

国際医療福祉大学審査学位論文(博士)

大学院医療福祉学研究科博士課程

健全人の手指タッピング課題による大脳皮質賦活
の相違
—電気生理学的解析—

平成 26 年度

保健医療学専攻・リハビリテーション学分野

リハビリテーション学領域

学籍番号:12S3038 氏名:高嶋 美和

研究指導教員:高嶋 幸男教授

副研究指導教員:後藤 純信教授

健常人の手指タッピング課題による大脳皮質賦活の相違

—電気生理学的解析—

高嶋 美和

要旨

目的は、外的ペース（ET）と自己ペース（SI）運動での手指tapping課題における感覚運動野の脳波（EEG）周波数帯域毎の振幅変化を分析し、その機能的意義を明らかにすることである。対象は健常成人11名で、ET 1Hzと5Hz、SI 1Hzの運動時脳活動をEEGで記録した。ET 1Hzに比較して5Hzでは、low- γ 帯域律動波30-45HzでCzに、high- γ 帯域律動波60-75HzでF3・Fz・C3・Cz・Pzに、105-120HzでPzに振幅減少がみられた。また、ET 1HzとSI 1Hzを比較すると、SI 1Hzでは、low- γ 帯域律動波45-60HzでC4に、high- γ 帯域律動波75-90HzでF3・Fz・F4・C3・Cz・C4に振幅増大がみられた。一方、ET 1Hzでは、high- γ 帯域律動波75-90HzでP3・Pz・P4に振幅増大が認められた。ETとSI 1Hzの運動では、 θ ・ α ・ β 帯域律動波成分に違いはみられないが、 γ 帯域律動波成分では部位別に異なる振幅変化がおこっていた。本研究の結果から、 γ 帯域律動波は、45-60HzでSI運動に、75-90Hzで部位別にSI運動とET運動に関与し、周波数帯域によって異なる機能的役割を担うことが示唆された。

Key words : 脳波, 感覚運動野, γ 帯域律動波, 外的ペース, 自己ペース

The difference of activation of the cerebral cortex in finger tapping movements in human

—A electrophysiological study—

Miwa Takashima

Summary

The amplitude changes of EEG frequency band on the sensorimotor cortex in right finger tapping movements were analyzed to clarify the effect of finger tapping to brain function. Eleven normal subjects were examined EEG on the scalp of human head via appropriate electrodes performing sequential right finger movements with self-initiated (SI) or externally triggered (ET) movements (1Hz or 5Hz). Compared with the ET movements (1Hz), in the tasks of ET movements (5Hz) the amplitude of low-gamma band activity (30-45Hz) was significantly decreased in Cz, high-gamma band activity (60-75Hz) was significantly decreased in F3, Fz, C3, Cz, Pz, and 105-120Hz in Pz. The appearance of gamma band activity was different between ET movements (1Hz) and SI movements (1Hz). Compared with the ET movements (1Hz), in the tasks of SI movements (1Hz) the amplitude of low-gamma band activity (45-60Hz) was significantly increased in C4, and the amplitude of high-gamma band activity (75-90Hz) was significantly increased in F3, Fz, F4, C3, Cz, C4. On the other hand, in the tasks of ET movements (1Hz), the amplitude of high-gamma band activities (75-90Hz) was significantly increased in P3, Pz, P4. Although in theta, alpha, or beta band activity, there were no differences between the ET movements (1Hz) and the SI movements (1Hz), the amplitude of high-gamma band activity was changed. These results suggest that 45-60Hz and 75-90Hz frequency bands in a high-gamma band activity show different functional roles in the brain.

Key words : EEG, sensorimotor cortex, high-gamma band, externally triggered movements,

self-initiated movements

目次

第1章 序論

1.1 脳における運動制御	1
1.2 外的ペース運動と自己ペース運動	1
1.3 電気生理学的検査	2
1.4 EEG 律動の発現とその機能的意義	3
1.5 本論文の位置づけと目的	5

第2章 運動頻度の違いによる外的ペース運動時の感覚運動野の活動変化

2.1 背景と目的	7
2.2 対象と方法	8
2.2.1 対象	8
2.2.2 EEG 測定条件	8
2.2.3 EEG 記録方法	9
2.2.4 分析	9
2.3 結果	
2.3.1 外的ペース運動 1Hz の tapping 課題における感覚運動野の振幅変化	10
2.3.2 外的ペース運動 5Hz の tapping 課題における感覚運動野の振幅変化	11
2.3.3 外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題の違いによる感覚運動野の 振幅変化の差	12

2.4 考察.....	13
第3章 自己ペース運動と外的ペース運動の違いによる感覚運動野の活動変化	
3.1 背景と目的	15
3.2 対象と方法	16
3.2.1 対象	16
3.2.2 EEG 測定条件	16
3.2.3 EEG 記録方法	17
3.2.4 分析	17
3.3 結果.....	18
3.3.1 自己ペース運動 1Hz の tapping 課題における感覚運動野の振幅変化	18
3.3.2 自己ペース運動 1Hz と外的ペース運動 1Hz の tapping 課題の違いによる 感覚運動野の振幅変化の差	19
3.4 考察.....	19
第4章 結論.....	22
謝辞	24
文献一覧.....	25
図・表	
図の説明	30

図 1	国際 10-20 法による電極配置	36
図 2	power spectrum の算出方法	37
図 3	外的ペース運動 1Hz の tapping 課題時の rest 区間と tapping 区間の 総加算波形	38
表 1	外的ペース運動 1Hz の tapping 課題による感覚運動野の振幅変化	39
図 4	外的ペース運動 5Hz の tapping 課題時の rest 区間と tapping 区間の 総加算波形	40
表 2	外的ペース運動 5Hz の tapping 課題による感覚運動野の振幅変化	41
図 5	外的ペース運動 1Hz と 5Hz 時の各周波数帯域律動波の頭皮上空間分布	42
表 3	外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題による振幅変化の差	43
図 6	外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題時の θ 帯域律動波振幅の差	44
図 7	外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題時の low- γ 帯域律動波 (30-45Hz) 振幅の差	45
図 8	外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題時の high- γ 帯域律動波 振幅の差	46
図 9	自己ペース運動 1Hz の tapping 課題時の rest 区間と tapping 区間の 総加算波形	47

表 4	自己ペース運動 1Hz の tapping 課題による振幅変化	48
図 10	自己ペース運動 1Hz と外的ペース運動 1Hz の tapping 課題時の 各周波数帯域律動波の頭皮上空間分布	49
表 5	自己ペース (SI) 運動 1Hz と外的ペース (ET) 運動 1Hz の tapping 課題による振幅変化の差	50
図 11	自己ペース (SI) 運動 1Hz と外的ペース (ET) 運動 1Hz の tapping 課題時の low- γ 帯域律動波 (45-60Hz) 振幅の差	51
図 12	自己ペース (SI) 運動 1Hz と外的ペース (ET) 運動 1Hz の tapping 課題時の high- γ 帯域律動波 (75-90Hz) 振幅の差	52

第1章 序論

1.1 脳における運動制御

随意運動は、脊髄から伸びる末梢神経（ α 運動ニューロン）が骨格筋を興奮させることでおこる。その運動は、解剖学的に下位レベルの感覚ニューロンと脊髄の介在ニューロン、上位レベルの大脳皮質運動関連野と大脳基底核・小脳が相互に活性化することによりコントロールされ、協調的な運動遂行を可能にすると考えられている¹⁾。無意識的に運動をコントロールすることで知られている重要な脳の回路には2つあり、1つは小脳-大脳皮質回路、そしてもう1つは、大脳皮質-基底核回路である。前者は、運動皮質から橋核を經由して小脳へ興奮性の入力がおこる間、小脳半球（前葉）から歯状核と視床を経て感覚運動野と腹側運動前野の運動皮質へ活動電位が出力される回路で、主に運動の微調整と運動計画に関与するとされている²⁻³⁾。後者は、運動皮質（補足運動野・腹側運動前野・感覚運動野）から興奮性の活動電位が被殻・淡蒼球内節と視床を經由して、補足運動野、腹側運動前野の皮質運動野に逆投影される回路で、主に運動、認知、情動を並列処理し、行動の選択と抑制に関与するとされている⁴⁻⁵⁾。この2つの回路は、磁気共鳴機能画像法（functional magnetic resonance imaging ; fMRI）、近赤外線分光法（near-infrared spectroscopy ; NIRS）、陽電子放射断層撮影（positron emission tomography ; PET）などの画像診断法の開発以前には別々に独立して働くと捉えられていたが、十数年前から、大脳基底核と小脳は、別々に働くのではなく、並列的に運動をコントロールしていると考えられるようになった⁶⁾。

1.2 外的ペース運動と自己ペース運動

小脳と大脳基底核は運動企画と運動開始の時間的タイミングやリズムを調整していると考えられており、外的ペース運動と自己ペース運動を用いた先行研究には脳の血流変化をみた

ものや電気生理学的解析をおこなった報告がある。外的ペース運動は「外部リズムに動きを同期させる人の能力」として、心理物理学的研究で報告されており⁷⁾、運動に関する研究では、メトロノーム拍子のような定時性あるいはランダムな非定時性の音刺激のタイミングに合わせた運動として定義づけされている⁸⁻⁹⁾。それらの研究で用いられる外的刺激には、聴覚と視覚がある。

一方、自己ペース運動とは、外的ペース運動時の「外部リズム」がない場合に、自己でタイミングを計りながら運動を行う場合の「自分の中の内部リズムに動きを同期させる能力」として考えられている⁸⁻⁹⁾。以上の内容から、本論文では、外的ペース運動を「外部リズムに合わせた受動的運動」、自己ペース運動を「外的刺激のない内部リズムに合わせた能動的運動」として使用する。

1.3 電気生理学的検査

脳が示す電気活動の変化を、頭皮上の電極から導出して記録したものを、一般に脳波 (electroencephalogram : EEG) と呼ぶ¹⁰⁾。猫の実験から、頭皮上 EEG の発生源は多数の大脳皮質錐体細胞に同期的に発生するシナプス後電位であることが知られている¹¹⁾。

視床特殊核ニューロンの軸索終末は主に第4層の深部樹状突起に、非特殊核ニューロンの軸索終末は皮質のほぼ全層にシナプス結合して、大脳皮質第5層の錐体細胞に興奮性シナプス後電位 (excitatory postsynaptic potential : EPSP) あるいは抑制性シナプス後電位 (inhibitory postsynaptic potential : IPSP) を発生させる。視床特殊核からの興奮性入力により錐体細胞の深部 (細胞体と樹状突起深部) に EPSP が生じると、細胞内に電流が発生し、細胞外では皮質表層部が陽性、深部が陰性の電場となる。同じ現象が隣接する多くのニューロン群に同時 (同期性) に起こると、同じ極性の双極子が多数生じることとなる。第4層への入力が抑制性であれば IPSP が発生し、双極子の表層、深層での極性は逆になる。

このように、EEG は錐体細胞に同期的に生じた EPSP, IPSP による双極子を皮質表面から眺めたものといわれている。したがって、EEG 上の陰性、陽性の極性は、EPSP, IPSP が表層部に生じるか、深層部に生じるかによって決定される¹²⁾。

