

身体-環境システムにおける両手協調ダイナミクス

児玉 謙太郎

博士（情報学）

総合研究大学院大学

複合科学研究科

情報学専攻

平成 27 年度

(2015)

本論文は総合研究大学院大学複合科学研究科情報学専攻に
博士（情報学）授与の要件として提出した博士論文である。

審査委員：

稲邑 哲也（主査）	国立情報学研究所／総合研究大学院大学
坊農 真弓	国立情報学研究所／総合研究大学院大学
三嶋 博之	早稲田大学
佐藤 健	国立情報学研究所／総合研究大学院大学
山田 誠二	国立情報学研究所／総合研究大学院大学

（主査以外はアルファベット順）

Bimanual coordination dynamics in body-environment system

Kentaro Kodama

DOCTOR OF

PHILOSOPHY

Department of Informatics

School of Multidisciplinary Sciences

The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

2015

A dissertation submitted to the Department of Informatics,
School of Multidisciplinary Sciences,
The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)
in partial fulfillment of the requirements for
the degree of Doctor of Philosophy

Advisory Committee:

Tetsunari Inamura (Chair)	National Institute of Informatics/ The Graduate University for Advanced Studies
Mayumi Bono	National Institute of Informatics/ The Graduate University for Advanced Studies
Hiroyuki Mishima	Waseda University
Ken Sato	National Institute of Informatics/ The Graduate University for Advanced Studies
Seiji Yamada	National Institute of Informatics/ The Graduate University for Advanced Studies

(Alphabet order of last name except chair)

目次

要旨	10
第 1 章 序章	1
第 1 節 目的と背景	1
第 2 節 方法	2
第 3 節 位置づけと意義	2
第 4 節 本論文の構成	3
第 2 章 身体運動に関する先行研究	4
第 1 節 知覚・運動研究の理論的背景	4
第 2 節 知覚・運動の伝統的理論	7
第 3 節 J. J. Gibson と N. A. Bernstein	12
第 4 節 複雑系科学と身体運動研究	18
第 5 節 関連領域の先行研究	21
第 6 節 本研究の仮説	29
第 3 章 環境との接触が体肢間協調に及ぼす影響（実験 1）	34
第 1 節 目的	34
第 2 節 方法	34
第 3 節 結果	39
第 4 節 考察	47
第 1 項 2 本指条件	47
第 2 項 4 本指条件	48
第 5 節 要約	48
第 4 章 指先の環境特性が体肢間協調と姿勢に及ぼす影響（実験 2）	50
第 1 節 目的	50
第 2 節 方法	50
第 3 節 結果	57
第 1 項 体肢間協調の分析	57
第 2 項 姿勢の分析	65
第 3 項 体肢-姿勢間協調の分析	79
第 4 節 考察	104
第 1 項 分析 1：体肢間協調の安定性（SD ϕ ）	104
第 2 項 分析 2：体肢間協調の協調性（CRQA）	105
第 3 項 分析 3：姿勢の安定性（L）	106
第 4 項 分析 4：姿勢の組織化（DFA）	106
第 5 項 分析 5：姿勢の多重性（MWA）	108

第 6 項	分析 6：体肢-姿勢間協調の協調性 (CRQA)	109
第 7 項	総合考察	111
第 5 章	姿勢要因が体肢間協調に及ぼす影響 (実験 3)	113
第 1 節	目的	113
第 2 節	方法	116
第 3 節	結果	118
第 2 項	体肢間協調の分析	118
第 3 項	姿勢の分析	126
第 4 項	体肢-姿勢間協調の分析	140
第 4 節	考察	167
第 1 項	分析 1：体肢間協調の安定性 ($SD \phi$)	167
第 2 項	分析 2：体肢間協調の協調性 (CRQA)	168
第 3 項	分析 3：姿勢の安定性 (L)	169
第 4 項	分析 4：姿勢の組織化 (DFA)	170
第 5 項	分析 5：姿勢の多重性 (MWA)	171
第 6 項	分析 6：体肢-姿勢間協調の協調性 (CRQA)	172
第 7 項	総合考察	175
第 6 章	総括的議論	178
第 1 節	本研究の成果の要約	178
第 2 節	結論	180
第 3 節	位置づけと意義	182
第 4 節	今後の課題	185
謝辞		187
参考文献		188

目次

図 2-1 : 複雑系のイメージ	6
図 2-2 : 鍵盤支配型モデル	9
図 2-3 : 計算論的モデル	10
図 2-4 : シナジー	14
図 2-5 : 生態学的モデル	17
図 2-6 : 自己組織化モデル	20
図 2-7 : Kelso(1984)が実施した指振り課題	21
図 2-8 : HKB モデル	22
図 2-9 : テンセグリティー構造からなる 20 面体	27
図 2-10 : 張力の要素と圧縮力の要素からなる身体モデル	27
図 2-11 : 本研究の位置づけ	31
図 3-1 : 実験状況	35
図 3-2 : 実験条件	36
図 3-3 : $SD\phi$	40
図 3-4 : %REC	42
図 3-5 : Maxline	44
図 3-6 : Averageline	46
図 4-1 : 実験状況	52
図 4-2 : 実験条件	53
図 4-3 : $SD\phi$	58
図 4-4 : %Recurrence	60
図 4-5 : Maxline	62
図 4-6 : Averageline	64
図 4-7 : L	66
図 4-8 : x 成分の速度データについての FS 指数	68
図 4-9 : x 成分の位置データについての FS 指数	70
図 4-10 : y 成分の速度データについての FS 指数	72
図 4-11 : y 成分の位置データについての FS 指数	74
図 4-12 : x 成分の位置データについての MFS 幅	76
図 4-13 : x 成分の位置データについての MFS 幅	78
図 4-14 : L_x についての %Recurrence	80
図 4-15 : R_x についての %Recurrence	82
図 4-16 : L_y についての %Recurrence	84
図 4-17 : R_y についての %Recurrence	86

図 4-18 : L _x についての Maxline	88
図 4-19 : R _x についての Maxline	90
図 4-20 : L _y についての Maxline.....	92
図 4-21 : R _y についての Maxline	94
図 4-22 : L _x についての Averageline	96
図 4-23 : R _x についての Averageline	98
図 4-24 : L _y についての Averageline.....	100
図 4-25 : R _y についての Averageline	102
図 5-1 : 実験条件	114
図 5-2 : 実験状況	115
図 5-3 : 支持面 Soft 条件でを使用したバランスパッド	116
図 5-4 : SDφ	119
図 5-5 : %Recurrence	121
図 5-6 : Maxline	123
図 5-7 : Averageline	125
図 5-8 : L.....	127
図 5-9 : x 成分の速度情報について FS 指数	129
図 5-10 : x 成分の位置情報について FS 指数	131
図 5-11 : y 成分の速度情報について FS 指数.....	133
図 5-12 : y 成分の位置情報について FS 指数	135
図 5-13 : x 成分の位置データについての MFS 幅.....	137
図 5-14 : y 成分の位置データについての MFS 幅.....	139
図 5-15 : L _x についての%Recurrence	141
図 5-16 : R _x についての%Recurrence	143
図 5-17 : L _y についての%Recurrence	145
図 5-18 : R _y についての%Recurrence	147
図 5-19 : L _x についての Maxline	150
図 5-20 : R _x についての Maxline	152
図 5-21 : L _y についての Maxline.....	154
図 5-22 : R _y についての Maxline	156
図 5-23 : L _x についての Averageline	159
図 5-24 : R _x についての Averageline	161
図 5-25 : L _y についての Averageline.....	163
図 5-26 : R _y についての Averageline	165
図 6-1 : 環境-身体 (全体 : 姿勢) -身体 (部分 : 体肢) の入れ子と影響関係....	181
図 6-2 : 体肢~姿勢の影響関係の非対称性	181

表 目次

表 3-1：実験 1 のメトロノーム周波数の設定.....	37
表 4-1：指先が接触する環境特性（タップ面の特性）	53
表 4-2：実験 2 のメトロノーム周波数の設定.....	54
表 5-1：実験 3 のメトロノーム周波数の設定.....	117

要旨

本研究は、身体-環境システムという観点から、両手の体肢間協調ダイナミクスに、環境と身体（体肢）の接触と、環境への定位としての姿勢が及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。身体-環境システムとは、身体運動研究の分野において、身体運動をそれが遂行される環境との関係から捉え、身体-環境間、身体要素間の相互作用から創発する現象とみなす立場から捉えた際の身体と環境からなるシステムのことである。また、体肢間協調とは、複数の体肢が特定の時空間的パターンを維持しつつ運動することである。身体運動の研究分野では、古くから、体肢の運動がそれを支える姿勢と分離できないこと、両者が階層的な入れ子関係にあること、身体はシステムとして捉えられること、が理論的に指摘されてきた。一方、心理学・認知科学分野でのシステム論的アプローチによる身体運動の基礎研究（実験的研究）では、手足・指先などの体肢の運動と全身の姿勢とは別々に研究され、既存のモデルにおいても両者の関係は検討されていない。その背景には、両者を同時に計測する技術的課題、両者の関係を同時に検討する実験的な枠組み、複雑な両者の関係を定量化する解析手法の道具立ての不という方法論上の問題があった。

そこで、本研究では、体肢の運動と姿勢の相互作用関係を明らかにするために、実験計画法による実験的検証を行うとともに、両データの同時計測、及び、情報学の理論に基づくデータ解析手法を用いた両者の時系列データの分析を行った。両者の関係を検証する実験的枠組みについては、体肢間協調と姿勢の組織化の双方に共通する理論的基盤でありながら、未だ両者の統一的理解は達成されていない **Dynamical Systems Approach** の枠組みを採用し、両手の指の協調運動課題を実施しながら、それを支える姿勢の動揺を同時に計測・分析した。

第3章では、身体（指先）が環境に接触することにより体肢間協調運動は安定する、という仮説を検証した実験1について報告する。実験課題は、体肢の運動の特異点（屈曲のピーク点）で指先が環境に接触するタッピング課題を採用した。ここでいう接触とは、足底など身体-環境接触面を通して常に持続されている身体と環境の地続きの接触ではなく、身体部位（体肢）を動かすことにより生じる体肢の先端と環境表面の断続的な接触を意味する。実験1の結果、指先と環境の接触がない指振り課題を実施した先行研究、及び、そのモデルの予測とは異なり、不安定とされている逆位相パターンの運動が安定化し、仮説が支持された。

第4章では、体肢間協調の安定化をもたらす要因を特定するため、指先が環境に接触することで得られる触覚情報が安定化の要因である、という仮説を検証した実験2について報告する。実験条件として、指先が接触する環境特性を **Hard** 条件（指先で力を加えることで物理的に身体を支持できるほどの反作用力が得られる条件）と、**Soft** 条件（指先で力を加えても物理的には身体を支持できるほどの反作用力は得られず触覚

情報のみが得られる条件)、No contact 条件 (指先で接触するものがなく力も触覚情報も得られない条件) の 3 水準で検討した。実験 2 の結果、指先で触覚情報が得られれば体肢間協調が安定化することが示され、仮説が支持された。

第 5 章では、姿勢の安定性を操作し姿勢が不安定化すると体肢間協調の安定性も低下する、という仮説を検討した実験 3 について報告する。姿勢安定性に関わる要因としては、体位と支持面 (身体と環境の接触面) を操作した。体位については、座位と立位の 2 水準を検討し、立位のほうが、支持基底面が小さいため姿勢は不安定だと仮定した。支持面については、Hard 条件 (表面が硬く力学的にも安定し接触面から自己身体と環境についての触覚情報が得やすい)、Soft 条件 (軟らかいクッションを用いて力学的に不安定で接触面からの触覚情報が得にくい) の 2 水準を検討した。実験 3 の結果、Soft 条件のほうが体肢間協調の安定性が低い傾向が示され、また、体位により体肢間協調のダイナミクスが異なり、不安定な立位条件では体肢間協調の逆位相パターンが不安定化することが示され、部分的に仮説が支持された。

また、実験 1~実験 3 で仮説の検証を行った他、本研究では、次のような 2 つの新たな発見が得られた。1 つめは、実験 3 において姿勢要因 (体位・支持面) の操作が姿勢の安定性に及ぼす影響について、姿勢の安定性が低下すると予想された立位条件や Soft 条件のほうが、むしろ姿勢が動的に安定化するということである。この結果については、姿勢というグローバルなレベルで身体システムが不安定化した場合、それを補償し、体肢の先導レベルでの課題の達成を支えるように、姿勢がより柔軟で適応的な状態へと組織化した結果の現れではないかと解釈された。2 つめは、実験 2 と実験 3 で体肢-姿勢間の協調について分析した結果、体肢間の協調パターン (位相パターン) によって、体肢-姿勢間の協調パターンも異なるという発見である。これらの結果に共通する傾向として、同位相の場合、左右の指と姿勢の前後方向の協調が強まり、逆位相の場合、左右の指と姿勢の左右方向の協調が強まる傾向が観察された。この結果については、体肢レベルの課題によって、体肢-姿勢間の協調パターンが変わり、身体システム全体が柔軟に組織化する可能性を示唆する結果だと考察された。

以上の結果から示唆される本研究の学術的意義は、次のようにまとめられる。まず、従来の体肢間協調モデルに新たな変数として「環境との接触 (それによってもたらされる触覚情報)」や「体肢の運動を支える姿勢の安定性」といった要因を考慮する必要性を実験的に示した点に、身体運動研究分野に対する本研究の学術的意義がある。これらの要因は、従来のモデルでは十分に検討されていない新規な点を含んでいるため、今後、モデル化へ向けてのさらなる展開が求められる。また、体肢の運動と姿勢の同時計測、2 時系列データ間の非線形解析の採用により、体肢-姿勢の関係を検証できることを示した点で、本研究は、身体運動研究分野の新たな研究領域を開拓し、さらなる理論的・実験的研究の展開を動機づけるため、当該分野への貢献が認められる。

第1章 序章

第1節 目的と背景

本研究の目的は、身体-環境システムという観点から体肢間協調ダイナミクスを捉え、両手の体肢間協調に環境と身体（体肢）の接触と、環境への定位としての姿勢が及ぼす影響を明らかにすることである。身体-環境システムとは、第2章で詳説するように、主に心理学・認知科学分野での身体運動研究における力学系アプローチ（Dynamical Systems Approach : DSA）の立場から、身体運動現象を身体-環境間の相互作用の過程で自己組織化する現象として捉えた際の身体と環境からなるシステムのことである(Clark, 1997; Kelso, 1995)。なお、身体-環境システムにおいて、とくに身体に着目する場合は身体システムと呼ぶ。ただし、本研究で検討する“環境”とは、身体が物理的・触覚的に接触する対象を指し、視覚や聴覚を介した環境との相互作用や、社会文化的な意味での環境は検討しない。また、本研究で検討する“接触”とは、足底などの身体-環境の接触面を通して常に持続されている身体と環境の地続きの接触ではなく、身体部位（体肢）を動かすことによって生じる体肢の先端と環境表面の断続的な接触を意味する。

また、体肢間協調（inter-limb coordination）とは、例えば、パーカッションを叩く動作のように両手をリズム的に運動させる体肢の動きに見られる、複数の体肢が特定の時空間的パターンにあることである。体肢間協調は、歩行や走行などの全身で行う移動行動の基礎にあるだけでなく、右手で握ったハサミで左手で把持した紙を切るといった手先での巧みな行為の基礎にもある(Bernstein, 1996)。

通常、「体肢」(limb)とは、体幹に対して手足のことを指して使う用語であるが、本研究では、手の指に対しても「体肢」という語を用いる。体幹は、哺乳類の身体の中枢（中心）に位置するものであり、その中枢から末梢へ、身体の内側から外側へ—すなわち“環境”へ—と伸びたのが体肢である。多くの動物では、体肢は複数の関節で結合されたセグメントからなり、それは中枢から末梢に向かうほど小さくなる。また、環境を知覚するための触覚（圧感受性閾値など）という点では、皮膚の表面で得られる感覚は、体肢の先端へ—すなわち指先へ—向かうほど細かく繊細になる(岩村, 2001)。指はそれを部分とする手に含まれ、手はそれを部分とする腕に含まれるといったように、身体は階層的な構造をなしている。

また、指先や手足の運動も、全身の姿勢と切り離せず、あらゆる運動の制御に姿勢の制御が伴われる(Reed, & Jones, 1982; 佐々木, 2002)。日常的な行為場面を振り返ってみると、姿勢が手先の運動に大きく影響することは、経験的にも理解することができる。例えば、書道やピアノを習う際には、姿勢を正して字を書くように、あるいは、ピアノを演奏するように指導される。また、パソコンのキーボードをタイプする際にも、

第1章

「自然で無理のない姿勢」で作業を行うことが心身への負担を軽減されている（『VDT 作業における労働衛生管理のためのガイドライン』，厚生労働省，2002）。また、近年、リハビリテーションの分野でも、手足など障害のある身体部位のみにアプローチするだけでなく、当該部位を含む全身への介入を行うことで、より持続的な身体機能の回復・向上を促そうとする試みが行われている（鎌田 & 真下，2013； 富田，2004）。このように経験的な知識や実践分野における臨床的知見は得られているものの、それらを裏付けるような基礎研究によるデータが不足しているという背景がある。

身体運動の学術的研究でも、身体が環境に埋め込まれ分離できないこと、その身体において体肢の運動が姿勢に依存し両者が切り離せないことについては、理論的に指摘されてきた（Bernstein, 1996; Gibson, 1966）。しかし、両者の関係を実験的に検討し、両者の協調的な関係を直接的に定量分析するような基礎研究はまだ充分に行われていない。その背景には、第2章で述べるような要素還元論的な思想背景や、技術的問題、方法論上の問題があると考えられる。

第2節 方法

そこで、本研究では、身体運動研究分野においても研究が盛んであり、非線形力学や情報理論など情報学の基礎理論を応用した新しいモデルや解析手法が積極的に応用されているシステム論的アプローチ（DSA）の観点から、実験の計画、データの分析を行い、身体と環境、そして、体肢間協調と姿勢の相互作用関係を明らかにする。

実験1では、身体と環境への接触が体肢（指）の協調運動の安定性に及ぼす影響を検証することで、身体・環境間の相互作用を明らかにする。実験1の結果を踏まえ、実験2では、指先が接触する“環境の特性”が体肢間協調に及ぼす影響を検証することで、どのような環境特性が体肢の運動に影響を及ぼし、そこで、どのような知覚情報が利用されるのかについて明らかにする。また、実験2では、体肢の運動と姿勢の動揺を同時に計測し、指先が接触する環境特性の操作によって姿勢の安定性や組織化がどのように変化するかを調べるとともに、両者の時系列データを分析することで、体肢・姿勢間の協調についても明らかにする。さらに、実験3では、姿勢の安定性を操作することで、体肢間協調がどのような影響を受けるのかを調べる。以上の実験1～実験3により、環境→身体（体肢）、体肢→姿勢、姿勢→体肢の相互作用関係を明らかにする。

第3節 位置づけと意義

本研究は、知覚や運動に関する理論において指摘されてきた問題、すなわち、身体と環境の相互作用、身体システムにおける体肢の運動と姿勢の相互作用について、実験的検討を行う基礎研究として位置づけられる。また、リハビリテーションなど実践分野に対して、1つのエビデンスを提供すべく研究としても位置づけられる。本研究の

第 1 章

成果により、上記の問題について理論と実践の溝を埋めることが目標とされる。また、本研究の特色は、これまで理論的には示唆されてきたものの実験的研究が充分に行われてこなかった体肢間協調と姿勢の相互作用関係を、DSA の観点から実験的に明らかにしようとする点にある。その際、両者を同時に計測し、その複雑な協調関係を非線形力学や情報理論に基づく情報学的手法を用いて解明することで、従来の研究の技術的・方法論的課題の克服を図る。また、そのような方法を採用することで、両者の関係にアプローチできる可能性を提示する点に、身体運動研究分野に対する本研究の学術的意義がある。

第4節 本論文の構成

本論文は、第 2 章で関連する研究領域の先行研究を概観し、本研究の問題設定、仮説の検討を行う。第 2 章で導出した仮説に基づき、第 3 章では、身体環境への接触が体肢間協調に及ぼす影響を検証した実験 1 について報告する。第 4 章では、指先が接触する環境特性が体肢間協調に及ぼす影響を検証した実験 2 について報告する。第 5 章では、姿勢要因が体肢間協調に及ぼす影響を検証した実験 3 について報告する。最後に、第 6 章では実験 1～実験 3 の結果についての総括的議論を行う。

第2章 身体運動に関する先行研究

第1節 知覚・運動研究の理論的背景

近代科学の方法論上の特徴

心理学の起源を巡っては諸説あるが、ここでは、17 世紀の哲学者デカルトの心身二元論まで遡ることにする(鹿取・杉本・鳥居, 2011)。なぜなら、知覚や身体運動に関する研究の理論的背景を探る上では、デカルトの心身二元論を無視することはできないからである(Lombardo, 1987; Turvey, 2004)。デカルトは、心(精神)の世界と物質の世界とを分け、前者は内省という方法によって思弁的にしか理解できない対象であり、反対に、後者は厳格な因果論に基づく法則に支配された対象とした(Lombardo, 1987; デカルト, 1637)。つまり、知覚現象は、実際の物質が持っている性質とは区別される別世界の現象であり、知覚経験は“何らかのかたちで”物質的な脳の状態と結びついた経験である、とデカルトは考えたのである(Lombardo, 1987)。そして、知覚という心的現象、例えば、「二次元の網膜像からなぜ 3 次元の知覚経験が成立するのか」という問題の説明において、「2 点の角度を利用して 3 つめの点までの距離を計算するメカニズム」として「心」の概念を導入した(佐々木, 1994)。この「心」は、現代風に言えば、感覚刺激を統合、判断、推論し、意味を創り出すメカニズムと言えよう(佐々木, 1994)。また、私たち動物の身体については、決定論的な物理的世界に属する対象とした。物理的世界は、時計仕掛けの機械のように、その構成要素である部品を個別に調べて理解した上で、最後にそれらを足し合わせることで全体を説明できるとし、物理的世界に対する要素還元論的な見方を提示した(デカルト, 1637)。さらに、デカルトの二元論は、同時代を生きたニュートンの物理学にも影響を与え(Lombardo, 1987)、ニュートンの物理学、及び、その機械論的・決定論的世界観は、バイオメカニクスを始めとする現代の身体運動研究に影響を与えている(Turvey, 2004)。

デカルトやニュートンらによって確立された近代科学の方法論の特徴は、次のようにまとめられよう。まず、知覚や認知といった現象(心の世界)と、身体、及び、身体運動現象(物の世界)を独立した別々の世界と分けて考える心身二元論の考え方が挙げられる。そして、前者を複雑な世界、後者を単純な世界に分けた。また、これら水準の異なる 2 つの世界を結び付けるメカニズムとして「心」=中枢の存在を想定した。さらに、それぞれの対象については、対象(全体)を、それを構成する要素(部分)に還元し、要素の理解を合わせていくことで、部分の総和として全体を理解しようとする要素還元論の考え方も重要な特徴として挙げられる。身体については、物理的な世界に属する物体、すなわち、中枢が制御する対象とみなされ、身体運動は、中枢(制御する側)からの一方向的な因果によって決定論的に起こる現象として描かれることとなる(ここに制御する側/される側の二元論を見出すことができる)。

情報科学の興隆

次に、知覚・運動の理論に影響を与えた科学史上の出来事として、20 世紀の計算機科学、情報科学の興隆について心理学・認知科学との関連から概観する。20 世紀半ばに Wiener が提唱したサイバネティクス理論は、動物と機械のメカニズムに共通の通信・制御の原理を適用する試みであり、とくに“フィードバック”の概念は、その後の知覚・運動のモデルに応用されるなど、心理学、認知科学分野に対しても多大な影響を与えた(鹿取ら, 2011)。また、同時代に誕生した Shannon の情報理論では、情報の定量化、符号化に関する定式化が行われ、音声やが画像などいかなる情報も「0」と「1」の記号に符号化し、共通の符号化のルール(コード)さえ持っていれば、データとして送受信し、伝達・共有することが可能だとされた。シャノン=ウィーバーの通信モデルは、個体内の認知プロセスや、個体間のコミュニケーションにおける情報の伝達のモデルとして、広く心理学・認知科学分野で採用されている(鹿取ら, 2011)。そして、これら計算機科学、情報科学の発展を背景に、1956 年に開催されたダートマス会議を機に認知革命が起こり、コンピュータのアナロジーとしてヒトの心や知性、認知を理解しようとする認知科学が誕生した(中川, 2002)。本論文では、これら認知科学の心や脳の理解の仕方を「認知的アプローチ」と呼ぶこととする。

ここでは、認知的アプローチの特徴として、計算主義と表象主義という立場を挙げる(Varela, Thompson, & Rosch, 1992; 山口, 2009)。計算主義とは、認知現象を脳内における記号の変換、情報の処理、すなわち、計算過程として理解する立場である。表象主義とは、外界(現実世界)を脳内で表象して構成される知覚世界(内部モデル)を想定し、その表象の操作として認知現象を理解する立場である。これら認知的アプローチにおける“情報”の概念は、実環境(現実世界)の状況や文脈そのものではなく、それらを何らかのかたちで記号・表象に変換した代理物を指し、脱文脈化されたものだと言える。そのため、この“情報”の概念においては、「意味」は払拭されている(Gibson, 1966; Haken, 1988)。それがどのような文脈、状況、環境に埋め込まれ存在していたのかということに関する情報自体は含まれない、という点に特徴がある。

複雑系科学の台頭

20 世紀後半に、本研究と関連深いもうひとつの科学史上の出来事が起こった。それは、複雑系科学という分野の台頭であり、とくに本研究のアプローチの基礎となる自己組織化理論の確立である。具体的には、知覚や運動の研究に大きな影響を与えた Prigogine らの散逸構造論(Nicolis & Prigogine, 1977)や Haken のシナジェティクス(Haken, 1978)といった自己組織化理論の登場である。複雑系科学と一言にいっても、そこには様々な分野、アプローチの研究領域が含まれるが、生命・知能・社会といった「生きている」システムを対象としたシステム論という点では共通の特徴を有すると言える(井庭・福原, 1998)。すなわち、複雑系とは「システムを構成する要素の振る舞いのルールが、全体の文脈によって動的に変化してしまうシステム」であり、複雑系科学

第2章

とは、先に挙げた近代科学が前提とする要素還元論とは異なる方法論を模索する研究領域と言える(井庭・福原, 1998)。生きているシステムでは、その構成要素は各自の局所的なルールに従って振る舞い、それら局所的なレベルでの要素間の相互作用によって、システム全体の状態・振る舞いが創発する。また、それらの全体的な振る舞いをもとに、個々の要素のルール、機能、関係性が変化していく、という循環的な相互作用関係が想定される(井庭・福原, 1998: 図 2-1)。ヒトの身体運動についても、局所的なレベルでは細胞～神経レベルの要素間の相互作用があり、その結果、大域的な秩序としての身体の動きが創発し、また、環境や運動課題、目的といった大域レベルでの制約のもと、神経筋骨格系などの要素間の関係、機能が柔軟に変化するという特徴を有するため、やはり複雑系とみなすことができる(Kelso, 1995; Turvey, 1990)。

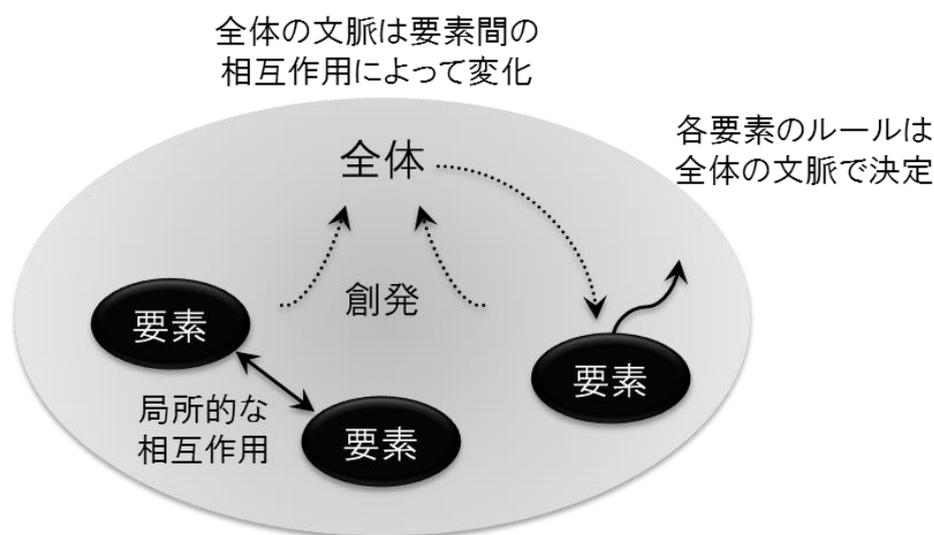


図 2-1: 複雑系のイメージ(井庭・福原, 1998、改変)

なお、ここでは要素還元論と対比してシステム論を位置づけているが、本研究では、両者を矛盾・対立するものとして捉えるのではなく、現象に対する異なる見方・アプローチと捉える。

第2節 知覚・運動の伝統的理論

知覚研究における認知的アプローチ

第1節で述べた通り、デカルトの知覚理論では、3次元の視覚を説明する際、特殊な幾何計算を実行する中枢機構としての「心」の概念が導入されていた(佐々木, 1994)。デカルト以降の知覚理論においても、ニュートン的世界に存在する点刺激などの低次で単純な刺激が視覚の原因だと考えられ、その低次で単純な刺激から、高次で複雑な知覚現象を説明するために、ブラックボックスとして中枢の存在が想定されていた(Lombardo, 1987)。そして、20世紀半ばに起こった認知革命以降の認知科学、心理学における認知的アプローチにおいては、認知現象を心的表象への操作として理解しようとする立場(表象主義: e.g., Fodor & Pylyshyn, 1981)が主流となり、「知覚とは脳の中で世界を表象することだ」という知覚理論が主流となった(山口, 2009)。ここでいう表象も、やはり中枢によって操作・処理される対象で、文脈から独立した記号と言える。また、脳での情報処理について計算モデルにより理解しようとする計算論的アプローチ(Marr, 1983; 川人, 1996)も、中枢による脱文脈化された記号・情報の処理をコンピュータによる計算のアナロジーで捉えようとするところから、ここでは認知的アプローチと呼ぶことにする。20世紀半ばに起こった認知革命以降、これら“表象”や“計算”の概念は、様々に拡張されている。例えば、表象という概念については、Fodor と Pylyshyn らによって提唱された、より文脈からの独立性が高く言語のような構文論的構造をもつ表象だけでなく、絵画や映像のような構文論的構造をもたない表象、さらに、脳の神経ネットワークをモデルとしニューロン群の興奮パターンを表象とみなす分散表象までその概念は拡張されている(Thagard, 1999)。また、計算という概念についても、従来のコンピュータ・モデルのように、構文論的構造に基づく形式的な情報処理過程だけでなく、神経ネットワーク(ニューラルネットワーク)・モデルのような、並列分散処理過程までを計算過程とみなすようになってきている(柴田, 2001)。認知科学分野においては、これら概念の拡張自体がひとつの研究課題ではあるものの、表象主義と計算主義の考えは、認知的アプローチの本質的な特徴として現代でも受け継がれ展開している(山口, 2009)。また、20世紀後半は、こうした表象主義や計算主義に立つ知覚理論とともに、神経科学の発展により、脳の特定の部位に中枢など特定の機能をもった機構を見出そうとする脳機能局在説に基づく研究が盛んとなっていった(山口, 2009)。

しかし、表象主義や計算主義に基づく知覚や認知へのアプローチに対しては、主に心の哲学の分野で以下の原理的な問題が指摘されている。実環境で行動をするために、事前に自己や環境の全てについて明示的にプログラムとして書き下すことが不可能なこと(フレーム問題; McCarthy & Hayes, 1969)、記号の変換とその記号が表象する対象の「意味」の理解は別であること(中国語の部屋; Searle, 1980)、脳の内部モデルで構成される記号の世界と外界の現実世界の対象との対応付けの問題(記号接地問題; Harnad, 1990)、表象を観察・操作し、計算を実行する中枢の存在を仮定すると、その

第 2 章

中枢自体の説明にさらに中枢が必要となり、説明が無限に後退すること（ホムンクルス問題; Dennett, 1992）、といった問題である。ホムンクルス問題は、分散表象の概念に基づくニューラルネットワーク・モデルにおいても同様に指摘されている(山口, 2005, 2009; 柴田, 2001)。

運動研究における認知的アプローチ

運動研究においても、要素還元論に基づく 19 世紀の運動制御理論が 20 世紀の認知革命の流れと結びつき、現在では認知的アプローチによる研究が主流となっている。ここでは、まず 19 世紀に遡り、鍵盤支配型モデル(Turvey, Fitch & Tuller, 1982)と言われる運動制御理論について説明し、その問題点を確認したい。19 世紀の運動制御のモデルは、当時の映像技術の革新である「コマ撮り」の技術に由来すると言われている(佐々木, 1994)。つまり、中枢からの運動制御の指令がコマ撮りされた一枚の写真のような「瞬間ごとに静止する全身の配置」を指定している、という発想に基づいていた。そして、中枢神経系からの指令により筋骨格系からなる身体各部位が制御されることで運動が実現する、と考えたわけである。このモデルでは、図 2-2 のように、中枢神経系の中に記憶、あるいは貯蔵されている無数のプログラムが探索され呼び出されて、各筋関節の動きに対応した大脳皮質の中の運動野の部位が刺激されることで運動が実現されると考える。中枢神経系に事前に用意されているとされる運動プログラムが「譜面」に、大脳皮質の「運動野」が「鍵盤」に、それらを使って「演奏する」ことが中枢神経システムの活動に例えられることから鍵盤支配型モデルと呼ばれている(Turvey et al., 1982)。このモデルの特徴として、運動結果をフィードバックするための回路をを持たない開回路制御であること、そして、中枢の指令が身体の静的な配置 (pose) を構成する各部位の変数 (関節の角度、筋の収縮) を個別に表象・指定するアドレス特定の制御であること、が挙げられる(佐々木 & 三嶋, 1994)。脳に鍵盤を演奏する中枢を想定する鍵盤支配型モデルでは、運動を実行する際に、脳には運動に関わる全ての運動単位、 α - γ 連関、筋、関節への指令が存在しなくてはならず、それらに対応する全身の膨大な数の鍵盤と、多様な状況や文脈ごとのプログラムが必要となってしまう。身体は非常に多くの自由度からなるシステムであるため、計算論の立場からしても膨大な計算コストがかかってしまう。また、通常、運動は連続的に遂行され、ひとたび運動が実行されると自己身体や環境に変化が生じ、その変化を踏まえ次の運動を開始する。ところが、この鍵盤支配型モデルは、事前にプログラムされた運動を実行する開回路制御であり、実行された運動の結果は関知しないモデルであり、運動 (出力) と知覚 (入力) とが明確に区別していた。

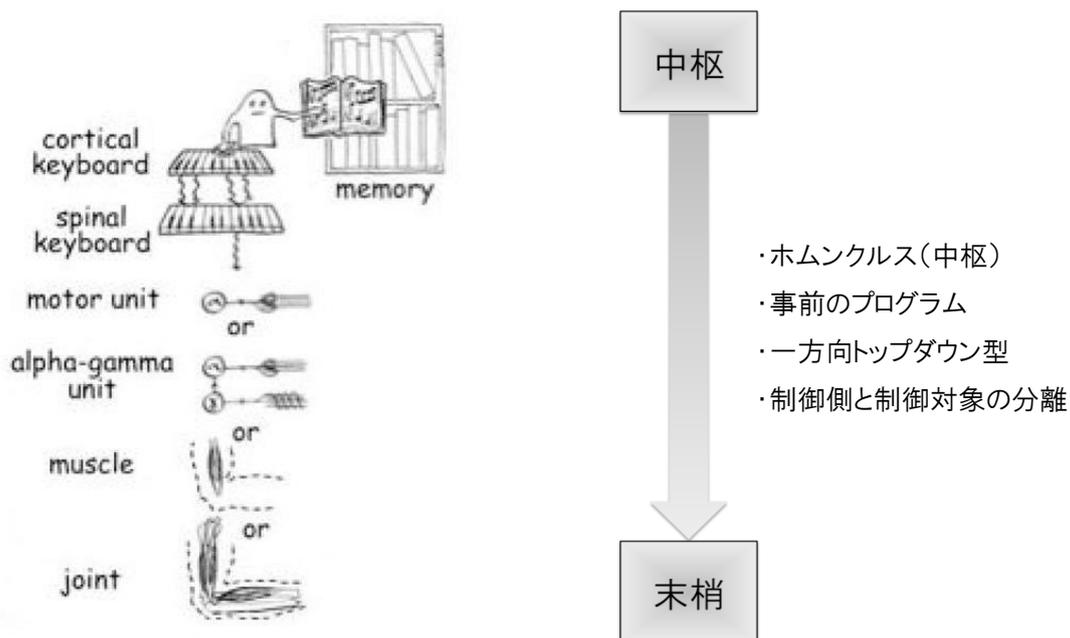


図 2-2 : 鍵盤支配型モデル (Turvey & Fonseca, 2009、改変)

その後、20 世紀に入り、運動実行後のフィードバックとしての結果の知識や、筋感覚情報（求心性情報）といったフィードバック情報を取り入れた閉回路（フィードバック）制御のモデルが提案された(Adams, 1971; Schmidt & Lee, 1988)。また、アドレス特定の制御で想定されていた「運動に関わる全ての要素の表象」という考えが再検討され、中枢が表象する単位が変更された(佐々木 & 三嶋, 1994)。すなわち、個々の関節の角度といった細かい変数まで表象・指定するのではなく、より大きい規模の単位を制御する抽象的な表象を用いることにより、自由度が縮減されると考えたわけである。そして、コンピュータと同じように、身体運動の制御においても、中枢に一般化された運動プログラムが存在することが仮定されていた(Schmidt & Lee, 1988)。ここでは、これら計算論に基づくコンピュータのアナロジーで運動を説明する立場も認知的アプローチと呼ぶこととする (図 2-3)。

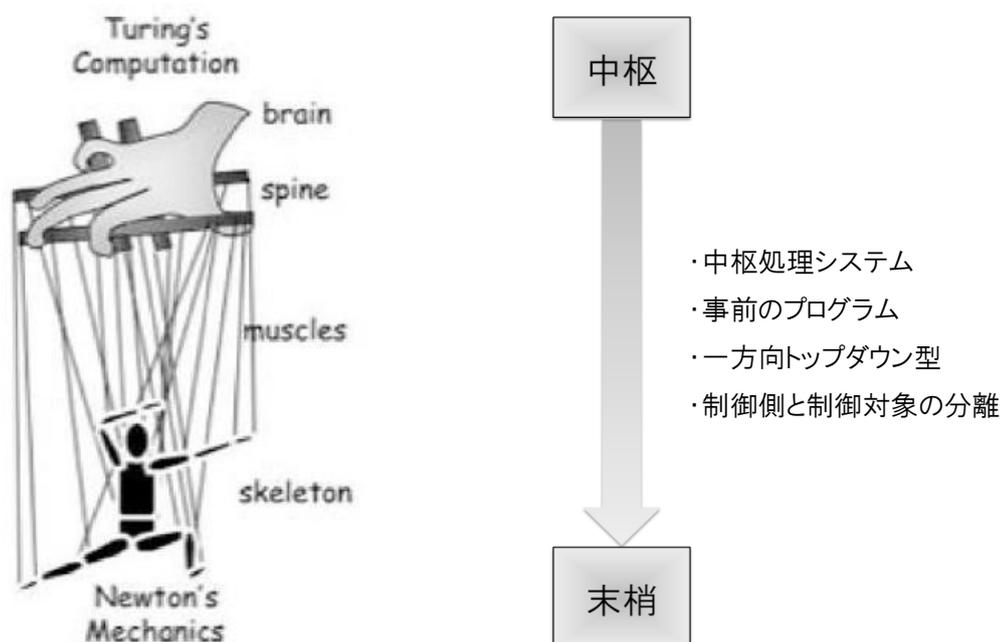


図 2-3 : 計算論的モデル (Turvey & Fonseca, 2009、改変)

しかし、フィードバック制御を取り入れたとしても、素早い修正運動は困難である。近年、このような認知的アプローチによるモデルでは説明が難しい現象として、Ultrafast 現象の存在が指摘されている(Thorpe, 2002; Wallot & Van Orden, 2012)。例えば、Kelso, Tuller, Vatikiotis-Bateson and Fowler (1984)の発話実験では、/bab/という単語の最後の/b/の発音をするために下顎が上昇しているとき、外乱として予測できないタイミングで下顎に負荷が加えられると、上唇は下顎と機械的には結合していないにもかかわらず、上下の唇の15~30ミリ秒の素早い補償運動により見事に外乱が補償され課題が達成された(Kelso, Tuller, Vatikiotis-Bateson, & Fowler, 1984)。この速さは、反応時間や反射など情報処理モデルに基づく生理学的な説明は困難なレベルであるという意味で Ultrafast と呼ばれる(Thorpe, 2002; Wallot & Van Orden, 2012)。Ultrafast 現象は、発話(Kelso et al., 1984)や姿勢制御(Marsden, Merton, & Morton, 1983)だけでなく、画像識別課題における眼球運動、単語識別課題における全身の筋活動などの認知課題でも確認されている(Wallot & Van Orden, 2012)。また、卓球選手のスマッシュも、接近するボールに対して神経伝達速度では説明できない速さで調整されている(Bootsma et al., 1990)。これらの Ultrafast 現象は、身体運動という現象の全てが、情報処理モデルに基づく認知的アプローチによって説明できるとは限らない、ということを示唆する(Wallot & Van Orden, 2012)。

また、中枢での表象を抽象化し、一般化された運動プログラムを仮定したとしても、次の問題が残される。すなわち、運動が遂行される文脈と独立したプログラムの

第2章

単位（表象）では、特定の文脈で実際に運動を遂行するために、文脈を特定し、文脈に即したかたちに変換する機構が必要となるのである。よって、計算論の立場からすると、文脈の特定・表象の変換には膨大な計算コストがかかってしまう、という問題が生じる。

さらに、表象やそれを処理・計算する中枢を仮定するモデルでは、次のような原理的な問題が残される。デカルトの心身二元論以降、心理学・認知科学・心の哲学の分野で議論されてきたホムンクルス問題である。つまり、19世紀の鍵盤支配型モデルでも、20世紀の認知的アプローチでも、演奏や計算を司る中枢（ホムンクルス）を想定すると、その中枢自体のメカニズムを説明するために、中枢（ホムンクルス）の中に、さらにホムンクルスを想定しなくてはならず、中枢の説明を巡って無限後退に陥ってしまうのである(Dennett, 1992; 山本, 2005)。

以上、17世紀のデカルトまで遡り、その要素還元論の思想や、知覚や運動を説明するために脳内に中枢の存在を仮定する考えを見てきた。そして、その中枢（制御側）に対し、制御対象と位置づけられた身体が、中枢からの一方向的・トップダウン型の指令により受動的に動かされることによって身体運動が生じる、と説明する19世紀の運動制御理論の問題を確認した。また、20世紀に入り情報科学の発展とともに台頭し、現在の認知科学の主流となっている認知的アプローチで前提とされている表象や計算という方法で知覚や運動を説明することの限界も確認した。ここで、これらの認知的アプローチの特徴をまとめ、20世紀後半、知覚・運動の研究分野で認知的アプローチと異なるアプローチを提示した J. J. Gibson と N. A. Bernstein の理論へと接続する。

認知的アプローチの特徴

ここでは、後述する生態学的アプローチや力学系アプローチと比較した場合の認知的アプローチの特徴を振り返る。すなわち、その特徴として、研究対象である個体（主体）はその周囲の環境と切り離して考えられがちである点、また、知覚研究は知覚を対象に、運動研究は運動を対象にしており、知覚と運動は別々に考えられがちである点が挙げられよう。ここにも要素還元論的な現象の理解の在り方が垣間見える。また、対象を要素に還元し現象の原因とし、主に動物の身体内部の機構、とくに脳という対象へフォーカスを当て、知覚や運動といった認知の機能の因果関係（原因→結果）を入力→出力というコンピュータのアナロジーで説明しようとする点も特徴的である。さらに、身体については、中枢（神経系）と末梢（筋骨格系）とに分け、それぞれ制御側→制御対象というトップダウン型の関係を想定する点にもその特徴を見出せる。次節で述べる Gibson の知覚理論、Bernstein の運動理論は、これら認知的アプローチの問題点を考える上で重要な示唆を与える。

第3節 J. J. Gibson と N. A. Bernstein

J. J. Gibson の知覚理論

以上、第2節で概観した認知的アプローチによる知覚の研究に対して、全く異なる着想から動物の知覚や行為について理解しようとする試みが、アメリカの知覚心理学者 J. J. Gibson によって開始された。Gibson が初めに疑ったのは、知覚の原因として従来の知覚理論で想定されていた低次で単純な刺激の問題であった(佐々木, 1994)。古典的な知覚心理学実験で構成される暗幕で壁が覆われた実験室に浮かぶ点刺激に象徴されるように、それ以外に何も存在しないかのように作られた空間の中に浮かぶ点が、果たして私たちの豊かな視覚的な見えを説明しうるのだろうか。従来の知覚理論では、この問題を説明するために、高次のレベルでの推論や計算を行う中枢の存在を仮定した。しかし、Gibson は、刺激のほうに疑問を抱き、刺激が存在する環境について再考した。その過程で、刺激は“単純な点”から“一定の構造をもった肌理のある面”へ、そして“面と面の関係であるレイアウト（配置）”へと捉え直されていった(佐々木, 1994)。

さらに、Gibson の知覚理論の核心ともいえる“動き”がもたらす情報の発見に至った(佐々木, 1994)。すなわち、従来の知覚心理学では、知覚を説明する際の妨げとみなされ、実験では統制されるべき変数として扱われていた身体の動きにこそ知覚の本質があると考えたわけである。「私たちは、動くために知覚するが、知覚するためには、また動かなければならない」(Gibson, 1979)という言葉に象徴されるように、Gibson は知覚と行為は分けることができないことを強調した。そして、身体の動きにより知覚がもたらされるとするならば、知覚の原因としての刺激という用語は適切ではなくなり、Gibson は、環境に存在し、知覚者の探索的な行為によって抽出されるものを“情報”と呼んだ(Gibson, 1966)。従来の知覚心理学では、刺激という原因によって、一方向的・受動的に作用がもたらされる感覚受容器からの信号が、中枢神経系によって処理されるものだと考えたのに対して、Gibson の知覚理論では、知覚とは、能動的な身体の探索行為によって環境内の情報を抽出し、環境や自己身体について、そして、両者の関係について知るプロセスとして捉え直されたのである。

視覚について言えば、知覚者は、光源から発せられる光が空気中の媒質を通過し、媒質中の無数の塵や周囲の面（壁や床）に反射し、周囲を取り囲むように配列された光の場に埋め込まれている。そして、知覚者を包囲する光の配列には、周囲の環境を構成するそれぞれにユニークな面のレイアウトが含まれており、その環境の性質を法則的に特定するという意味で情報となる。また、それらの構造は、知覚者の動きに伴い、知覚者に対し光学的流動として変化するが、その動きと特定的な関係を保ったまま変化するため、環境の特性と同時に自己身体に関する情報をもたらす。よって、Gibson の“情報”の概念は、自己身体とそれを取り囲む環境や状況、文脈が含まれたものであり、シャノンの情報の概念とは全く異なるものだと言える。

第 2 章

このように、Gibson の知覚理論の特徴は、知覚を説明するにあたり、動物とその環境を分けずに、動物が能動的に環境を探索し、情報を抽出する過程を知覚とみなした点にある。つまり、個体とその環境、知覚と行為（運動）を分けずに現象を捉えるという視点である。そして、文脈や状況、目的に応じて、環境内の情報を能動的な探索するよう組織化されるシステムとして、知覚システムを想定した(Gibson, 1966)。知覚システムは、感覚器官や運動器官を要素としつつも、それらに還元し対応づけることはできない 5 つのシステムに分類される（基礎定位システム、聴覚システム、触覚システム、味覚-嗅覚システム、視覚システム；Gibson, 1966）。

ここでは、本研究の関連性から、とくに他の全ての知覚システムの基礎となりそれらと協調して機能する基礎定位システムと、特定の感覚器官をもたず、しかし、全身に存在する受容器と協調して働く触覚システムに着目する。基礎定位システムとは、身体が能動的な探索を行うために前提となる環境への定位を担うものであり、身体底面の触覚により地面を知覚し、内耳の前庭器官が特定する重力方向と関係づけ、接触感覚と前庭感覚の 2 つによって、動物は自身の身体が置かれた環境の性質と自己身体の姿勢の 2 つを同時に知ることができる。こうして、身体は環境に安定して姿勢を保つことができ、また、その安定した姿勢により、様々な行為が可能となる。ただし、ここでいう安定とは微動だにしない静的な安定ではなく、むしろ常に揺れ動く自己身体や変動的な環境に対し、適応的に定位する動的な安定である。そして、身体と環境の接触面から環境-身体の関係に関する情報を持続的にピックアップし、全身の姿勢の調整へとつなぐ働きを担っているのが触覚システムである。

このような Gibson の知覚理論では、動物をその環境とセットで捉え、動物-環境からなる生態学的なシステムの振る舞いの中に知覚や行為の本質を見出そうとするため、生態学的心理学（Ecological psychology：生態心理学）と呼ばれる。

N. A. Bernstein の運動理論

前節で述べた運動研究における認知的アプローチの問題について、20 世紀後半、旧ソビエトの運動生理学者 N. A. Bernstein は、自由度の問題と文脈の問題を指摘した(Bernstein, 1967)。自由度とは対象を制御するために決定すべき変数の数のことであり、自由度の問題とは、鍵盤支配型モデルのように運動に先立ち身体各部位の状態を指定するモデルでは、身体システムの膨大な自由度を決定するのは困難だ、という指摘である。人間の場合、関節のレベルで約 10^2 個のオーダー、筋のレベルで約 10^3 個のオーダー、細胞のレベルでは約 10^{14} 個のオーダーの自由度が存在するとされている(Turvey, 1990)。この問題は、制御工学の観点からすると、制御すべき変数のほうが、状態を記述するために必要な変数より多く、解が一意に決定できないという冗長性に起因する不良設定問題だと言える(川人, 1996)。

次に指摘されたのは運動の文脈の問題である。伝統的な運動制御理論では、各

第2章

時刻における身体運動の姿勢を映像のコマのように互いに独立した要素だと仮定したため、解剖学的・力学的・生理学的レベルにおける多義性の問題が生じる(佐々木, 1994)。ここでいう多義性とは、ある時刻における要素(姿勢や神経筋骨格レベルでの状態を表す変数)が与えられたとしても、その前後のシステムの状態が一意に決定できない様を指す。これは、身体運動を、先行する運動、後続する運動といった一連の流れ(文脈)から切り離された要素として捉え、その要素の足し合わせにより記述しようとする要素還元論に起因する問題だと言える。文脈の問題も、多義性を有するため不良設定問題と言える。さらに、文脈の問題は、運動が実行される前に解決されるべき“事前”の文脈だけではない(佐々木 & 三嶋, 1994)。実際の身体運動は、動的で多様な環境のなかで実現されねばならないため、運動が実行されている“最中”、実行後に生じる“事後”の文脈の問題も存在する(佐々木 & 三嶋, 1994)。なぜならば、身体システム、及び、その環境では、常に変動やゆらぎが存在するからである。身体運動の実現という場面では、常にシステムと環境の間で生じる変動・ゆらぎが吸収され、特定の課題を達成するかたちで、ひとつの解が選択されている。この冗長な自由度により生じる不確定性は、身体や環境、前後の文脈からの制約(拘束条件)により解消されるとみるならば、身体運動は文脈に依存して組織化されると考えた方が妥当であろう。

これら自由度問題、文脈の問題に対し、Bernstein が提案した概念がシナジー(synergy)というアイデアである(Bernstein, 1967, 1996)。シナジーとは、ある運動課題を達成する際に、身体各部位(要素)が連携し協調することによって、運動の自由度を減らすような機能的な構造・単位のことである。Bernstein 自身は、運動の目的によって組織化される筋群の間、あるいは筋-関節の間の一時的で柔軟な結合をシナジーと呼んだ(Bernstein, 1967, 1996)。つまり、この筋群間、筋-関節リンクのレベルでシナジーを想定し、要素が個別に制御されるのではなく、要素間の協調関係を考慮することで、自由度が減ることを指摘し、自由度問題の解決を図ったのである(図2-4)。また、シナジーの一時的で柔軟な組織化は、無方向に要素間が協調し、組織化すればいいということではなく、直面した課題に特定の、文脈に依存するかたちで組織化されることを意味する。Bernstein は、このように課題特定の・文脈依存的な要素間の結合を考慮すれば、文脈の問題は解決すると考えた。



- ・要素間の連携・結合による自由度縮減(協調構造)
- ・身体-環境の相互作用(感覚調整)
- ・双方向型
- ・制御側と制御対象の非分離

図 2-4 : シナジー (Turvey, 1990、改変)

第 2 章

次に、Bernstein の提起した運動に関する理論の中で、とくに本研究との関連が深いポイント 4 点について述べたい。1 つめは、身体システムをその内部で閉じず、それを取り囲む環境や状況とセットにして捉えようとした点である。先述した 19 世紀の鍵盤支配型モデルが開回路制御（運動を出力した結果については関知しない）を想定していたのに対して、Bernstein は、運動をある特定の状況、文脈における課題を解決することだと考えた。Bernstein は、ヒトの身体運動の巧みさに関する著書の冒頭で、巧みさが現れる様々な例を取り上げて、その共通の特徴として、巧みさとは「あらゆる状況ならびにあらゆる条件下において解決策を見つけることである」と述べた (Bernstein, 1996)。また、巧みさが必要になるかどうかは、運動の種類によって決まるのではなく、運動を取り囲む条件によって決まるとした。つまり、複雑で巧みな運動であればあるほど、それは事前に用意されたプログラムを実行したり、単に身体システムの内部での要素によって決まったりするのではなく、直面する課題に対し即応的に運動を調整し、状況や環境に適応する側面があることを指摘したと言える。ここでは、身体と環境を分離しないことと、運動と知覚を分離しないことが含意されている。実際、Bernstein は運動を行う際の知覚の役割を重視し、それを感覚調整と呼び、巧みな運動を行うために必要な要素と位置づけていた (Bernstein, 1996)。

