

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	二者間リズム協調における制御戦略のテンポおよびタイミング依存性
Title(English)	
著者(和文)	木村和人
Author(English)	Kazuto Kimura
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12677号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:三宅 美博,山村 雅幸,瀧ノ上 正浩,石井 秀明,小野 功
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12677号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

博士論文
二者間リズム協調における制御戦略の
テンポおよびタイミング依存性

木村 和人

東京工業大学
情報理工学院
知能情報コース

指導教員 三宅 美博

2024年3月6日

概要

人間は音楽の合奏に見られるように、リズムカルに運動しながら他者と運動タイミングを同期させる、つまり、リズム協調を行うことができる。また、そのリズム協調を達成させるために、複数の戦略を用いて運動タイミングを制御することができる。具体的には、自身の運動周期を維持する戦略、相手や外界からの刺激の周期に合わせる戦略、自身の運動と刺激との間の同期誤差を修正する戦略を使用している。、これらの戦略は、テンポや同期タイミングにおいて若干先行するもしくは後行するという役割分担に依存すると考えられている。しかしながら、複雑な音楽を用いた先行研究においては、その複雑さ故に一貫した結論に至っていない。また、プロフェッショナルではない素人であっても戦略を使い分けるのかは明らかでない。つまり、人間同士のリズム協調において、人間がそれらの戦略をどのように変化させてリズム協調を達成しているのかの基本的特徴とメカニズムについては十分に調べられていない。

そこで本研究では、人間のリズム協調における戦略のテンポとタイミング依存性についての基礎的特性とメカニズムを明らかにすることを目的とした。より具体的には、先に述べた自身の周期を維持する戦略、相手の周期に合わせる戦略、同期誤差を修正する戦略の度合いが、リズム協調におけるテンポとり同期のタイミングが相手よりも早いか遅いかのタイミングに依存するかどうかの調査を行った。加えて、戦略のテンポとタイミング依存性の基本的特性を明らかにするために、二者間同期継続タッピング課

題と呼ばれる単純なリズム協調課題を実施した。この課題では、試行の最初に二名の参加者に一定周期のメトロノーム音が同時提示され、参加者はメトロノームに同期するように指をタップした。メトロノームが停止した後、両参加者は、メトロノームが周期を維持しながら、相手のタップ時に聞こえる聴覚刺激に同期するようにタップをつづけた。実験1においては戦略のテンポ依存性を調べた。最初に提示するメトロノームの周期を700msから3,200msまで500ms刻みの6条件を用いて、二者間同期継続タッピング課題を行った。メトロノームのテンポより参加者のタップ周期が速くなった後、試行ごとに異なるテンポに収束して、安定したテンポでリズム協調が行われる傾向が見られた。そのため、重回帰分析により推定した参加者ごとの戦略の度合と参加者のタップのテンポの間の相関関係を分析した。その結果、相手の周期に合わせる戦略の度合は、テンポが遅くなるほど大きくなる傾向が見られた。一方で、自身の周期を維持する戦略と同期誤差を修正する戦略はテンポに依存しなかった。実験2においては、戦略のタイミング依存性を調べた。最初に提示するメトロノームの周期を700msとして二者間同期継続タッピング課題を行った。その結果、59試行中58試行において、ペアとなった参加者は、先にタップする先行側と遅れてボタンをタップする後行側に分かれた。そこで、先行後行の役割の違いで戦略の度合に対して有意な効果が見られるか、位相周期誤差修正モデルのパラメタ推定と窓相互相関関数を用いて分析した。その結果、先行側の参加者は後行側より同期誤差を修正する戦略の度合と自身の周期を維持する戦略の度合が大きい傾向が見られた。一方で、後行側の参加者は先行側より、相手の周期に合わせる戦略の度合が大きい傾向が見られた。

以上より、二者間リズム協調における戦略には、テンポ依存性およびタイミング依存性が存在することが確認された。テンポ依存性について素人の単純なリズム協調においてもテンポが遅くなるにつれて相手の周期に合わせる度合いが大きくなることが明らかとなった。タイミング依存性については、先行側はより同期誤差を修正し、後行側は相手の周期により依存することが示された。本結果は、今後のリズム協調における戦略の分析

においては役割やテンポを考慮することの重要性を示している。

目次

概要	i
第 1 章 緒論	1
1.1 リズム協調と戦略	1
1.2 音楽における戦略の変化	4
1.3 リズム同期の基本的戦略	6
1.3.1 自身の周期を維持する戦略	9
1.3.2 外界の周期に合わせる戦略	10
1.3.3 同期誤差を修正する戦略	11
1.4 戦略のテンポ依存性	12
1.5 戦略のタイミング依存性	15
1.6 二者間リズム協調における戦略と特徴	16
1.7 研究目的	18
1.8 本論文の構成	19
第 2 章 実験 1・二者間リズム協調戦略のテンポ依存性	21
2.1 緒言	21
2.2 実験手法	22
2.2.1 実験参加者	22
2.2.2 実験装置と刺激	23
2.2.3 実験課題	27

2.2.4	実験手続き	29
2.2.5	分析手法	31
2.3	結果	33
2.3.1	平均テンポの特徴	33
2.3.2	戦略のテンポ依存性	37
2.4	考察	42
2.4.1	自身の周期を維持する戦略のテンポ独立性	43
2.4.2	相手の周期に合わせる戦略のテンポ依存性	44
2.4.3	同期誤差を修正する戦略のテンポ独立性	45
2.4.4	テンポの加速傾向の要因考察	46
2.5	結言	47
第3章	実験2・二者間リズム協調戦略のタイミング依存性	49
3.1	緒言	49
3.2	実験手法	50
3.2.1	実験参加者	50
3.2.2	実験装置と刺激	51
3.2.3	実験課題	52
3.2.4	実験手続き	53
3.2.5	分析手法	55
3.3	結果	59
3.3.1	タイミングの先行後行の役割分担	59
3.3.2	同期誤差を修正する戦略と周期誤差を修正する戦略のタイミング依存性	62
3.3.3	周期を維持する戦略と相手に周期を合わせる戦略のタイミング依存性	64
3.4	考察	66
3.4.1	先行後行の役割分担の存在と安定性	66
3.4.2	戦略のタイミング依存性	67

3.4.3	位相周期修正モデルと3つの戦略を扱う重回帰モデルとの関係	68
3.4.4	役割を決定する要因の考察	69
3.4.5	音楽における戦略のタイミング依存性	70
3.5	結言	71
第4章	総合考察	73
4.1	二者間リズム協調におけるテンポおよびタイミング依存性	73
4.2	テンポが加速する現象と戦略の変化の関係性	76
4.3	教示によるリズム協調と戦略の変化	78
4.4	戦略の意識・無意識と教示	80
4.5	2つのアプローチから見た役割分担の考察	82
4.5.1	情報処理理論的アプローチからの役割分担の考察	83
4.5.2	動的システムアプローチからの役割分担の考察	86
第5章	結論	89
第6章	展望	93
6.1	事前の役割分担や個人の性格傾向が戦略に与える影響	93
6.2	音楽におけるリズム協調の崩壊の原因と対策の研究	95
6.3	役割を考慮したリズム協調ロボットの開発	96
謝辞		97
参考文献		99
研究業績		113

目次

1.1	指タッピング実験課題の模式図	6
1.2	メトロノームとの同期タッピング課題における指標	8
1.3	自身の周期を維持する戦略	9
1.4	外界刺激の周期に合わせる戦略	10
1.5	同期誤差を修正する戦略	11
1.6	本論文の構成	20
2.1	同期継続課題における実験装置の図	24
2.2	圧力センサを使用したタッピング装置	25
2.3	実験で使用したマイクロコンピュータ	26
2.4	実験 1 における同期継続タッピング課題	27
2.5	実験 1 における実験風景	30
2.6	実験中の参加者の状態	30
2.7	実験 1 の代表的な試行における ITI の推移 (700ms テンポ条件)	33
2.8	実験 1 の代表的な試行における ITI の推移 (1,700ms テンポ条件)	34
2.9	実験 1 の代表的な試行における ITI の推移 (2,700ms テンポ条件)	34
2.10	条件間の平均テンポ (試行ごとの周期の平均)	36

2.11	自身の周期を維持する戦略の度合を示すパラメータ α と平均テンポとの散布図	39
2.12	相手の周期に合わせる戦略の度合を示すパラメータ β と平均テンポとの散布図	40
2.13	同期誤差を修正する戦略の度合を示すパラメータ γ と平均テンポの散布図	41
3.1	実験 2 における同期継続タッピング課題	52
3.2	実験 2 における実験室の写真	54
3.3	実験 2 の代表的な試行における SE の推移	60
3.4	実験 2 の代表的な試行における SE の分布	61
3.5	Shulze のモデルのパラメータ α について先行後行間で比較した結果	62
3.6	Shulze のモデルのパラメータ β について先行後行間で比較した結果.	63
3.7	ラグ - 1 相互相関係数について先行後行間で比較した結果.	65

表目次

2.1	重回帰モデルにおける各変数の多重共線性解析	37
2.2	パラメータ α , β , γ と平均テンポとの間の相関分析の結果	38
3.1	参加者ごとに, 先行側であった試行数を調べた結果	59

第1章

緒論

1.1 リズム協調と戦略

人間はリズムカルに運動しながら他者と運動タイミングを同期させることができる [1-4]. 例えば, 音楽の演奏では, 演奏者らは楽器の音を鳴らすタイミングを他者のそれと一致させる. ほかに, 人間が横に並んで歩くときには, 意識的か無意識的かを問わず, 足の運動タイミングが同期することや [5-7], 二人の人間が横に並んでロッキングチェアを揺らした場合, 無意識的に運動が同期すること [8], 他者と対話を行う際, うなずきやジェスチャーなどの身体運動が同期すること [9] などが知られている. 日常の様々な場面において, このように人間は他者とリズム協調を行っている.

そのリズム協調を達成するために, 人間はいくつかの方法を用いていることが知られている. 例えば, 音楽の合奏 [10] においては, 指揮者や他の演奏者などの外界からのリズム刺激のテンポに自身のテンポを合わせる, もしくは, 逆に自身のテンポを維持するという方法で協調を達成しようとする. また, 自身の運動と他者の運動との間の同期誤差を修正することで演奏のタイミングを一致させることを行う. さらに, これらの方法を組み合わせて使用していることが示されてきている [11, 12]. 本研究ではリ

リズム生成を達成させるために運動タイミングを制御する内的メカニズムのことを戦略と呼ぶことにする。リズム協調のための基本的な戦略については1.3節にて詳細に述べる。

リズム協調の戦略には様々な要因が影響を及ぼす。例えば、一定テンポのメトロノームに合わせるのか、もしくは、他者と協調しながらリズムを生成するかによってこの戦略が異なることが示されてきている [2, 13–15]。音楽の演奏においてはその他にも多くの要素が存在する [16–19]。例えば、ピアノやバイオリンといった様々な楽器の中からどのような楽器を使うのか、演奏者間の楽器は同じなのか演奏者ごとに異なる楽器を使うのか、演奏者らの中で指揮者やコンマスなどのリーダー役となる人はいるのかそれとも全演奏者は役割分けされず、平等な立場なのか、演奏する楽曲は激しいものなのか穏やかなのか、楽しいものか悲しいものかといった曲のモードなど、様々な要因によって、音楽の演奏におけるリズム協調の戦略は変化する。

しかしながら、音楽を用いたリズム協調戦略の研究では、これらの音楽に含まれる複雑さから人間が他者とのリズム協調の中でどのような戦略をとるのか、また、それがどのように変化するのかについて一貫した結論に至っていない。加えて、それらの戦略がプロの熟練者だから成り立つものであるのか、素人においてもある戦略を取りうるのかについてもいまだ多くのことが明らかでない。本研究は、音楽に含まれる上述の複雑な要因を排除した二者間のリズム協調実験を行うことで、人間のリズム協調における戦略についてその基礎的特性とメカニズムを明らかにするものである。

人間のリズム同期を調べる研究の分野には、動的システムアプローチを用いて位相領域にて現象を記述しようとする分野と情報処理理論的アプローチを用いて時間領域にて内部メカニズムを記述しようとする分野が存在している [1]。

動的システムアプローチにおいては、位相空間において非線形モデルによってリズム同期現象を普遍的に記述する。左右の人差し指の引き込みや anti-phase から in-phase への相転移などを上手く記述でき、より一般的

な記述と考えられ [20], 二人で並んでロックンロールチェアを揺らすと位相が合うようになることを調べた研究 [8] など, 同期現象について, 非線形モデルで説明する研究が行われている. ただし, 本研究では, 指振り運動と違い, 実験課題である指タッピング動作は上げる動作と下げる動作との間で非対称性がありリミットサイクルに乗りづらい点, 同期継続タッピングの継続課題における相手からの刺激提示がタップしたタイミングと関連した聴覚刺激のみであり, 情報が離散的であるという点, 指タッピングのようなイベントに同期するためには, 指振りより広範囲の脳部位が関与している点など, 指振りのときのモデルを直接指タッピングに適応させることは難しいという指摘がある [1].

一方で, 情報処理理論的アプローチは線形離散モデルを用いてリズム同期のプロセスおよび内部メカニズム記述している. この線形モデルは過渡に単純化しすぎているという指摘がされているが, 相転移などがおこらない安定的なリズム同期においては非線形モデルをよく近似していると考えられている [1]. 本研究においては戦略という人間の内部メカニズムに着目するため情報処理理論的アプローチを採用した.

1.2 音楽における戦略の変化

プロの音楽家として訓練を受けている演奏家は、役割に関して別々の指示が与えられている場合には、その指示に沿って戦略を変えることができる。例えば、相手の行動を無視して機械的に自身の周期で運動を行う役割、相手の運動に対して運動時刻や周期を一方向的に合わせに行く役割に分かれる例 [21] や、相手が運動するより先に運動する役割と相手の運動の直後に遅れて運動する役割 [22] に分かれる例があげられる。より具体的には、オーケストラなどの合奏の場面において、指揮者やコンサートマスターと呼ばれる立場の人は演奏者らの中で、リーダ的な立場を担っており、ほかの演奏者に自身のテンポ（周期）やタイミング（運動時刻）を提示し、その他の演奏者はリーダ役の人間が提示するテンポやタイミングに合わせて、自身の運動タイミングを制御する戦略をとるといった例 [10] が挙げられる。

実際に、音楽の演奏を分析した先行研究によると、プロの音楽家は事前に割り当てられた役割に沿って戦略を変えることができることが示されている [10, 22]。例えば、ピアノの二重奏において、自身のテンポを維持するように指示されたリーダと、リーダにテンポを合わせることを指示されたフォロワに分かれてピアノを演奏させると、フォロワがわずかにピアノの音を鳴らすタイミングが先行している傾向をみせた [22]。より具体的には、平均して数 ms 程度、フォロワの方がリーダに対してピアノを演奏するタイミングが先行する傾向を見せた。第一バイオリン、第二バイオリン、ビオラ、チェロからなる弦楽四重奏においては、第一バイオリンとチェロを担当する演奏者が音を鳴らすタイミングが先行しており、第二バイオリンとビオラが数十 ms 程度遅れて音を鳴らすという傾向が見られる [10]。また、テンポの関係性については、ビオラは第一バイオリンのテンポに合わせて、第一バイオリンはチェロのテンポに合わせていた。加えて、第二バイオリンとチェロはお互いにテンポを合わせあい、第二バイオリンとビオラもお互いにテンポを合わせあうという傾向を見せた。これら

の結果は、弦楽四重奏においては一般的に第一バイオリンがリーダーであると認識されているにもかかわらず、各演奏者の非常に複雑な戦略とそれに基づく複雑な依存関係が演奏者間で構築されていることを示している。

これらのように、訓練を受けたプロの音楽家はリーダーとフォロワなどの割り当てられた役割や自身が演奏する楽器によって、相手へテンポを合わせるのか自身がテンポを引っ張るのか、また、演奏のタイミングを先行させるのか後行させるのかという役割分担を行っている。一方で、楽器や習熟度、役割、時間的構造など、様々な要素を含む音楽は複雑であり、戦略はそれらの要素の影響を受けてしまう場合がある。例えば、上述した通りピアノデュオではリーダーの役割を与えられたものが後から演奏するが、弦楽四重奏ではリーダーである第一バイオリンが先行して演奏を行っている。加えて、1.1 節でも述べた通り、音楽の演奏には、役割のほかに、楽器やテンポ、ムードのような、様々な要素が存在し、それらの要素がリズム協調の戦略や特徴に影響を与えることが調べられている [16–19]。このように、リズム協調における戦略について、音楽を用いた研究においては音楽の複雑さから一貫した知見は十分に見つかっていない。したがって、より単純化したリズム協調課題を用いることで、リズム協調における基礎的な戦略を調べるのが重要である。

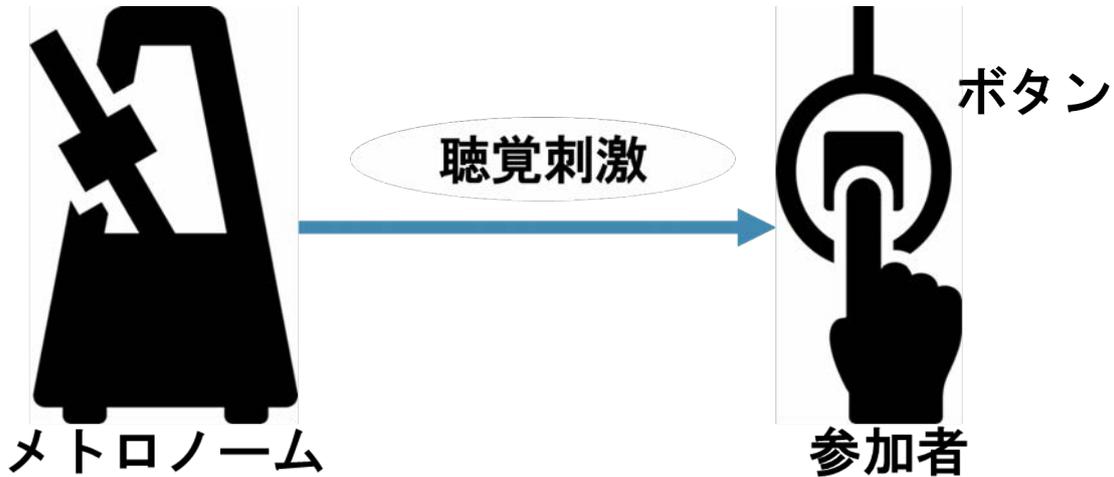


図 1.1 指タッピング実験課題の模式図. 参加者は, メトロノームなどから提示される聴覚刺激に合わせて, 指でボタンをタップ (軽くたたくこと) する. 同期課題では, 聴覚刺激とタップを同期させることを行う. 継続課題では, メトロノームが鳴りやんだ後にそのテンポを維持するようにタップを続けることが参加者にとっての目標になる.

1.3 リズム同期の基本的戦略

人間のリズム同期の基本的特性と戦略を調べるための単純なリズム協調課題として, 図 1.1 に示すような, メトロノーム音に指タッピングを用いて同期する指タッピング課題が古くから用いられてきた [1, 2, 23–28]. この課題は, メトロノームからリズムカルに提示される聴覚刺激に同期するように, 指でボタンなどをタップする課題である. より具体的には, メトロノームと同期するようにタップする同期タッピング課題 [28] と, 最初に提示されたメトロノームのテンポを維持するように, メトロノームが消された後にタップし続ける継続タッピング課題, そして同期タッピング課題から速やかに継続タッピング課題に移行する同期継続タッピング課題 [29, 30] などがリズム同期の基本特性を調べるために用いられてきた. その指タッピング課題を用いて, 人間の同期精度やテンポ維持の正確さなどの特徴や, それらのためのタイミング制御の戦略が調べられてきている.

ここで戦略を考える上で、3つの重要な指標が存在する。それらは、参加者のタップの時刻と外部刺激の時刻から求められる、自身の運動周期 (inter-tap interval; ITI), 外部刺激の周期 (inter-stimulus interval; ISI), 自身の運動と外界刺激との間の同期誤差 (synchronization error; SE) である。図 1.2 にそれらを示す。本研究では、 n 番目の参加者のタップ時刻を $Tap(n)$, 聴覚刺激の提示時刻を $Sti(n)$ と定義し、 n 番目のタップとその直前 ($n-1$ 番目) のタップとの間の時間差を n 番目のタップ周期 $ITI(n)$, n 番目の刺激とその直前 ($n-1$ 番目) の刺激との間の時間差を n 番目の刺激周期 $ISI(n)$, n 番目のタップと n 番目の刺激との間の時間差を n 番目の同期誤差 $SE(n)$ と定義している。

リズム協調の特徴を調査する際、ITI, ISI, および、SE が重要な指標として扱われている [31, 32]。ITI と ISI との差は、テンポ維持の正確さを示しており [33], ITI の標準偏差は、周期がどの程度安定しているかを示している [34, 35]。ISI は外部の状況を示す指標であり、ISI の平均を変えて平均テンポによって人間のリズム協調にどのような影響が起きるかが調べられたり [36], リズム協調の途中で ISI が変化した場合に人間がどのように対応するかを観察する実験が行われたりしている [37]。SE は、人間と外部との関係や同期の精度を示しており、SE の絶対値が小さい程同期が正確であることを意味している [38, 39]。また、正負を考慮した SE の平均は、人間と外部刺激のどちらがどのくらい先に運動しているかの傾向を示しており [21, 24, 25], SE の標準偏差は、その傾向がどのくらい安定しているかを示している。

また、リズム協調における戦略においても、ITI, ISI, および、SE が重要であることが示されてきている [11, 12, 27, 28, 40–43]。特に、メトロノームとのタッピングの研究を通して、人間はリズム協調を達成する際、ITI を維持する戦略 [30], ITI を ISI に合わせる戦略 [28], SE を小さくするようにタイミングを修正する戦略 [44] の三種類の戦略が重要であることが分かっている。以下では、それぞれの戦略について詳細に述べる。

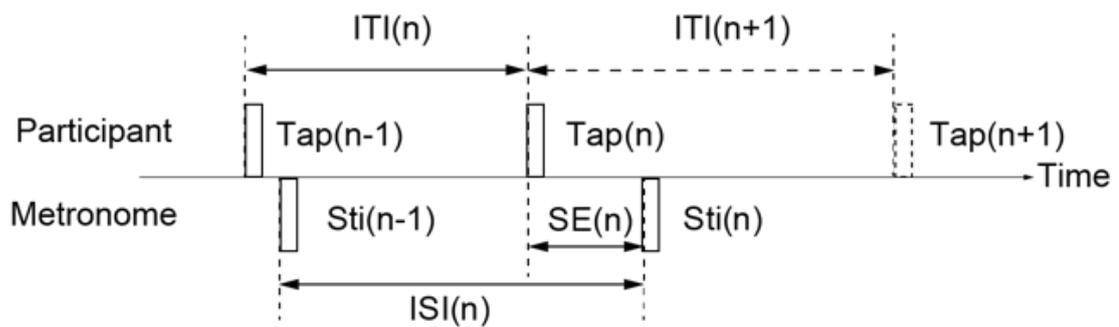


図 1.2 メトロノームとの同期タッピング課題における指標. 時間は左から右に流れる構造をとっており, 四角はタップや刺激の時刻を示す. n 番目の参加者のタップ時刻を $Tap(n)$, 聴覚刺激の提示時刻を $Sti(n)$ と定義している. n 番目のタップとその直前 ($n-1$ 番目) のタップとの間の時間差を n 番目のタップ周期 $ITI(n)$, n 番目の刺激とその直前 ($n-1$ 番目) の刺激との間の時間差を n 番目の刺激周期 $ISI(n)$, n 番目のタップと n 番目の刺激との間の時間差を n 番目の同期誤差 $SE(n)$ と定義している.

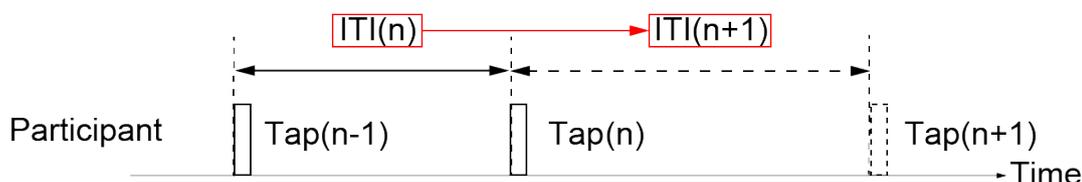


図 1.3 自身の周期を維持する戦略. 直前に出したの自身のタップ周期 (ITI) が短かった場合には, 次の自身の ITI を長くするために, 次は遅めにタップしようとし, 逆に直前の自身の ITI が長かった場合には, 次の自身の ITI を短くするために次は早くタップしようとする. この戦略により平均のテンポを維持しようとする.