EEG を構成するものには、波、波が連続して出現する活動 (Activity)、ある一定の周期と波形をもった波の繰り返しによってできる律動 (rhythm) がある。背景脳波とは、多少とも全体的かつ持続的な activity であり、脳の成熟度や機能状態を知る上で最も大切なものであるとされている¹³⁾。EEG は、これらの rhythm を振幅、周波数または周期、対称性、分布、反応性で確認し、正常と異常を判読する検査法である¹³⁾。

1.4 EEG 律動の発現とその機能的意義

EEG は 10Hz 前後の α 帯域律動波を代表とする律動性を呈するのが特徴であり、EEG rhythm の発生源は視床ニューロン群に発生する脱分極・過分極からなるシナプス後電位 (PSP) の律動性振動であるとされる¹⁴⁾。その律動性振動の脱分極成分に発生する活動電位が皮質大錐体細胞に興奮性入力として伝えられ、先端樹状突起に PSP の律動性振動を生じ、その細胞外電場が同期的に加重されて EEG rhythm を発生させる。EEG rhythm の周波数は視床ニューロンの膜電位水準に依存しており、脱分極状態では速波帯域、中等度の過分極状態では睡眠紡錘波、深い過分極では δ 波帯域の周波数を示す。この視床ニューロンの膜電位水準は、覚醒レベルを調節する脳幹網様体ニューロンの活動性によって制御され、病的状態においては大腦皮質や視床、その他の脳構造のニューロン機能障害によって変化するとされる¹⁵⁻¹⁶⁾。このように、EEG rhythm は、知的活動や運動活動など全ての活動状態により変化するため、それらの出現は異なる機能的意義を示すと考えられている。

4-8Hz の θ 帯域律動波は、ラットの動物実験より、睡眠時では REM 睡眠時に、覚醒時は注意集中を必要とする随意運動時 (Fm θ) に出現するが、休憩中や non-REM 睡眠時には消

失する。これは海馬脳波の θ 波出現と関連付けられ、睡眠と知覚活動、記憶に機能的意義があることが示唆されている¹⁷⁾。

8-13Hz の α 帯域律動波は、覚醒時リラックス状態で閉眼すると後頭部優位に出現する EEG rhythm の代表的活動として知られている。イヌの動物実験より、その出現状況は視床-皮質間よりも大脳皮質内の近接点との関係性が高かったとされる¹⁸⁾。また、健常人を対象とした研究より、最大電位は左右の後頭部と頭頂部を時々刻々と移動することから、その主要電源は皮質内ニューロン回路に依存し、時間的に移動している¹⁹⁾と考えられている。つまり、 α 帯域律動波は覚醒時の大脳皮質間の連絡に機能的意義があると考えられている。

14-30Hz の β 帯域律動波は、ネコの動物実験より、小脳脚への電気刺激が視床の脱分極を引き起こし、紡錘波や δ 帯域律動波を減少させ、20-40Hz の活動電位を生じることで知られている周波数帯域である²⁰⁾。つまり、 β 帯域律動波は、視床皮質核ニューロンの内在性興奮特性が関与し、覚醒時の音刺激に合わせた運動時に出現すると考えられている。

30Hz 以上の γ 帯域律動波は、大脳皮質間の知覚情報の統合に機能的意義があると考えられており、初期知覚段階の脳内処理を反映し、特に記憶との照合において出現するとされている^{9,21)}。また、ネコの EEG 研究より、30-120Hz の γ 帯域律動波は視覚情報の脳内ネットワークを調整する役割をもつことが報告されている²²⁾。脳磁図 (magnetoencephalography : MEG) 研究より、視覚または聴覚において提示された知覚刺激への注意集中が必要な課題は、注意集中を必要としない課題よりも γ 帯域反応が増大するとされている²³⁾。また、low- γ 帯域は筋収縮の程度に、high- γ 帯域 60-90Hz は上肢の運動に、75Hz 以上は運動のタイミングに関連する^{9,24-25)}ことが報告されている。以上のことから、 γ 帯域律動成分は運動遂行時に出現し、大脳皮質の空間的に遠い部位を統合する役割をもち、運動の理解と遂行において運動出力を調整することに関与すると考えられている。

1.5 本論文の位置づけと目的

一般に、学習と記憶を含む運動実行機能は、前頭葉・頭頂葉皮質と内側側頭葉、小脳とに依存していることが知られている。認知機能と運動機能は、加齢に伴う機能低下を引き起こし、運動機能の老化現象は、微細運動機能の低下と関連があるとされている²⁶⁾。リハビリテーションの対象となるパーキンソン病や脳梗塞などの運動障害では、病理所見から、運動実行機能に関与する脳内ネットワークの障害がおこると考えられている。生存患者での運動実行機能の脳内ネットワーク障害については、電気生理学的に、EEG や MEG 研究より、運動関連脳電位を用いた一次感覚運動野の活動と反対側の筋電図間のコヒーレンスが報告²⁷⁾されて以来、周波数領域での解析が盛んに行われている。実際に、MEG 研究より、病理所見だけでは分からなかったパーキンソン病の安静時振戦に関連する脳活動については、反対側の一次運動野に加えて、運動前野、補足運動野、二次感覚野、後部頭頂葉、視床や同側の小脳にコヒーレンスが認められたことより明らかにされている²⁸⁻³¹⁾。このことは、それまで病理所見と症状から考察されていた脳内ネットワーク障害が生存例で検討され、これまで以上に病態理解が可能となったことを裏付ける。

著者は、2009 年以降、健常者とダウン症候群（DS）の剖検例で大脳皮質・白質の発達と加齢について、神経系と神経内分泌系に特異的なユビキチンカルボキシル末端加水分解酵素の一つである Protein Gene Product 9.5（PGP9.5）抗体を用いて、免疫組織化学的に検討してきた。DS 患者では、乳児期大脳皮質において、錐体細胞層での PGP9.5 の発現減弱に対する顆粒神経細胞層の発現増加がおこる可塑性について報告した³²⁻³³⁾。DS の脳組織は、解剖学的に、大脳皮質の第 3～4 層の小型神経細胞数が低下し、シナプス発達が遅れること、ゴルジ染色では胎児・新生児期脳の樹状突起にはスパインがやや細い³⁴⁾という報告があり、このことが DS の臨床症状である筋緊張低下と精神運動発達遅滞を引き起こしているかもしれない。しかし、DS の運動障害のメカニズムについては未だ解明されていな

い.

そこで、今回は生存例での運動実行機能評価の指標を作成するために、まずは、若年健康成人の随意運動が感覚運動情報処理ネットワークの構造的機能連関に及ぼす影響について、微小律動成分の相違を EEG で明らかにすることを目的とした。

運動実行機能の脳内ネットワーク障害は、部分的、直接的に運動メカニズムに影響を与える神経接続または細胞の状態変化に伴う微細運動機能の低下に関連するとされている。その運動機能ネットワークに関する研究で新しく注目されているものに、EEG や MEG での γ 帯域律動波に関するものがあり、この成分は認知面以外に運動遂行にも関与することが報告されるようになった。 γ 帯域律動波は、運動頻度が一定でない非定時性の視覚や聴覚刺激に合わせた外的ペース運動時に出現するため、運動開始や遂行中の運動のタイミングを調整する注意制御機構としての役割を担っているのではないかと考えられている⁹⁾。すでに、外的ペース運動、自己ペース運動における手指 tapping 課題時の神経学的変化は、PET や EEG, fMRI 研究で、健康人以外にも、パーキンソン病などの疾患患者を対象として報告されている⁴⁾が、EEG γ 帯域律動成分では、外的ペース運動と自己ペース運動の手指 tapping 課題時の頭皮上空間分布毎の振幅変化とその部位の違いについては明らかにされていない。また、fMRI 研究より、運動に関する脳内ネットワーク解明には外的ペース運動と自己ペース運動の2つの運動課題を用いた評価表の作成が必要⁶⁾と考えられている。

そこで、今回は、侵襲を伴わない脳機能検査法の中で、リハビリテーションに関わる専門職種でも測定が可能な EEG を用いて、外的ペース運動と自己ペース運動での手指 tapping 課題時の微小律動成分をコンピュータにて解析し、その機能的意義を明らかにすることを目的とした。

第2章 運動頻度の違いによる外的ペース運動時の感覚運動野の活動変化

2.1 背景と目的

サルでの動物実験³⁵⁻³⁶⁾、パーキンソン病患者を対象とした研究³⁷⁻³⁹⁾で、外的ペース運動では運動前野と小脳半球、自己ペース運動では補足運動野と大脳基底核が関与すると考えられている。一方、狂犬病ウイルスを用いた逆行性神経輸送を利用したサルの動物実験⁴⁰⁾では、前頭前野背外側部と小脳、視床を介した小脳と一次感覚運動野を結ぶ経路が報告されている。その結果は、大脳基底核と小脳の両方が視床を介して、感覚運動野をコントロールしていることを示唆し、単純に外的ペース運動や自己ペース運動課題の比較によって、大脳皮質感覚運動野の活性化や脳内ネットワークが異なるということを証明できないことを意味する。実際に、その後のfMRIの研究^{6,41-42)}より、健常成人では運動頻度に関係なく、外的ペース運動、自己ペース運動課題で活性化する共通の部位として、運動反対側の被殻後部、淡蒼球、視床、補足運動野、運動前野、一次感覚運動野、運動側の小脳前葉と歯状核が報告されている。しかし、その脳内ネットワークは、運動頻度を変更すると、外的ペース運動では、運動側の小脳前葉・歯状核、反対側の視床、運動前野、一次感覚運動野の信号変化と運動頻度の中に強い相関がみられたとの報告がある⁶⁾。

その他にも、運動頻度が1.26Hzのメトロノームに合わせた外的ペース運動を用いたPET研究⁴³⁾では、若年健常群に比し、高齢健常群では代償機能と考えられる運動前野での過剰活性がみられたとの報告がある。また、単位時間内での上肢の運動をタイミングセンサーで測定した研究⁴⁴⁾では、年齢に関係なく利き手の運動が優れており、その結果に男女差はなかったとされている。運動タイミングについては、若年群よりも高齢群で粗大運動と微細運動の両方で時間的遅れがみられたとされ、これはPET研究の運動前野の代償機能としての過剰活性を裏付けているのかもしれない。このことから、運動機能の衰退とりわけ手指 tapping 課題などの微細運動能力の喪失は、老化特有の運動変化に加えて、疾患による

脳内ネットワーク障害も関連していることが考えられている。

そこで、今回、大脳皮質感覚運動野の活動をみるために、EEGの周波数分析で運動頻度毎に脳活動を調べたいと考えた。運動頻度に関する指標を作成するために、若年健常成人の外的ペース運動頻度の違いによる感覚運動野の微小律動成分をコンピュータにて解析し、その機能的意義を明らかにすることを目的とした。