そして、2 つめに着目したいポイントは、身体運動を階層的に理解しようとした点である。Bernstein は、ある運動課題を行う際にその中心的な役割を担うレベルを先導レベルと呼び、それを支える役割を担うレベルのことを背景レベルと呼んだ (Bernstein, 1996)。先導レベルが担う役割は、行為の全体ではなく、行為達成のための重要な一部分であり、残りの部分の調整役を背景レベルが担うかたちとなる。さらに、この 2 つの階層のレベルとは別に、系統発生的な進化のプロセス、及び、それに伴う脳の進化になぞらえ、4 つのレベルで段階的に運動の巧みさが獲得されていくという考えを示した。つまり、最も低次に位置づけられる体幹部の筋緊張のレベル (レベル A)、その次の段階として位置づけられる多数の筋と筋が協調し体肢でのリズムミクな動作が発現するレベル (レベル B)、遠隔受容器 (視覚や聴覚) により知覚される空間内の対象へ働きかける動作やその空間内を移動するレベル (レベル C)、そして最後にヒトに特有の巧みさのレベルとして、運動の連鎖からなる行為が発現するレベル (レベル D) を位置づけた (Bernstein, 1996)。Bernstein は、これらのレベルの自律性を強調し、高次のレベル (例えば、鏡を見ながら剃刀で髭を剃るというレベル D の行為) の遂行には、それを支える低次のレベル (例えば、鏡に自身の顔が適切な角度で映るよう視覚と姿勢を協調させるレベルや、左手で頬の皮膚表面を引っ張り、髭を剃りやすいよう整えつつ右手で剃刀を滑らすという両手を協調させるレベル) が背景レベルとして自律的に機能することを指摘した (Bernstein, 1996)。Bernstein の階層的な運動理論においては、手先で行われる先導的な行為のレベル D も、環境内で身体を定位させるために視覚的に姿勢を調整するレベル C に支えられ、またそのレベル C 自体も体肢の協調的な動作

第 2 章

を実現するレベル B に支えられ、そして、それら背景レベルも適切な筋緊張で動的に姿勢を安定化させるレベル A に支えられているのだ (Bernstein は、レベル A を背景の背景と呼んだ ; Bernstein, 1996)。

そして、3 つめに着目したいのがこのレベル A の位置づけである。Bernstein によると、あらゆる行為もこの背景の背景のレベル A なしには遂行され得ないとした (Bernstein, 1996)。身体部位としては、主に体幹と首が担うこのレベル A は、体肢の運動を支える土台の役割を果たし、適応的かつ柔軟に身体を支える動的平衡システムとみなされている (Bernstein, 1996)。レベル A は協調的な運動にとって必要条件であり、また通常ほとんど自覚されることなく作動するレベルである (Bernstein, 1996)。

最後に、Bernstein が、これら背景レベルの機能を支える感覚系として、自己受容器系 (筋・関節感覚) の働きを強調した点に着目したい。自己受容器は、全身に分散して存在し、自己身体の各部位の位置、関節角度、筋力などの情報を知る働きをする。よって、自己受容器系は、運動を遂行する上で、自己身体と環境との関係を調整する感覚調整の機能において極めて重要な感覚である (Bernstein, 1996)。そして、この自己受容器系は、触覚と密接に関わっており、これらを分離することはできない。本研究では、このように自己身体に関する情報を知覚するシステムの重要性を指摘した点に、Bernstein の運動理論の 4 つめの特徴を見出す。

以上に概説した Gibson の知覚理論 (生態学的心理学) や、Bernstein の運動理論にインスパイアされた運動研究は生態学的アプローチと呼ばれ、身体運動を環境との関係で規定される行為として記述する試みが行われている (図 2-5)。



- ・能動的に探索する知覚システム
- ・動物-環境の相互作用
- ・双方向型
- ・制御側と制御対象の非分離

図 2-5 : 生態学的モデル (Turvey & Fonseca, 2009、改変)

左は何も環境内の対象を参照していない単なる運動を示しており、右は、環境内の対象として自動車のタイヤを交換する行為、すなわちタイヤ交換という事象を示している。

第4節 複雑系科学と身体運動研究

20世紀後半、知覚研究の文脈においては Gibson が、運動研究の文脈においては Bernstein が、「全体は部分の総和である」と考える要素還元論に基づく認知的アプローチによる知覚や運動の理論の限界や問題点を指摘した。そして、彼らの考えはその後の複雑系科学の方法論と結びつき、展開を見せることとなる。本研究では、「全体は部分の総和以上」と考えられる“システム”を想定し、自己組織化理論など複雑系科学の方法論に理論的背景をもつアプローチのことを、認知的アプローチと対比し“システム論的アプローチ”と呼ぶこととする。ただし、全ての研究領域をこれら2つのアプローチに分けることはできないこと、また、2つのアプローチの一方が他方より絶対的に優位であるわけではないこと、をあらかじめ断っておく。また、システム論と称しながらも要素還元論のアプローチをとる立場も存在しうるため、Gibson と Bernstein の思想を受け継ぎ、自己組織化理論の枠組みで知覚や運動の研究を行う立場に限定してシステム論的アプローチと称すことにする。それでは、Gibson や Bernstein が提起した問題に対し、自己組織化理論に基づくどのようなアプローチが展開されたのであろうか。

Bernstein が自由度の問題と文脈の問題を克服するために提案したシナジーを実現するための条件は、次のようにまとめられる。1つは、運動の自由度を十分に減らすことができることであり、2つめは、特定の課題に対し環境や文脈の変化を越えて維持されるよう柔軟に組織化される課題特定性を有することである(三嶋, 2000)。Bernstein の問題提起以降、このような条件を満たすシナジーが、自然界で観察される自己組織化現象と類似することが指摘され、協調構造 (Coordinateve structure) と名付けられた(Kugler, Kelso, & Turvey, 1980; Kelso, Kugler, & Turvey, 1980)。協調構造とは、解剖的な筋群ではなく、機能的単位として行為するように制約された、しばしば複数の関節にまたがって組織化される筋群のことである(Kugler et al., 1980; Turvey, Shaw, & Mace, 1978)。

自己組織化現象は、例えば、水を入れた容器を加熱することにより生じる対流現象にみられる。対流現象では、はじめは個別に運動していたマイクロレベルでの水分子(要素)の運動が、容器外部の環境(熱源やその周囲の空気)との関係によって決まる容器内の温度の勾配が一定の状態に達すると、対流というマクロレベルでのパターンが創発(自己組織化)する。ここでいう“創発”は、事前に個々の水分子(要素)の振る舞いが記された設計図(中枢)が存在しないにもかかわらず、システム、要素、環境との相互作用により、自律的に秩序をもったパターンが発生することを意味する。その際、システムは環境に対し開かれており、システム-環境間でエネルギーが散逸する流れの中で構造が自己組織化する。Prigogine は、このように熱力学というマクロな観点からエネルギーが散逸する過程で構造・秩序が自己組織化すると考えた。

これに対し、Haken は、レーザー光についてレーザーの無秩序な多数の光子の振動が同期し、秩序を形成することで強いレーザー光が生じるという自己組織化現象

第 2 章

を観察し、協同現象として説明した。このレーザー光だけでなく協同現象一般を統一的に扱うためのシナジェティクス(Haken, 1978)では、マイクロな要素レベルの挙動とシステムのマクロなレベルの挙動との関係が考慮されており、両者の循環的な関係により、自己組織化が起こるとされた(Haken, 1978)。シナジェティクスでは、対流やレーザー光のようにシステムのマクロな振る舞いを秩序変数 (*order parameter*) という変数により記述し、それに影響を与える変数のことを制御変数 (*control parameter*) と呼ぶ。つまり、シナジェティクスでは、マイクロなレベルでの多数の要素 (自由度) 同士の相互作用が、制御パラメータによってコントロールされ、その変化がマクロなレベルでの場 (秩序変数) を生成し、また個々の要素の振る舞いは、マクロなパターン (場) に適応するように決まると説明される。そうすることで、マイクロなレベルでは無数に存在する自由度が、マクロなレベルでは非常に少ない秩序パラメータとして記述できる。これら自己組織化現象のうち、比較的その振る舞いがよく理解されているものについては、力学系 (*dynamical system*) としてモデル化することができる。また、力学系は、システムのマクロなパターンについてのモデルであるため、そのパターンが共通していれば、対象を限定せず、例えば、対流の発生モデルをヒトの運動制御のモデルとして応用することができるという意味で、力学系は機能的で課題特定のと言える(三嶋, 2000)。

このように考えると、自己組織化理論に基づく力学系モデルは、先述した協調構造の条件である自由度の縮減と課題特定性という条件を満たすため、膨大な自由度をもつ身体システムのモデルとして有効である(三嶋, 2000)。本研究では、身体運動研究にこの力学系モデルを適用する立場を力学系アプローチ (*Dynamical Systems Approach : DSA*) と呼ぶ。従来の運動制御のモデルでは、中枢神経系 (制御側) と筋骨格系 (制御対象) とを分離し、中枢からのトップダウン型の指令によって運動が実現すると説明していた。これに対して、*DSA* では、身体-環境の相互作用や筋骨格レベルでの要素間の相互作用からマクロな運動パターンがボトムアップ式に自己組織化する側面を指摘した点で、身体運動研究の新たな可能性を示したと言える。

身体運動研究における *DSA* の先駆的な試みとしては、Gibson の生態心理学に着想を得て提出された Kugler ら(Kugler et al., 1980; Kugler & Turvey, 1987)の自己組織情報システム論がある。また、同時期、Kelso ら(Kelso, 1984; Kelso et al., 1980)は、シナジェティクスを身体運動に応用し、自己組織化現象の特徴である相転移やヒステリシスといった現象を体肢間協調運動において確認し、Haken らとモデル化を行い、*Coordination Dynamics* という枠組みによる研究を展開している(Haken, Kelso, & Buz, 1985; Kelso, 1995)。これら自己組織化理論を応用した身体運動研究においては、制御側 (中枢) からのトップダウン型の指令により運動が生成・制御されるとする認知的アプローチと異なり、身体を構成する要素間、及び、身体-環境間の相互作用により自然発生的に運動が生成されると考える点に、その特徴を見出すことができる(図 2-6)。

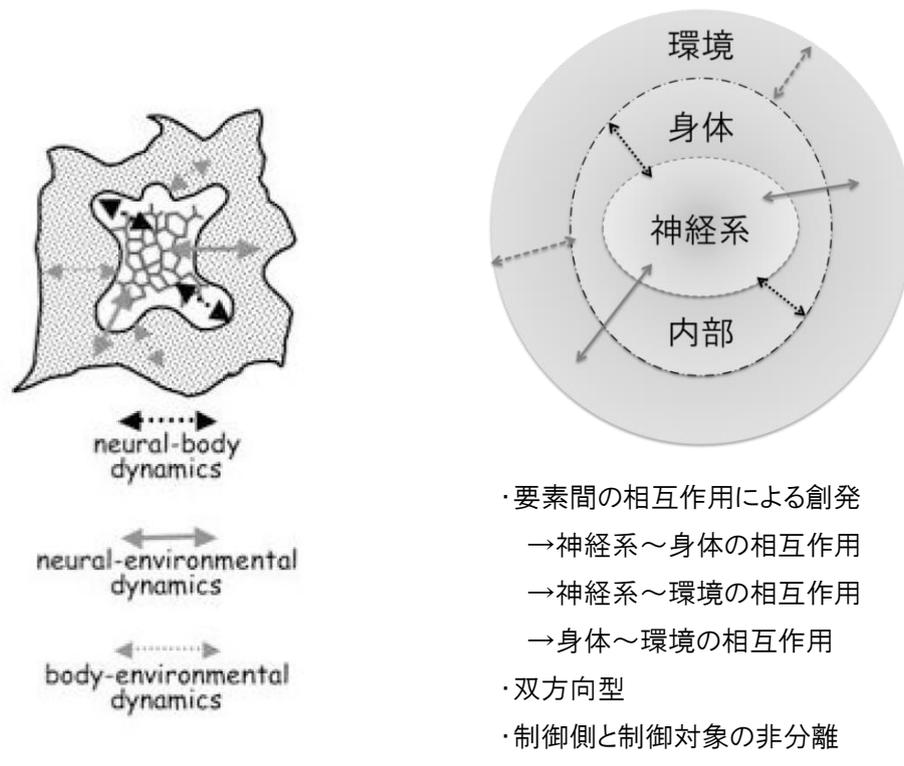


図 2-6：自己組織化モデル (Turvey & Fonseca, 2009、改変)

このように複雑系科学、とくに自己組織化理論の台頭は、知覚や運動の研究に理論的枠組みを提供したという意味で、積極的な影響を与えたと言える。複雑系科学が身体運動研究にもたらした影響は、DSA による新しいモデルの提案という側面のほか、非線形力学や情報理論に基づく解析手法の導入という側面にも及んでいる。本研究でも、体肢の運動データや姿勢の動揺に関するデータに対して、非線形時系列解析を実施することで、身体-環境間、及び、身体システム内部の部分-全体といった階層間の動的相互作用を定量的に評価する。

第5節 関連領域の先行研究

第5節では、身体運動研究の中でも、本研究と関連が深い体肢間協調や、指のタッピング、能動的触知覚、姿勢制御に関する先行研究を中心に概観する。

体肢間協調（Inter-limb coordination）に関する研究

Bernstein の提起した問題に対して、Kelso(1984)は、両手の指のリズミクな協調運動実験を行い、身体運動におけるマイクロレベル（筋神経系）での要素間の相互作用により、自律的にマクロレベルでシステム全体としての秩序が創発することを実験的に示した(Kelso, 1984)。具体的には、両手の人差し指を周期的に運動させる課題で実験を行った（図 2-7）。その結果、2つの協調パターン（同位相・逆位相）のみ運動が安定すること、運動周波数を増加させると逆位相から同位相へのみ変化すること（相転移）、その状態から周波数を下げていっても逆位相には戻らないこと（ヒステリシス）、など物理現象で観察される自己組織化と類似する現象が観察された。なお、同位相は左右の人差し指を左右対称に動かすパターン、逆位相は左右非対称に動かすパターンである。その後、Haken らはこれらの結果に対し、シナジェティクスの観点からマクロレベルで記述される秩序変数を指同士の間位相差、その変化をもたらす制御変数を運動周波数として、運動の質的变化を説明するモデルを提案した（HKB モデル；Haken et al., 1985）。その際、Kelso らは、相転移現象が被験者の意図とは独立して、制御変数（指振り実験の場合はメトロノーム音で刻まれる運動のテンポ）の変化により起こるため、必ずしも中枢指令型のモデルでは説明できないとした。

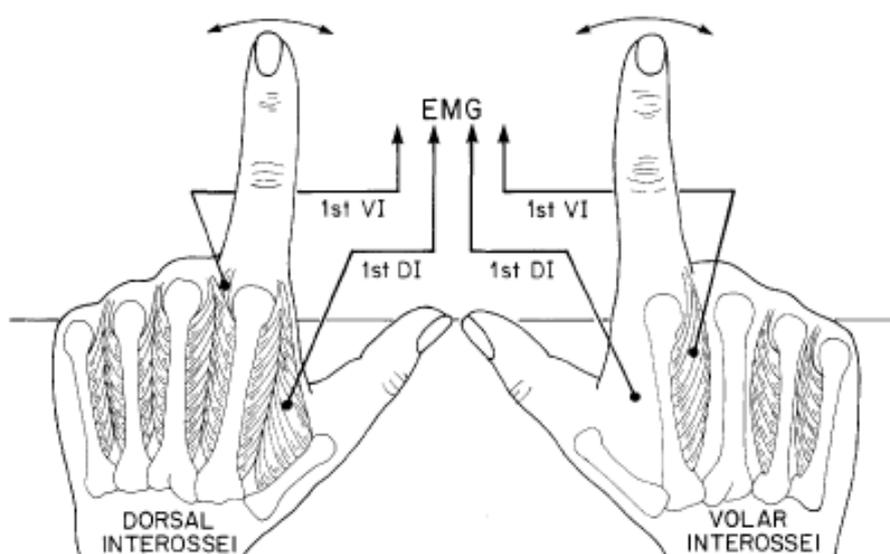


図 2-7 : Kelso(1984)が実施した指振り課題（Kelso, 1995）

この Haken らによって提案された HKB モデルでは、左右の人差し指の位相差 φ (Relative Phase: 相対位相) を秩序変数とし、一方、運動の周波数を制御変数 (b/a) とし、次のことが説明された。すなわち、 $\varphi = 0$ (同位相) のときと $\varphi = \pm\pi$ (逆位相) のとき指振り運動が安定すること、運動の周波数が増加すると同位相 ($\varphi = 0$) と逆位相 ($\varphi = \pm\pi$) いずれのパターンでも運動の安定性 (ポテンシャル) が低下する一方で、臨界値を超えて制御パラメータが増加した場合、逆位相から同位相への相転移が起こることである (図 2-8)。V (ポテンシャル) は安定性を意味し、低いほど安定した状態を意味し、ポテンシャル図の谷がシステムが安定する状態 (アトラクター) を示している。

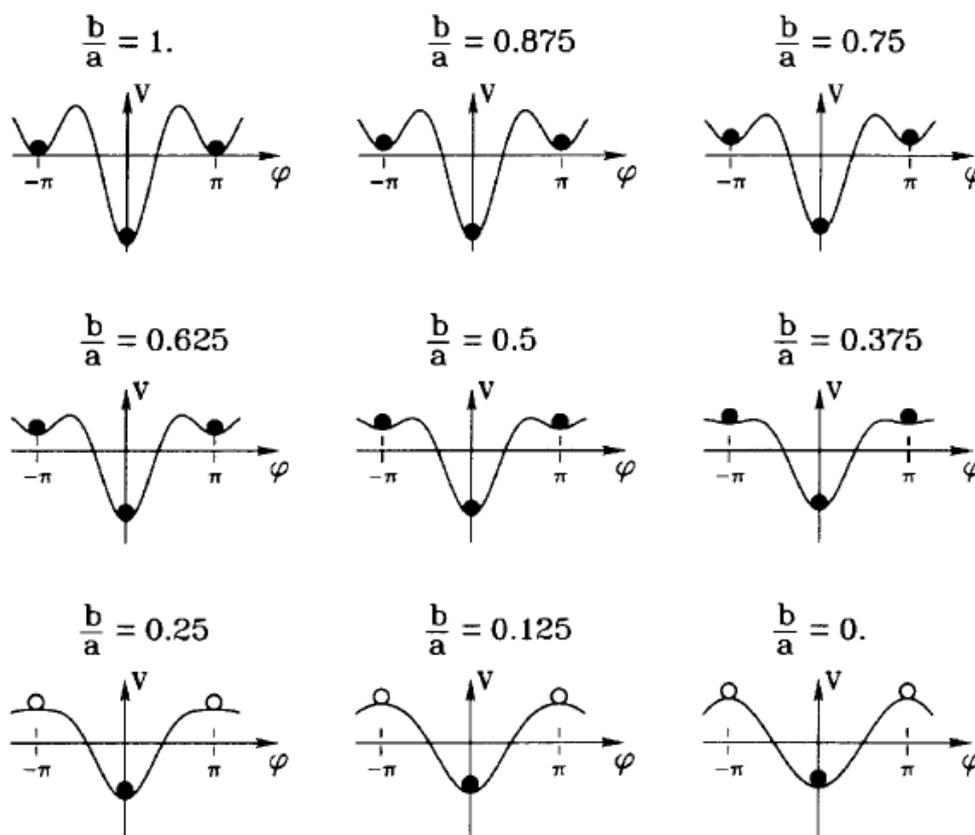


図 2-8 : HKB モデル (Kelso, 1995)

この Kelso らによる一連の研究を契機に、DSA による身体運動研究が様々に展開され、手首(Byblow, Carson, & Goodman, 1994)や肩(Swinnen, Walter, Serrien, & Vandendriessche, 1992)、前腕(Beek, Rikkert, & van Wieringen, 1996)の協調、上肢と下肢の協調(Kelso & Jeka, 1992)、手首と肘の協調(Buchanan & Kelso, 1993)などの運動課題にも適用されている。また、これら個体内の身体部位間の協調のみならず、運動と外界の聴覚情報(Kelso, Delcolle, & Schöner, 1990)や視覚情報(Lopresti-Goodman, Richardson, Silva, & Schmidt, 2008; R. C. Schmidt, Richardson, Arsenault, &

Galantucci, 2007; Wimmers, Beek, & van Wieringen, 1992)との協調においても検討されている。さらに、個体内、個体-環境間のみならず、視覚情報を介した個体間での脚(Schmidt, Carello, & Turvey, 1990)や逆さ振り子(Schmidt & Turvey, 1994)を振る運動課題でも検討されており、HKBモデルに従い、同位相から逆位相への相転移現象が観察されるなど、神経筋骨格レベルで結合のないシステムにおいても知覚情報を介した相互作用により自己組織化が起こることが示されている。さらに昨今では、これら DSA による身体運動の研究は、行動レベルでの個体間協調のみならず、行動と脳活動の同時計測によって、脳レベルでの現象と行動レベルでの現象の関係にまでアプローチするにまで展開している(Tognoli, Lagarde, DeGuzman, & Kelso, 2007)。

実験的枠組みだけでなく、HKBモデル(Haken et al., 1985)という数理モデルも様々に展開している。例えば、Schönerらにより、ノイズ項が追加され、運動の安定性の喪失(相転移)が、位相ゆらぎと緩和時間の増大によって理解されることとなった(Schöner, Haken, & Kelso, 1986)。また、Schönerらは、運動の学習過程における行動情報、環境情報、記憶情報、意図情報を考慮することでモデルを拡張している(Scholz & Kelso, 1990; Schöner & Kelso, 1988; Schöner, 1994)。あるいは、振動子(体肢)の質量差がもたらす固有周波数差を反映したものの項の追加(Kelso et al., 1990)、左右の手の非対称性を考慮した項(Treffner & Turvey, 1995)を導入したモデルや、離散運動に拡張したものの(Schöner, 1990)、四肢の運動にまで拡張したものの(Schöner, Jiang, & Kelso, 1990)、振動子間の周波数比の問題を考慮したものの(DeGuzman & Kelso, 1991)や、パラメトリック安定化(Jirsa, Fink, Foo, & Kelso, 2000)、聴覚情報と運動のカップリング(Anchoring effect; Fink, Jirsa, Foo, & Kelso, 2000)、神経系と筋骨格系のカップリング(Beek, Peper, & Daffertshofer, 2002)など様々なモデルの拡張が行われている。

このように20世紀後半以降、DSAの枠組みによる体肢間協調に関する研究は、様々な拡がりを見せてきた。しかし、その一方で、HKBモデルについては、その一般性について疑問を投げかける実験データも示されている(Kao, Ringenbach, & Martin, 2003; Kodama, Furuyama, & Inamura, 2015; Kodama, Makino, & Furuyama, 2012; Seay, Haddad, van Emmerik, & Hamill, 2006; van Ulzen, Lamoth, Daffertshofer, Semin, & Beek, 2008, 2010)。歩行における下肢の協調ダイナミクスがHKBモデルの予測に従うかどうかについて調べた研究(Kao et al., 2003; Seay et al., 2006)では、歩行から走行への協調パターンの変化過程において、HKBモデルの予測に反する現象が観察されたと報告している。具体的には、移動速度の上昇に伴うパターン変化前の歩行の不安定化が観察されなかったこと、及び、パターン変化後の走行の再安定化も観察されなかったことから、人間の歩行から走行への協調パターンの変化過程については、HKBモデルがそのまま応用できるわけではないと結論された(Kao et al., 2003; Seay et al., 2006)。さらに、van Ulzenらの行った個体間協調に関する実験では、HKBモデルが、隣に並んでトレッドミルの上で歩行する個体間の下肢間協調に適用できるかを調べた

(van Ulzen et al., 2008, 2010)。実験の結果、HKB モデルの予測と反して、歩行速度や個々の固有周波数によらず、同位相と逆位相が同程度に安定し、固有周波数差が体系的な位相シフトを引き起さなかった (van Ulzen et al., 2008)。また、後続する実験でも HKB モデルに基づく仮説を支持しない結果が得られた (van Ulzen et al., 2010)。一連の実験結果から、van Ulzen らは、個体間協調歩行課題には、HKB モデルがそのまま応用できるわけではないと結論した (van Ulzen et al., 2008, 2010)。また、Kodama らが検討したタッピング実験でも、個体内実験では 2 本指条件で、個体間実験では 4 本指条件で、周波数によらず同位相と逆位相が同程度に安定することが示された (Kodama et al., 2015, 2012)。これら近年の実験的研究で示された事実は、現状の HKB モデルの応用可能性について再考を促すものである。また、これらの実験で検討されている実験課題、すなわち、歩行とタッピングの共通点としては、運動の周期の特定の点で体肢が環境へ接触することが挙げられる。よって、体肢間協調ダイナミクスにおいて、身体-環境の相互作用として、身体（体肢）の環境への接触を考慮する必要性が示唆される。

タッピングに関する研究

ここで、体肢間協調研究と関連する研究領域として、手の指によるタッピングに関する先行研究について概観する。タッピングに関する研究の歴史は古く、19 世紀末から感覚運動同期 (Sensorymotor synchronization : SMS) の研究として開始されている (Stevens, 1886)。SMS とは、主に運動を外界の事象 (メトロノームなどの刺激) に対し、周期的に同期させることであり、SMS パラダイムは、身体運動の研究というよりタイミング予測や時間感覚といった認知メカニズムの研究として展開している (Repp & Su, 2013; Repp, 2005)。そのため、タッピング研究の多くはメトロノームなどの外的刺激に対し、片手で運動を同期させるという実験パラダイムを採用している。

しかし、DSA の観点から、片手の指の運動と聴覚情報 (Kelso et al., 1990) や、視覚情報 (Zanone & Kelso, 1992)、そして触覚情報 (Kelso, Fink, DeLaplaine, & Carson, 2001) の協調を調べた研究も存在する。また、体肢間協調という枠組みで左右の手の指のタッピングを調べた先行研究としては、両手の人差し指 2 本 (Wing, Church, & Gentner, 1989; Yamanishi, Kawato, & Suzuki, 1979, 1980) と、左右の人差し指、中指の 4 本の間での協調 (Mechsner, Kerzel, Knoblich, & Prinz, 2001; Riek & Woolley, 2005) がある。

タッピング課題では、多くの DSA による体肢間協調研究で採用されてきた指や脚、逆さ振り子を宙で振る運動課題と異なり、運動課題の特定のタイミング (体肢が屈曲するピーク) で机という環境の表面へと指先が接触する事象が起こる。こうした指先の接触が片手の指の屈曲伸展運動の安定性に与える影響を調べた Kelso らの実験によると、指先の接触がメトロノーム音と一致するタイミングで呈示される条件では、触覚情報が運動を安定させるという (Kelso et al., 2001)。また、両手の逆位相タッピング課題において指先で加える力と運動周波数の影響を調べた Loseby, Piek, &

Barrett(2001)の実験では、高周波数では力を指先に加えることで逆位相の協調運動が不安定化することが示された(Loesby et al., 2001)。これらの実験結果は、指先が環境に接触するというタッピング課題固有の問題として、指先で得られる触覚情報や力が運動の安定性に影響する可能性を示している。では、環境との接触によって生じる触覚や力覚については、どのような研究が行われてきたのだろうか。

能動的触覚に関する研究

従来、触覚に関する心理学、生理学の研究では、静止して動かない実験参加者の身体（掌など）の皮膚表面に点状の刺激を与え、皮膚の触、圧、温度に対応する受容器の反応を調べる、といった受動的な実験のパラダイムが用いられてきた(岩村, 2001)。しかし、Katz は、それら受動的な触覚の現象は日常的な触覚とかけ離れており、日常生活ではむしろ能動的に環境内の対象に触れることで知覚すると指摘した(Katz, 1925)。また、Gibson は、対象の形状の知覚における能動的な動きの重要性を実験的に示した(Gibson, 1962)。さらに、Turvey らは、剛体（棒など）を振ることによって、その長さや形状、向きを知覚できる触覚、すなわち、ダイナミックタッチの研究を展開した(Turvey, 1996)。ダイナミックタッチという能動的触覚を支える知覚情報としては、身体と対象の関係から求まる主慣性モーメントなど質量分布のパターンに基づく物理量が情報となっていることが分かっており(Pagano & Turvey, 1993)、この情報は能動的に動かす探索行為により特定される(三嶋, 2000)。さらに、ダイナミックタッチは、対象の知覚のみならず自己身体の知覚にまで関係していることが指摘されており(Carello & Turvey, 2004; Carello, 2005; Pagano & Turvey, 1995)、身体の位置や向きといった自己の知覚、及び、自己身体と環境との関係の知覚に利用されている(Turvey & Carello, 2011)。すなわち、環境に自己の身体を定位させる際、ダイナミックタッチをはじめとする能動的な触覚システムがその姿勢の調整において重要な役割を果たしているのである(Gibson, 1966; Turvey & Carello, 2011)。このように能動的触覚には、能動的に探索することで知覚される自己と環境の関係（知覚と行為の不可分性、自己と環境の関係の知覚）という特徴がみられる。そして、もちろん能動的触覚には、固有の受容器のようなものが存在するわけではない。身体システム全体に分布する皮膚、筋、腱、及び、それらを構成する細胞など複数のスケールにまたがって存在するシステムの要素が、課題に即して柔軟に適応的に組織化することで、知覚が実現するのである。

このような触覚システムの機能を実現するメカニズムについて、近年、Turvey らによって有力な仮説が提出されている(Fonseca & Turvey, 2006; Turvey & Fonseca, 2014)。彼らは、身体システム全体に分布し、課題特定の・文脈依存的に柔軟に組織化する身体構造モデルとして“テンセグリティ構造”に着目した(Fonseca & Turvey, 2006; Turvey & Fonseca, 2014)。テンセグリティ (tensegrity) とは、張力 (tension : 要素間で相互に連結し引っ張り合う力) と圧縮力 (compression : 張力によって引っ張られる要素を支える力) を統合する (integrate) する組織である (tensional integrity ;

Fuller & Applewhite, 1975)。テンセグリティ構造は、システム全体の力のバランスを保ち、変形に対し自身で安定化するように力を全体へ分散させる。つまり、テンセグリティ構造は、常にシステム外部と内部の環境の間で力のバランスをとるような調整を自律的に行うと言える(Turvey, 2007)。これを脊椎のモデルとして応用したのが **Biotensegrity** モデルである (Levin, 2002 : 図 2-9b)。テンセグリティ構造の 20 面体 (図 2-9a) は、幾何学的対称性、形成と機能における全方向性、表面積の広さ、3 次元空間の包囲という点で優れた性質を有し、身体システムを構成する単位として有効な特性をもつとされている(Turvey & Fonseca, 2014)。Turvey らは、細胞から筋、腱、骨格に至る身体システムの要素が、テンセグリティ構造の 20 面体から構成されており、身体システム全体を複数の階層からなるテンセグリティ構造の 20 面体が多重に入れ子化したシステムとみなした (図 2-10)。

つまり、細胞という最小単位のレベルでは、細胞膜の張力とそれに拮抗する細胞繊維の圧縮力で均衡が保たれ、筋・腱・骨格系のレベルでも同様に下位システムはそれを含む上位システムとの均衡を張力と圧縮力という物理的な相互作用により維持しているのである。この張力の多重な分布のパターンは皮膚表面から身体の深部に至るまで広がる。Turvey らは、これを Gibson の視覚理論における光配列 (optic array) の概念に対し、張力配列 (tension array) と呼んだ(Turvey & Fonseca, 2014)。張力配列は、身体が環境に接触する面 (指先や足底、座面など) で生じる力、及び、その接触というイベント (変化、変形) によってユニークなレイアウト (分布、配列のパターン) となる。すなわち、光配列と同様に、身体の動き (変化) に伴って自己と環境の関係についての特定のな情報となるわけである(Turvey & Fonseca, 2014)。その力のパターンは、テンセグリティ構造の 20 面体という不変的な構造を媒介とし、皮膚表面の細胞の変形から筋膜、腱、骨格へと伝搬する。このような触覚システムのメカニズムは、細胞から骨格に至るまで複数の時間スケールで相互作用をもたらすことから、**Multifractal Tensegrity (MFT : Turvey & Fonseca, 2014)** と呼ばれる。MFT 構造は、タッピング運動のように環境に身体が接触することでもたらされる皮膚表面の変形を、力や振動として全身に速やかに伝搬することを可能にし、身体システムは、部分における変化を直ちに全体へと拡散し、環境は部分システムの変化へと素早く柔軟に適応的に組織化できるのである。このような MFT 構造は、ダイナミックタッチという能動的な触知覚や、環境への定位としての姿勢の動的安定化を支える知覚メカニズムの有力な候補と考えられている (Palatinus, Dixon, & Kelty-Stephen, 2013; Palatinus, Kelty-Stephen, Kinsella-Shaw, Carello, & Turvey, 2014, Turvey & Fonseca, 2014)。また、この MFT 仮説については、足圧重心 (Center of Pressure : COP) のデータに対しマルチフラクタル解析を行うことで検証されている (Palatinus et al., 2013, 2014)。時系列の多重時間スケール間での相互作用をマルチフラクタル解析で定量化することにより、身体システムの複数の時空間スケール間で生じるエネルギーや情報の相互作用

第2章

を評価できるからである。このように、全身を入れ子化したテンセグリティ構造とみなし、その柔軟な組織化に触覚システムが介在しているという仮説は、まだ提案されて間もない。そこで、この仮説にも関連する姿勢の制御・組織化の研究について、次項で概説する。

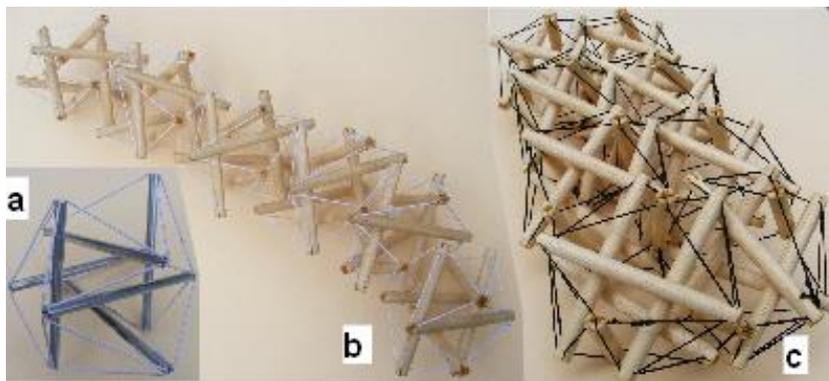


図 2-9 : テンセグリティ構造からなる 20 面体 (Scarr, 2010)

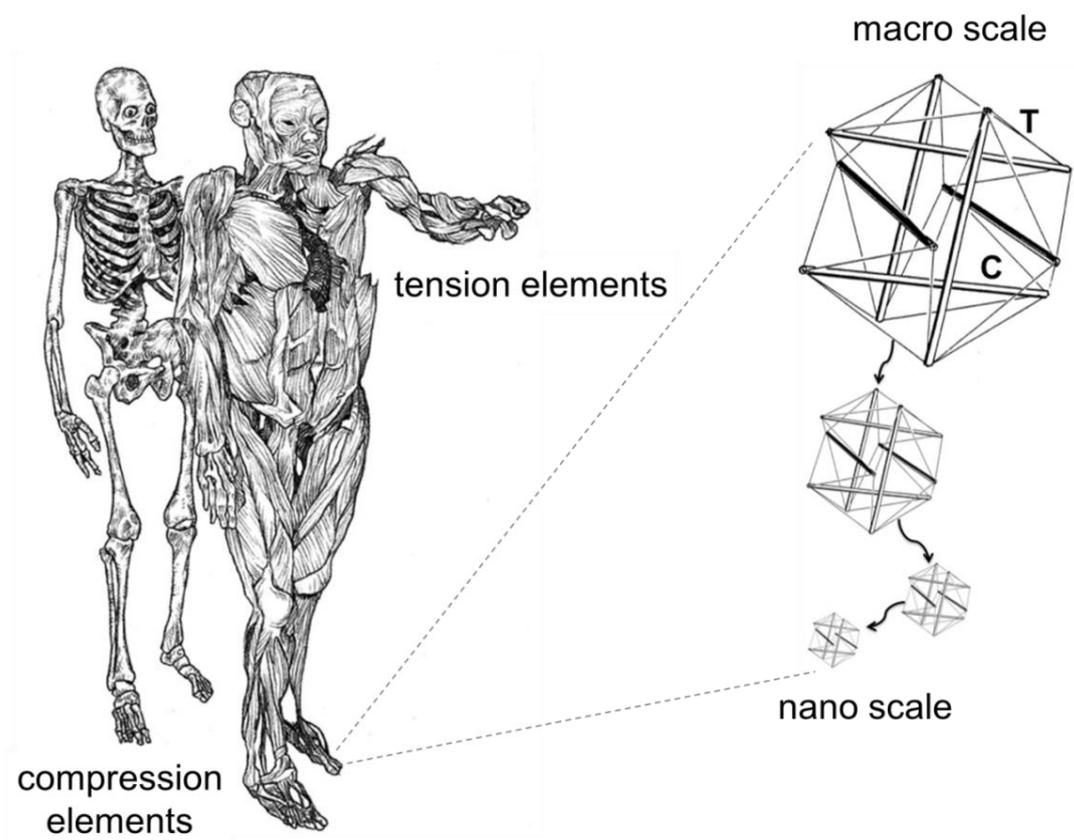


図 2-10 : 張力の要素と圧縮力の要素からなる身体モデル (Palatinus, Kelty-Stephen, Kinsella-Shaw, Carello, & Turvey, 2014a; Turvey & Fonseca, 2014、改変)

姿勢の制御・組織化に関する研究

一般に、姿勢の制御に関わる知覚システムとして、視覚系、体性感覚系、前庭感覚系が関与するとされている(Shumway - Cook & Woollacott, 2013)。また、指先の環境への接触も、立位姿勢の安定化に影響するとされている(Jeka & Lackner, 1995; Jeka & Lackner, 1994)。Jeka らの研究では、立位静止課題において、指先の接触状態について次の 3 つの条件を検討し、その姿勢動揺への影響を調べた(Jeka & Lackner, 1994)。すなわち、指先に全く何も触れない条件 (No contact 条件) と、軽くしか触れることができず身体を物理的に支持できるだけの力は得られない条件 (Touch contact 条件: 最大 1N までしか力を加えられない)、必要な分だけ力が加えられる条件 (Force contact 条件: 無制限で力を加えられる) の 3 つである。実験の結果、Touch contact 条件では、物理的には身体を支持できるほどの力を加えることができないにもかかわらず、Force contact 条件と同程度に姿勢動揺を減少させ、立位姿勢を安定化させることができた(Jeka & Lackner, 1994)。また、指先の圧力の変化と姿勢動揺の変化の時間関係を分析した結果、Force contact 条件では、両者は同位相の関係で変化していたことから、指先に力を加えることができる場合には、指先の環境への接触が、重心動揺の補正に利用されると考察されている(Jeka & Lackner, 1994)。一方、Touch contact 条件では、指先に力が加わってから 200~300ms ほど遅延して重心が動揺していたことから、指先に身体を支えられるほどの力が加えられない場合には、触覚情報がバランスの補正に利用される考察している(Jeka & Lackner, 1994)。また、これら指先で得られる接触 (Light touch: 身体を物理的に支持できる程度の力は得られない) が姿勢を安定化させる知覚メカニズムについては、皮膚受容器と腕の位置に関する固有受容器からの情報が関与しているという(Jeka, 1997)。これら Light touch に関する実験結果は、指先が接触する環境の特性 (Touch/Force contact) により、立位姿勢保持という課題を遂行するための身体システムの組織化の方略が異なる可能性を示唆している点で興味深い。そして、その姿勢の組織化において、全身の各部位から得られる体性感覚情報が重要な役割を果たしている点は、第 3 節で述べた Gibson や Bernstein の主張とも重なる。

また、姿勢制御に関わる知覚システムの研究としては、Gibson の知覚理論に基づく Lee らの視覚性運動制御の研究がある(Lee & Lishman, 1975; Lee & Aronson, 1974)。彼らは「揺れる部屋」という天井と壁が床から分離され吊るされた状態の部屋の中で実験を行った。部屋の壁には、格子状の視覚パターンが印刷されており、壁の揺れに伴い、部屋の中にいる実験参加者に対し、肌理の拡大と縮小という光学的流動が生じるようになっていた。彼らは、この揺れる部屋に実験参加者を立たせ、外から参加者に気づかれないように少しずつ部屋の壁を揺らした。その結果、壁が参加者から遠ざかるように動く際には、参加者に対し肌理の縮小という光学的流動のパターンが知覚されるため、参加者は自身が前方へと姿勢を傾けたと知覚してしまい、それを補償するよう

第2章

に後方へと姿勢を反らした。反対に、壁が参加者に接近するように動く際には、参加者に対し肌理の拡大という光学的流動のパターンが知覚されるため、参加者は自身が後方へと姿勢を倒したと知覚してしまい、それを補償するように今度は前方へと姿勢を傾けたのである(Lee & Lishman, 1975; Lee & Aronson, 1974)。これらの実験結果は、視覚的な情報(光学的流動の変化)により、身体が無自覚に環境の変化に協調してしまうことを示している。Leeらの視覚性運動制御に関する研究以降、視覚情報と姿勢の協調に関する研究は盛んに行われ(e.g., Stoffregen, 1985)、近年では、DSAの観点から、視覚トラッキング課題(視覚情報に追従して身体を動かす課題)を用い、姿勢制御における身体の協調にアプローチする研究も行われており(e.g., Bardy, 2004)、姿勢の協調にHKBモデルを応用する試みもみられる(Rooke, Bardy, & Tsaneva-Atanasova, 2011)。

以上に見てきた姿勢に関する研究では、主に立位静止課題、または視覚情報のトラッキング課題における姿勢動揺、及び、全身の関節間協調に関する分析という枠組みが採用されていた。つまり、立位で静止することや、視覚的に対象物をトラッキングするといった行為が先導レベルとなる運動課題が実験課題として採用されている。しかし、日常的な行為においては、姿勢は主に何らかの先導レベル(例えば、体肢、指先を使った行為)を支える背景レベルとしての役割を担う場合が多いと考えられる。GibsonやBernsteinが指摘したように、あらゆる運動は環境への定位という姿勢の側面に支えられて初めて実現しうるものであり、運動は姿勢に入れ子となって組織化されているはずである。しかし、このような意味で、体肢などの運動とそれを支える姿勢の関係にアプローチする研究は少ない。Yamada(1995)は、上肢を振る運動課題中の足圧重心を計測し、上肢の運動と姿勢の動揺の同時計測を行う実験を実施しているものの、両者の関係について直接の分析は行っていない(Yamada, 1995)。また、Light touchに関する研究では、指先の圧力と足圧中心(Center of Pressure : COP)の時系列データ間の相関を分析しているものの、実験課題自体は立位静止課題であり、体肢の運動と姿勢の関係を扱っているわけではない(e.g., Jeka & Lackner, 1994)。

第6節 本研究の仮説

問題の設定

以上、身体運動に対する認知的アプローチ、及び、システム論的アプローチによる研究について確認し、本研究と関連する研究領域のトピックとして、体肢間協調、タッピング、能動的触知覚、姿勢の制御・組織化に関する先行研究について概観した。第3節で述べたGibsonとBernsteinの主張に基づき、これら先行研究の問題点を振り返ると、次のように整理される。GibsonやBernsteinの理論では、身体は環境と切り離して記述することができず、また、環境に埋め込まれた身体システムの内部においても、体肢の運動(部分)と、それを支える姿勢(全体)の役割は分離することはできず、体肢の運動は、姿勢に依存し両者は分離できず、姿勢もまた環境への定位として環境に

第2章

埋め込まれている。システム論的アプローチと比較した場合の認知的アプローチの問題は、身体と環境を分離して捉えがちな点、また、身体については、その能動的な知覚システムとしての側面を軽視した点にあると言える。ところが、身体は、環境に対し能動的に働きかけ、文脈や状況に応じ柔軟に組織化するシステムとみなすことができる。また、そのシステムとしての特徴を積極的に見出し、自己組織化と結び付けて展開したのがシステム論的アプローチによる身体運動研究であった。しかし、システム論的アプローチによる身体運動研究においても、体肢の運動と姿勢の研究が別々に行われており、その背景には、技術的な問題として、両者を同時に計測し、両者の動的な相互作用関係を直接分析する手法の不足が考えられる。また、体肢の運動については、DSA の観点から体肢間協調という枠組みで研究が進められており、姿勢についても、DSA による研究が進められているものの、未だ両者を統一的に記述するモデルは提案されていない。また、身体と環境の関係という点では、環境の特性を実験的に操作し、その姿勢への影響を調べる研究は存在するものの、体肢間協調への影響を検討した研究は見当たらない。

また、本研究が体肢の中でも指という部位に着目したのは、次の理由による。指は身体の中でも最も先端（末梢）にある身体部位であり、その意味で、環境との接点となる指先の触覚は、他の部位より優れて感受性が高い(岩村, 2001)。また、手足などの体肢より質量が小さいため運動によって生じる慣性力などの力学的影響は他の部位より極めて少なく、一見、指の運動が体幹を含めた身体全身へ影響を与えるとは考えにくい。反対に、上肢（腕）などの体肢の運動を対象とし、それと姿勢との関係を調べる場合、腕の質量が大きく運動によって生じる慣性力も大きいいため、ある意味で、姿勢へ影響することは自明となってしまう。そこで、本研究では、知覚という面では繊細で、運動という面では姿勢への影響が少ない、と想定される身体部位として指に着目する。また、日常行為場面を振り返ってみても、環境と接触しながら様々な行為の先導レベルを担うのは、やはり指先が多いと考えられる。

本研究の位置づけ

本研究は、図 2-11 のように位置づけられる。図 2-11 中央には、本研究で想定している身体-環境システムが、楕円の入れ子として示されている。すなわち、環境（橙の楕円）に身体システムが埋め込まれ、身体-環境システムをなし、その身体システム全体（環境への定位としての姿勢：青の楕円）には、体肢の運動（緑の楕円）が部分として埋め込まれている。このように捉えられる身体-環境システムについて、Gibson や Bernshtein の理論では、身体は環境と切り離して記述することができないこと、また、環境に埋め込まれた身体システムにおいても、体肢の運動（部分）とそれを支える姿勢（全体）は分離できないことが示唆されてきた(Bernstein, 1996; Gibson, 1966)。また、彼らの理論的示唆を受け、環境への定位を担う知覚メカニズムとして、近年、触覚システムによる身体-環境間の関係の動的調整メカニズムの存在が示唆されている(Jeka, 1997; Jeka & Lackner, 1994; Palatinus et al., 2013, 2014b, Turvey & Carello, 2011;

Turvey & Fonseca, 2014)。一方、体肢の運動については、体肢間協調を自己組織化の観点から捉えモデル化したHKBモデルに基づく体肢の協調ダイナミクスに関する研究では、環境への接触としての“触覚”や、環境への定位としての“姿勢”との関係については実験的に十分な検討が行われてこなかった。

そこで、本研究では次のことを前提とする。すなわち、身体システムは環境に埋め込まれていること、その身体システムが環境に定位するために姿勢が背景レベルとして機能していること、及び、身体システムの部分システムとしての体肢の運動は姿勢に依存し分離できないこと、である。そのため、体肢の運動を姿勢と切り離して捉えることはできず、また、体肢-姿勢からなる身体システムを環境から分離して捉えることもできないと考える。以上の前提のもと、本研究では以下に示す仮説に基づき、実験1、実験2、実験3を計画し、実施した。

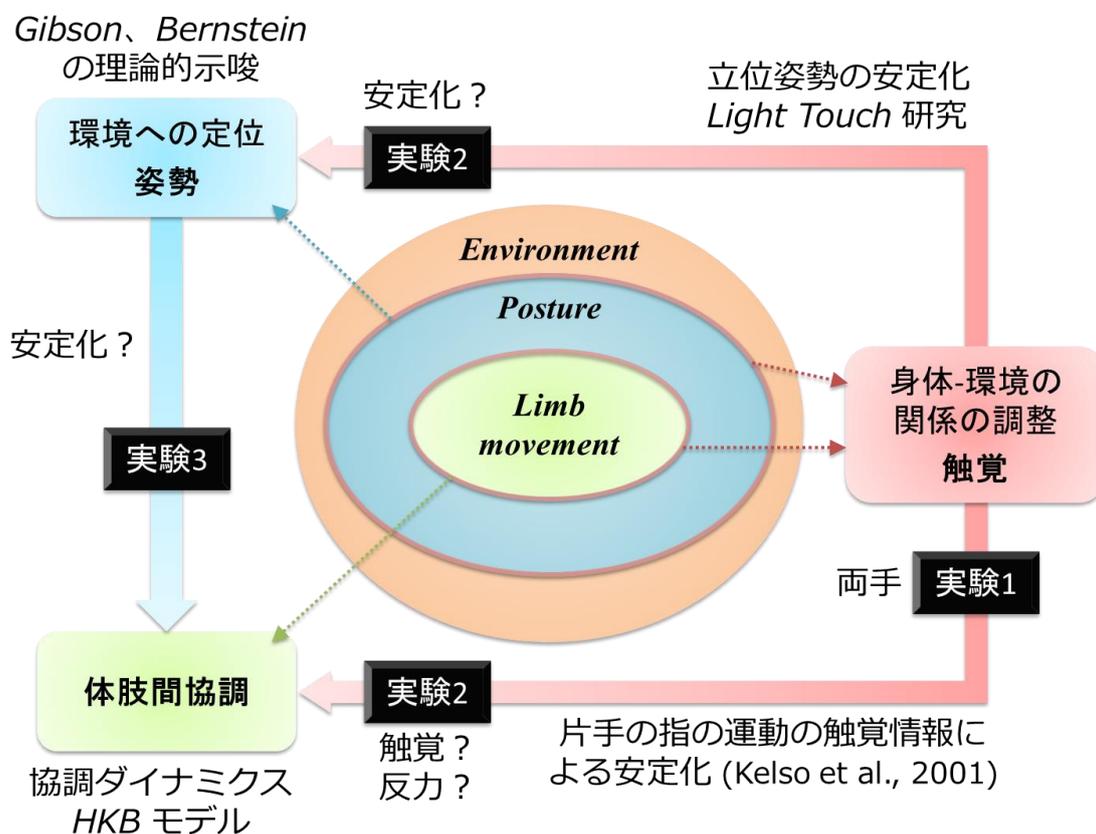


図 2-11 : 本研究の位置づけ

仮説

- 1) 身体と環境との接触を操作することで体肢の運動の安定性が変化する。
- 2) 身体が接触する環境の特性を操作することで体肢の運動の安定性、及び、

第 2 章

姿勢の安定性が変化する。

3) 姿勢の安定性を操作することで体肢の運動の安定性が変化する。

具体的な作業仮説とその検証方法は以下に示す通りである。なお、安定性の定義、指標については第 3 章以降（方法）で詳説する。

方法

そこで、本研究では、身体と環境、そして、体肢の運動と姿勢の相互作用関係を明らかにするため、次のように実験を計画し、分析方法を検討する。まず、身体運動の研究の枠組みとして、体肢の運動と姿勢の双方について統一的に記述できる可能性が期待できるという点で、DSA による枠組みを採用する。

実験 1 では、身体が環境への接触することで体肢間の協調運動が安定化するかどうかを検討すべく指のタッピング実験を計画する。Kelso(1984)の両手の人差し指の指振り課題を始め、これまで検討されてきた体肢間協調の多くの実験課題では、体肢は環境と接触することなく宙で周期的な運動を繰り返すような状況のみ検討されてきた。しかし、キーボードのタイピングやピアノの演奏など、日常的な指先の協調運動においては、むしろ指先が環境と接触しながら動的に安定することが多い。また、Kelso et al.(2001)が実施した片手の人差し指の屈曲伸展運動課題では、指先の触覚情報が運動を安定化させることが示された。よって、実験 1 ではタッピング課題を実施する。実験 1 に関する仮説は、身体（指先）が環境に接触することで得られる触覚情報と指の運動の協調により、タッピング課題では体肢間協調運動が安定する、である。

実験 2 では、指先が接触する環境の特性が体肢間協調に影響を及ぼすか明らかにする。Light touch に関する研究では、指先が接触する環境の特性によって、姿勢の組織化の方略が異なる可能性が示唆された(Jeka & Lackner, 1994, 1995)。そこで、本研究では、体肢間協調においても、指先が接触する環境の特性を操作した場合に、体肢間協調のダイナミクスが変化するかどうかを検証する。また、実験 2 では、同時に、指先の環境への接触は、体肢間協調というローカルなレベルのみならず姿勢というグローバルなレベルでの安定性にも影響するかどうかも明らかにする。指先が接触する環境特性により、先導レベルの体肢間協調と、それを支える背景レベルの姿勢の組織化にも変化がみられるのかを明らかにする。つまり、体肢→姿勢の影響を検証する。実験 2 の仮説は、Light touch に関する研究で示唆されたように、指先で得られる反作用力が、身体を物理的に支持できるほど得られない条件でも、姿勢は安定化し、姿勢が安定して環境に定位することで体肢間協調もまた安定化する、である。

実験 3 では、反対に、グローバルなレベルの姿勢要因（体位、支持面の特性）を操作することで、姿勢要因が体肢間協調に与える影響を調べる。つまり、姿勢→体肢の影響を検証する。姿勢の安定性に関わる要因としては、体位と支持面（身体と環境の接触面）を操作した。体位については座位条件と立位条件、支持面については、Hard 条件、Soft 条件を検討し、それぞれ立位条件、Soft 条件のほうが姿勢の安定性が低く

第 2 章

なると仮定した。実験 3 に関する仮説は、姿勢が不安定化することによって、身体システムのグローバルなレベルでの安定性が低下し、姿勢に埋め込まれたローカルなレベルの体肢間協調の安定性を低下させる、である。

実験 2 と実験 3 では、いずれも身体-環境の接触面（指先が接触するタップ面と姿勢支持面）の力学的特性を操作していると言える。すなわち、Hard 条件は力学的安定性が高く、その環境特性は剛体とみなされるが、Soft 条件では力学的安定性は低く、その環境特性は弾性体とみなされる。この環境特性を剛体/弾性体（Hard/Soft）の 2 つの水準で比較した場合、それぞれの環境特性が体肢間協調、姿勢、及び、体肢-姿勢間協調に及ぼす影響の仕方は同じなのか、それとも異なるのか、という問題が生じる。

この問題については、本研究では、指先の接触面の操作（実験 2）は直接的には指先～体肢の運動というローカルなレベルでの現象に影響し、姿勢支持面の接触面の操作（実験 3）は姿勢というグローバルなレベルでの現象に影響すると考える。よって、これら 2 つのレベルでの環境特性の変化は、身体システムへ異なる影響を与えるのではないかと予測する。なぜならば、身体システムは、指先～体肢の運動というローカルなレベルが、それを部分とするシステム全体（姿勢）というグローバルなレベルに入れ子となって階層化したシステムと捉えられるからである。そのため、身体-環境の接触面の環境特性を同じように操作した場合でも、ローカルなレベルからグローバルなレベルへの影響の仕方と、グローバルなレベルからローカルなレベルへの影響の仕方には、非対称性がみられるのではないかと予測される。