1.3.1 自身の周期を維持する戦略

ITI を維持する戦略とは, 自身の運動周期の平均であるテンポを維持するために, 長い周期と短い周期を交互に出すことである [30]. 具体的には, 直前に出したの自身のタップ周期が短かった場合には, 次の自身のタップ周期を長くするために, 次は遅めにタップしようとし, 逆に直前の自身のタップ周期が長かった場合には, 次の自身のタップ周期を短くするために次は早くタップしようとする戦略のことである (図 1.3). 開始時に提示されたメトロノーム刺激が停止した後もテンポを維持するようにタッピングを継続する継続タッピングの先行研究において, 参加者は自身のテンポを維持する目的で, 長いタップ周期と短いタップ周期を交互に出す傾向がみられる [30,33].

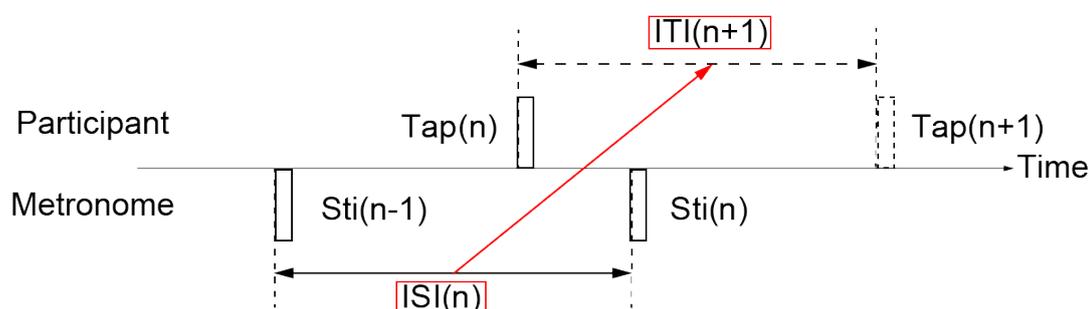


図 1.4 外界刺激の周期に合わせる戦略. 直前の刺激の周期が自身のタップ周期より長かった場合には, 次の自身のタップ周期を長くするために, 次は遅くタップしようとする. 逆に, 直前の刺激の周期が自身のタップ周期よりも短かった場合には, 次の自身の周期を短くするために, 次は早くタップしようとする.

1.3.2 外界の周期に合わせる戦略

つづいて, ISI に合わせる戦略とは, 外界刺激の周期に合わせて, 自身の次のタップ周期を決定することである [28]. 具体的には, 直前の刺激の周期が自身のタップ周期より長かった場合には, 次の自身のタップ周期を長くするために次は遅くタップしようとする (図 1.4). 逆に, 直前の刺激の周期が自身のタップ周期よりも短かった場合には, 次の自身の周期を短くするために, 次は早くタップしようとする戦略のことである. 1 周期ごとに刺激の周期が変化するメトロノームとの同期タッピング課題の先行研究において, 参加者は, 直前の刺激周期に合わせて, 自身のタップ周期を修正しようとする傾向がみられた [28, 44–47].

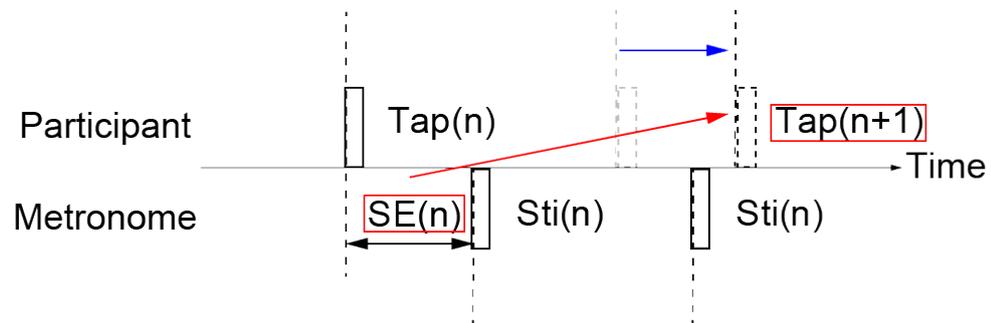


図 1.5 同期誤差を修正する戦略. 直前の自身のタップが外部刺激より早かった場合, 次の同期誤差が縮まるように, 次は遅くタップしようとする. 逆に, 自身のタップが外部刺激より遅かった場合には, 次の同期誤差が縮まるように次のタップを早くしようとする.

1.3.3 同期誤差を修正する戦略

最後に, 自身のタップタイミングと外界刺激のタイミングとの間の同期誤差 (SE) を修正する戦略とは, 直前の同期誤差を修正するように次のタップ時刻を修正することである [44]. 具体的には, 直前の自身のタップが外部刺激より早かった場合, 次の同期誤差が縮まるように次は遅くタップしようとする (図 1.5). 逆に, 自身のタップが外部刺激より遅かった場合には, 次の同期誤差が縮まるように次のタップを早くしようとする戦略のことである. 等間隔で鳴るメトロノーム刺激に対する同期課題において, 1 回だけメトロノーム音を早くもしくは遅く鳴らすと, 参加者は, 直前の同期誤差を修正するように, 次のタップ時刻を修正する傾向がみられる [37, 44, 48–54].

1.4 戦略のテンポ依存性

これらの戦略は、周期の平均であるテンポに依存して変化すること、つまり戦略にはテンポ依存性があることが知られている。まず、自身の周期を維持する戦略に関して、テンポが 1,000ms を超える遅いメトロノームを用いた継続課題において、周期の変化が加速と減速の両方の方向で激しくなる傾向を見せた [33]。先に述べたように、継続課題とは、最初にメトロノーム音を一定テンポで提示し、参加者はメトロノームが停止した後、提示されたメトロノームの周期を維持するように、外部刺激が提示されない条件で指タップを行うよう指示された。条件として、メトロノームの周期を 400ms から 2,200ms までに設定された。その結果、周期の条件が 1,000ms を超える条件において、周期を維持するために長い周期と短い周期を交互に出す戦略が見られなくなり、参加者はテンポの維持が困難になりはじめ、周期が長くなるか短くなるかのどちらかの方向で変化し続ける傾向を見せた。

つづいて、外部刺激の周期に合わせる戦略に関して、文章を読みながらタッピングを行う同期課題を 1,800ms を超える遅いテンポで行ったとき、外部刺激の周期に合わせてタップする事に失敗しやすくなる傾向が報告されている [36]。この先行研究においては、参加者には、一定テンポで提示されるメトロノームからの聴覚刺激と自身のタップを同期させる同期指タッピング課題を行った。その際、タッピング中に文章を読む二重課題を含む条件と、タッピングだけを行う二重課題を含まない条件の二条件が設定された。また、メトロノーム周期の条件は、450ms から 6,000ms までの条件が設定された。その結果、周期が 1,800ms よりも上回る遅いテンポの条件において、参加者は二重課題を含まない条件ではメトロノームの周期に合わせることに成功したが、二重課題を含む条件においては周期に合わせることに失敗し、聴覚刺激が提示されたことに気づいてからタップを行う回数が有意に大きくなった。つまり、二重課題を課され、注意などの認知資源が他の課題に逸らされると、遅いテンポでの同期課題が失敗し

やすいことを示している。一方で、周期が 1,800ms よりも短い、早いテンポにおいては、二重課題を含む条件においても、メトロノームの周期に合わせることに成功しており、意識的な注意などがなくとも同期が可能であることを示している。このことより、周期が 1,800ms 前後のテンポを境に、速いテンポでは無意識的に周期を合わせる事が可能だが、遅いテンポでは外界の周期に対して意識的に合わせる必要があることが考察されている。また、周期が 3,600ms を超える非常に遅いテンポ条件においては、二重課題を含まない条件においても、周期に合わせることに失敗する傾向が見られ、人間がリズム協調を行うことができるテンポの限界が存在することを示している。この先行研究や他の先行研究 [55, 56] より、一般的に、同期タッピングにおけるメトロノーム周期の上限は、1,800ms であると考察がされている [1]。

最後に、自身と外界との間の同期誤差を修正する戦略に関して、メトロノームのテンポが遅い程、同じ大きさの同期誤差に対して、次の自身のタップ時刻を修正する割合である、タップ周期の変化量が大きくなる傾向を見せる [37]。この先行研究では、途中で刺激のタイミングが変化するメトロノームとの同期タッピング課題が行われた。参加者にはメトロノームからの聴覚刺激が一定テンポで提示され、その聴覚刺激と同期するようにタッピングを行うことが指示された。さらに、意図的にある同期誤差を発生させる目的で、1 回だけ基準の周期と比べて、一定割合だけ変化した周期でメトロノーム刺激が提示された。この 1 周期分だけ周期が変化することを、位相変化 (Phase shift) と呼ぶ [50]。そして、周期が変化したメトロノームに対して参加者どのように合わせるのかを観察し、参加者が発生した同期誤差の大きさに対して、次のタップ時刻をどの程度修正しているかを推定された。また、基準となる周期は、400ms から、1,200ms までの条件が用いられた。その結果、基準となる周期が大きい程、つまり基準となるメトロノームのテンポが遅い程、同じ割合の位相変化に対して、より大きく次のタップ時刻を修正する、という傾向を見せた。

以上の先行研究は、人間のリズム協調の戦略についてテンポ依存性があ

ることを示している。しかしながら、これらの戦略のテンポ依存性はメトロノームを相手としたときの同期課題，もしくは，継続課題を用いて示されてきたものである。詳細は1.6節に置いて述べるが，メトロノームを用いた同期課題や継続課題と他者とのリズム協調には異なる特性があることが知られており，他者とのリズム協調においてはメトロノームとのそれとは異なる戦略が用いられることが知られている。しかしながら，人間同士のリズム協調の戦略のテンポ依存性については十分に調べられていない。そのため，二者間指タッピング課題を通して人間同士のリズム協調における戦略や特徴を調べる必要がある。

1.5 戦略のタイミング依存性

1.1 節に置いて述べたが、人間のリズム協調においては、必ずしも外部刺激に一致してタイミングが生成されるわけではなく、タイミングが外部刺激に先行したり、後行したりする。先行後行の役割分担を作ることがある。例えば、弦楽四重奏において、第一バイオリンとチェロを担当する演奏者が音を出すタイミングが先行して、第二バイオリンとビオラがそのあとに続くという先行後行の役割り分担を作る傾向がみられる [10]。また、メトロノームとの同期タッピング課題において、人間はメトロノームの刺激に数十 ms 程度、先行してタップする傾向がある [24, 25]。この現象は、負の非同期 (negative mean asynchrony; NMA) と呼ばれている [1, 2]。一般的に、人間は NMA の存在に気づかないといわれており、メトロノームとの同期タッピングにおいて、実際には参加者自身が先行しているのにも関わらず、参加者は、完全に同期ができていたと判断していたという先行研究が存在する [57]。また、NMA の度合はプロフェッショナルとして音楽の訓練を受けている者では減少させることができるという先行研究 [38] がある一方、訓練を受けている人と訓練を受けていない人との間で NMA の度合は変わらないという先行研究 [39] も存在する。少なくとも、音楽の訓練を受けていない人間にとって、この自身の運動が外部刺激より数十 ms 程度、先行してしまう傾向をなくすことは難しいと考えられる。

しかしながら、このようなタイミングにおける先行、後行という役割分担が他者との基本的なリズム協調においても現れるのかはいまだ明らかではない。特に、プロとして訓練を受けた音楽家でないものであっても、他者とのリズム協調においてタイミングに関する役割分担を生成するかどうかは調査されていない。加えて、もし先行後行という役割分担が発生する場合、その役割分担によって戦略が変化するのか、つまり、戦略のタイミング依存性が存在するかも本研究の問いである。

1.6 二者間リズム協調における戦略と特徴

人間同士の二者間リズム協調では、一人でのテンポ維持を行う継続課題やメトロノーム相手のリズム同期課題とは異なる特徴を見せるため、人間同士のリズム協調における戦略を調べる事は人間のリズム協調を調べるために重要であると考えられる [13–15, 58–60]. 例えば、一人のときの継続課題より、二人で継続課題を行ったときの方がよりテンポが加速する傾向が示されている [14]. そのために、二者間同期継続指タッピング実験課題が用いられてきている [13, 14, 59]. この実験課題では、まず、二名の参加者は同時にメトロノームからの聴覚刺激を受け取り、その刺激に同期するように指タップを行う。続いて、メトロノームが停止した後は、両参加者は互いにパートナーのタップタイミングで聴覚刺激を受け取る。そして、両参加者は最初に聞かされたメトロノームのテンポの維持をパートナーとのタップタイミングを同期させながら行う。

この二者間同期継続指タッピング課題によって、人間同士の二者間リズム協調はメトロノーム相手の同期は異なる特徴を見せることが示されてきた。例えば、お互いがお互いの直前の ITI に合わせるように自身のテンポを決定している傾向を見せた。このお互いに相手に依存している現象は、ITI というタップ周期についてお互いが相手のフォローになっていることからハイパーフォローと名付けられている。一方で、二者間リズム協調では、周期依存性については異なる戦略が取られる場合があることも示されている。二者間の同期継続指タッピング課題において、メトロノームのインターバルを維持するリーダーとそのリーダーの周期に自身の周期を合わせるフォローに分かれる、テンポのリーダーフォローの役割分担が見られている [59].

しかし、二者間リズム協調において、リズム協調を達成させるための戦略については十分に調べられていない。まず、一人でのタッピングで見られた、三つの戦略のテンポ依存性 [33, 36, 37] について、二者間リズム協調では調べられていなかった。続いて、二者間リズム協調において動作のタ

イミングの先行後行の役割分担 [10] と戦略との関係について、つまり戦略のタイミング依存性についても調べられていない。そもそも、二者間のリズム協調において動作のタイミングが先になる先行側と後になる後行がわに分かれる、先行後行の役割分担が行われるか明らかでない。

1.7 研究目的

本研究の目的は、二者間リズム協調において、人間はテンポやタイミングに依存して運動タイミングの制御の戦略を変化させるのか、また、その場合はどのように変化させるのかを明らかにすることである。具体的には、第一に、二者間リズム協調において、人間は平均テンポに依存して戦略を変化させるのかを明らかにする。第二に、二者間リズム協調において、人間はタイミングの先行後行の役割に依存して制御戦略を変化させるのか明らかにする。

そのため、実験1では、戦略のテンポ依存性を明らかにするために、異なるメトロノームテンポ条件を用いて二者間同期継続指タッピング実験を行い、それぞれのテンポ条件における ITI を維持する戦略、ISI に合わせる戦略、SE を修正する戦略の三つ戦略の度合を推定する。

実験2では、戦略のタイミング依存性を調べるために、まず、二者間の同期連続指タッピング課題において、タップのタイミングが先になる先行側と後になる後行側とに分かれるかどうかを明らかにする。つまり、タイミングの先行後行の役割分担を行うのかを調べる。加えて、先行後行の役割ごとに戦略が異なるかを調べる。

1.8 本論文の構成

本論文は、図 1.6 に示すように、緒論、第 2 章として二者間リズム協調における戦略のテンポ依存性を調べる実験 1、第 3 章として二者間リズム協調における戦略のタイミング依存性を調べる実験 2、総合考察、結論、展望の 6 章から構成されている。緒論は本章の事を指し、リズム協調における戦略に関する背景、先行研究と課題点、そして目的を記す内容であった。第 2 章では、実験 1、戦略のテンポ依存性を調べるために行った実験について、緒言、手法、結果、考察、結言を記す。第 3 章では、実験 2、戦略のタイミング依存性を調べるために行った実験について、緒言、手法、結果、考察、結言を述べる。総合考察では、リズム協調に関する戦略の変化や、役割分担及び戦略の変化が発生する原因についての考察を、実験 1、実験 2 の両方の結果を踏まえた総合的な考察を行う。

結論では、本研究の目的に対する結論をのべる。展望では、本研究の制限や結果を深堀するための今後の課題や、本研究の結果を別の分野に応用することができる可能性など、この研究が、新たな研究の起点となる可能性を記す。

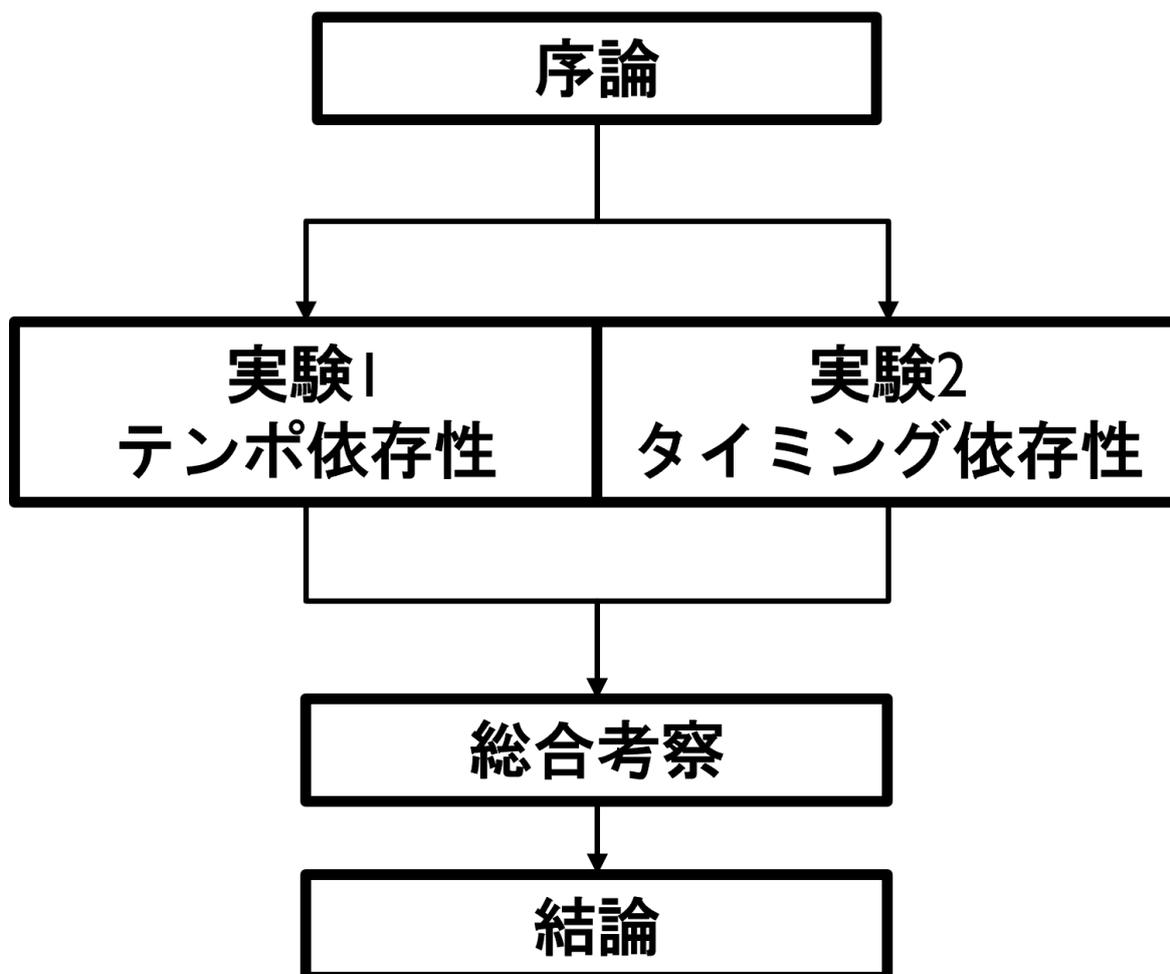


図 1.6 本論文の構成・緒論. 第 2 章として二者間リズム協調における戦略のテンポ依存性を調べる実験 1, 第 3 章として二者間リズム協調における戦略のタイミング依存性を調べる実験 2, 総合考察, 結論, 展望の 6 章から構成されている

第2章

実験1・二者間リズム協調戦略のテンポ依存性

2.1 緒言

本章では二者間リズム協調における戦略のテンポ依存性を明らかにすることを目的とした実験1について述べる。より具体的には、実験1の目的は二者間リズム協調において、人間は平均テンポに依存して戦略を変化させるのかを調べることであった。そのため、異なるメトロノームテンポ条件を用いて二者間同期継続指タッピング実験を行った。また、各条件におけるITIを維持する戦略、ISIに合わせる戦略、および、SEを修正する戦略の三つ戦略の度合を推定した。

2.2 実験手法

2.2.1 実験参加者

24名12組(男性ペア10組, 女性ペア2組, 21~31歳)の参加者が実験に参加した。全参加者は右利きであった。全参加者は聴覚および運動に関する障害は見られなかった。参加者はプロフェッショナルな音楽訓練の経験はなかった。この実験はヘルシンキ宣言に従って実施され, 東京工業大学の研究倫理審査委員会によって承認された。また, 参加者から書面によるインフォームドコンセントを得てから実験を行った。

2.2.2 実験装置と刺激

同期 継続タッピング課題における実験装置の設定の概要は図 2.1 の通りである。参加者のタップを検知するために、圧力センサ (FSR-406, Interlink Electronics, US) を用いたタッピング装置 (図 2.2) が用いられた。メトロノームおよびパートナからの聴覚刺激は、マイクロコンピュータ (Arduino Mega2560 Rev3, Arduino, US, 図 2.3) によって生成された、100ms の長さの 500Hz の矩形波としてイヤホン (SHE3010WT, PHILIPS, Nerderland) を経由して参加者に提示された。外部の雑音の影響を防ぐ目的で、ホワイトノイズが PC (Latitude7280, DELL, US) からヘッドホン (HPH-50B, YAMAHA, Japan) を経由して、イヤホンの外側から参加者に提示された。マイクロコンピュータ (Arduino Mega2560 Rev3, Arduino, US) によって実験課題及び聴覚刺激の制御およびタップ時刻の記録が行われた。マイクロコンピュータによる刺激の制御およびタップの記録は 1,000Hz で制御された。

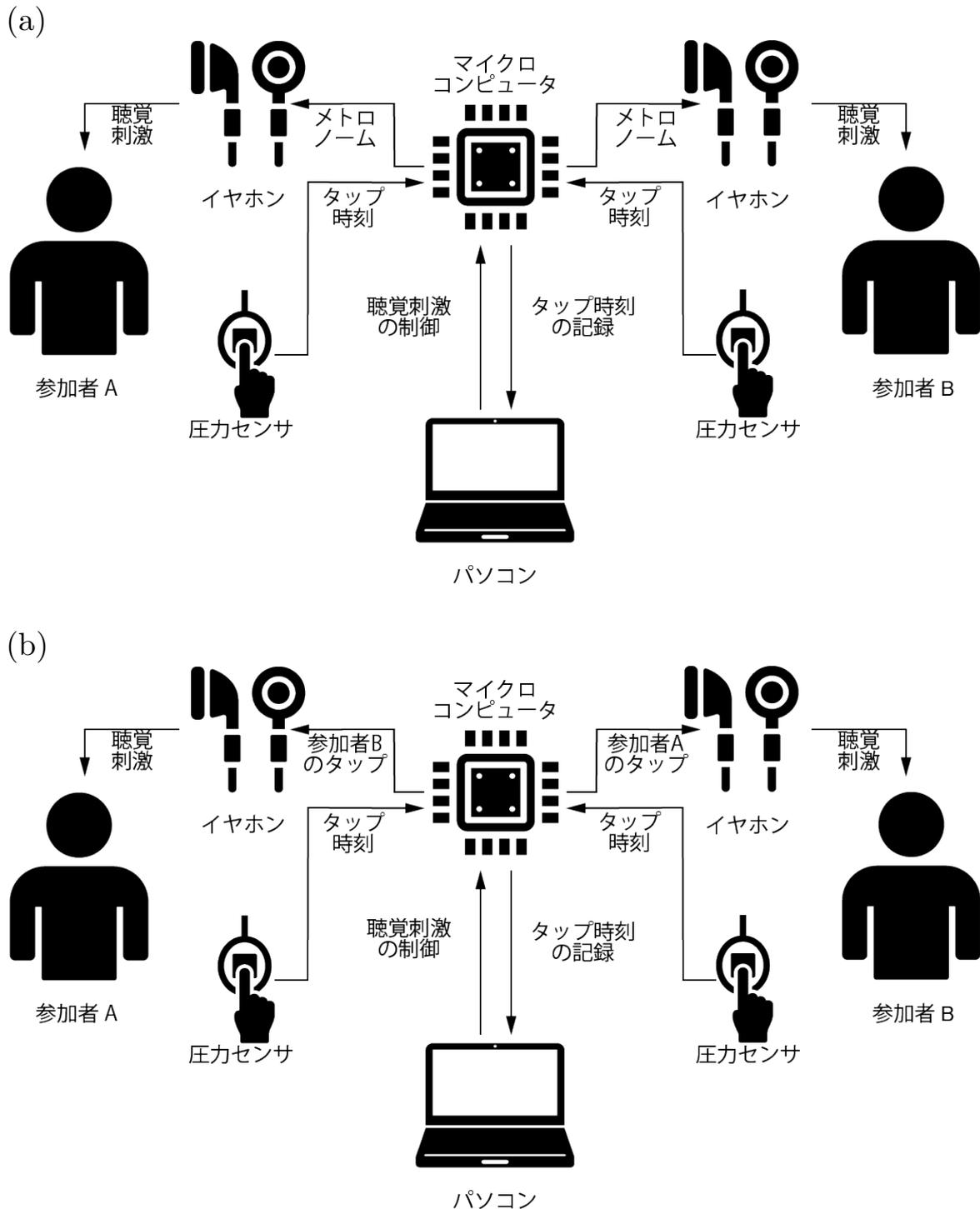


図 2.1 同期継続課題における実験装置の図. (a) 同期フェイズにおいては、マイクロコンピュータから、メトロノームの聴覚刺激がイヤホンを経由して両参加者 A,B に提示された. (b) 継続フェイズにおいては、圧力センサを経由して参加者 A のタップをマイクロコンピュータが検知したとき、マイクロコンピュータはイヤホン経由で参加者 B に聴覚刺激を提示した. 同様に、参加者 B がタップしたときには、参加者 A に聴覚刺激が提示された.