2.2 対象と方法

2.2.1 対象

健常成人 11 名を対象とした（平均年齢±標準偏差； 31.5 ± 7.2 歳，21-42 歳，女性 2 名，男性 9 名）。運動頻度の違う外的ペース運動の 2 群間は、同じ被検者を対象とした。全ての被検者は、病歴に脳疾患がないこと、血圧が正常値であること、脳の興奮状態に影響するような服薬治療を行っていないことを条件とし、エジンバラ利き手テスト⁴⁵⁾で、右利きの者とした。実験開始前に、全ての被検者に対し、研究参加への理解に基づいた書面による同意をかわした後に実施した。なお本研究は、国際医療福祉大学研究倫理審査委員会から承認を受けた後に実施した（平成 24 年 12 月 27 日，承認番号：12-162）。

2.2.2 EEG 測定条件

右手指 tapping 課題時の大脳感覚運動野の EEG を測定した。被検者の姿勢は、頭頸部が動かないように、両足底が床に接地した腰かけ椅座位⁴⁶⁾で、前方のテーブルで両前腕、顎は顎台で支持した。このとき、開眼し、視線を一定の位置に保持すること、できる限り瞬きをしないように指示した。tapping 課題は、外的刺激（メトロノーム音）に合わせて示指の屈曲・伸展運動を行わせた。予備実験において、自由ペースでの tapping 課題時の運動頻度の平均が $2.2\pm 0.5\text{Hz}$ であったことから、音への注意集中が必要な課題条件とするため

に、努力性に遅い運動頻度を 1Hz, 速い運動頻度を 5Hz に設定した。1Hz と 5Hz の運動は、計測当日にそれぞれの速さで手指の連続運動が可能になるまで練習を行った（練習は平均 30 秒）。EEG 記録中に、被検者が正確な運動頻度で tapping 課題を行っているかを把握するために、示指先端にスイッチ、第 1 背側骨間筋に電極を取り付け、tapping のタイミングと筋電図をデジタル信号で EEG 計にとり込み、モニタリングした。tapping 課題時の振幅変化を把握するために、安静（rest）時も tapping 時と同様にメトロノームの音が聞こえる条件とした。rest 区間を 30 秒、その後の tapping 区間を 20 秒、計 50 秒を 1 試行として、連続 5 試行のブロックデザインとした。運動開始および終了は音声で合図した。運動頻度の違う 2 条件での実験は、被検者毎に行った。1Hz と 5Hz のメトロノーム刺激は 70dB として被検者間で統一した。

2.2.3 EEG 記録方法

記録計は、デジタル脳波計 Neurofax EEG-4524（日本光電製）を使用した。国際 10-20 法（図 1）に従い、頭皮上の Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5, T6, Pz, Cz, Fz, Oz から同時記録した。基準電極は鼻尖 Z とし、サンプリング周波数 500Hz, 低域遮断周波数 0.53Hz, 高域遮断周波数 120Hz の記録条件とした。

2.2.4 分析

脳波計からアナログ出力された脳波データをパーソナルコンピューター（dynabook satellite T31 186C/5W, 東芝製）に取り込んだ。課題中の全体的な特徴をみるために、各被検者毎の rest 区間と tapping 区間について頭皮上空間分布毎の EEG の振幅平均を算出した。その方法は、図 2 に示すように課題中の EEG 時系列を 2 秒ごと、25 区間に区切り、各区間に対して高速フーリエ変換（fast fourier transform: FFT）を用いてパワースペクトル（power

spectrum) を算出後に、同帯域の振幅を計算した。その振幅は、power spectrum の任意帯域 (f_1 - f_2 Hz 帯域) の面積を S として、 $A=4\sqrt{S}$ [μV] の計算式に基づいて算出した。各周波数帯域は、 θ 波 (4-8Hz) , α 波 (8-14Hz) , β 波 (14-30Hz), low- γ 波 (30-45Hz, 45-60Hz), high- γ 波 (60-75Hz, 75-90Hz, 90-105Hz, 105-120Hz) の 9 つに分類し、被検者データそれぞれに対して、各周波数帯域の頭皮上空間分布毎に、rest 区間および tapping 区間の振幅を 50 回加算平均した。ブロックデザイン各試行の開始点は、指先のスイッチから記録された最初のデジタル信号が入力された時刻とした (図 2)。

算出された振幅は、2段階に分けて評価した。まず、外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題毎の感覚運動領域の振幅変化を確認するために、頭皮上空間分布毎の rest 区間と tapping 区間の振幅平均を算出し、統計学的に検討した。その後、rest 区間をベースラインとした tapping 区間の振幅変化の平均を算出し、頭皮上空間分布毎に統計処理を行った。統計学的検定は、統計ソフト (Dr.SPSS 22.0 J for windows) を使用して、Shapiro-Wilk 検定にて 2 群の正規性を確認した後に、Wilcoxon の符号付順位和検定を行った。有意水準 (P) は 5% 未満とし、 $P < 0.05$ であるものを有意差があるとした。

2.3 結果

2.3.1 外的ペース運動 1Hz の tapping 課題における感覚運動野の振幅変化

図 3 は、外的ペース運動 1Hz の tapping 課題時の rest 区間と tapping 区間の総加算波形である。被検者 11 名の原波形データをパーソナルコンピュータに取り込み、時系列に加算平均して作成したものである。また、被検者 11 名の外的ペース運動 1Hz の rest 区間と tapping 区間の振幅平均値について、対応する頭皮上空間分布毎に Wilcoxon の符号付順位和検定を行い、統計学的に差があるか検討した (表 1)。表中の数値は rest 区間と tapping 区間の中央値 (四分位範囲; 25% 値 - 75% 値)、* $P < 0.05$ を示している。

その結果、外的ペース運動 1Hz の tapping 課題時の β 帯域律動波の振幅は、左前頭部 (F3) でのみ有意に減少していた ($P < 0.05$)。その他の θ 帯域律動波および α 帯域律動波、 γ 帯域律動波の振幅変化について有意差は認められなかった。

図 5a は、外的ペース運動 1Hz の tapping 課題時の振幅変化の中央値 (表 3) を基に作成した頭皮上空間分布である。赤が振幅増大、青が振幅減少を示している。統計上有意差はみられない部位も含めて振幅変化の拡がりを確認すると、振幅増大は、 θ 帯域律動波 4-8Hz で P3・Pz・P4 に、low- γ 帯域律動波 30-45Hz で Fz・Cz・P3・Pz・P4 に、high- γ 帯域律動波では 60-75Hz で F3・Fz・C3・Cz・P3・Pz・P4 に、75-90Hz で Fz・C3・Cz・C4・P3・Pz・P4 に、90-105Hz では Fz・C3・Cz・P3・Pz・P4 に、105-120Hz では F3・Fz・C3・Cz・Pz に認められた。一方、振幅減少は、 α 帯域律動波と β 帯域律動波で感覚運動野全体 (F3・Fz・F4・C3・Cz・C4・P3・Pz・P4) に認めていた。

2.3.2 外的ペース運動 5Hz の tapping 課題における感覚運動野の振幅変化

図 4 は、外的ペース運動 5Hz の tapping 課題時の rest 区間と tapping 区間の総加算波形である。被検者 11 名の原波形データをパーソナルコンピュータに取り込み、時系列に加算平均して作成したものである。また、被検者 11 名の外的ペース運動 5Hz の rest 区間と tapping 区間の振幅平均値について、対応する頭皮上空間分布毎に Wilcoxon の符号付順位和検定を行い、統計学的に差があるか検討した (表 2)。表中の数値は、rest 区間と tapping 区間の中央値 (四分位範囲; 25% 値 - 75% 値)、* $P < 0.05$ を示している。

その結果、 β 帯域律動波は、両側・正中の前頭・中心・頭頂部 (F3・Fz・F4・C3・Cz・C4・P3・Pz・P4) の感覚運動野全体に有意な振幅減少を認めた ($P < 0.05$)。low- γ 帯域律動波 30-45Hz では、正中前頭部 (Fz)、両側・正中中心部 (C3・Cz・C4)、正中・右頭頂部 (Pz・P4)、45-60Hz で両側・正中の前頭・中心部 (F3・Fz・F4・C3・Cz・C4)、正中・

右頭頂部 (Pz・P4) に振幅減少を認めた ($P < 0.05$) . 60Hz 以上の high- γ 帯域律動波 60-75Hz では左前頭部 (F3) , 両側・正中中心部 (C3・Cz・C4) , 75-90Hz では, 左中心部 (C3) に有意な振幅減少がみられた ($P < 0.05$) .

図 5b は, 外的ペース運動 5Hz の tapping 課題時の振幅変化の中央値 (表 3) を基に作成した頭皮上空間分布である. 赤が振幅増大, 青が振幅減少を示している. 統計上有意差はみられない部位も含めて振幅変化の拡がりを確認すると, 振幅増大は, θ 帯域律動波 4-8Hz で右前頭部 (F4) , 左・正中頭頂部 (P3・Pz) にみられたが, その他の α 帯域律動波, β 帯域律動波, low- γ 帯域律動波 30-45Hz・45-60Hz, high- γ 帯域律動波 60-75Hz・75-90Hz・90-105Hz・105-120Hz では感覚運動野全体 (F3・Fz・F4・C3・Cz・C4・P3・Pz・P4) に振幅減少がみられていた.

2.3.3 外的ペース運動1Hzと5Hzのtapping課題の違いによる感覚運動野の振幅変化の差

図 5 の頭皮上空間分布で統計上有意差がみられない部位も含めて振幅変化の拡がりを確認すると, 外的ペース運動 1Hz 時, θ 帯域律動波 4-8Hz と γ 帯域律動波 30-45Hz・60-105Hz に共通して振幅増大がある部位は両側・正中頭頂部 (P3・Pz・P4) であり, γ 帯域律動波 30-45Hz・60-105Hz に共通して振幅増大がみられる部位は正中前頭・中心・頭頂部と左中心部 (Fz・C3・Cz・Pz) であった. 一方, 外的ペース運動 5Hz の tapping 課題時, 振幅増大は θ 帯域律動波で右前頭部 (F4) , 左・正中頭頂部 (P3・Pz) にみられたが, その他の帯域では感覚運動野全体で振幅減少がみられていた. 頭皮上空間分布から, γ 帯域律動波 1Hz に比べて 5Hz では感覚運動野全体の振幅は減少傾向であった.

そこで, 外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題における周波数帯域律動波毎の rest 区間をベースラインとした tapping 区間の振幅変化の平均値について, 対応する頭皮上空

間分布毎に Wilcoxon の符号付順位和検定を行い、統計学的に差があるか検討した (表 3) . 表中の数値は, rest 区間と tapping 区間の中央値 (四分位範囲; 25% 値 - 75% 値), * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ を示している. その結果を表 3 に示す.

外的ペース運動 1Hz に比べて 5Hz では, θ 帯域律動波の振幅は右前頭部 (F4) で, 有意に増大が認められた ($P < 0.05$) (図 6) . 一方, γ 帯域律動波の振幅は, low- γ 帯域律動波 30-45Hz で正中中心部 (Cz) に (図 7) , high- γ 帯域律動波 60-75Hz で左・正中前頭部 (F3・Fz), 左・正中中心部 (C3・Cz), 正中頭頂部 (Pz) に, 105-120Hz で正中頭頂部 (Pz) に有意な減少が認められた ($P < 0.05$) (図 8) .