第3章 環境との接触が体肢間協調に及ぼす影響（実験 1）

第1節 目的

実験 1 の目的は、触覚情報が両手の指の協調運動の安定性に影響を与えるかを明らかにすることである。Kelso(1984)らが実施した指振り課題など、宙で体肢を周期的に動かす運動課題に対して、タッピング課題では、屈曲-伸展の周期運動の屈曲点において、環境内の対象、すなわち、机の表面へと指先が接触する。Kelso によると、片手の人差し指での屈曲-伸展運動において、指先が物体へ触れることにより得られる触覚情報が運動を安定化させる(Kelso et al., 2001)。よって、実験 1 の予測される結果として、タッピング課題では触覚情報が得られるため運動が不安定化するとされている高周波数での課題遂行や逆位相パターンでの課題遂行において安定化がみられるのではないかと予測される。

第2節 方法

実験参加者

実験参加者は健常な成人 10 名（男性 5 名、女性 5 名）であった。年齢は 22 歳から 27 歳（平均年齢 25.1 歳）であり、いずれの実験参加者も右利きであった。実験の手続きは国立情報学研究所の倫理審査委員会にて承認されていた。実験参加者は実験に参加する際、同意書に署名し、謝礼として時給 1000 円を支払われた。

実験装置

図 3-1 に実験状況の概略を示す。メトロノーム音には一音の長さが約 85ms のビープ音が用いられ、音量は実験前に実験参加者ごと、ペアごとに不快でない大きさに設定された。刺激に使用されたメトロノームは、先行研究(Riek & Woolley, 2005)にならい、最初の 3 秒間は 1 Hz のまま一定のテンポで拍が刻まれ、その後 1 Hz から 3Hz まで 30 秒間かけて加速するよう設定され、全体で約 33 秒間であった。メトロノームは、PC (MacBook 2130/13.3; Apple) で再生されたものをヘッドフォン (MDR-NC600D; Sony) を通して提示された。タッピングの運動は、ビデオカメラ (TK-C1380; Victor) で撮影され、HDD (HVR-DR-60; Sony) に記録された。また、メトロノームの音声とカメラの映像はビデオカメラ (DSR-PDX10; Sony) を経由して同期された。

データ処理

ビデオカメラで記録したデータは、動画解析ソフト (Frame-DIAS II; DKH) を用い毎秒 60 フィールド (60Hz) ごとに分析され、運動解析にあたっては、ローパスフィルタ (三角移動平均) による平滑化が行われた。

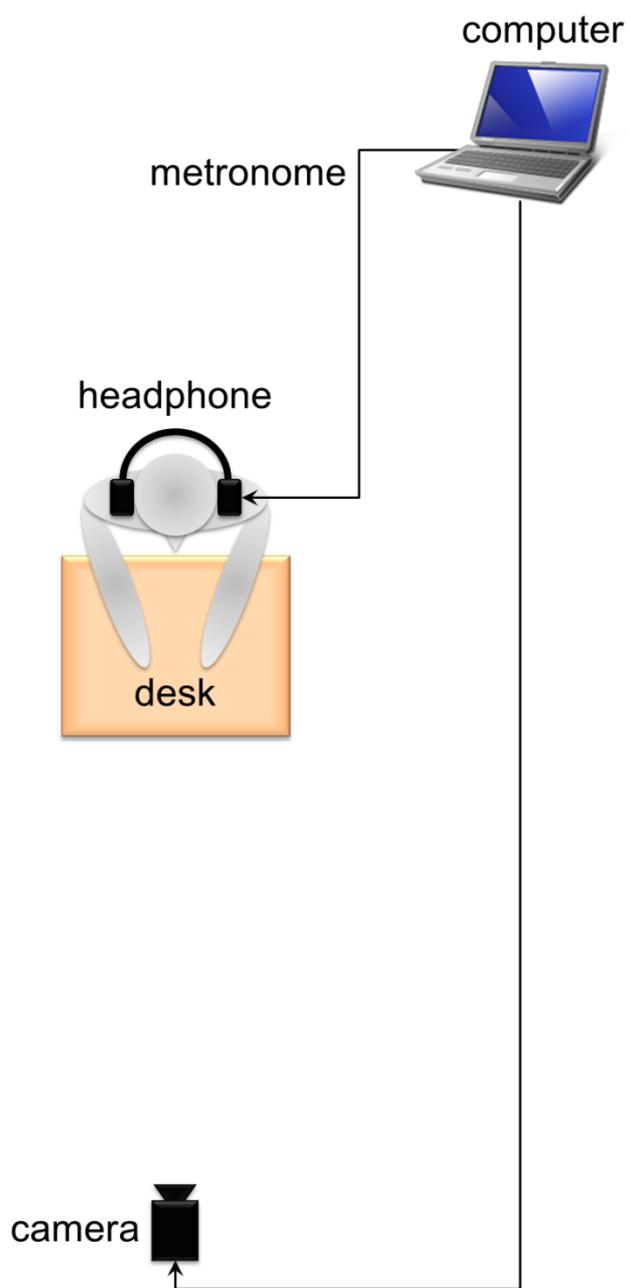


図 3-1 : 実験状況

手続き

実験計画は、指の本数（2本、4本）×位相（同位相、逆位相）の2要因被験者内計画であった。指の本数は、人差し指のみ用いる2本指条件と、人差し指・中指の2本ずつ計4本を用いる4本指条件の2水準、位相については、2本指条件では、人差し指同士が同期する同位相と、それらが交互にタップする逆位相の2水準、4本指条件では、人差し指(I)同士、中指(M)同士が同期する同位相 ($I \cdot I$), ($M \cdot M$)…と、左手の中指と右手の人差し指、左手の人差し指と右手の中指が同期する逆位相 ($M \cdot I$), ($I \cdot M$)…の2水準を検討した (図3-2)。

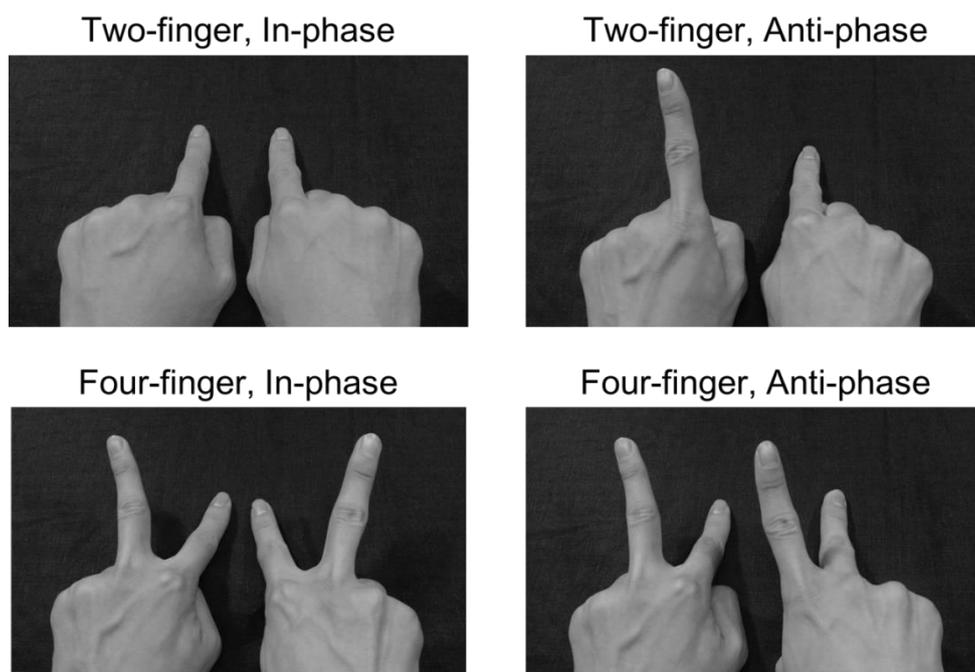


図 3-2 : 実験条件

左上 : 2本指・同位相条件、右上 : 2本指・逆位相条件

左下 : 4本指・同位相条件、右下 : 4本指・逆位相条件

課題は、1 Hz から 3Hz まで 30 秒間かけて加速するメトロノーム音に、同期してタッピングを行うことである。ただし、いずれの位相においても、メトロノームと運動の周期が一致するよう求められた。逆位相では、左手の人差し指がメトロノーム音と同期するよう求められた。また、課題を行う際、実験参加者は指の動きを注視するよう求められた。実験では、練習試行のあと4条件を1回ずつランダムに行うブロックが4回繰り返され、合計16試行が実施された。適宜休憩を挟みながら、実験に要した時間は、20分ほどであった。

データ分析

実験1では、指の屈曲伸展方向の運動成分（垂直方向、y成分）を分析対象とした。分析区間は、先行研究(Riek & Woolley, 2005)に従い、30秒間の試行を5秒間ずつ6つ周波数区間（f1-f6）に分割した（0-5秒：平均1.06Hz、5-10秒：平均1.23Hz、10-15秒：平均1.50Hz、15-20秒：平均1.93Hz、20-25秒：平均2.55Hz、25-30秒：平均2.96Hz、表3-1）。

表 3-1：実験1のメトロノーム周波数の設定

周波数区間	f1	f2	f3	f4	f5	f6
平均周波数 [Hz]	1.06	1.23	1.50	1.93	2.55	2.96

SD ϕ

体肢間協調の安定性を評価するため、先行研究(Riek & Woolley, 2005)に従い、人差し指同士の位相差(ϕ)を求め、その標準偏差(SD ϕ)を安定性の指標とした(Carson, 1995; Schmidt et al., 1990; Zanone & Kelso, 1992)。相対位相 ϕ を求める際のタップ時刻については、左手の人差し指がタップした時刻をReferenceとし、右手の人差し指がタップした時刻をTargetとした。また、 ϕ については同位相条件の場合は位相差 ϕ （度）そのものを、逆位相条件の場合は180度から位相差 ϕ を引いた値（度）を求めた。

Cross Recurrence Quantification Analysis (CRQA)

また、体肢間協調を定量評価するため、非線形時系列解析手法である相互再帰定量化分析(Cross Recurrence Quantification Analysis, CRQA; Zbilut, Giuliani, & Webber, 1998)を行った。RQAは力学系の再帰特性や再帰パターンを定量化する手法であり、CRQAは同時に生起し相互作用する2つの時系列データ間でRQAを実行する(Coco & Dale, 2014; Zbilut et al., 1998)。RQAは、時系列データを高次元の状態空間に再構成し、その軌道の再帰状態を調べることでシステムの特性を定量化する手法で(Shockley, 2005)、データのサイズや分布に限定されず様々なデータに対して実行できるという特徴をもつ(Zbilut & Webber, 1992)。CRQAでは、元の2つの時系列データを一定時間ずつ遅延させた時系列を用いて、高次元位相空間にアトラクターを再構成し(Takens, 1981)、2つの軌道間の再帰構造を分析する(Zbilut et al., 1998)。遅延時間は、一般に平均相互情報量が最初に極小となる値が用いられるが(Fraser & Swinney, 1986)、周期的な運動を分析する際は運動周期の1/4の時間を用いることが多い(Kudo, Park, Kay, & Turvey, 2006; Pellicchia, Shockley, & Turvey, 2005)。埋め込み次元は、誤り最隣接法(False Nearest Neighbours; Kennel, Brown, & Abarbanel, 1992)を用いて推定され、CRQAで2つの時系列の埋め込み次元が異なる場合には大きい方の値を

選択する(Coco & Dale, 2014)。さらに、RQAでは半径の値を入力変数(閾値)として設定し、状態空間の中で一定時間後、軌道が十分に近い位置に再び訪れ、半径内に点同士が収まる場合を軌道が“再帰”したと定義する。CRQAでは、2つの時系列がこの半径内に収まる場合を再帰とみなす。このように再帰を定義し、時系列の再帰状態を2次元平面図として視覚的に表現したものがRecurrence Plot(RP; Eckmann, Kamphorst, & Ruelle, 1987)であり、縦軸、横軸ともに時系列の経過時間を示す。RQAでは、RPの構造(点のパターン)に基づき、システムの再帰特性を定量的に評価する様々な指標を算出する(Pellecchia et al., 2005; Webber & Zbilut, 2005)。RQAは、心拍変動、重心動揺、個人間の身体協調など様々な種類のデータの分析に応用されている(Webber & Marwan, 2014)。

体肢間協調の分析においては、運動の安定性、協調性についての有力な指標として再帰率(%Recurrence : %REC)や最大線長(Maxline : MAXL)などが用いられている(Kudo et al., 2006; Pellecchia et al., 2005)。再帰率は、位相空間における可能な再帰点に対する実際の再帰点の割合として求められ、0~100%の範囲の値をとる。再帰率はシステムにおける確率的ノイズの程度を表す指標であり、再帰率が高いほどシステムにおける確率的ノイズは小さいとみなされる。最大線長は、位相空間において最も長く再帰が続いた軌跡の長さであり、RPにおける対角方向の線の最大値である。最大線長はシステムの安定性、とくに体肢間協調においては外乱に対するシステムの感受性(アトラクターの強度、結合強度:リアプノフ指数と反比例する)を表す指標であり、最大線長が長いほど協調における結合が強いとみなされる。また、対角方向の線の長さの平均値は平均線長(Averageline : AVGL)と呼ばれ、位相空間において再帰が平均してどれくらい持続するかという持続的協調性を表す指標とみなすことができ、平均線長が長いほど持続的に再帰した状態が続くとみなされる。

本研究では、CRQAによって定められる再帰状態を2つの時系列が“協調”している状態とみなして、体肢間協調や体肢-姿勢間協調におけるノイズの程度、結合強度、持続的協調性をそれぞれ%REC、MAXL、AVGLの指標で評価する。CRQAの実行にあたってはRパッケージ'*crqa*'(version 1.0.5)を用いた。入力変数は、RQAの標準的な手順(Webber & Zbilut, 2005)、及び、先行研究の設定を参照し決定された。具体的には、実験1では、体肢間協調の分析において、左右の人差指の垂直方向(y成分)の運動データに対し、CRQAを実行した。遅延時間については、運動周期の1/4と一致するよう6つの周波数区間ごとにそれぞれ「12」(f1)、「12」(f1)、「11」(f3)、「8」(f4)、「7」(f5)、「6」(f6)と設定された。埋め込み次元は「5」とした。半径は、zスコアに基づいて平均距離で標準化された位相空間内でのユークリッド距離「25」の範囲内と設定された。

第3節 結果

分析 1：体肢間協調の安定性 (SD ϕ)

左右の人差し指同士の相対位相の標準偏差 (SD ϕ) を求めた結果を図 3-3 に示す。図 3-3 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は SD ϕ (度) を示している。

SD ϕ について、指の本数 (2) \times 位相 (2) \times 周波数 (6) の 3 要因分散分析を行った結果、指の本数、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,9)=39.983$, $p < .001$ 、 $F(1,9)=31.530$, $p < .001$ 、 $F(1,9)=24.500$, $p < .001$)。

また、指の本数 \times 位相、指の本数 \times 周波数、位相 \times 周波数、指の本数 \times 位相 \times 周波数の交互作用がみられた (それぞれ、 $F(1,9)=44.699$, $p < .001$ 、 $F(1,9)=4.010$, $p < .005$ 、 $F(1,9)=2.994$, $p < .05$ 、 $F(1,9)=4.764$, $p < .005$)。

指の本数 \times 位相の交互作用について下位検定を行った結果、2 本指条件では同位相と逆位相の間に有意差がみられなかったのに対し、4 本指条件では同位相のほうが逆位相より SD ϕ が有意に小さく ($F(1,9)=74.505$, $p < .001$)、運動の安定性が高いことが示された。また、同位相条件では 2 本指条件と 4 本指条件に有意差がみられなかったのに対し、逆位相条件では 2 本指条件のほうが 4 本指条件より SD ϕ が有意に小さく ($F(1,9)=83.749$, $p < .001$)、運動の安定性が高いことが示された。すなわち、指の本数 \times 位相の交互作用は、4 本指逆位相条件が他の条件より SD ϕ が有意に大きいことによると考えられる。

指の本数 \times 位相 \times 周波数の交互作用について単純-下位検定を行った結果、2 本指条件では全周波数区間において同位相と逆位相の間に有意差がみられなかったのに対し、4 本指条件では周波数区間 f2 - f6 で同位相のほうが逆位相より SD ϕ が有意に小さく (それぞれ、 $F(1,9)=4.118$, $p < .05$ 、 $F(1,9)=5.105$, $p < .05$ 、 $F(1,9)=57.957$, $p < .001$ 、 $F(1,9)=36.503$, $p < .001$ 、 $F(1,9)=7.793$, $p < .01$)、運動の安定性が高いことが示された。

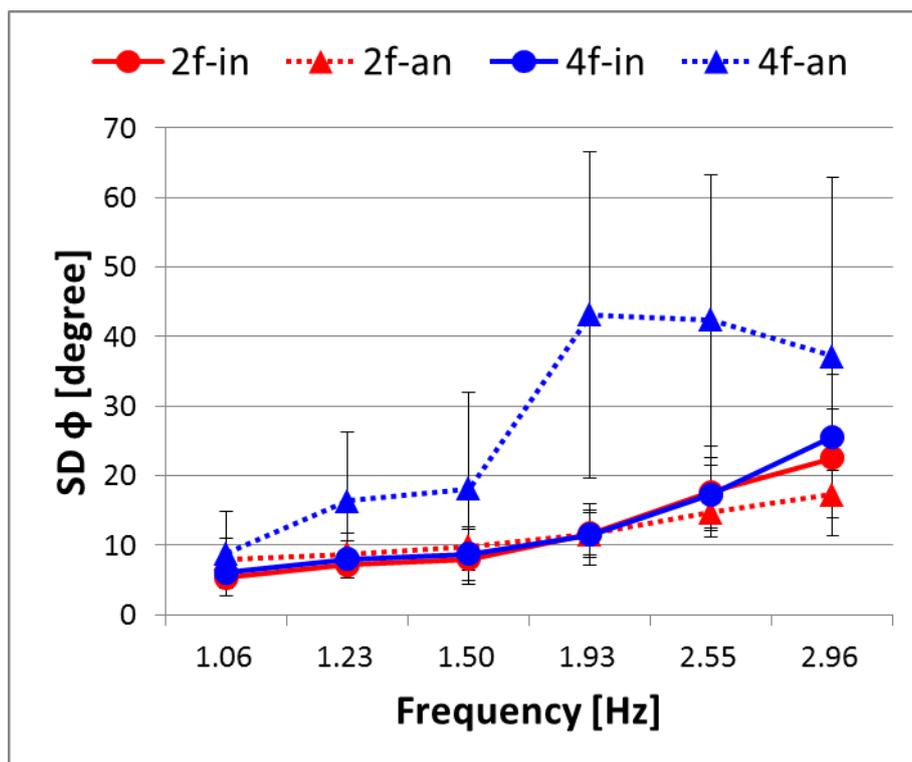


図 3-3 : SD φ

- 2本指同位相条件 (2f-in : 赤色の実線、●印)
 - 2本指逆位相条件 (2f-an : 赤色の破線、▲印)
 - 4本指同位相条件 (4f-in : 青色の実線、●印)
 - 4本指逆位相条件 (4f-an : 青色の破線、▲印)
- ※エラーバー : 標準偏差

分析2：体肢間協調の協調性（CRQA）

%REC：協調におけるノイズ

左右の人差し指同士の運動データに対しCRQAを行い、%RECを求めた結果を図3-4に示す。図3-4の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は%RECを示している。

%RECについて、指の本数（2）×位相（2）×周波数（6）の3要因分散分析を行った結果、指の本数、位相、周波数の主効果が有意であった（それぞれ、 $F(1,9)=13.047, p<.01$ 、 $F(1,9)=5.279, p<.05$ 、 $F(1,9)=25.0613, p<.001$ ）。

また、指の本数×位相、位相×周波数の交互作用がみられた（それぞれ、 $F(1,9)=5.585, p<.05$ 、 $F(1,9)=5.057, p<.001$ ）。

指の本数×位相の交互作用について下位検定を行った結果、2本指条件では同位相と逆位相の間に有意差がみられなかったのに対し、4本指条件では同位相のほうが逆位相より%RECが有意に高く（ $F(1,9)=8.666, p<.01$ ）、ノイズが小さいことが示された。また、同位相条件では2本指条件と4本指条件に有意差がみられなかったのに対し、逆位相条件では2本指条件のほうが4本指条件より%RECが有意に高く（ $F(1,9)=18.526, p<.001$ ）、ノイズが小さいことが示された。すなわち、指の本数×位相の交互作用は、4本指逆位相条件が他の条件より%RECが有意に小さいことによると考えられる。

位相×周波数の交互作用について下位検定を行った結果、周波数区間 f1 - f3 で同位相のほうが逆位相より%RECが有意に高く（それぞれ、 $F(1,9)=17.507, p<.001$ 、 $F(1,9)=7.646, p<.01$ 、 $F(1,9)=4.396, p<.05$ ）、ノイズが小さいことが示された。

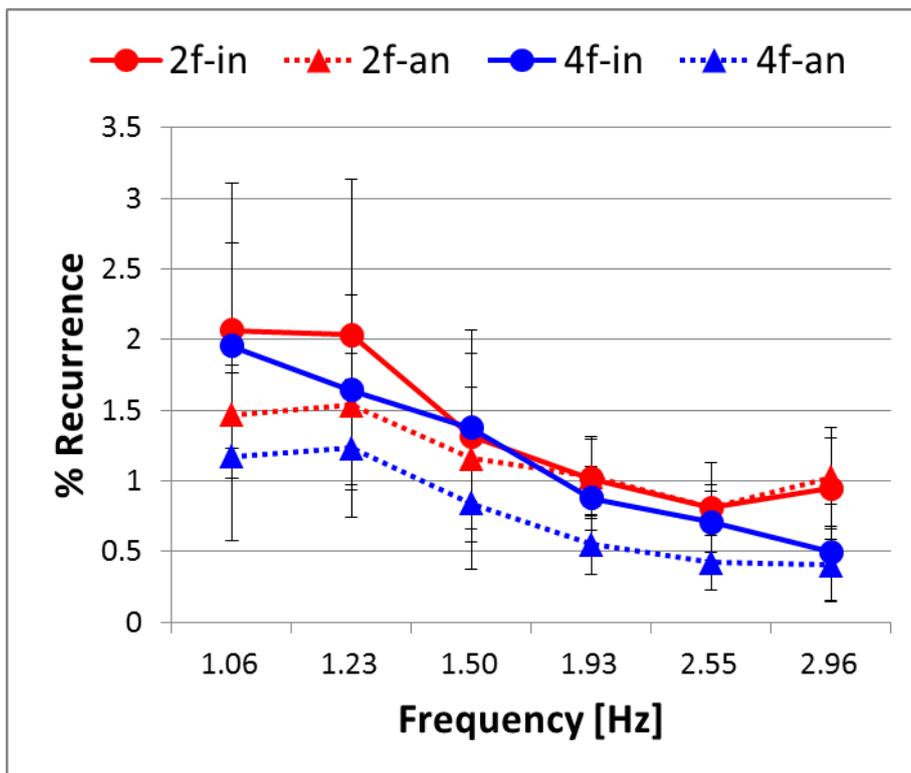


図 3-4 : %REC

- 2本指同位相条件 (2f-in : 赤色の実線、●印)
 - 2本指逆位相条件 (2f-an : 赤色の破線、▲印)
 - 4本指同位相条件 (4f-in : 青色の実線、●印)
 - 4本指逆位相条件 (4f-an : 青色の破線、▲印)
- ※エラーバー : 標準偏差

MAXL：協調における結合強度

左右の人差し指同士の運動データに対し CRQA を行い、MAXL を求めた結果を図 3-5 に示す。図 3-5 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は MAXL を示している。

MAXL について、指の本数 (2) ×位相 (2) ×周波数 (6) の 3 要因分散分析を行った結果、指の本数、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,9)=16.027, p<.005$ 、 $F(1,9)=7.886, p<.05$ 、 $F(1,9)=11.127, p<.001$)。

また、指の本数×周波数、位相×周波数の交互作用がみられた (それぞれ、 $F(1,9)=3.314, p<.05$ 、 $F(1,9)=5.580, p<.001$)。

指の本数×周波数の交互作用について下位検定を行った結果、周波数区間 f4 - f6 で 2 本指条件のほうが 4 本指条件より MAXL が有意に長く (それぞれ、 $F(1,9)=6.653, p<.05$ 、 $F(1,9)=8.083, p<.01$ 、 $F(1,9)=24.281, p<.001$)、結合強度が強いことが示された。

位相×周波数の交互作用について下位検定を行った結果、周波数区間 f1 - f3 で同位相条件のほうが逆位相条件より MAXL が有意に長く (それぞれ、 $F(1,9)=19.789, p<.001$ 、 $F(1,9)=8.640, p<.005$ 、 $F(1,9)=9.553, p<.005$)、結合強度が強いことが示された。

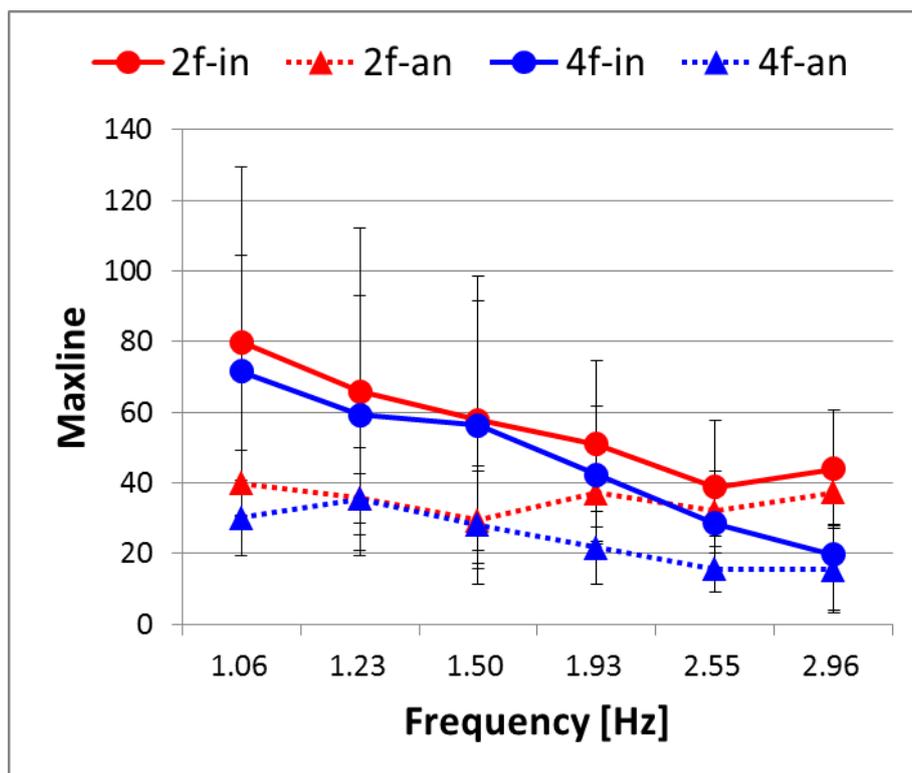


図 3-5 : Maxline

2本指同位相条件 (2f-in : 赤色の実線、●印)

2本指逆位相条件 (2f-an : 赤色の破線、▲印)

4本指同位相条件 (4f-in : 青色の実線、●印)

4本指逆位相条件 (4f-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

AVGL：協調における持続的協調性

左右の人差し指同士の運動データに対し CRQA を行い、AVGL を求めた結果を図 3-6 に示す。図 3-6 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は AVGL を示している。

AVGL について、指の本数 (2) ×位相 (2) ×周波数 (6) の 3 要因分散分析を行った結果、指の本数、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,9)=6.650$, $p<.05$ 、 $F(1,9)=6.598$, $p<.05$ 、 $F(1,9)=4.349$, $p<.005$)。

また、指の本数×位相、指の本数×周波数の交互作用がみられた (それぞれ、 $F(1,9)=5.449$, $p<.05$ 、 $F(1,9)=38.881$, $p<.001$)。

指の本数×位相の交互作用について下位検定を行った結果、2 本指条件では同位相と逆位相の間に有意差がみられなかったのに対し、4 本指条件では同位相のほうが逆位相より AVGL が有意に長く ($F(1,9)=11.113$, $p<.005$)、持続的協調性が高いことが示された。また、同位相条件では 2 本指条件と 4 本指条件に有意差がみられなかったのに対し、逆位相条件では 2 本指条件のほうが 4 本指条件より AVGL が有意に長く ($F(1,9)=11.965$, $p<.005$)、持続的協調性が高いことが示された。すなわち、指の本数×位相の交互作用は、4 本指逆位相条件が他の条件より AVGL が有意に短いことによると考えられる。

指の本数×周波数の交互作用について下位検定を行った結果、周波数区間 f1 - f3 では 4 本指条件のほうが 2 本指条件より AVGL が有意に長く (それぞれ、 $F(1,9)=18.807$, $p<.001$ 、 $F(1,9)=23.562$, $p<.001$ 、 $F(1,9)=5.924$, $p<.05$)、持続的協調性が高いことが示された。周波数区間 f4 - f6 では 2 本指条件のほうが 4 本指条件より AVGL が有意に長く (それぞれ、 $F(1,9)=4.904$, $p<.05$ 、 $F(1,9)=23.758$, $p<.001$ 、 $F(1,9)=122.071$, $p<.001$)、持続的協調性が高いことが示された。

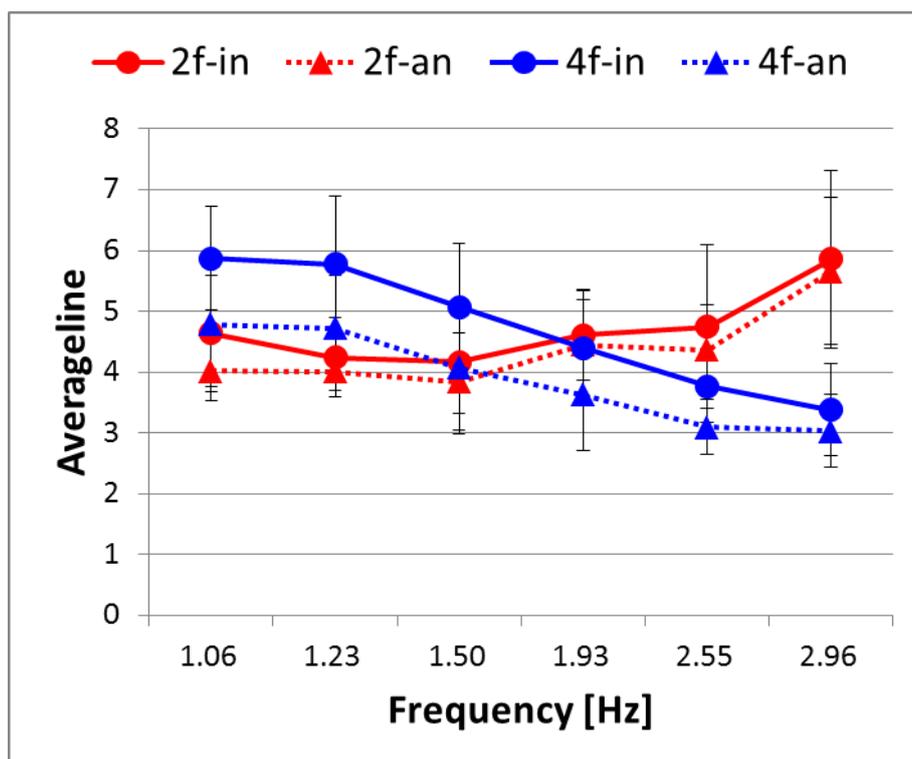


図 3-6 : Averageline

- 2本指同位相条件 (2f-in : 赤色の実線、●印)
 - 2本指逆位相条件 (2f-an : 赤色の破線、▲印)
 - 4本指同位相条件 (4f-in : 青色の実線、●印)
 - 4本指逆位相条件 (4f-an : 青色の破線、▲印)
- ※エラーバー : 標準偏差

第4節 考察

第1項 2本指条件

実験1で得られた体肢間協調に関するデータを多角的に分析した結果、2本指条件では、体肢間協調の安定性 ($SD\phi$)、ノイズ (%REC)、持続的協調性 (AVGL) の指標については同位相条件と逆位相条件の間に有意差がみられなかった。これらの結果は、宙で体肢を振る課題によって検証されてきた HKB モデルによる予測と一致しなかった。すなわち、HKB モデルの予測に従うと、高周波数になると同位相パターンのほうが逆位相パターンより安定する。しかし、体肢の周期的な運動の特定の点（屈曲のピーク）で「環境との接触」というイベントが生じるタッピング課題には、この HKB モデルの予測はあてはまらなかったのである。これらの指標についてみられた指の本数×位相の交互作用について下位検定を行った結果、同位相条件における2本指条件と4本指条件の間に有意差はみられず、逆位相条件においては2本指条件のほうが4本指条件より安定していたことが示された。これらの結果より、2本指逆位相条件の安定化が指の本数×位相の交互作用をもたらしたと考えられる。

この結果について、2本指逆位相条件では相転移が起きたため、高周波数でも同位相パターンとして安定していた可能性も考えられる。そこで、相転移が起きていたかどうかについて確認するため、以下の方法によって、相転移の生起を調べた。同位相条件、逆位相条件、それぞれの試行における相対位相が、 180 ± 50 度、 0 ± 50 度の範囲内、すなわち、課題で求められる位相パターンと逆の位相パターンとなったタップが、5回連続して続いた場合を相転移が生起したと定義した。各条件について相転移の生起率を算出したところ、4本指・逆位相条件では、全試行の97.5%で相転移が観察されたのに対して、その他の試行では、1度も相転移は観察されず、生起率は0%であった。これらの結果から、2本指逆位相条件で高周波数でも安定性が保たれたのは、相転移が起きていたからではないことが確認された。以下、その他の要因についても考察する。

1つめの要因は、運動の周波数を操作するために使用されたメトロノームの周波数の範囲である。実験1では、先行研究(Mechsner et al., 2001; Riek & Woolley, 2005)に従い、1~3Hzの範囲でメトロノームの周波数は設定された。指の運動における臨界周波数は約2.2Hzと言われている(Kelso, 1984; Zanone & Kelso, 1992)。よって、実験1のメトロノームの周波数は臨界周波数をカバーしていたと考えられる。

2つめの要因は、実験2の仮説で想定されていた触覚情報の影響が考えられる。つまり、宙で指を振る運動課題と異なり、タッピング課題では運動の特定の地点（屈曲のピーク）で指先が環境に接触する。そのため、指先が接触することで得られる触覚情報が不安定とされている逆位相パターンの運動が安定したのではないかと考えられる。また、本研究の基本仮説、「体肢・姿勢は不可分な相互作用関係にある」の観点から本結果について考察すると、指先の環境への接触というイベントは、体肢間協調の安定化のみならず、姿勢の安定化をもたらす可能性も考えられる。また、姿勢というグローバル

なレベル（全体）でのシステムの安定化が起こることで、さらに体肢間協調というローカルなレベル（部分）でのシステムの安定化が起きるとも考えられる。

第2項 4本指条件

実験1で得られた体肢間協調に関するデータを多角的に分析した結果、4本指条件では、体肢間協調の安定性（SD ϕ ）については低周波数区間（f1）を過ぎると同位相条件のほうが逆位相条件より安定すること、ノイズ（%REC）と持続的協調性（AVGL）の指標については同位相条件のほうが逆位相条件より安定していたことが示された。これらの結果は、4本指タッピング実験を実施した先行研究の結果と一致し（Mechsner et al., 2001）、HKBモデルの予測とも一致する。また、4本指逆位相条件では周波数が高くなると同位相への相転移も観察された（Kodama et al., 2015）。本研究で実施した実験1では、視覚的・空間的対称性（Mechsner et al., 2001）という知覚的要因、相同筋の同時活性化という神経筋レベルの要因（Kelso, 1984）が関与した可能性がある。2本指逆位相条件で考察された触覚情報による安定化の影響より、これらの要因のほうが強く作用したため、このような結果が得られたと考えられる。これら複数の要因が体肢間協調に与える異なる影響については、さらなる検討が必要である。

第5節 要約

実験1では、環境との接触が体肢間協調に及ぼす影響を調べるため、指が屈曲する際に机の表面に接触するタッピング課題を用いた実験を実施した。両手の人差し指を用いる2本指条件と、人差し指と中指を用いる4本指条件について、それぞれ同位相条件と逆位相条件を検討した。各試行内では運動の周波数を操作するメトロノームの周波数が1~3Hzの範囲で連続的に上昇するよう設定された。体肢間協調について多角的に分析を行った結果、2本指条件では、不安定とされている逆位相条件が安定化し、全周波数区間で同位相条件と安定性、ノイズ、持続的協調性の指標において有意な差が認められなかった。先行研究（Kelso, 1984）での実験課題と異なり、タッピング課題では机に触れるという環境への接触というイベントによって得られる触覚情報が逆位相パターンの運動を安定化させたと考えられた。4本指条件では、高い周波数で逆位相条件が不安定化し、同位相のほうが安定するという結果が得られた。この結果は、これまでの先行研究の結果と一致する。指の本数という変数によって、指先で得られる触覚情報による逆位相の安定化、知覚的要因や神経筋レベルの要因による逆位相の不安定化といった体肢間協調への影響が異なるという事実は、これまでの体肢間協調研究では検討されていない発見といえる。今後、複数の要因を統制し、変数を特定するような実験的研究、及び、指の本数といった変数を考慮したモデルの拡張が期待される。本研究では、実験1で得られた結果のうち、2本指条件における逆位相パターンの安定化要因を明らかにするため、実験2を計画した。実験2では、指先が接触する環境の特性（タッ

ブ面)を操作し、指先で得られる触覚情報のうち反作用力を伴う力覚情報と反作用力は伴わない皮膚感覚情報によるものかを明らかにする。

第4章 指先の環境特性が体肢間協調と姿勢に及ぼす影響（実験2）

第1節 目的

実験2の目的は、指先が接触する環境特性が体肢間協調、及び、姿勢に及ぼす影響を明らかにすることである。具体的には、指先が接触する環境特性として、タップ面（指がタップする対象物の表面）が、硬くて指先で力を加えると反作用力が得られる Hard 条件と、軟らかくて反作用力が十分に得られずに触覚情報のみが得られる Soft 条件、そして、環境との接触がなく指を宙で振るだけの No Contact 条件を検討する。指先が接触する環境特性を操作することにより、実験1で示唆された仮説、すなわち、逆位相パターンの運動が触覚情報により安定化することを検証する。よって、仮説から予測される結果としては次の2つが考えられる。

1) 指先で触覚情報に加え反作用力が得られれば、体肢間協調が安定化する。この場合、Hard 条件で Soft 条件と No contact 条件より高い安定性が観察される、という結果となる。

2) 指先で触覚情報が得られれば、体肢間協調が安定化する。この場合、Hard 条件と Soft 条件で No contact 条件より高い安定性が観察され、Hard 条件と Soft 条件の間には有意差がみられない、という結果となるはずである。

さらに、実験2では、指先が接触する環境特性が、姿勢の安定性、体肢-姿勢間協調に及ぼす影響についても検証する。Light touch 研究において、指先の環境への接触が立位姿勢の安定化をもたらしたことを考えると、本研究においても、指先が環境に接触する Hard 条件、Soft 条件では、No contact 条件よりも姿勢が安定すると予測される。また、体肢-姿勢間協調については、体肢間協調というローカルなレベルでのダイナミクスと姿勢というグローバルなレベルでのダイナミクスが相互作用するという仮説に基づくと、体肢間協調が安定化すると予測される Hard 条件、Soft 条件において、体肢-姿勢間の協調性も高まることが予測される。

第2節 方法

実験参加者

実験参加者は健常な成人8名（男性7名、女性1名）であった。年齢は23歳から38歳（平均年齢30.5歳）であり、いずれの実験参加者も右利きであった。実験の手続きは国立情報学研究所の倫理審査委員会にて承認されていた。実験参加者は実験に参加する際、同意書に署名し、謝礼として時給1000円を支払われた。

実験装置・データ計測

図4-1に実験状況の概略を示す。メトロノーム音には一音の長さが約85msのビーブ音が用いられ、音量は、実験前に実験参加者ごと、ペアごとに不快でない大きさに設定された。刺激に使用されたメトロノームは、1.67 Hz、2.00Hz、2.33Hz、2.67Hz、3.00Hzの5つの周波数区間について、それぞれ16拍ずつ音が鳴るよう設定され、1試行全体で約38秒間となっている。なお、メトロノームは、タブレット端末(iPad mini 8.1 MD529J/A; Apple)で再生されたものをノイズキャンセリングヘッドフォン(MM-450X MM450-X; Sennheiser)を通して提示された。タッピングの運動は、光学式3次元モーションキャプチャシステム(OptiTrack; Natural Point)で記録された。姿勢の計測は、足圧中心(Center of Pressure; COP)をフォースプレート(9260AA6; Kistler)を用いて行った。メトロノームの音声はビデオカメラ(HDR-PJ390; Sony)で同期して記録された。モーションキャプチャシステム、フォースプレート、ビデオカメラは信号同期装置(OptiTrack A/V リモート、OptuHub; Natural Point)を用いて同期された。

本研究では、実験2で「指先が接触する環境特性」を操作することで、体肢間協調、姿勢、体肢-姿勢間協調を支える要因を明らかにするため、指先で得られる「力(force)」と「情報(information)」(ここでは触覚情報 haptic information を指す)の分離を試みる。そのため、指先で得られる力については「皮膚表面が環境の表面に接触した際に生じる反作用力で、姿勢の安定性に影響する程度の力を有するもの」と定義する。また、指先で得られる触覚情報については「皮膚表面が環境表面に接触することで得られる情報」と定義する。具体的には、指先にかかる圧力と姿勢動揺の関係について調べた先行研究(Jeka & Lackner, 1994)を参照し、指先が接触する環境特性、指先で得られる情報、力、及び、それらの変数を操作するために作成したタップ台の関係は以下の通り定義する(表4-1、図4-2)。図4-2左は、Hard条件で用いたタップ台であり、ゴム素材が隆起した箇所下部に木材を固定し、タップした際、十分な反作用力が得られ、触覚情報と力が得られるという特性をもつ。図4-2中は、Soft条件で用いたタップ台であり、ゴム素材が隆起した箇所下部には何もなかったため、タップした際、十分な反作用力が得られず、触覚情報のみが得られるという特性をもつ。図4-2右は、No contact条件の状況を示しており、指先が接触する対象がなく宙で指を振るだけの状態のため、触覚情報、力いずれも得られない。

データ処理

モーションキャプチャ、フォースプレートのサンプリング周波数は100Hzに設定され、解析にあたっては、ローパスフィルタ(Butterworth filter)による平滑化が行われた。カットオフ周波数の選定にあたっては残差分析を行い(Robertson, Caldwell, Hamill, Kamen, & Whittlesey, 2013)、それぞれ30Hz、10Hzとした。

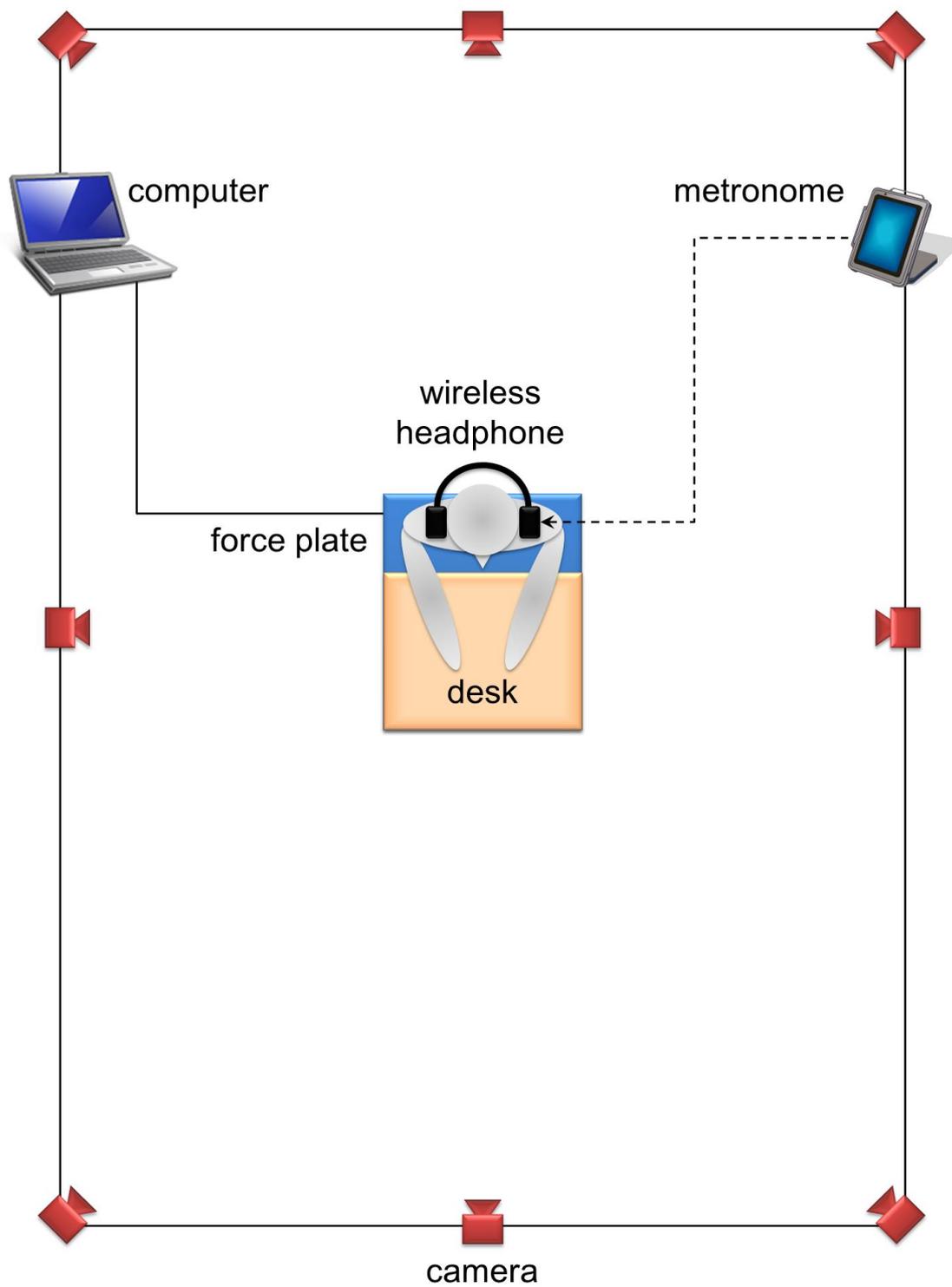


図 4-1 : 実験状況

表 4-1 : 指先が接触する環境特性 (タップ面の特性)

環境特性	情報・力	タップ台	表記
硬い	触覚情報+力	ゴム素材+木材	Hard (H)
軟らかい	触覚情報のみ	ゴム素材	Soft (S)
接触なし	なし	なし	No contact (N)

※姿勢の安定性に影響する指先の反作用力は Jeka & Lackner (1994) に従い 400g 重以上とみなした。図 4-1 で示すタップ台を使った予備実験より、Hard 条件、Soft 条件でそれぞれ約 400g 重、200g 重程度の力がタップ時に加わることが確かめられた。



図 4-2 : 実験条件

左 : Hard 条件、中 : Soft 条件、右 : No contact 条件

手続き

実験計画は、タップ面 (Hard、Soft、No contact) × 位相 (同位相、逆位相) の 2 要因被験者内計画であった。タップ面 (指先が接触する環境特性) は、Hard、Soft、No contact の 3 水準を検討した (表 4-1、図 4-2)。位相は、実験 1 と同様に、人差し指同士が同期する同位相、それらが交互にタップする逆位相の 2 水準を検討した。

課題は、1.67 Hz、2.00Hz、2.33Hz、2.67Hz、3.00Hz の 5 つの周波数 (表 4-2) でステップ式に加速するメトロノーム音に同期してタッピングを行うことである。ただし、いずれの位相においても、メトロノームと運動の周期が一致するよう求められた。逆位相パターンでは、左手の人差し指がメトロノーム音と同期するよう求められた。また、課題を行う際、実験参加者は指の動きを注視するよう求められた。実験では、練習試行のあと 6 条件を 1 回ずつランダムに行うブロックが 3 回繰り返され、合計 18 試行が実施された。適宜休憩を挟みながら、実験に要した時間は、30 分ほどであった。

表 4-2：実験2のメトロノーム周波数の設定

周波数区間	f1	f2	f3	f4	f5
周波数 [Hz]	1.67	2.00	2.33	2.67	3.00

データ分析

実験2では、体肢間協調については実験1と同様に指の屈曲伸展方向の運動成分（垂直方向、y成分）を分析対象とした。姿勢については、COPデータの左右方向（Medio-Lateral、x成分：COPx）、前後方向（Anterior-Posterior、y成分：COPy）を分析対象とした。分析区間については、実験2では実験1と異なりメトロノームの周波数をステップ式に加速しているため、周波数が増えた直後の区間は分析対象から除外した。SD ϕ 、COPの単位時間当たりの軌跡長の分析では、各周波数区間で全16回の拍のうち最初の4回分を分析区間から除外し、4回目以降の区間を分析の対象とした。その他の非線形時系列解析においては、分析区間（データ長、サンプル数）が分析結果に影響するため、各周波数区間の最後の4秒間（400サンプル）を分析の対象とした。

体肢間協調の分析

実験2では、実験1と同様に、協調の安定性を評価する指標としてSD ϕ を求め（分析1）、協調性を分析するためにCRQAを実行し、ノイズの程度（%REC）、結合強度（MAXL）、持続的協調性（AVGL）を求めた（分析2）。CRQAの入力変数は次の通り設定された。遅延時間については、運動周期の1/4と一致するよう5つの周波数区間ごとにそれぞれ「15」（f1）、「13」（f1）、「11」（f3）、「10」（f4）、「9」（f5）と設定された。埋め込み次元は「5」とした。半径は、zスコアに基づいて平均距離で標準化された位相空間内でのユークリッド距離「25」の範囲内と設定された。

姿勢の分析

実験2では、姿勢の安定性を評価する指標として、COPデータのxy成分から求まる総軌跡長を分析区間（ Δt ）で除した単位時間軌跡長（L[cm/s]）を用いた（分析3）。

Detrended Fluctuation Analysis (DFA)

また、姿勢の安定性、組織化について定量的に評価するため、非線形時系列解析手法であるトレンド除去ゆらぎ解析(Detrended Fluctuation Analysis, DFA; Peng, Havlin, Stanley, & Goldberger, 1995; Peng et al., 1994)を行った（分析4）。DFAは、時系列データのトレンドを数学的に除いた上でゆらぎを解析するため、非定常的な変動特性を持つ時系列データの解析に適用できるという特徴をもつ(Peng et al., 1994, 1995)。また、比較的少ないデータ長（サンプル数）の時系列にも適用可能であることが示されており(Delignières et al., 2006)、心拍変動(Peng et al., 1995)や歩行(Goldberger et al., 2002)、姿勢動揺(Delignières, Torre, & Bernard, 2011)などの分析

に積極的に応用されている。

DFAの手順は次の通りである。まず、分析対象となる時系列 $\{x(t)\}$ を確率過程とみなし、平均値で標準化する。標準化された時系列を積算し、時系列 $\{y(t)\}$ をつくる。次に、 $\{y(t)\}$ を重複しないように等間隔の長さ n の部分区間に分割する。部分区間ごとに最小二乗法により回帰直線（トレンドとする）を求める。 $y(t)$ のトレンドからの平均二乗偏差を求め、その平方根を動揺量 $F(n)$ とする。次に、この計算を様々なスケール n の部分区間で繰り返し、 $F(n)$ とボックスサイズ n の関係が得られ、その一次近似式から求まる直線の傾き α がフラクタル・スケーリング指数（Fractal scaling 指数：FS 指数）となる(Peng et al., 1995)。本研究では、統計ソフト R (version 3.1.2) の '*fractal*' package (version 2.0) で DFA を実行し、FS 指数 α を算出した。

DFA で求められる FS 指数 α については、次のように解釈することができる。 $0 < \alpha < 0.5$ のとき、 $y(t)$ は反持続性相関をもつ。負の自己相関をもつため、過去に起きた変動とは逆向きの変動が未来で起こる可能性が高くなる。 $\alpha = 0.5$ のとき、 $y(t)$ には自己相関はなく、ホワイトノイズである。 $0.5 < \alpha < 1.0$ のとき、 $y(t)$ は持続性相関をもつ。正の自己相関をもつため、過去に起きた変動と同じ向きの変動が未来で起こる可能性が高くなる。 $\alpha = 1.0$ のとき、 $y(t)$ は $1/f$ のゆらぎ（ピンクノイズ）となる。 $\alpha > 1.0$ のとき、 $y(t)$ には自己相関性はあるが、 α 値の増大とともにフラクタル性は消失する。 $\alpha = 1.5$ のとき、 $y(t)$ はブラウン運動（ブラウンノイズ）である。

COP の位置変化を記録した時系列データに対し、DFA を適用する場合、入力信号として、まず COP の左右方向（x 成分）と前後方向（y 成分）の 2 種類がある。さらに、それぞれを位置データのまま DFA にかける場合と、位置データを時間微分し速度データに変換して DFA にかける場合とがある(Delignières et al., 2011)。それぞれの分析の結果についての解釈は次のように考えられる。まず、入力信号として COP の x 成分/y 成分を用いることは、姿勢制御の方向をそれぞれ左右方向/前後方向と別々に調べることができることを意味する。また、入力信号として COP の位置データ/速度データを用いることは、姿勢制御に利用される情報（位置情報/速度情報）を調べることができることを意味する。そして、DFA によって計算され出力された FS 指数(α)については、 $0 < \alpha < 0.5$ の場合、値が 0 に近いほど反持続的な姿勢の組織化（過去の変動と逆方向に変動するような制御）を行っていることを示し、 $0.5 < \alpha < 1.0$ の場合、値が 1 に近いほど持続的な姿勢の組織化（過去の変動と同方向に変動するような制御）を行っていることを示すと考えられる。姿勢の安定性という意味では、一般に $\alpha = 1$ のとき $1/f$ 構造（フラクタル性）を有する適応的で動的に安定した状態とみなされる(Goldberger et al., 2002)。

Multifractal-Wavelet Analysis (MWA)