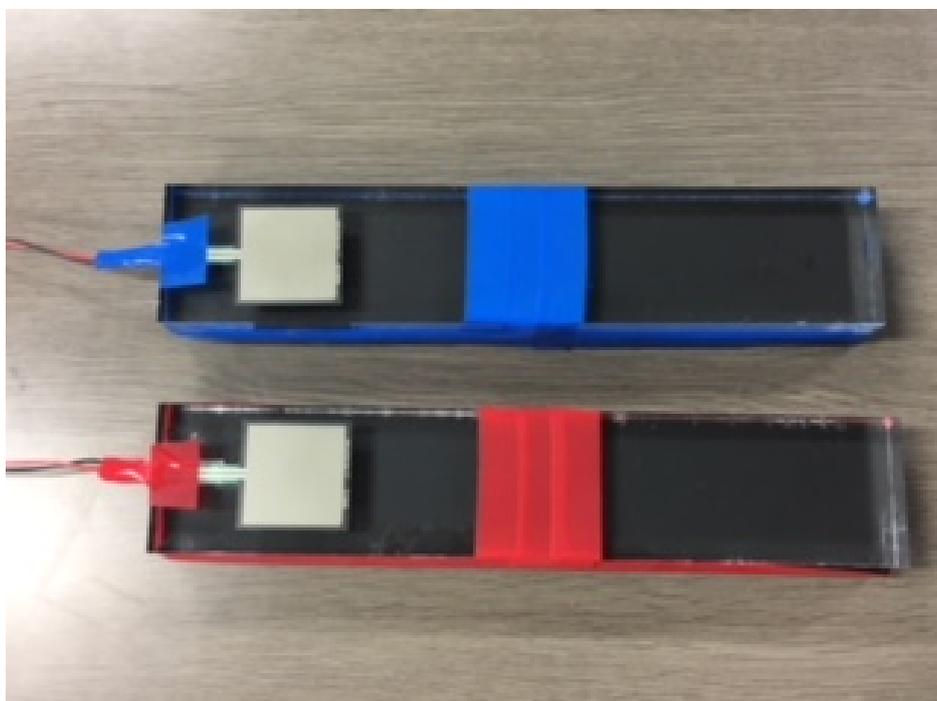


図 2.2 圧力センサを使用したタッピング装置. センサをタップすることで, 圧力を検知することができる.

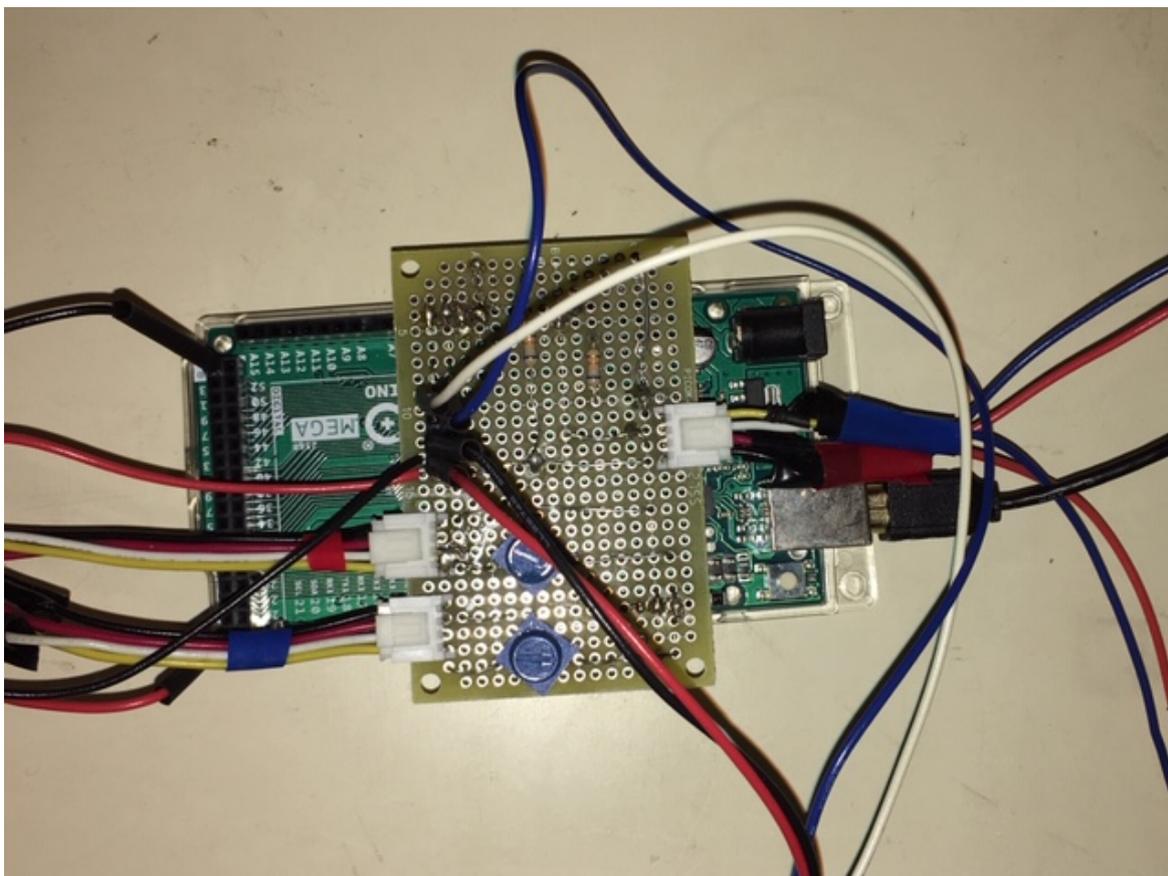


図 2.3 実験で使ったマイクロコンピュータ。基盤経由で、タッピング装置とイヤホンを接続した。

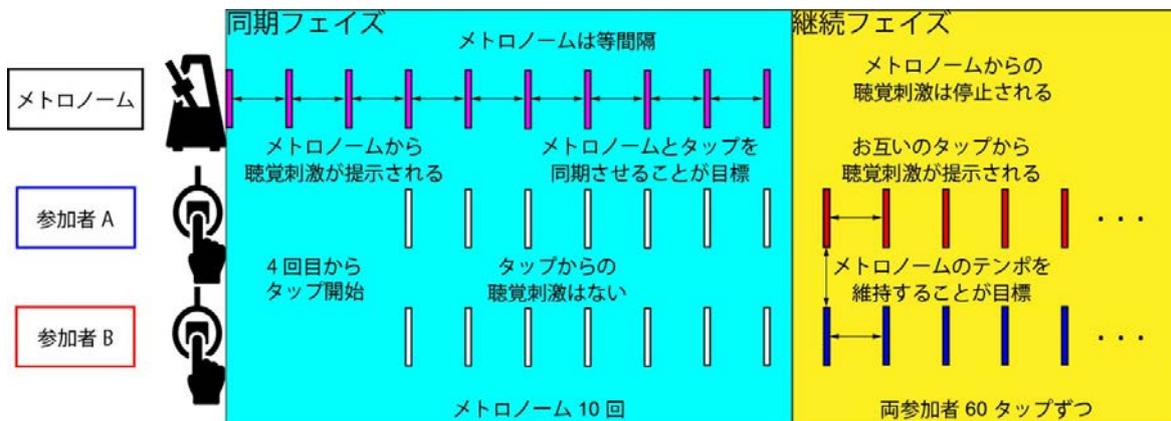


図 2.4 実験 1 における同期継続タッピング課題。

2.2.3 実験課題

実験課題には、二者間同期継続タッピング課題を用いた。この二者間同期継続タッピング課題は、図 2.4 に示す、同期フェイズと継続フェイズから構成された。最初の同期フェイズでは、両参加者に 10 回の等間隔のメトロノームからの聴覚刺激が提示された。両参加者は 4 回目の聴覚刺激から、タップがメトロノームからの刺激と同期するようにタッピングを開始した。同期フェイズの間は、参加者のタップは聴覚刺激として自身にもパートナーとなる参加者にも提示されなかった。メトロノームの提示が終了した後、課題は継続フェイズに途切れなく移行した。継続フェイズでは、参加者はメトロノームのテンポを維持するようにタッピングを継続した。また、継続フェイズでは、お互いがセンサをタップしたとき、そのタップタイミングでパートナーに聴覚刺激が提示された。一方で、自身のタップは聴覚刺激として提示されなかった。継続フェイズで、両参加者のタップが 60 回ずつ記録された時点で、実験課題の 1 試行は終了となった。

戦略のテンポ依存性を調べるために、同期フェイズに提示されるメトロノームのテンポ条件は、700ms, 1,200ms, 1,700ms, 2,200ms, 2,700ms, 3,200ms の 6 条件が設定された。人間は連続的の刺激を、全体的または主観的な時間的ゲシュタルトとして知覚する [61]。この「Feeling of nowness」

[62] の限界は、平均で 2~3 秒程度といわれている [61, 63–68]. 実際、指タッピングを使用した等間隔メトロノームとの同期において、メトロノームのテンポが 3,600ms より遅い場合には、負の非同期である NMA が消失し、タップタイミングが刺激よりも遅くなる傾向を示した [36]. この結果は、3,600ms を超える条件では、参加者はメトロノームにリズムカルに同期せず、各刺激に直接反応していることを示唆している. したがって、最大テンポを 3,200ms とした.

2.2.4 実験手続き

この実験は、図 2.5 に示す防音室の中で行われた。参加者らはお互いに背中合わせで机に着席した。実験試行中は、参加者はアイマスクを着用し、ヘッドホン経由でホワイトノイズを聞いた。聴覚刺激とホワイトノイズの音量は、ホワイトノイズによりタップ時の打撃音などの外界刺激が十分に遮断されるが、課題のための聴覚刺激が十分に聞こえるように参加者ごとに調整された。それらの音量は実験中一定であった。参加者には利き手人差し指でタップするよう指示した（図 2.6）。すべての参加者には、「メトロノームが止まったら、メトロノームのテンポを維持するよう引き続きタッピングを行ってください。メトロノームはいくつかのテンポを準備しています。試行ごとに最初のメトロノームのテンポを維持してください。」という教示を、実験者が紙に書かれた教示を読み上げる形で伝えられた。実験は、4 セッションで構成され、1 セッションは、各テンポ条件が 1 試行ずつ含まれる計 6 試行で構成された。つまり、1 ペアにつき 1 テンポ条件を 4 試行、合計 24 試行が行われた。テンポ条件の順番は、セッション内でランダム化され、ペア間でカウンターバランスがとられた。また、練習試行は、各条件最低 1 試行ずつ行われた。実験時間は、休憩時間を含めて約 4 時間であった。1 分以上の休憩時間が試行間で確保された。それに加えて、20 分（4~6 試行）ごとに、5 分の休憩時間が確保された。さらに、参加者が休憩を求めた場合には、追加で休憩時間が確保された。



図 2.5 実験 1 における実験風景. 外部雑音の影響を抑えるために, 防音室の中で実験課題を行った. 視覚刺激を遮断するためにアイマスクを装着させた. 聴覚刺激を提示するためのイヤホンの上から, ホワイトノイズが流れるヘッドホン装着した.



図 2.6 実験中の参加者の状態. 右手でタッピング装置を持ち, 右手人差し指でボタンをタップした.

2.2.5 分析手法

参加者は参加者 A と参加者 B にランダムに分けられた。参加者 A の n 回目のタップ時刻を $Tap_A(n)$ ，参加者 B の n 回目のタップ時刻を $Tap_B(n)$ ，と定義し，以下の式のように参加者の n 番目のタップ周期 $ITI_i(n)$ ， n 番目の同期誤差 $SE_{ij}(n)$ ，参加者の n 番目のタップにおける周期の変化量 $\delta ITI_i(n)$ を定義した。（ただし， i, j について， $(i, j) = (A, B) \text{ or } (B, A)$ であり，参加者の別を意味している。）

$$ITI_i(n) = Tap_i(n) - Tap_i(n - 1), \quad (2.1)$$

$$SE_{ij}(n) = Tap_i(n) - Tap_j(n), \quad (2.2)$$

$$\delta ITI_i(n) = ITI_i(n - 1), \quad (2.3)$$

参加者が用いた戦略の度合いを調べる目的で，直前の 3 種類の時間情報である，先行研究で統計的に示された，3 つの説明変数から構成された，重回帰モデルを提案した。1 つ目の説明変数は，メトロノームからの刺激提示がなくなった状態で開始時に提示されたテンポを維持する継続課題において，長い周期と短い周期を交互に出す傾向があったという先行研究 [30] より示された，自身のタップ周期 $ITI_i(n - 1)$ である。2 つ目の説明変数は，メトロノームの刺激とタップを同期させる同期課題において，提示される刺激の周期に合わせて，自身の次の周期を決定する傾向があるという先行研究 [28] より示された，相手のタップ周期 $ITI_j(n - 1)$ である。3 つ目の説明変数は，メトロノームの刺激とタップを同期させる同期課題において，直前の同期誤差を修正するように次のタップ時刻を修正する傾向があるという先行研究 [44] より示された，同期誤差 $SE_{ij}(n - 1)$ である。上記の 3 つの説明変数の線形和として，各戦略がタップ時刻を早くするか遅くするかを調べるために，モデルを従属変数を周期の変化量 $\delta ITI(n)$ に設定した線形モデルを仮定した。

$$\delta ITI_i(n) = \alpha ITI_i(n - 1) + \beta ITI_j(n - 1) + \gamma SE_{ij}(n - 1), \quad (2.4)$$

上の重回帰モデルの式の係数にあたる，パラメータ α ， β ， γ は，それぞれ

れ自身の周期を維持する戦略の度合、相手の周期に合わせる戦略の度合、同期誤差を修正する戦略の度合を示している。各パラメータは、試行ごと、参加者ごとに算出された。パラメータを算出するにあたり、数値の大きさの違いを考慮して、周期と同期誤差が戦略に影響する度合を考慮できるように、説明変数にあたるタップ周期 ITI と同期誤差 SE の分布を平均が 0、標準偏差が 1 になるように標準化を行ったうえで、重回帰分析を実施した。変数に対するモデルフィット率 (R^2) をテストするために、説明変数に対する ANOVA を実施した。有意水準を 0.05 に設定した。Holm-Bonferroni 法を使用して試験間の有意水準を変更した。次に、各試行のパラメータ α 、 β 、 γ と平均 ITI との間のピアソンの相関係数を計算した。相関係数は無相関検定により検定した。重回帰、 R^2 検定、および相関分析は、MATLAB (Math Works、US) を使用して実行された。ANOVA と多重比較は、R (バージョン 3.5) を使用して実行された。統計解析には、メトロノームが停止してから 21 回目から 60 回目までの 40 回のタップデータを使用した。各参加者の 24 試験からのすべてのデータが統計分析に使用された ($n = 576$)。また、重回帰分析を行うためには、各説明変数が独立している必要がある。そのため、全試行に対して、VIF (分散拡大係数) の指標を用いて、多重共線性が存在しない、つまり各説明変数が十分に独立しているかどうかを調べた。VIF は以下の式で計算でき、VIF が 10 以上の場合、共線性が認められる、つまりその変数はほかの説明変数に依存している可能性がある」と判断できる。

$$VIF = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (2.5)$$

ただし、 R_i は各説明変数を他の説明変数で回帰した式の決定係数であり、回帰式の推定値を $f_i(n)$ 、推定値の平均を \bar{f}_i 、測定値を $y_i(n)$ 、測定値の平均を \bar{y}_i とすると、以下のように求められる。

$$R_i^2 = \frac{\sum_n (f_i(n) - \bar{f}_i)^2}{\sum_n (y_i(n) - \bar{y}_i)^2} \quad (2.6)$$

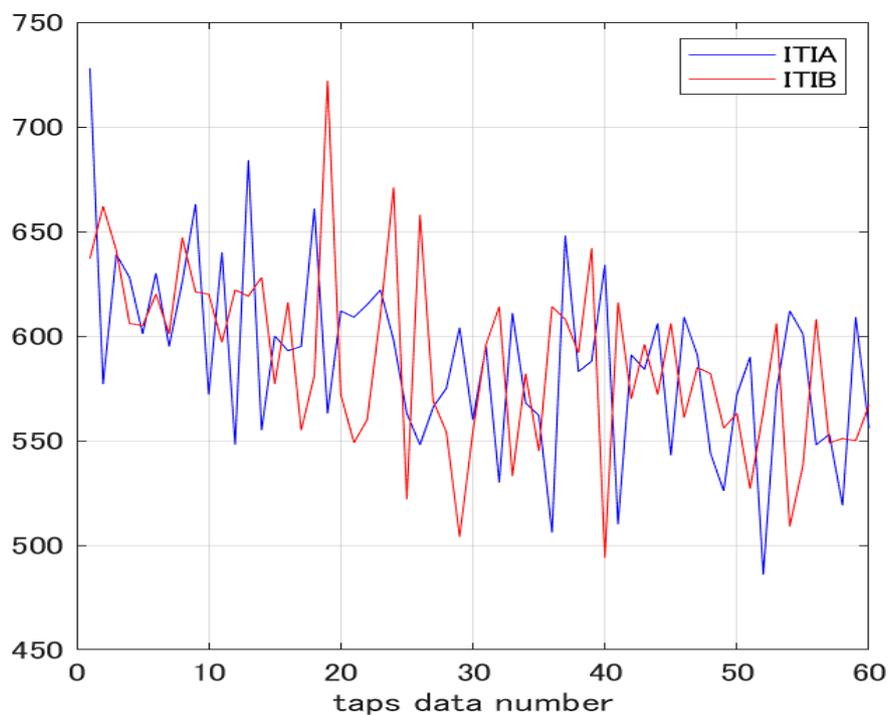


図 2.7 実験 1 の代表的な試行における ITI の推移の図 (700ms テンポ条件).

2.3 結果

2.3.1 平均テンポの特徴

図 2.7, 2.8, 2.9 は, テンポ条件ごとの代表的な試行における, 試行内の各参加者 ITI の推移を示している. 図より, 参加者のタッピングの平均テンポは, メトロノームのテンポより, 速くなっている傾向が見られた.

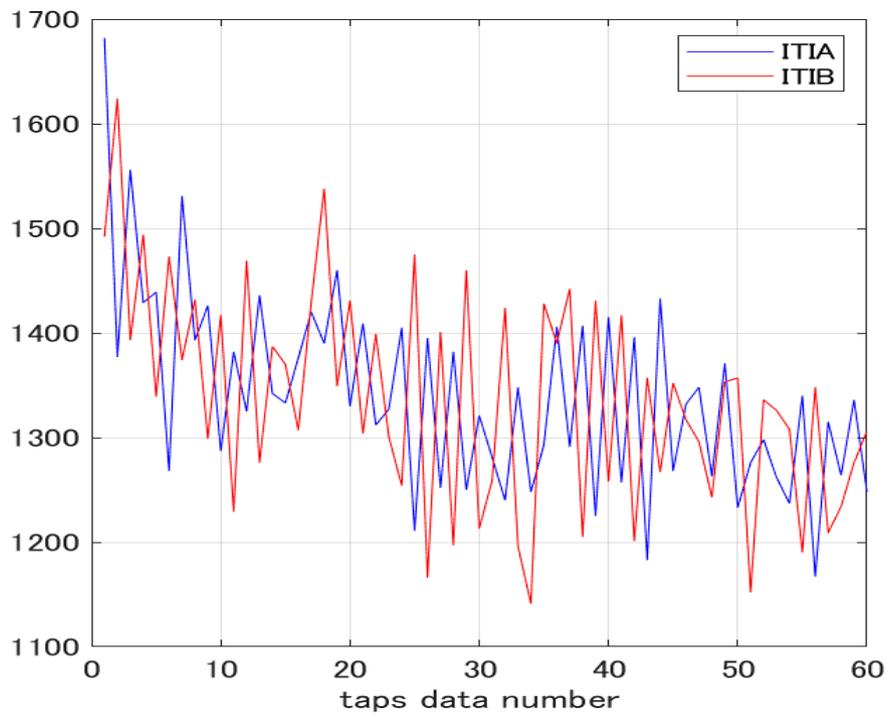


図 2.8 実験1の代表的な試行における ITI の推移の図 (1,700ms テンポ条件).

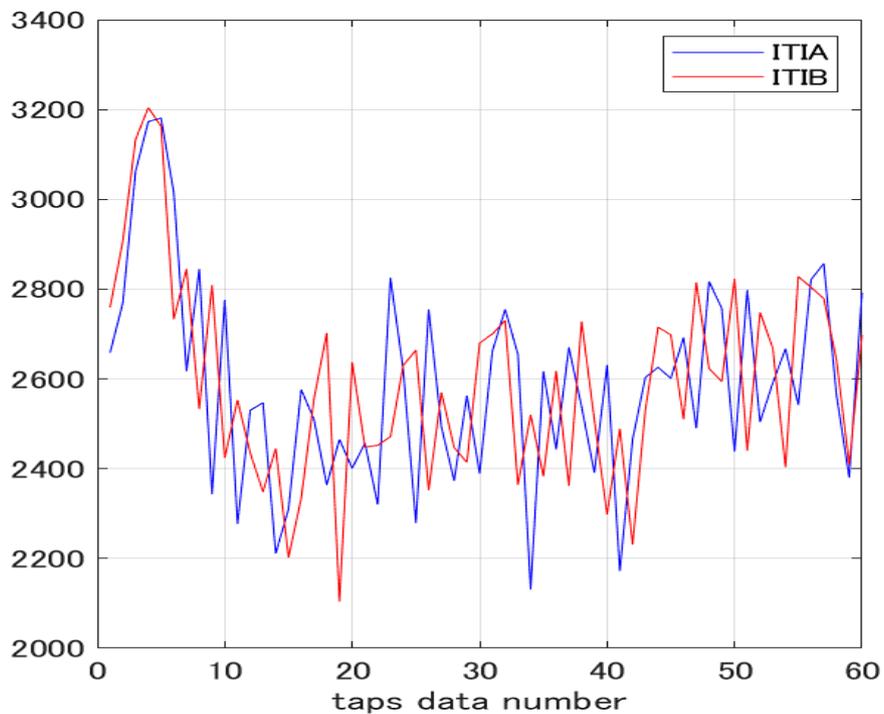


図 2.9 実験1の代表的な試行における ITI の推移の図 (2,700ms テンポ条件).