2.4 考察

本研究結果をまとめると, 外的ペース運動 1Hz の tapping 課題に比べて 5Hz では, i) 4-8Hz の θ 帯域律動波の振幅は右前頭部 (F4) で有意に増大すること, ii) γ 帯域律動波の振幅は low- γ 帯域律動波 30-45Hz で正中中心部 (Cz) , high- γ 帯域律動波 60-75Hz・75-90Hz・105-120Hz で左・正中前頭部 (F3・Fz), 左・正中中心部 (C3・Cz), 正中頭頂部 (Pz) で有意に減少することがわかった.

これらの結果から, 非常に早い外的ペース運動 5Hz での tapping 課題では, 右前頭部で θ 帯域律動成分が多数の神経細胞を興奮させ, 正中中心部の 30-45Hz の low- γ 帯域律動成分, 左・正中前頭部, 左・正中中心部, 正中頭頂部の 60-75Hz・75-90Hz・105-120Hz の high- γ 帯域律動成分は, 大脳皮質感覚運動野の神経細胞発火の抑制に働くことが示唆された.

γ 帯域律動波の振動は, EEG あるいは MEG 電極周囲の大脳皮質における神経細胞群の同期した活動とされ, 知覚, 注意, 記憶, 言語, 運動などの幅広い認知機能に伴い出現することが報告されている^{9,47)}. 一般的に, 運動前野は視覚・聴覚・体性感覚情報に誘導され活動がおこる領域とされているが, fMRI 研究では, 音に合わせた外的ペース運動を行っ

た場合には、皮質-運動側小脳-運動反対側の一次感覚運動野・運動前野に機能連関がおり、皮質領域では運動前野と一次感覚運動野が賦活する⁶⁾とされている。以上のことから、外的ペース運動 1Hz に比べると 5Hz の非常に速い運動では、時間的に感覚によるフィードバック制御が関与する余裕がないために、その結果として、大脳皮質の神経細胞の興奮に関与するとされる γ 帯域律動成分の出現がおこらなかったことが考えられた。

また、ラットの動物実験より、海馬での θ 波・ γ 波帯域律動成分の出現は、神経細胞の発火のタイミングと一致する⁴⁸⁾とされ、海馬は記憶に関与し、 γ 帯域律動波は大脳皮質の神経細胞の興奮に関与することから、 θ と γ 帯域律動成分の同期的出現は認知機能と関連していると考えられている。ヒトにおいても、健常人を対象とした MEG 研究の中で θ 帯域律動波や α 帯域律動波、 β 帯域律動波と γ 帯域律動波 30-60Hz が、ワーキングメモリーや感覚の統合処理に関与していることが報告されている⁴⁹⁾。以上のことから、外的ペース運動 5Hz 時の右前頭部における θ 帯域律動波の増大と γ 帯域律動波の減少は、努力性の非常に早い運動時の大脳皮質感覚運動野のフィードバック制御からの脱却と記憶や注意集中についての機能的意義を示唆しているのかもしれない。

第3章 自己ペース運動と外的ペース運動の違いによる感覚運動野の活動変化

3.1 背景と目的

第2章の結果より、外的ペース運動 1Hz に比べて 5Hz の tapping 課題では、i) 4-8Hz の θ 帯域律動波の振幅は右前頭部で有意に増大すること、ii) γ 帯域律動波の振幅は low- γ 帯域律動波 30-45Hz で正中中心部、high- γ 帯域律動波 60-75Hz・75-90Hz・105-120Hz で左・正中前頭部、左・正中中心部、正中頭頂部で有意に減少することがわかった。このことは、同じ外的ペース運動であっても運動頻度が異なると、周波数帯域律動波成分の出現においては、その空間分布と神経細胞の活動の違いがあることが考えられ、脳内ネットワークに差があることが示唆された。以上のことより、EEG における大脳皮質各周波数帯域律動波の振幅変化が脳内ネットワーク障害をみる指標となりうる可能性があると考えた。第2章では、外的ペース運動の運動頻度の違いにおける頭皮上空間分布の相違について調べたが、過去の健常成人における fMRI の研究^{6,41-42)}では、外的ペース運動は主に運動前野と小脳が関与するが、自己ペース運動では、補足運動野と大脳基底核が関与し、その脳内ネットワークに差があることが報告されている。

そこで、第3章では、若年健常成人の自己ペース運動時の微小律動成分を解析後に、自己ペース運動と外的ペース運動時の感覚運動野における周波数帯域律動成分とその出現部位の違いを明らかにし、2つの指標を用いた評価指標を作成することを目的とした。

第2章の結果から、外的ペース運動 5Hz での tapping 課題における EEG の周波数律動波の振幅は、大脳皮質感覚運動野で減少していたことから、自己ペース運動 5Hz でも振幅減少がおこる可能性が考えられたこと、5Hz の運動は努力性に非常に速い動きであり、将来的に患者への応用には困難であることが予測された。以上のことから、第3章では、1Hz の運動を外的ペースの指標に用いることを考え、自己ペース運動の設定は、1Hz をイメージした運動とした。

3.2 対象と方法

3.2.1 対象

健康成人 11 名を対象とした（平均年齢±標準偏差；31.5±7.2 歳，範囲 21-42 歳，女性 2 名，男性 9 名）。第 2 章で行った実験と同じ被検者を対象とし，自己ペース運動での実験は別日に行った。全ての被検者は，病歴に脳疾患がないこと，血圧が正常値であること，脳の興奮状態に影響するような服薬治療を行っていないことを条件とし，エジンバラ利き手テスト⁴⁵⁾で，右利きの者とした。実験開始前に，全ての被検者に対し，研究参加への理解に基づいた書面による同意をかわした後に実施した。なお本研究は，国際医療福祉大学研究倫理審査委員会から承認を受けた後に実施した（平成 24 年 12 月 27 日，承認番号：12-162）。

3.2.2 EEG 測定条件

右手指 tapping 課題時の大脳感覚運動野の EEG を測定した。被検者の姿勢は，頭頸部が動かないように，両足底が床に接地した腰かけ椅座位⁴⁶⁾で，前方のテーブルで両前腕，顎は顎台で支持した。このとき，開眼し，視線を一定の位置に保持すること，できる限り瞬きをしないように指示した。tapping 課題は，外的刺激音なしの自己ペース運動で示指の屈曲・伸展を行わせた。前述したように，自己ペース運動は 1Hz をイメージして行うように指示した。自己ペース運動 1Hz は，計測当日に手指の連続運動が可能になるまで練習を行った（練習は平均 30 秒）。EEG 記録中に，被検者が正確な運動頻度で tapping 課題を行っているかを把握するために，示指先端にスイッチ，第 1 背側骨間筋に電極を取り付け，タイミングと筋電図をデジタル信号で EEG 計にとり込み，モニタリングした。rest 区間を 30 秒，その後の tapping 区間を 20 秒，計 50 秒を 1 試行として，連続 5 試行のブロックデザインとした。運動開始および終了は音声で合図した。

3.2.3 EEG 記録方法

記録計は、デジタル脳波計 Neurofax EEG-4524（日本光電製）を使用した。国際 10-20 法（図 1）に従い、頭皮上の Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5, T6, Pz, Cz, Fz, Oz から同時記録した。基準電極は鼻尖 Z とし、サンプリング周波数 500Hz, 低域遮断周波数 0.53Hz, 高域遮断周波数 120Hz の記録条件とした。

3.2.4 分析

脳波計からアナログ出力された脳波データをパーソナルコンピューター（dynabook satellite T31 186C/5W, 東芝製）に取り込んだ。課題中の全体的な特徴をみるために、被検者毎の rest 区間と tapping 区間について頭皮上空間分布毎の EEG の振幅平均を算出した。

その方法は、図 2 に示すように課題中の EEG 時系列を 2 秒ごと、25 区間に区切り、各区間に対して高速フーリエ変換（fast fourier transform: FFT）を用いて power spectrum を算出後に、同帯域の振幅を計算した。その振幅は、power spectrum の任意帯域（ f_1 - f_2 Hz 帯域）の面積を S として、 $A=4\sqrt{S}$ [μ V] の計算式に基づいて算出した。各周波数帯域は、 θ 波（4-8Hz）、 α 波（8-14Hz）、 β 波（14-30Hz）、low- γ 波（30-45Hz, 45-60Hz）、high- γ 波（60-75Hz, 75-90Hz, 90-105Hz, 105-120Hz）の 9 つに分類し、被検者データそれぞれに対して、各周波数帯域の頭皮上空間分布毎に、rest 区間および tapping 区間の振幅を 50 回加算平均した。ブロックデザイン各試行の開始点は、指先のスイッチから記録された最初のデジタル信号が入力された時刻とした（図 2）。

算出された振幅は、2段階に分けて評価した。まず、自己ペース運動 1Hz の tapping 課題時の感覚運動領域の振幅変化を確認するために、頭皮上空間分布毎の rest 区間と tapping 区間の振幅平均を算出し、統計学的に検討した。その後、rest 区間をベースラインとした tapping 区間の振幅変化の平均を算出し、第 2 章の外的ペース運動 1Hz の tapping 課題時の結果

と比較するために、頭皮上空間分布毎に統計処理を行った。統計学的検定は、統計ソフト (Dr.SPSS 22.0 J for windows) を使用して、Shapiro-Wilk検定にて2群の正規性を確認した後、Wilcoxonの符号付順位和検定を行った。有意水準 (P) は5%未満とし、 $P < 0.05$ であるものを有意差があるとした。

3.3 結果

3.3.1 自己ペース運動1Hzのtapping課題における感覚運動野の振幅変化

図9は、自己ペース運動1Hzのtapping課題時のrest区間とtapping区間の総加算波形である。被検者11名の原波形データをパーソナルコンピュータに取り込み、時系列に加算平均して作成した。また、被検者11名の自己ペース運動1Hzのtapping課題のrest区間とtapping区間の平均について、対応する頭皮上空間分布毎にWilcoxonの符号付順位和検定を行い、統計的に差があるか検討した (表4)。表中の数値は、rest区間とtapping区間の中央値 (四分位範囲; 25%値 - 75%値)、* $P < 0.05$ を示している。その結果、統計上、有意な差は認められなかった。

図10aは、自己ペース運動1Hzのtapping課題時の振幅変化の中央値で作成した頭皮上空間分布である。統計上有意差は認められなかったが、振幅変化の拡がりを確認すると、 θ 帯域律動波 4-8Hz で Fz・F4・C3・C4・P3・Pz・P4 に、 β 帯域律動波 14-30Hz で F4、low- γ 帯域律動波 30-45Hz で P3、45-60Hz で F3・Fz・F4・C3・Cz・C4・P3・Pz、high- γ 帯域律動波 75-90Hz で F3・Fz・F4・C3・Cz・C4・P3・Pz・P4、90-105Hz で F3・C3・P3・Pz、105-120Hz で F3・Fz・F4・C3・Cz・P3・Pz・P4 に振幅増大がみられていた。