さらに、本研究では、多自由度複雑系としての身体システムにおける複数の時間スケール間の相互作用を分析するため、マルチフラクタル解析を行った(分析5)。具体的には、先行研究(Thurner, Mittermaier, & Ehrenberger, 2002)に従い、マルチフラクタル-ウェーブレット解析(Multifractal-Wavelet Analysis : MWA)を行った。先行研究(Shimizu, Thurner, & Ehrenberger, 2002)によると、MWAで求まるマルチフラクタルスペクトル幅(Multifractal Spectrum Width : W)は、システムのマルチフラクタル性を表す指標の1つであり、システムの適応性、安定性を評価できる可能性が示唆されている。マルチフラクタル解析は、システム(時系列)のフラクタル性をより詳細に特徴づけるためには、時系列全体のフラクタル性を特徴づける1つの大域FS指数だけでは不十分であることから、変動が特定の時間スケールにおける局所的FS指数を複数の時間スケールで求めていく。MWAでは、このマルチフラクタル構造についてウェーブレット解析を応用することで解析する。本研究では、このMWAをモノ-マルチフラクタル解析プログラム(TAOS)を用いて実行し、計算された結果からマルチフラクタル性の指標としてマルチフラクタルスペクトル幅(W)を求め、身体システムにおける多重な時間スケール間の相互作用の程度を評価する。すなわち、Wが大きいほどシステムの複数の異なる時間スケール間での相互作用が多く、より全身での協調が達成されているとみなすのである。

体肢-姿勢間協調の分析

体肢-姿勢間協調を分析するためにCRQAを実行し、ノイズの程度(%REC)、結合強度(MAXL)、持続的協調性(AVGL)を求めた(分析6)。CRQAにかける2つの時系列の組み合わせについては、左右の人差指の垂直方向(y成分)の運動データとCOPデータの左右方向(x成分)、前後方向(y成分)の4つの組み合わせ(Lx : 左手-COPx成分、Rx : 右手-COPx成分、Ly : 左手-COPy成分、Ry : 右手-COPy成分)を検討した。遅延時間については、体肢間協調の分析と同様に運動周期の1/4と一致するよう5つの周波数区間ごとにそれぞれ「15」(f1)、「13」(f1)、「11」(f3)、「10」(f4)、「9」(f5)と設定された。埋め込み次元は「20」とした。半径は、zスコアに基づいて平均距離で標準化された位相空間内でのユークリッド距離「85」の範囲内と設定された。

第3節 結果

第1項 体肢間協調の分析

分析1：体肢間協調の安定性（SD ϕ ）

左右の人差し指同士の相対位相の標準偏差（SD ϕ ）を求めた結果を図4-3に示す。図4-3の横軸はメトロノームの周波数、縦軸はSD ϕ （度）を示している。

SD ϕ について、タップ面（3）×位相（2）×周波数（5）の3要因分散分析を行った結果、タップ面、位相、周波数の主効果が有意であった（それぞれ、 $F(1,7)=44.662$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=14.697$, $p<.01$ 、 $F(1,7)=11.442$, $p<.001$ ）。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数が高くなるほどSD ϕ が大きくなり、運動の安定性が低下する傾向が示された。

また、タップ面×位相の交互作用がみられた（ $F(1,7)=8.444$, $p<.005$ ）。交互作用について下位検定を行った結果、Hard条件では同位相と逆位相の間に有意差はみられなかったが、Soft条件とNo contact条件では同位相のほうが逆位相よりSD ϕ が有意に小さく（それぞれ、 $F(1,7)=6.845$, $p<.05$ 、 $F(1,7)=28.980$, $p<.005$ ）、運動の安定性が高いことが示された。また、同位相条件において、Hard条件とNo contact条件、Soft条件とNo contact条件の間に有意差がみられたが（それぞれ、 $t(28)=3.105$, $p<.005$ 、 $t(28)=2.949$, $p<.01$ ）、Hard条件とSoft条件の間には有意差がみられなかった。逆位相条件においても、Hard条件とNo contact条件、Soft条件とNo contact条件の間に有意差がみられたが（それぞれ、 $t(28)=8.889$, $p<.001$ 、 $t(28)=7.215$, $p<.001$ ）、Hard条件とSoft条件の間には有意差がみられなかった。

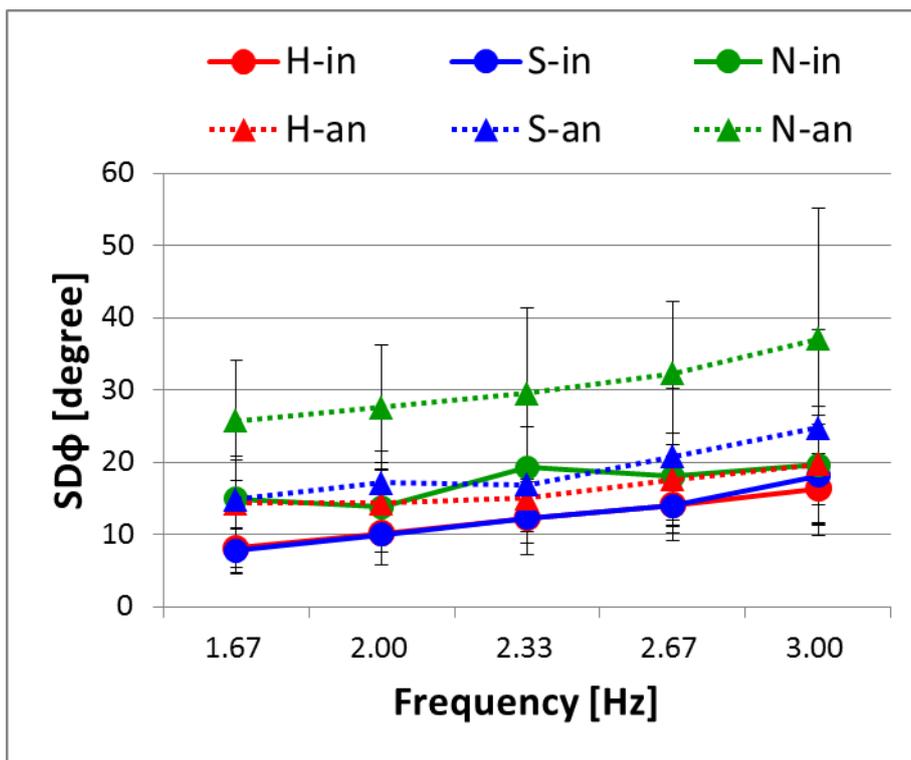


図 4-3 : SD ϕ

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

分析2：体肢間協調の協調性（CRQA）

%REC：協調におけるノイズ

左右の人差し指同士の前腕運動データに対し CRQA を行い、%REC を求めた結果を図 4-4 に示す。図 4-4 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は%REC を示している。

%REC について、タップ面（3）×位相（2）×周波数（5）の3要因分散分析を行った結果、タップ面、周波数の主効果が有意であった（それぞれ、 $F(1,7)=11.441$, $p<.005$ 、 $F(1,7)=7.069$, $p<.001$ ）。

タップ面の主効果における多重比較の結果、Hard 条件と No contact 条件、Soft 条件と No contact 条件の間に有意差が認められた（それぞれ、 $t(14)=4.666$, $p<.001$ 、 $t(14)=3.245$, $p<.01$ ）。すなわち、Hard 条件と Soft 条件の間には%REC に有意な差はみられなかったが、No contact 条件は Hard 条件、Soft 条件より%REC が有意に低く、ノイズが大きいことが示された。

また、周波数の主効果における多重比較の結果、周波数が高くなるほど%REC が低くなり、ノイズが増加する傾向が示された。

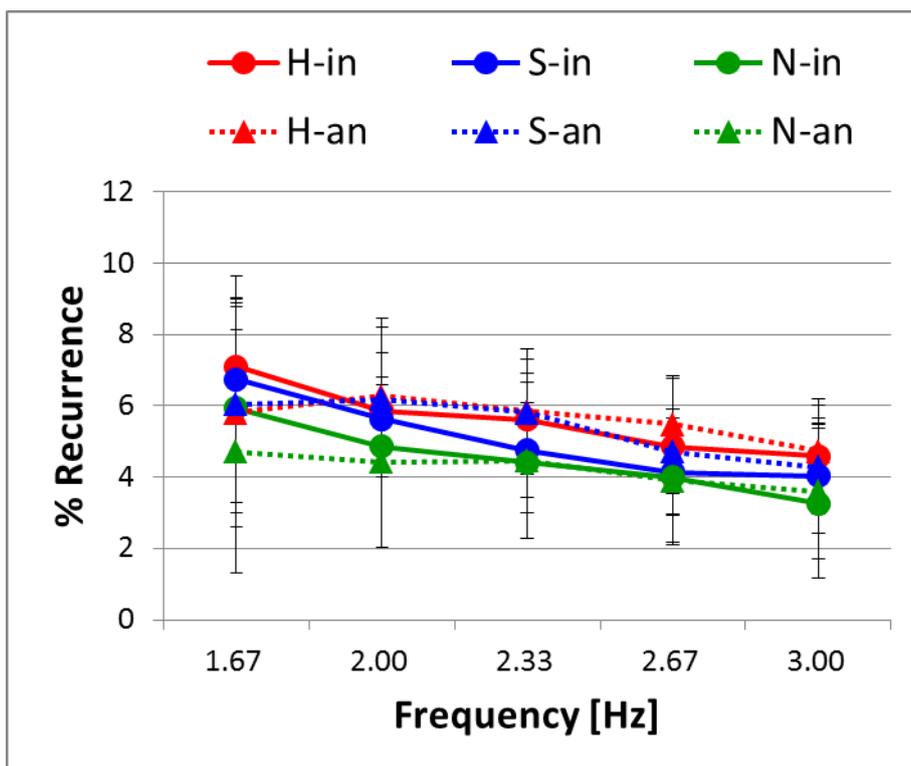


図 4-4 : %Recurrence

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

MAXL : 協調における結合強度

左右の人差し指同士の運動データに対し CRQA を行い、MAXL を求めた結果を図 4-5 に示す。図 4-5 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は MAXL を示している。

MAXL について、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、位相の主効果が有意であり ($F(1,7)=6.897, p<.05$)、同位相のほうが逆位相より MAXL が長く、指同士の結合が強いことが示された。

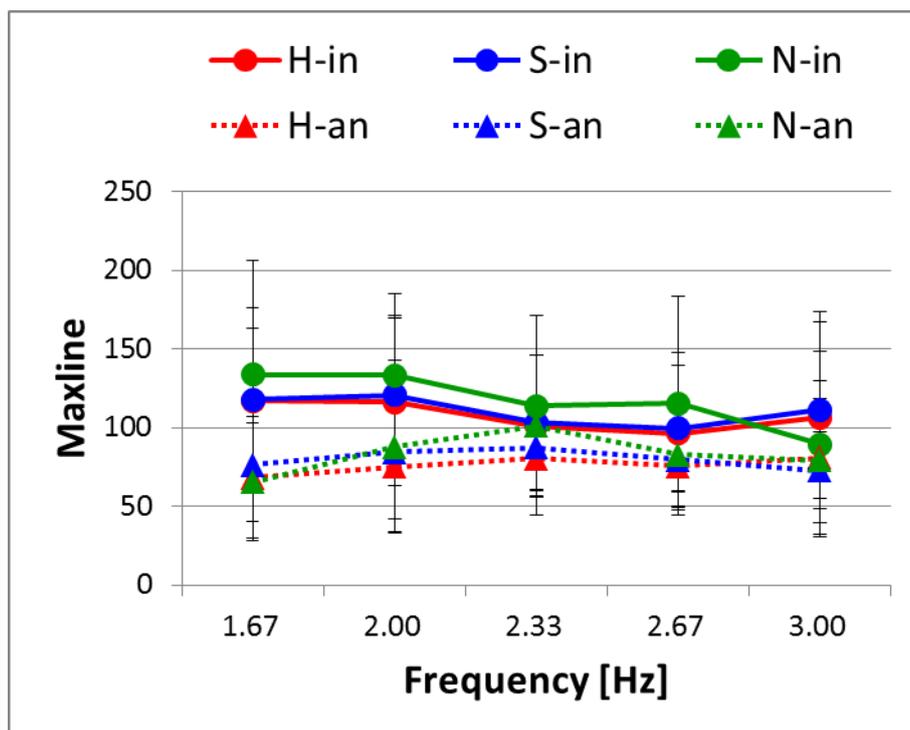


図 4-5 : Maxline

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

AVGL：協調における持続的協調性

左右の人差し指同士の運動データに対し CRQA を行い、AVGL を求めた結果を図 4-6 に示す。図 4-6 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は AVGL を示している。

AVGL について、タップ面 (3) ×位相 (2) ×周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、周波数の主効果が有意であった ($F(1,7)=4.718, p<.005$)。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数が高くなるほど AVGL が短くなり、持続的協調性が減少する傾向が示された。

また、タップ面×周波数の交互作用がみられた ($F(1,7)=3.849, p<.005$)。交互作用について下位検定を行った結果、高周波数 (f4・f5) において、タップ面の条件間で有意な差がみられた。これらについて多重比較 (Ryan 法) を行った結果、f4 で Hard 条件と No contact 条件、Soft 条件と No contact 条件に有意な差がみられた (それぞれ、 $t(70)=3.407, p<.005$ 、 $t(70)=2.786, p<.01$)。同様に f5 でも Hard 条件と No contact 条件、Soft 条件と No contact 条件に有意な差がみられた (それぞれ、 $t(70)=3.005, p<.005$ 、 $t(70)=2.114, p<.05$)。すなわち、高周波数では、No contact 条件が Hard 条件、Soft 条件より AVGL が長くなり、持続的協調性が高くなることが示された。

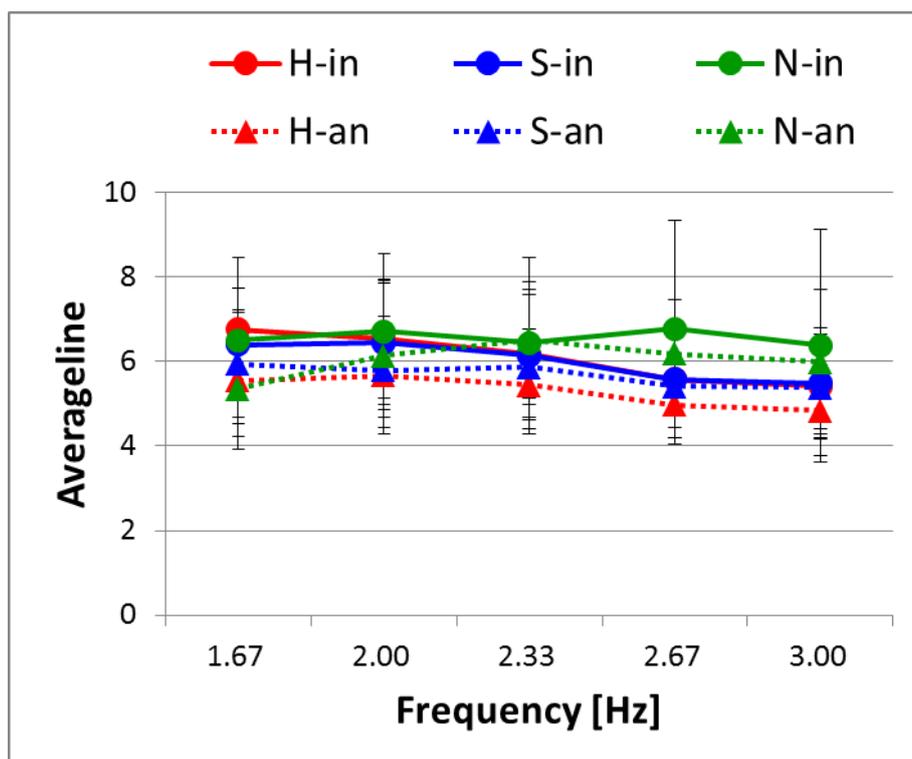


図 4-6 : Averageline

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

第2項 姿勢の分析

分析3：姿勢の安定性（L）

単位時間軌跡長 L を求めた結果を図 4-7 に示す。図 4-7 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は L (cm/s) を示している。

L について、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、周波数の主効果が有意であった ($F(1,7)=4.713, p<.005$)。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、 L は U 字型の変化をみせることが示された。

また、タップ面 × 周波数の交互作用がみられた ($F(1,7)=2.298, p<.05$)。交互作用について下位検定を行った結果、高周波数 ($f_4 \cdot f_5$) において、タップ面の条件間で有意な差がみられた。これらについて多重比較 (Ryan 法) を行った結果、 f_4 で Hard 条件と Soft 条件、Soft 条件と No contact 条件に有意な差がみられた (それぞれ、 $t(70)=2.480, p<.05$ 、 $t(70)=2.435, p<.05$)。同様に f_5 でも Hard 条件と Soft 条件、Soft 条件と No contact 条件に有意な差がみられた (それぞれ、 $t(70)=2.873, p<.01$ 、 $t(70)=2.620, p<.05$)。

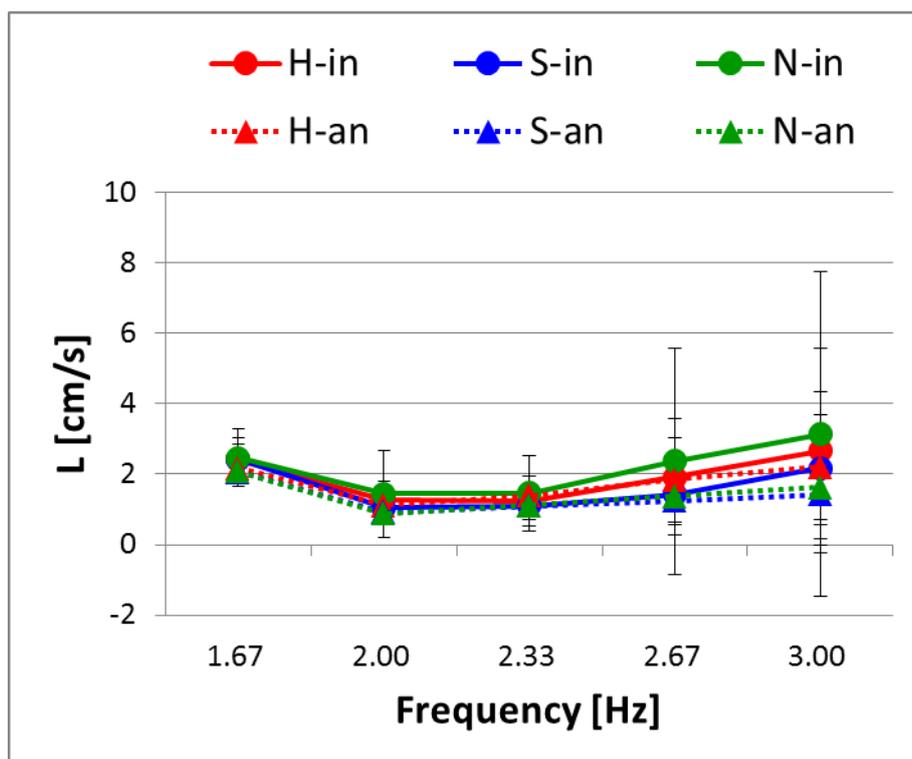


図 4-7 : L

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

分析 4 : 姿勢の組織化 (DFA)

左右方向 (x、Medio-Lateral 成分)

速度情報に対する姿勢の組織化

速度データに対する DFA で FS 指数を求めた結果を図 4-8 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は FS 指数を示している。

速度データに対する DFA で求められた FS 指数について、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、タップ面、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=4.297$, $p < .05$ 、 $F(1,7)=26.275$, $p < .005$ 、 $F(1,7)=26.634$, $p < .001$)。

タップ面の主効果における多重比較の結果、Hard 条件と Soft 条件、Hard 条件と No contact 条件の間に有意な差がみられ (それぞれ、 $t(70)=2.817$, $p < .05$ 、 $t(70)=2.110$, $p < .10$)、FS 指数は、Hard 条件 (平均 0.335) で、Soft 条件 (平均 0.317)、No contact 条件 (平均 0.314) より高く、反持続性が低いことが示された。

位相の主効果より、FS 指数は、同位相条件 (平均 0.301) のほうが逆位相条件 (平均 0.337) より低く、反持続性が高いことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、FS 指数は上昇し、反持続性が低下する傾向が示された。

また、位相 × 周波数、タップ面 × 位相 × 周波数の交互作用がみられたが (それぞれ、 $F(1,7)=5.567$, $p < .005$ 、 $F(1,7)=2.181$, $p < .05$)、これらの交互作用について下位検定を行った結果、とくに一貫した傾向はみられなかった。

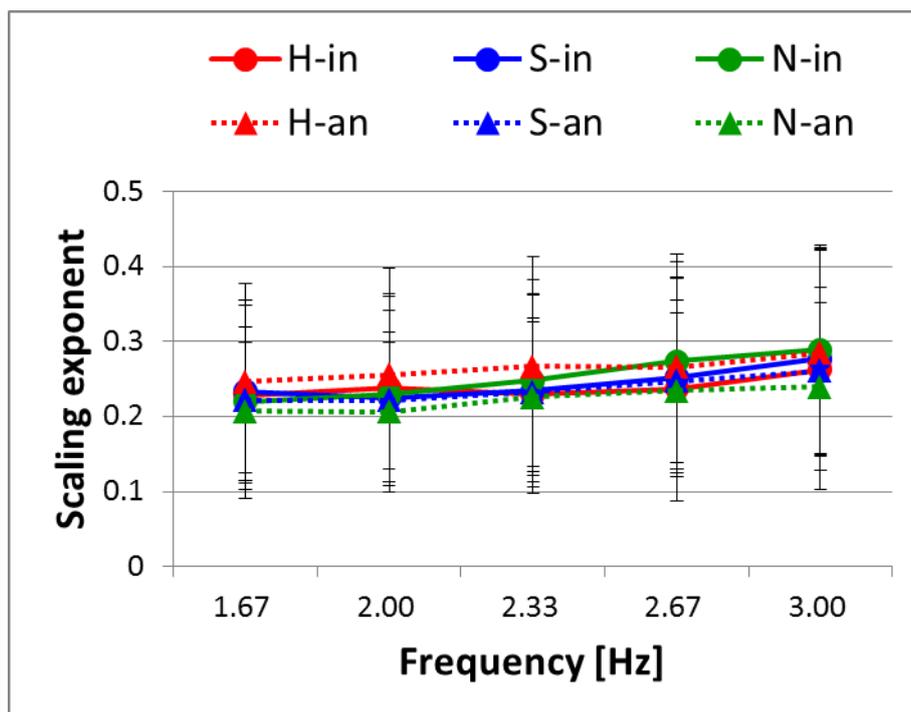


図 4-8 : x 成分の速度データについての FS 指数

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

位置情報に対する姿勢の組織化

位置データに対する DFA で FS 指数を求めた結果を図 4-9 に示す。図 4-9 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は FS 指数を示している。

位置データに対する DFA で求められた FS 指数について、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=8.318, p<.05$ 、 $F(1,7)=23.472, p<.001$)。

位相の主効果より、FS 指数は、同位相条件 (平均 0.618) のほうが逆位相条件 (平均 0.605) より高く、持続性が高いことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、FS 指数は低下し、持続性が低下する傾向が示された。

また、タップ面×位相×周波数の交互作用がみられ ($F(1,7)=2.671, p<.05$)、下位検定を行った結果、Hard 条件と Soft 条件では、高周波数 (f4・f5) で、同位相条件のほうが逆位相条件より FS 指数が有意に高く (それぞれ、 $F(1,7)=7.268, p<.01$ 、 $F(1,7)=12.514, p<.001$ 、 $F(1,7)=9.562, p<.005$ 、 $F(1,7)=8.483, p<.005$)、持続性が強いことが示された。

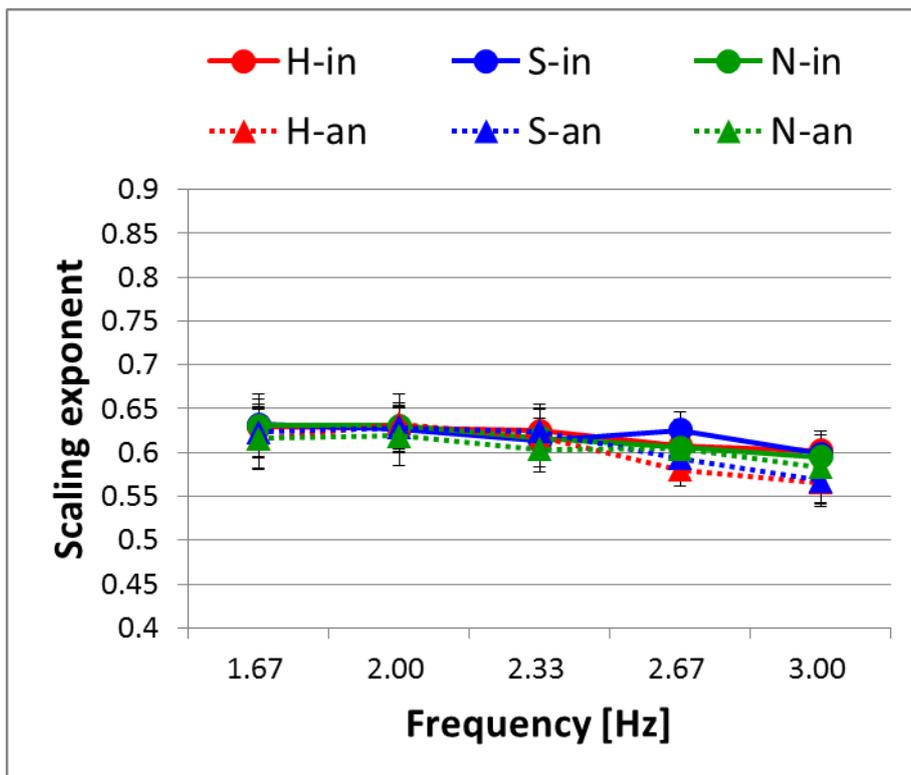


図 4-9 : x 成分の位置データについての FS 指数

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

前後方向 (y、Anterior-Posterior 成分)

速度情報に対する姿勢の組織化

速度データに対する DFA で FS 指数を求めた結果を図 4-10 に示す。図 4-10 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は FS 指数を示している。

速度データに対する DFA で求められた FS 指数について、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、周波数の主効果が有意であった ($F(1,7)=8.117, p < .001$)。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、FS 指数は上昇し、反持続性が低下する傾向が示された。

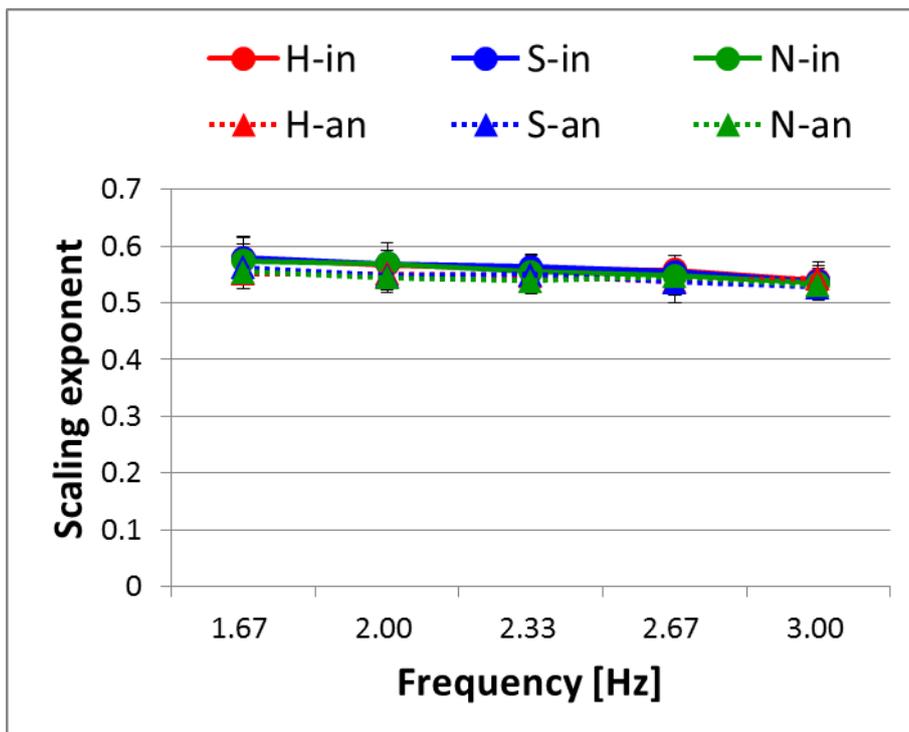


図 4-10 : y 成分の速度データについての FS 指数

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

位置情報に対する姿勢の組織化

位置データに対する DFA で FS 指数を求めた結果を図 4-11 に示す。図 4-11 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は FS 指数を示している。

位置データに対する DFA で求められた FS 指数について、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=114.045, p<.001$ 、 $F(1,7)=13.649, p<.001$)。

位相の主効果より、FS 指数は、同位相条件 (平均 0.559) のほうが逆位相条件 (平均 0.545) より高く、持続性が高いことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、FS 指数は低下し、持続性が低下する傾向が示された。

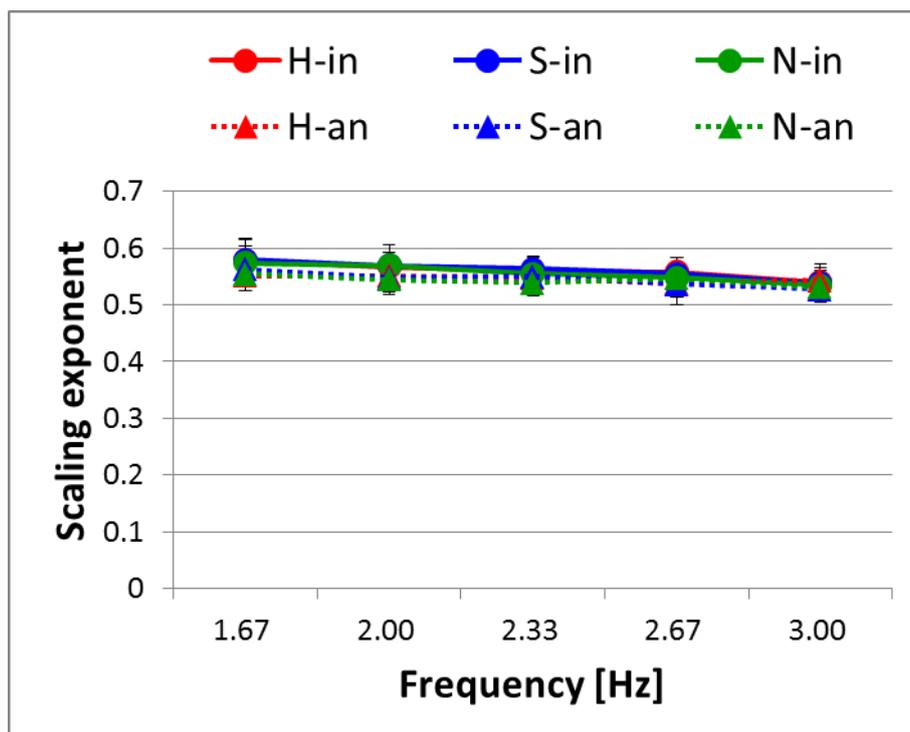


図 4-11 : y 成分の位置データについての FS 指数

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

分析 5 : 姿勢の多重性 (MWA)

左右方向 (x、Medio-Lateral 成分)

COP 位置データの x 成分に対する MWA で MFS 幅 W を求めた結果を図 4-12 に示す。図 4-12 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は W を示している。

COP 位置データの x 成分に対する MWA で求められた W について、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、タップ面、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=6.898, p< .01$ 、 $F(1,7)=3.259, p< .05$)。

タップ面の主効果における多重比較の結果、Hard 条件と Soft 条件、Soft 条件と No contact 条件の間に有意な差がみられ (それぞれ、 $t(14)=3.659, p< .005$ 、 $t(14)=2.381, p< .05$)、Soft 条件 (平均 0.515) が、Hard 条件 (平均 0.414)、No contact 条件 (平均 0.480) より有意に W が小さいことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、 W は小さくなり、姿勢の多重時間スケール間の相互作用は減少する傾向が示された。

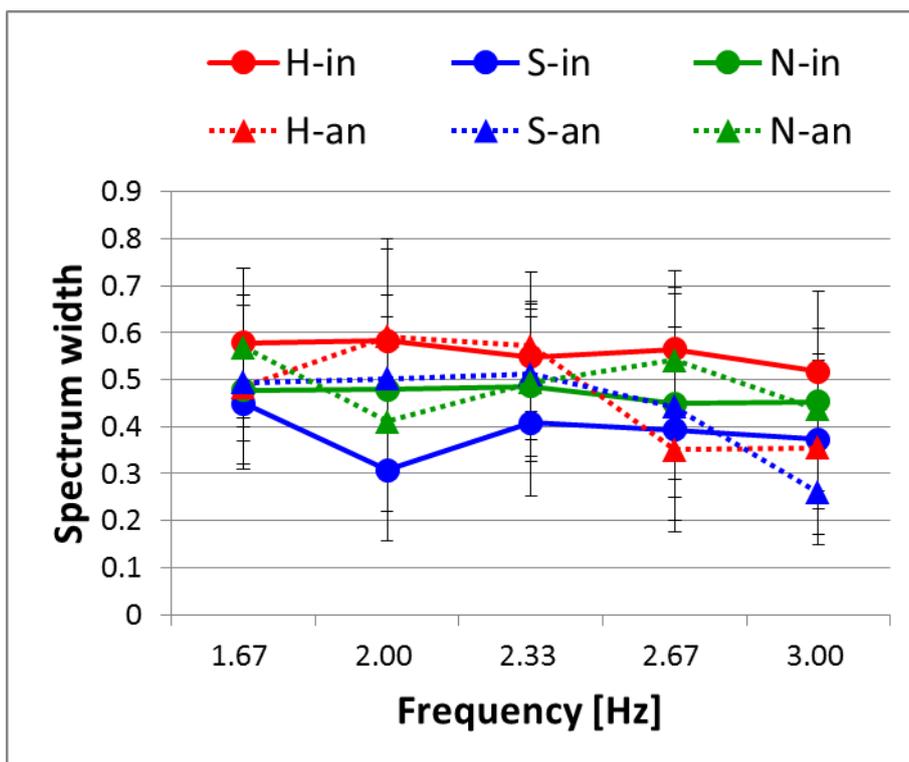


図 4-12 : x 成分の位置データについての MFS 幅

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

前後方向 (y、Anterior-Posterior 成分)

COP 位置データの y 成分に対する MWA で MFS 幅 W を求めた結果を図 4-13 に示す。図 4-13 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は W を示している。

COP 位置データの y 成分に対する MWA で求められた W について、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、周波数の主効果が有意であった ($F(1,7)=4.956, p<.005$)。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、 W は大きくなり、姿勢の多重時間スケール間の相互作用は増加する傾向が示された。

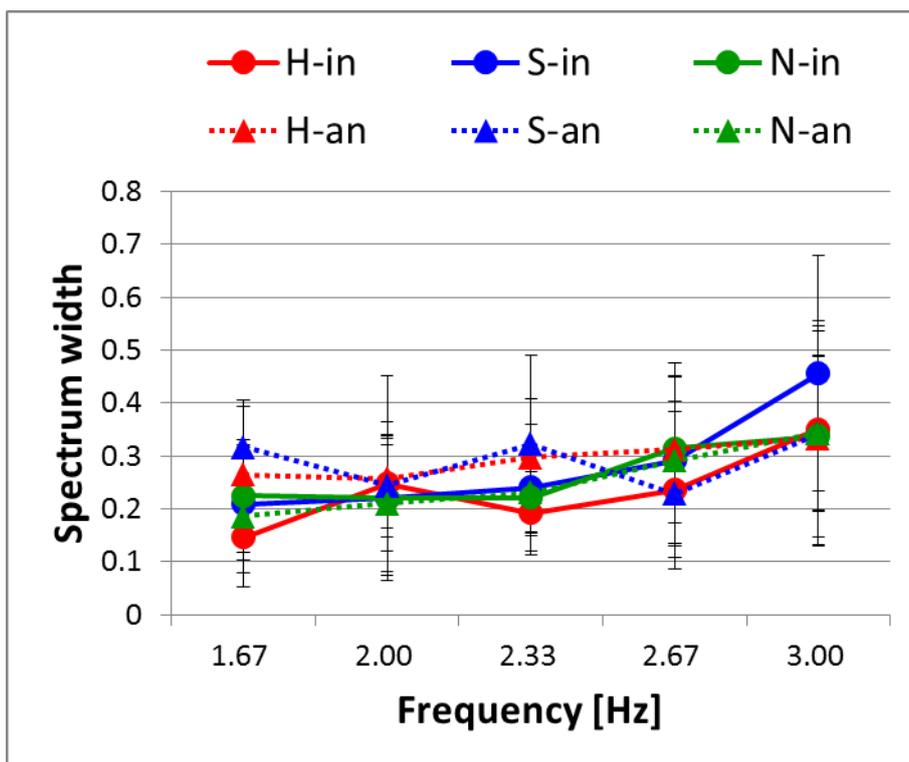


図 4-13 : x 成分の位置データについての MFS 幅

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

第3項 体肢-姿勢間協調の分析

分析6：体肢-姿勢間の協調性（CRQA）

%REC：体肢-姿勢間の協調におけるノイズ

左手人差し指と COP-x 成分の組合せ（Lx）

Lx データ間の CRQA で%REC を求めた結果を図 4-14 に示す。図 4-14 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は%REC を示している。

Lx データ間の CRQA により求められた%REC について、タップ面（3）×位相（2）×周波数（5）の 3 要因分散分析を行った結果、タップ面、位相、周波数の主効果が有意であった（それぞれ、 $F(1,7)=6.900$, $p< .01$ 、 $F(1,7)=70.315$, $p< .001$ 、 $F(1,7)=4.968$, $p< .005$ ）。

位相の主効果より、%REC は逆位相条件のほうが、同位相条件より高く、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが少ないことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い%REC は高くなり、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが減少する傾向が示された。

また、タップ面×位相の交互作用がみられ（ $F(1,7)=3.860$, $p< .05$ ）、下位検定を行った結果、同位相条件ではタップ面の条件間で有意差がみられなかった一方、逆位相条件ではタップ面の条件間で有意差がみられ、Hard 条件と No contact 条件、Soft 条件と No contact 条件の間に有意差がみられた（それぞれ $t(28)=4.161$, $p< .001$ 、 $t(28)=3.425$, $p< .005$ ）。すなわち、逆位相条件では、触覚情報が利用できない No contact 条件では、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが多くなることが示された。

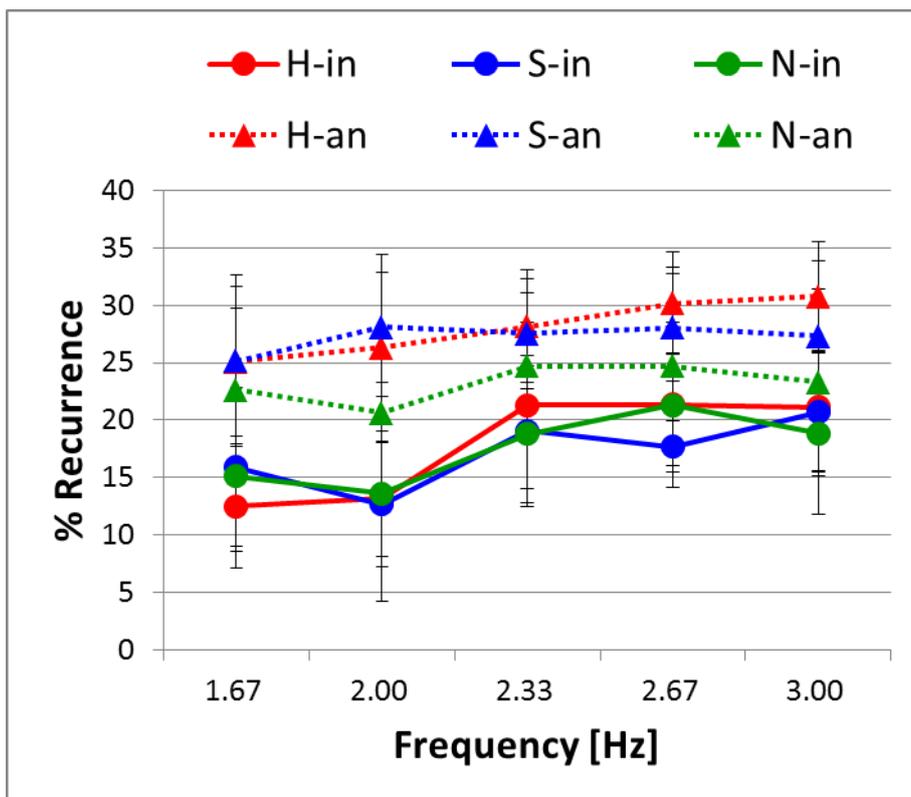


図 4-14 : L_x についての%Recurrence

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

右手人差し指と COP-x 成分の組合せ (Rx)

Rx データ間の CRQA で%REC を求めた結果を図 4-15 に示す。図 4-15 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は%REC を示している。

Rx データ間の CRQA により求められた%REC について、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、タップ面、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=6.410$, $p < .05$ 、 $F(1,7)=68.873$, $p < .001$ 、 $F(1,7)=4.072$, $p < .05$)。

位相の主効果より、%REC は逆位相条件のほうが、同位相条件より高く、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが少ないことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、%REC は高くなり、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが減少する傾向が示された。

また、タップ面×位相の交互作用がみられ ($F(1,7)=3.860$, $p < .05$)、下位検定を行った結果、同位相条件ではタップ面の条件間で有意差がみられなかった一方、逆位相条件ではタップ面の条件間で有意差がみられ、Hard 条件と No contact 条件、Soft 条件と No contact 条件の間に有意差がみられた (それぞれ、 $t(28)=4.207$, $p < .001$ 、 $t(28)=3.549$, $p < .005$)。すなわち、逆位相条件では、触覚情報が利用できない No contact 条件では、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが多くなることが示された。

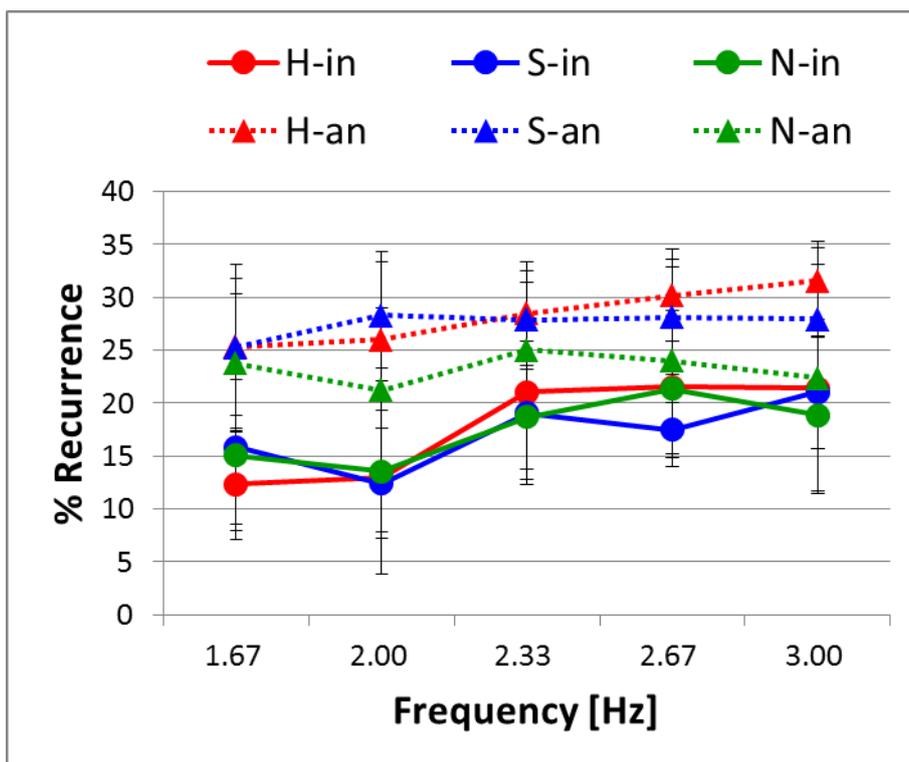


図 4-15 : Rx についての%Recurrence

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

左手人差し指と COP-y 成分の組合せ (Ly)

Ly データ間の CRQA で%REC を求めた結果を図 4-16 に示す。図 4-16 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は%REC を示している。

Ly データ間の CRQA により求められた%REC について、タップ面 (3) ×位相 (2) ×周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=47.073, p<.001$ 、 $F(1,7)=6.135, p<.005$)。

位相の主効果より、%REC は同位相条件のほうが、逆位相条件より高く、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが少ないことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、%REC は高くなり、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが減少する傾向が示された。

位相×周波数の交互作用がみられ ($F(1,7)=3.650, p<.05$)、下位検定を行った結果、同位相条件では周波数間で有意差がみられなかった一方、逆位相条件では周波数間で有意差がみられ、周波数の上昇に伴い、%REC が高まり、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが減少する傾向が示された。

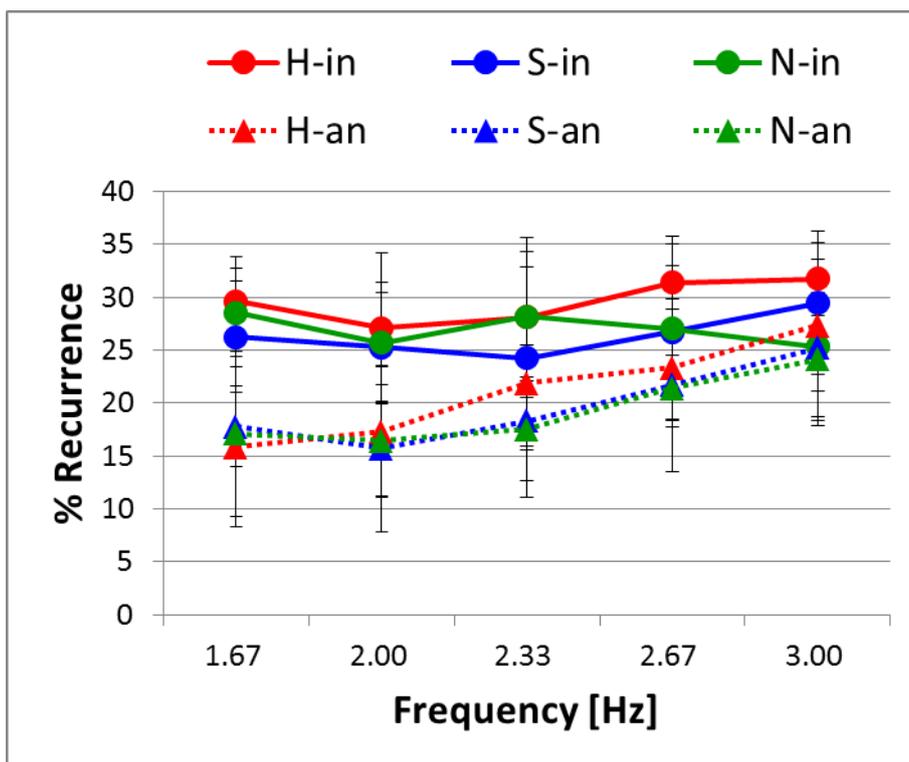


図 4-16 : Ly についての%Recurrence

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

右手人差し指と COP-y 成分の組合せ (Ry)

Ry データ間の CRQA で%REC を求めた結果を図 4-17 に示す。図 4-17 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は%REC を示している。

Ry データ間の CRQA により求められた%REC について、タップ面 (3) ×位相 (2) ×周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=38.689, p<.001$ 、 $F(1,7)=8.542, p<.001$)。

位相の主効果より、%REC は同位相条件のほうが、逆位相条件より高く、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが少ないことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、%REC は高くなり、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが減少する傾向が示された。

位相×周波数の交互作用がみられ ($F(1,7)=5.596, p<.005$)、下位検定を行った結果、同位相条件では周波数間で有意差がみられなかった一方、逆位相条件では周波数間で有意差がみられ、周波数の上昇に伴い、%REC が高まり、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが減少する傾向が示された。

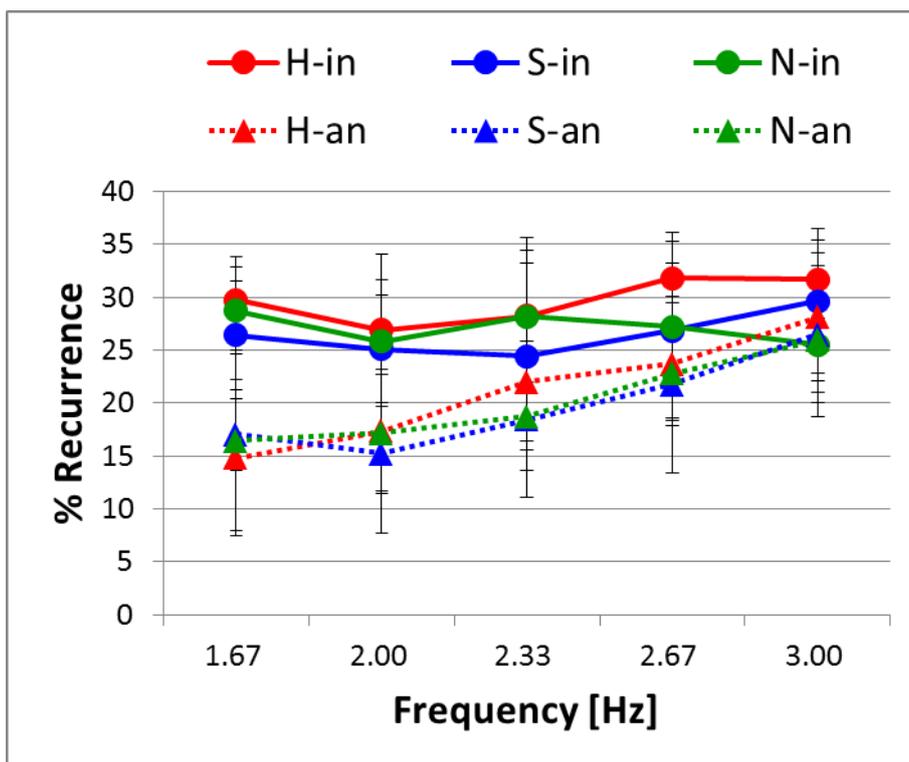


図 4-17 : Ry についての%Recurrence

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

%REC についての分析結果

以上、 L_x 、 R_x 、 L_y 、 R_y のデータ間の CRQA により求められた %REC に関して統計的分析を行った結果、次のことが明らかとなった。

左右の人差し指と COP の x 成分との間の協調 (L_x 、 R_x) においては、逆位相条件では No contact 条件でノイズが多いこと、周波数の上昇に伴いノイズが減少することが分かった。

左右の人差し指と COP の y 成分との間の協調 (L_y 、 R_y) においては、逆位相条件では周波数の上昇に伴いノイズが減少することが分かった。

Maxline

左手人差し指と COP- x 成分の組合せ (L_x)

L_x データ間の CRQA で MAXL を求めた結果を図 4-18 に示す。図 4-18 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は MAXL を示している。

L_x データ間の CRQA により求められた MAXL について、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、タップ面、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=4.093$, $p < .05$ 、 $F(1,7)=115.544$, $p < .001$ 、 $F(1,7)=83.329$, $p < .001$)。

タップ面の主効果における多重比較の結果、Hard 条件と No contact 条件の間に有意差がみられた ($t(14)=2.856$, $p < .05$)。

位相の主効果より、MAXL は逆位相条件のほうが、同位相条件より高く、体肢-姿勢間の協調における結合が強いことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、MAXL は長くなり、体肢-姿勢間の協調における結合が強化される傾向が示された。

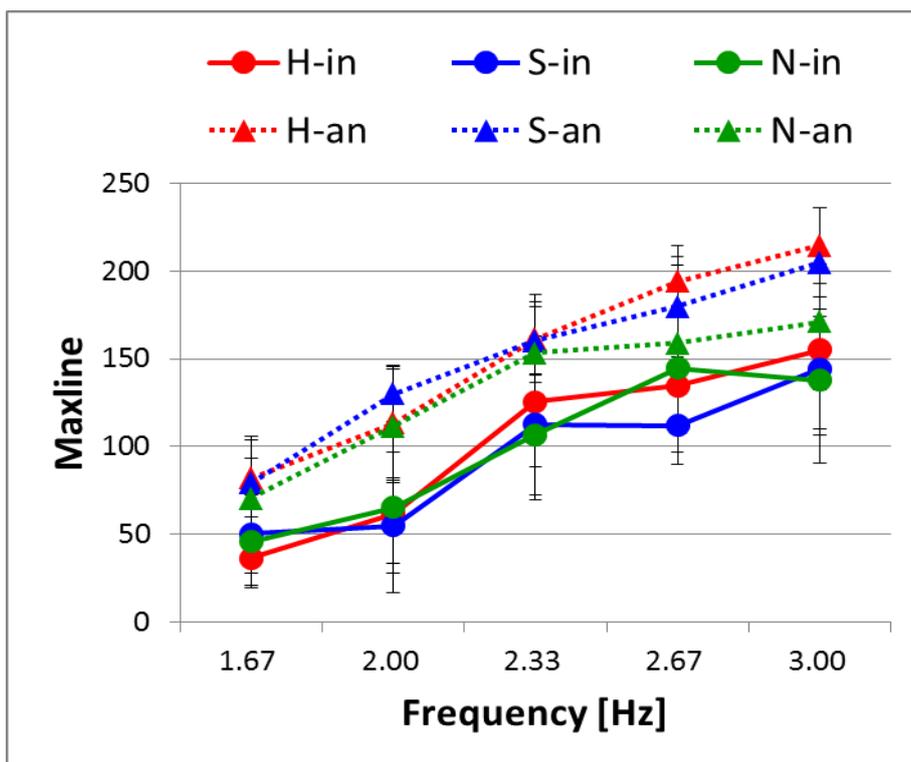


図 4-18 : Lx についての Maxline

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

右手人差し指と COP-x 成分の組合せ (Rx)

Rx データ間の CRQA で MAXL を求めた結果を図 4-19 に示す。図 4-19 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は MAXL を示している。

Rx データ間の CRQA により求められた MAXL について、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、タップ面の主効果が有意傾向を示し、位相、周波数の主効果については有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=78.564$, $p<.001$, $F(1,7)=60.891$, $p<.001$)。

位相の主効果より、MAXL は逆位相条件のほうが、同位相条件より高く、体肢-姿勢間の協調における結合が強いことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、MAXL は長くなり、体肢-姿勢間の協調における結合が強化される傾向が示された。