Okano らは、メトロノームのテンポ条件が 300ms, 500ms, 800ms で同期継続タッピング実験課題を行ったとき、平均 ITI が徐々に減少していく傾向を示した [14]. そのため、本実験では、より遅いテンポ条件で同期継続タッピング実験課題を行ったときにも、平均 ITI が変化するかを調べた. 図 2.10 は、試行ごとのメトロノームのテンポと平均 ITI の散布図を示す. その結果、平均テンポはどの条件においてもメトロノームのテンポと比較して速くなる傾向を示した. また、試行ごとに平均テンポが異なることも示された. そのため、以下の解析ではメトロノームのテンポではなく、各試行における平均 ITI を平均テンポの指標として用いた.

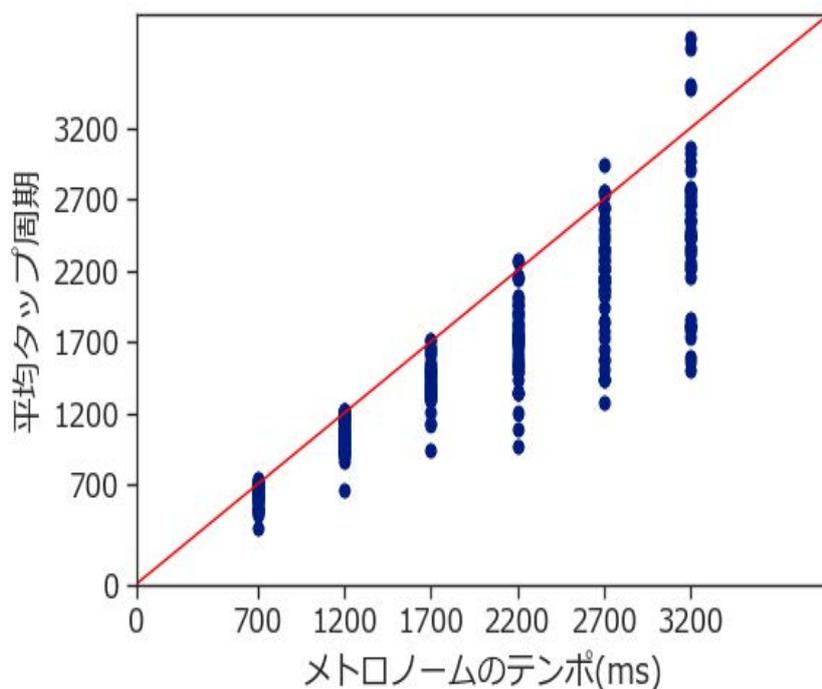


図 2.10 条件間の平均テンポ（試行ごとの周期の平均）。縦軸は平均テンポ（平均 ITI）を示し、横軸はメトロノームのテンポ条件を示す。青点は試行ごとのデータを示す。赤線は、平均テンポとメトロノームのテンポが等しいときの指標を示し、ある試行においてテンポメトロノームのテンポを正確に維持できた時は、青点と赤線が重なり、平均テンポがメトロノームより速くなった場合は、青点は赤線の下に、遅くなった場合には青点は赤線の上に配置される。この図より、試行ごとに平均テンポが異なることと、多くの試行において、平均テンポはメトロノームのテンポより速くなったことがわかる。

表 2.1 重回帰モデル $\delta ITI_i(n) = \alpha ITI_i(n-1) + \beta ITI_j(n-1) + \gamma SE_{ij}(n-1)$ の説明変数である，自身の周期 ITI_i ，相手の周期 ITI_j ，同期誤差 SE_{ij} に対して，変数間の多重共線性 VIF（分散拡大係数）を調べる目的で，重回帰分析を行った結果．VIF は $VIF = 1/(1 - R_i^2)$ でもとめられ（ R_i 各説明変数を他の説明変数で回帰した場合の決定係数），VIF が 10 以上の場合，多重共線性が認められ，つまり，その説明変数はほかの説明変数に依存しており，重回帰分析を行うことができないことを示す．

説明変数	最大値	平均値	標準偏差
自身の周期 ITI_i	7.03	2.39	1.23
相手の周期 ITI_j	9.04	2.28	1.13
同期誤差 SE_{ij}	7.41	2.85	1.04

2.3.2 戦略のテンポ依存性

表 2.1 は，変数間の多重共線性を調べる目的で，すべての試行の各説明変数に対して，VIF の計算を行った結果である．おいて VIF は 10 を下回っていた．そのため，すべての試行において，各説明変数は十分に独立しており，重回帰分析を行うことができると判断した．

各試行における重回帰モデルがデータに一致していることを示すため，説明変数を要因とした， R^2 値の ANOVA を行った．その結果，すべての試行のすべての説明変数において p 値は有意水準（0.05）を下回る値であった．つまり，モデルは十分にデータにフィットしていたといえる．

表 2.2 は，自身の周期を維持する戦略の度合を示すパラメータ α ，相手の周期に合わせる戦略の度合を示すパラメータ β ，同期誤差を修正する戦略の度合を示すパラメータ γ と，平均テンポを示す平均 ITI との相関関係を分析した結果である．以下では，それぞれのパラメータについての詳細な結果を述べる．

表 2.2 自身の周期を維持する戦略の度合を示すパラメータ α ，相手の周期に合わせる戦略の度合を示すパラメータ β ，同期誤差を修正する戦略の度合を示すパラメータ γ と平均テンポ（試行ごとの周期の平均）との間の相関分析の結果. パラメータ α ， β ， γ は，重回帰モデル $\delta ITI_i(n) = \alpha ITI_i(n-1) + \beta ITI_j(n-1) + \gamma SE_{ij}(n-1)$ の標準化重回帰係数である.

パラメータ (標準化重回帰係数)	相関係数 r	p 値
α	-0.014	0.734
β	0.238	<0.001
γ	0.021	0.615

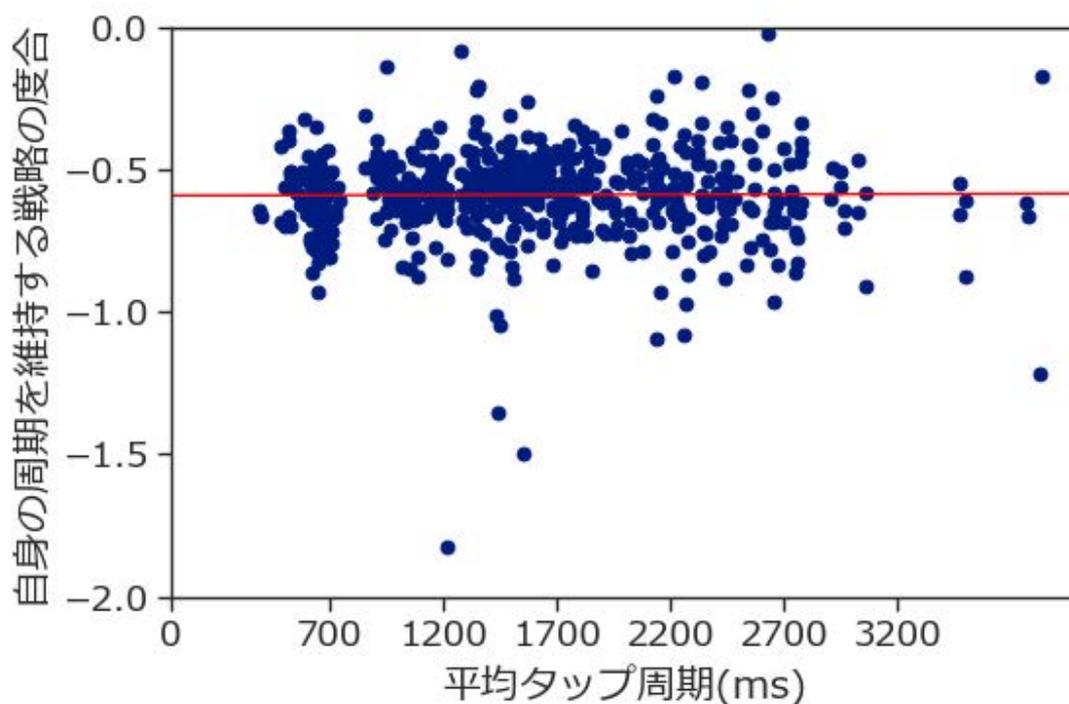


図 2.11 自身の周期を維持する戦略の度合を示すパラメータ α と平均テンポとの散布図. 縦軸は, 試行ごとのパラメータ α の値を示し, 横軸は試行中の平均タップ周期を示す. パラメータ α が負に大きい程, 自身の周期を維持する戦略の度合が強いことを示す. 青点は試行ごとのデータを示す. 赤線は, パラメータ α と平均テンポとの間の回帰直線を示す. パラメータ α と平均テンポとの間に有意な相関は見られなかった ($r = -0.014, p = 0.734$). そのため, 自身の周期を維持する戦略の度合は平均テンポに対して独立していると考えられる.

図 2.11 は, パラメータ α と平均 ITI の散布図である. パラメータ α の値は -1.0 から -0.4 までの範囲に収まる負の値であった. パラメータ α と平均タップ周期との有意な相関は見られなかった ($r = -0.014, p = 0.734$). この結果は, 自身の ITI を維持する戦略の度合はがテンポに対して独立していることを示す.

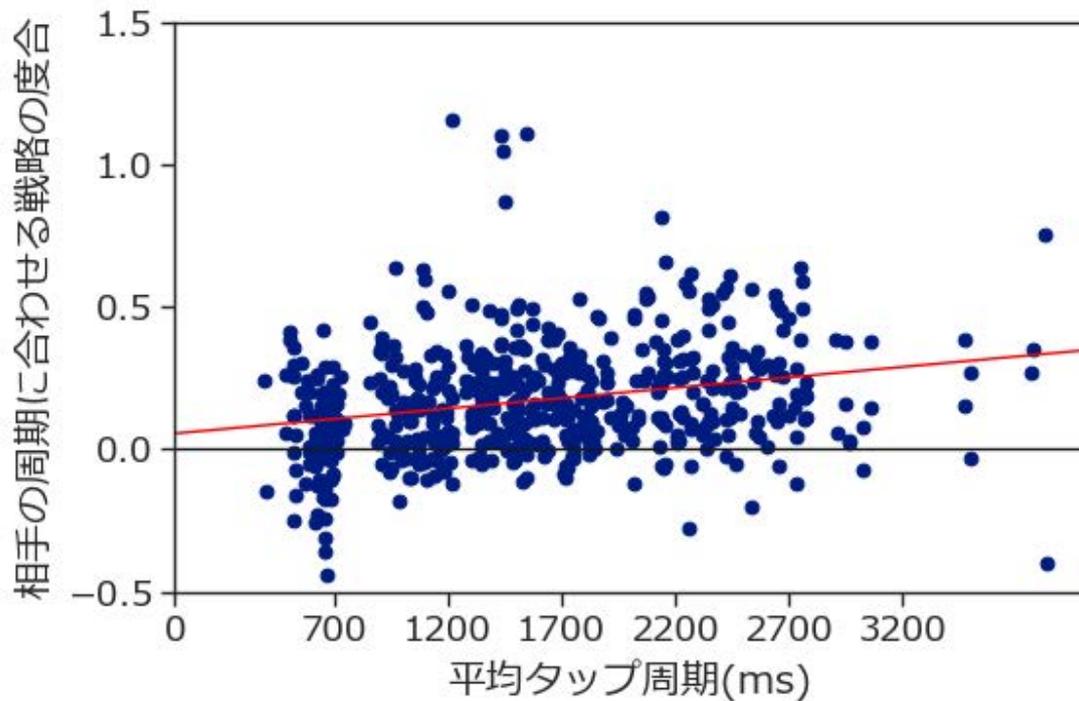


図 2.12 相手の周期に合わせる戦略の度合を示すパラメータ β と平均テンポの散布図. 縦軸は, 試行ごとのパラメータ β の値を示し, 横軸は試行中の平均タップ周期を示す. パラメータ β が正に大きい程, 相手の周期に合わせる戦略の度合が強いことを示す. 青点は試行ごとのデータを示す. 赤線は, パラメータ β と平均テンポとの間の回帰直線を示す. パラメータ β と平均テンポとの間に有意な正の相関が見られた ($r = 0.238, p < 0.001$). そのため, 相手の周期に合わせる戦略の度合は, 平均テンポが遅くなるほど大きくなると考えられる.

図 2.12 は, パラメータ β と平均 ITI の散布図である. ほとんどの試行において, パラメータ β の値は, -0.2 から 0.6 までの範囲に収まっていた. パラメータ β と平均 ITI との間に有意な正の相関が見られた ($r = 0.238, p < 0.001$). この結果は相手の ITI に合わせる戦略の度合はテンポが遅くなるほど強くなる傾向を示す.

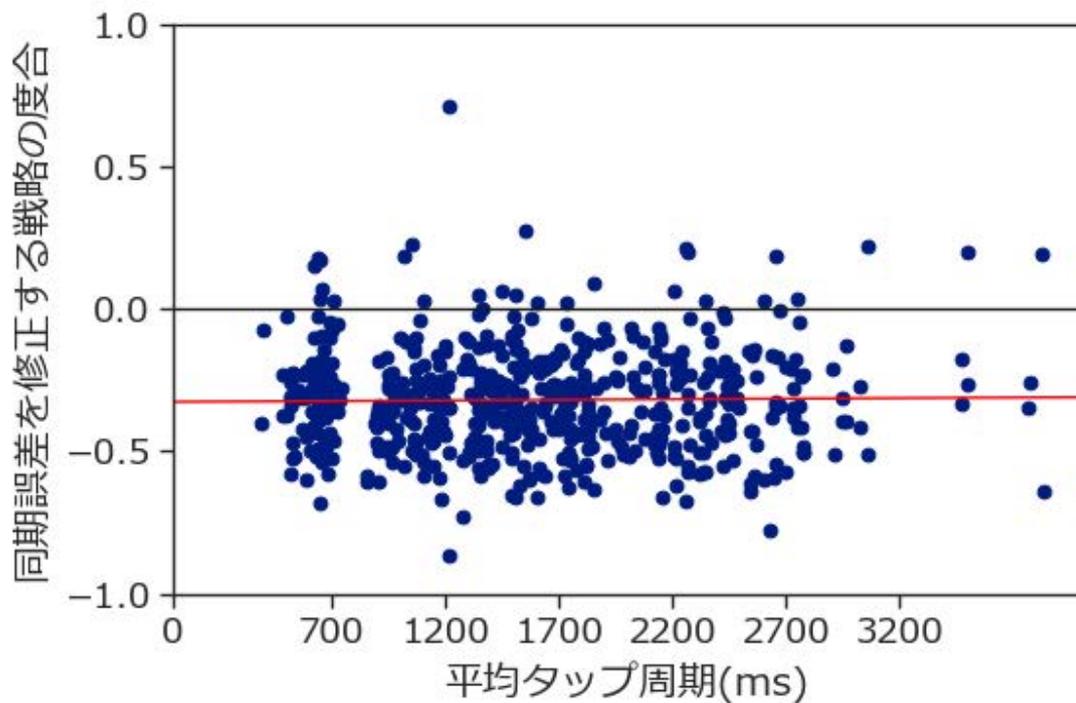


図 2.13 同期誤差を修正する戦略の度合を示すパラメータ γ と平均テンポとの散布図. 縦軸は, 試行ごとのパラメータ γ の値を示し, 横軸は試行中の平均タップ周期を示す. パラメータ γ が正に大きい程, 同期誤差を修正する戦略の度合が強いことを示す. 青点は試行ごとのデータを示す. 赤線は, パラメータ γ と平均テンポとの間の回帰直線を示す. パラメータ γ と平均テンポとの間に有意な相関は見られなかった ($r = 0.021, p = 0.615$). そのため, 同期誤差を修正する戦略の度合は平均テンポに対して独立していると考えられる.

図 2.13 は, パラメータ γ と平均 ITI の散布図である. ほとんどの試行において, パラメータ β の値は, -0.6 から 0 までの範囲に収まっていた. パラメータ γ と平均 ITI との間に有意な相関は見られなかった ($r = 0.021, p = 0.615$). SE を修正する戦略の度合はテンポに対して独立していることを示した.

2.4 考察

本実験の目的は、二者間リズム協調における戦略のテンポ依存性を明らかにすることであった。そのため、異なるメトロノームテンポ条件において二者間同期継続タッピング課題を実施した。そして、ITIを維持する戦略、相手のITIに合わせる戦略、自他のSEを修正する戦略の度合を重回帰分析によって試行ごとに推定し、戦略の度合いと平均テンポとの相関関係を求めた。その結果、自身のITIを維持する戦略は、テンポとは独立していること、パートナーのITIに合わせる戦略はテンポが遅くなるほど度合いが強くなること、SEを修正する戦略はテンポとは独立していることが明らかとなったつまり、二者間リズム協調における戦略は、パートナーのITIに合わせる戦略のみがテンポに依存することが示された。以下では、各戦略と平均テンポの関係についての考察とテンポの加速についての考察を行う。

2.4.1 自身の周期を維持する戦略のテンポ独立性

自身の周期を維持するための戦略の度合を示すパラメータの値は、-1.0から-0.4までの負の値であり、テンポとは独立していた。この値が負であることは、二者間リズム協調において、長い周期と短い周期を交互に出す傾向が続く傾向を示している。値がテンポから独立していることは、この傾向が、速いテンポにおいても遅いテンポにおいても変わらない度合で現れることを示している。速いメトロームテンポ（700ms以下）における単独での継続タッピング課題を行った先行研究において、ITI時系列に1次ラグの自己相関が発生することが分かっている [33]。つまり、人間は長いITIと短いITIを交互に出し、自身の周期を維持する。しかしながら、メトロームテンポが遅くなるにつれ、ITI時系列にトレンドが発生する。つまり、テンポが徐々に大きく、または、小さくなる傾向を持つことで、そのITI時系列の1次ラグの自己相関は失われる。これにより、テンポを維持する戦略が機能しなくなると考えられる [33]。だが、本実験においては、長いITIと短いITIを交互に出すという戦略はテンポが遅くなっても消失しなかった。つまり、遅いテンポでも自身の周期を維持する戦略が機能しなくなる傾向は見られなかった。よって、他者と協調しているとき、自身の周期を維持するために、長い周期と短い周期を交互に出す戦略はテンポが遅くなっても維持されるということが明らかとなった。このことは、二者間のリズム協調における戦略はメトロームへの同期のための戦略とは異なることを示しており、別に調査されるべきものであることを意味している。

2.4.2 相手の周期に合わせる戦略のテンポ依存性

相手の周期に合わせる戦略の度合は、テンポが遅くなるほど大きくなる傾向が明らかとなった。つまり、テンポが遅くなるほど、相手の周期に合わせる戦略の度合が大きくなった。Okanoらは、メトロノームのテンポが遅くなるほど、自身と相手のITIの差である周期誤差を参照する戦略の度合が大きくなる傾向を示している [14]。本研究の実験結果より、Okanoらの結果における周期誤差を用いた自身のITIの修正度合いのテンポ依存性は、自身の周期ではなく、相手の周期を参照する戦略のテンポ依存性によって生じたと考えられる。

相手の周期に合わせる戦略の度合を示すパラメータ β は、500ms程度から1,500ms程度の範囲で0.12程度から0.21程度に変化している。この値はほかのパラメータ α や γ よりも小さな値である。しかしながら、相手の周期が説明変数になり得ることは、過去の先行研究によって統計的に示されたものであり、相手の周期は自身の周期や同期誤差といった他の説明変数に対して独立であることが共線性解析によって示されている。よって、パラメータ β もリズム協調に十分に影響を与えるパラメータであり、本研究で見られたパラメータ β の変化は、リズム協調の戦略にテンポ依存性があるとみなせる変化である。

2.4.3 同期誤差を修正する戦略のテンポ独立性

同期誤差を参照する戦略の度合を示すパラメータの値は、ほとんどが-0.6から0まで負の値であり、テンポとは独立していた。この値が負であることは、二者間リズム協調において、直前のタップが刺激より早かった場合は次の周期を長くすることで、タップを遅くしようとし、その逆に直前のタップが刺激より遅かった場合には、次の周期を短くすることで次のタップ周期を早くしようとする傾向があることを示している。値がテンポから独立していることは、同期誤差に反応して、次の周期を変化させる度合はテンポが遅くなっても変化しないことを示している。途中で刺激のタイミングが変化するメトロノームとの指タッピング実験課題を用いた先行研究 [37] では、メトロノームのテンポが遅くなるほど、同期誤差を修正する戦略の度合は大きくなった。つまり、テンポが遅い方が、同じ同期誤差であっても、次のタップの時刻を早くまたは遅くしようとする度合が大きくなる傾向を示していた。一方で、本研究では、同期誤差を修正する戦略の度合はテンポとは独立していた。自己のタップ周期に関する戦略と同様、この結果からも二者間のリズム協調における戦略とメトロノームとの同期タッピングにおける戦略との間では、戦略のテンポ依存性が異なる可能性が考えられる。

2.4.4 テンポの加速傾向の要因考察

本実験では、先行研究で見られた二者間のリズム協調におけるテンポの加速傾向に関しての分析を行った。その結果、288 試行中 267 試行において、平均テンポがメトロノームテンポより加速する傾向を見せた。また、メトロノームテンポが遅い条件の方がより加速する傾向が見られた。それらの要因である可能性の一つとして、パートナーの周期を参照する戦略のテンポ依存性が関わっている可能性が考えられる。人間は、外界刺激の周期を実際の周期より短く感じる傾向があるといわれている [69, 70]。そのため、テンポが遅い程、実際より短く感じられるパートナーの周期を互いに参照することで、お互い早めにタップすること続けることで、テンポが加速している可能性が考えられる。また、遅い初期テンポにおける大きなテンポ加速は、人間が今起きていることとして知覚できる (Feeling of nowness) 時間窓 [62] の上限が 2~3 秒程度であるといわれている [61, 63-68] ことが関係している可能性がある。人間は、この上限を超えると異なるタイミングで起こった事象を、今という一つの時間間隔の中でとらえることができなくなる。つまり、長いインターバルで刺激が提示された場合、それらを一つのリズム事象としてとらえられなくなると考えられる。Feeling of nowness の上限より上回る周期でのリズム協調のとき、リズムカルに運動するために、周期が Feeling of nowness の閾値より短いところになるまでテンポが加速した可能性が考えられる。

2.5 結言

本実験では、二者間のリズム協調において、リズム協調の戦略に対するテンポ依存性を調査する目的で、異なるテンポにおける二者間同期継続タッピング課題を実施した。そして、自身のインターバル、パートナーのインターバル、自他のタイミング誤差を参照する戦略の度合を推定して、平均テンポとの相関を分析した。まず、初期テンポが遅い条件においても先行研究と同様に平均テンポが加速する傾向が示され、その度合いはテンポが遅くなるほど大きくなる可能性が見られた。つづいて、テンポが遅くなるほど、相手の周期に合わせる戦略の度合が大きくなる傾向をみせた。また、自身の周期を維持する戦略と同期誤差を修正する戦略はテンポに対して独立であることが確認できた。二者間のリズム協調において、テンポが遅くなるほど、意識的に相手の周期を参照して、タップタイミングを制御している可能性が考えられる。また、その影響で、初期テンポが遅くなるほど平均テンポの加速傾向が強くなる可能性が示唆される。

第3章

実験2・二者間リズム協調戦略のタイミング依存性

3.1 緒言

本章では二者間リズム協調における戦略のタイミング依存性を明らかにすることを目的とした実験2について述べる。より具体的には、実験2の目的は、二者間リズム協調において、人間はタイミングの先行後行の役割に依存して制御戦略を変化させるのかを明らかにすることであった。そのため、まず、二者間同期継続指タッピング課題において、タップのタイミングが二者間で先になる先行側と後になる後行側とに分かれるか、つまり、タイミングの先行後行の役割分担を行うのかを調べた。次に、先行後行の役割ごとに、自身のITIを維持する戦略、相手のITIに合わせる戦略、SEを修正する戦略の三つの戦略の度合を調べた。

3.2 実験手法

3.2.1 実験参加者

12名（6組，男性10名，女性2名，22～32歳）が実験2に参加した。すべての参加者は右利きであり，聴覚および運動に関する障害は見られなかった。また，すべての参加者は，プロになるための音楽の訓練を受けていなかった。この実験はヘルシンキ宣言に従って実施され，東京工業大学の研究倫理審査委員会によって承認された。また，参加者から書面によるインフォームドコンセントを得てから実験を行った。

3.2.2 実験装置と刺激

実験装置と刺激は実験 1 と同様であった。圧力センサ (FSR-406, Interlink Electronics, US) が参加者のタップを検知するために用いられた。マイクロコンピュータ (Arduino Mega2560 Rev3, Arduino, US) が参加者のタップを記録し、聴覚刺激を制御する目的で用いられた。イヤホン (SHE3010WT, PHILIPS, Nederland) を経由して 100ms の長さの 500Hz, 矩形波の聴覚刺激が参加者に提示された。試行中, ヘッドホン (HPH-50B, YAMAHA, Japan) を経由してホワイトノイズが参加者に提示された。

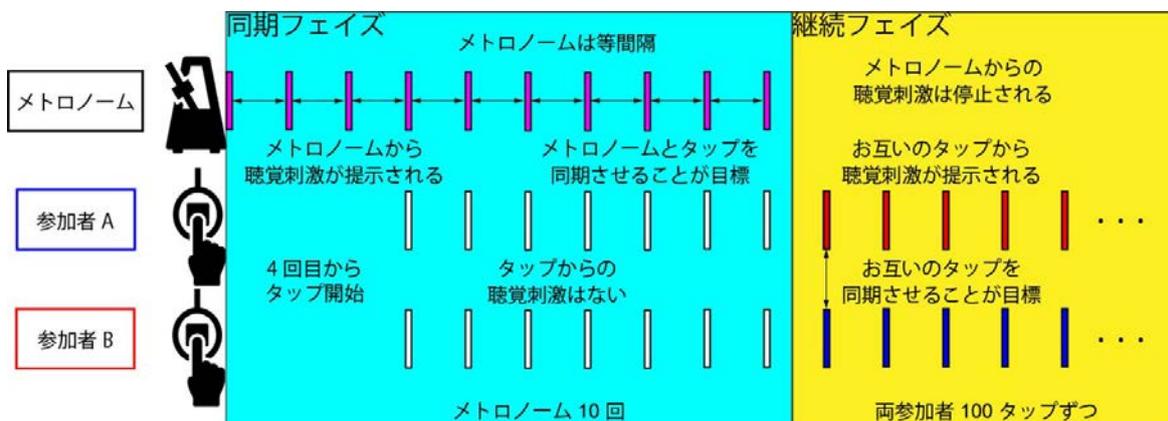


図 3.1 実験 2 における同期継続タッピング課題.