3.3.2 自己ペース運動 1Hz と外的ペース運動 1Hz の tapping 課題の違いによる感覚運動野の振幅変化の差

図 10 は、自己ペース運動 1Hz と外的ペース運動 1Hz での tapping 課題時の各周波数帯域律動波の rest 区間と tapping 区間の差を振幅変化とし、被検者 11 名の振幅変化の平均を算出後、その中央値で作成した頭皮上空間分布である。この振幅変化の中央値を表 5 に示す。赤が振幅増大、青が振幅減少を示している。図中の矢印は、自己ペース運動 1Hz と外的ペース運動 1Hz での tapping 課題で、対応する頭皮上空間分布毎に各周波数の平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果、 $P < 0.05$ である周波数帯域を示している。

自己ペース運動 1Hz と外的ペース運動 1Hz での tapping 課題における周波数帯域律動波毎の tapping 区間と rest 区間の差を振幅変化の基準とし、被検者 11 名の平均値を統計学的に検討した。その結果を表 5 に示す。

外的ペース運動に比べて自己ペース運動では、low- γ 帯域律動波 45-60Hz は右中心部 (C4) で有意に振幅増大がみられた ($P < 0.05$) (図 11)。外的ペース運動に比べ自己ペース運動では、high- γ 帯域律動波 75-90Hz は両側・正中の前頭・中心部 (F3・Fz・F4・C3・Cz・C4) で、自己ペース運動に比べて外的ペース運動では、両側・正中頭頂部 (P3・Pz・P4) で振幅増大が認められた ($P < 0.01$) (図 12)。

3.4 考察

本研究結果をまとめると、i) 外的ペース運動 1Hz に比べて自己ペース運動 1Hz では、low- γ 帯域律動波 45-60Hz の振幅は右中心部 (C4)、high- γ 帯域律動波 75-90Hz では両側・正中前頭・中心部 (F3・Fz・F4・C3・Cz・C4) に有意な増大がみられること、ii) 自己ペース運動 1Hz に比べて外的ペース運動 1Hz では、両側・正中頭頂部 (P3・Pz・P4) に有意な振幅増大がみられることがわかった。

これらの結果から、自己ペース運動1Hzのtapping課題では、右中心部に45-60Hzのlow- γ 帯域律動成分、両側・正中の前頭・中心部に75-90Hzのhigh- γ 帯域律動成分が出現し、前頭・中心部の多数の神経細胞を興奮させることが推察された。一方、外的ペース運動1Hzのtapping課題では、両側・正中頭頂部に75-90Hzのhigh- γ 帯域律動成分が出現し、多数の神経細胞を興奮させることが示唆された。

MEG研究より、視覚または聴覚において提示された知覚刺激への注意集中が必要な課題は、注意集中を必要としない課題よりも γ 帯域反応を増大させることが報告されている²³⁾。以上のことから、外的ペース運動1Hzでの両側・正中頭頂部の75-90Hzの γ 帯域律動波の振幅増大は、頭頂側頭連合野での音と体性感覚野の機能統合に関与していることが考えられる。一方、自己ペース運動1Hzでは、自らタイミングを計る必要があり、注意深くリズムを刻むために運動前野、補足運動野、一次感覚野の感覚運動野に神経細胞興奮が必要であったことが考えられた。

また、 γ 帯域律動波は、大脳皮質の機能連関に重要な役割を果たしているが、もともと皮質回路連絡は、興奮性伝達物質であるグルタミン酸が皮質-皮質間あるいは皮質-皮質下構造の連絡を担う錐体ニューロンと、抑制性伝達物質である γ アミノ酪酸（GABA）が関与する皮質局所における周囲の神経細胞の活動抑制の役割を担う抑制性シナプスが関与していると考えられている⁴⁷⁾。このグルタミン酸による興奮性伝達の遮断の効果は実験状況により一致しないが、 γ 帯域律動波の周期的活動がGABA伝達のブロックにより明らかとなっていることや、介在ニューロンによりつくられるネットワークが効率的に γ 帯域律動波の周期的活動を形成することが報告⁴⁷⁻⁵¹⁾され、 γ 帯域律動波の周期的活動には介在ニューロンによるGABA伝達が中心的役割を担うとされている。以上のことから、自己ペース運動と外的ペース運動では、異なる部位や周波数帯域で、この介在ニューロンの働きがおこなわれていることが示唆される。したがって、本研究結果を基に、大脳皮質顆粒細胞層の神経細胞が活

性化されている^{32-33,52)} DSや脳室白質軟化症などの生存例における随意運動時の微細脳活動の変化を記録して、今回の結果と比較することで、運動機能異常の病態解明とその代償的变化を明らかにできる可能性がある。

本結果から、 γ 帯域律動成分など脳の微細な電位変化が脳活動の指標となり、この活動変化や頭皮上空間分布を検討することで、脳機能連関の詳細を明らかにできると考えられる。

第4章 結論

本研究結果は、感覚運動野の活動変化について、(1) 外的ペース運動1Hzと5Hzのtapping課題時それぞれのrest区間とtapping区間の振幅変化の差、外的ペース運動1Hzと5Hzのtapping課題における振幅変化の差、(2) 外的ペース運動1Hzと自己ペース運動1Hzのtapping課題における振幅変化の差についてEEGの各周波数帯域律動波を頭皮上空間分布毎に明らかにした。

(1) の外的ペース運動 1Hz では、tapping 課題時の β 帯域律動波の振幅は、左前頭部でのみ有意に減少していた。外的ペース運動 5Hz では、 β 帯域律動波の振幅は感覚運動野全体に、low- γ 帯域律動波 30-45Hz は正中前頭部、両側・正中中心部、右・正中頭頂部に、45-60Hz は両側・正中の前頭・中心部、右・正中頭頂部に、有意な振幅減少が認められた。また、60Hz 以上の high- γ 帯域律動波の振幅は、60-75Hz で左前頭部、両側・正中中心部に、75-90Hz で、左中心部に有意な減少が認められた。それぞれの課題における差を確認後に、外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題における振幅変化の差を比較すると、外的ペース運動 1Hz に比べて 5Hz では、 θ 帯域律動波 4-8Hz で右前頭部に有意な振幅増大が認められた。一方、 γ 帯域律動波は、low- γ 帯域律動波 30-45Hz で正中中心部に、high- γ 帯域律動波 60-75Hz・75-90Hz・105-120Hz で左・正中前頭部、左・正中中心部、正中頭頂部に有意な振幅減少が認められた。以上、第2章の結果から、外的ペース運動 1Hz に比較して 5Hz では、60-75Hz の high- γ 帯域律動波の振幅が左前頭・中心部と正中前頭・中心・頭頂部にかげ減少することが明らかとなり、5Hz の速い運動では EEG γ 帯域律動波の活動は減少することが示唆された。

(2) の自己ペース運動1Hzと外的ペース運動1Hzのtapping課題における振幅変化の差を比較すると、外的ペース運動1Hzに比べて自己ペース運動1Hzでは、low- γ 帯域律動波45-60Hzで右中心部に有意な振幅減少がみられ、high- γ 帯域律動波75-90Hzで両側・正中の

前頭・中心部に有意な振幅増大がみられた。一方、自己ペース運動1Hzに比べて外的ペース運動1Hzでは、両側・正中頭頂部で有意な振幅増大が認められた。外的ペース運動1Hzと自己ペース運動1Hzでは、 θ ・ α ・ β 帯域律動波に違いはみられないが、 γ 帯域律動波では部位別に異なる振幅変化がおこっていた。以上、第3章の結果から、 γ 帯域律動波は、45-60Hzで自己ペース運動に、75-90Hzでは部位別に自己ペース運動と外的ペース運動に関与し、周波数帯域によって異なる機能的役割を担うことが示唆された。

本研究の結果から、自己ペース運動1Hz、外的ペース運動1Hz、外的ペース運動5Hzで、 θ 帯域律動波、 β 帯域律動波、 γ 帯域律動波の脳内分布が異なり、特に、 γ 帯域律動波はlow- γ 帯域律動波とhigh- γ 帯域律動波でも賦活部位が異なることがわかった。脳の活動を反映するといわれているhigh- γ 帯域律動波が自己ペース運動1Hz時に前頭・中心部で振幅増大し、外的ペース運動1Hzでは頭頂部で増大していた。この結果は、自己ペース運動時に必要な脳内ネットワークと外的ペース運動で働く場合の脳内ネットワークが異なることを示していると考えられる。このことは、临床上、パーキンソン病で認められる外的ペースによる運動の改善という現象に関連している可能性を示唆するものとして新規性がある。

更に、 γ 帯域律動波は介在ニューロンと関係深いといわれており、著者が以前の研究で確認したDSや脳室周囲白質軟化症における大脳皮質顆粒細胞層でのPGP9.5抗体の発現増加という脳可塑性の評価にも、今回のEEG γ 帯域律動成分分析が臨床利用できると考えられ、更に発展させたい。

謝辞

本研究は、国際医療福祉大学医療福祉学研究科・保健医療学専攻・リハビリテーション学分野において行われたものである。

研究の取り組みから論文作成に際し、終始懇切丁寧なご指導と多大なるご助言を頂きました。国際医療福祉大学大学院 高嶋幸男 教授、後藤純信 教授に心より感謝致します。

本研究をすすめるにあたって、工学の立場から多大なる御協力・御助言を頂きました佐賀大学大学院 後藤和彦 先生に心より感謝致します。

本研究の推進にあたって、多くの御協力を頂きました国際医療福祉大学 池田拓郎 先生、八女リハビリ病院 福田裕樹 先生、佐賀大学理工学部電気電子工学科システム制御研究室の皆様に深く感謝申し上げます。

また、専門学校柳川リハビリテーション学院でご協力頂いた理学療法学科の先生方（代表、学科長 横尾正博 先生）に深謝致します。

文献一覧

- 1) Bear MF, Connors BW, Paradiso MA. (加藤宏司・後藤薫・藤井聡・他監訳). 神経科学:脳
の探究, 東京:西村書店, 2007:351
- 2) Allen GI, Tsukahara N. Cerebrocerebellar communication systems. *Physiol Rev.* 1974;54:
957-1006
- 3) Kelly RM, Strick PL. Cerebellar loops with motor cortex and prefrontal cortex of a nonhuman
primate. *J Neurosci.* 2003;23:8432-8444
- 4) Alexander GE, Crutcher MD. Functional architecture of basal ganglia circuits: neural
substrates of parallel processing. *Trends Neurosci.* 1990;13:266-271
- 5) DeLong MR. Primate models of movement disorders of basal ganglia origin. *Trends Neurosci.*
1990;13:281-285
- 6) Taniwaki T, Okayama A, Yoshiura T, et al. Age-related alterations of the functional
interactions within the basal ganglia and cerebellar motor loops in vivo. *NeuroImage.*
2007;36:1263-1276
- 7) Patel AD, Iversen JR. The evolutionary neuroscience of musical beat perception: the Action
Simulation for Auditory Prediction (ASAP) hypothesis. *Front Syst Neurosci.* 2014;8:57
- 8) Repp BH. Sensorimotor synchronization: a review of the tapping literature. *Psychon Bull Rev.*
2005;12:969-992
- 9) Rieder MK, Rahm B, Williams JD, et al. Human γ -band activity and behavior. *Int J*
Psychophysiol. 2011;79:39-48
- 10) Berger H. Uber das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Arch Psychiatr Nervenkr.* 1929;87:
527-570
- 11) Creutzfeldt OD, Watanabe S, Lux HD. Relations between EEG phenomena and potentials of