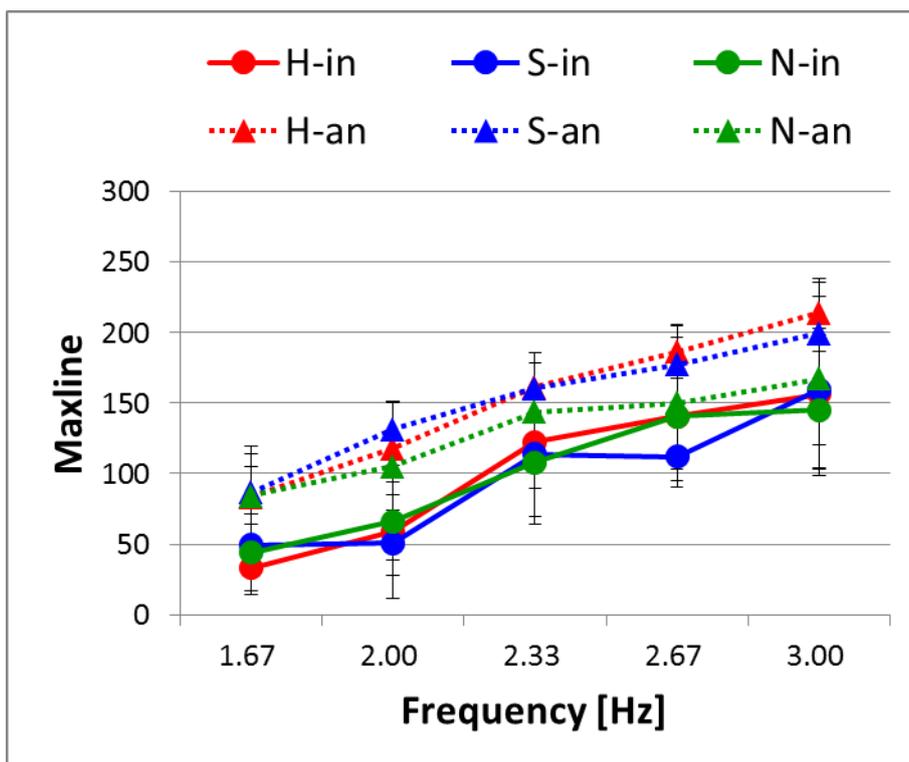


図 4-19 : Rx についての Maxline

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

左手人差し指と COP-y 成分の組合せ (Ly)

Ly データ間の CRQA で MAXL を求めた結果を図 4-20 に示す。図 4-20 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は MAXL を示している。

Ly データ間の CRQA により求められた MAXL について、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=36.491, p<.001$ 、 $F(1,7)=100.057, p<.001$)。

位相の主効果より、MAXL は同位相条件のほうが、逆条件より高く、体肢-姿勢間の協調における結合が強いことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、MAXL は長くなり、体肢-姿勢間の協調における結合が強化される傾向が示された。

また、位相×周波数の交互作用がみられ ($F(1,7)=4.838, p<.005$)、下位検定を行った結果、同位相条件でも逆位相条件でも周波数間で有意差がみられ、周波数の上昇に伴い、MAXL が高まり、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが減少する傾向が示された。ただし、高周波数 (f5) では、同位相条件と逆位相条件の間で MAXL に有意な差がみられなくなった。

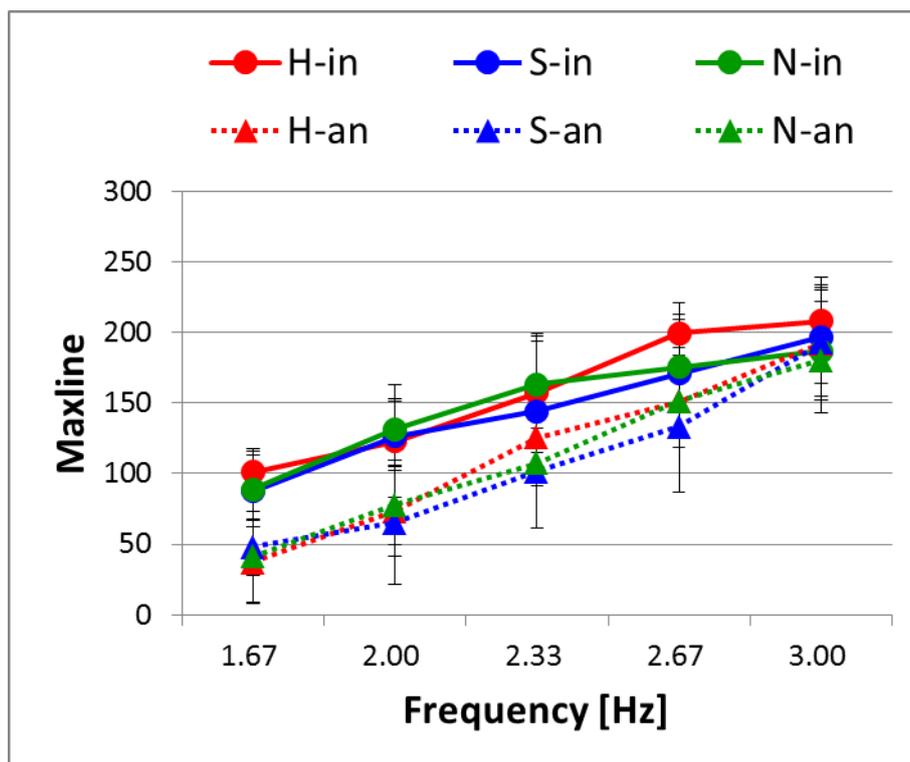


図 4-20 : Ly についての Maxline

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

右手人差し指と COP-y 成分の組合せ (Ry)

Ry データ間の CRQA で MAXL を求めた結果を図 4-21 に示す。図 4-21 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は MAXL を示している。

Ry データ間の CRQA により求められた MAXL について、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=28.526, p<.005$ 、 $F(1,7)=105.691, p<.001$)。

位相の主効果より、MAXL は同位相条件のほうが、逆条件より高く、体肢-姿勢間の協調における結合が強いことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、MAXL は長くなり、体肢-姿勢間の協調における結合が強化される傾向が示された。

また、位相×周波数の交互作用がみられ ($F(1,7)=5.598, p<.005$)、下位検定を行った結果、同位相条件でも逆位相条件でも周波数間で有意差がみられ、周波数の上昇に伴い、MAXL が高まり、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが減少する傾向が示された。ただし、高周波数 (f5) では、同位相条件と逆位相条件の間で MAXL に有意な差がみられなくなった。

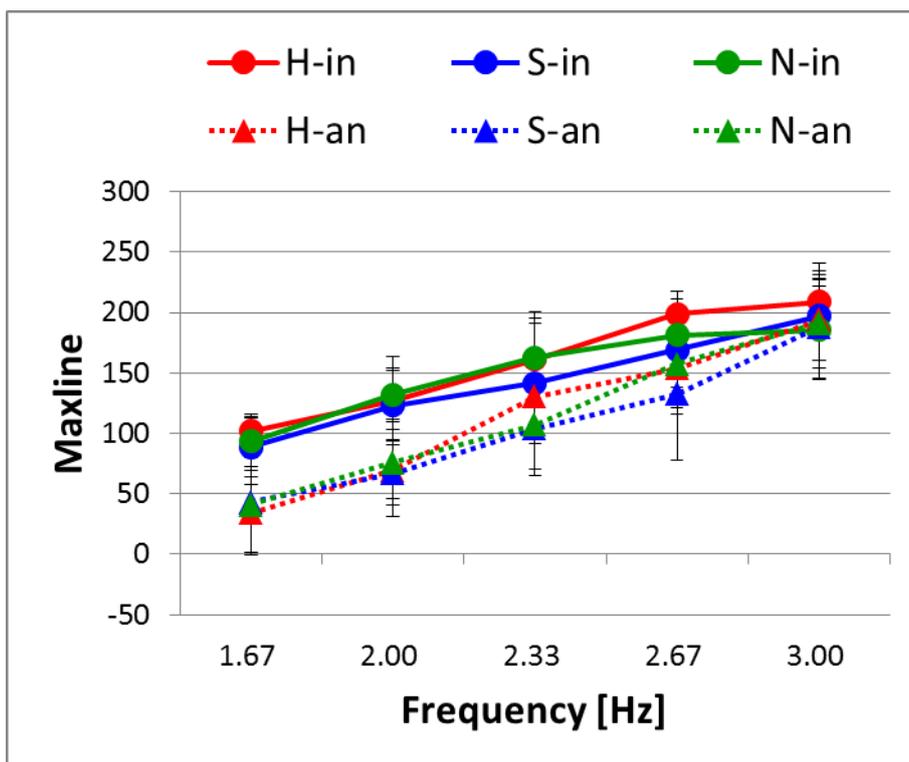


図 4-21 : Ry についての Maxline

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

MAXL についての分析結果

以上、 L_x 、 R_x 、 L_y 、 R_y のデータ間の CRQA により求められた MAXL に関して統計的分析を行った結果、次のことが明らかとなった。

左右の人差し指と COP の x 成分との間の協調 (L_x 、 R_x) においては、Hard 条件のほうが No contact 条件より結合強度が強いこと、逆位相条件のほうが同位相条件より結合強度が強いこと、周波数の上昇に伴い結合が強化することが分かった。

左右の人差し指と COP の y 成分との間の協調 (L_y 、 R_y) においては、同位相条件のほうが逆位相条件より結合強度が強いこと、周波数の上昇に伴い結合が強化すること、ただし、高周波数 (f5) では同位相条件と逆位相条件の間に有意差は見られないことが分かった。

Averageline

左手人差し指と COP-x 成分の組合せ (L_x)

L_x データ間の CRQA で AVGL を求めた結果を図 4-22 に示す。図 4-22 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は AVGL を示している。

L_x データ間の CRQA により求められた AVGL について、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=33.703$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=26.018$, $p<.001$)。

位相の主効果より、AVGL は逆位相条件のほうが、同位相条件より高く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、AVGL は長くなり、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高まることが示された。

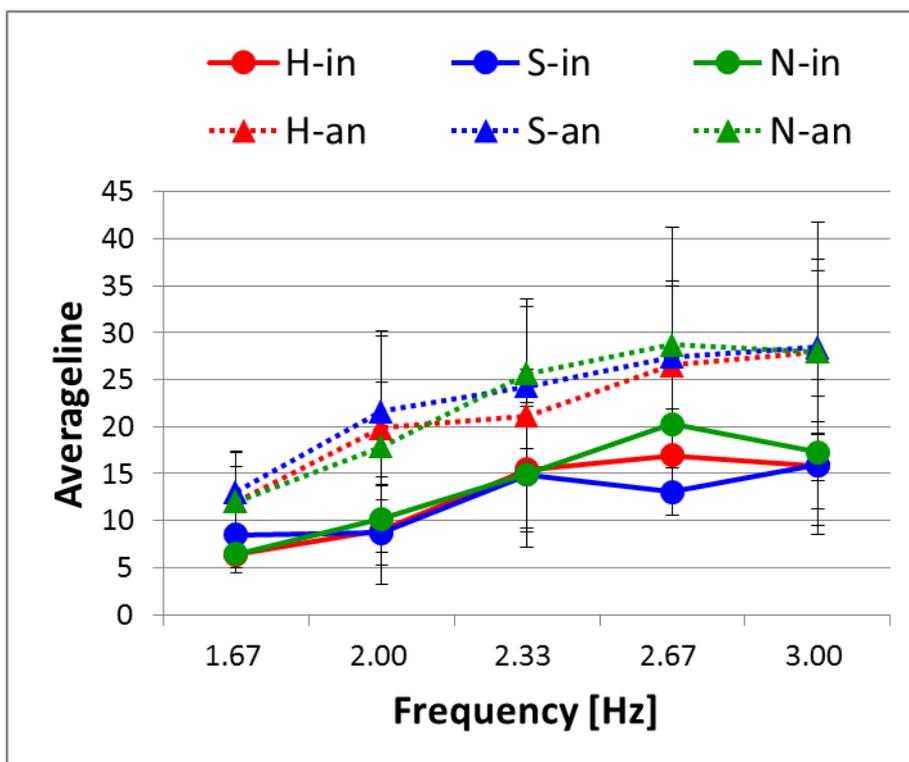


図 4-22 : Lx についての Averageline

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

右手人差し指と COP-x 成分の組合せ (Rx)

Rx データ間の CRQA で AVGL を求めた結果を図 4-23 に示す。図 4-23 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は AVGL を示している。

Rx データ間の CRQA により求められた AVGL について、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=35.839, p<.001$ 、 $F(1,7)=15.857, p<.001$)。

位相の主効果より、AVGL は逆位相条件のほうが、同位相条件より高く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、AVGL は長くなり、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高まることが示された。

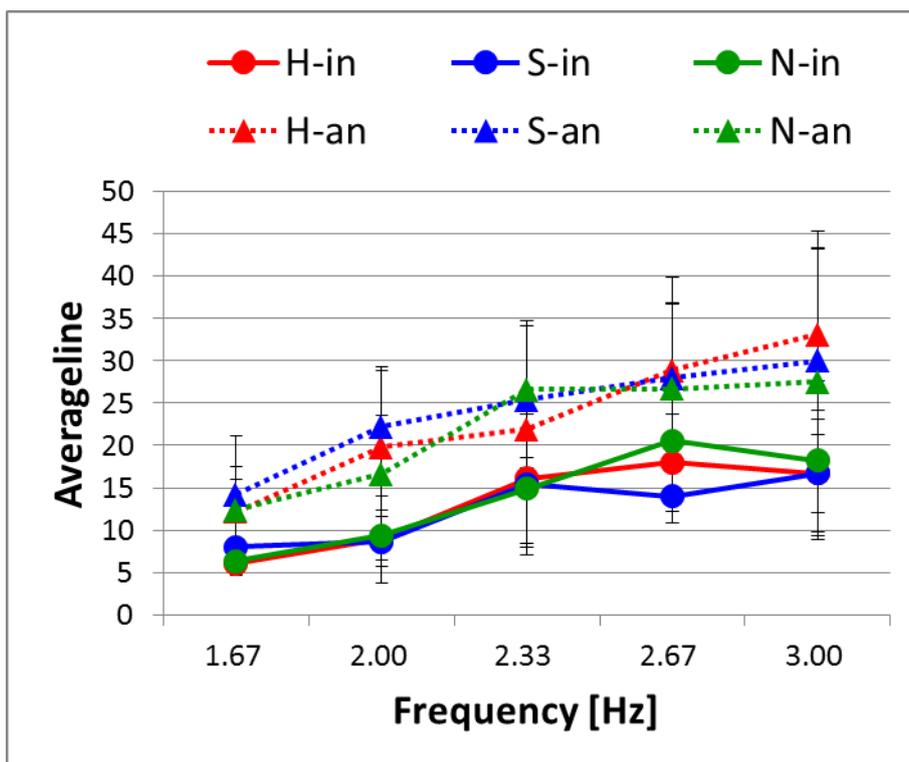


図 4-23 : Rx についての Averageline

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

左手人差し指と COP-y 成分の組合せ (Ly)

Ly データ間の CRQA で AVGL を求めた結果を図 4-24 に示す。図 4-24 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は AVGL を示している。

Ly データ間の CRQA により求められた AVGL について、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=18.291, p<.005$ 、 $F(1,7)=28.738, p<.001$)。

位相の主効果より、AVGL は同位相条件のほうが、逆位相条件より高く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、AVGL は長くなり、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高まることが示された。

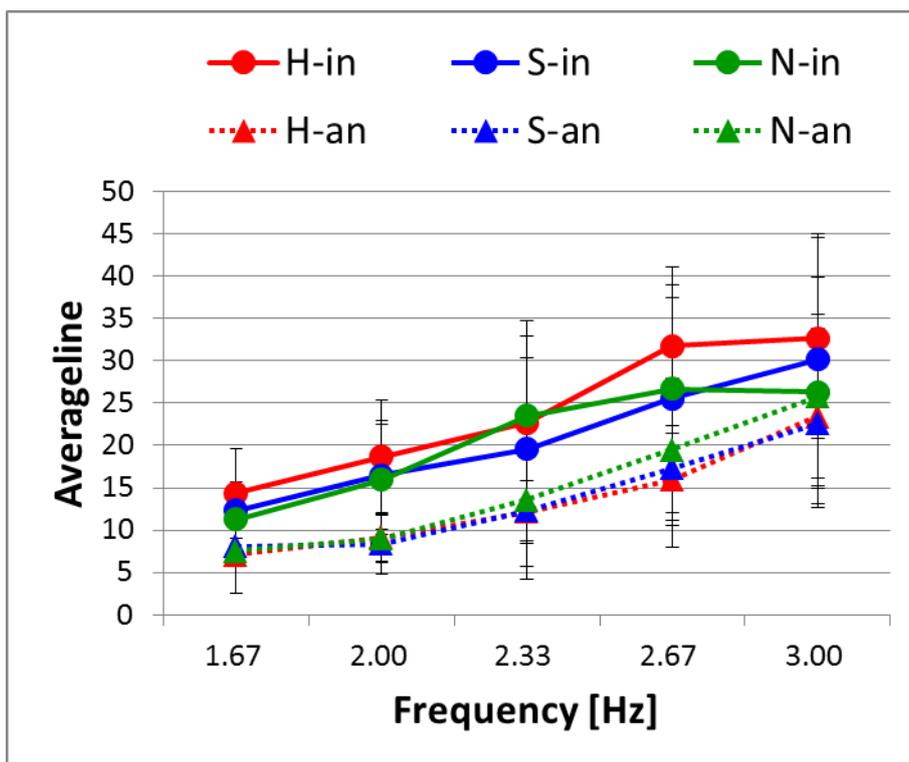


図 4-24 : Ly についての Average line

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

右手人差し指と COP-y 成分の組合せ (Ry)

Ry データ間の CRQA で AVGL を求めた結果を図 4-25 に示す。図 4-25 の横軸はメトロノームの周波数、縦軸は AVGL を示している。

Ry データ間の CRQA により求められた AVGL について、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=15.040, p<.01$ 、 $F(1,7)=34.335, p<.001$)。

位相の主効果より、AVGL は同位相条件のほうが、逆位相条件より高く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、AVGL は長くなり、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高まることが示された。

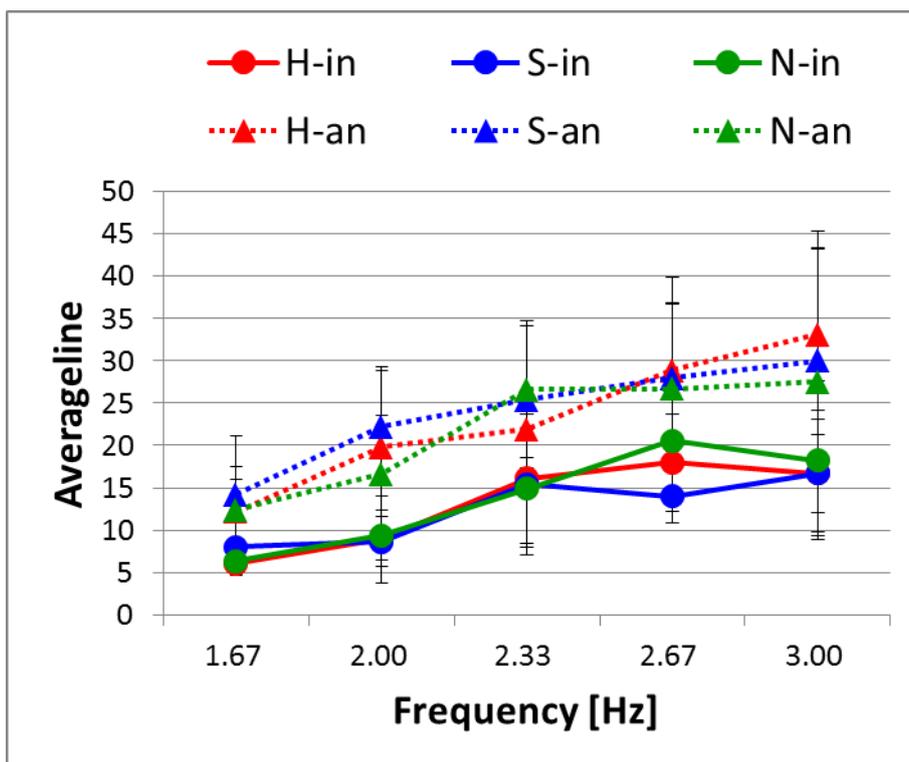


図 4-25 : Ry についての Averageline

Hard 同位相条件 (H-in : 赤色の実線、●印)

Hard 逆位相条件 (H-an : 赤色の破線、▲印)

Soft 同位相条件 (S-in : 青色の実線、●印)

Soft 逆位相条件 (S-an : 青色の破線、▲印)

No contact 同位相条件 (N-in : 緑色の実線、●印)

No contact 逆位相条件 (N-an : 緑色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

AVGL についての分析結果

以上、 L_x 、 R_x 、 L_y 、 R_y のデータ間の CRQA により求められた AVGL に関して統計的分析を行った結果、次のことが明らかとなった。

左右の人差し指と COP の x 成分との間の協調 (L_x 、 R_x) においては、逆位相条件のほうが同位相条件より持続的協調性が高いこと、周波数の上昇に伴い持続的協調性が高くなることが分かった。

左右の人差し指と COP の y 成分との間の協調 (L_y 、 R_y) においては、同位相条件のほうが逆位相条件より持続的協調性が高いこと、周波数の上昇に伴い持続的協調性が高くなることが分かった。

第4節 考察

以下、体肢間協調の安定性（分析1：SD ϕ ）、協調性（分析2：CRQA）、姿勢の安定性（分析3：L）、組織化（分析4：DFA）、多重性（分析5：MWA）、体肢-姿勢間協調の協調性（分析6：CRQA）の結果について順に考察する。

第1項 分析1：体肢間協調の安定性（SD ϕ ）

体肢間協調の安定性を評価するためSD ϕ を求め、タップ面（3）×位相（2）×周波数（5）の3要因分散分析を行った結果、周波数の主効果が有意であり、周波数が高くなるほどSD ϕ が大きくなり、運動の安定性が低下する傾向が示された。この結果は、運動の周波数がコントロールパラメータとして体肢間協調のダイナミクスに作用し、高周波数ほど運動が不安定化するという体肢間協調研究に関する多くの先行研究の結果、及び、HKBモデルの予測と一致する。

また、タップ面×位相の交互作用が有意であり、同位相、逆位相いずれの条件においても、Hard条件とNo contact条件、Soft条件とNo contact条件の間に有意差がみられた一方、Hard条件とSoft条件の間には有意差がみられなかった。実験1では、体肢間協調の安定性（SD ϕ ）について、2本指条件では同位相と逆位相の間に有意差がみられず、触覚情報が逆位相条件の安定化に寄与した可能性が示唆された。この実験1の仮説を検証するために行った実験2の結果、タップ面（指先が接触する環境特性）について、Hard条件（指先で力と触覚情報の両方が得られる）とSoft条件（指先で触覚情報のみ得られる）の間で有意差がみられず、Hard条件とNo contact条件（指先で力も触覚情報も得られない）、Soft条件とNo contact条件の間で有意差がみられたことから、指先で環境との接触による触覚情報が得られれば、体肢間協調は安定化することが示された。

他方、タップ面×位相の交互作用の下位検定の結果、Hard条件では同位相と逆位相の間に有意差はみられなかったが、Soft条件とNo contact条件では同位相のほうが逆位相よりSD ϕ が有意に小さく、運動の安定性が高いことも示された。この結果は、Hard条件とSoft条件では体肢間協調のダイナミクス（HKBモデルで描かれる位相-ポテンシャル図の形状）が異なることを示唆する。すなわち、体肢間協調ダイナミクスのコントロールパラメータとして、指先で得られる力を考慮する必要性を示している。今後、指先で得られる力を独立変数として操作し、それくらいの力が得られればダイナミクスが変化するのかを明らかにすることで、モデルの拡張に向けたデータが得られると考えられる。

第2項 分析2：体肢間協調の協調性（CRQA）

%REC

体肢間協調におけるノイズの程度を評価するため CRQA で %REC を求め、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、タップ面の主効果が有意であり、下位検定の結果、Hard 条件と Soft 条件の間には %REC に有意な差はみられなかったが、No contact 条件は Hard 条件、Soft 条件より %REC が有意に低く、ノイズが大きいことが示された。これらの結果より、指先が環境に接触することで触覚情報が得られれば、体肢間協調におけるノイズは軽減することが示唆された。指先での接触がなく宙で指を屈曲伸展させる No contact 条件では、運動によって生じる慣性力を打ち消すことができず、ノイズの程度に影響したのではないかと考えられる。

また、周波数の主効果が有意であり、周波数が高くなるほど %REC が低くなり、ノイズが増加するという結果については、SD ϕ と同様、運動の周波数がコントロールパラメータとして体肢間協調のダイナミクスに作用し、高周波数ほどノイズが増加することを示唆している。

MAXL

体肢間協調における結合の強度を評価するため CRQA で MAXL を求め、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、位相の主効果が有意であり、同位相のほうが逆位相より MAXL が長く、指同士の結合が強いことが示された。この結果は、結合強度という観点では、指先が接触するタップ面によらず同位相のほうが逆位相より左右の人差し指同士の結合が強いことを示している。

AVGL

体肢間協調における持続的協調性を評価するため CRQA で AVGL を求め、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、周波数の主効果が有意であり、周波数が高くなるほど AVGL が短くなり、持続的協調性が低下するという結果については、SD ϕ と同様、運動の周波数がコントロールパラメータとして体肢間協調のダイナミクスに作用し、高周波数ほど持続的協調性が低下することを示唆している。

また、タップ面×周波数の交互作用が有意であり、高周波数 (f4・f5) で Hard 条件と No contact 条件、Soft 条件と No contact 条件に有意な差がみられ、高周波数では、No contact 条件が Hard 条件、Soft 条件より AVGL が長くなり、持続的協調性が高くなることが示された。この結果は、高周波数では指先が環境に接触することで、体肢間協調の持続性が断たれることを示唆している。

以上より、指先が接触する環境特性が、体肢間協調のノイズや持続的協調性に影響することが明らかとなった。今後、これらの影響をもたらす要因を特定すべくさらなる実験的検討が求められる。

第3項 分析3：姿勢の安定性 (L)

姿勢の安定性を評価するため単位時間軌跡長 (L) を求め、タップ面 (3) ×位相 (2) ×周波数 (5) の3要因分散分析を行った結果、タップ面×周波数の交互作用が有意であり、高周波数 (f4・f5) では、Soft 条件が Hard 条件、No contact 条件より安定性が高いことが示された。この結果をもたらした要因については、本研究のデータからだけでは説明することはできないが、指先が接触する環境特性が姿勢の安定性に影響することが明らかとなった。今後、どのような要因が姿勢の安定化にどのように影響するのか、さらなる検討が求められる。

第4項 分析4：姿勢の組織化 (DFA)

左右方向 (x、Medio-Lateral 成分)

速度情報に対する姿勢の組織化

左右方向の速度情報に対する姿勢の組織化を分析するため、速度データに対する DFA で FS 指数を求め、タップ面 (3) ×位相 (2) ×周波数 (5) の3要因分散分析を行った結果、タップ面、位相、周波数の主効果が有意であった。

タップ面の主効果における下位検定の結果、FS 指数は、Hard 条件 (平均 0.335) で、Soft 条件 (平均 0.317)、No contact 条件 (平均 0.314) より高く、反持続性が低いことが示された。この結果は、指先が接触する環境特性が姿勢の組織化に影響することを示している。FS 指数は、0~0.5 の範囲である場合、時系列の変動が反持続的になることを示し、0.5 に近いほど反持続性は失われランダム化するとされている。よって、指先で力が得られない Soft 条件、No contact 条件では、体肢間協調というローカルなレベルのダイナミクスに姿勢というグローバルなレベルの調整が行われ、かつ速度情報を反持続的に調整するような組織化が起こると考察される。

また、位相の主効果より、同位相条件のほうが逆位相条件より反持続性が高いことが示された。この結果については、本項の末尾で他の結果と総合的に考察する。

周波数の主効果における下位検定の結果、周波数の上昇に伴い、反持続性が低下する傾向が示された。この結果は、周波数が高くなり体肢のレベルでの課題が難しくなるにつれ、システム全体 (姿勢) としての組織化のレベルではランダム性を増し、制御が弱くなっていくと解釈できる。

位置情報に対する姿勢の組織化

左右方向の位置情報に対する姿勢の組織化を分析するため、位置データに対する DFA で FS 指数を求め、タップ面 (3) ×位相 (2) ×周波数 (5) の3要因分散分析を行った結果、位相、周波数の主効果が有意であった。

また、位相の主効果より、同位相条件のほうが逆位相条件より持続性が高いことが示された。この結果については、本項の末尾で他の結果と総合的に考察する。

周波数の主効果における下位検定の結果、周波数の上昇に伴い、持続性が低下する傾向が示された。この結果は、速度情報に対する姿勢の組織化と同様に、周波数が高くなり体肢のレベルでの課題が難しくなると、システム全体（姿勢）としての組織化のレベルではランダム性を増し、制御が弱くなるのではないかと考えられる。

また、タップ面×位相×周波数の交互作用がみられ、下位検定を行った結果、Hard条件とSoft条件では、高周波数（f4・f5）で、同位相条件のほうが逆位相条件より持続性が強いことが示された。この結果は、高周波数になり、体肢のレベルでの安定性が低下すると、指先が環境に接触するか否かによって、位相パターン間での姿勢の組織化の仕方が変わることを示している。しかし、指先が環境に接触する条件において、高周波数でなぜ同位相条件のほうが持続性が高くなるかについては明らかではない。

前後方向（y、Anterior-Posterior 成分）

速度情報に対する姿勢の組織化

左右方向の速度情報に対する姿勢の組織化を分析するため、速度データに対するDFAでFS指数を求め、タップ面（3）×位相（2）×周波数（5）の3要因分散分析を行った結果、周波数の主効果が有意であった。周波数の主効果において下位検定を行った結果、周波数の上昇に伴い、反持続性が低下する傾向が示された。この結果は、左右方向の姿勢の組織化と同様に、周波数が高くなり体肢のレベルでの課題が難しくなると、システム全体（姿勢）としての組織化のレベルではランダム性を増し、制御が弱くなるためだと考えられる。

位置情報に対する姿勢の組織化

左右方向の位置情報に対する姿勢の組織化を分析するため、位置データに対するDFAでFS指数を求め、タップ面（3）×位相（2）×周波数（5）の3要因分散分析を行った結果、位相、周波数の主効果が有意であった。

位相の主効果より、同位相条件のほうが逆位相条件持続性が高いことが示された。この結果については、本項の末尾で他の結果と総合的に考察する。

波数の主効果において下位検定を行った結果、周波数の上昇に伴い、持続性が低下する傾向が示された。この結果も、やはり左右方向の姿勢の組織化と同様に、周波数が高くなり体肢のレベルでの課題が難しくなるにつれ、システム全体（姿勢）としての組織化のレベルではランダム性を増し、制御が弱くなるためだと考えられる。

最後に、左右方向の速度情報、及び、前後方向の速度情報と位置情報に対する姿勢の組織化において、位相の主効果がみられたことについて考察をする。いずれの結果においても、逆位相のほうが同位相より、ランダム性が高く、姿勢の制御が弱いとい

う結果が得られた。このことは、同位相パターンのほうが体肢から姿勢への影響が大きく、そのため姿勢は何らかの方略により、姿勢を強く組織化させる必要があったのではないかと推察する。では、なぜ同位相パターンのほうが姿勢への影響が大きいかについては、同位相パターンでは、両手の指が同方向に身体を中心から外側へと動かされるため、その質量が微々たるものであっても、逆位相パターンに比べ、相対的に大きな慣性力が発生し、姿勢に力学的な影響を与えるのではないかと考察される。本研究のデータからだけでは、この点は明らかにならないため、今後の課題として検討が求められる。

第5項 分析5：姿勢の多重性（MWA）

左右方向（x、Medio-Lateral 成分）

姿勢の多重性を評価するため、COP データの左右方向（x 成分）に対する MWA で MFS 幅 W を求め、タップ面（3）×位相（2）×周波数（5）の3要因分散分析を行った結果、タップ面の主効果が有意であり、下位検定の結果、Hard 条件と Soft 条件、Soft 条件と No contact 条件の間に有意な差がみられ、Soft 条件が、Hard 条件、No contact 条件より有意に W が小さいことが示された。この結果は、Soft 条件では、姿勢の多重性、すなわち多重時間スケール間での相互作用が少ないことを示している。Hard 条件が Soft 条件より W が大きいという結果については、指先で反作用力が得られる場合には、姿勢が多重時間スケールでの相互作用が多くなり、全身の触覚ネットワークの組織化が強化されると考えられる。しかし、No contact 条件が Soft 条件より W が大きいという結果については、現段階ではそれを説明できる知見を持ち合わせていないため、今後の課題として理論的・実験的な検討が求められる。

周波数の主効果が有意であり、周波数の上昇に伴い、 W は小さくなり、姿勢の多重時間スケール間の相互作用は減少する傾向が示された。この結果については、体肢間協調の運動周波数が高くなり、ローカルなレベルでの安定性が低下するのに伴い、姿勢は左右方向の変動において、多重時間スケール間の相互作用を減らすよう組織化できると考えることができる。

・前後方向（y、Anterior-Posterior 成分）

姿勢の多重性を評価するため、COP データの前後方向（y 成分）に対する MWA で MFS 幅 W を求め、タップ面（3）×位相（2）×周波数（5）の3要因分散分析を行った結果、周波数の主効果が有意であり、周波数の上昇に伴い、 W は大きくなり、姿勢の多重時間スケール間の相互作用は増加する傾向が示された。この結果については、体肢間協調の運動周波数が高くなり、ローカルなレベルでの安定性が低下するのに伴い、姿勢は前後方向の変動において、多重時間スケール間の相互作用を増やすよう組織化できると考えることができる。

体肢間協調というローカルなレベルでの周波数の上昇に伴い、姿勢というグローバルなレベルでは、左右方向と前後方向で多重時間スケール間での相互作用の仕方が異なることが示された。この結果は、姿勢が状況に応じて柔軟に組織化の様式を変化させている可能性を示唆する。しかし、本研究の結果からだけでは、姿勢がどのような状況でどのように組織化するのかについて、詳しく考察することはできないため、今後の課題として検討していきたい。

第6項 分析6：体肢-姿勢間協調の協調性（CRQA）

%REC

体肢-姿勢間協調におけるノイズの程度を評価するため、左右の人差し指、COPデータの左右方向（x成分）、前後方向（y成分）の4つの組み合わせ（Lx、Rx、Ly、Ry）のデータ間でCRQAを実行し%RECを求め、タップ面（3）×位相（2）×周波数（5）の3要因分散分析を行った結果、次のことが明らかとなった。

左右の人差し指とCOPのx成分との間の協調（Lx、Rx）においては、タップ面×位相の交互作用が有意であり、同位相条件では、指先が接触する環境特性の影響は受けなかったが、逆位相条件では、No contact条件でHard条件、Soft条件よりノイズが多いことが示された。この結果から、同位相と逆位相では、体肢-姿勢間の協調のパターンが異なり、逆位相では、指先が環境に接触することで得られる触覚情報により、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが減少する可能性が示唆された。

また、周波数の主効果が有意であり、運動周波数の上昇に伴って、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが減少することが示された。この結果から、体肢間協調というローカルなレベルでの運動の不安定化に対し、それを補うように体肢と姿勢の左右方向での協調が強化され、全身で課題に参加するようにグローバルに身体システムが組織化すると考えられる。

左右の人差し指とCOPのy成分との間の協調（Ly、Ry）においては、位相×周波数の交互作用が有意であり、同位相条件では、指先が接触する環境特性の影響は受けなかったが、逆位相条件では、周波数の上昇に伴い、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが減少することが示された。この結果から、同位相と逆位相では、体肢-姿勢間の協調のパターンが異なり、逆位相では、体肢間協調というローカルなレベルでの運動の不安定化に対し、それを補うように体肢と姿勢の前後方向での協調が強化され、全身で課題に参加するようにグローバルに身体システムが組織化すると考えられる。

MAXL

体肢-姿勢間協調における結合の強度を評価するため、左右の人差し指、COPデータの左右方向（x成分）、前後方向（y成分）の4つの組み合わせ（Lx、Rx、Ly、Ry）のデータ間でCRQAを実行しMAXLを求め、タップ面（3）×位相（2）×周波数（5）の3要因分散分析を行った結果、次のことが明らかとなった。

左右の人差し指と COP の x 成分との間の協調 (L_x , R_x) においては、タップ面の主効果が有意であり、Hard 条件で No contact 条件より体肢-姿勢間協調における結合強度が強いことが示され、体肢-姿勢間の結合を強化するには、指先で力、及び、触覚情報が必要であることが示唆された。

また、位相の主効果が有意であり、逆位相条件のほうが同位相条件より体肢 - 姿勢間協調の結合が強かった。この結果については、逆位相条件では、左右の人差し指を交互に屈曲伸展させるため、身体の正中線を軸として左右非対称に交互に左右の指が屈曲伸展を繰り返すかたちとなる。体肢間協調というローカルなレベルでの左右非対称の運動が、姿勢の左右方向の動揺とカップリングすることによって、逆位相条件で同位相条件より体肢 - 姿勢間協調の結合が強くなったと考えられる。

さらに、周波数の主効果が有意であり、周波数の上昇に伴い、体肢 - 姿勢間協調の結合が強くなることが示された。この結果から、%REC の結果と同様に、体肢間協調というローカルなレベルでの運動の不安定化に対し、それを補うように体肢と姿勢の左右方向での協調が強化され、全身で課題に参加するようにグローバルに身体システムが組織化すると考えられる。

左右の人差し指と COP の y 成分との間の協調 (L_y , R_y) においては、位相の主効果が有意であり、同位相条件のほうが逆位相条件より体肢-姿勢間協調の結合が強かった。ただし、位相×周波数の交互作用が有意であり、高周波数 (f_5) を除き、同位相条件のほうが逆位相条件より結合強度が強くなっていた。これらの結果から、高周波数ほど体肢間協調というローカルなレベルで運動が不安定化する逆位相条件では、ローカルなダイナミクスを安定化させるように体肢と姿勢の前後方向での協調が強化されるように身体システムが組織化すると考えられる。

AVGL

体肢-姿勢間協調における持続的協調性を評価するため、左右の人差し指、COP データの左右方向 (x 成分)、前後方向 (y 成分) の 4 つの組み合わせ (L_x , R_x , L_y , R_y) のデータ間で CRQA を実行し AVGL を求め、タップ面 (3) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 3 要因分散分析を行った結果、次のことが明らかとなった。

左右の人差し指と COP の x 成分との間の協調 (L_x , R_x) においては、位相の主効果が有意であり、逆位相条件のほうが同位相条件より体肢 - 姿勢間協調の持続的に協調を維持していたことが示された。この結果については、MAXL の結果と同様に、逆位相条件では、体肢間協調というローカルなレベルでの左右非対称の運動が、姿勢の左右方向の動揺とカップリングすることによって、逆位相条件で同位相条件より体肢 - 姿勢間協調の結合が強くなったと考えられる。

また、周波数の主効果が有意であり、周波数の上昇に伴い、体肢 - 姿勢間協調が持続的に維持されることが示された。この結果から、%REC や MAXL の結果と同様に、体肢間協調というローカルなレベルでの運動の不安定化に対し、それを補うように

体肢と姿勢の左右方向での協調が強化され、全身で課題に参加するようにグローバルに身体システムが組織化すると考えられる。

左右の人差し指と COP の y 成分との間の協調 (L_y , R_y) においては、位相の主効果が有意であり、同位相条件のほうが逆位相条件より体肢・姿勢間協調が持続的に維持されることが示された。この結果から、逆位相条件とは異なり、同位相条件では、左右の人差し指を同時に屈曲伸展させるため、身体の正中線を軸として左右対称に同時に左右の指が屈曲伸展を繰り返すかたちとなる。このような体肢間協調というローカルなレベルでの左右対称の運動によって、指の運動に伴って生じる前後方向の慣性力は大きくなる（左右の指が交互に屈曲伸展する逆位相条件では、前後方向の慣性力はローカルなレベルで打ち消されるかたちとなる）。よって、同位相条件では、体肢の前後方向の運動が姿勢の前後方向の動揺とカップリングすることによって、体肢 - 姿勢間協調の持続的協調性が高くなったと考えられる。

また、周波数の主効果が有意であり、周波数の上昇に伴い、体肢 - 姿勢間協調が持続的に維持されることが示された。この結果は、%REC や MAXL の結果と同様に、体肢間協調というローカルなレベルでの運動の不安定化に対し、それを補うように体肢と姿勢の左右方向での協調が強化され、全身で課題に参加するようにグローバルに身体システムが組織化すると考えられる。

第7項 総合考察

体肢間協調の分析の結果、運動の安定性 ($SD\phi$) という観点では、同位相、逆位相のいずれの位相パターンにおいても、指先が接触する環境の特性として、触覚情報が得られる Hard 条件と Soft 条件において、触覚情報も力も得られない No contact 条件より高い安定性を示した。この結果から、指先で環境との接触による触覚情報が得られれば、体肢間協調は安定化することが示された。

実験2の目的、すなわち、体肢間協調の安定化条件の検討は達成され、その結果、「触覚情報が得られれば体肢間協調は安定化する」という仮説が支持された。ただし、体肢間協調のダイナミクス、すなわち位相パターンによる安定性 (HKB モデルで記述される位相・ポテンシャル図の形状) については指先が接触する環境特性による違いが確認された。つまり、指先で反作用力と触覚情報の両方が得られる Hard 条件では同位相と逆位相のパターン間に安定性において有意差がみられなかったのに対し、触覚情報しか得られない Soft 条件では同位相のほうが逆位相より安定性が高かった。これら体肢間協調のダイナミクスを変化させるパラメータの特定には、今後さらなる実験的研究が必要である。また、分析2で CRQA を実行した結果、指先が環境に接触することによって体肢間協調におけるノイズが軽減する一方、高周波数では体肢間協調の持続性が失われることが示唆された。

総じて、これらの結果は、指先の運動はそれが触れる環境の特性の影響を受けることを表している。この事実は、身体運動を環境との関係で捉えるという生態学的ア

アプローチの考えの重要性を改めて示すものであった。また、実験2で示唆された新たな要因、パラメータを特定すべくさらなる研究を動機づける意味でも身体運動研究分野にインパクトを与えうるものと言えよう。また、指先の協調的な運動は、タイピングやピアノ演奏など日常的な行為の場面でも観察される。実験2の結果は、こうした日常行為においても、指先のパフォーマンスを向上させる要因として、指先が触れる環境表面の素材や特性も検討する必要があることを改めて示している。これまで経験的には知られていたことが、基礎的な実験研究によって示されたことは、それらの経験知にエビデンスを提供する点で意義がある。

他方、指先が触れる環境の特性が、姿勢にまで影響するかどうかについては、日常の経験から想像することは容易ではなかった。しかしながら、実験2で姿勢の分析を行った結果、指先が接触する環境特性が姿勢の安定性や組織化、多重性に影響することが明らかとなった。そのため、指先が接触する環境の特性によって体肢間協調が影響を受け、その影響が全身の姿勢へも影響することが示唆された。

続く、体肢-姿勢間協調の分析の結果、指先の協調のパターン（位相パターン）によって、体肢-姿勢間の協調のパターンが異なり、姿勢の動揺方向と体肢間協調の位相パターンとが対応するかたちで、全身が課題特定の組織化する可能性が示唆された。さらに、指先が接触する環境特性も体肢-姿勢間協調に影響を与えることが示された。具体的には、実験2の仮説、すなわち、体肢間協調というローカルなレベルでのダイナミクスと姿勢というグローバルなレベルでのダイナミクスが相互作用する、という仮説に基づいて予測した結果と部分的に一致する結果が得られた。ただし、予測していなかった位相パターンによる体肢-姿勢間の協調パターンの違いなどにより、指先が接触する環境特性が体肢-姿勢間の協調に及ぼす影響は限定的となった。これら新たに浮上した要因については、本研究のデータからだけではすべてを説明することができず、今後、これらの要因を検証していく必要がある。

総じて、実験2の結果について、体肢間協調という観点のみならず、姿勢、及び、体肢-姿勢間協調という観点からも分析を加えた結果、指先が触れる環境の特性や、指先の運動のパターンといった身体システムのローカルなレベルでの実験的操作により、姿勢の安定性や多重性、また体肢-姿勢間協調といった身体システムのグローバルなレベルのダイナミクスが影響を受けることが示された。

以上、実験2では、身体システムのローカルなレベルでの実験的操作がグローバルなレベルのダイナミクスに与える影響を検討した。では、反対にグローバルなレベルの姿勢要因を実験的に操作した場合、ローカルなレベルのダイナミクスは影響を受けるのであろうか。

第5章 姿勢要因が体肢間協調に及ぼす影響（実験3）

第1節 目的

実験3の目的は、姿勢要因というグローバルなレベルで実験的操作を加えたとき、体肢間協調といったローカルなレベルのダイナミクスが影響を受けるのかどうか、影響を受けるとしたらどのような影響を受けるのかを明らかにすることである。具体的には、姿勢要因として体位（座位、立位）と、身体・環境のインターフェースとしての支持面（安定、不安定）を操作する。

本研究の目的である「体肢（部分）-姿勢（全体）の相互作用関係の検討」について、実験2では、体肢（部分）レベルを実験的に操作し、体肢→姿勢の影響関係を調べた。実験3では、姿勢→体肢の影響関係を調べるため、姿勢（全体）レベルの要因を操作する。姿勢要因として、1つめは体位を操作する。一般に姿勢の研究では、立位姿勢の研究が多く、座位の研究については立位の研究に比べると少ないものの先行研究は存在する(Shumway - Cook & Woollacott, 2013)。また、座位姿勢の重心動揺の計測についても、立位姿勢研究で使用される重心動揺計の上に椅子を置いて測定する方法の信頼性も確認されているため(内山, 峯島, 有賀, & 吉田, 1994)、本研究でも体位について座位と立位の2水準を検討する。また、2つめの姿勢要因として、身体と環境に接触面である支持面の環境特性を操作する。具体的には、表面が硬く力学的な安定性が高いとともに環境-自己身体の接触面から触覚情報が得やすい Hard 条件と、表面が軟らかく力学的な安定性が低いとともに環境-自己身体の接触面から触覚情報が得にくい Soft 条件の2水準を検討する(図5-1)。体位については、立位のほうが座位より支持基底面も小さく不安定なため、姿勢というグローバルなレベルでの安定性が低いと考えられる(Shumway - Cook & Woollacott, 2013)。よって、その影響が体肢間協調というローカルレベルのダイナミクスにも影響すると予測される。また、支持面の環境特性については、Soft 条件のほうが Hard 条件より力学的な安定性も低く接触面から得られる触覚情報も得にくいため、姿勢というグローバルなレベルでの安定性が低いと考えられる。よって、その影響が体肢間協調というローカルなレベルのダイナミクスにも影響すると予測される。

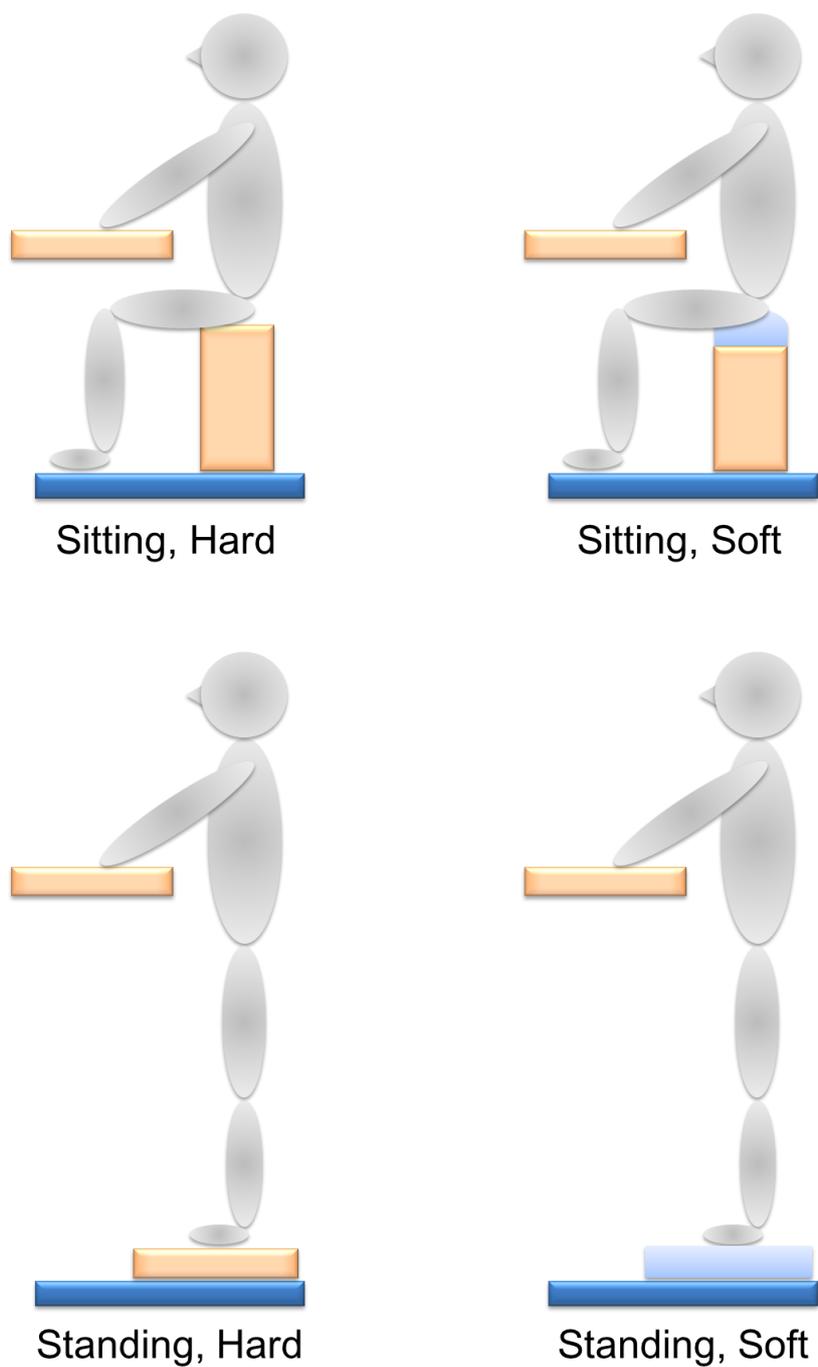


図 5-1 : 実験条件

- 左上 : 座位 Hard 条件
- 右上 : 座位 Soft 条件
- 左下 : 立位 Hard 条件
- 右下 : 立位 Soft 条件

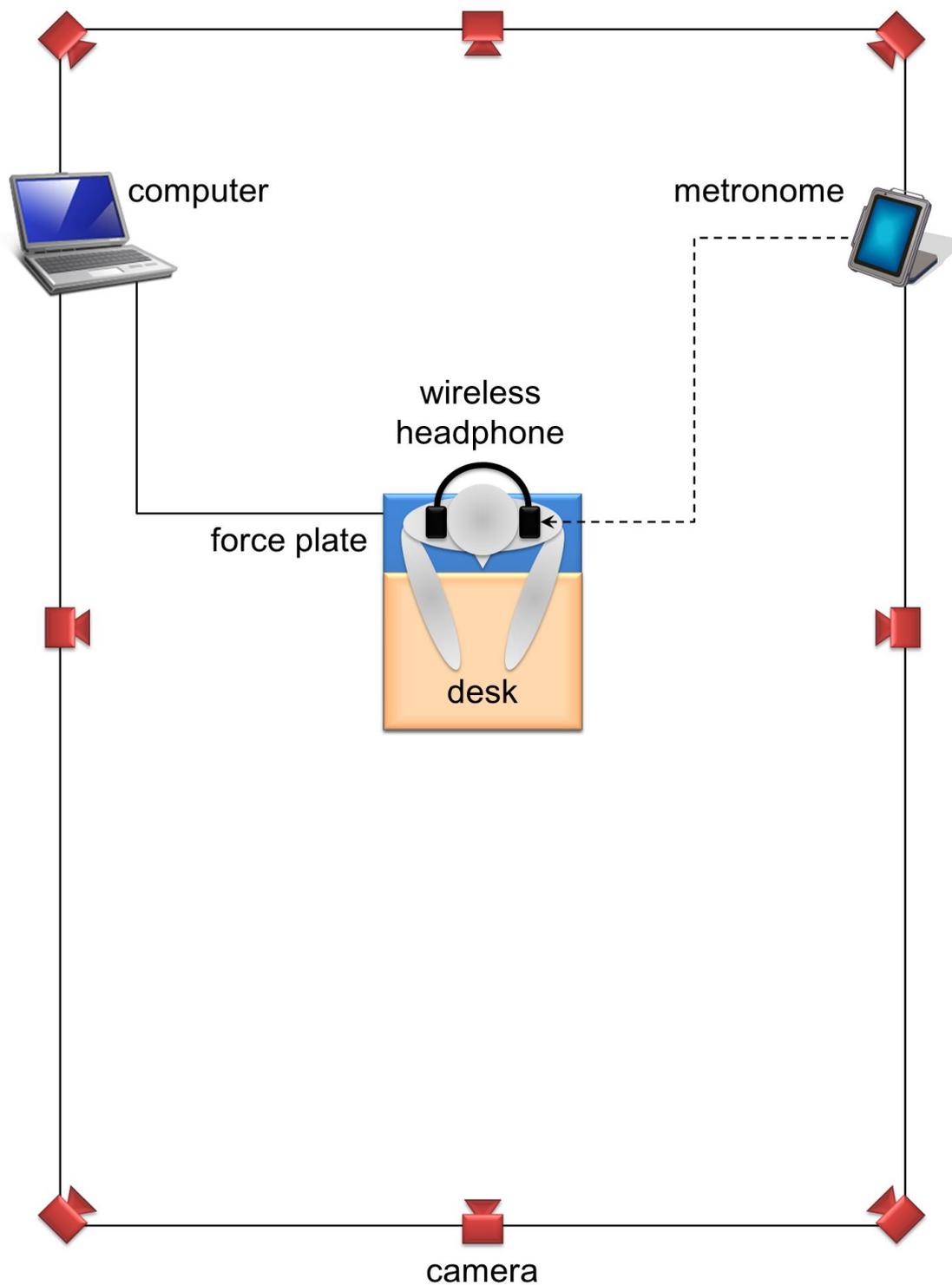


図 5-2 : 実験状況

第2節 方法

実験参加者

実験参加者は健常な成人8名（男性7名、女性1名）であった。年齢は23歳から38歳（平均年齢30.6歳）であり、いずれの実験参加者も右利きであった。実験の手続きは国立情報学研究所の倫理審査委員会にて承認されていた。実験参加者は実験に参加する際、同意書に署名し、謝礼として時給1000円を支払われた。