3.2.3 実験課題

実験課題には同期継続タッピング課題を用いた。この課題は図 3.1 に示すように同期フェイズと継続フェイズから構成された。まず、同期フェイズの間、両参加者には 10 回、メトロノームから等間隔 (700ms) の聴覚刺激が提示された 5 回目の刺激より、参加者はメトロノームと同期するように、タッピングを開始した。10 回のメトロノーム刺激の提示が終わった後、実験課題は継続フェイズに移行した。継続フェイズにおいては、メトロノームからの聴覚刺激は停止し、相手がセンサをタップしたタイミングで聴覚刺激が提示されるようになった。参加者は、自身のタップと提示される聴覚刺激が同期するようにつ、メトロノームのテンポを維持するように、タッピングを継続するように指示がされた。また、参加者は、継続フェイズにおいては、テンポを維持することより相手と同期することを優先させるように指示された。タッピング課題の 1 試行は、継続フェイズで両参加者が 100 回タップを行うまで継続された。

3.2.4 実験手続き

ペアの参加者は、図 3.2 に示す部屋の中で、背中合わせとなって着席した。参加者は 2 つの席のうち、無作為に選ばれた 1 つに着席した。実験中は、参加者は視覚刺激を遮断するためにアイマスクを着用した。また、聴覚刺激提示用のイヤホンと外界音社団用のヘッドホンを着用した。実験開始前に、聴覚刺激とホワイトノイズの音量を調整した。その後は実験を通して、音量は固定された。すべての参加者には、「テンポを維持することと、相手と同期することの両立が難しい場合は、相手と同期することを優先してください。」という教示を、実験者が紙に書かれた教示を読み上げる形で伝えられた。

ペアごとに、実験課題は 10 試行ずつ行われた。実験試行の開始前に、数回練習試行が行われた。5~6 試行ごとに 5 分間の休憩時間が確保された。実験は 1 ペアにつき、約 1 時間 30 分程度であった。



図 3.2 実験 2 における実験室の写真. 新型コロナウイルス (Covid-19) の感染拡大への対策として, 防音室より広く, 窓を解放できる部屋で実験課題を行った.

3.2.5 分析手法

全ペアで、60 試行分のデータが計測された。一般的に二者間同期継続課題の継続フェイズでは、ITI は試行をとして減少していく傾向が見られる。しかしながら、1 試行だけ、試行中 ITI が徐々に増加し、また、適切な同期ができていないとみなせる試行が見られた。その試行は分析から除外した。そのため、59 試行分のデータを分析に用いた。本実験に関するすべての分析は、MATLAB(MATLAB 2022a, The MathWorks) を用いて分析された。各試行における継続フェイズの 80 タップ分のデータが分析に用いられた。参加者は参加者 A と参加者 B に分けられた。参加者 A の n 回目のタップ時刻を $Tap_A(n)$ 、参加者 B の n 回目のタップ時刻を $Tap_B(n)$ 、と定義し、以下の式のように参加者の n 番目のタップ周期 $ITI_i(n)$ 、 n 番目の同期誤差 $SE_{ij}(n)$ 、標準化された同期誤差 $nITI_i(n)$ を定義した。(ただし、 i, j について、 $(i, j) = (A, B) \text{ or } (B, A)$ であり、参加者の別を意味している。)

$$ITI_i(n) = Tap_i(n) - Tap_i(n - 1) \quad (3.1)$$

$$SE_{ij}(n) = Tap_i(n) - Tap_j(n) \quad (3.2)$$

$$nSE_{ij}(n) = SE_{ij}(n)/ITI_i(n), \quad (3.3)$$

同期誤差はテンポに比例して大きくなることが知られている。そのため、SE ではなく nSE を本研究では分析対象とした。

第 1 に二者間のリズム協調において、先行後行の役割分担が行われているかどうかを調べた。まず、参加者間の先行後行の役割が発生したとき、試行内で役割が固定されているかを調べる目的で、 nSE の時系列が定常であるかどうか調べた。具体的には、各試行の nSE の時系列データに ADF 検定を行った。有意水準は 0.05 に設定された。つづいて、試行内で参加者間の先行後行の役割分担が発生しているかを調べる目的で、各試行内で nSE の分布の平均値が 0 である可能性があるかどうかを調べた。具体的には、各試行の nSE の分布データに対して t 検定を行った。有意水準は 0.05 に設定された。また、ペアごとに、一方の参加者が先行する傾向を

見せるかどうかを調べる目的で、ペアの参加者を参加者 A と参加者 B に分けたうえでそれぞれが先行側であった試行数を調べた。

第2に、戦略のタイミング依存性を調べる目的で、参加者ごとの戦略の度合の推定を行った。しかしながら、実験2では、実験1とは異なり、ITIの時系列が非定常である試行が存在した。より具体的には、テンポが際限なく早くなり続ける試行が見られた。このような試行では、実験1で用いた重回帰分析を適用することができないため、時系列が非定常であっても使用できる、戦略の度合の推定手法を用いた。

各試行の各参加者において、以下に示す Shulze のモデル [43] の同期誤差を参照して次のタップ時刻を修正する位相修正の戦略の度合を示すパラメータ α と周期誤差を参照して自身の周期を修正する周期修正の戦略の度合を示すパラメータ β とを、bGLS 法 [71, 72] によって推定した。この手法は、位相修正の度合 α と周期修正の度合 β を参加者の内的テンポ t 、参加者の内的テンポのノイズ T' 、そして参加者の運動ノイズ M を考慮しながら推定する手法であり、運動ノイズより内的テンポのノイズが大きいという仮定のもと、二つの修正戦略の度合を推定する手法である。

$$SE_{ij}(k+1) = (1 - \alpha)SE_{ij}(k) + t(k) - ITI_j(k+1) + N(k) \quad (3.4)$$

$$t(k) = t(k-1) - \beta SE_{ij}(k), \quad (3.5)$$

上のパラメータ推定のために用いられるモデル式は、以下のように、制御モデルの式に変換することができる。ただし、 N は、運動ノイズと内的テンポのノイズを統合したノイズ項である。

$$Tap_i(k+1) = Tap_i(k) - \alpha SE_{ij}(k) + t(k) + N(k) \quad (3.6)$$

$$t(k) = t(k-1) - \beta SE_{ij}(k), \quad (3.7)$$

Shulze モデルにおける位相修正の戦略は、同期誤差を修正する戦略に相当する。しかしながら、周期修正の戦略は、相手の周期に合わせる戦略や自身の周期を維持する戦略を明確には当てはまらない。これはそれらの差分による周期誤差を用いた戦略を意味する。よって、別の手法を用いて、自身の周期を維持する戦略と相手の周期に合わせる戦略を調べる必要がある。

そこで、窓相互相関 [73] を用いて、自身の周期を維持する戦略と相手の周期に合わせる戦略の度合の推定を行った通常の相互相関分析は、2つの時系列の定常性が前提として求められる。しかしながら、上述した通り ITI が減少し続ける試行が見られたため、本実験の分析では定常性を前提とできない。そこで、時系列の長期的なトレンドなどを無視し、2つの時系列の局所的（短い時間間隔での）依存関係を解析できる窓相互相関を用いて、ペアとなった2者の ITI の依存関係を求めた。具体的には、まず、分析範囲内のうち最初の6周期分の窓を設定し、その中で相互相関を計算する。次に、窓を1周期分ずつずらしながら、次々に10周期分の相互相関を計算する。そして、各窓で計算した相互相関係数のうち、参加者の戦略の度合を示すラグ-1の相互相関係数を平均する。ここでいう、周期のラグ-1の相互相関とは、参加者B視点で参加者Bの周期の時系列と、参加者Aの周期時系列を1周期分遅らせた時系列との間の相互相関を指す。相関の平均値が0に近いほど、相手の周期を無視して自身の周期を維持する役割を持つ傾向を示し、相関の平均値が正に大きいほど相手の周期に合わせるように自身の周期を修正する役割を持つ傾向を示す [13]。

第3に推定した戦略の度合において、先行側と後行側に違いが見られるかの分析を行う。以下に示す一般化線形混合モデル [74] によって、参加者やペアの効果を考慮しながら、先行後行の役割が戦略の度合に効果を与えるかどうかを、 t 統計量を用いて分析した。

$$(Parameter) = (Role) + (1|Participant) + (1|Pair) \quad (3.8)$$

ただし、Parameter の変数は推定した、戦略の度合の数値（ α 、 β の値、

ラグ-1窓相互相関係数)を示し, Roleの変数は, 参加者が先行側の場合
は+1, 後行側の場合は-1となる変数を取り, ParticipantとPairの変
数はそれぞれ参加者ごと, ペアごとに割り当てられた数値をとる.

表 3.1 ペアごとに、参加者 A と参加者 B のそれぞれが先行側であった試行数を調べた結果。ほとんどのペアで、一方の参加者が 10 回の試行中 9 回以上の試行で先行側の役割を担当していた。このことより、試行間で、先行後行の役割分担は固定化される可能性が考えられる。

ペア番号	1	2	3	4	5	6
参加者 A が先行/参加者 B が後行	0	10	0	3	10	10
参加者 B が先行/参加者 A が後行	9	0	10	6	0	0
先行後攻の役割分担なし	1	0	0	0	0	0

3.3 結果

3.3.1 タイミングの先行後行の役割分担

実験の結果、全試行における、SE の大きさ平均は、85.8ms（標準偏差は 53.1ms）であった。代表的な数試行における、試行内の SE の推移を図 3.3 に、分布を図 3.4 に示している。図より、先行後行の役割分担が存在して、試行内で安定している可能性が見られた。

各試行における SE 時系列の ADF 検定により、59 試行すべての試行において、定常性が見られた ($p < 0.05$)。つまり、参加者間の先行後行の関係が発生した場合、その役割は試行中安定している傾向が見られた。各試行における SE 分布の t 検定により、59 試行中 58 試行において、平均が有意に 0 ではなかった。つまり、58 試行においては、先行後行の関係が発生していることが確認できた ($p < 0.05$)。一方で、残る 1 試行においては、有意な役割分担が見られなかった。ペアごとに、参加者 A と参加者 B がそれぞれ先行側であった試行数を表 3.1 にまとめた。表より、多くのペアにおいて、一方の参加者が先行側となる傾向が見られた。

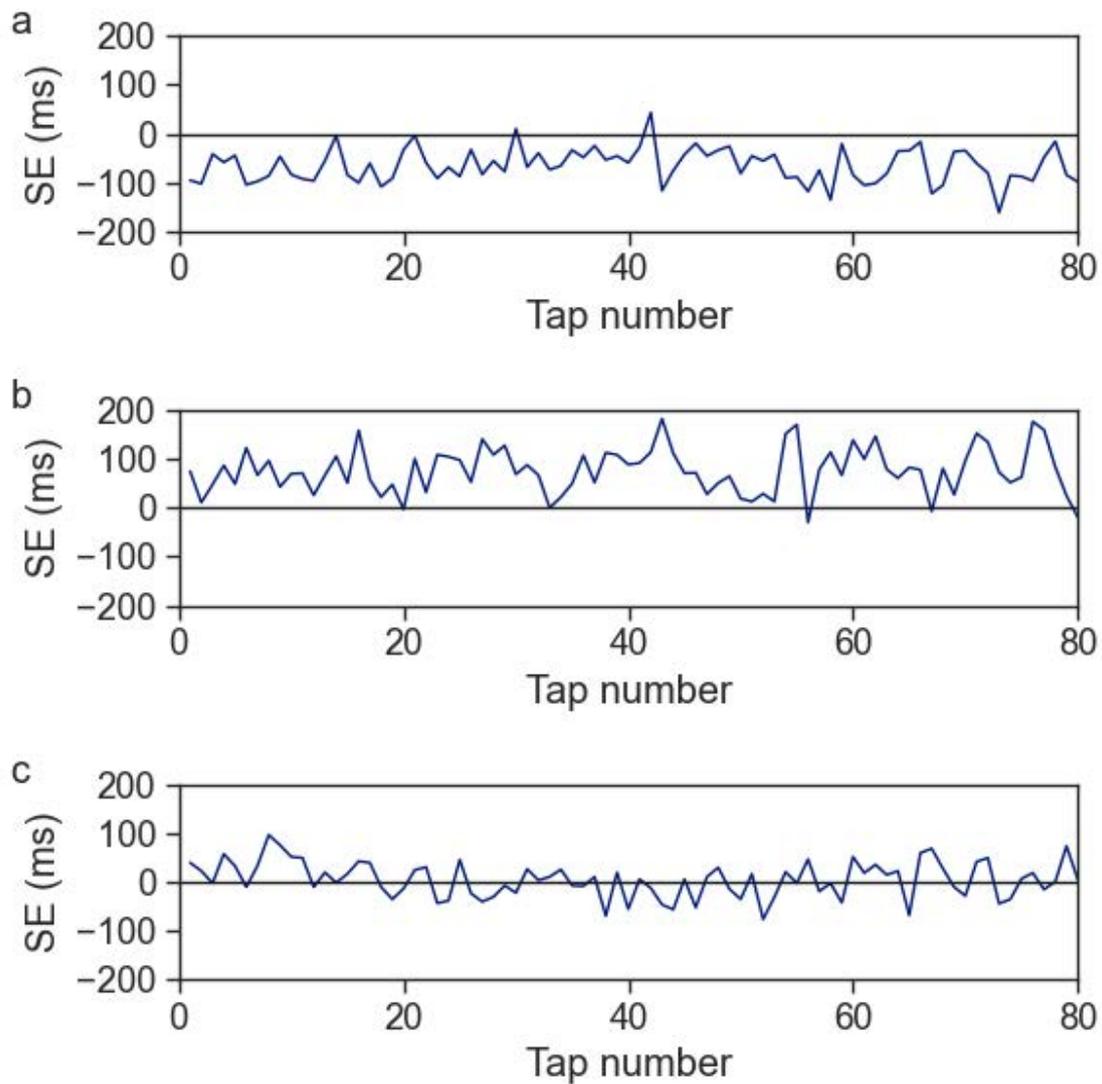


図 3.3 実験 2 の代表的な試行における SE の推移の図. a: 参加者 A が参加者 B よりタップのタイミングが先行している傾向が見られた試行における SE の推移. b: 参加者 B が参加者 A よりタップのタイミングが先行している傾向が見られた試行における SE の推移. c: 有意な先行後行の役割分担が観察できなかった試行における SE の推移

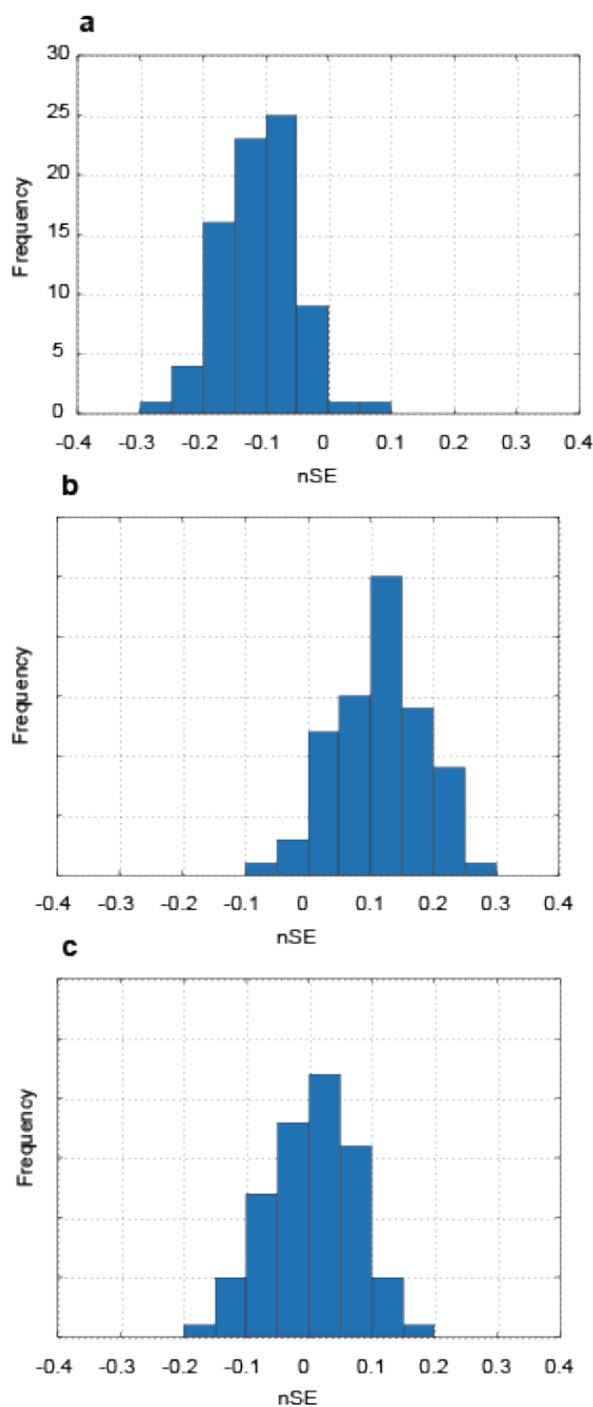


図 3.4 実験 2 の代表的な試行における SE の分布の図. 本図における a,b,c は, それぞれ図 3.3 の a,b,c と対応している. a: 参加者 A が参加者 B よりタップのタイミングが先行している傾向が見られた試行における SE の分布. b: 参加者 B が参加者 A よりタップのタイミングが先行している傾向が見られた試行における SE の分布. c: 有意な先行後行の役割分担が観察できなかった試行における SE の分布

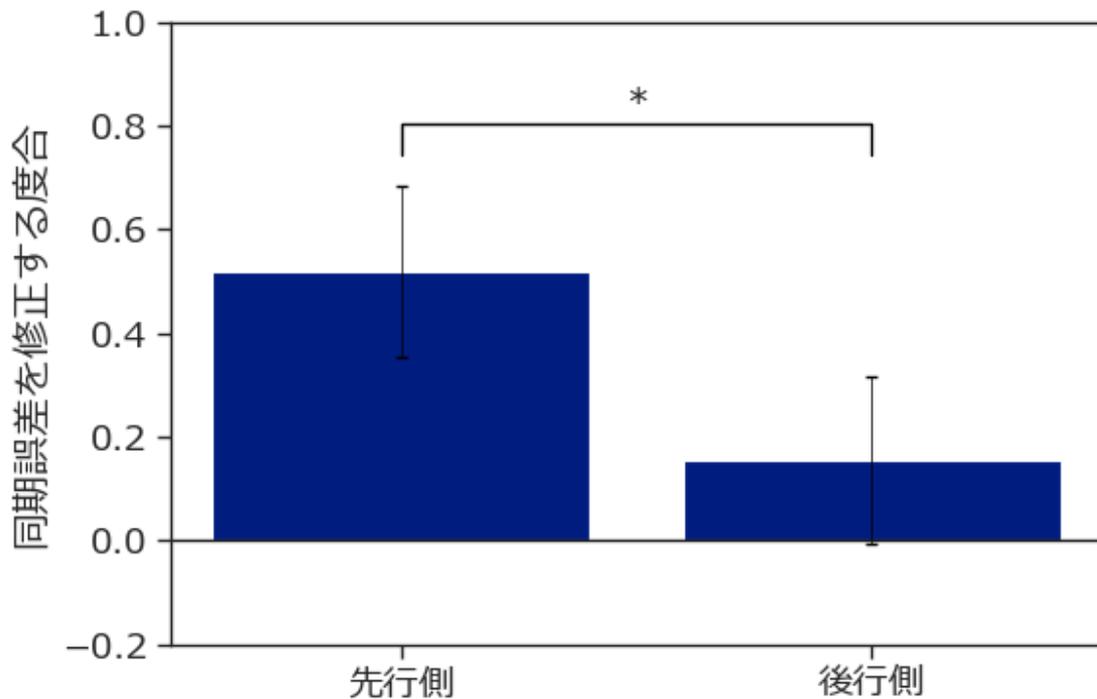


図 3.5 Shulze のモデルの同期誤差を修正する戦略の割合を示すパラメータ α について、パラメータを推定し、先行後行間で、推定したパラメータの値を比較した結果。先行側の参加者の方が、高いパラメータ α の値、つまり同期誤差を修正する戦略の割合を示した。

3.3.2 同期誤差を修正する戦略と周期誤差を修正する戦略のタイミング依存性

位相修正の割合を示す α について、先行側の参加者と後行側の参加者の平均値を調べた結果を図 3.5 に示す。先行後行の効果調べた結果、有意な効果が確認でき ($t = 4.14, p < 0.001$)、先行側の方が高い値をとる傾向がみられた。この結果より、先行側の参加者は後行側の参加者より大きい位相修正の割合を見ることが示された。

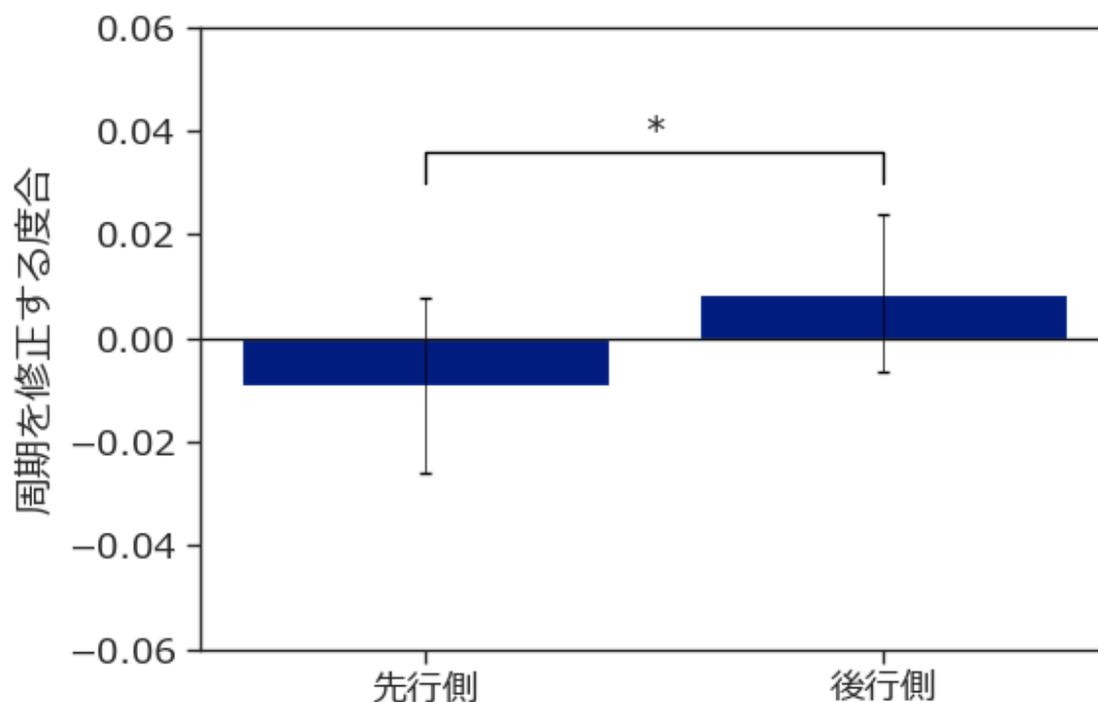


図 3.6 Shulze のモデルの周期誤差を修正する戦略の割合を示すパラメータ β について、パラメータを推定し、先行後行間で、推定したパラメータの値を比較した結果。後行側の参加者の方が、高いパラメータ β の値、つまり周期誤差を修正する戦略の割合を示した。