- single cortical cells. II. Spontaneous and convulsoid activity. *Electroencephalogr clin Neurophysiol.* 1966;20:19-37
- 12) 加藤元博. 脳波律動の発現機構 (I). *臨床脳波* 1998;40:399-405
- 13) 柴崎浩. 脳波の合理的な判読法. *臨床脳波* 1974;16:304-313
- 14) Engel J. *Seizures and Epilepsy.* Philadelphia: FA Davis Co, 1989:62
- 15) Steriade M, Curro Dossi R, Nunez A. Network modulation of a slow intrinsic oscillation of cat thalamocortical neurons implicated in sleep delta waves: Cortically induced synchronization and brainstem cholinergic suppression. *J Neurosci.* 1991;11:3200-3217
- 16) 加藤元博. 脳波律動の発現機構 (II). *臨床脳波* 1998;40:467-473
- 17) Buzsaki G. Hippocampal sharp waves: their origin and significance. *Brain Res.* 1986;398:242-252
- 18) Lopes da Silva FH, Vos JE, Mooibroek J, et al. Relative contributions of intracortical and thalamocortical processes in the generation of alpha rhythms, revealed by partial coherence analysis. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.* 1980;50:449-456
- 19) Lehmann D. Multichannel topography of human alpha EEG fields. *Electroencephalogr clin Neurophysiol.* 1971;31:439-449
- 20) Steriade M, Dossi RC, Pare D, et al. Fast oscillations (20-40Hz) in thalamocortical systems and their potentiation by mesopontine cholinergic nuclei in the cat. *Proc Natl Acad Sci USA.* 1991;88:4396-4400
- 21) Bragin A, Jandó G, Nádasdy Z, et al. Gamma (40-100Hz) oscillation in the hippocampus of the behaving rat. *J Neurosci.* 1995;15:47-60
- 22) Eckhorn R, Bauer R, Jordan W, et al. Coherent oscillations: a mechanism of feature linking in the visual cortex? Multiple electrode and correlation analyses in the cat. *Biol Cybern.*

1988;60:121-130

- 23) Bauer M, Oostenveld R, Peeters M et al. Tactile spatial attention enhances gamma-band activity in somatosensory cortex and reduces low-frequency activity in parieto-occipital areas. *J Neurosci.* 2006;13:490-501
- 24) Tecchio F, Graziadio S, Barbati G. Somatosensory dynamic gamma-band synchrony: a neural code of sensorimotor dexterity. *Neuroimage.* 2007;35:185-193
- 25) Miller KJ, Leuthardt EC, Schalk G, et al. Spectral changes in cortical surface potentials during motor movement. *J Neurosci.* 2007;27:2424-2432
- 26) Burke SN, Barnes CA. Neural plasticity in the ageing brain. *Nat Rev Neurosci.* 2006;7:30-40
- 27) Conway BA, Halliday DM, Farmer SF, et al. Synchronization between motor cortex and spinal motoneuronal pool during the performance of a maintained motor task in man. *J Physiol.* 1995;489:917-924
- 28) 美馬達哉. 脳波-筋電図コヒーレンスとその臨床応用. *臨床脳波* 2005;47:479-485
- 29) Volkmann J, Joliot M, Mogilner A, et al. Central motor loop oscillations in parkinsonian resting tremor revealed by magnetoencephalography. *Neurology.* 1996;46:1359-1370
- 30) Timmermann L, Gross J, Dirks M, et al. The cerebral oscillatory network of parkinsonian resting tremor. *Brain.* 2003;126:199-212
- 31) Mima T, Simpkins N, Oluwatimilehin T, et al. Force level modulates human cortical oscillatory activities. *Neurosci Lett.* 1999;275:77-80
- 32) 高嶋美和, 甲斐悟, 高橋精一郎ら. ダウン症候群の発達遅滞と早発認知症における大脳の可塑性に関する脳病理学的研究. *理学療法科学* 2011;26:347-352
- 33) Takashima M, Takahashi S, Iwata O, et al. Neuronal plasticity in the developing and aging cerebral cortices of patients with Down syndrome. *Int J Neurorehabilitation* 2014;1-11

- 34) Takashima S, Becker LE, Armstrong DL, et al. Abnormal neuronal development in the visual cortex of the human fetus and infant with Down's syndrome. *Brain Res.* 1981;225:1-21
- 35) van Donkelaar P, Stein JF, Passingham RE, et al. Neuronal activity in the primate motor thalamus during visually triggered and internally generated limb movements. *J Neurophysiol.* 1999;82:934-945
- 36) van Donkelaar P, Stein JF, Passingham RE, et al. Temporary inactivation in the primate motor thalamus during visually triggered and internally generated limb movements. *J Neurophysiol.* 2000;83:2780-2790
- 37) Ivry RB, Keele SW, Diener HC. Dissociation of the lateral and medial cerebellum in movement timing and movement execution. *Exp Brain Res.* 1988;73:167-80
- 38) Pastor MA, Jahanshahi M, Artieda J, et al. Performance of repetitive wrist movements in Parkinson's disease. *Brain.* 1992;115:875-891
- 39) O'Boyle DJ, Freeman JS, Cody FW. The accuracy and precision of timing of self-paced, repetitive movements in subjects with Parkinson's disease. *Brain.* 1996;119:51-70
- 40) Kelly RM, Strick PL. Cerebellar loops with motor cortex and prefrontal cortex of a nonhuman primate. *J Neurosci.* 2003;23:8432-8444
- 41) Taniwaki T, Okayama A, Yoshiura T, et al. Reappraisal of the motor role of basal ganglia: a functional magnetic resonance image study. *J Neurosci.* 2003;23:3432-3438
- 42) Taniwaki T, Okayama A, Yoshiura T, et al. Functional network of the basal ganglia and cerebellar motor loops in vivo: different activation patterns between self-initiated and externally triggered movements. *Neuroimage.* 2006;31:745-753
- 43) Calautti C, Serrati C, Baron JC. Effects of age on brain activation during auditory-cued

- thumb-to-index opposition: A positron emission tomography study. *Stroke*. 2001;32:139-146
- 44) Smith CD, Umberger GH, Manning EL, et al. Critical decline in fine motor hand movements in human aging. *Neurology*. 1999;53:1458-1461
- 45) Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*. 1971;9:97-113
- 46) 鬼頭伸和, 五木田健, 伊藤智式. 運動準備電位と筋力発揮の調節. 愛知教育大学研究報告 1998;47:13-18
- 47) 橋本隆起. γ 帯域オシレーション. 分子精神医学 2008;8:253-256
- 48) Buzsaki G. Hippocampal sharp waves: their origin and significance. *Brain Res*. 1986;398:242-252
- 49) 石井良平, 鵜飼聡, 栗本龍, 他. 律動脳波の MEG 研究. 臨床脳波 2005;47:349-356
- 50) Lewis DA. Inhibitory neurons in human cortical circuits: substrate for cognitive dysfunction in schizophrenia. *Curr Opin Neurobiol*. 2014;26:22-26
- 51) Bartos M, Vida I, Jonas P. Synaptic mechanisms of synchronized gamma oscillations in inhibitory interneuron networks. *Nat Rev Neurosci*. 2007;8:45-56
- 52) 中林紘二, 水野健太郎, 兒玉隆之ら. 脳室周囲白質軟化症における脳の可塑性と神経再生に関する免疫組織化学的研究. 理学療法科学 2009;24:733-736
- 53) 福澤 等. ポケット臨床脳波. 第 1 版. 東京:日本医事新報社, 2005:144

図の説明

図1 国際 10-20 法による電極配置

記録電極は国際 10-20 法に基づく頭皮上空間分布を図式化したものである。Fp1, Fp2, F3, F4, C3, C4, P3, P4, O1, O2, F7, F8, T3, T4, T5, T6, Pz, Cz, Fz, Oz から同時記録するものである。

図2 power spectrum の算出方法

power spectrum は、課題中の EEG 時系列を 2 秒ごと、25 に区切り、各区间に対して高速フーリエ変換 (FFT) して導出する。25 区分の最初の 10 区分が tapping 区間で、その後の 15 区分が rest 区間である。power spectrum の任意帯域 (f1-f2Hz 帯域) の面積を S とすると、同帯域の振幅は、 $A=4\sqrt{S}$ [μV] となる。この数式で振幅を算出し、各セットの始点は最初の tapping が行われた時刻としている。

図3 外的ペース運動1Hzのtapping課題時のrest区間とtapping区間の総加算波形

n=11. 外的ペース運動1Hzのtapping課題時のrest区間とtapping区間の総加算波形である。aは、rest区間を総加算したベースラインとなる波形である。bは、外的ペース運動1Hzでのtapping区間の総加算波形である。

表1 外的ペース運動 1Hz の tapping 課題による感覚運動野の振幅変化

n=11. 対応する頭皮上空間分布毎に各周波数帯域律動波の rest 区間と tapping 区間の振幅平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である。数値は中央値(四分位範囲; 25%値 - 75%値), 有意水準 (P) を * $P < 0.05$ で示す。

β 帯域律動波の振幅は、左前頭部 (F3) で有意な減少が認められている ($P < 0.05$) 。

図 4 外的ペース運動 5Hz の tapping 課題時の rest 区間と tapping 区間の総加算波形

n=11. 外的ペース運動5Hzのtapping課題のrest区間とtapping区間の総加算波形である。
aは、rest区間を総加算したベースラインとなる波形である。bは、外的ペース運動5Hzでのtapping区間の総加算波形である。

表 2 外的ペース運動 5Hz の tapping 課題による感覚運動野の振幅変化

n=11. 対応する頭皮上空間分布毎に各周波数帯域律動波の rest 区間と tapping 区間の振幅平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である。数値は中央値（四分位範囲; 25%値 - 75%値），有意水準（P）を * $P < 0.05$ ，** $P < 0.01$ で示す。

β 帯域律動波の振幅は，両側・正中の前頭・中心・頭頂部（F3・Fz・F4・C3・Cz・C4・P3・Pz・P4）の感覚運動野全体に有意な減少を認めている（ $P < 0.05$ ）。low- γ 帯域律動波の振幅は，30-45Hz で正中前頭部（Fz），両側・正中中心部（C3・Cz・C4），正中・右頭頂部（Pz・P4），45-60Hz で両側・正中の前頭・中心部（F3・Fz・F4・C3・Cz・C4），正中・右頭頂部（Pz・P4）に有意な減少が認められる（ $P < 0.05$ ）。60Hz 以上の high- γ 帯域律動波の振幅は，60-75Hz では左前頭部（F3），両側と正中中心部（C3・Cz・C4），75-90Hz では左中心部（C3）に有意な減少が認められる（ $P < 0.05$ ）。