実験装置・データ計測

図5-2に実験状況の概略を示す。メトロノーム、実験装置は実験2と同じものを用いた。実験3では実験的に操作する姿勢要因のうち、支持面の環境特性をHard条件とSoft条件の2つの条件で検討する。その際、Soft条件では、支持面の上に軟らかいパッド状のクッションを敷くことで、その上に座る／立つときに力学的な安定性と触覚情報の利用可能性を低下させることを試みた。ただし、それらの特性を低くしすぎると転倒などの恐れが考えられるため、安全性を考慮し、リハビリテーション分野におけるバランス能力の訓練にも使用されており、安全性が保証できるクッションを座位条件、立位条件でそれぞれ吟味し、選定した（図5-3）。



図 5-3 : 支持面 Soft 条件で使用したバランスパッド

左：座位条件で使用したパッド（直径 33cm、厚さ 7cm）

右：立位条件で使用したパッド（縦×横 40×25cm、厚さ 5.5cm、2 枚重ねて使用）

データ処理

実験2と同様、モーションキャプチャ、フォースプレートのサンプリング周波数は100Hzに設定され、解析にあたっては、ローパスフィルタ（Butterworth filter）による平滑化が行われた。カットオフ周波数の選定にあたっては残差分析を行い（Robertson et al., 2004）、それぞれ30Hz、10Hzとした。

手続き

実験計画は、体位（座位、立位）×支持面（Hard、Soft）×位相（同位相、逆位相）の 3 要因被験者内計画であった。体位は、座位と立位の 2 水準を検討した（図 5-1）。支持面は、Hard 条件と Soft 条件の 2 水準を検討した（図 5-1）。位相については、実験 1、実験 2 と同様に、人差し指同士が同期する同位相と、それらが交互にタップする逆位相の 2 水準を検討した。

課題は、1.67 Hz、2.00Hz、2.33Hz、2.67Hz、3.00Hz の 5 つの周波数（表 5-1）でステップ的に加速するメトロノーム音に同期してタッピングを行うことである。ただし、いずれの位相においても、メトロノームと運動の周期が一致するよう求められた。逆位相パターンでは、左手の人差し指がメトロノーム音と同期するよう求められた。また、課題を行う際、実験参加者は指の動きを注視するよう求められた。実験は、座位条件と立位条件それぞれにおいて、支持面（2）×位相（2）の計 4 条件を練習試行のあと 1 回ずつランダムに行うブロックが 3 回繰り返された。座位条件と立位条件の順序は、実験参加者ごとにカウンターバランスをとり、合計 24 試行が実施された。適宜休憩を挟みながら、実験に要した時間は、40 分ほどであった。

表 5-1：実験 3 のメトロノーム周波数の設定

周波数区間	f1	f2	f3	f4	f5
周波数 [Hz]	1.67	2.00	2.33	2.67	3.00

データ分析

体肢間協調については実験 1、実験 2 と同様に指の屈曲伸展方向の運動成分（垂直方向、y 成分）を分析対象とした。姿勢については、COP データの左右方向（Medio-Lateral、x 成分：COPx）、前後方向（Anterior-Posterior、y 成分：COPy）を分析対象とした。分析区間については、実験 2 と同様にメトロノームの周波数が変化した直後の区間は分析対象から除外した。SD ϕ 、COP の単位時間当たりの軌跡長の分析では、各周波数区間で全 16 回の拍のうち最初の 4 回分を分析区間から除外し、4 回目以降の区間を分析の対象とした。その他の非線形時系列解析においては、分析区間（データ長、サンプル数）が分析結果に影響するため、各周波数区間の最後の 4 秒間（400 サンプル）を分析の対象とした。体肢間協調、姿勢、体肢間－姿勢間協調の分析は、実験 2 と同じ解析手法、指標が用いられた。ただし、体肢－姿勢間協調の分析において CRQA を実行する際の入力変数のうち半径については実験 3 では「90」と設定した。

第3節 結果

第2項 体肢間協調の分析

分析1：体肢間協調の安定性（SD ϕ ）

左右の人差し指同士の相対位相の標準偏差（SD ϕ ）を求めた結果を図5-4に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸はSD ϕ （度）を示している。

SD ϕ について、体位（2）×支持面（2）×位相（2）×周波数（5）の4要因分散分析を行った結果、体位、位相、周波数の主効果が有意であった（それぞれ、 $F(1,7)=8.026$, $p<.05$ 、 $F(1,7)=6.713$, $p<.05$ 、 $F(1,7)=26.428$, $p<.001$ ）。

支持面の主効果については有意傾向がみられ（ $F(1,7)=4.896$, $p<.10$ ）、SD ϕ は、Hard条件のほうがSoft条件より小さく、運動の安定性が高い傾向が示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数が高くなるほどSD ϕ が大きくなり、運動の安定性が低下する傾向が示された。

また、体位×位相の交互作用がみられた（ $F(1,7)=5.725$, $p<.05$ ）。下位検定を行った結果、逆位相条件で座位と立位の間有意差がみられ（ $F(1,7)=13.575$, $p<.005$ ）、座位条件のほうが、立位条件よりSD ϕ が小さく、運動の安定性が高かったことが示された。また、立位条件で同位相と逆位相の間に有意差がみられ（ $F(1,7)=10.445$, $p<.01$ ）、同位相条件のほうが、逆位相条件よりSD ϕ が小さく、運動の安定性が高かったことが示された。これら下位検定の結果から、立位逆位相条件の安定性の低下より、座位と立位では体肢間協調のダイナミクスが異なることが明らかとなった。

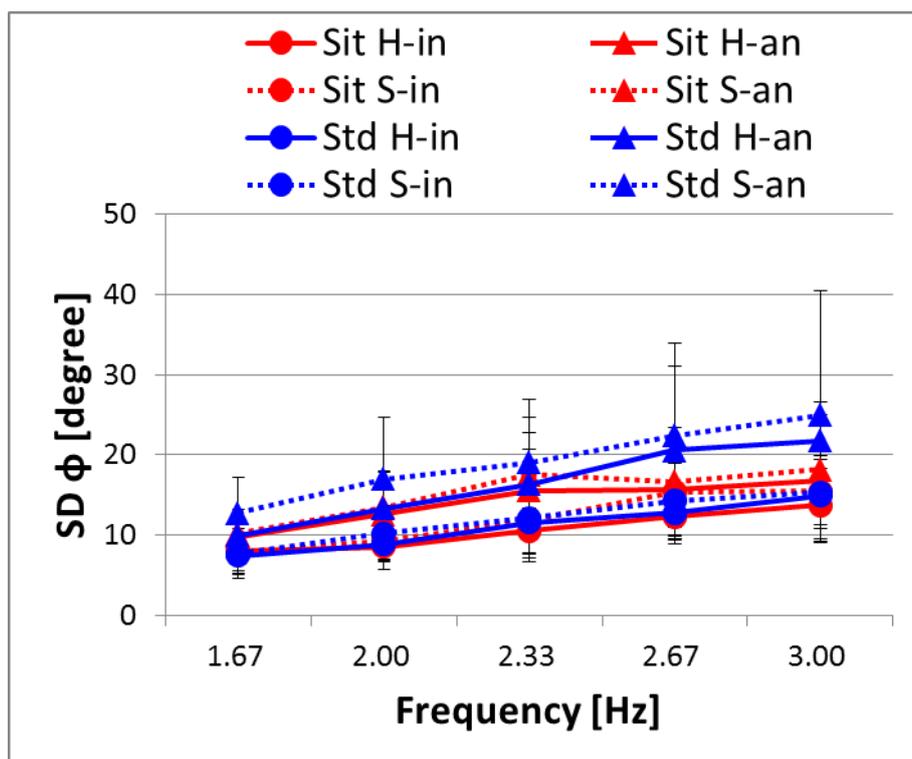


図 5-4 : SD φ

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

分析 2 : 体肢間協調の協調性 (CRQA)

%REC : 体肢間協調におけるノイズ

左右の人差し指同士の前運動データに対し CRQA を行い、%REC を求めた結果を図 5-5 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は%REC を示している。

%REC について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、周波数の主効果が有意であった ($F(1,7)=3.143, p<.05$)。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数が高くなるほど%REC が低くなり、体肢間協調におけるノイズが増加する傾向が示された。

位相×周波数の交互作用がみられた ($F(1,7)=7.723, p<.001$)。下位検定を行った結果、同位相条件では周波数区間の間で有意な差がみられたが ($F(1,7)=7.936, p<.001$)、逆位相条件では周波数間で有意差は見られなかった。また、低周波数 (f1) では、同位相条件のほうが逆位相条件より%REC が高く、体肢間協調におけるノイズが少ないことが示された。

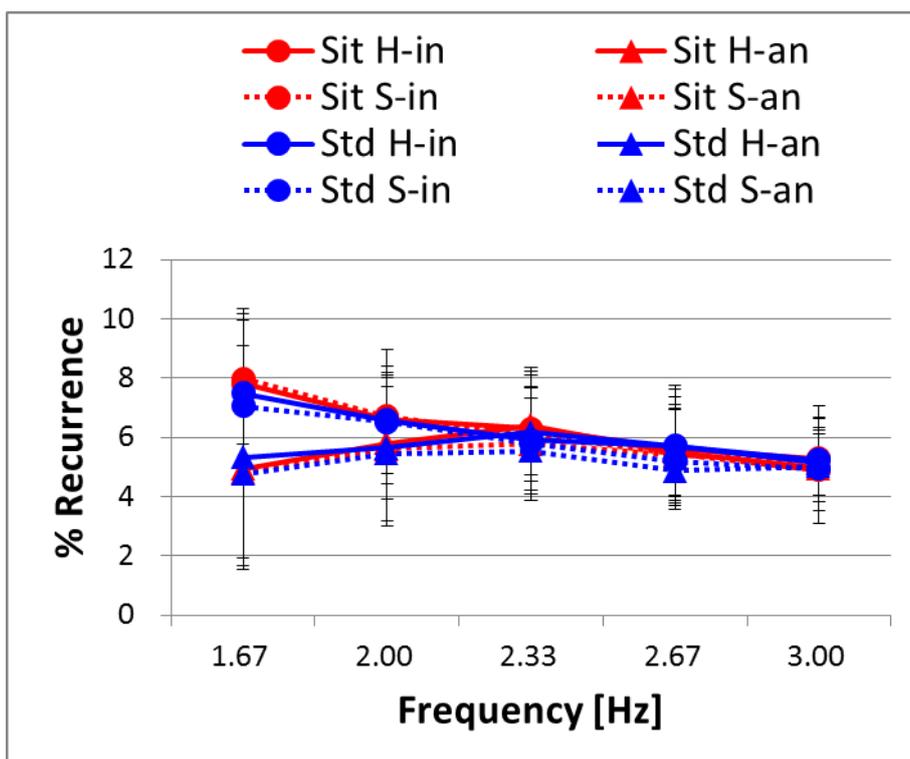


図 5-5 : %Recurrence

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

MAXL : 体肢間協調における結合強度

左右の人差し指同士の運動データに対し CRQA を行い、MAXL を求めた結果を図 5-6 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は MAXL を示している。

MAXL について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、位相の主効果が有意であり ($F(1,7)=10.189, p < .05$)、同位相条件のほうが逆位相条件より MAXL が長く、体肢間協調の結合が強かった。

また、位相 × 周波数の交互作用がみられた ($F(1,7)=6.567, p < .001$)。下位検定を行った結果、周波数が上昇するのに伴い、同位相と逆位相の間の MAXL の差が縮まることが示された。

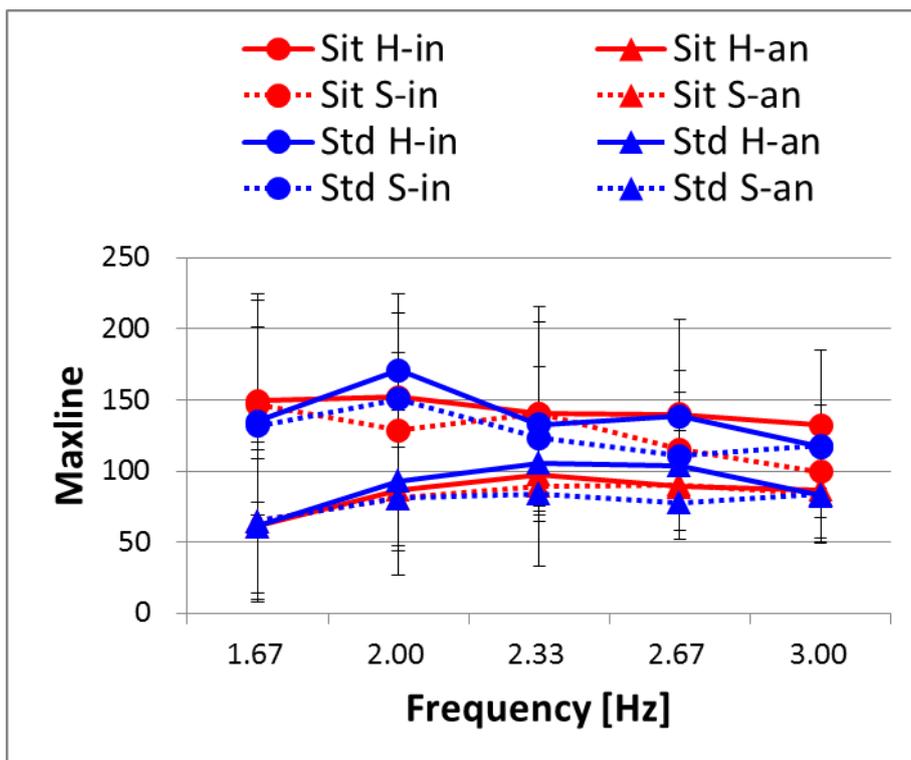


図 5-6 : Maxline

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー：標準偏差

AVGL : 体肢間協調における結合強度

左右の人差し指同士の運動データに対し CRQA を行い、AVGL を求めた結果を図 5-7 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は AVGL を示している。

AVGL について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、支持面の主効果について有意傾向がみられ ($F(1,7)=3.738, p<.10$)。Hard 条件のほうが Soft 条件より AVGL が長く、持続的協調性が高い傾向がみられた。

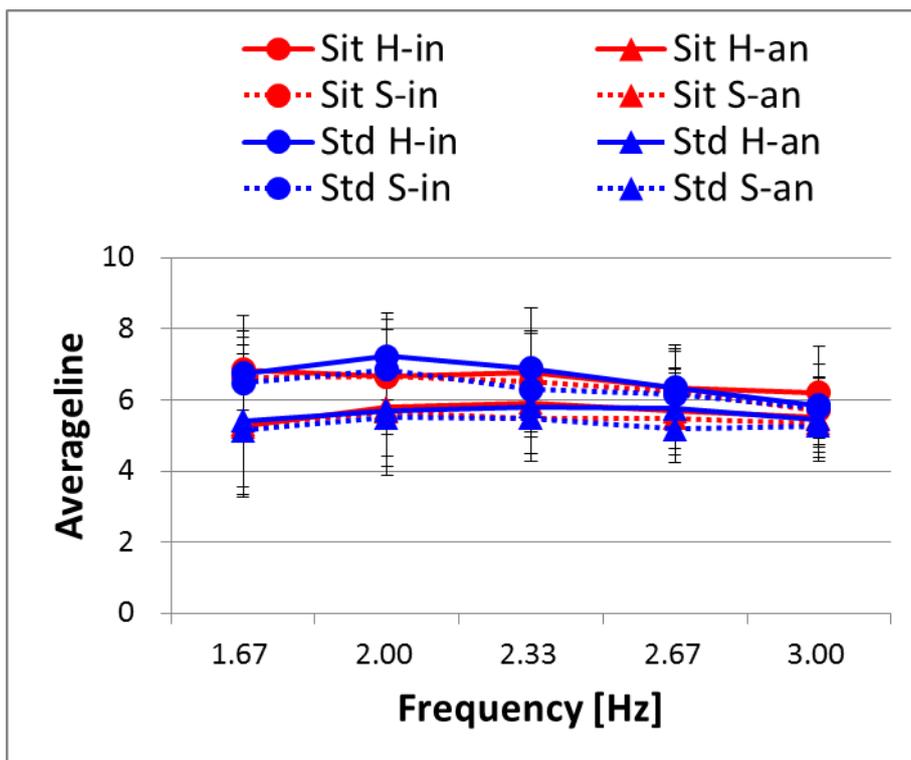


図 5-7 : Average line

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

第3項 姿勢の分析

分析3：姿勢の安定性（L）

単位時間軌跡長（L）を求めた結果を図5-8に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸はL（cm/s）を示している。

Lについて、体位（2）×支持面（2）×位相（2）×周波数（5）の4要因分散分析を行った結果、体位、周波数の主効果が有意であった（それぞれ、 $F(1,7)=211.663$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=21.467$, $p<.001$ ）。

体位の主効果より、座位条件のほうが立位条件よりLが長く、安定性が低いことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、LはU字型の変化をみせることが示された。

また、体位×支持面、体位×周波数、体位×支持面×位相、体位×支持面×位相×周波数の交互作用がみられた（それぞれ、 $F(1,7)=12.536$, $p<.01$ 、 $F(1,7)=12.008$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=5.862$, $p<.05$ 、 $F(1,7)=3.557$, $p<.05$ ）。

体位×支持面×位相の交互作用の下位検定の結果、Hard 同位相条件、Soft 同位相条件、Hard 逆位相条件、Soft 逆位相条件において、立位条件と座位条件の間に有意差がみられ（それぞれ、 $F(1,7)=110.731$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=94.823$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=28.139$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=56.563$, $p<.001$ ）、いずれの条件においても座位条件のほうが立位条件よりLが長く、安定性が低いことが示された。

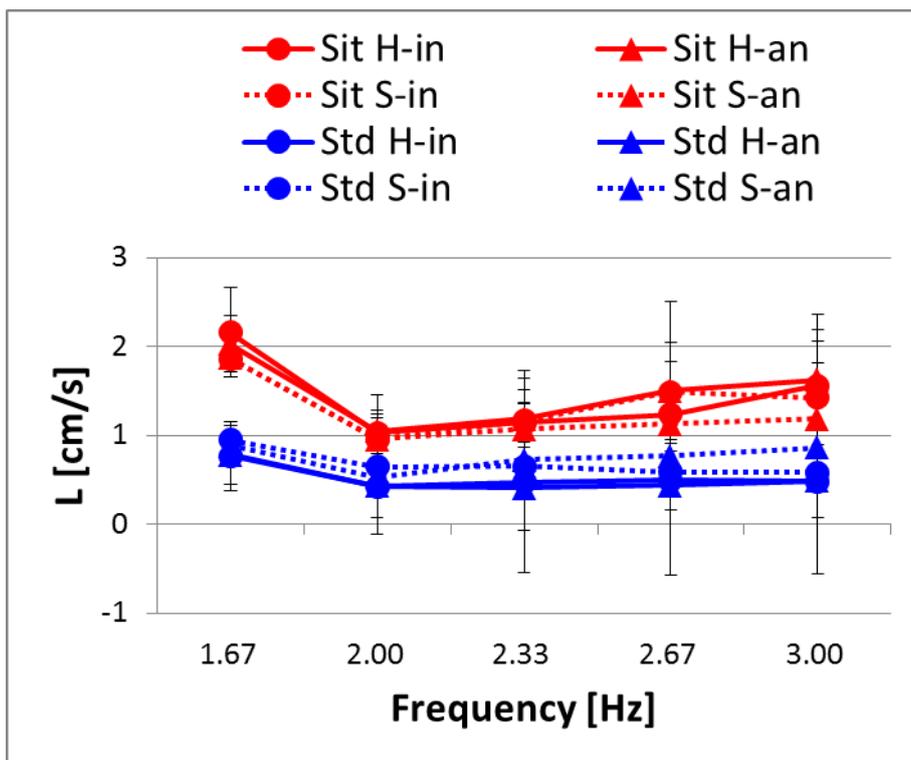


図 5-8 : L

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

分析 4 : 姿勢の組織化 (DFA)

左右方向 (x、Medio-Lateral 成分)

速度情報に対する姿勢の組織化

速度データに対する DFA で FS 指数を求めた結果を図 5-9 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は FS 指数を示している。

速度データに対する DFA で求められた FS 指数について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=87.690, p<.001$ 、 $F(1,7)=6.874, p<.05$ 、 $F(1,7)=6.354, p<.001$)。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、FS 指数は上昇し、反持続性が低下する傾向が示された。

また、体位 × 支持面、体位 × 位相、体位 × 周波数、支持面 × 周波数、位相 × 周波数、体位 × 支持面 × 位相、体位 × 支持面 × 周波数、体位 × 位相 × 周波数の交互作用が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=73.893, p<.001$ 、 $F(1,7)=8.410, p<.05$ 、 $F(1,7)=10.003, p<.001$ 、 $F(1,7)=3.999, p<.05$ 、 $F(1,7)=4.258, p<.01$ 、 $F(1,7)=17.568, p<.005$ 、 $F(1,7)=3.807, p<.05$ 、 $F(1,7)=2.874, p<.05$)。

また体位 × 支持面 × 周波数の交互作用について下位検定を行った結果、座位 Hard 条件でのみ周波数区間の間での有意差がみられ ($F(1,7)=20.998, p<.001$)、周波数の上昇に伴い、FS 指数が 0.5 に近づよう増加し、ランダム性が高くなっていた。

また体位 × 位相 × 周波数の交互作用について下位検定を行った結果、座位逆位相条件でのみ周波数区間の間での有意差がみられ ($F(1,7)=19.492, p<.001$)、周波数の上昇に伴い、FS 指数が 0.5 に近づよう増加し、ランダム性が高くなっていた。

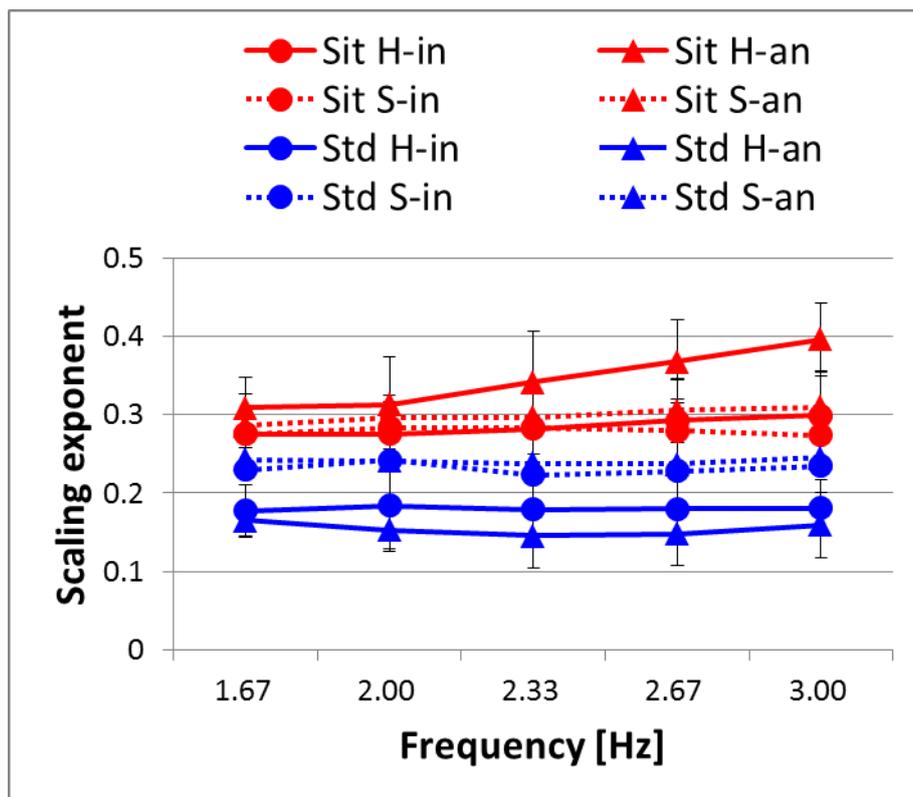


図 5-9 : x 成分の速度情報について FS 指数

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

位置情報に対する姿勢の組織化

位置データに対する DFA で FS 指数を求めた結果を図 5-10 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は FS 指数を示している。

位置データに対する DFA で求められた FS 指数について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位、位相の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=552.610$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=43.119$, $p<.001$)。

また、体位 × 支持面、体位 × 位相、体位 × 周波数の交互作用がみられた (それぞれ、 $F(1,7)=27.010$, $p<.005$ 、 $F(1,7)=7.270$, $p<.05$ 、 $F(1,7)=8.290$, $p<.001$)。

体位 × 支持面の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件、立位条件いずれの条件においても、Soft 条件のほうが Hard 条件より FS 指数が有意に大きく (それぞれ、 $F(1,7)=70.010$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=5.099$, $p<.05$)、フラクタル性が高いが、座位条件のほうが立位条件より、Hard 条件と Soft 条件の差が大きいため、交互作用が生じたと考えられる。

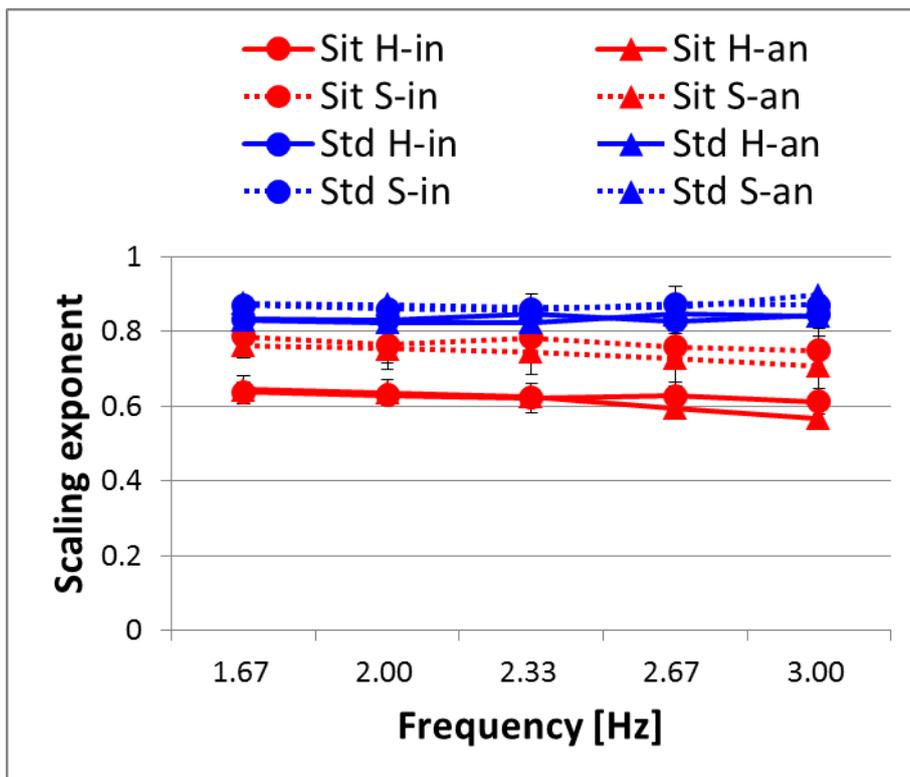


図 5-10 : x 成分の位置情報について FS 指数

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

前後方向 (y、Anterior-Posterior 成分)

速度情報に対する姿勢の組織化

速度データに対する DFA で FS 指数を求めた結果を図 5-11 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は FS 指数を示している。

速度データに対する DFA で求められた FS 指数について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=14.909$, $p<.01$ 、 $F(1,7)=9.274$, $p<.001$)。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、FS 指数は上昇し、反持続性が低下する傾向が示された。

また、体位×周波数、体位×支持面×周波数の交互作用が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=5.973$, $p<.005$ 、 $F(1,7)=5.006$, $p<.005$)。

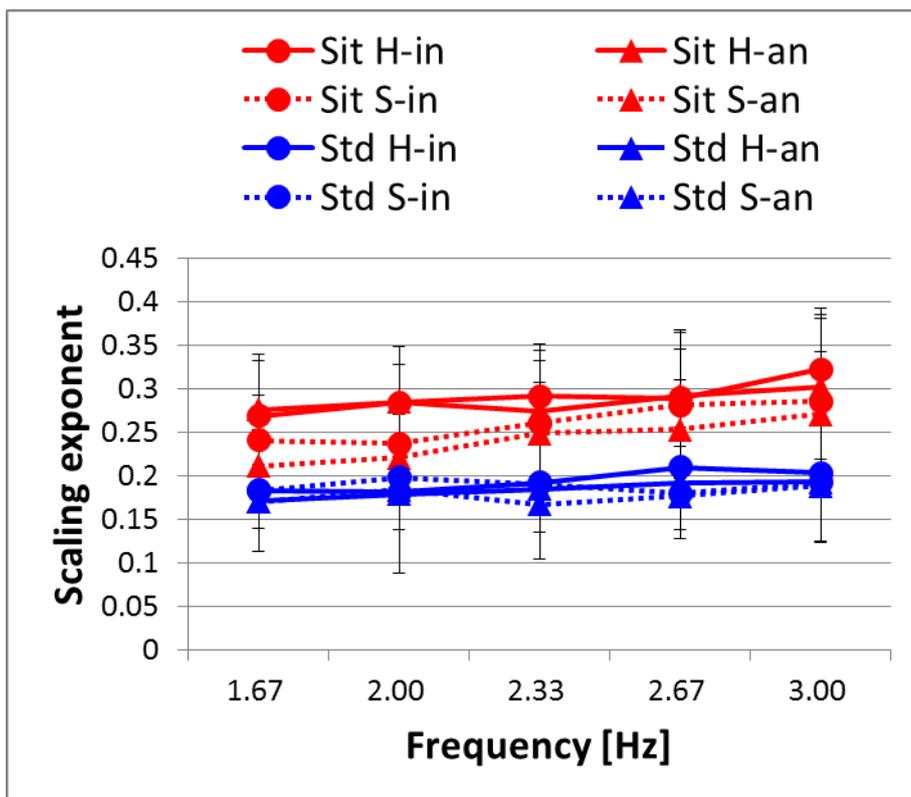


図 5-11 : y 成分の速度情報について FS 指数

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

位置情報に対する姿勢の組織化

位置データに対する DFA で FS 指数を求めた結果を図 5-12 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は FS 指数を示している。

位置データに対する DFA で求められた FS 指数について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位、支持面の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=71.349$, $p < .001$ 、 $F(1,7)=17.080$, $p < .005$)。

また、体位 × 支持面、体位 × 周波数、体位 × 支持面 × 周波数、体位 × 支持面 × 周波数の交互作用が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=7.760$, $p < .05$ 、 $F(1,7)=3.071$, $p < .05$ 、 $F(1,7)=3.557$, $p < .05$)。

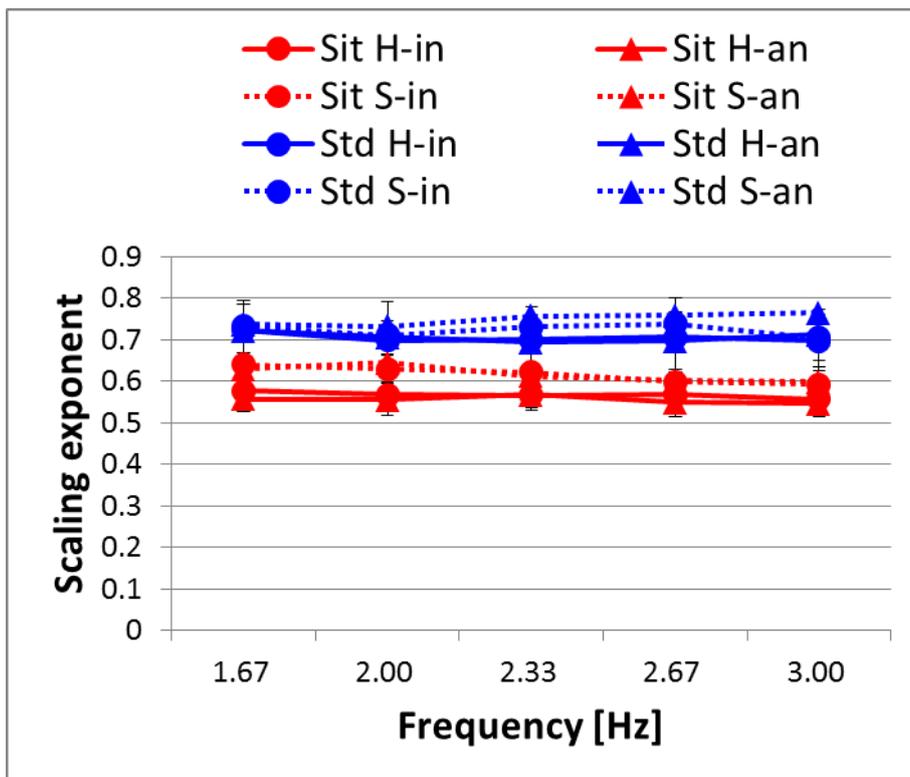


図 5-12 : y 成分の位置情報について FS 指数

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

分析 5 : 姿勢の多重性 (MFA)

左右方向 (x、Medio-Lateral 成分)

COP 位置データの x 成分に対する MWA で MFS 幅 W を求めた結果を図 5-13 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は W を示している。

COP 位置データの x 成分に対する MWA で求められた W について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位、支持面の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=10.814, p<.05$ 、 $F(1,7)=22.589, p<.005$)。

また、体位 × 支持面 × 位相、体位 × 位相 × 周波数の交互作用が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=9.693, p<.05$ 、 $F(1,7)=3.455, p<.05$)。

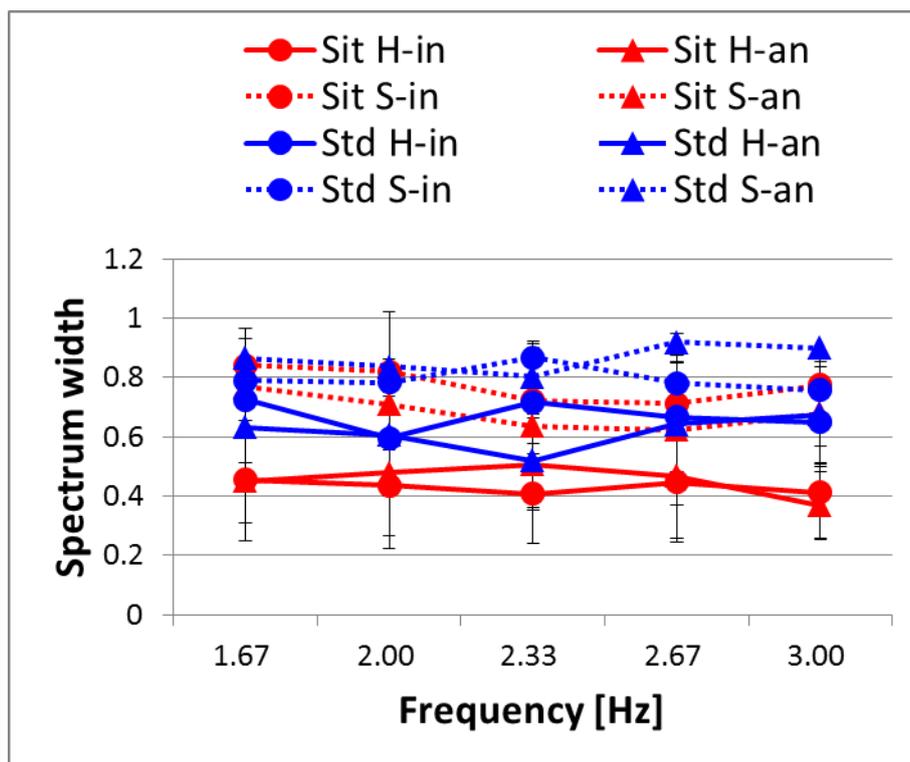


図 5-13 : x 成分の位置データについての MFS 幅

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

前後方向 (y、Anterior-Posterior 成分)

COP 位置データの y 成分に対する MWA で MFS 幅 W を求めた結果を図 5-14 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は W を示している。

COP 位置データの x 成分に対する MWA で求められた W について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位の主効果が有意であった ($F(1,7)=13.455, p<.01$)。

また、体位 × 周波数、体位 × 支持面 × 位相 × 周波数の交互作用が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=2.819, p<.05$ 、 $F(1,7)=3.022, p<.05$)。

体位 × 周波数の交互作用について下位検定を行った結果、立位条件では、周波数区間の間で有意な差はみられなかったが、座位条件では、周波数区間の中に有意差がみられ ($F(1,7)=3.295, p<.05$)、周波数の上昇に伴い、 W が大きくなる傾向がみられた。

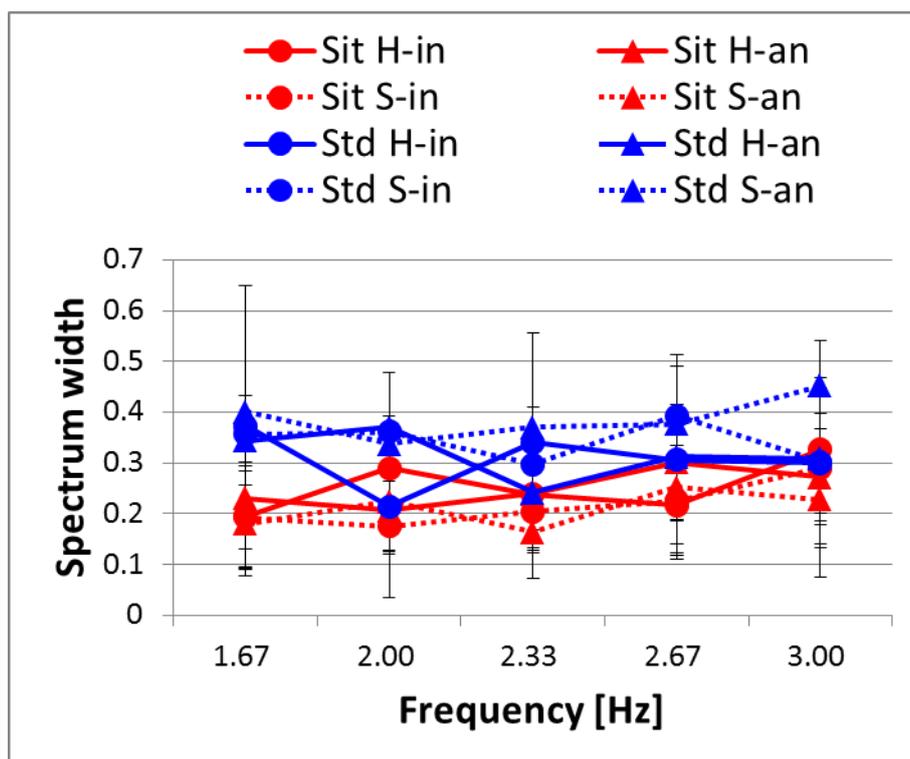


図 5-14 : y 成分の位置データについての MFS 幅

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

第4項 体肢-姿勢間協調の分析

分析6：体肢-姿勢間の協調（CRQA）

%REC：体肢-姿勢間の協調におけるノイズ

左手人差し指と COP-x 成分の組合せ（Lx）

Lx データ間の CRQA で%REC を求めた結果を図 5-15 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は%REC を示している。

Lx データ間の CRQA により求められた%REC について、体位（2）×支持面（2）×位相（2）×周波数（5）の4要因分散分析を行った結果、体位、支持面、位相、周波数の主効果が有意であった（それぞれ、 $F(1,7)=226.161, p<.001$ 、 $F(1,7)=53.933, p<.001$ 、 $F(1,7)=21.975, p<.005$ 、 $F(1,7)=3.284, p<.05$ ）。

支持面の主効果より、%REC は Hard 条件のほうが、Soft 条件より高く、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが少ないことが示された。

また、体位×支持面、体位×位相、体位×周波数、支持面×位相、位相×周波数の交互作用が有意であった（それぞれ、 $F(1,7)=25.386, p<.005$ 、 $F(1,7)=14.995, p<.01$ 、 $F(1,7)=3.748, p<.05$ 、 $F(1,7)=18.283, p<.005$ 、 $F(1,7)=3.068, p<.05$ ）。

体位×支持面の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件でも立位条件でも、Hard 条件と Soft 条件の間に有意があり（それぞれ、 $F(1,7)=78.234, p<.001$ 、 $F(1,7)=4.892, p<.05$ ）、Hard 条件のほうが Soft 条件より%REC が高く、体肢-姿勢間協調におけるノイズが少ないことが示された。

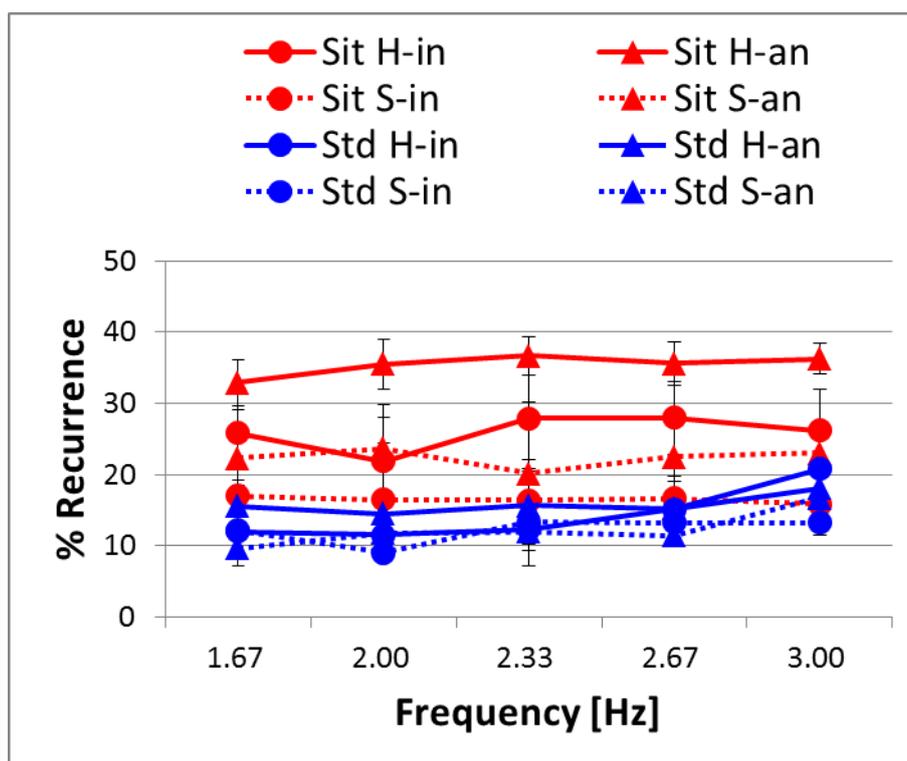


図 5-15 : Lx についての%Recurrence

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー：標準偏差

右手人差し指と COP-x 成分の組合せ (Rx)

Rx データ間の CRQA で%REC を求めた結果を図 5-16 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は%REC を示している。

Rx データ間の CRQA により求められた%REC について、体位 (2) ×支持面 (2) ×位相 (2) ×周波数 (5) の4要因分散分析を行った結果、体位、支持面、位相の主効果が有意であった(それぞれ、 $F(1,7)=322.626$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=56.242$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=17.000$, $p<.005$)。

支持面の主効果より、%REC は Hard 条件のほうが、Soft 条件より高く、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが少ないことが示された。

また、体位×支持面、体位×位相、支持面×位相、位相×周波数の交互作用が有意であった(それぞれ、 $F(1,7)=25.918$, $p<.005$ 、 $F(1,7)=11.592$, $p<.05$ 、 $F(1,7)=14.313$, $p<.01$ 、 $F(1,7)=2.859$, $p<.05$)。

体位×支持面の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件で、Hard 条件と Soft 条件の間に有意があり ($F(1,7)=79.925$, $p<.001$)、立位条件で、Hard 条件と Soft 条件の間に有意傾向があり ($F(1,7)=3.648$, $p<.10$)、Hard 条件のほうが Soft 条件より%REC が高く、体肢-姿勢間協調におけるノイズが少ないことが示された。

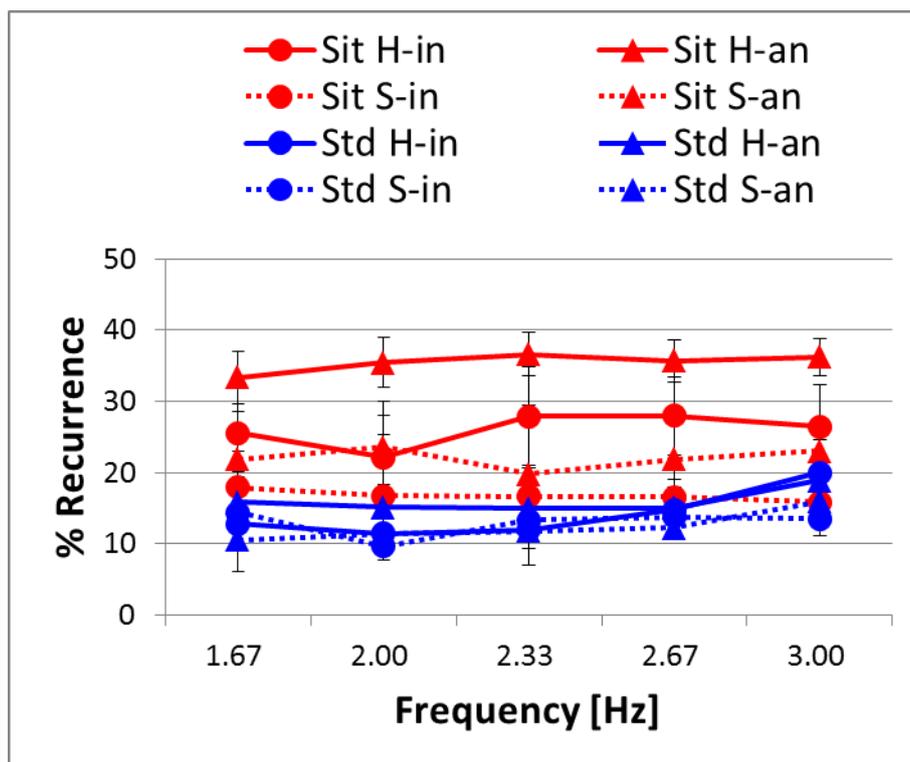


図 5-16 : Rx についての%Recurrence

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー：標準偏差

左手人差し指と COP-y 成分の組合せ (Ly)

Ly データ間の CRQA で%REC を求めた結果を図 5-17 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は%REC を示している。

Ly データ間の CRQA により求められた%REC について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位、支持面、位相の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=171.897, p<.001$ 、 $F(1,7)=8.057, p<.05$ 、 $F(1,7)=9.922, p<.05$)。

位相の主効果より、%REC は同位相条件のほうが、逆位相条件より高く、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが少ないことが示された。

また、体位×支持面、体位×周波数、支持面×周波数の交互作用が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=10.360, p<.05$ 、 $F(1,7)=8.883, p<.001$ 、 $F(1,7)=6.932, p<.001$)。

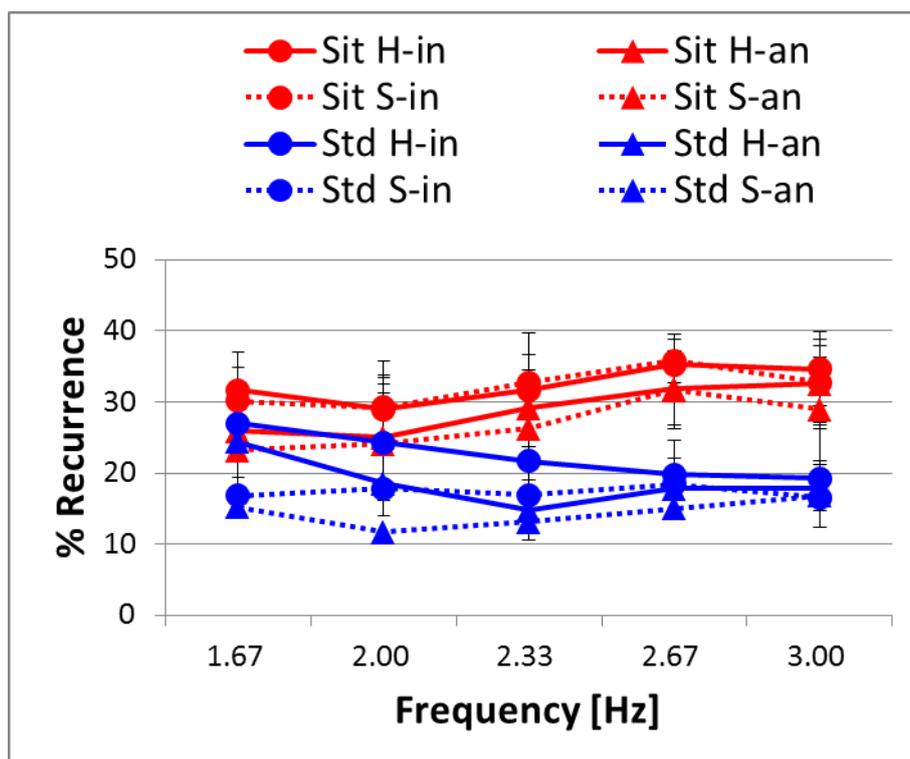


図 5-17 : Ly についての%Recurrence

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

右手人差し指と COP-y 成分の組合せ (Ry)

Ry データ間の CRQA で%REC を求めた結果を図 5-18 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は%REC を示している。

Ry データ間の CRQA により求められた%REC について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位、支持面、位相の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=180.364, p<.001$ 、 $F(1,7)=9.654, p<.05$ 、 $F(1,7)=11.739, p<.05$)。

位相の主効果より、%REC は同位相条件のほうが、逆位相条件より高く、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが少ないことが示された。

また、体位×支持面、体位×周波数、支持面×周波数の交互作用が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=10.905, p<.05$ 、 $F(1,7)=10.031, p<.001$ 、 $F(1,7)=6.406, p<.001$)。

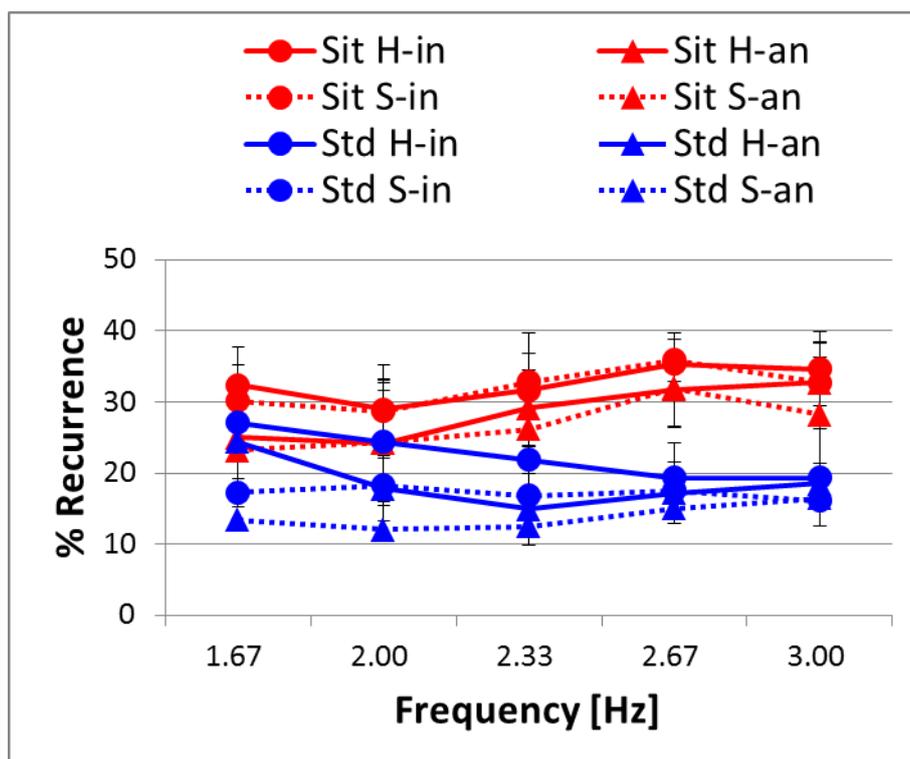


図 5-18 : Ry についての%Recurrence

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

%REC についての分析結果

以上、 L_x 、 R_x 、 L_y 、 R_y のデータ間の CRQA により求められた %REC に関して統計的分析を行った結果、次のことが明らかとなった。

体肢-姿勢間協調におけるノイズの程度を評価するため、左右の人差し指、COP データの左右方向 (x 成分)、前後方向 (y 成分) の 4 つの組み合わせ (L_x 、 R_x 、 L_y 、 R_y) のデータ間で CRQA を実行し %REC を求め、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、次のことが明らかとなった。

左右の人差し指と COP の x 成分との間の協調 (L_x 、 R_x) においては、支持面の主効果より、Hard 条件のほうが Soft 条件より体肢-姿勢間協調におけるノイズが小さく安定していた。体位×支持面の交互作用がみられ、いずれの体位でも Hard 条件のほうが Soft 条件より体肢-姿勢間協調におけるノイズが小さく安定していたが、座位条件では立位条件より、Hard 条件と Soft 条件との差が大きかった。体位×位相の交互作用がみられ、座位条件では逆位相条件のほうが同位相条件より %REC が大きい、立位条件では逆位相条件と同位相条件の間に有意差がなかった。体位×周波数の交互作用がみられ、座位条件では周波数区間の間に有意差がない、立位条件では周波数の上昇に伴い、%REC が大きくなっていった。支持面×位相の交互作用がみられ、Hard 条件では Soft 条件より、同位相条件と逆位相条件との差が大きかった。位相×周波数の交互作用がみられ、同位相条件では、周波数の上昇に伴い、%REC が大きくなるが、逆位相条件では、周波数区間の間に有意差がみられなかった。

左右の人差し指と COP の y 成分との間の協調 (L_y 、 R_y) においては、位相の主効果より、%REC は同位相条件のほうが、逆位相条件より高く、体肢-姿勢間の協調におけるノイズが少ないことが示された。体位×支持面の交互作用がみられ、座位条件では Hard 条件と Soft 条件の間に有意差がなかったが、立位条件では Hard 条件のほうが Soft 条件より %REC が大きかった。体位×周波数の交互作用がみられ、座位条件では、周波数の上昇に伴い、%REC が大きくなっていったが、立位条件では周波数区間の間に有意差がなかった。支持面×周波数の交互作用がみられ、Hard 条件では周波数区間の間に有意差がみられなかったが、Soft 条件では周波数区間の間に有意差がみられた。しかし、一貫したパターンはみられなかった。

Maxline

左手人差し指と COP-x 成分の組合せ (Lx)

Lx データ間の CRQA で MAXL を求めた結果を図 5-19 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は MAXL を示している。