周期修正の割合を示す β について、先行側の参加者と後行側の参加者の平均値を調べた結果を図 3.6 に示す。先行後行の効果を調べた結果、有意な効果が確認でき ($t = -4.41, p < 0.001$)、後行側の方が高い値をとる傾向がみられた。この結果より後行側の参加者は先行側より大きい周期修正の割合を見せることが示された。

3.3.3 周期を維持する戦略と相手に周期を合わせる戦略のタイミング依存性

自身の周期を維持する戦略と相手に周期を合わせる戦略の度合を示すラグ-1窓相互相関係数について、先行側の参加者と後行側の参加者の平均値を調べた結果を図3.7に示す。先行後行の効果を調べた結果、有意差が確認できた ($t = 6.78, p < 0.001$)。後行側の参加者は先行側の参加者よりも、高いラグ-1の窓相互相関係数の値を見せた。つまり、先行側は自身の周期を維持する傾向を見せ、後行側は相手に周期を合わせる傾向を見せた。

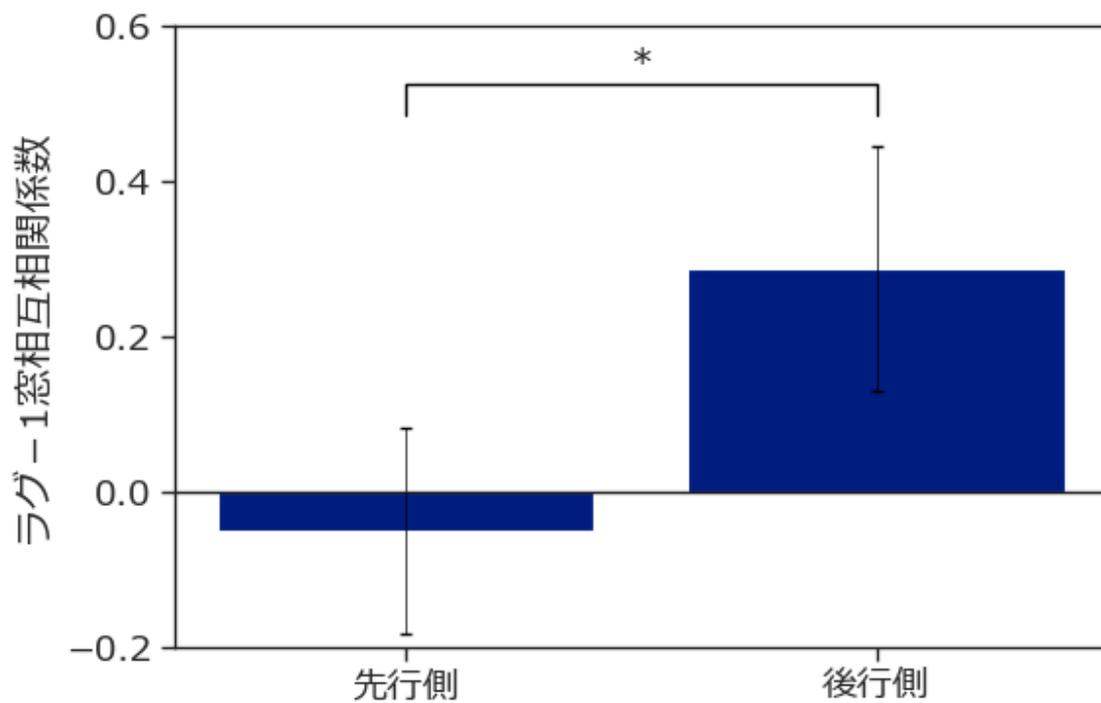


図 3.7 自身の周期を維持する戦略と相手の周期に合わせる戦略の度合を示すラグ-1窓相互相関係数について、相関係数を計算し、算出された相関係数の値を先行後行かで比較した結果。値が正に高い程、相手の周期を維持する戦略の度合が強いことを示し、値が0に近い程、自身の周期を維持する戦略の度合が強いことを示す。後行側の参加者の方が、高い相関係数の値、つまり、相手の周期を維持する戦略の度合が強いという傾向を示した。一方で、先行側の参加者は、自身の周期を維持する戦略の度合が強いことが示された。

3.4 考察

3.4.1 先行後行の役割分担の存在と安定性

本研究の目的は、二者間の単純なリズム協調において、戦略のタイミング依存性を調べる事であった。そのために、まず、二者間のリズム協調において、タイミングの先行後行の役割分担が発生するかどうか調べた。その結果、二者間の指タッピング課題において、参加者は先行側と後行側に分かれる傾向が見られ、また、試行内、および、試行間の両方で先行後行の役割は固定される傾向が見られた。

音楽の先行研究では、二名の演奏者が、事前にリーダーとフォロウに指示によって分けられた状態で演奏を行った場合 [22] や、異なる楽器を持つ弦楽四重奏の演奏を行った場合 [10] において、一方の演奏者がタイミングにおいて先行し、もう一方の演奏者が後行して続く、先行後行の役割分担が行われていたことが示されている。本実験によって、事前に役割が与えられなくても、リズム協調において、参加者らは安定して先行後行の役割分担を行うことが示された。

3.4.2 戦略のタイミング依存性

つづいて、二者間リズム協調における戦略のタイミング依存性を調べた。その結果、先行側の参加者は、同期誤差を修正する戦略の度合いが強く、自身の周期を維持する傾向が見られた。一方で、後行側の参加者は、周期を修正する戦略の度合いが強く、相手に周期を合わせる傾向が見られた。つまり、先行後行間で、異なる戦略を用いていることが示され、二者間リズム協調において、戦略のタイミング依存性が示された。

また、戦略のタイミング依存性に関して、人間同士のリズム協調と、人間とメトロノームとのリズム協調との間に、異なる特徴が見られた。一般的に、人間と一定周期のメトロノームが同期しようとするとき、メトロノームは周期を維持し、人間はメトロノームの周期に合わせるという関係にあるが、周期を合わせる人間側が、タイミングにおいて先行する傾向にある [24, 25]。一方で、人間同士が同期しようとするとき、本研究の結果では、周期を維持しようとしている側の人間が先行し、周期を合わせる側の人間が後行する傾向にあった。つまり、戦略のタイミング依存性に関して、人間同士のリズム協調と人間とメトロノームとのリズム協調との間に、反対の特徴を持っていることが示された。したがって、人間のリズム協調における戦略を調べるためには、人間とメトロノームとのリズム協調だけでなく、人間同士のリズム協調を観察することもまた重要であるということが再確認された。

3.4.3 位相周期修正モデルと3つの戦略を扱う重回帰モデルとの関係

先行研究では、同期誤差を修正する位相修正と周期誤差を修正する周期修正の2つのメカニズムを用いた位相周期修正モデル [11] が一般的に扱われている。その位相周期修正モデルは以下の式のように示すことができる。

$$\begin{aligned} Tap_A(k+1) &= Tap_A(k) - \alpha_A SE_{AB}(k) + t_A(k), \\ t_A(k) &= t_A(k-1) - \beta_A SE_{AB}(k-1), \end{aligned} \quad (3.9)$$

この式を、タップ周期 $ITI_A(n)$ に変換すると以下のように示すことができる。

$$\begin{aligned} ITI_A(k+1) &= Tap_A(k+1) - Tap_A(k) \\ &= -\alpha_A SE_{AB}(k) + t_A(k), \end{aligned} \quad (3.10)$$

さらに、タップ周期の変動量 $\delta ITI_A(n)$ に変換すると以下のように示すことができる。

$$\begin{aligned} \delta ITI_A(k+1) &= ITI_A(k+1) - ITI_A(k) \\ &= -\alpha_A (SE_{AB}(k) - SE_{AB}(k-1)) + t_A(k) - t_A(k-1) \\ &= -\alpha_A ITI_A(k) + \alpha_A ITI_B(k) - \beta_A SE_{AB}(k), \end{aligned} \quad (3.11)$$

位相周期修正モデルから導出したモデルと実験1で提案したモデルについて、どちらのモデルも自身のタップ周期 $ITI_A(n)$ 、相手のタップ周期 $ITI_B(n)$ 、同期誤差 $SE_{AB}(n)$ を説明変数とする回帰モデルの形となった。しかし、導出したモデルと提案したモデルの間で、パラメータが異なっている。両モデル間でのパラメータの違いについては、今後さらに検討する必要がある。

3.4.4 役割を決定する要因の考察

多くのペアにおいて、一方の参加者が試行間で安定して先行側となる傾向が見られた。この結果は、リズム協調における個人特性が、先行後行の役割を決定する可能性があることを示唆している。一つの可能性として、負の非同期（NMA）の度合 [38, 75] が関わっている可能性が考えられる。人間には、等間隔のメトロノームなどの外部刺激との同期の際に、外部刺激より先に運動する傾向がある [24, 25]。その際、人間が刺激よりどれだけ早く運動するかの度合、つまり NMA の大きさには個人差があることが示されている [38, 75]。そのため、より刺激より早く運動する傾向を持つ参加者が、二者間リズム協調においても、早くタップしようとするため、先行後行の役割分担が発生する可能性が考えられる。別の可能性として、パーソナルテンポ [76, 77] の影響が挙げられる。パーソナルテンポとは、その人が指タッピングや歩行などの周期運動をするときに自然に出す、その個人にとって好ましいテンポのことを指す。パーソナルテンポの個人間のばらつきは大きく [26]、個人内のばらつきは小さい [78, 79] ことが分かっている。パーソナルテンポは数日開けても、十分に一貫性を持っていることが明らかとなっている [79, 80]。本実験においても参加者の周期が自然と、それぞれのパーソナルテンポに近づいていき、テンポに違いが発生し、パーソナルテンポは速い方が、タイミングが先行する先行側になり、パーソナルテンポが遅い方が、先行側についていく後行側になった可能性が考えられる。このことは、音楽の合奏を用いた研究からも示唆されている。ピアノの二重奏の先行研究において、単独での継続課題のテンポが速い参加者の方が先行する傾向が見られている [22]。

3.4.5 音楽における戦略のタイミング依存性

本研究では、先打ちの役割の参加者がテンポのリーダーに、後打ちの役割の参加者がフォローになっていた。このような先打ち後打ちの役割とテンポのリーダーフォロワの役割との関連については、音楽のアンサンブルにおいても調べられている。本研究で用いた指タッピング課題よりも複雑な音楽においては、本研究に見られたテンポにおけるリーダー／フォロワとタイミングにおける先行／後行の関係とは異なる様子も観察されている。例えば、弦楽四重奏において [10] は、上述したように、第1バイオリンとチェロが先行する。この時、第1バイオリンはビオラに対してテンポのリーダーとなっている。このことは先打ちの参加者がテンポリーダーであるという本研究の結果と同じ関係であるといえる。しかしながら、他の楽器間ではこれとは異なる関係も見られている。例えば、チェロは第2バイオリンに先行するが、テンポではお互いがお互いの周期に合わせてあうハイパーフォロワーの現象 [13] がみられた。また、第1バイオリンとチェロは先打ち後打ちという関係が見られないが、チェロが第1バイオリンに対してテンポではリーダーであった。また、ピアノのデュオにおいて、テンポを維持するように指示をされたリーダーがタイミングにおいて後行側となるという、先行後行とリーダーフォロワについて本研究と逆の関係性も見られている。これらの結果は、音楽のアンサンブルにおいて演奏者は意図的に先打ち後打ち、および、テンポのリーダーフォロワの関係性を調整していることを示唆している。本研究で見られたタイミングとテンポにおける役割分担を超えて、プロの演奏家がどのように複雑な関係性を構築しているかはさらなる研究が必要である。

3.5 結言

本実験では、二者間のリズム協調に戦略のタイミング依存性を調べる目的で、二者間のタッピング課題を行った。その結果、まず、事前の役割の割り当てがされていない二者間のリズム協調において、参加者らは、先行側と後行側に安定して分かれた。また、先行側は後行側より同期誤差を修正する傾向と自身の周期を維持する傾向を見せ、後行側は先行側より周期を相手に合わせる傾向を見せた。したがって、二者間リズム協調における戦略のタイミング依存性が示された。

第4章

総合考察

4.1 二者間リズム協調におけるテンポおよびタイミング依存性

本研究の目的は、二者間のリズム協調において、戦略のテンポ依存性およびタイミング依存性を調べることであった。その目的のもと、本研究では、戦略のテンポ依存性を調べた実験1と戦略のタイミング依存性を調べた実験2の二つの二者間同期継続タッピング課題の実験を行った。二者間同期継続指タッピング課題は同期フェイズと継続フェイズから構成された。同期フェイズでは、一定周期で聴覚刺激を提示するメトロノームと自身のタップを同期させるようにタッピングを行うように参加者に指示がされた。継続フェイズでは、メトロノームからの聴覚刺激が停止し、相手のタップがお互いに聴覚刺激として提示される状況で、メトロノームのテンポを維持しながら、相手からの聴覚刺激と自身のタップを同期させるようにタッピングを継続するように参加者に指示がされた。そして、継続フェイズにおけるタッピングのデータを分析して、参加者の戦略の度合を推定した。実験1では戦略のテンポ依存性を明らかにするために平均テンポと各戦略の度合いの相関分析を行った。また、実験2では戦略のタイミング依存性を明らかにするために、タイミングの先行後行という役割分担ごと

に各戦略の度合いを分析した。

実験1では、テンポ依存性を明らかにするという目的から、参加者にはメトロノームテンポの維持を優先するよう指示を行った。また、700msから3,200msまでの異なるメトロノームテンポの条件を設定して実験を行った。その結果、まず、二者間リズム協調の試行ごとに異なる平均テンポが生成されることが確認できた。戦略のテンポ依存性については、自身の周期を維持する戦略はテンポとは独立していた。相手の周期に合わせる戦略の度合はテンポが遅い程、強くなる傾向が見られた。加えて、同期誤差を修正する戦略はテンポとは独立している可能性が見られた。

実験2では、戦略のタイミング依存性を明らかにする目的から、相手との同期を優先するよう参加者に指示を行った。700msのメトロノームテンポの条件で実験を実施した。その結果、まず、二者間リズム協調において、運動タイミングが先になる先行側と運動タイミングが後になる後行側に分かれる役割分担が観察された。役割分担が発生した場合、タイミングにおいて先行側の役割の参加者は同期誤差を修正する戦略の度合後行側の参加者よりも強い傾向が見られた。一方で、タイミングにおいて後行側の参加者は相手の周期に合わせる戦略の度合が先行側の参加者よりも強い傾向が見られた。

よって、二者間リズム協調において、プロフェッショナルとしての音楽トレーニングの経験のない場合においても、テンポ、および、タイミングに依存して戦略を変化させることが分かった。また、脳神経活動の先行研究において、自身の周期を維持する戦略、相手の周期に合わせる戦略、同期誤差を修正する戦略は別々のメカニズムをもとにしていることが示唆されている。まず、メトロノームなどの外界刺激に合わせる同期課題とテンポを維持する継続課題との間では、活性化する神経回路網が異なる。同期課題では、感覚-運動同期や聴覚-運動協応にかかわる小脳の運動前野ネットワークが活動することが示され [81-83]、一方で継続課題では、内的テンポの生成や事前のテンポの参照にかかわる反対側の感覚運動野、補足運動野、および大脳基底核が活性することが示されている [84,85]。続

いて、同期課題における位相修正と周期修正について、位相修正は腹側運動前野が、周期修正は小脳や大脳基底核の回路が関わっており、位相修正と周期修正はそれぞれ異なるメカニズムに支えられていることが示唆されている [1, 2]。これらの先行研究により、自身の周期を維持する戦略、相手の周期に合わせる戦略、同期誤差を修正する戦略が、異なるメカニズムをもとにしていることが示された。

本研究では、自身の周期を維持する戦略、相手の周期に合わせる戦略、同期誤差を修正する戦略という 3 つの戦略を扱った。先行研究では、同期誤差を修正する位相修正と周期誤差を修正する周期修正の 2 つのメカニズムを用いた位相周期修正モデル [11] が一般的であり、先述の 3 つの戦略を明示的に考えたモデルは存在しなかった [1, 2]。しかし、本研究は、同期誤差を修正するメカニズムを自身の周期を維持するメカニズムと相手の周期に合わせるメカニズムに分けて考え、同期誤差を修正するメカニズムを加えた 3 つのメカニズムについて扱い、タイミング依存性とテンポ依存性がそれぞれ異なることを明らかにした。今後は、自身の周期を維持する戦略、相手の周期に合わせる戦略、同期誤差を修正する戦略という 3 つの戦略のメカニズムについてより詳細に検討する必要がある。

以下では、実験 1 と 2 の結果を受けて、リズム協調の相手による戦略の違い、つまり、メトロノームに同期するか他者と協調してリズムを生成するかによる戦略の違いについて考察する。また、本論文においては実験 1 において戦略のテンポ依存性を明らかにする観点からメトロノームのテンポを維持することを優先するように参加者に教示し、実験 2 においては戦略のタイミング依存性を明らかにする観点から相手とのタップタイミングを同期することを優先するように参加者に教示した。これら教示の違いがリズム協調とその戦略に与える影響についても考察を行う。

4.2 テンポが加速する現象と戦略の変化の関係性

実験2において、参加者のタッピングのテンポが常に加速し続ける、ラッシュと呼ばれる現象が確認できた。ラッシュとは、リズム協調において、テンポが加速し続ける現象のことを差し、プロの演奏においても確認される現象である [86]。

一人での継続課題においても、テンポを維持できずに加速し続ける、ラッシュの現象が見られたている [33]。具体的には、メトロノームテンポが 1,000ms を超える遅いテンポ条件において、事前に提示されたメトロノームのテンポを維持するようにタッピングを行う継続指タッピング課題において、参加者はメトロノームのテンポを維持しきれず、テンポが徐々に加速していくことが報告されている。つまり、一人で外界刺激なしにテンポを維持しようとするラッシュが見られる。

同様に、二者間のリズム協調において、テンポが加速し続ける、ラッシュが観察されている [14]。メトロノームのテンポが 300ms, 500ms, 800ms の3条件において、一人でのソロ同期継続タッピング課題と二人での二者間同期継続タッピング課題を行い、継続フェイズにおける周期（テンポ）の推移を観察した結果、一人で課題を行った場合にも、ラッシュの傾向は見られたが、二人で課題を行った場合、一人の場合よりも、継続課題におけるテンポはより速くなる傾向が見られた。つまり二者間でのリズム協調において、一人よりも、ラッシュが起りやすいと報告されている。

また、このラッシュの現象は、プロの同期継続タッピング課題においても発生する場合がある [87]。二者間の同期継続タッピング課題を、音楽の訓練を受けていない人間同士またはプロの演奏者同士で、参加者にはタイミング同期とテンポ維持の両方を達成させよという指示を行い、二者間同期継続タッピングを行った。その結果、訓練を受けていない人間同士でも、演奏者同士でも、ラッシュの現象は観察された。また、訓練を受けていない人同士と演奏者同士との間で、ラッシュの度合に差は見られなかった。一方で、同期フェイズにおけるメトロノームとの同期誤差の大きさや

継続フェイズにおける参加者間の同期誤差の大きさと周期の変動（標準偏差）は、プロの演奏者の方が、小さいという結果を見せた。

そして、二者間のリズム協調において、ラッシュが発生する場合、テンポは一人においてより加速しやすい方に引き込まれる傾向がある [14,22]. 同期継続タッピング課題および、ピアノの演奏課題を一人および二人の両方の条件で行い、テンポの推移を観察した結果、二者間リズム協調におけるテンポは、一人で行った時のテンポが速かった方の参加者のテンポに収束する傾向が見られた。さらに、ピアノ演奏の先行研究 [22] において、一人での課題におけるテンポが速かった方の参加者が、二者間で課題を行った場合に先行する傾向を見せた。

そのため、二者間のリズム協調において、加速しやすい参加者は、相手の周期を無視してテンポが加速していく先行側になる可能性が考えられる。その際、先行側は、相手との同期誤差を修正する戦略は残っているが、相手の周期を無視して、自身の内部テンポに周期を合わせようとしている可能性が考えられる。一方で、もう一方の参加者は、同期を崩壊させないように、後行側として、先行側についていく必要があると考えられる。この時、後行側は、同期誤差を無視して、相手の周期に合わせる戦略を強くする必要があると考えられる。したがって、ラッシュが起きるときに、先行後行の役割分担が発生し、戦略のタイミング依存性が発生すると考えられる。

4.3 教示によるリズム協調と戦略の変化

本研究において、二つの実験間で、異なるラッシュの傾向を見せた。実験1では試行が進むにつれ、途中でラッシュが止まり、平均テンポは安定していく傾向が見られた。一方で、実験2では、一部の試行においてラッシュが止まらない、つまり、周期の時系列が非定常な試行が見られた。音楽のプロにおいても、相手との同期を指示した場合は、訓練を受けていない参加者と同様にラッシュが発生する場合があることを示す先行研究が存在している [87]。そこで、なぜ実験1では、参加者らはラッシュを止め、テンポを安定させることができたのかを考察する。

本研究の2つの実験間で異なる点として、参加者への指示の違いがある。2つの実験では、メトロノームのテンポの維持と、相手とのタップタイミングの同期の二つの教示を行った。二者間同期継続タッピング課題を用いた先行研究 [14] や、プロの二者間リズム協調の先行研究 [87] においても、テンポ維持とタイミングの同期は同等に達成されるべきものとして参加者に教示されてきている。ただし、本研究の実験1と実験2では、優先させるべき事項が異なっていた。実験1では、戦略のテンポ依存性を明らかにする目的から、条件ごとに異なる平均テンポを参加者が示すことが望まれたため、メトロノームのテンポの維持を優先させた。その結果、試行が進むにつれて途中でラッシュが止まり、平均テンポは安定していく傾向が見られた。一方で、実験2では戦略のタイミング依存性を明らかにする目的から、参加者間のタイミング関係が安定していることが望まれたため、参加者にはタイミングの同期を優先させた。その結果、一部の試行においてラッシュが止まらない、周期の時系列が非定常な試行が見られた。この比較により、優先させるべき事項の教示の違い、つまり、実験1におけるテンポ維持を優先させるような指示がラッシュを止める原因になった可能性が考えられる。

もう一つの仮説として、実験2相手との同期を優先させるような指示によって、参加者が意図的に相手の周期を参照する戦略を重視していること

がラッシュの原因になってしまった可能性が考えられる。人間は、外界刺激の周期を実際の周期より短く感じる傾向があるといわれている [69, 70]。そのため、最低でも一方が相手の周期に合わせる戦略をとると、実際の相手の周期より短い周期に自身の周期を合わせてしまい、その時発生する誤差にもう一方が修正しようとすることで、徐々に周期が短くなる、つまりラッシュが発生してしまうと考えられる。逆に、お互いが、相手の周期を意識しない、または意図的に無視して、相手の周期に合わせる戦略をとらないようにすることで、ラッシュを発生させずに安定したテンポを維持できる可能性が示唆できる。さらに、同期誤差を修正する戦略は無意識的に実行することが可能であるといわれている [1]。そのため、お互いが意識的に自身の周期を維持しつつ、発生する誤差を無意識的に修正することで、ラッシュを発生させずに安定したテンポでリズム協調を達成させることが可能になるという仮説が立てられる。実験 1 の図 2.12 に示すように、1,000ms を下回るはやいテンポにおいて、相手の周期に合わせる戦略の度合を示すパラメータ β の値は、0 付近に分布しており、相手の周期を参照する戦略をほとんどとっておらず、実験 1 の早いテンポにおいて、残りの自身の周期を維持する戦略と、同期誤差を修正する戦略の二つの戦略で、リズム協調を達成させていると考えられ、その時、継続フェイズにおけるテンポは安定していることが確認できている。また、実験 1 の考察において、相手の周期に合わせる戦略は意識が関わっている可能性が示唆されている。そのため、意図的に相手の周期に合わせる戦略がラッシュにかかわっている可能性が考えられる。

