctor, R. W., & Capaldi, E. J. (2010). A review of contemporary ideomotor theory. *Psychological Bulletin*, 136(6), 943–974. <http://doi.org/10.1037/a0020541>
- Sloboda, J. A. (1985). *The musical mind: The cognitive psychology of music*. Oxford University Press.
- Spiro, N., & Himberg, T. (2012). Musicians and Non-musicians Adapting to Tempo Differences in Cooperative Tapping Tasks. In *Proceedings of the 12th International Conference on Music perception and Cognition and the 8th Triennial Conference of the European Society for the Cognitive Sciences of Music, July 23-28, 2012, Thessaloniki, Greece* (pp. 950–955).
- Stenzel, A., Chinellato, E., Bou, M. A. T., Del Pobil, Á. P., Lappe, M., & Liepelt, R. (2012). When Humanoid Robots Become Human-Like Interaction Partners: Corepresentation of Robotic Actions.

- Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38(5), 1073–1077.
<http://doi.org/10.1037/a0029493>
- Stephen, D. G., Stepp, N., Dixon, J. A., & Turvey, M. T. (2008). Strong anticipation: Sensitivity to long-range correlations in synchronization behavior. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 387(21), 5271–5278. <http://doi.org/10.1016/j.physa.2008.05.015>
- Stepp, N., & Turvey, M. T. (2010). On Strong Anticipation. *Cognitive Systems Research*, 11(2), 148–164.
<http://doi.org/10.1016/j.cogsys.2009.03.003>
- Stevens, L. T. (1886). On The Time-Sense. *Mind*, 11(43), 393–404.
<http://doi.org/10.1093/mind/os-XI.43.393>
- Thaut, M. H. (2005). *Rhythm, Music, and the Brain: Scientific Foundations and Clinical Applications*. London: Routledge.
- Torre, K., Balasubramaniam, R., Rheume, N., Lemoine, L., & Zelaznik, H. N. (2011). Long-range correlation properties in motor timing are individual and task specific. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18(2), 339–346. <http://doi.org/10.3758/s13423-011-0049-1>
- Tsai, C.-C., & Brass, M. (2007). Does the Human Motor System Simulate Pinocchio's Actions? *Psychological Science*, 18(12), 1058–1062. <http://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.02025.x>
- Tsai, C.-C., Kuo, W.-J., Hung, D. L., & Tzeng, O. J. L. (2008). Action Co-representation is Tuned to Other Humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(11), 2015–2024.
<http://doi.org/10.1162/jocn.2008.20144>
- van der Wel, R. P. R. D., & Fu, E. (2015). Entrainment and task co-representation effects for discrete and continuous action sequences. *Psychonomic Bulletin & Review*, 1685–1691.
<http://doi.org/10.3758/s13423-015-0831-6>
- Varlet, M., & Richardson, M. J. (2015). What would be Usain Bolt's 100-meter sprint world record without Tyson Gay? Unintentional interpersonal synchronization between the two sprinters. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 41(1), 36–41.

<http://doi.org/10.1037/a0038640>

Vierordt, K. (1868). *Der Zeitsinn nach Versuchen*. Tübingen, Germany: Laupp.

Vorberg, D., & Wing, A. (1996). Chapter 4 Modeling variability and dependence in timing. *Handbook of Perception and Action* (Vol. 2). [http://doi.org/10.1016/S1874-5822\(06\)80007-1](http://doi.org/10.1016/S1874-5822(06)80007-1)

Washburn, A., Kallen, R. W., Coey, C. A., Shockley, K., & Richardson, M. J. (2015). Harmony from chaos? Perceptual-motor delays enhance behavioral anticipation in social interaction. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 41(4), 1166–1177.

<http://doi.org/10.1037/xhp0000080>

Windsor, W. L., & Clarke, E. F. (1997). Expressive Timing and Dynamics in Real and Artificial Musical Performances: Using an Algorithm as an Analytical Tool. *Music Perception*, 15(2), 127–152.

Wing, A. M., & Kristofferson, A. B. (1973a). Response delays and the timing of discrete motor responses. *Perception & Psychophysics*, 14(1), 5–12. <http://doi.org/10.3758/BF03198607>

Wing, A. M., & Kristofferson, A. B. (1973b). The timing of interresponse intervals. *Perception & Psychophysics*, 13(1963), 455–460. <http://doi.org/10.3758/BF03205802>

Yamada, M., & Yonera, S. (2001). Temporal control mechanism of repetitive tapping with simple rhythmic patterns. *Acoustical Science and Technology*, 22(3), 245–252.