Lx データ間の CRQA により求められた MAXL について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位、支持面、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=754.624$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=48.308$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=19.619$, $p<.005$ 、 $F(1,7)=79.022$, $p<.001$)。

また、体位×支持面、体位×位相、体位×周波数、支持面×周波数、体位×支持面×周波数、体位×位相×周波数の交互作用が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=25.018$, $p<.005$ 、 $F(1,7)=12.411$, $p<.01$ 、 $F(1,7)=23.904$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=7.842$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=5.374$, $p<.005$ 、 $F(1,7)=3.140$, $p<.05$)。

体位×支持面の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件では支持面間に有意差があり ($F(1,7)=72.275$, $p<.001$)、Hard 条件のほうが Soft 条件より MAXL が長く、体肢-姿勢間協調における結合強度が強かった。一方、立位条件では Hard 条件と Soft 条件の間に有意差がみられなかった。

体位×位相の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件では位相間に有意差があり ($F(1,7)=31.277$, $p<.001$)、逆位相条件のほうが同位相条件より MAXL が長く、体肢-姿勢間協調における結合強度が強かった。一方、立位条件では Hard 条件と Soft 条件の間に有意差がみられなかった。

体位×支持面×周波数の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件では全周波数区間で支持面間に有意差があったが ($F(1,7)=13.322$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=16.405$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=71.838$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=64.282$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=76.765$, $p<.001$)、全周波数区間で Hard 条件のほうが Soft 条件より MAXL が長く、体肢-姿勢間協調における結合強度が強かった。一方、立位条件では、周波数区間 f5 でのみ支持面間で有意差があり ($F(1,7)=4.126$, $p<.05$)、Hard 条件のほうが Soft 条件より MAXL が長く、体肢-姿勢間協調における結合強度が強かった。

体位 × 位相 × 周波数の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件では、全周波数区間で位相間に有意差があり ($F(1,7)=5.765$, $p<.05$ 、 $F(1,7)=15.243$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=14.711$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=19.748$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=35.504$, $p<.001$)、逆条件のほうが同条件より MAXL が長く、体肢-姿勢間協調における結合強度が強かった。一方、立位条件では、全周波数区間で位相間に有意差がみられなかった。

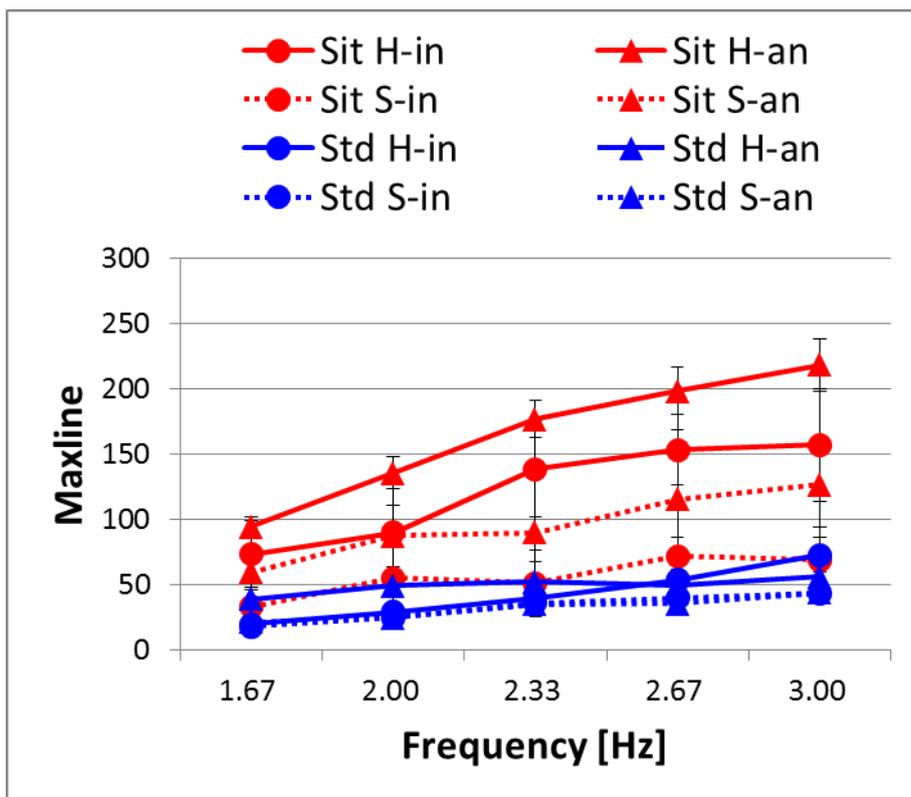


図 5-19 : Lx についての Maxline

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー：標準偏差

右手人差し指と COP-x 成分の組合せ (Rx)

Rx データ間の CRQA で%REC を求めた結果を図 5-20 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は%REC を示している。

Rx データ間の CRQA により求められた MAXL について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位、支持面、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=1553.599$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=41.747$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=26.807$, $p<.005$ 、 $F(1,7)=80.214$, $p<.001$)。

また、体位×支持面、体位×位相、体位×周波数、支持面×周波数、体位×支持面×周波数の交互作用が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=33.883$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=11.186$, $p<.05$ 、 $F(1,7)=16.760$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=8.251$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=4.642$, $p<.01$)。また、体位×位相×周波数の交互作用について有意傾向がみられた ($F(1,7)=2.241$, $p<.10$)。

体位×支持面の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件では支持面間に有意差があり ($F(1,7)=75.461$, $p<.001$)、Hard 条件のほうが Soft 条件より MAXL が長く、体肢-姿勢間協調における結合強度が強かった。一方、立位条件では Hard 条件と Soft 条件の間に有意差がみられなかった。

体位×位相の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件では位相間に有意差があり ($F(1,7)=34.825$, $p<.001$)、逆位相条件のほうが同位相条件より MAXL が長く、体肢-姿勢間協調における結合強度が強かった。一方、立位条件では Hard 条件と Soft 条件の間に有意差がみられなかった。

体位×支持面×周波数の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件では全周波数区間で支持面間に有意差があったが ($F(1,7)=14.238$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=13.839$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=70.806$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=71.605$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=69.088$, $p<.001$)、全周波数区間で Hard 条件のほうが Soft 条件より MAXL が長く、体肢-姿勢間協調における結合強度が強かった。一方、立位条件では、全周波数区間で支持面間に有意差がみられなかった。

体位×位相×周波数の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件では、全周波数区間で位相間に有意差があり ($F(1,7)=7.913$, $p<.01$ 、 $F(1,7)=15.654$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=17.069$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=20.699$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=31.511$, $p<.001$)、逆条件のほうが同条件より MAXL が長く、体肢-姿勢間協調における結合強度が強かった。一方、立位条件では、全周波数区間で位相間に有意差がみられなかった。

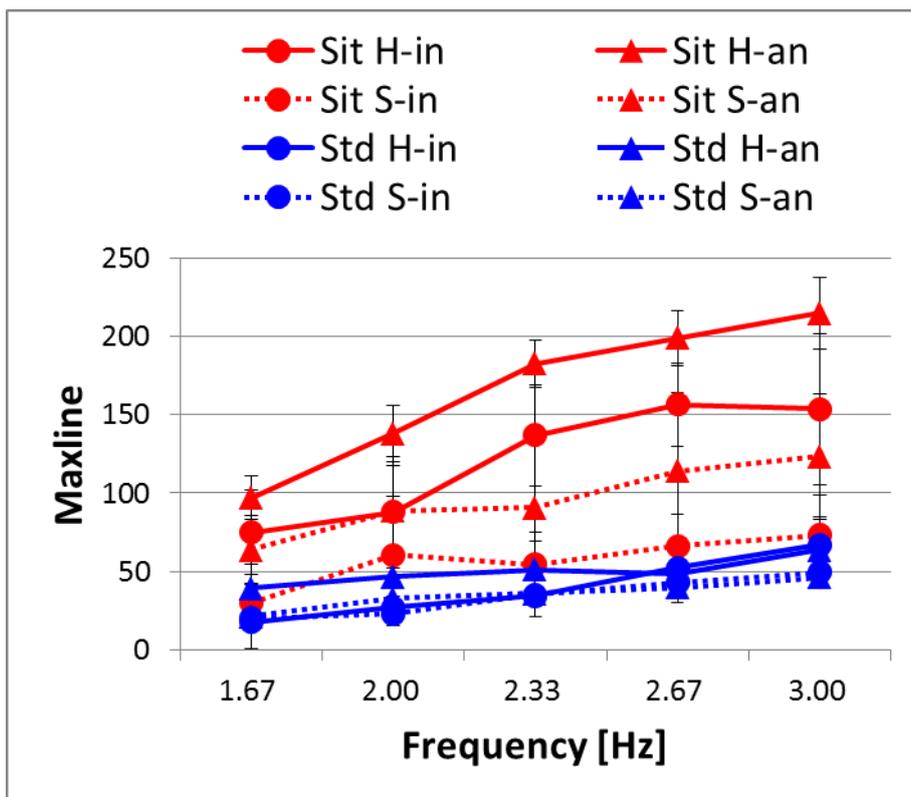


図 5-20 : Rx についての Maxline

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

左手人差し指と COP-y 成分の組合せ (Ly)

Ly データ間の CRQA で MAXL を求めた結果を図 5-21 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は MAXL を示している。

Ly データ間の CRQA により求められた MAXL について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位、支持面、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=164.948$, $p < .001$ 、 $F(1,7)=9.035$, $p < .05$ 、 $F(1,7)=19.338$, $p < .005$ 、 $F(1,7)=50.799$, $p < .001$)。

また、体位×支持面、体位×周波数、体位×支持面×位相の交互作用が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=15.359$, $p < .01$ 、 $F(1,7)=39.775$, $p < .001$ 、 $F(1,7)=6.571$, $p < .05$)。

体位×周波数の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件でも立位条件でも周波数区間間に有意差があり (それぞれ、 $F(1,7)=89.195$, $p < .001$ 、 $F(1,7)=5.142$, $p < .005$)、周波数の上昇に伴い、MAXL が長くなる傾向がみられた。

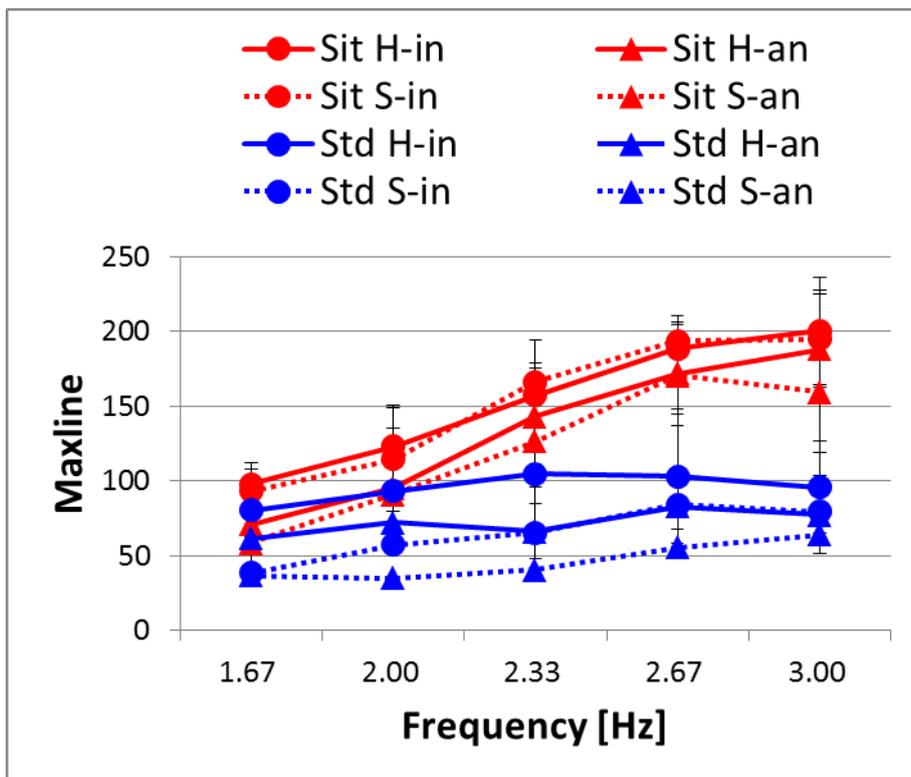


図 5-21 : Ly についての Maxline

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

右手人差し指と COP-y 成分の組合せ (Ry)

Ry データ間の CRQA で MAXL を求めた結果を図 5-22 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は MAXL を示している。

Ry データ間の CRQA により求められた MAXL について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、**体位、支持面、位相、周波数**の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=149.763$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=10.401$, $p<.05$ 、 $F(1,7)=11.703$, $p<.05$ 、 $F(1,7)=51.119$, $p<.001$)。

また、体位×支持面、体位×周波数の交互作用が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=11.349$, $p<.05$ 、 $F(1,7)=45.269$, $p<.001$)。

体位×周波数の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件でも立位条件でも周波数区間間に有意差があり (それぞれ、 $F(1,7)=93.036$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=5.692$, $p<.001$)、周波数の上昇に伴い、MAXL が長くなり、体肢・姿勢間協調における結合が強くなる傾向がみられた。

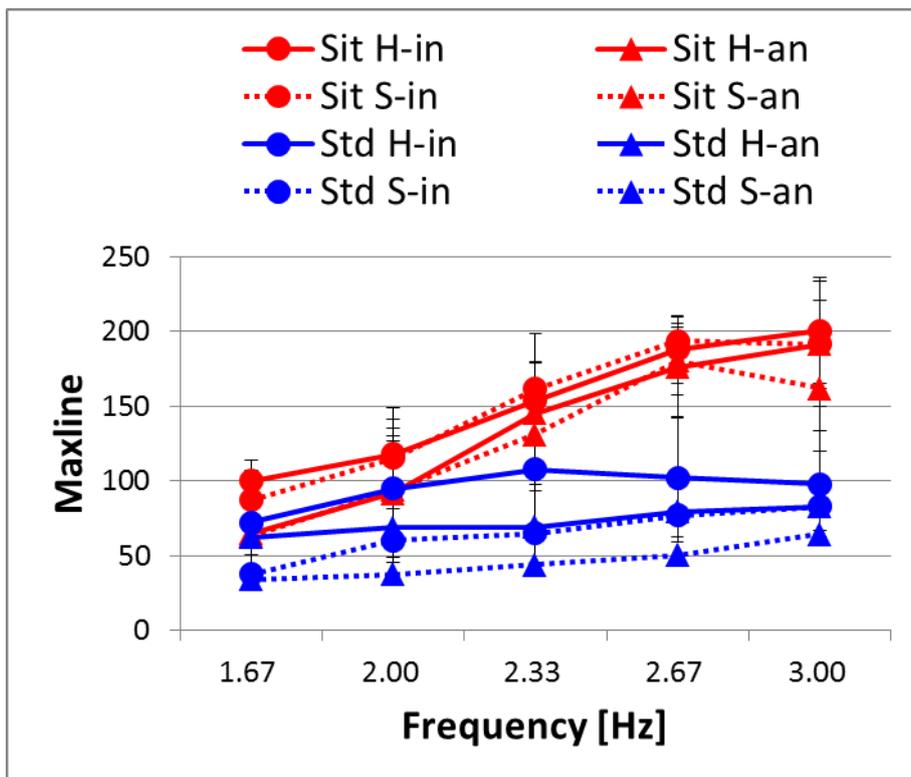


図 5-22 : Ry についての Maxline

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

MAXL についての分析結果

以上、 L_x 、 R_x 、 L_y 、 R_y のデータ間の CRQA により求められた MAXL に関して統計的分析を行った結果、次のことが明らかとなった。

左右の人差し指と COP の x 成分との間の協調 (L_x 、 R_x) においては、体位×支持面の交互作用がみられ、座位条件では Hard 条件のほうが Soft 条件より MAXL が長く、体肢-姿勢間協調における結合が強かった。一方、立位条件では Hard 条件と Soft 条件の間に有意差がなかった。体位×位相の交互作用がみられ、座位条件では逆位相条件のほうが同位相条件より MAXL が長く、体肢-姿勢間協調における結合が強かった。一方、立位条件では逆位相条件と同位相条件の間に有意差がなかった。体位×支持面×周波数の交互作用がみられ、座位条件では、全周波数区間で Hard 条件のほうが Soft 条件より MAXL が長く、体肢-姿勢間協調における結合が強かった。一方、立位条件では、f5 でのみ Hard 条件のほうが Soft 条件より MAXL が長く、体肢-姿勢間協調における結合が強かった。体位×位相×周波数の交互作用がみられ、座位条件では、全周波数区間で逆条件のほうが同条件より MAXL が長く、体肢-姿勢間協調における結合が強かった。一方、立位条件では、全周波数区間で位相間に有意差がみられなかった。

左右の人差し指と COP の y 成分との間の協調 (L_y 、 R_y) においては、体位×支持面の交互作用がみられ、座位条件では、Hard 条件と Soft 条件の間に有意差がみられなかった。一方、立位条件では、Hard 条件のほうが Soft 条件より MAXL が長く、体肢-姿勢間協調における結合が強かった。体位×周波数の交互作用がみられ、座位条件でも立位条件でも、周波数の上昇に伴い、MAXL が長くなる傾向があるが、上昇の仕方に違いがみられた。

Averageline

左手人差し指と COP-x 成分の組合せ (Lx)

Lx データ間の CRQA で AVGL を求めた結果を図 5-23 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は AVGL を示している。

Lx データ間の CRQA により求められた AVGL について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位、支持面、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=182.032$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=40.565$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=19.512$, $p<.005$ 、 $F(1,7)=18.003$, $p<.001$)。

位相の主効果より、AVGL は逆位相条件のほうが、同位相条件より高く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、AVGL は長くなり、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。

また、体位 × 支持面、体位 × 位相、体位 × 周波数、支持面 × 位相、支持面 × 周波数の交互作用が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=25.771$, $p<.005$ 、 $F(1,7)=15.120$, $p<.01$ 、 $F(1,7)=7.337$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=13.703$, $p<.01$ 、 $F(1,7)=5.841$, $p<.005$)。

体位 × 支持面の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件では、支持面間に有意差があり ($F(1,7)=66.157$, $p<.001$)、Hard 条件のほうが Soft 条件より AVGL が長く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。一方、立位条件では、Hard 条件と Soft 条件の間に有意差はみられなかった。

体位 × 位相の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件では、位相間に有意差があり ($F(1,7)=34.556$, $p<.001$)、逆位相条件のほうが同位相条件より AVGL が長く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。一方、立位条件では、同位相条件と逆位相条件の間に有意差はみられなかった。

体位 × 周波数の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件では周波数区間の間に有意差があり ($F(1,7)=24.070$, $p<.001$)、立位条件では周波数区間の間に有意傾向があり ($F(1,7)=2.264$, $p<.10$)、周波数の上昇に伴い、AVGL が長くなり、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高くなる傾向があった。

支持面 × 位相の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件でも立位条件でも、位相間に有意差があり (それぞれ、 $F(1,7)=31.274$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=5.522$, $p<.05$)、逆位相条件のほうが同位相条件より AVGL が長く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。

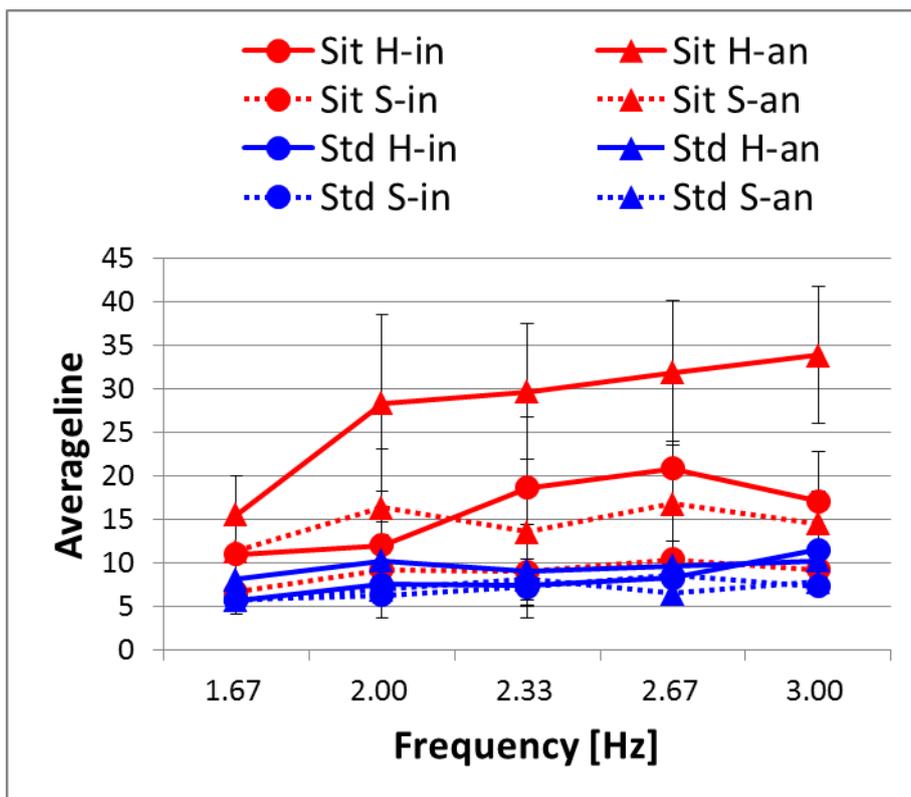


図 5-23 : Lx についての Averageline

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

右手人差し指と COP-x 成分の組合せ (Rx)

Rx データ間の CRQA で AVGL を求めた結果を図 5-24 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は AVGL を示している。

Rx データ間の CRQA により求められた AVGL について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位、支持面、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=263.700$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=66.565$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=24.479$, $p<.005$ 、 $F(1,7)=21.318$, $p<.001$)。

位相の主効果より、AVGL は逆位相条件のほうが、同位相条件より高く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。

周波数の主効果における多重比較の結果、周波数の上昇に伴い、AVGL は長くなり、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。

また、体位×支持面、体位×位相、体位×周波数、支持面×位相、支持面×周波数の交互作用が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=35.002$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=11.928$, $p<.05$ 、 $F(1,7)=6.505$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=10.698$, $p<.05$ 、 $F(1,7)=6.653$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=6.441$, $p<.05$)。

体位×支持面の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件では、支持面間に有意差があり ($F(1,7)=98.491$, $p<.001$)、Hard 条件のほうが Soft 条件より AVGL が長く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。一方、立位条件では、Hard 条件と Soft 条件の間に有意差はみられなかった。

体位×位相の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件では、位相間に有意差があり ($F(1,7)=34.528$, $p<.001$)、逆位相条件のほうが同位相条件より AVGL が長く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。一方、立位条件では、同位相条件と逆位相条件の間に有意差はみられなかった。

体位×周波数の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件で持立位条件でも周波数区間の間に有意差があり (それぞれ、 $F(1,7)=25.070$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=3.249$, $p<.05$)、周波数の上昇に伴い、AVGL が長くなり、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高くなる傾向があった。

支持面×位相の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件でも立位条件でも、位相間に有意差があり (それぞれ、 $F(1,7)=35.168$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=5.812$, $p<.05$)、逆位相条件のほうが同位相条件より AVGL が長く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。

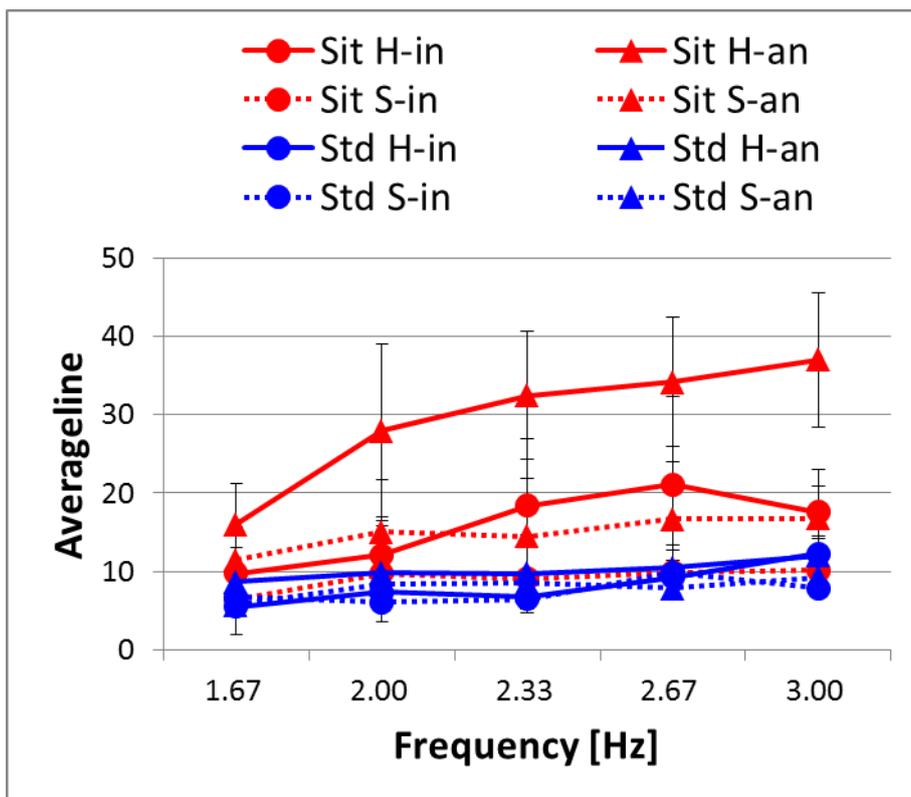


図 5-24 : Rx についての Averageline

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

左手人差し指と COP-y 成分の組合せ (Ly)

Ly データ間の CRQA で AVGL を求めた結果を図 5-25 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は AVGL を示している。

Ly データ間の CRQA により求められた AVGL について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=217.719, p<.001$ 、 $F(1,7)=20.572, p<.005$ 、 $F(1,7)=18.694, p<.001$)。

位相の主効果より、AVGL は同位相条件のほうが、逆位相条件より長く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。

また、体位×周波数、体位×支持面の交互作用が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=11.268, p<.05$ 、 $F(1,7)=22.665, p<.001$)。

体位×支持面の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件では、Hard 条件と Soft 条件の間に有意差がみられなかったが、立位条件では、支持面の間に有意差がみられ ($F(1,7)=9.399, p<.01$)、Hard 条件のほうが Soft 条件より AVGL が長く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。

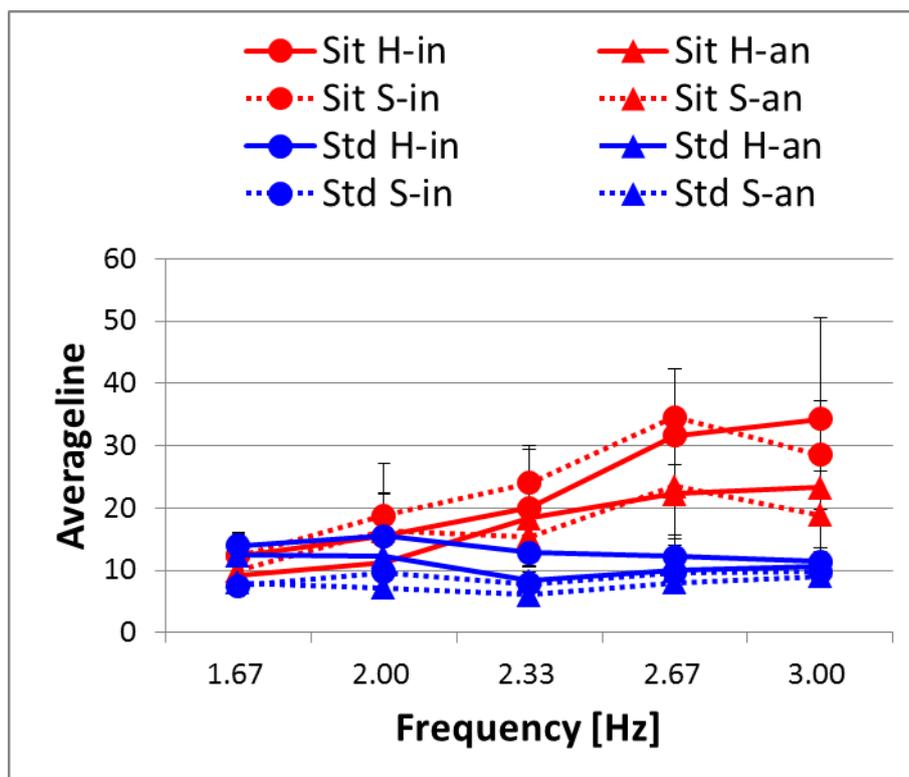


図 5-25 : Ly についての Averageline

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

右手人差し指と COP-y 成分の組合せ (Ry)

Ry データ間の CRQA で AVGL を求めた結果を図 5-26 に示す。横軸はメトロノームの周波数、縦軸は AVGL を示している。

Ry データ間の CRQA により求められた AVGL について、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位、位相、周波数の主効果が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=215.644$, $p<.001$ 、 $F(1,7)=12.203$, $p<.05$ 、 $F(1,7)=18.174$, $p<.001$)。

位相の主効果より、AVGL は同位相条件のほうが、逆位相条件より長く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。

また、体位×支持面、体位×周波数の交互作用が有意であった (それぞれ、 $F(1,7)=9.782$, $p<.05$ 、 $F(1,7)=23.018$, $p<.001$)。

体位×支持面の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件では、Hard 条件と Soft 条件の間に有意差がみられなかったが、立位条件では、支持面の間に有意差がみられ ($F(1,7)=8.285$, $p<.05$)、Hard 条件のほうが Soft 条件より AVGL が長く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。

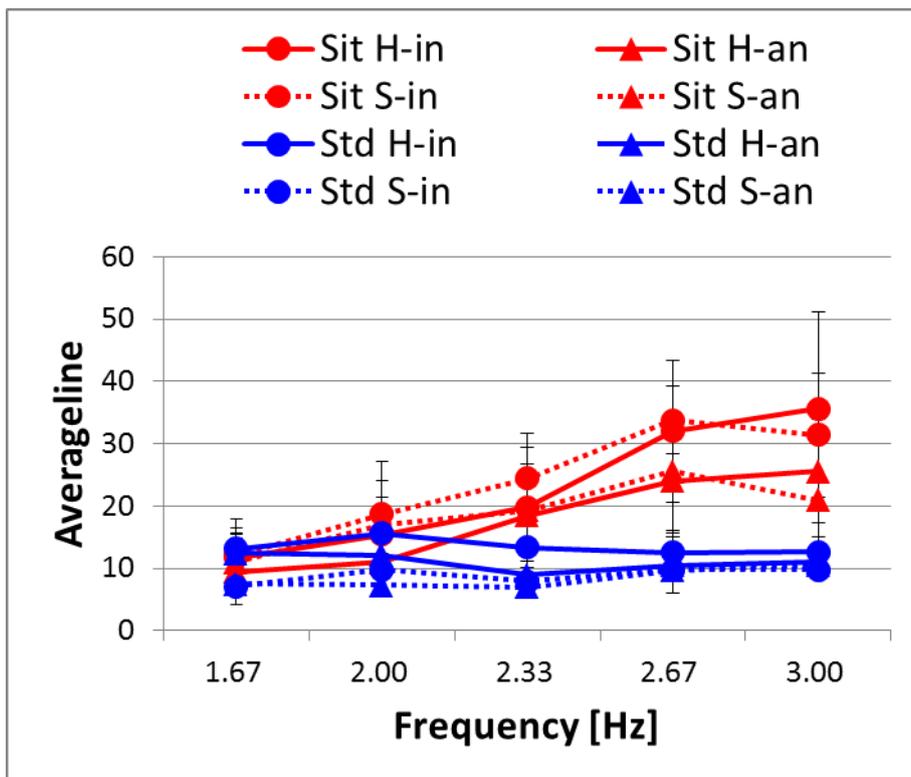


図 5-26 : Ry についての Averageline

- 座位 Hard 同位相条件 (Sit H-in : 赤色の実線、●印)
- 座位 Hard 逆位相条件 (Sit H-an : 赤色の実線、▲印)
- 座位 Soft 同位相条件 (Sit S-in : 赤色の破線、●印)
- 座位 Soft 逆位相条件 (Sit S-an : 赤色の破線、▲印)
- 立位 Hard 同位相条件 (Std H-in : 青色の実線、●印)
- 立位 Hard 逆位相条件 (Std H-an : 青色の実線、▲印)
- 立位 Soft 同位相条件 (Std S-in : 青色の破線、●印)
- 立位 Soft 逆位相条件 (Std S-an : 青色の破線、▲印)

※エラーバー : 標準偏差

AVGL についての分析結果

以上、 L_x 、 R_x 、 L_y 、 R_y のデータ間の CRQA により求められた AVGL に関して統計的分析を行った結果、次のことが明らかとなった。

左右の人差し指と COP の x 成分との間の協調 (L_x 、 R_x) においては、位相の主効果がみられ、AVGL は逆位相条件のほうが、同位相条件より高く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。周波数の主効果がみられ、周波数の上昇に伴い、AVGL は長くなり、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。体位×支持面の交互作用がみられ、座位条件では、Hard 条件のほうが Soft 条件より AVGL が長く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。一方、立位条件では、Hard 条件と Soft 条件の間に有意差はみられなかった。体位×位相の交互作用がみられ、座位条件では、逆位相条件のほうが同位相条件より AVGL が長く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。一方、立位条件では、同位相条件と逆位相条件の間に有意差はみられなかった。体位×周波数の交互作用がみられ、座位条件で立位条件でも、周波数の上昇に伴い、AVGL が長くなり、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高くなる傾向があった。支持面×位相の交互作用がみられ、座位条件でも立位条件でも、逆位相条件のほうが同位相条件より AVGL が長く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。

左右の人差し指と COP の y 成分との間の協調 (L_y 、 R_y) においては、位相の主効果がみられ、AVGL は同位相条件のほうが、逆位相条件より長く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。体位×支持面の交互作用がみられ、座位条件では、Hard 条件と Soft 条件の間に有意差がみられなかったが、立位条件では、Hard 条件のほうが Soft 条件より AVGL が長く、体肢-姿勢間の協調における持続的協調性が高いことが示された。

第4節 考察

以下、体肢間協調の安定性（分析1：SD ϕ ）、協調性（分析2：CRQA）、姿勢の安定性（分析3：L）、組織化（分析4：DFA）、多重性（分析5：MWA）、体肢-姿勢間協調の協調性（分析6：CRQA）の結果について順に考察する。

第1項 分析1：体肢間協調の安定性（SD ϕ ）

体肢間協調の安定性を評価するためSD ϕ を求め、体位（2）×支持面（2）×位相（2）×周波数（5）の4要因分散分析を行った結果、支持面の主効果については有意傾向がみられ、Hard条件のほうがSoft条件よりSD ϕ が小さく、運動の安定性が高い傾向が示された。この結果は、仮説通り、身体と環境の接触面である支持面の環境特性（力学的安定性、触覚情報の利用可能性）が体肢間協調の安定性に影響することを示しており、予測した通り、力学的に安定し、支持面からの触覚情報が得やすいHard条件のほうが体肢間協調の安定性も高かった。実験3で操作した支持面は、座位条件では椅子と実験参加者の大腿部、立位条件では床と足底の接触する面であり、当該課題を遂行する指先からは離れた位置にある。それにもかかわらず、身体というシステムが全身で指先の課題に参与し、支持面というグローバルなレベルの安定性が指先というローカルなレベルの安定性に影響するという事実は、本研究の仮説の一部であるグローバルなレベルからローカルなレベルへの影響関係を支持する結果となった。

また、周波数の主効果が有意であり、周波数が高くなるほどSD ϕ が大きくなり、運動の安定性が低下する傾向が示された。この結果は、運動の周波数がコントロールパラメータとして体肢間協調のダイナミクスに作用し、高周波数ほど運動が不安定化するという体肢間協調研究に関する多くの先行研究の結果、及び、HKBモデルの予測と一致する。

さらに、体位×位相の交互作用がみられ、逆位相条件で座位と立位の間には有意差がみられ、座位条件のほうが、立位条件よりSD ϕ が小さく、運動の安定性が高かったことが示された。また、立位条件で同位相と逆位相の間に有意差がみられ、同位相条件のほうが、逆位相条件よりSD ϕ が小さく、運動の安定性が高かったことが示された。これら下位検定の結果から、立位逆位相条件の安定性の低下より、座位と立位では体肢間協調のダイナミクスが異なることが明らかとなった。この結果は、仮説通り、支持基底面が大きく姿勢というグローバルなレベルでの安定性が高い座位条件のほうが、体肢間協調というローカルなレベルでの安定性も高くなるということを示している。また、グローバルなレベルで不安定化する立位条件では、逆位相が同位相より安定性が低くなるという結果は、潜在的には同位相のほうが逆位相より安定するというHKBモデルの記述とも一致する。

第2項 分析2：体肢間協調の協調性（CRQA）

%REC

体肢間協調におけるノイズの程度を評価するため CRQA で %REC を求め、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、周波数の主効果が有意であり、周波数が高くなるほど %REC が低くなり、体肢間協調におけるノイズが増加する傾向が示された。

ただし、位相×周波数の交互作用がみられ、同位相条件では周波数区間によって %REC に有意差が認められたが、逆位相条件では周波数区間による差はみられなかった。また、低周波数 (f1) では、同位相条件のほうが逆位相条件より %REC が高く、体肢間協調におけるノイズが少ないことが示された。

これらの結果から、位相により運動周波数の影響が異なり、同位相パターンでは、SDφと同様に、周波数が高くなるほど体肢間協調の安定性が下がり、ノイズが増加するのに対し、逆位相パターンでは、周波数の影響は受けなかったことが示された。

MAXL

体肢間協調における結合の強度を評価するため CRQA で MAXL を求め、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、位相の主効果が有意であり、同位相条件のほうが逆位相条件より MAXL が長く、体肢間協調の結合が強かった。

ただし、位相×周波数の交互作用がみられ、周波数の上昇に伴い、同位相と逆位相の間の MAXL の差が縮まることが示された。

これらの結果は、実験1、実験2と同様に、結合強度という観点では、姿勢要因によらず同位相のほうが逆位相より左右の人差し指同士との結合が強いことを示している。

AVGL

体肢間協調における持続的協調性を評価するため CRQA で AVGL を求め、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、支持面の主効果について有意傾向がみられ、Hard 条件のほうが Soft 条件より AVGL が長く、持続的協調性が高い傾向があった。この結果は、仮説通り、支持面の特性（力学的安定性、触覚情報の利用可能性）が体肢間協調の安定性に影響することを示しており、予測通り、力学的に安定し、支持面からの触覚情報が得やすい Hard 条件のほうが体肢間の協調が持続的に維持されることを示している。

以上より、体位や支持面といった姿勢というグローバルなレベルでの安定性に影響を与えうる要因を実験的に操作した結果、体肢間協調というローカルなレベルでの運動の安定性や協調性に影響が確認された。とくに、支持面の特性（座面や足底面の材質）の操作は、座位条件では実験参加者の大腿部、立位条件では足底部に対する操作で

あるため、一見、当該実験で課題の遂行を求められる指先とは離れており、影響がないのではないかと予測された。しかしながら、本研究の基本仮説である身体というシステムが部分（体肢）-全体（姿勢）の入れ子構造を想定するならば、物理的に離れた部位でも相互に影響しうることを踏まえると、指先の課題に対しても全身で協調して参与し、グローバルなレベルの安定性がローカルなレベルの安定性に影響したと解釈できよう。このことは、私たちが日常生活のレベルで行っているタイピングなどの指先の行為においても、椅子の座面の材質や、足底の材質が影響することを示唆しており、今後、そうしたより実践的な課題における体肢-姿勢の相互作用関係についての検討も期待される。

第3項 分析3：姿勢の安定性（L）

姿勢の安定性を評価するため単位時間軌跡長（L）を求め、体位（2）×支持面（2）×位相（2）×周波数（5）の4要因分散分析を行った結果、体位×周波数の交互作用がみられ、座位条件では、周波数区間 f1 で他の区間より単位時間軌跡長 L が著しく大きく、f2 で L が約半分の値に減少し、f2 以降は少しずつ増加するの傾向を示した。立位条件についても、f1 で比較的 L が大きな値をとり、その後、f2 で一旦減少した後は少しずつ増加する傾向を示した。これらの結果については、2つの要因が影響している可能性が示唆される。1つめの要因は、いずれの体位においても、実験参加者は試行の開始直前に実験装置（フォースプレート）の上に乗って試行後は降りる、という手続きで実験を繰り返していた。そのため、実験装置に乗り、その場に姿勢を落ち着かせるまでの間、すなわち、身体を環境に定位させるまでの間の探索的姿勢動揺が、冒頭の周波数区間 f1 と重なってしまい、L として検出されてしまった可能性である。2つめの要因としては、f1 の周波数（1.67Hz）が、姿勢の固有周波数と近く指の運動と姿勢の動揺とが共振したため、L が大きな値となってしまった可能性である。

また、体位×支持面×位相の交互作用もみられたが、Hard 同位相条件、Soft 同位相条件、Hard 逆位相条件、Soft 逆位相条件のいずれにおいても、座位条件のほうが立位条件より L が大きく、姿勢の動揺が大きかったが、座位条件と立位条件の間の差の現れが異なっていたため、交互作用が出たと考察される。

以上より、姿勢の安定性を単位時間軌跡長 L、すなわち COP が動揺した距離に基づいて評価した場合、総じて、座位条件のほうが立位条件より L が長くなるということが示唆された。この結果は、支持基底面が大きい座位条件のほうが安定するという予測と異なるものである。この結果に関する解釈は2つある。1つめは、座位と立位という2つの体位の違いとして、支持基底面と身体全体の固有周波数（胴部を振動体とした場合、座位では上体が、立位では全身が振動体とみなされる）が考えられる。支持基底面については、座位のほうが大腿部の裏面全体が椅子の座面に接しているため、立位の足底より面積が広くなる。さらに、固有周波数という点でも、座位のほうが固有周波数は高くなる。よって、座位のほうが高周波数で（小刻みに）広範囲への重心の移動

が可能な体位と考えられるため、その結果、単位時間あたりの軌跡長も長くなったという解釈ができる。2つめの解釈は、姿勢安定性の評価として、単位時間軌跡長という指標が適切でない可能性である。一般に、安静立位姿勢の動揺には非定常性、非線形性がみられるため、単位時間軌跡長といった線形的指標では、「動けば動くほど不安定とみなす」という定義であるため、動揺の変動性に含まれる動的な安定性、ダイナミクスの安定性は検出できない。そのため、動揺の量ではなく質に関する分析を行い、COP変動の時間構造に関する非線形時系列解析も行い、総合的に分析する必要がある。そこで、以下では、非線形時系列解析として DFA を実行した結果について考察する。

第4項 分析4：姿勢の組織化 (DFA)

左右方向 (x、Medio-Lateral 成分)

速度情報に対する姿勢の組織化

左右方向の速度情報に対する姿勢の組織化を分析するため、速度データに対する DFA で FS 指数を求め、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の4要因分散分析を行った結果、体位、位相、周波数の主効果が有意であった。

また、体位×支持面、体位×位相、体位×周波数、支持面×周波数、位相×周波数、体位×支持面×位相、体位×支持面×周波数、体位×位相×周波数の交互作用が有意であった。体位×支持面×周波数、体位×位相×周波数の交互作用について下位検定を行い、総合的に考察した結果、次のことが示唆された。すなわち、座位の逆位相条件や Hard 条件では、周波数の上昇に伴い、姿勢のランダム性が高くなるという結果から、これらの条件では相対的に体肢というローカルなレベルで運動が安定化するため、姿勢というレベルでは制御が弱くなりランダム化するという可能性である。体肢間協調に関する分析結果 (分析2) を振り返ると、逆位相条件では高周波数になるほど同位相条件との結合強度の差が縮まり、また、Hard 条件では持続的協調性が高まるという結果は、この可能性を一部支持するように考えられる。

位置情報に対する姿勢の組織化

左右方向の位置情報に対する姿勢の組織化を分析するため、位置データに対する DFA で FS 指数を求め、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の4要因分散分析を行った結果、体位、位相の主効果が有意であった。

また、体位×支持面の交互作用がみられ、いずれもの体位でも Soft 条件のほうが Hard 条件よりフラクタル性が高いが、座位条件のほうが立位条件より、Hard 条件と Soft 条件の差が大きいため、交互作用が生じたと考えられる。この結果から、Soft 条件では、不安定で支持面からの触覚情報が得にくい場合、身体システムは、先導レベルでの課題の遂行を達成させようと、より適応的で動的に姿勢を安定化させ、その結果としてフラクタル性が高まるのではないかと考えられる。

体位×位相、体位×周波数の交互作用からは、とくに一貫した傾向は確認されなかったが、座位条件でのみ位相パターンや周波数区間の間で有意差がみられたことについては、立位と座位における支持面の実験的操作の方法が、姿勢の組織化への影響という点では充分でなかった可能性がある。この点については、今後の課題としたい。

前後方向 (y、Anterior-Posterior 成分)

速度情報に対する姿勢の組織化

左右方向の速度情報に対する姿勢の組織化を分析するため、速度データに対する DFA で FS 指数を求め、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位、周波数の主効果が有意であった。

また、体位×周波数、体位×支持面×周波数の交互作用からは、とくに一貫した傾向は確認されなかった。

位置情報に対する姿勢の組織化

左右方向の位置情報に対する姿勢の組織化を分析するため、位置データに対する DFA で FS 指数を求め、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位、支持面の主効果が有意であった。

また、体位×支持面、体位×周波数、体位×支持面×周波数、体位×支持面×周波数の交互作用からは、とくに一貫した傾向は確認されなかった。

第5項 分析5：姿勢の多重性 (MWA)

左右方向 (x、Medio-Lateral 成分)

姿勢の多重性を評価するため、COP データの左右方向 (x 成分) に対する MWA で MFS 幅 W を求め、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位の主効果が有意であり、立位条件のほうが座位条件より W が大きく、姿勢の多重時間スケールでの相互作用が増すことが示された。また、支持面の主効果も有意であり、Soft 条件のほうが Hard 条件より W が大きく、姿勢の多重時間スケールでの相互作用が増すことが示された。これらの結果から、不安定な姿勢の条件 (体位については支持基底面が小さく安定性が低い立位条件、支持面については力学的安定性が低く触覚情報も得にくい Soft 条件) のほうが W が大きくなり、姿勢の多重時間スケールでの相互作用が増すという一貫した傾向が示唆された。すなわち、身体システムは、グローバルなレベルで不安定化すると、全身の複数の階層間での相互作用を増すことで、バランスをとろうとし、マルチフラクタル性の指標であり、多重時間スケール間の相互作用の程度を示す W の値が大きくなるのではないかと考えられる。

また、体位×支持面×位相、体位×位相×周波数の交互作用がみられたが、一貫した傾向を見出すことはできず、これらの結果については、現段階では説明できる知見が得られていない。

前後方向 (y、Anterior-Posterior 成分)

姿勢の多重性を評価するため、COP データの前後方向 (y 成分) に対する MWA で MFS 幅 W を求め、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、体位の主効果が有意であり、立位条件のほうが座位条件より W が大きく、姿勢の多重時間スケールでの相互作用が増すことが示された。ただし、体位 × 周波数の交互作用がみられ、立位条件では、周波数区間の間で有意な差はみられなかったが、座位条件では、周波数区間の間で有意差がみられ、周波数の上昇に伴い、 W が大きくなる傾向がみられた。座位条件においては、周波数の上昇に伴い、体肢間協調というローカルなレベルでの安定性が低下するのに伴って、姿勢というグローバルなレベルでは全身の複数の階層間での相互作用を増すことで、バランスをとろうとし、その結果、多重時間スケール間の相互作用 (W) が大きくなるのではないかと考えられる。

第6項 分析 6 : 体肢-姿勢間協調の協調性 (CRQA)

%REC

体肢-姿勢間協調におけるノイズの程度を評価するため、左右の人差し指、COP データの左右方向 (x 成分)、前後方向 (y 成分) の 4 つの組み合わせ (L_x 、 R_x 、 L_y 、 R_y) のデータ間で CRQA を実行し %REC を求め、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2) × 周波数 (5) の 4 要因分散分析を行った結果、次のことが明らかとなった。

左右の人差し指と COP の x 成分との間の協調 (L_x 、 R_x) においては、体位 × 支持面の交互作用について下位検定を行った結果、いずれの体位でも Hard 条件のほうが Soft 条件より体肢-姿勢間協調におけるノイズが小さく安定していたが、座位条件では立位条件より、Hard 条件と Soft 条件との差が大きかった。支持面の主効果より、Hard 条件のほうが Soft 条件より体肢-姿勢間協調におけるノイズが小さく安定していたことを踏まえると、体位によらず、Hard 条件では、支持面が安定し、身体-環境の接触面から触覚情報が得やすいため、体肢-姿勢間協調におけるノイズが小さく、両者の協調が安定すると考えられる。

左右の人差し指と COP の y 成分との間の協調 (L_y 、 R_y) においては、位相の主効果がみられ、同位相条件のほうが逆位相条件より体肢-姿勢間協調におけるノイズが小さく安定していた。この結果については、左右の人差し指を前後方向に同時に動かす同位相パターンのほうが、指の運動による慣性力という点で、逆位相パターンよりも相対的に姿勢への影響が大きく、その影響を身体システム全体で補償するように体肢-姿勢間の協調が強くなるのではないかと考えられる。

MAXL

体肢-姿勢間協調における結合の強度を評価するため、左右の人差し指、COP データの左右方向 (x 成分)、前後方向 (y 成分) の 4 つの組み合わせ (L_x 、 R_x 、 L_y 、 R_y) のデータ間で CRQA を実行し MAXL を求め、体位 (2) × 支持面 (2) × 位相 (2)

×周波数 (5) の4要因分散分析を行った結果、次のことが明らかとなった。

左右の人差し指と COP の x 成分との間の協調 (L_x , R_x) においては、体位、支持面、位相、周波数の主効果が有意であった。また、体位×支持面、体位×位相、体位×支持面×周波数、体位×位相×周波数の交互作用がみられ、下位検定を行い総合的に考察した結果、立位条件では、支持面や位相による差がほとんど確認されなかったのに対し、座位条件では、周波数が高くなるほど体肢-姿勢間の結合が強化され、支持面については Hard 条件のほうが Soft 条件より、位相については逆位相条件のほうが同位相条件より体肢-姿勢間の結合が強かった。座位 Hard 条件のほうが座位 Soft 条件より結合強度が強かったという結果については、Hard 条件のほうが支持面が安定し、身体-環境の接触面から触覚情報が得やすいため、体肢-姿勢間協調における結合が強くなり、両者の協調が安定したと考えられる。座位逆位相条件のほうが座位同位相条件より結合強度が強かったという結果については、逆位相パターンでは左右の指を交互に動かすため、体肢レベルでの左右の動きと姿勢レベルの左右の動揺が協調し、左右の指を同時に前後方向へ動かす同位相パターンより相対的に結合強度が強くなったのではないかと考えられる。しかし、後述する COP の前後方向の動揺と左右の手の運動の協調について、この仮説と反対の結果が得られたわけではないので、これらの点については、今後さらなる検討が必要である。

左右の人差し指と COP の y 成分との間の協調 (L_y , R_y) においては、体位、支持面、位相、周波数の主効果が有意であった。

体位×周波数の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件でも立位条件でも、周波数の上昇に伴い、MAXL が長くなる傾向があるが、上昇の仕方に違いがみられた。周波数の主効果より、周波数の上昇に伴い体肢-姿勢間協調の結合が強くなることを踏まえると、体位によらず周波数の上昇に伴い、体肢レベルでの課題の遂行が困難になると、より全身で課題に参加し、課題を達成しようとするため、結合強度が強くなるのではないかと考えられる。

また、体位×支持面×位相の交互作用について下位検定を行った結果、立位条件の同位相条件と逆位相条件でのみ支持面の条件間で有意差がみられた。ただし、立位同位相条件と立位逆位相条件ではいずれも Hard 条件のほうが Soft 条件より体肢-姿勢間協調の結合強度が強いという結果であった。立位 Hard 条件のほうが立位 Soft 条件より結合強度が強かったという結果については、Hard 条件のほうが支持面が安定し、身体-環境の接触面から触覚情報が得やすいため、体肢-姿勢間協調における結合が強くなり、両者の協調が安定したと考えられる。

AVGL

体肢-姿勢間協調における持続的協調性を評価するため、左右の人差し指、COP データの左右方向 (x 成分)、前後方向 (y 成分) の4つの組み合わせ (L_x , R_x , L_y , R_y) のデータ間で CRQA を実行し MAXL を求め、体位 (2) ×支持面 (2) ×位相 (2)

×周波数 (5) の4要因分散分析を行った結果、次のことが明らかとなった。

左右の人差し指と COP の x 成分との間の協調 (L_x , R_x) においては、体位、支持面、位相、周波数の主効果が有意であった。

位相の主効果より、逆位相条件のほうが同位相条件より持続的協調性が高いことが分かった。支持面×位相の交互作用について下位検定を行った結果、いずれの支持面においても逆位相条件のほうが同位相条件より持続的協調性が高かったが、Hard 条件のほうが Soft 条件より、逆位相条件と同位相条件の差が大きかったため、交互作用が生じたと考えられる。

また、周波数の主効果について下位検定を行った結果、周波数の上昇に伴い、持続的協調性が高いことが分かった。体位×周波数の交互作用について下位検定を行った結果、いずれの支持面においても周波数の上昇に伴い、持続的協調性が高くなる傾向があるが、上昇の仕方に違いがみられたため、交互作用が生じたと考えられる。

また、体位×支持面、体位×位相の交互作用から、立位条件では、支持面や位相による有意差は確認されなかったが、座位条件では、支持面については Hard 条件のほうが Soft 条件より、位相については逆位相条件のほうが同位相条件より持続的協調性が高かった。座位 Hard 条件のほうが座位 Soft 条件より結合強度が強かったという結果については、Hard 条件のほうが支持面が安定し、身体・環境の接触面から触覚情報が得やすいため、体肢・姿勢間協調が持続的に維持され、両者の協調が安定したと考えられる。座位逆位相条件のほうが座位同位相条件より結合強度が強かったという結果については、MAXL の結果と同様に、逆位相パターンでは左右の指を交互に動かすため、体肢レベルでの左右の動きと姿勢レベルの左右の動揺が協調し、左右の指を同時に前後方向へ動かす同位相パターンより相対的に結合強度が強くなったのではないかと考えられる。

左右の人差し指と COP の y 成分との間の協調 (L_y , R_y) においては、体位、位相、周波数の主効果が有意であった。

位相の主効果より、同位相条件のほうが逆位相条件より持続的協調性が高いことが分かった。この結果については、%REC の結果と同様に、左右の人差し指を前後方向に同時に動かす同位相パターンのほうが、指の運動による慣性力という点で、逆位相パターンよりも相対的に姿勢への影響が大きく、その影響を身体システム全体で補償するように体肢・姿勢間の協調が持続的に維持されるのではないかと考えられる。