したがって、本研究の実験 1 において、ラッシュが途中で止まった原因は、タイミングの同期を無視して、テンポの維持を優先させる行動が影響した可能性が考えられる。そのため、今後のリズム協調の実験においては、それぞれが、自身の周期を維持する戦略を重視（または、相手の周期に合わせる戦略を無視）するような指示が、ラッシュを止め、テンポを安定させるために必要であると考えられる。

4.4 戦略の意識・無意識と教示

本研究において、リズム協調における意識的戦略とは、実験者から与えられた教示を達成するための制御戦略のことを指し、無意識的な戦略とは、与えられた教示とは一致しない戦略や、自身が自覚していない現象に依存した制御戦略のことを指す。本研究では、どのように戦略を変えていたかについては、調査の対象にはなっていない。しかし、実験者から提示された教示を意識した上で、無意識的に戦略を変化させていた可能性が考えられる。

実験1では、参加者はメトロノームのテンポを維持することを優先する教示を受けて、その教示に従い、意識的に自身の周期を維持する戦略をとっていたと考えられ、相手の周期は意識しないで、タイミング制御を行っていたという可能性が考えられる。しかし、実験1の結果では、平均テンポに依存して相手の周期に依存する戦略の度合を変化させていた。そのため、参加者は教示に従って自身の周期を維持する戦略をとりながら、テンポが遅くなった場合、無意識的に相手の周期に依存した戦略をとっていたと考えられる。

実験2では、参加者は相手と同期することを優先するという教示を受けて、その教示に従い、意識的に相手と同期しようとしていたと考えられ、そのために、戦略の度合を変えていた可能性が考えられる。その結果、先行後行の役割分担が行われ、先行側は位相修正強度を大きくし、後行側は周期修正強度を大きくしていた。この先行後行について、参加者は先行後行の存在に気づいていなかった可能性が考えられる。人間は、一般的に負の非同期(NMA)の存在に気づかないということが調べられている[57]。NMAの度合は、1,000msのメトロノーム周期に対して、60ms程度といわれており[1]、個人差によっては、1000msを超える場合もある[38]といわれている。実験2における同期誤差の平均は、85ms程度である。また、NMAの度合は、タイミングの変動(ジッター)によって、変動する[88]といわれている。よって、参加者は意識的に相手と同期するために、無意

識的に役割分担を行い、戦略の度合を変えていた可能性が考えられる。

また、それぞれの戦略が意識的なのか、それとも無意識的なのかについては、テンポも関わっている可能性がある。例えば、文章を読むという干渉課題を含む一人での同期タッピング課題の先行研究 [36] によって、速いテンポのメトロノームに合わせることは、無意識的なものであり、遅いテンポのメトロノームに合わせることは意識的なものであることが示されている。具体的には、1,800ms 以下の比較的速いテンポでの同期タッピングでは、干渉課題を含んだ条件においても、十分にメトロノームに同期することに成功していた。しかし、メトロノームのテンポが 1,800ms より遅くなると、干渉課題を含む状態でメトロノームに合わせることは難しくなることが分かっている。そのため、遅いテンポのメトロノームと同期するためには、メトロノーム刺激に注意資源を割く必要があると結論付けられており、テンポの違いで、戦略の意識・無意識が変わる可能性を示した。

本研究では、これらの戦略の意識的戦略と無意識的戦略を、明確に分離できていない。しかし、先行研究 [36] と同様に、二重課題実験手法を用いることで、戦略の意識的側面と無意識的側面を分離して計測できる可能性がある。具体的には、主課題となる二者間リズム協調課題と注意資源を主課題に向けさせないようにする干渉課題を用意し、両課題同時に行う条件と主課題のみを行う条件で、リズム協調の戦略を比較する二重課題実験手法を用いる。このような二重課題実験手法によって、戦略における意識的側面および無意識的側面を明確に分離することができると考えられる。

4.5 2つのアプローチから見た役割分担の考察

本研究においては戦略という人間の内部メカニズムに着目するため情報処理理論的アプローチを採用した。しかし、情報処理理論的アプローチと動的システムアプローチとの関係を明らかにする必要がある。そのため、両方のアプローチを用いて、実験2の結果を説明し、両者の数理モデルに基づいて、比較を試みた。情報処理理論的アプローチからは、時間領域の線形離散モデルの一例として、位相周期修正モデル [43] を用い、動的システムアプローチからは、位相領域の非線形連続モデルの一例として蔵本モデル [89] を用いた。

4.5.1 情報処理理論的アプローチからの役割分担の考察

まず、情報処理理論的アプローチからの説明を行う。位相周期修正モデル [43] は、自身の内部テンポと同期誤差を参照にして自身のタップ時刻を修正する同期誤差修正と同期誤差を参照して自身の内部テンポを修正する周期修正から構成される人間のリズム協調のメカニズムを記述したモデルである。参加者 A のモデルは以下のように記述することができる。

$$\begin{aligned} Tap_A(k+1) &= Tap_A(k) - \alpha_A SE_{AB}(k) + t_A(k), \\ t_A(k) &= t_A(k-1) - \beta_A SE_{AB}(k-1), \end{aligned} \quad (4.1)$$

参加者 B のモデルは以下のように記述することができる。

$$\begin{aligned} Tap_B(k+1) &= Tap_B(k) - \alpha_B(-SE_{AB}(k)) + t_B(k), \\ t_B(k) &= t_B(k-1) - \beta_B(-SE_{AB}(k-1)), \end{aligned} \quad (4.2)$$

ただし、 α_A , α_B はそれぞれの参加者の同期誤差修正の度合を示し、 β_A , β_B はそれぞれの参加者の周期修正の度合を示す。また、以降は簡単のため、 $\alpha_A = \alpha_B$, $\beta_A = \beta_B$ とする。このモデルに関して、実験 2 の結果を解釈するために、パーソナルテンポ [79] と負の非同期 (NMA) の度合 [38, 75] を考慮に入れてモデルの拡張を行い、同期誤差の式を求める。

位相周期修正モデルにおいて、パーソナルテンポを考慮するために、周期修正の式に内部テンポとパーソナルテンポの差が内部テンポに影響を与える項を追加した。また、同期誤差の参照にずれが発生して負の非同期が発生するという現象を考慮するために、同期誤差を参照する部分において同期誤差に負の非同期の度合を示す値を追加した。パーソナルテンポと NMA を考慮した、参加者 A の位相周期修正モデルと参加者 B の位相周期修正モデルは以下のように記述することができる。

$$\begin{aligned} Tap_A(k+1) &= Tap_A(k) - \alpha_A SE_{AB}(k) + t_A(k), \\ t_A(k) &= t_A(k-1) - \beta_A SE_{AB}(k-1), \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} Tap_B(k+1) &= Tap_B(k) - \alpha_B(-SE_{AB}(k)) + t_B(k), \\ t_B(k) &= t_B(k-1) - \beta_B(-SE_{AB}(k-1)), \end{aligned} \quad (4.4)$$

ただし, p_A, p_B は両参加者のパーソナルテンポの周期を示し, δ_A, δ_B は負の非同期 (NMA) の度合を示す. p_A の値が小さい程参加者 A のパーソナルテンポは速いことを意味しており, δ_A の値が大きい程, 参加者 A がより刺激より早くタップする傾向があることを意味している. また, γ は両参加者のパーソナルテンポが内部テンポに影響を与える度合を示している (簡単のため, 両参加者の γ は同じ値とした). 先行後行の役割分担が発生したときの同期誤差を調べる目的で, 拡張されたモデルについて, 同期誤差の式に変換を行った.

まず, タップ時刻を示す変数 Tap を消去するための準備として, 同期誤差修正の項について, 参加者 A の式と参加者 B の式との間で差分を計算した. ただし, $\Delta\delta$ は, 両参加者の負の非同期 (NMA) の度合の差を示し, $\Delta\delta = \delta_A - \delta_B$ で求められるものとする. また, $\Delta t(k)$ は両参加者の内部テンポの差を示し, $\Delta t(k) = t_A(k) - t_B(k)$ で求められるものとする.

$$\begin{aligned} SE_{AB}(k+1) &= Tap_A(k+1) - Tap_B(k+1) \\ &= SE_{AB}(k) - 2\alpha SE_{AB}(k) - \alpha(\delta_A - \delta_B) \\ &= (1 - 2\alpha)SE_{AB}(k) - \alpha(\Delta\delta) + \Delta t(k), \end{aligned} \quad (4.5)$$

続いて, 内部テンポを示す変数 $t(k)$ を消去するための準備として, 周期修正の項について, 参加者 A の式と参加者 B の式との間で差分を計算した. ただし, Δp は, 両参加者のパーソナルテンポの差を示し, $\Delta p = p_A - p_B$ で求められるものとする.

$$\begin{aligned} \Delta t(k) &= t_A(k) - t_B(k) \\ &= \Delta t(k-1) - 2\beta SE_{AB}(k) - \beta(\Delta\delta) - \gamma(\Delta t(k-1) - \Delta p) \\ &= (1 - \gamma)\Delta t(k-1) - 2\beta SE_{AB}(k) - \beta(\Delta\delta) + \gamma\Delta p, \end{aligned} \quad (4.6)$$

上記の準備に基づいて, 同期誤差 SE_{AB} の漸化式の変換を行うと, 以下

の式が求められる。

$$\begin{aligned}
& SE_{AB}(k+1) + (\gamma - 1)SE_{AB}(k) \\
&= (1 - 2\alpha)SE_{AB}(k) - \alpha(\Delta\delta) + \Delta t(k) \\
&\quad + (\gamma - 1)(1 - 2\alpha)SE_{AB}(k-1) + \alpha(\gamma - 1)(\Delta\delta) \\
&\quad + (\gamma - 1)\Delta t(k-1) \\
&= (1 - 2\alpha - 2\beta)SE_{AB}(k) + (\gamma - 1)(1 - 2\alpha)SE_{AB}(k-1) \\
&\quad + (\alpha\gamma + \beta)\Delta\delta + \gamma\Delta p, \tag{4.7}
\end{aligned}$$

ここで、同期誤差 SE_{AB} が定常状態になると仮定して、以下のように置く。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} SE_{AB}(k) = SE_{lock}, \tag{4.8}$$

この式を先程の漸化式に代入し、 SE_{lock} について整理をすると、以下の関係式が得られる。

$$SE_{lock} = -\frac{1}{2}(\delta_A - \delta_B) + \frac{\gamma}{2\beta + 2\alpha\gamma}(p_A - p_B), \tag{4.9}$$

この式は、負の非同期 (NMA) の度合やパーソナルテンポの個人差によって、 SE_{lock} の値が決定されることを意味している。よって、実験 2 において先行後行が発生した場合、パーソナルテンポが速い参加者や負の非同期 (NMA) の度合が大きい参加者の方が先行側になっていた可能性が考えられる。

4.5.2 動的システムアプローチからの役割分担の考察

続いて、動的システムアプローチからの説明を行う。蔵本モデル [89] は、非線形運動の引き込み現象を表現するモデルである。二者間リズム協調における参加者 A と参加者 B のモデルは以下のように記述することができる。ただし、 ϕ_A, ϕ_B は両参加者の位相、 ω_A, ω_B は両参加者の固有振動数、 a_A, a_B は引き込み現象の度合を示している（以降は簡単のため、 $a = a_A = a_B$ とする）。

$$\dot{\phi}_A = \omega_A - a \sin(\phi_A - \phi_B), \quad \dot{\phi}_B = \omega_B - a \sin(\phi_B - \phi_A), \quad (4.10)$$

このモデルを用いた実験 2 の結果を解釈において、情報処理理論的アプローチと比較をするために、パーソナルテンポ [79] と負の非同期 (NMA) の度合 [38, 75] を考慮に入れてモデルの拡張を行い、位相差の式を求める。

蔵本モデルにおいて、パーソナルテンポを考慮するために、二者間リズム協調における固有振動数は認知的固有振動数であり、パーソナルテンポが認知的固有振動数にあたるとした。また、同期誤差の参照にずれが発生して負の非同期が発生するという現象を考慮するために、引き込み現象における位相差の部分に負の非同期の度合を示す値を追加した。パーソナルテンポと NMA を考慮した、参加者 A と参加者 B の二者間リズム協調における蔵本モデルは以下のように記述することができる。ただし、 ϕ は両参加者間のパーソナルテンポ（固有振動数）の差であり、 $\phi = \phi_A - \phi_B$ で求められるものとする。

$$\dot{\phi}_A = \omega_A - a \sin(\phi - \delta_A), \quad (4.11)$$

$$\dot{\phi}_B = \omega_B - a \sin(-\phi - \delta_B), \quad (4.12)$$

ここで、 ω_A, ω_B は両参加者のパーソナルテンポの角速度を示し、 δ_A, δ_B は負の非同期 (NMA) の度合を示す。 ω_A の値が大きい程参加者 A のパーソナルテンポは速いことを意味しており、 δ_A の値が大きい程、参加者 A

がより刺激より早くタップする傾向があることを意味している。先行後行の役割分担が発生したときの同期誤差を調べる目的で、拡張されたモデルについて、位相差の式に変換を行った。

まず、参加者間の位相差の式は、以下のように示すことができる。ただし、 $\Delta\omega$ は参加者間のパーソナルテンポ（認知的固有振動数）の個人差を示し、 $\Delta\omega = \omega_A - \omega_B$ で求められるものとする。

$$\begin{aligned}\dot{\phi} &= \dot{\phi}_A - \dot{\phi}_B \\ &= \Delta\omega - a(\cos\delta_A + \cos\delta_B)\sin\phi + a(\sin\delta_A - \sin\delta_B)\cos\phi,\end{aligned}\quad (4.13)$$

続いて、位相差 ϕ が十分小さい場合、つまり $|\phi| \ll 1$ の場合、以下のように近似を行うことができる。

$$\sin\phi \simeq \phi \quad (4.14)$$

$$\cos\phi \simeq 1 \quad (4.15)$$

また、負の非同期（NMA）の度合 δ が十分小さい場合、つまり $|\delta| \ll 1$ の場合、以下のように近似を行うことができる。

$$\sin\delta \simeq \delta \quad (4.16)$$

$$\cos\delta \simeq 1 \quad (4.17)$$

上記の近似を位相差にあてはめた場合、以下の式が求められる。

$$\dot{\phi} = \Delta\omega - 2a\phi + a(\delta_A - \delta_B) \quad (4.18)$$

ここで、定常状態（ $\dot{\phi} = 0$ ）における位相差 ϕ_{lock} は、以下のように得られる。

$$\phi_{lock} = \frac{1}{2}(\delta_A - \delta_B) + \frac{1}{2a}(\omega_A - \omega_B), \quad (4.19)$$

この式は、負の非同期（NMA）の度合やパーソナルテンポの個人差によって、 ϕ_{lock} の値が決定されることを意味している。よって、実験2において先行後行が発生した場合、パーソナルテンポが速い参加者や負の非同期

(NMA) の度合が大きい参加者の方が先行側になっていた可能性が考えられる。

したがって、情報処理理論的アプローチの説明からも、動的システムアプローチの説明からも、先行後行が発生したときの同期誤差は、パーソナルテンポや負の非同期 (NMA) の度合の二者間の差が関わっている可能性が示された。つまり、本研究で発生した、先行後行の関係は、パーソナルテンポと負の非同期 (NMA) を考慮することで、情報処理理論的アプローチと動的システムアプローチの両方で同様の解釈が可能であることが示された。

第5章

結論

第1章では、研究の背景、先行研究、残された課題、および、目的を示した。具体的には、まず、人間は、自身の周期の維持する戦略、相手の周期に合わせる戦略、同期誤差を修正する戦略を用いて、他者とリズム協調を行うことができるという背景を示した。続いて、人間同士のリズム協調において、テンポとタイミングの先行後行によって、戦略を変化させるのかどうかについては、十分に調べられていないという残された課題を示した。そして、二者間同期継続タッピング課題という、単純なリズム協調課題を用いて、人間同士のリズム協調における戦略のテンポ依存性とタイミング依存性を明らかにするという目的を示した。

第2章では、間同士のリズム協調における戦略のテンポ依存性を調べる目的で行った実験1について述べた。最初に提示するメトロノームの周期を700msから3,200msまで500ms刻みで変えた6条件を設けて二者間指同期継続課題を実施した。また、参加者には相手との同期より、メトロノーム周期の維持を優先するよう指示をした。試行ごとに重回帰分析を行うことで、参加者ごとの自分の周期を維持する戦略、相手の周期に合わせる戦略、同期誤差を修正する戦略の度合をそれぞれ推定した。結果として、まず、試行ごとにメトロノームのテンポより速くなった後、異なるテンポに収束して、安定したテンポでリズム協調が行われている傾向が見ら

れた。そのため、試行ごとのテンポと推定された参加者ごとの戦略の度合との間の相関関係を分析した。その結果、相手の周期に合わせる戦略の度合は、テンポが遅くなるほど大きくなる傾向が見られた。一方で、自身の周期を維持する戦略と同期誤差を修正する戦略においては、テンポとは独立している傾向が見られた。本実験結果から、遅いテンポになるほど、人間は意識的に相手の周期を参照し、自身の周期を相手の周期に合わせようとしている可能性が示唆された。また、これらの結果は、人間同士のリズム協調はメトロノーム相手のリズム協調とは異なる戦略を用いることを示している。以上より、人間はテンポによって相手の周期に合わせる戦略の度合を変える傾向が見られという点で、人間同士のリズム協調における戦略のテンポ依存性が示された。

第3章では、人間同士のリズム協調における戦略のタイミング依存性を調べる目的で行った実験2について述べた。最初に提示するメトロノームの周期を700msの1条件として二者間同期継続タッピング課題を行った。参加者にはメトロノーム周期の維持より、相手との同期を優先するよう指示をした。その結果、59試行中58試行において、参加者は、先にタップする先行側と遅れてタップする後行側に分かれた。また、リズム協調のテンポは途中で収束せず、加速を続ける傾向が見られた。そのため、戦略の度合の分析には、時系列データに非定常性が存在しても同期誤差を修正する戦略の度合を推定できる位相周期修正モデルのパラメータ推定手法、および、自身の周期を維持する戦略と相手の周期に合わせる戦略について調べることができる窓相互相関の手法を用いた。これらを用いて、先行後行間で、戦略の度合に有意な効果が見られるかどうかの分析を行った。その結果、先行側の参加者は後行側より、同期誤差を修正する戦略の度合と自身の周期を維持する戦略の度合が大きい傾向が見られた。一方で、後行側の参加者は先行側より、相手の周期に合わせる戦略の度合が大きい傾向が見られた。以上の結果より、人間同士のリズム協調はメトロノーム相手のリズム協調とは戦略と役割の関係が異なることが示唆された。また、このような先行後行側という役割分担は、一人での継続もしくは同期タッピン

グにおけるテンポの加速度合や NMA の大きさなど、個人のリズム運動の特性が役関連している可能性を考察した。以上より、人間はタイミングの先行後行によって、異なる戦略をとっている可能性がある、つまり、人間同士のリズム協調における戦略のタイミング依存性が示された。

第 4 章では、実験 1 と実験 2 の結果を統合した考察を行った。まず、本論文の実験 1 と実験 2 によって、人間同士の二者間リズム協調において、テンポが遅くなるほど相手の周期に合わせる戦略の度合を大きくするという戦略のテンポ依存性、および、先行側の参加者は同期誤差を修正する戦略の度合と自身の周期を維持する戦略の度合が大きく、後行側の参加者は相手の周期に合わせる戦略の度合が大きいという戦略のタイミング依存性が示されたことを確認されたことをまとめた。続いて、リズム協調において、テンポが加速し続けるラッシュと呼ばれる現象が、先行後行の役割分担の発生や、戦略のタイミング依存性の発生にかかわっている可能性を示唆した。最後に、参加者にテンポの維持を優先するよう教示を行った実験 1 ではラッシュは途中で止まり、参加者にタイミングの同期を優先するよう教示を行った実験 2 ではラッシュが途中で止まらなかったことから、タイミングの同期を無視して、テンポの維持を優先させるような教示がラッシュを途中で止めるのかにかかわった可能性が示唆された。

以上より、本研究は次のように結論される。素人による単純な二者間のリズム協調における戦略は、テンポ依存性およびタイミング依存性が存在する。具体的にはテンポが遅くなるほど相手の周期に合わせる戦略の度合いが大きくなる。また、タイミングの先行側は同期誤差を修正する戦略と自身のテンポを維持する戦略の度合いが相対的に大きく、後行側の参加者は相手の周期に合わせる戦略の度合いが相対的に大きい。本結論は今後のリズム協調における戦略の分析においてはタイミングに見られる役割とテンポを考慮すること、および、テンポ維持や相手のタイミングに合わせるなどのリズム協調における意図の重要性を示している。

第6章

展望

6.1 事前の役割分担や個人の性格傾向が戦略に与える影響

音楽の合奏においては、指揮者やコンサートマスターのように事前に役割が与えられることが多い。このような役割は、同期タイミングの先行後行という役割分担や周期の依存関係に影響を与えることが明らかとなっている。しかしながら、本研究ではこのような役割を事前に参加者に与えなかった。そのため、事前にリーダーとフォロワといった役割を与えた場合に、他者とのリズム協調においてどのような戦略をとるのか、また、事前の役割がリズム協調に資するかを明らかにする必要がある。例えば、先行研究においては、一人のテンポを保つ役割のリーダーとリーダーに同期する役割のフォロワからなる3者間指タッピング実験が行われた [15]。そこでは役割に応じて、位相修正強度を意識的に変えることが報告されている。リーダーは位相修正強度を下げ、フォロワは上げるという戦略が取られていた。また、4名での四重奏の音楽演奏 [10] においては楽器による役割分担によって、2名の先行側と、2名の後行側に分かれて四重奏を成立させており、相手の周期への依存度も役割によって変化させていた。これらのような事前な役割を与えた状態のリズム協調において、本研究で示した3

つの戦略をどのように変化させるのかをさらに詳細に調べることで、より普遍的な同調メカニズムについて明らかにできると考えられる。

例えば、二名の参加者を自身の周期を維持するリーダーの役割と相手の周期に合わせるフォロワの役割を分けた場合と、お互いに相手の周期に合わせてるように指示した場合は、先行後行の役割分担の発生や、リズム協調の安定性にどのような影響を与えるのかを調べることが考えられる。加えて、プロフェッショナルとしての音楽の訓練を受けている者と受けていない者を比較することにより、プロフェッショナルは意識的にどのように事前にも与えられた役割分担を踏まえたうえでリズム協調の戦略を変化させるのかについて明らかにできるであろう。また、人間には、性格によって、リズム協調における戦略が変わる可能性があると考えられる。例えば、外向的な性格の人間は、内向的な性格の人間よりも、パーソナルテンポが速い傾向があることが調べられている [90]。つまり、本研究の考察と組み合わせると、外向的な人間ほど、リズム協調において、リーダーとしてタイミングが先行する傾向を示す可能性が考えられる。つづいて、質問紙において、社会的にリーダーの傾向を示す人間は、人間に周期を合わせるタイプのメトロノームとの同期タッピング実験において、同期しやすいと答える傾向を示している [81]。この結果は、社会的にリーダーの傾向を示す人間は、二者間リズム協調においても、無意識的にリーダーや先行側の役割を担うようになるという仮説が考えられる。そのため、参加者の性格に合わせた役割分担を与えた場合と、そうでない場合との間に、リズム協調の安定性などの違いが生じるかを調べることで、後述のリズム崩壊の防止や、リズム協調ロボットの開発に応用させることができる可能性が考えられる。