<http://doi.org/10.1250/ast.22.245>

Yamada, N. (1995a). Chaotic swaying of the upright posture. *Human Movement Science*, 14(6), 711–726. [http://doi.org/10.1016/0167-9457\(95\)00032-1](http://doi.org/10.1016/0167-9457(95)00032-1)

Yamada, N. (1995b). Nature of variability in rhythmical movement. *Human Movement Science*, 14(3), 371–384. [http://doi.org/10.1016/0167-9457\(95\)00018-N](http://doi.org/10.1016/0167-9457(95)00018-N)

Zebende, G. F. (2011). DCCA cross-correlation coefficient: Quantifying level of cross-correlation. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 390(4), 614–618.

<http://doi.org/10.1016/j.physa.2010.10.022>

河瀬諭. (2009). 音楽のコミュニケーションに関する諸研究. 大阪大学大学院人間科学研究科紀

要, 35, 293–311. <http://doi.org/http://doi.org/10.18910/6931>

松葉育雄. (2007). 長期記憶過程の統計 自己相似な時系列の理論と方法. 共立出版.

謝辞

本論文の作成，ならびに，これまでの大学院生活にあたりご支援をくださった皆様に，心より感謝申し上げます。

工藤和俊先生は，博士課程からの入学にもかかわらず，私を快く研究室へ受け入れ，研究が遅々として進まない私を温かく見守り，様々な角度からの助言をくださりました。御指南いただいたにも関わらず手つかずの課題も，今後の研究生活の中でじっくり進めて参りたいと思います。3年間ご指導くださり，誠にありがとうございました。

博士論文の審査を担当してくださいました，阪口先生，中澤先生，柳原先生，吉岡先生にも，貴重なご指摘を多くいただきました。お忙しい中，論文の質を上げるための多くの建設的なコメントをくださり，誠にありがとうございました。

進矢正宏先生からは，プログラミングや論文作成，研究を計画的に進めるための基礎を，細部から大局的な観点に至るまで，時に優しく，時に厳しく，様々な角度から繰り返しご指導をいただきました。3年でここまで来られたのも，工藤先生に加え，進矢先生のご助力があったからこそと思います。心からお礼申し上げます。

青森大学の紅林亘先生には，第2章の数理モデル関連で多大なお世話になりました。私一人ではあのモデルは決して作れなかったと思います。おかげさまで充実した博士論文にすることができました。心からお礼申し上げます。

工藤研究室の皆様には，ミーティングでのコメントや論文，申請書等の添削，飲み会など，公私に渡りお世話になりました。特にOBの宮田紘平さんは，運動学習研究会での初対面から良くしていただき，リズム運動協調課題の研究をしている先輩がいるという点で大変心強く思い，工藤研受験のきっかけになりました。同期の太田啓示さんと山本耕太さんも，良い刺激を与えてくださり，誠にありがとうございます。

中澤研究室の皆様にも心より感謝申し上げます。データミーティングや抄読会では

数ヶ月のスパンが空くため、私の研究の興味や流れを理解していただくための説明の仕方等、様々な点を見直すための良い機会となりました。特に OB の三浦さんからは様々な研究上の仕事を回していただいたおかげで、関連する研究領域の知識やノウハウが深まりました。誠にありがとうございます。

京都大学の神崎素樹先生も、私を分野違いでありながら快く受け入れ、また送り出した後も気にかけてくださり、誠にありがとうございました。色々のご心配をおかけしましたが、無事博士論文を書き上げることができました。工藤先生との出会いも、神崎研 OB の藤井慶輔さんに運動学習研究会に誘っていただいたのがきっかけでした。神崎研時代から色々とお気にかけてくださり、誠にありがとうございました。

日本音楽知覚認知学会や関東音楽と脳勉強会、そして運動学習研究会の皆様にも、心よりお礼申し上げます。研究室外部の会で好意的なコメントをいただけたことは、研究を続けていく上で大変な励みになりました。

身体運動科学の先生方、ならびに学生の皆様にも、心よりお礼申し上げます。身体のアットホームな雰囲気のおかげで、外部から入学した私も安心して新しい環境へ早々と馴染み、研究に取り組むことができました。予備実験・本実験への協力に関しても、誠にありがとうございました。おかげさまで、貴重なデータを得ることができました。

また、店長の湯川史樹さんをはじめ、バー「変幻自在」の皆様にも、大変お世話になりました。地元を離れ上京することを決めたときは心細さを感じていましたが、研究室見学の帰りに寄り道した際、1年ぶり2度目の来店にもかかわらず湯川さんは私のことを覚えていて、温かく迎えてくださりました。おかげさまで3年間、孤独を感じることなく過ごすことができました。

最後に、修士課程を含めて5年間、仕事を辞めた私を支えてくれた家族や親戚の皆様にも、心より感謝申し上げます。様々な苦勞をかけましたが、なんとか論文を書き上げることができました。本当にありがとうございました。