図 5 外的ペース運動 1Hz と 5Hz 時の各周波数帯域律動波の頭皮上空間分布

n=11. mapping は中央値で作成している。中央値は表 3 に示す。矢印は，外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題で，対応する頭皮上空間分布毎に各周波数の振幅変化量の平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果， $P < 0.05$ である周波数帯域を示している。赤が振幅増大，青が振幅減少を示している。a は外的ペース運動 1Hz の tapping 課題時，b は外的ペース運動 5Hz の tapping 課題時のものである。

表 3 外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題による振幅変化の差

n=11. 外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題で、対応する頭皮上空間分布毎に各周波数帯域律動波の振幅変化量の平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である。数値は中央値（四分位範囲; 25%値 - 75%値）、有意水準 (P) を *P<0.05, **P<0.01 で示す。

外的ペース運動 1Hz に比べて 5Hz では、 θ 帯域律動波の振幅は右前頭部 (F4) で有意な増大が認められる (P<0.05)。外的ペース運動 1Hz に比べて 5Hz では、 γ 帯域律動波の振幅が減少する。low- γ 帯域 30-45Hz は正中中心部 (Cz) に、high- γ 帯域律動波 60-75Hz は左・正中前頭部 (F3・Fz)、左・正中中心部 (C3・Cz)、正中頭頂部 (Pz) に、105-120Hz は正中頭頂部 (Pz) に有意な振幅減少が認められる (P<0.05)。

図 6 外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題時の θ 帯域律動波振幅の差

n=11. 外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題で、 θ 帯域律動波 4-8Hz の F4 における振幅変化量の平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である。箱の中央は中央値、箱の上限・下限は四分位範囲 75%値・25%値、ひげの上限・下限は最大値・最小値を示している。有意水準 (P) を *P<0.05 で示す。

外的ペース 1Hz に比べて 5Hz では右前頭部 (F4) に振幅増大がみられる (P<0.05)。

図 7 外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題時の low- γ 帯域律動波 (30-45Hz)

振幅の差

n=11. 外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題で、low- γ 帯域律動波 30-45Hz の Cz における振幅変化量の平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である。箱の中央は中央値、箱の上限・下限は四分位範囲 75%値・25%値、ひげの上限・下限は最大値・最小値を示している。有意水準 (P) を *P<0.05 で示す。

外的ペース運動 1Hz に比べて 5Hz では、正中中心部 (Cz) で有意な振幅減少が認められる ($P < 0.05$) .

図 8 外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題時の high- γ 帯域律動波振幅の差

n=11. 外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題で、high- γ 帯域律動波 60-75Hz の F3・Fz・C3・Cz・Pz, 75-90Hz の Fz, 90-105Hz の Pz における振幅変化量の平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である。箱の中央は中央値、箱の上限・下限は四分位範囲 75% 値・25% 値、ひげの上限・下限は最大値・最小値を示している。有意水準(P)を * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ で示す。

外的ペース運動 1Hz に比べて 5Hz では、high- γ 帯域律動波 60-75Hz は左・正中前頭部 (F3, Fz), 左・正中中心部 (C3・Cz) に、75-90Hz は正中前頭部 (Fz) に、90-105Hz は正中頭頂部 (Pz) に有意な振幅減少が認められる ($P < 0.05$, $P < 0.01$) .

図 9 自己ペース運動 1Hz の tapping 課題時の rest 区間と tapping 区間の総加算波形

n=11. 自己ペース運動 1Hz の tapping 課題の rest 区間と tapping 区間の総加算波形である。a は rest 区間を総加算したベースラインとなる波形である。b は、自己ペース運動 1Hz での tapping 区間の総加算波形である。

表 4 自己ペース運動 1Hz の tapping 課題による振幅変化

n=11. 対応する頭皮上空間分布毎に各周波数の rest 区間と tapping 区間の振幅平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である。数値は中央値 (四分位範囲; 25% 値 - 75% 値) を示す。有意差は認められない。

図 10 自己ペース運動 1Hz と外的ペース運動 1Hz の tapping 課題時の各周波数帯域律動波の頭皮上空間分布

n=11. mapping は中央値で作成している. 中央値は表 5 に示す. 矢印は, 自己ペース運動 1Hz と外的ペース運動 1Hz の tapping 課題で, 対応する頭皮上空間分布毎に各周波数の振幅変化量の平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果, $P < 0.05$ である周波数帯域を示している. 赤は, 振幅増大, 青は振幅減少を示している. a は, 自己ペース運動 1Hz をイメージした tapping 運動課題時, b は外的ペース運動 1Hz の tapping 課題時のものである.

表 5 自己ペース (SI) 運動 1Hz と外的ペース (ET) 運動 1Hz の tapping 課題による振幅変化の差

n=11. SI 運動 1Hz と ET 運動 1Hz の tapping 課題で, 対応する頭皮上空間分布毎に各周波数の振幅変化量の平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である. 数値は中央値 (四分位範囲; 25%値 - 75%値), 有意水準 (P) を * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ で示す.

ET 運動 1Hz に比べて SI 運動 1Hz では, low- γ 帯域律動波 45-60Hz は右中心部 (C4) に有意な振幅増大がみられる ($P < 0.05$). ET 運動 1Hz に比べ SI 運動 1Hz では, high- γ 帯域律動波 75-90Hz は両側・正中の前頭・中心部 (F3・Fz・F4・C3・Cz・C4) に, SI 運動 1Hz に比べて ET 運動 1Hz では, 両側・正中頭頂部 (P3・Pz・P4) に有意な振幅増大が認められる ($P < 0.01$).

図 11 自己ペース (SI) 運動 1Hz と外的ペース (ET) 運動 1Hz の tapping 課題時の low- γ 帯域律動波 (45-60Hz) 振幅の差

n=11. SI 運動 1Hz と ET 運動 1Hz の tapping 課題で, low- γ 帯域律動波 45-60Hz の C4 に

における振幅変化量の平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である。箱の中央は中央値，箱の上限・下限は四分位範囲 75%値・25%値，ひげの上限・下限は最大値・最小値を示している。有意水準 (P) を * $P < 0.05$ で示す。

外的ペース運動 1Hz に比べて自己ペース運動 1Hz では，low- γ 帯域律動波 45-60Hz は右中心部 (C4) で，振幅増大がみられる ($P < 0.05$) 。

図 12 自己ペース (SI) 運動 1Hz と外的ペース (ET) 運動 1Hz の tapping 課題時の high- γ 帯域律動波 (75-90Hz) 振幅の差

n=11. SI 運動 1Hz と ET 運動 1Hz の tapping 課題で，high- γ 帯域律動波 75-90Hz の F3・Fz・F4・C3・Cz・C4・P3・Pz・P4 における振幅変化量の平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である。箱の中央は中央値，箱の上限・下限は四分位範囲 75%値・25%値，ひげの上限・下限は最大値・最小値を示している。有意水準 (P) を * $P < 0.05$ ，** $P < 0.01$ で示す。

外的ペース運動 1Hz に比べて自己ペース運動 1Hz では，high- γ 帯域律動波 75-90Hz は両側・正中の前頭・中心部 (F3・Fz・F4・C3・Cz・C4) に，自己ペース運動 1Hz に比べて外的ペース運動 1Hz で，両側・正中頭頂部 (P・Pz・P4) に有意な振幅増大が認められる ($P < 0.01$) 。