6.2 音楽におけるリズム協調の崩壊の原因と対策の研究

一つ目に、プロの音楽訓練の経験を持つ参加者が本研究と同様の実験を行った場合、テンポやタイミングの特徴や戦略の傾向が高度な訓練を受けていない人と比べてどのように変化するかを調べることは、有用であると考えられる。

タッピングなどのリズム協調における音楽訓練の経験の影響に関して、同期やテンポ維持の精度の面で様々な先行研究が行われており [91, 92]、音楽の訓練の中でも、ドラマーなど、プロの音楽の中でも、より高度なリズム訓練を受けた人は同期の精度などが向上するが、一般的なプロのリズム訓練を受けた人は、音楽訓練を受けていない人と差は見られなかったという結果が出ている [92]。

二つ目に、ラッシュ [86] に見られる、音楽におけるリズム協調の崩壊が起こる原因や崩壊を防ぐプロの戦略の研究への応用が期待できる。

本研究の総合考察において、リズム協調の参加者それぞれが相手の周期を意識的に無視して、自身の周期を意識的に維持しようとすることで、ラッシュを防ぎ、安定したテンポでリズム協調を達成させることが可能になる可能性が示唆された。しかしながら、実際のリズム協調の場面において、そのような戦略を意識することで、ラッシュを防ぐことができるのか、また、安定したテンポでリズム協調を実現させることができるのかどうかについては、さらなる実験による検証が必要である。また、仮に、先述の戦略で、安定したテンポでのリズム協調が達成された場合においても、実際のプロの演奏者らが安定したテンポでリズム協調を達成させるために意識している戦略と異なる部分があるのかについても、研究が必要であると考えられる。

6.3 役割を考慮したリズム協調ロボットの開発

相手の戦略を把握し、相手に合わせた戦略をとるようなシステムを導入することで、より人間にとって自然なリズム協調ができるロボットなどが実現する可能性が期待できる。

まず、リズム協調のモデルを利用して、ロボットに人間と自然に同期させようとする研究 [93] やコミュニケーションロボットの同期の仕方と利用者の性格の組み合わせとロボットへの印象を調べた研究 [94] が存在する。

人間同士で同期を行うことには、自身の感情、お互いに対する対人認知、向社会的な行動に、良い影響を与えることが調べられている [95]。具体的には、参加者は、他者と同期した運動をすることで、自身の感情がよくなり [96]、相手に対して、良い印象を持つようになり [97]、より社会のためになるような行動をとるようになる [98,99] 傾向があることが分かっている。一方で、必ずしも同期すればよいというわけではなく、同期の仕方によっては、相手の理不尽な要求に従ってしまうという報告がある [100]。

そのため、本研究成果を応用し、協調戦略の変化が自身に感情、対人認知、行動にどのような影響を及ぼすかを調べる必要がある。例えば、リズム協調において、リーダーとして周期を維持する戦略やをとっていた人と、フォロワとして相手の周期に合わせる戦略をとっていた人との間で、リズム協調後の行動にどのような差を生じるのかを調べることは、利用者に良い行動を促す効果を活かし、理不尽な要求に従ってしまう効果を抑制したりすることに応用できる可能性がある。このように、本研究成果を応用し、ロボットの用途や使用者に合わせた制御戦略を用いることで、より同期の効果を活かし、コミュニケーションロボットの魅力や効果を向上させることに応用できる可能性が期待できる。

謝辞

まず、本研究を推進するにあたり、学部学生時代の研究の最初から、本研究の最後まで熱心な指導を賜った指導教官の三宅美博教授に深い感謝の意を表させていただきます。

続いて、本研究において課題の設定から実験装置の準備、実験の実行、本論文の際に的確な助言をくださった緒方大樹特任准教授に対し心より感謝を申し上げます。

更に、中間発表、予備審査、論文発表会、最終審査において、重要な質問や的確な助言をしてくださった、石井秀明教授、瀧ノ上正浩教授、山村雅幸教授、小野功教授に対し、感謝を申し上げたいと思っております。

また、共同実験者として、課題の設定から実験装置の準備、実験の実行、データの解析において、協力していただいた、田中悠毅様にお礼を申し上げます。

そして、実験や生活など、様々な面で様々なご協力いただいた、東京工業大学三宅研究室、同矢野研究室、同柴田研究室の皆様にお礼を申し上げます。また、本研究における模擬実験を含む実験に参加者としてご協力いただいた研究室内外の皆様にも、お礼を申し上げます。

最後にこれまでの生活を支え見守り続けていただいた、家族の皆様への深い感謝の意を表し、謝辞といたします。

参考文献

- [1] Bruno H Repp. Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic bulletin & review*, 12(6):969–992, 2005.
- [2] Bruno H Repp and Yi-Huang Su. Sensorimotor synchronization: a review of recent research (2006–2012). *Psychonomic bulletin & review*, 20(3):403–452, 2013.
- [3] Sukhvinder S Obhi and Natalie Sebanz. Moving together: toward understanding the mechanisms of joint action, 2011.
- [4] Natalie Sebanz, Harold Bekkering, and Günther Knoblich. Joint action: bodies and minds moving together. *Trends in cognitive sciences*, 10(2):70–76, 2006.
- [5] Ari Z Zivotofsky and Jeffrey M Hausdorff. The sensory feedback mechanisms enabling couples to walk synchronously: An initial investigation. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 4(1):1–5, 2007.
- [6] Niek R van Ulzen, Claudine JC Lamoth, Andreas Daffertshofer, Gün R Semin, and Peter J Beek. Characteristics of instructed and uninstructed interpersonal coordination while walking side-by-side. *Neuroscience letters*, 432(2):88–93, 2008.
- [7] Claire Chambers, Konrad Kording, Gaiqing Kong, and Kunlin

- Wei. Synchronization of walking “in the wild” . 2018.
- [8] Michael J Richardson, Kerry L Marsh, Robert W Isenhower, Justin RL Goodman, and Richard C Schmidt. Rocking together: Dynamics of intentional and unintentional interpersonal coordination. *Human movement science*, 26(6):867–891, 2007.
- [9] Max M Louwerse, Rick Dale, Ellen G Bard, and Patrick Jeuniaux. Behavior matching in multimodal communication is synchronized. *Cognitive science*, 36(8):1404–1426, 2012.
- [10] Renee Timmers, Satoshi Endo, Adrian Bradbury, and Alan M Wing. Synchronization and leadership in string quartet performance: a case study of auditory and visual cues. *Frontiers in Psychology*, 5:645, 2014.
- [11] Jiří Mates. A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence. *Biological cybernetics*, 70(5):463–473, 1994.
- [12] Jiri Mates. A model of synchronization of motor acts to a stimulus sequence. ii. stability analysis, error estimation and simulations. *Biological Cybernetics*, 70(5):475–484, 1994.
- [13] Ivana Konvalinka, Peter Vuust, Andreas Roepstorff, and Chris D Frith. Follow you, follow me: continuous mutual prediction and adaptation in joint tapping. *Quarterly journal of experimental psychology*, 63(11):2220–2230, 2010.
- [14] Masahiro Okano, Masahiro Shinya, and Kazutoshi Kudo. Paired synchronous rhythmic finger tapping without an external timing cue shows greater speed increases relative to those for solo tapping. *Scientific Reports*, 7(1):1–11, 2017.
- [15] Taiki Ogata, Takahiro Katayama, and Jun Ota. Cross-feedback with partner contributes to performance accuracy in finger-tapping rhythm synchronization between one leader and two followers. *Scientific reports*, 9(1):1–12, 2019.

-
- [16] Nori Jacoby, Rainer Polak, and Justin London. Extreme precision in rhythmic interaction is enabled by role-optimized sensorimotor coupling: analysis and modelling of west african drum ensemble music. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1835):20200331, 2021.
- [17] Martin Clayton, Kelly Jakubowski, Tuomas Eerola, Peter E Keller, Antonio Camurri, Gualtiero Volpe, and Paolo Alborn. Interpersonal entrainment in music performance: theory, method, and model. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 38(2):136–194, 2020.
- [18] Justin London. *Hearing in time: Psychological aspects of musical meter*. Oxford University Press, 2012.
- [19] Dorottya Fabian, Renee Timmers, and Emery Schubert. *Expressiveness in music performance: Empirical approaches across styles and cultures*. Oxford University Press, USA, 2014.
- [20] Hermann Haken. *Principles of brain functioning: a synergetic approach to brain activity, behavior and cognition*, volume 67. Springer Science & Business Media, 2013.
- [21] Werner Goebel and Caroline Palmer. Synchronization of timing and motion among performing musicians. *Music Perception*, 26(5):427–438, 2009.
- [22] Anna Zamm, Peter Q Pfordresher, and Caroline Palmer. Temporal coordination in joint music performance: effects of endogenous rhythms and auditory feedback. *Experimental Brain Research*, 233(2):607–615, 2015.
- [23] Knight Dunlap. Reaction to rhythmic stimuli with attempt to synchronize. *Psychological Review*, 17(6):399, 1910.
- [24] Ishiro Miyake. *Researches on rhythmic action*. Yale University, 1901.

- [25] Herbert Woodrow. The effect of rate of sequence upon the accuracy of synchronization. *Journal of Experimental Psychology*, 15(4):357, 1932.
- [26] Paul Fraisse, Pierre Pichot, and G Clairouin. Les aptitudes rythmiques. etude comparée des oligophrenes et des enfants normaux. *Journal de Psychologie Normale et pathologique*, 1949.
- [27] John Albertus Michon and NJL Van der Valk. A dynamic model of timing behavior. *Acta Psychologica*, 27:204–212, 1967.
- [28] John Albertus Michon and Pays-Bas). Instituut voor Zintuigfysiologie RVO-TNO (Soesterberg. *Timing in temporal tracking*. Institute for Perception RVO-TNO Soesterberg, The Netherlands, 1967.
- [29] Alan M Wing and AB Kristofferson. The timing of interresponse intervals. *Perception & Psychophysics*, 13(3):455–460, 1973.
- [30] Alan M Wing and Alfred B Kristofferson. Response delays and the timing of discrete motor responses. *Perception & Psychophysics*, 14(1):5–12, 1973.
- [31] Edmond Hiriartborde and Paul Fraisse. *Les aptitudes rythmiques*. FeniXX, 1968.
- [32] Rupert Manfred Thackray. *An investigation into rhythmic abilities*. Number 4. Novello, 1969.
- [33] Guy Madison. Variability in isochronous tapping: higher order dependencies as a function of intertap interval. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(2):411, 2001.
- [34] Jeff Pressing and Garry Jolley-Rogers. Spectral properties of human cognition and skill. *Biological cybernetics*, 76(5):339–347, 1997.
- [35] Bruno H Repp and Amandine Penel. Auditory dominance in tem-

-
- poral processing: new evidence from synchronization with simultaneous visual and auditory sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(5):1085, 2002.
- [36] Yoshihiro Miyake, Yohei Onishi, and Ernst Poppel. Two types of anticipation in synchronization tapping. *Acta neurobiologiae experimentalis*, 64(3):415–426, 2004.
- [37] Bruno H Repp, Peter E Keller, and Nori Jacoby. Quantifying phase correction in sensorimotor synchronization: empirical comparison of three paradigms. *Acta psychologica*, 139(2):281–290, 2012.
- [38] Gisa Aschersleben. Temporal control of movements in sensorimotor synchronization. *Brain and cognition*, 48(1):66–79, 2002.
- [39] Bruno H Repp. On the nature of phase attraction in sensorimotor synchronization with interleaved auditory sequences. *Human Movement Science*, 23(3-4):389–413, 2004.
- [40] C Voillaume. Modèles pour l'étude de la régulation des mouvements cadencés. *L'annee Psychologique*, 71(2):347–358, 1971.
- [41] David Hary and George P Moore. Temporal tracking and synchronization strategies. *Human Neurobiology*, 4(2):73–79, 1985.
- [42] David Hary and George P Moore. On the performance and stability of human metronome-synchronization strategies. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 40(2):109–124, 1987.
- [43] Hans-Henning Schulze, Andreas Cordes, and Dirk Vorberg. Keeping synchrony while tempo changes: Accelerando and ritardando. *Music Perception*, 22(3):461–477, 2005.
- [44] H-H Schulze. The error correction model for the tracking of a random metronome: Statistical properties and an empirical test.

- In *Time, action and cognition*, pages 275–286. Springer, 1992.
- [45] David Hary and George P Moore. Synchronizing human movement with an external clock source. *Biological Cybernetics*, 56(5):305–311, 1987.
- [46] MH Thaut, B Tian, and MR Azimi-Sadjadi. Rhythmic finger tapping to cosine-wave modulated metronome sequences: Evidence of subliminal entrainment. *Human movement science*, 17(6):839–863, 1998.
- [47] KM Stephan, MH Thaut, G Wunderlich, W Schicks, B Tian, Lutz Tellmann, T Schmitz, Hans Herzog, GC McIntosh, Rüdiger J Seitz, et al. Conscious and subconscious sensorimotor synchronization—prefrontal cortex and the influence of awareness. *Neuroimage*, 15(2):345–352, 2002.
- [48] Dirk Vorberg and Alan Wing. Modeling variability and dependence in timing. In *Handbook of perception and action*, volume 2, pages 181–262. Elsevier, 1996.
- [49] Bruno H Repp. Automaticity and voluntary control of phase correction following event onset shifts in sensorimotor synchronization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(2):410, 2002.
- [50] Bruno H Repp. Perception of timing is more context sensitive than sensorimotor synchronization. *Perception & Psychophysics*, 64(5):703–716, 2002.
- [51] Bruno H Repp. Phase correction following a perturbation in sensorimotor synchronization depends on sensory information. *Journal of Motor Behavior*, 34(3):291–298, 2002.
- [52] Bruno H Repp. Phase correction in sensorimotor synchronization: Nonlinearities in voluntary and involuntary responses to perturbations. *Human Movement Science*, 21(1):1–37, 2002.

-
- [53] Bruno H Repp. Does an auditory perceptual illusion affect on-line auditory action control? the case of (de) accentuation and synchronization. *Experimental brain research*, 168(4):493–504, 2006.
- [54] B. H. Repp. Perfect phase correction in synchronization with slow auditory sequences. *Journal of Motor Behavior*, 40(5):363–367, 2008.
- [55] David A Engström, JA Scott Kelso, and Tom Holroyd. Reaction-anticipation transitions in human perception-action patterns. *Human movement science*, 15(6):809–832, 1996.
- [56] Jiří Mates, Ulrike Müller, Tomáš Radil, and Ernst Pöppel. Temporal integration in sensorimotor synchronization. *Journal of cognitive neuroscience*, 6(4):332–340, 1994.
- [57] Gisa Aschersleben. Effects of training on the timing of simple repetitive movements. *Topics in cognitive psychology*, pages 135–150, 2003.
- [58] Nadine Pecenka and Peter E Keller. The role of temporal prediction abilities in interpersonal sensorimotor synchronization. *Experimental brain research*, 211(3):505–515, 2011.
- [59] Ivana Konvalinka, Markus Bauer, Carsten Stahlhut, Lars Kai Hansen, Andreas Roepstorff, and Chris D Frith. Frontal alpha oscillations distinguish leaders from followers: multivariate decoding of mutually interacting brains. *Neuroimage*, 94:79–88, 2014.
- [60] Takeshi Takenaka, Taiki Ogata, and Kanji Ueda. Temporal co-creation between self and others with multi-sensory inputs. *Advanced Engineering Informatics*, 20(3):321–333, 2006.
- [61] Elzbieta Szelag, Joanna Kowalska, Krystyna Rymarczyk, and Ernst Pöppel. Duration processing in children as determined

- by time reproduction: implications for a few seconds temporal window. *Acta Psychologica*, 110(1):1–19, 2002.
- [62] William James, Frederick Burkhardt, Fredson Bowers, and Ignas K Skrupskelis. *The principles of psychology*, volume 1. Macmillan London, 1890.
- [63] Ernst Pöppel. Time perception. In *Perception*, pages 713–729. Springer, 1978.
- [64] Paul Fraisse. Perception and estimation of time. *Annual review of psychology*, 35(1):1–37, 1984.
- [65] Richard A Block. Models of psychological time. 1990.
- [66] Ernst Pöppel. Temporal mechanisms in perception. *International review of Neurobiology*, pages 185–185, 1994.
- [67] Ernst Pöppel. A hierarchical model of temporal perception. *Trends in cognitive sciences*, 1(2):56–61, 1997.
- [68] Marc Wittmann. Time perception and temporal processing levels of the brain. *Chronobiology international*, 16(1):17–32, 1999.
- [69] James C Craig. A constant error in the perception of brief temporal intervals. *Perception & Psychophysics*, 13(1):99–104, 1973.
- [70] Joyce Levis Goldfarb and Sanford Goldstone. Time judgment: A comparison of filled and unfilled durations. *Perceptual and Motor Skills*, 1963.
- [71] Nori Jacoby, Naftali Tishby, Bruno H Repp, Merav Ahissar, and Peter E Keller. Parameter estimation of linear sensorimotor synchronization models: phase correction, period correction, and ensemble synchronization. *Timing & Time Perception*, 3(1-2):52–87, 2015.
- [72] Nori Jacoby, Peter E Keller, Bruno H Repp, Merav Ahissar, and Naftali Tishby. Lower bound on the accuracy of parameter estimation methods for linear sensorimotor synchronization models.

-
- Timing & Time Perception*, 3(1-2):32–51, 2015.
- [73] Steven M Boker, Jennifer L Rotondo, Minquan Xu, and Kadijah King. Windowed cross-correlation and peak picking for the analysis of variability in the association between behavioral time series. *Psychological methods*, 7(3):338, 2002.
- [74] Benjamin M Bolker, Mollie E Brooks, Connie J Clark, Shane W Geange, John R Poulsen, M Henry H Stevens, and Jada-Simone S White. Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution. *Trends in ecology & evolution*, 24(3):127–135, 2009.
- [75] M Billon, A Semjen, J Cole, and G Gauthier. The role of sensory information in the production of periodic finger-tapping sequences. *Experimental Brain Research*, 110(1):117–130, 1996.
- [76] Paul Fraisse. Rhythm and tempo. *The psychology of music*, 1:149–180, 1982.
- [77] Frank L Smoll. Preferred tempo in performance of repetitive movements. *Perceptual and Motor skills*, 40(2):439–442, 1975.
- [78] Thomas Willard Harrell. Factors influencing preference and memory for auditory rhythm. *The Journal of General Psychology*, 17(1):63–104, 1937.
- [79] Horacio JA Rimoldi. Personal tempo. *The Journal of Abnormal and Social Psychology*, 46(3):283, 1951.
- [80] Frank L Smoll. Between-days consistency in personal tempo. *Perceptual and Motor Skills*, 41(3):731–734, 1975.
- [81] Merle T Fairhurst, Petr Janata, and Peter E Keller. Leading the follower: an fmri investigation of dynamic cooperativity and leader–follower strategies in synchronization with an adaptive virtual partner. *Neuroimage*, 84:688–697, 2014.
- [82] Hugo Merchant, Wilbert Zarco, Oswaldo Pérez, Luis Prado, and

- Ramón Bartolo. Measuring time with different neural chronometers during a synchronization-continuation task. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(49):19784–19789, 2011.
- [83] Suzanne T Witt, Angela R Laird, and M Elizabeth Meyerand. Functional neuroimaging correlates of finger-tapping task variations: an ale meta-analysis. *Neuroimage*, 42(1):343–356, 2008.
- [84] Christian Gerloff, Jacob Richard, Jordan Hadley, Andrew E Schulman, Manabu Honda, and Mark Hallett. Functional coupling and regional activation of human cortical motor areas during simple, internally paced and externally paced finger movements. *Brain: a journal of neurology*, 121(8):1513–1531, 1998.
- [85] Penelope A Lewis, Alan M Wing, Paul A Pope, Peter Praamstra, and R Chris Miall. Brain activity correlates differentially with increasing temporal complexity of rhythms during initialisation, synchronisation, and continuation phases of paced finger tapping. *Neuropsychologia*, 42(10):1301–1312, 2004.
- [86] John F Colson. *Conducting and rehearsing the instrumental music ensemble: Scenarios, priorities, strategies, essentials, and repertoire*. Scarecrow Press, 2012.
- [87] Thomas Wolf and Günther Knoblich. Joint rushing alters internal timekeeping in non-musicians and musicians. *Scientific Reports*, 12(1):1190, 2022.
- [88] Alan M Wing, Michail Dumas, and Andrew E Welchman. Combining multisensory temporal information for movement synchronisation. *Experimental brain research*, 200:277–282, 2010.
- [89] Yoshiki Kuramoto and Toshio Tsuzuki. On the formation of dissipative structures in reaction-diffusion systems: Reductive perturbation approach. *Progress of Theoretical Physics*, 54(3):687–699, 1975.

-
- [90] Y Rim. Personal tempo, personality, cognitive speed and cognitive performance. *Personality and Individual Differences*, 2(4):336–338, 1981.
- [91] Bruno H Repp. Sensorimotor synchronization and perception of timing: effects of music training and task experience. *Human movement science*, 29(2):200–213, 2010.
- [92] Vanessa Krause, Bettina Pollok, and Alfons Schnitzler. Perception in action: the impact of sensory information on sensorimotor synchronization in musicians and non-musicians. *Acta psychologica*, 133(1):28–37, 2010.
- [93] Tariq Iqbal, Samantha Rack, and Laurel D Riek. Movement coordination in human–robot teams: a dynamical systems approach. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(4):909–919, 2016.
- [94] Chidchanok Thepsoonthorn, Ken-ichiro Ogawa, and Yoshihiro Miyake. The relationship between robot’ s nonverbal behaviour and human’ s likability based on human’ s personality. *Scientific reports*, 8(1):8435, 2018.
- [95] Reneeta Mogan, Ronald Fischer, and Joseph A Bulbulia. To be in synchrony or not? a meta-analysis of synchrony’s effects on behavior, perception, cognition and affect. *Journal of Experimental Social Psychology*, 72:13–20, 2017.
- [96] Laura Galbusera, Michael Finn, Wolfgang Tschacher, and Miriam Kyselo. Interpersonal synchrony feels good but impedes self-regulation of affect. *Scientific reports*, 9(1):1–12, 2019.
- [97] Michael J Hove and Jane L Risen. It’s all in the timing: Interpersonal synchrony increases affiliation. *Social cognition*, 27(6):949–960, 2009.
- [98] Piercarlo Valdesolo and David DeSteno. Synchrony and the social tuning of compassion. *Emotion*, 11(2):262, 2011.

-
- [99] Paul Reddish, Joseph Bulbulia, and Ronald Fischer. Does synchrony promote generalized prosociality? *Religion, Brain & Behavior*, 4(1):3–19, 2014.
- [100] Scott Wiltermuth. Synchrony and destructive obedience. *Social Influence*, 7(2):78–89, 2012.

研究業績

原著論文

Kazuto Kimura, Taiki Ogata, and Yoshihiro Miyake. "Effects of a Partner's Tap Intervals on an Individual's Timing Control Increase in Slow-tempo Dyad Synchronisation using Finger-Tapping." *Scientific Reports*, Vol. 10, Article number 8237, pp. 1-8 (2020)

Kazuto Kimura, Yuki Tanaka, Taiki Ogata, and Yoshihiro Miyake. "Preceding and trailing role-taking in dyad synchronization using finger tapping." *Scientific Reports*, Vol. 13, Article number 9861, pp. 1-9 (2023)

国内会議論文（査読なし）

木村和人，長尾嵩利，小川健一 朗，三宅美博，協調タッピングにおけるタイミング制御モデルの解析，第23回創発システム・シンポジウム「創発夏の学校 2017」，p. 1（2017年9月）

木村和人，緒方大樹，三宅美博，二者間の協調タッピングにおいてテンポがタイミング制御に与える影響，第31回自律分散システム・シンポジウム，pp. 1-4（2019年1月）

共著論文（国内会議）

緒方大樹，木村和人，田中悠毅，三宅美博，二者間同期リズム生成におけるタイミング生成のテンポ依存性，第20回システムインテグレーション部門講演会（SI2019），pp. 1809-1810（2019年12月）

田中悠毅，木村和人，緒方大樹，三宅美博，二者間協調リズム生成における位相の非対称性とタイミング制御，第33回自律分散システム・シンポジウム，pp. 50-55（2021年3月）

小池由夏，木村和人，田中悠毅，緒方大樹，三宅美博，二者間リズム同調のタイミング制御に対する時間遅れの影響，第33回自律分散システム・シンポジウム，pp. 44-49（2021年3月）