また、体位×支持面の交互作用について下位検定を行った結果、座位条件では、Hard 条件と Soft 条件の間に有意差がみられなかったのに対し、立位条件では、Hard 条件のほうが Soft 条件より持続的協調性が高かった。この結果については、左右の手と COP の左右方向の協調に関する結果と同様に、Hard 条件のほうが支持面が安定し、身体・環境の接触面から触覚情報が得やすいため、体肢・姿勢間協調が持続的に維持され、両者の協調が安定したと考えられる。

第7項 総合考察

以上、体肢間協調（分析1・分析2）、姿勢（分析3～分析5）、体肢-姿勢間協調（分析6）について考察した。

体肢間協調の分析の結果、運動の安定性（SD ϕ ）という観点では、支持面の主効果について有意傾向がみられ、Hard条件のほうがSoft条件より運動の安定性が高い傾向が示された。この結果は、仮説通り、身体と環境の接触面である支持面の環境特性（力学的安定性、触覚情報の利用可能性）が体肢間協調の安定性に影響することを示している。この結果については、Hard条件のほうが、支持面が力学的に安定するだけでなく、支持面から自己身体と環境との関係を触覚情報より得やすく、すなわち、環境への定位がしやすいため、グローバルなレベルでの姿勢が安定し、その姿勢に埋め込まれたローカルなレベルの体肢間協調も安定したと考えられる。

さらに、体位×位相の交互作用の下位検定の結果、立位逆位相条件の安定性の低下により、座位と立位では体肢間協調のダイナミクスが異なることが明らかとなった。この結果は、支持基底面が大きく姿勢というグローバルなレベルでの安定性が高い座位条件のほうが、体肢間協調というローカルなレベルでの安定性も高くなるということを示している。また、グローバルなレベルで不安定化する立位条件では、逆位相が同位相より安定性が低くなるという結果は、潜在的には同位相のほうが逆位相より安定するというHKBモデルの記述とも一致する。よって、モデルの観点から考えると、体位というパラメータは同位相と逆位相の相対的な安定性を逆転させるように作用するというより、潜在的には大局的安定解としての同位相パターンと局所的安定解としての逆位相パターンがあり、体位といったグローバルなレベルでのパラメータの変化が、2つの位相パターンの相対的な安定性の関係（ダイナミクス）を変化させると推察される。今後、これらの予測についても詳細に検討することで、本研究の結果をモデルへ反映させることができるのではないかと期待される。

また、分析2でCRQAを実行した結果、姿勢要因の影響としては、持続的協調性（AVGL）について、支持面の主効果について有意傾向がみられ、Hard条件のほうがSoft条件より持続的協調性が高い傾向が示された。

これら体肢間協調に関する分析1、分析2の結果より、体位や支持面といった姿勢というグローバルなレベルの安定性を実験的に操作すると、体肢間協調というローカルなレベルでの運動の安定性や協調性が影響を受けることが確認された。とくに、支持面の特性の操作は、座位条件では実験参加者の大腿部、立位条件では足底部に対する操作であるため、一見、当該実験で課題の遂行を求められる指先とは離れており、影響がないのではないかと予測された。しかしながら、本研究の基本仮説である身体というシステムが部分（体肢）-全体（姿勢）の入れ子構造を想定するならば、物理的に離れた部位でも相互に影響しうることを踏まえると、指先の課題に対しても全身で協調して参与し、グローバルなレベルの安定性がローカルなレベルの安定性に影響したと解釈

できる。

以上の体肢間協調の分析結果から考察されたグローバルなレベルでの姿勢の安定性、及び、体肢-姿勢間の協調に関する分析の結果、次のことが明らかとなった。まず、姿勢の安定性については、単位時間軌跡長 L の分析の結果、体位や支持面といった姿勢要因を操作したからといって必ずしも不安定と予測された条件（立位条件、Soft 条件）で姿勢が不安定になるとは限らなかった。また、DFA により FS 指数という観点から安定性を評価した結果、総合的に考察すると、むしろ立位条件や Soft 条件といった不安定な条件ほどフラクタル性が高まり、身体システム全体として適応的な状態となり動的に安定するよう組織化される傾向が示唆された。これらの結果については、体位や支持面といった姿勢要因を操作し、グローバルなレベルで姿勢の安定性を低下させようとした場合、身体システムはむしろその不安定性を補償し、体肢レベルでの課題の達成に向けて適応するように組織化されるのではないかと推察された。このような身体システムの頑健性については、第6章でさらに考察したい。

また、身体システムを構成する複数の時間スケール間の相互作用を評価するために MWA によりマルチフラクタルスペクトル幅を求めて分析した結果、やはり不安定な姿勢の条件（体位については支持基底面が小さく安定性が低い立位条件、支持面については力学的安定性が低く触覚情報も得にくい Soft 条件）のほうが、姿勢の多重時間スケールでの相互作用が増すという傾向が示唆された。すなわち、身体システムは、グローバルなレベルで不安定化すると、全身の複数の階層間での相互作用を増すことで、バランスをとろうとし、その結果、マルチフラクタル性の指標であり、多重時間スケール間の相互作用の程度を示す W の値が大きくなるのではないかと考えられる。

また、体肢-姿勢間協調の分析の結果については、体位、支持面の主効果がみられ、安定した姿勢条件（座位条件、Hard 条件）のほうが、体肢-姿勢間の協調性は高まるという傾向が示された。すなわち、グローバルなレベルでの姿勢要因の操作は、体肢-姿勢間の協調のレベルに影響し、先に考察した体肢間協調というローカルなレベルでのダイナミクスに影響したと考えられる。この結果は、実験3の仮説から予測された結果と一致する。

また、実験2と同様に、指先の協調のパターン（位相パターン）によって、体肢-姿勢間の協調のパターンが異なり、姿勢の動揺方向と体肢間協調の位相パターンとが対応するかたちで、全身が課題特定の組織化する可能性が示唆された。ただし、これら新たに浮上した要因については、本研究のデータからだけではすべてを説明することができず、今後、これらの要因を検証していく必要がある。

総じて、実験3の結果として、体位や支持面といった姿勢要因を実験的に操作し、身体システムのグローバルなレベルでの安定性を変化させた結果、ローカルなレベルでの体肢間協調、及び、グローバルなレベルとローカルなレベルの協調である体肢-姿勢間協調にも影響が及ぼされることが示された。そのため、実験3の仮説、すなわち、

姿勢という全体に埋め込まれた体肢という部分のダイナミクスは、姿勢レベルの安定性の操作の影響を受けることが確認できたと結論される。この事実は、私たちの日常的な行為場面を振り返れば、キーボードをタイプする、ピアノを演奏する、あるいは、文字を書く、といった指先を使う行為において、姿勢が安定し、環境に定位していることが重要であるという経験知と一致する結果である。そのため、これら経験的な知見について、DSA という理論的・実験的な枠組みでの検証を行った本研究の成果は、体肢のパフォーマンスに姿勢の要因が影響することを改めて示した点で、両者の関係を重視するリハビリテーションの実践応用に対しても、1つのエビデンスを提供しうるものであり意義があるものだと考えられる。

第6章 総括的議論

第1節 本研究の成果の要約

本研究は、身体-環境システムという観点から体肢間協調ダイナミクスを実験的に検証し、両手の体肢間協調に、環境と身体（体肢）の接触と、環境への定位としての姿勢が及ぼす影響を明らかにすることを目的とし実施された。その際、身体を階層的なシステムとみなした。すなわち、環境と接触する体肢の先端である指先から体幹、そして、指先の皮膚から筋骨格系、中枢神経系など様々なスケールにまたがり要素間、及び、階層間で複雑に相互作用するシステムである。そして、身体運動とは、多数の階層をもち、それぞれのレベルで膨大な自由度をもつ身体システムが、それを取り囲む環境や状況、文脈に応じて、それらと相互作用しながら自己組織的に生成されるプロセスであるとみなした。こうした身体や身体運動の描像は、20世紀の知覚や運動に関する先駆的な研究によって提起され、20世紀後半に確立された複雑系科学（自己組織化理論）の知見と結びつき発展する中で、システム論的アプローチとして身体運動研究の一分野を形成するに至っている。

このようなシステム論的アプローチの流れに位置づけられる本研究では、次のような前提を立て、身体運動研究における体肢の運動と姿勢の相互作用関係を調べた。すなわち、身体システムは環境に埋め込まれていること、身体システムが環境に定位するために姿勢が重要な役割を果たしていること、身体システムの部分システムとしての体肢の運動は姿勢に依存し切り離せないこと、である。これらの前提に基づくと、体肢の運動を、それを部分とする姿勢と分離して捉えることはできず、同時に、体肢-姿勢からなる身体システムを環境から分離して捉えることもできない。

以上の問題意識から、本研究では、DSAの観点から、体肢間協調運動を先導レベルでの実験課題として設定し、体肢の運動とそれを支える背景レベルとしての姿勢の相互作用について検証した。以下に、本研究の仮説、検証方法（実験）、主な結果を要約する。

実験1（第3章）

仮説1：身体と環境との接触を操作することで体肢の運動の安定性が変化する。具体的には、身体（指先）が環境に接触することで体肢間協調運動は安定する、と仮定した。実験1：実験課題として体肢の運動の特定の点（指の屈曲のピーク）で指先が環境に接触するタッピング課題を採用した。実験1の結果、指先と環境の接触のない指振り課題を実施した先行研究と異なり、不安定とされている逆位相パターンの運動が安定化し、仮説1が支持された。しかし、実験1では、指先が環境と接触しない条件との直接的な比較をしていない点と、指先の環境への接触の何が体肢間協調の安定化をもたらすのか明らかでない点が問題として指摘された。

実験 2 (第 4 章)

仮説 2: 指先が接触する環境特性を実験的に操作することにより体肢間協調の安定性が変化する、という仮説を立てた。具体的には、体肢間協調の安定化をもたらす要因は、指先が環境に接触することで得られる触覚情報である、と仮定した。

実験 2: 指先が接触する環境特性 (タップ面) を、**Hard** 条件 (指先で力を加えることで物理的に身体を支持できるほどの反作用力が得られる条件)、**Soft** 条件 (指先で力を加えても物理的には身体を支持できるほどの反作用力は得られず触覚情報のみが得られる条件)、**No contact** 条件 (指先で接触するものがなく力も触覚情報も得られない条件) の 3 水準で検討した。実験 2 の結果、指先で触覚情報が得られれば体肢間協調が安定化することが示され、仮説 2 が支持された。また、実験 2 では、体肢というローカルなレベルの実験的操作により姿勢というグローバルなレベルが影響を受けることも確認された。しかし、体肢の運動が不安定化すると姿勢も不安定化するといった単純な影響関係はみられなかった。では、反対に、姿勢というグローバルなレベルを実験的に操作した場合には、体肢というローカルなレベルが影響を受けるのであろうか、という問題が残された。

実験 3 (第 5 章)

仮説 3: そこで、姿勢の安定性を操作することによって体肢の運動の安定性が変化する、という仮説を立てた。具体的には、姿勢の安定性を操作し姿勢が不安定化すると体肢間協調の安定性も低下する、と仮定した。

実験 3: 姿勢の安定性に関わる要因として、体位と支持面 (身体と環境の接触面) を操作した。体位については、座位と立位の 2 水準を検討し、立位のほうが、支持基底面が小さいため姿勢は不安定だ、と仮定した。支持面については、表面が硬く力学的にも安定し、接触面から自己身体と環境についての触覚情報が得やすい **Hard** 条件と、軟らかいクッションを用いて力学的に不安定で、かつ接触面からの触覚情報が得にくい **Soft** 条件の 2 水準を検討した。実験 3 の結果、支持面が不安定な **Soft** 条件のほうが体肢間協調の安定性が低下する傾向が示された。また、体位により体肢間協調のダイナミクスが異なり、不安定な立位条件では体肢間協調の逆位相パターンの安定性が低くなることが示された。これらの結果は、仮説 3 から予測した結果と部分的に一致するため、仮説 3 も支持された。

また、以上の仮説検証の他、本研究では予測していなかった新たな発見として次の 2 つが得られた。1 つめの発見として、実験 3 で姿勢要因の操作が姿勢の安定性に及ぼす影響について調べた結果、姿勢の安定性が低下すると予想されていた立位条件や **Soft** 条件のほうが、姿勢が動的に安定化する傾向が示された。この結果は、実験 3 を計画する段階では想定しておらず、姿勢というグローバルなレベルで身体システムが不安定化した場合に、それを補償し、体肢の先導レベルでの課題の達成を支えるよう姿勢が、より柔軟で適応的な状態へと組織化した結果の現れではないかと解釈された。また、

2 つめの発見として、実験 2 と実験 3 で体肢-姿勢間協調について分析した結果、体肢間の協調パターン（位相パターン）により体肢-姿勢間の協調パターンが異なることが示唆された。これらの結果に共通する傾向は、体肢の位相パターンが同位相の場合、左右の指と姿勢の前後方向の協調が強まり、体肢の位相パターンが逆位相の場合、左右の指と姿勢の左右方向の協調が強まるという傾向である。このことは、体肢レベルの課題に対し、身体システムが課題特定の組織化する可能性を示唆するものであり、今後、さらなる検討により、両者の関係が明らかにされることが期待される。

また、実験 2 と実験 3 では、いずれも身体-環境の接触面（タップ面と支持面）の力学的特性を操作していると言える。すなわち、Hard 条件は力学的安定性が高く、その環境特性は剛体とみなされるが、Soft 条件では力学的安定性は低く、その環境特性は弾性体とみなされる。この環境特性を剛体/弾性体（Hard/Soft）の 2 つの水準で比較した場合の、タップ面と支持面それぞれの環境特性が、体肢間協調、姿勢、体肢-姿勢間協調に及ぼす影響の仕方には非対称性がみられた（図 6-2）。すなわち、タップ面の環境特性（体肢というローカルなレベル）の操作は、姿勢というグローバルなレベルに対し、体肢の運動の安定性が低下すると姿勢の安定性も低下する、といった単純な影響関係はみられなかった。他方、姿勢支持面の環境特性（姿勢というグローバルなレベル）の操作は、体肢というローカルなレベルに対し、不安定と仮定される条件では、体肢の運動の安定性・ダイナミクスが低下する、といった影響関係が傾向として確認された。このような影響関係の非対称性は、両レベルの階層性（入れ子構造）に由来するのではないかと考えられるが、本研究の実験結果からだけでは結論することができない。体肢と姿勢の関係も様々であり、本研究で検討した状況は、その一例に過ぎないからである。今後、既存の体肢間協調モデルに姿勢などの要因を反映させていくためにも、さらなる検討によって、様々な実験条件で両者の関係を解明していくことが求められる。

第2節 結論

本研究の実験 1、実験 2、実験 3 から身体-環境システムにおける両手協調ダイナミクスについて、以下 1~4 が明らかになり、本研究の仮説が支持された。

1. 指先の触覚情報が、体肢間協調運動を安定化させる（図 6-1、橙の矢印）。
2. 指先の条件（接触する環境特性、体肢間の協調パターン、運動の周波数）によって、姿勢の安定性や組織化の方略が変化するが、単純な影響関係はみられない（図 6-2）。
3. 姿勢の支持面の不安定化が、体肢間協調運動を不安定化させる（図 6-1、青の矢印）。
4. 体位によって、体肢間協調のダイナミクスが変化する（図 6-1、青の矢印）。

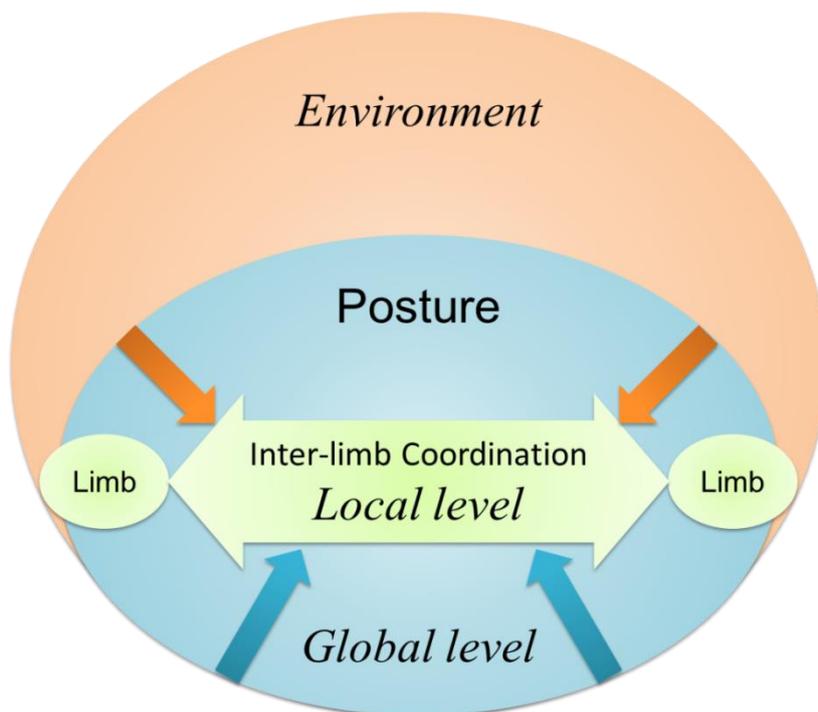


図 6-1 : 環境-身体 (全体 : 姿勢) -身体 (部分 : 体肢) の入れ子と影響関係

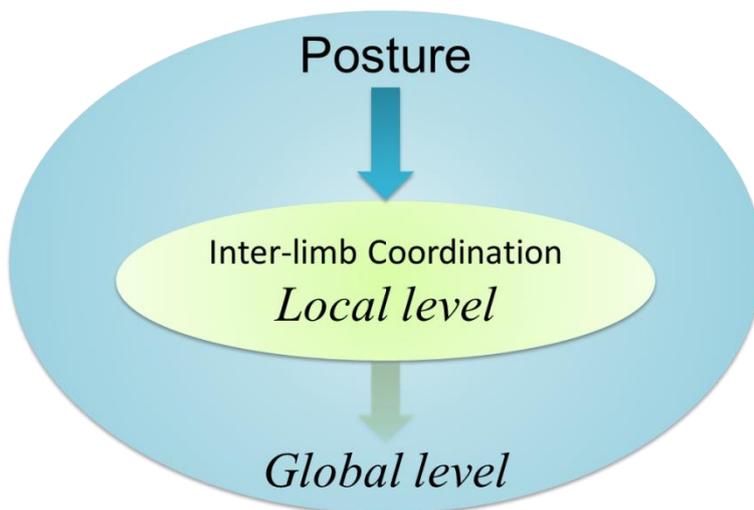


図 6-2 : 体肢～姿勢の影響関係の非対称性

体肢のレベル (ローカル) から姿勢のレベル (グローバル) への影響関係は、体肢の運動の安定性が低下すると姿勢の安定性も低下する、といった単純な関係ではない。

第6章

また、実験2、実験3から次の5、6が明らかになり、新しい発見が得られた。

5. 体肢間の協調パターンによって、体肢-姿勢間の協調パターンが変化する。
6. 不安定と考えられる姿勢（立位、不安定な支持面）ほど、姿勢は動的に安定化し、柔軟に組織化する。

以上より、身体-環境システムの両手協調ダイナミクスについて、以下の一般的結論を導くことができる。

- 体肢間協調のダイナミクスは、運動が遂行される環境との接触によって変化する。
- 姿勢というグローバルなレベルでのダイナミクスは、その部分システムである体肢間協調というローカルなレベルのダイナミクスに影響を与える。
- 身体-環境の接触面の環境特性を剛体/弾性体(Hard/Soft)の2水準で比較した場合、指先というローカルなレベルの環境特性の操作と、姿勢支持面というグローバルなレベルの環境特性の操作では、身体-環境システムへの影響の仕方が異なり、両者の影響関係には非対称性がみられる。その影響関係の非対称性は、身体-環境システムが入れ子構造からなることに由来すると考えられる。

また、これら本研究の成果は、本研究の前提であった次の事実を再確認させるものであった。

- ・ 身体運動はそれが遂行される環境や状況、文脈に応じて柔軟に自己組織化するシステムの振る舞いである。よって、身体運動を環境や状況、文脈と切り離して捉えることはできない。
- ・ 身体-環境システムは、互いに相互作用する複数の異なる時空間スケールが入れ子をなして形成される階層構造をもつ。よって、体肢の運動といった部分システムの振る舞いを、それを部分とするシステム全体（姿勢）と切り離して捉えることはできない。

第3節 位置づけと意義

本研究は、Gibson や Bernstein といった知覚や運動に関する先駆的な研究において、理論的には指摘されていたものの、その後、実験的には十分に検討されていなかった問題にアプローチした。つまり、本研究は、身体と環境の相互作用、身体システムにおける体肢の運動と姿勢の相互作用について、実験的に検討を行う基礎研究として位置づけられる。また、本研究の特色は、体肢の運動と姿勢の相互作用関係に実験的にアプローチする際、両者を同時に計測し、両者の関係を非線形力学や情報理論に基づく

情報学的手法を用いて解明した点にある。そして、このような方法論を採用することで、両者の関係にアプローチできる可能性を提示した点に、本研究の学術的意義がある。

本研究の新規性、及び、運動研究分野への貢献は、次のようにまとめられる。まず、実験1、実験2の結果、タッピング課題のように指先が環境へと接触し、指先で触覚情報が得られる場合、臨界周波数を超えても同位相パターンと逆位相パターンの間に安定性の差がみられなかった。この結果は、既存の体肢間協調のモデルに新たな変数として触覚情報（または、身体が接触する環境特性）を考慮することを提起している。また、実験3では、支持面の安定性や体位といった姿勢要因が、体肢間協調の安定性やダイナミクスに変化することが示された。この結果も既存のモデルに新たな変数として姿勢の要因を考慮する必要性を示している。本研究で得られたこれらの結果は、既存の体肢間協調モデルを、体肢というローカルなレベルだけでなく、それを部分とする身体システム全体（姿勢）や、身体システムが埋め込まれている環境を含めたグローバルなレベルから捉え直す必要性を示している点で重要である。今後、さらなる実験的・理論的検討によって、既存のモデルが拡張され、理論研究と実験的手法を用いた基礎研究が蓄積されていくことが期待される。また、本研究で新たに浮上したトピックについては、身体運動研究分野の新たな研究領域を開拓できる可能性を秘めている点で、当該分野への貢献が認められる。

また、本研究の実践分野への貢献として、Gibson や Bernstein の理論的知見に基づき、身体の全体性に着目した支援・介入を実践してきたリハビリテーション分野に対して、基礎研究による1つのエビデンスを示したことが挙げられる。本研究の成果により、身体と環境の相互作用、及び、身体システムにおける体肢の運動と姿勢の相互作用に関する理論と実践の溝を少しでも埋めることができたのではないかと考える。

さらに、本研究で検討した身体運動の側面は、階層的なシステムにおける部分（体肢）システムと、それを部分とするシステム全体（姿勢）の動的な相互作用関係であると言える。このような階層間の動的相互作用は、近年、複雑系科学分野でも活発に議論されている問題でもある(Gunji & Kamiura, 2004; Jen, 2003)。生命システムなどの柔軟で適応的なシステムの特徴として、階層間の動的相互作用をもつことが指摘されている。本研究でも、身体システムにおける階層間相互作用を定量化するため、マルチフラクタル解析を行った。その結果、部分システムのダイナミクスが不安定化する状況や、システム全体が不安定化する状況において、多重時間スケール間の相互作用が増すことが示唆された。そして、このような階層間相互作用には、全身にまたがって形成される触覚システムのネットワークの働きが関与しているのではないかと考察された。これらの知見を総合的に考察すると、柔軟で頑健なシステムの成立には、MFT 構造のような柔軟な組織が必要であることが示唆される。すなわち、動物の身体構造を剛体としてでなく、剛体を張力で引っ張り合う弾性体も含めて捉えようとする MFT 仮説では、システムが、環境や自己の変化（ノイズ）が生じた際、その変化を部分だけでなく全体

へと速やかに分散させ、ノイズが与えられた部分を他の部分が補償するようなシステムの柔軟な組織化の側面を捉えることができるからである (Latash, 2008; Riley, Shockley, & Van Orden, 2012; Turvey, 2007; Wallot & Van Orden, 2012)。

また、実験1は、当初、個体間実験との比較として計画された (Kodama et al., 2012; 2015)。個体間実験でも、2本指条件と4本指条件を検討した。その結果、個体間4本指条件では、それまで安定とされてきた同位相パターンが、高周波数においては逆位相パターンと同程度に不安定化することが示された。この結果については、個体内システムを2つ入れ子化した個体間システムにおいて、複雑な階層間の相互作用が生じ、安定パターンの不安定化に関与したのではないかと考察された。すなわち、従来の体肢間協調モデルにおいては、個体内システムと個体間システムは、同じ自己組織化の原理に従うとされてきたが (Richardson, Lopresti- Goodman, Mancini, Kay, & Schmidt, 2008; Schmidt, Bienvenu, Fitzpatrick, & Amazeen, 1998)、振動子 (体肢の数) が変数として2つから4つに増えた場合、入れ子化したシステムの階層間相互作用の様式も変化し、ダイナミクスが安定化/不安定化の影響を受ける可能性がある、ということである。近年、体肢間協調の研究領域では、このように個体間協調の最中における個体内協調を調べ、2つの階層間の影響関係を検討する研究もみられる (Black, Riley, & McCord, 2007; Coey, Varlet, Schmidt, & Richardson, 2011; Ramenzoni, Davis, Riley, Shockley, & Baker, 2011; Ramenzoni, Riley, Shockley, & Baker, 2012; Varlet, Marin, Lagarde, & Bardy, 2011)。今後、さらなる実験的・理論的研究により、入れ子化したシステムの性質についても理解が深まっていくと期待される。

複雑系科学分野では、従来、“complexity-from-simplicity”のテーマのもと、様々な複雑な現象を、単純な規則によって説明する、というアプローチの研究が進められてきた。一方、Bernsteinが指摘した自由度の問題のように、身体運動現象で観察されるのは、むしろ“simplicity-from-complexity”といった現象の側面である (Riley, Shockley, & Van Orden, 2012)。これら2つのアプローチは、複雑なシステムを理解する際の相補的な関係とみなされる (Riley et al., 2012)。よって、この身体運動現象特有の側面を理論的・実験的に明らかにしていくことは、認知科学分野全体に対する貢献や、複雑系科学分野に対しても有益な知見の提供につながると期待されている (Riley et al., 2012)。また、昨今、フラクタル解析をはじめとする非線形解析手法により求まる指標が、システムの健康状態と関連づけられており (Goldberger et al., 2002; Lipsitz, 1992)、医療やリハビリテーションの分野で障害や疾患の評価に応用されている。そのため、柔軟で適応的な身体システムの理解は、医療やリハビリテーションといった応用分野の発展にも貢献できると見込まれる。

第4節 今後の課題

本研究では、様々な身体部位のなかでも、まず初めに手の指に着目し、指・姿勢の関係に実験的にアプローチした。その結果、両者の不可分な影響関係の一端を示すことができた。一見、身体全身（全体）への影響は小さいと考えられる手の指という部位の運動においても、その影響関係を示したことで、今後、他の身体部位の影響を調べることを動機づけ、さらなる実験研究の展開可能性を示したと言える。しかし、同時に、本研究では、身体・環境、体肢・姿勢の関係に関与して新たに検討が必要な事項もが浮上した。以下、本研究の問題点と今後の課題について述べる。

まず、1つめの問題点は、実験計画上の問題であり、とくに実験3では、複数の要因が交絡し、検討した要因ひとつひとつの効果が分かりにくかった点が挙げられる。そのため、今後、要因を限定し厳密な統制を行った上での追加実験が求められる。そうすることで、身体・環境、体肢・姿勢の相互作用関係に関わる個々の要因についての理解が深まると考えられる。2つめの問題点は、各実験のサンプル数である。今後、サンプル数を増やすことで、より確かなエビデンスが得られると考えられる。

また、今後の課題として、以下の4つが挙げられる。1つめは実験のデザインについてであり、実験2の展開として、指先が環境に接触する際に加えられる力という変数を連続的に操作し検討した実験の計画が考えられる。実験2では、体肢間の協調は姿勢を支持できるほどの力が指先で得られない条件（Soft条件）でも安定化することが示されたが、Soft条件でも少なからず力を加えることはできたと考えられる。今回はHard条件とSoft条件の2水準しか検討していないが、今後、より細かく環境の特性を変化させていくことで、どれくらいの力があれば体肢間協調や姿勢に影響が出てくるのかを明らかにし、モデル化へと展開することが求められる。また、指先で実際に加わる力を計測し、運動や姿勢の動揺との関係を調べることも重要であろう。2つめの課題は、実験課題の選定についてである。今回は体肢については指を選び、運動課題は指の屈曲伸展（タッピング）運動を対象とした。今後、他の身体部位を用いた課題での体肢・姿勢の関係や、同じ指でも運動の方向などを変数として操作することで、様々な状況における体肢・姿勢の関係について理解が得られるであろう。3つめの課題は、分析方法についてである。今回は体肢・姿勢の協調を分析するにあたり、指先の運動とCOPのデータ間の関係を分析した。しかし、指先から身体の中核、体幹に至る過程の部位（腕、肩、頭部など）がどのように両者の協調に参加していたのか、あるいは参加していなかったのは明らかでない。よって、それらについても分析を加えることで、身体システムの要素間の協調について理解が深まると考えられる。同時に、分析手法として本研究で実行した以外の手法についても検討をする必要がある。最後に、本研究では基礎研究として行われてきた既存の実験パラダイムの中で実験を計画した。そのため、研究対象に影響を及ぼす要因を、実験的に抽出・操作するという手続きを踏んだ。このような実験的な統制がなされる実験室的研究では、複雑な「生きている」システムのありのままの姿を

第6章

捉えることができない可能性がある。一方、実験的手法によってしか明らかにできない現象の側面もある。本研究も、日常的な問題意識からスタートし、ピアノや書字、タイピングといった手先・指先を使った行為を支える姿勢や環境の影響を調べるに至った。その意味で、日常的な行為の側面を実験室的な研究のフレームに落とし込んで検証した点に、本研究の特色がある。今後は、各々の方法論上の特性を熟慮し、実験室的研究とともに、より日常的な課題についてもアプローチしていくことで、身体・環境システムへの理解が深まると考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、御指導を頂きました指導教員の総合研究大学院大学複合科学研究科情報学専攻の稲邑哲也准教授に深く感謝致します。また、学内の中間発表や学位審査で審査委員を下された先生方、同専攻の佐藤健教授、山田誠二教授、坊農真弓准教授、早稲田大学人間科学学術院の三嶋博之准教授には、いつも大変貴重なご助言、ご指摘を頂きました。深く感謝申し上げます。また、本研究で実施した実験には、多くの方々にご参加して頂きました。実験にご参加頂いた皆様には、快く実験にご協力頂きましたこと、大変感謝しております。そして、本実験を実施する前の予備実験へのご参加や研究内容に対するご助言など、いつも身近で支えて頂いたポスドク、大学院生の皆様にも、感謝の意を表します。有り難うございました。

参考文献

- Adams, J. A. (1971). A Closed-Loop Theory of Motor Learning. *Journal of Motor Behavior*, 3(2), 111–150.
- Bardy, B. G. (2004). Postural coordination dynamics in standing humans. In V. K. Jirsa & S. Kelso (Eds.), *Coordination dynamics: Issues and trends* (pp. 103–121). Springer.
- Beek, P. J., Peper, C. E., & Daffertshofer, A. (2002). Modeling rhythmic interlimb coordination: beyond the Haken-Kelso-Bunz model. *Brain and Cognition*, 48(1), 149–65.
- Beek, P. J., Rikkert, W. E. I., & van Wieringen, P. C. W. (1996). Limit cycle properties of rhythmic forearm movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22(5), 1077–1093.
- Bernstein, N. A. (1967). *The Co-ordination and regulation of movements*. Pergamon Press Ltd.
- Bernstein, N. A. (1996). *Dexterity and Its Development*. Psychology Press.
- Black, D. P., Riley, M. a, & McCord, C. K. (2007). Synergies in intra- and interpersonal interlimb rhythmic coordination. *Motor Control*, 11(4), 348–373.
- Bootsma, R. J., van Wieringen, P. C. W., Wieringen, V., Brinker, D., Timing, O., Tyldesley, A., ... Gon, D. Van Der. (1990). Timing an attacking forehand drive in table tennis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(1), 21–29.
- Buchanan, J. J., & Kelso, J. A. S. (1993). Posturally induced transitions in rhythmic multijoint limb movements. *Experimental Brain Research*, 94(1).
- Byblow, W. D., Carson, R. G., & Goodman, D. (1994). Expressions of asymmetries and anchoring in bimanual coordination. *Human Movement Science*, 13(1), 3–28.
- Carello, C. (2005). 筋感覚の物理学と心理学—Claudia Carello教授講演 (特集 幽霊も機械もいない Michael Turvey教授・Claudia Carello教授 公開講演会記録). *生態心理学研究*, 2(1), 57–67.
- Carello, C., & Turvey, M. T. (2004). Physics and Psychology of the Muscle Sense. *Current Directions in Psychological Science*, 13(1), 25–28.
- Clark, A. (1997). The Dynamical Challenge. *Cognitive Science*, 21(4), 461–481.
- Coco, M. I., & Dale, R. (2014). Cross-recurrence quantification analysis of categorical and continuous time series: an R package. *Frontiers in Psychology*, 5, 510.
- Coey, C., Varlet, M., Schmidt, R. C., & Richardson, M. J. (2011). Effects of movement stability and congruency on the emergence of spontaneous interpersonal coordination. *Experimental Brain Research*, 211(3-4), 483–493.
- deGuzman, G. C., & Kelso, J. A. S. (1991). Multifrequency behavioral patterns and the phase attractive circle map. *Biological Cybernetics*, 64(6), 485–495.
- Delignières, 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.
- Delignières, D., Torre, K., & Bernard, P.-L. (2011). Transition from persistent to anti-persistent correlations in postural sway indicates velocity-based control. *PLoS Computational Biology*, 7(2), e1001089.
- Dennett, D. C. (1992). *Consciousness Explained*. Back Bay Books.
- Descartes, R. (1905). *Discours de la méthode: 1637*. G. Gröber (Ed.). Heitz. (デカルト, D. 谷川 多佳子(翻訳) (1997). 方法序説 角川学芸出版)
- Eckmann, J.-P., Kamphorst, S. O., & Ruelle, D. (1987). Recurrence Plots of Dynamical Systems. *Europhysics Letters*, 4(9), 973–977.
- Fink, P. W., Jirsa, V. K., Foo, P., & Kelso, J. A. S. (2000). Local and global stabilization of coordination by sensory information. *Experimental Brain Research*, 134(1), 9–20.
- Fodor, J. A., & Pylyshyn, Z. W. (1981). How direct is visual perception?: Some reflections on Gibson’s “ecological approach.” *Cognition*, 9(2), 139–196.
- Fonseca, S. T., & Turvey, M. T. (2006). Biotensegrity perceptual hypothesis: A medium of haptic perception. *Paper Presented at the North America Meeting of the International Society for Ecological Psychology*.
- Fraser, A. M., & Swinney, H. L. (1986). Independent coordinates for strange attractors from mutual information. *Physical Review A*, 33(2), 1134–1140.
- Fuller, R. B., & Applewhite, E. J. (1975). *Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking*. Macmillan.
- Gibson, J. J. (1962). Observations on active touch. *Psychological Review*, 69(6), 477–491.
- Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Praeger.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception: Classic Edition (Vol. 20)*. Psychology Press.
- Gibson, J. J., Reed, E. (Edward S. ., & Jones, R. (1982). *Reasons for realism: selected essays of James J. Gibson*. Lawrence Erlbaum.
- Goldberger, A. L., Amaral, L. A. N., 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(Supplement 1), 2466–2472.
- Gunji, Y.-P., & Kamiura, M. (2004). Observational heterarchy enhancing active coupling. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 198(1-2), 74–105.
- Haken, H. (1978). *Synergetics: an introduction: nonequilibrium phase transitions and self-organization in physics, chemistry and biology*. Springer-Verlag.
- Haken, H. (1988). *Information and Self-Organization: A Macroscopic Approach to Complex Systems*. Springer Science & Business Media.

- Haken, H., Kelso, J. A. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51(5), 347–356.
- Harnad, S. (1990). The symbol grounding problem. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 42(1-3), 335–346.
- 井庭崇・福原義久 (1998). 複雑系入門：知のフロンティアへの冒険 NTT出版.
- 岩村吉晃 (2001). タッチ 医学書院.
- Jeka, J. J. (1997). Light Touch Contact as a Balance Aid. *Physical Therapy*, 77(5), 476–487.
- Jeka, J. J., & Lackner, J. R. (1994). Fingertip contact influences human postural control. *Experimental Brain Research*, 79(2).
- Jeka, J. J., & Lackner, J. R. (1995). The role of haptic cues from rough and slippery surfaces in human postural control. *Experimental Brain Research*, 103(2).
- Jen, E. (2003). Stable or robust? What's the difference? *Complexity* (Vol. 8).
- Jirsa, V. K., Fink, P., Foo, P., & Kelso, J. A. S. (2000). Parametric stabilization of biological coordination: a theoretical model. *Journal of Biological Physics*, 26(2), 85–112.
- Kao, J. C., Ringenbach, S. D. R., & Martin, P. E. (2003). Gait transitions are not dependent on changes in intralimb coordination variability. *Journal of Motor Behavior*, 35(3), 211–4.
- 鎌田優子・真下英明 (2013). 嚙下障害を有する脊髄損傷者の活動性に着目した治療介入 (特集 生態心理学とリハビリテーションの融合). *生態心理学研究*, 6(1), 73–75.
- 鹿取廣人・杉本敏夫・鳥居修晃 (2011). 心理学 東京大学出版会.
- Katz, D. (1925). *Der Aufbau der Tastwelt [Structure of the haptic world]*. Leipzig, Germany: Barth.
- (カツ, D. 東山篤規・岩切絹代(翻訳) (2003). 触覚の世界：実験現象学の地平 新曜社)
- 川人光男 (1996). 脳の計算理論 産業図書.
- Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 246(6), R1000–1004.
- Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic Patterns: The Self-organization of Brain and Behavior*. MIT Press.
- Kelso, J. A. S., Delcolle, J. D., & Schöner, G. (1990). Action-perception as a pattern formation process. *Attention And Performance XIII*, 5, 139-169.
- Kelso, J. A. S., Fink, P. W., DeLaplain, C. R., & Carson, R. G. (2001). Haptic information stabilizes and destabilizes coordination dynamics. *Proceedings. Biological Sciences / The Royal Society*, 268(1472), 1207–13.
- Kelso, J. A. S., Holt, K. G., Kugler, P. N., & Turvey, M. T. (1980). 2 On the Concept of Coordinative Structures as Dissipative Structures: II. Empirical Lines of Convergence, *Tutorials in Motor Behavior. Advances in Psychology*, 1, 49–70.
- Kelso, J. A. S., & Jeka, J. J. (1992). Symmetry breaking dynamics of human multilimb

- coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 18(3), 645–68.
- Kelso, J. A. S., Tuller, B., Vatikiotis-Bateson, E., & Fowler, C. A. (1984). Functionally specific articulatory cooperation following jaw perturbations during speech: Evidence for coordinative structures. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10(6), 812–832.
- Kennel, M. B., Brown, R., & Abarbanel, H. D. I. (1992). Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction. *Physical Review A*, 45(6), 3403–3411.
- Kodama, K., Furuyama, N., & Inamura, T. (2015). Differing Dynamics of Intrapersonal and Interpersonal Coordination: Two-Finger and Four-Finger Tapping Experiments. *PloS One*, 10(6).
- Kodama, K., Makino, R., & Furuyama, N. (2012). Different Stable Patterns between Intra- and Inter-personal Systems : Experimental Study on Inter-limb Tapping Coordination. In *CogSci 2012 Proceedings* (pp. 1810–1815).
- Kudo, K., Park, H., Kay, B. A., & Turvey, M. T. (2006). Environmental coupling modulates the attractors of rhythmic coordination. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 32(3), 599–609.
- Kugler, P. N., Kelso, J. A. S., & Turvey, M. T. (1980). On the concept of coordinative structures as dissipative structures: I. Theoretical lines of convergence, *Tutorials in Motor Behavior. Advances in Psychology*, 1, 3–47.
- Kugler, P. N., & Turvey, M. T. (1987). *Information, Natural Law, and the Self-assembly of Rhythmic Movement*. Lawrence Erlbaum Associates.
- Latash, M. L. (2008). *Synergy*. Oxford University Press,.
- Lee, D. N., & Aronson, E. (1974). Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Perception & Psychophysics*, 15(3), 529–532.
- Lee, D. N., & Lishman, J. R. (1975). Visual proprioceptive control of stance. *Journal of Human Movement Studies*, 1(2), 87–95.
- Levin, S. M. (2002). The tensegrity-truss as a model for spine mechanics: biotensegrity. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, 02(03n04), 375–388.
- Lipsitz, L. a. (1992). Loss of “Complexity” and Aging. *Jama*, 267(13), 1806.
- Lombardo, T. J. (1987). *The reciprocity of perceiver and environment: the evolution of James J. Gibson’s ecological psychology*. Lawrence Erlbaum Associates, Incorporated.
- Lopresti-Goodman, S. M., Richardson, M. J., Silva, P. L., & Schmidt, R. C. (2008). Period basin of entrainment for unintentional visual coordination. *Journal of Motor Behavior*, 40(1), 3–10.
- Loseby, P. N., Piek, J. P., & Barrett, N. C. (2001). The influence of speed and force on bimanual

- finger tapping patterns. *Human Movement Science*, 20(4-5), 531–547.
- Marr, D. (1983). *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*. The MIT Press.
- Marsden, C. D., Merton, P. A., & Morton, H. B. (1983). Rapid postural reactions to mechanical displacement of the hand in man. *Advances in Neurology*, 39, 645–59.
- McCarthy, J., & Hayes, P. J. (1969). Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence. *Machine Intelligence*, 4, 463–502.
- Mechner, F., Kerzel, D., Knoblich, G., & Prinz, W. (2001). Perceptual basis of bimanual coordination. *Nature*, 414(6859), 69–73.
- 三嶋博之 (2000). エコロジカル・マインド：知性と環境をつなぐ心理学 日本放送出版協会.
- 中川維子 (2002). 心・脳・コンピュータ 渡辺恒夫・村田純一・高橋濤子 (編) 心理学の哲学 北大路書房, pp.168-186.
- Nicolis, G., & Prigogine, I. (1977). *Self-organization in nonequilibrium systems: from dissipative structures to order through fluctuations*. Wiley.
- 荻阪直行・下條信輔・佐々木正人 (2002). 意識の科学は可能か 新曜社.
- Pagano, C. C., & Turvey, M. T. (1993). Perceiving by Dynamic Touch the Distances Reachable With Irregular Objects. *Ecological Psychology*, 5(2), 125–151.
- Pagano, C. C., & Turvey, M. T. (1995). The inertia tensor as a basis for the perception of limb orientation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(5), 1070–1087.
- Palatinus, Z., Dixon, J. A., & Kelty-stephens, D. G. (2013). Fractal fluctuations in quiet standing predict the use of mechanical information for haptic perception. *Annals of Biomedical Engineering*, 41(8), 1625–1634.
- Palatinus, Z., Kelty-stephens, D. G., Kinsella-Shaw, J., Carello, C., & Turvey, M. T. (2014). Haptic perceptual intent in quiet standing affects multifractal scaling of postural fluctuations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 40(5), 1808–1818.
- Pellecchia, G. L., Shockley, K. D., & Turvey, M. T. (2005). Concurrent cognitive task modulates coordination dynamics. *Cognitive Science*, 29(4), 531–57.
- 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.
- 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.
- Ramenzoni, V. C., Davis, T. J., Riley, M. A., Shockley, K. D., & Baker, A. A. (2011). Joint action in a cooperative precision task: nested processes of intrapersonal and interpersonal

- coordination. *Experimental Brain Research*, 211(3-4), 447–57.
- Ramenzoni, V. C., Riley, M. A., Shockley, K. D., & Baker, A. A. (2012). Interpersonal and intrapersonal coordinative modes for joint and single task performance. *Human Movement Science*, 31(5), 1253–67.
- Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(6), 969–992.
- Repp, B. H., & Su, Y.-H. (2013). Sensorimotor synchronization: a review of recent research (2006-2012). *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(3), 403–52.
- Richardson, M. J., Lopresti-Goodman, S. M., Mancini, M., Kay, B. A., & Schmidt, R. C. (2008). Comparing the attractor strength of intra- and interpersonal interlimb coordination using cross-recurrence analysis. *Neuroscience Letters*, 438(3), 340–345.
- Riek, S., & Woolley, D. (2005). Hierarchical organisation of neuro-anatomical constraints in interlimb coordination. *Human Movement Science*, 24(5-6), 798–814.
- Riley, M. a, Shockley, K. D., & Van Orden, G. C. (2012). Learning From the Body About the Mind. *Topics in Cognitive Science*, 4(1), 21–34.
- Robertson, G., Caldwell, G. E., Hamill, J., Kamen, G., & Whittlesey, S. N. (2013). *Research Methods in Biomechanics, 2nd Edition*. Human Kinetics.
- Rooke, E., Bardy, B. G., & Tsaneva-Atanasova, K. (2011). Toward a synergetic model of postural coordination dynamics. *BIO Web of Conferences*, 1, 00077.
- 佐々木正人 (1994). アフォーダンス—新しい認知の理論 岩波書店.
- 佐々木正人・三嶋博之 (1994). 運動制御への生態学的アプローチ 岩波講座認知科学 4, pp.2-28.
- Scarr, G. (2010). Simple geometry in complex organisms. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*, 14(4), 424–444.
- Schmidt, R. A., & Lee, T. (1988). *Motor Control and Learning-5th Edition*. Human Kinetics Pub.
- Schmidt, R. C., Bienvvenu, M., Fitzpatrick, P., & Amazeen, P. G. (1998). A comparison of intra- and interpersonal interlimb coordination: coordination breakdowns and coupling strength. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 24(3), 884–900.
- 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.
- Schmidt, R. C., Richardson, M. J., Arsenault, C., & Galantucci, B. (2007). Visual tracking and entrainment to an environmental rhythm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(4), 860–870.
- Schmidt, R. C., & Turvey, M. T. (1994). Phase-entrainment dynamics of visually coupled rhythmic movements. *Biological Cybernetics*, 70(4), 369–376.

- Scholz, J. P., & Kelso, J. A. S. (1990). Intentional Switching Between Patterns of Bimanual Coordination Depends on the Intrinsic Dynamics of the Patterns. *Journal of Motor Behavior*, 22(1), 98–124.
- Schöner, G. H. (1990). A dynamic theory of coordination of discrete movement. *Biological Cybernetics*, 63(4), 257–270.
- Schöner, G. H. (1994). Dynamic theory of action-perception patterns: The time-before-contact paradigm. *Human Movement Science*, 13(3-4), 415–439.
- Schöner, G. H., Haken, H., & Kelso, J. A. S. (1986). A stochastic theory of phase transitions in human hand movement. *Biological Cybernetics*, 53(4), 247–57.
- Schöner, G. H., Jiang, W. Y., & Kelso, J. A. S. (1990). A synergetic theory of quadrupedal gaits and gait transitions. *Journal of Theoretical Biology*, 142(3), 359–391.
- Schöner, G. H., & Kelso, J. A. S. (1988). A synergetic theory of environmentally-specified and learned patterns of movement coordination. *Biological Cybernetics*, 58, 81–89.
- Searle, J. R. (1980). Minds, brains, and programs. *Behavioral and Brain Sciences*, 3(03), 417.
- Seay, J. F., Haddad, J. M., van Emmerik, R. E. A., & Hamill, J. (2006). Coordination variability around the walk to run transition during human locomotion. *Motor Control*, 10(2), 178–96.
- 柴田正良 (2001). ロボットの心 : 7つの哲学物語 講談社.
- Shimizu, Y., Thurner, S., & Ehrenberger, K. (2002). Multifractal spectra as a measure of complexity in human posture. *Fractals*, 10(01), 103–116.
- Shockley, K. D. (2005). Cross recurrence quantification of interpersonal postural activity. In M. Riley & G. Van Orden (Eds.), *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences* (pp. 142–177).
- Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. H. (2013). *Motor control: translating research into clinical practice*, 612.
- Stevens, L. (1886). *On the time-sense. In mind* (pp. 393–404). Oxford Journals.
- Stoffregen, T. A. (1985). Flow structure versus retinal location in the optical control of stance. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 11(5), 554–65.
- Swinnen, S. P., Walter, C. B., Serrien, D. J., & Vandendriessche, C. (1992). The effect of movement speed on upper-limb coupling strength. *Human Movement Science*, 11(5), 615–636.
- Takens, F. (1981). Detecting strange attractors in turbulence. In *Lecture Notes in Mathematics* (Vol. 898, pp. 366–381). Springer Berlin Heidelberg.
- Thagard, P. (1996). *Mind: Introduction to cognitive science*. Cambridge, MA: MIT press. (サガード, P. 松原仁・江尻桂子(翻訳) (1999). マインド : 認知科学入門 共立出版)
- Thorpe, S. (2002). Ultra-rapid scene categorization with a wave of spikes. In *Biologically motivated computer vision* (pp. 1-15). Springer Berlin Heidelberg.

- Turner, S., Mittermaier, C., & Ehrenberger, K. (2002). Change of complexity patterns in human posture during aging. *Audiology & Neuro-Otology*, 7(4), 240–8.
- Tognoli, E., Lagarde, J., DeGuzman, G. C., & Kelso, J. A. S. (2007). The phi complex as a neuromarker of human social coordination. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(19), 8190–5.
- 富田昌夫 (2004). 環境と運動 In 内山靖(編) 環境と理学療法 医歯薬出版株式会社, pp.88-98.
- Treffner, P. J., & Turvey, M. T. (1995). Handedness and the asymmetric dynamics of bimanual rhythmic coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(2), 318–333.
- Turvey, M. T. (1990). Coordination. *American Psychologist*, 45(8), 938–953.
- Turvey, M. T. (1996). Dynamic touch. *American Psychologist*, 51(11), 1134–1152.
- Turvey, M. T. (2004). Impredicativity, dynamics, and the perception-action divide. In V. K. Jirsa & S. Kelso (Eds.), *Coordination dynamics: Issues and trends* (Vol. 1, pp. 1–20).
- Turvey, M. T. (2007). Action and perception at the level of synergies. *Human Movement Science*, 26(4), 657–97.
- Turvey, M. T., & Carello, C. (2011). Obtaining information by dynamic (effortful) touching. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 366(1581), 3123–32.
- Turvey, M. T., Fitch, H., & Tuller, B. (1982). The Bernstein perspective: I. The problems of degrees of freedom and context-conditioned variability. In J. A. S. Kelso (Ed.), *Human Motor Behavior: An Introduction* (pp. 239–252). Psychology Press.
- Turvey, M. T., & Fonseca, S. T. (2014). The medium of haptic perception: a tensegrity hypothesis. *Journal of Motor Behavior*, 46(3), 143–87.
- Turvey, M. T., Shaw, R. E., & Mace, W. (1978). Issues in the theory of action: Degrees of freedom, coordinative structures and coalitions. In *Attention and performance VII* (pp. 557–595).
- 内山靖・峯島孝雄・有賀徹・吉田義之 (1994). 体平衡機能における坐位重心動揺の測定意義と臨床応用 理学療法学 (Vol. 21). 公益社団法人日本理学療法士協会.
- van Ulzen, N. R., Lamoth, C. J. C., Daffertshofer, A., Semin, G. R., & Beek, P. J. (2008). Characteristics of instructed and uninstructed interpersonal coordination while walking side-by-side. *Neuroscience Letters*, 432(2), 88–93.
- van Ulzen, N. R., Lamoth, C. J. C., Daffertshofer, A., Semin, G. R., & Beek, P. J. (2010). Stability and variability of acoustically specified coordination patterns while walking side-by-side on a treadmill: does the seagull effect hold? *Neuroscience Letters*, 474(2), 79–83.
- Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (1992). *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*. The MIT Press. (ヴァレラ, F., ロッシュ, E. & トンプソン, E. 田中靖

- 夫(翻訳) (2001). 身体化された心—仏教思想からのエナクティブ・アプローチ 工作舎
- Varlet, M., Marin, L., Lagarde, J., & Bardy, B. G. (2011). Social postural coordination. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 37(2), 473–483.
- Wallot, S., & Van Orden, G. C. (2012). Ultrafast Cognition. *Journal of Consciousness Studies*, 19(5-6), 1–20.
- Webber, C. L., & Zbilut, J. P. (2005). Recurrence quantification analysis of nonlinear dynamical systems. In M. Riley & G. Van Orden (Eds.), *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences* (pp. 26–94).
- Webber, Jr., C. L., & Marwan, N. (Eds.). (2014). *Recurrence Quantification Analysis: Theory and Best Practices*. Springer.
- Wimmers, R. H., Beek, P. J., & van Wieringen, P. C. W. (1992). Phase transitions in rhythmic tracking movements: A case of unilateral coupling. *Human Movement Science*, 11(1-2), 217–226.
- Wing, A. M., Church, R. M., & Gentner, D. R. (1989). Variability in the timing of responses during repetitive tapping with alternate hands. *Psychological Research*, 51(1), 28–37.
- Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, 370.
- Yamada, N. (1995). Chaotic swaying of the upright posture. *Human Movement Science*, 14(6), 711–726.
- 山口裕之 (2005). 人間科学の哲学：自由と創造性はどこへいくのか 勁草書房.
- 山口裕之 (2009). 認知哲学：心と脳のエピステモロジー 新曜社.
- 山本裕二 (2005). 複雑系としての身体運動：巧みな動きを生み出す環境のデザイン 東京大学出版会.
- Yamanishi, J., Kawato, M., & Suzuki, R. (1979). Studies on human finger tapping neural networks by phase transition curves. *Biological Cybernetics*, 33(4), 199–208.
- Yamanishi, J., Kawato, M., & Suzuki, R. (1980). Two coupled oscillators as a model for the coordinated finger tapping by both hands. *Biological Cybernetics*, 37(4), 219–225.
- Zanone, P. G., & Kelso, J. A. S. (1992). Evolution of behavioral attractors with learning: nonequilibrium phase transitions. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 18(2), 403–21.
- Zbilut, J. P., Giuliani, A., & Webber, C. L. (1998). Detecting deterministic signals in exceptionally noisy environments using cross-recurrence quantification. *Physics Letters A*, 246(1-2), 122–128.
- Zbilut, J. P., & Webber, C. L. (1992). Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots. *Physics Letters A*, 171(3-4), 199–203.