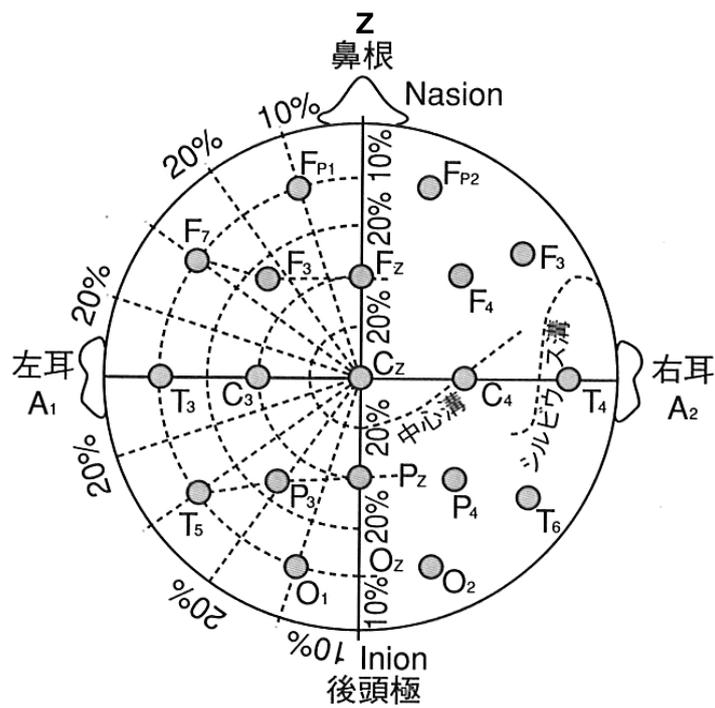


図1 国際10-20法による電極配置⁵³⁾

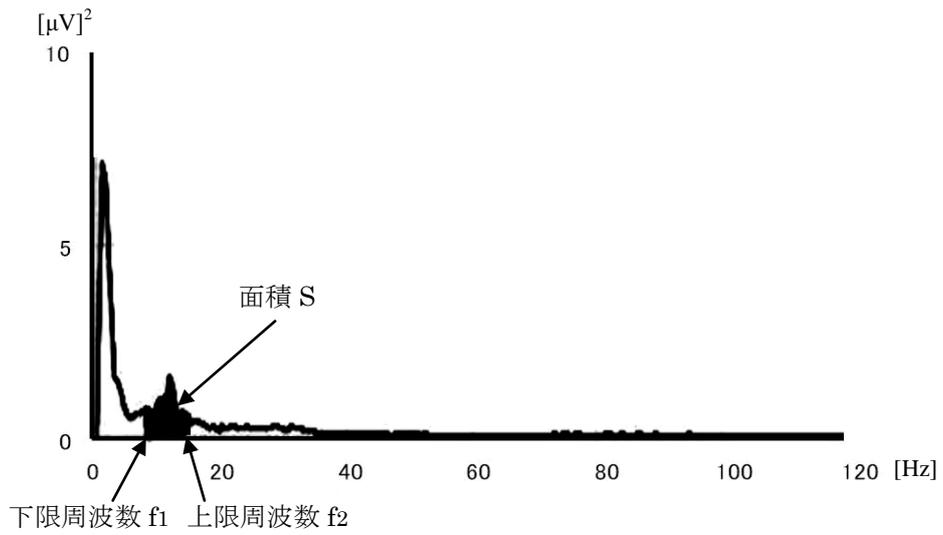
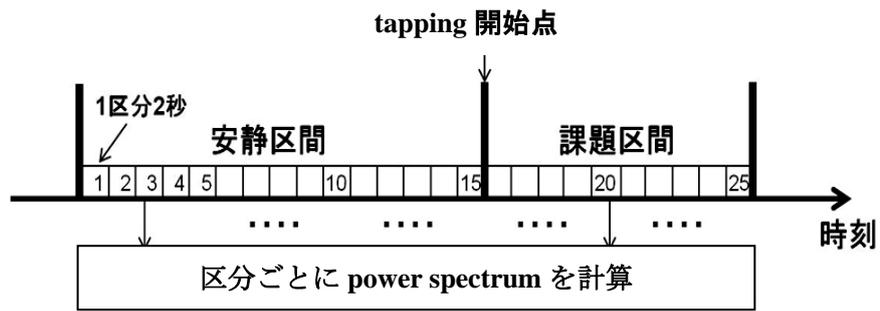
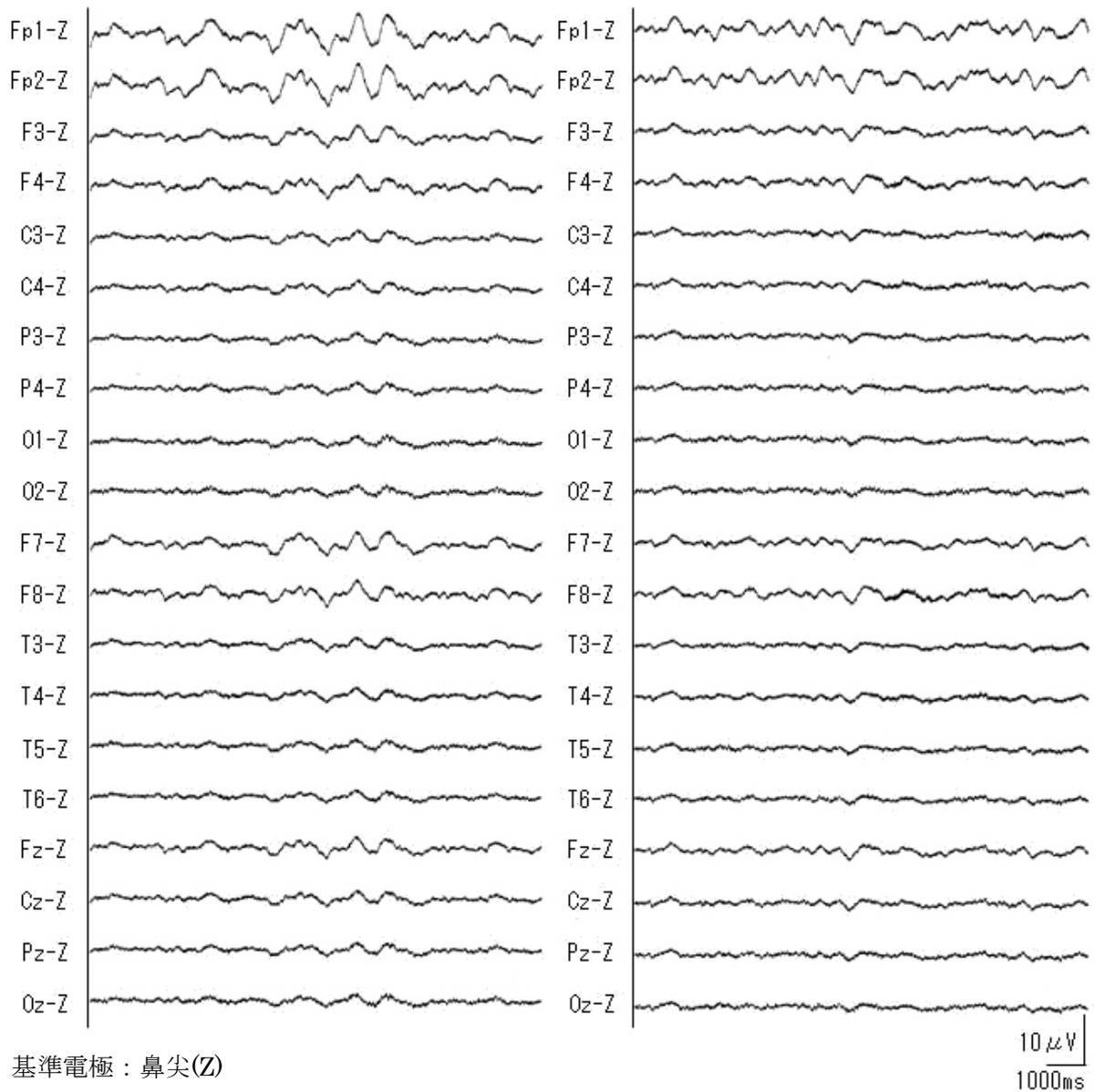


図 2 power spectrum の算出方法

a. rest

b. 外的ペース運動1Hzのtapping



基準電極：鼻尖(Z)

図3 外的ペース運動1Hzのtapping課題時のrest区間とtapping区間の総加算波形 (n=11)

表1 外的ペース運動 1Hz の tapping 課題による感覚運動野の振幅変化

frequency (Hz)	F3		Fz		F4	
	rest	tapping	rest	tapping	rest	tapping
4-8	7.264(5.859 - 9.627)	6.743(5.267 - 9.410)	8.407(6.675 - 10.426)	7.153(6.498 - 10.592)	8.423(5.644 - 9.749)	6.903(5.291 - 9.744)
8-14	5.377(4.709 - 5.713)	5.013(4.430 - 5.540)	6.002(4.975 - 6.503)	5.483(4.835 - 6.312)	5.388(4.810 - 5.984)	5.237(4.897 - 6.108)
14-30	6.110(5.213 - 8.216)	6.020(5.361 - 8.026) *	6.002(5.132 - 6.439)	5.628(5.365 - 6.711)	6.850(5.660 - 10.441)	6.555(6.090 - 9.336)
30-45	5.506(3.861 - 6.866)	5.007(3.869 - 6.466)	4.461(3.436 - 5.349)	4.640(3.245 - 5.017)	5.232(4.072 - 8.526)	5.130(4.487 - 8.347)
45-60	2.300(3.310 - 3.911)	2.424(2.987 - 4.017)	2.055(2.514 - 3.165)	1.883(2.680 - 2.963)	2.530(3.746 - 5.910)	2.823(3.256 - 5.380)
60-75	2.778(1.892 - 2.908)	2.742(1.937 - 2.929)	1.969(1.509 - 2.864)	2.078(1.577 - 2.750)	2.795(2.016 - 4.462)	2.589(2.476 - 4.464)
75-90	3.583(2.428 - 3.901)	3.685(2.630 - 3.806)	2.470(2.048 - 3.905)	2.767(2.100 - 3.744)	3.720(2.698 - 5.729)	3.393(3.183 - 5.617)
90-105	2.932(2.070 - 3.690)	2.947(2.301 - 3.407)	2.273(1.837 - 3.246)	2.376(1.828 - 3.144)	3.114(2.297 - 4.664)	3.084(2.575 - 4.482)
105-120	2.362(1.780 - 3.181)	2.295(1.779 - 2.806)	1.826(1.390 - 2.755)	1.852(1.510 - 2.608)	2.452(1.708 - 3.759)	2.464(1.983 - 3.545)
frequency (Hz)	C3		Cz		C4	
	rest	tapping	rest	tapping	rest	tapping
4-8	6.586(5.491 - 8.681)	6.509(5.483 - 9.254)	8.343(6.582 - 9.114)	7.416(6.302 - 10.264)	6.966(5.735 - 8.232)	6.642(5.501 - 8.514)
8-14	6.113(4.915 - 7.173)	5.457(5.105 - 5.830)	6.155(5.201 - 7.427)	5.804(5.280 - 7.093)	5.653(5.030 - 7.291)	5.587(5.020 - 7.432)
14-30	6.119(5.122 - 7.312)	5.711(5.309 - 7.167)	6.748(5.559 - 7.657)	6.237(5.623 - 7.338)	6.435(5.400 - 8.104)	5.639(5.314 - 7.390)
30-45	4.111(3.863 - 5.663)	4.235(3.781 - 5.457)	4.645(3.507 - 5.494)	4.613(3.555 - 5.458)	4.530(3.474 - 6.533)	4.647(3.521 - 6.220)
45-60	2.342(2.685 - 3.420)	2.403(2.974 - 3.199)	2.220(2.488 - 3.425)	2.004(2.921 - 3.065)	2.233(2.747 - 4.185)	1.954(2.936 - 3.921)
60-75	2.106(1.841 - 3.116)	2.259(2.006 - 2.888)	2.071(1.620 - 2.940)	2.164(1.680 - 2.783)	2.353(1.707 - 3.247)	2.357(1.665 - 3.015)
75-90	2.776(2.382 - 4.000)	2.889(2.541 - 3.777)	2.587(2.188 - 3.981)	2.952(2.260 - 3.819)	3.222(2.300 - 4.140)	3.089(2.284 - 4.363)
90-105	2.502(2.038 - 3.792)	2.503(2.320 - 3.429)	2.288(1.844 - 3.306)	2.334(1.914 - 3.176)	2.758(1.963 - 3.985)	2.588(1.925 - 3.934)
105-120	1.974(1.542 - 3.209)	1.982(1.656 - 2.703)	1.848(1.428 - 1.428)	1.876(1.556 - 2.642)	2.337(1.582 - 3.356)	2.182(1.602 - 3.290)
frequency (Hz)	P3		Pz		P4	
	rest	tapping	rest	tapping	rest	tapping
4-8	7.176(6.444 - 8.209)	7.037(6.324 - 9.486)	7.966(6.530 - 9.157)	6.930(6.626 - 9.815)	7.166(5.726 - 8.358)	6.270(5.931 - 9.293)
8-14	6.516(5.731 - 10.057)	6.586(5.588 - 9.828)	6.546(6.003 - 10.373)	5.820(5.694 - 10.324)	6.421(5.933 - 9.925)	5.794(5.557 - 10.000)
14-30	6.517(5.986 - 7.643)	6.414(5.634 - 8.091)	6.546(5.717 - 7.460)	6.694(5.703 - 7.866)	6.355(5.937 - 7.603)	6.422(5.463 - 8.008)
30-45	4.790(3.617 - 5.727)	4.434(4.109 - 5.757)	4.126(3.589 - 5.801)	4.331(3.741 - 5.649)	4.284(3.503 - 5.871)	4.208(3.958 - 5.536)
45-60	2.292(2.700 - 3.486)	2.384(2.957 - 3.291)	2.276(2.479 - 3.547)	2.033(2.891 - 3.193)	2.269(2.515 - 3.640)	2.183(2.988 - 3.223)
60-75	2.032(1.850 - 3.160)	2.250(1.886 - 3.104)	2.053(1.675 - 2.976)	2.183(1.708 - 2.922)	2.138(1.731 - 3.080)	2.282(1.749 - 3.087)
75-90	2.661(2.368 - 4.056)	2.973(2.468 - 4.332)	2.609(2.276 - 4.005)	2.973(2.358 - 3.930)	2.774(2.299 - 4.046)	2.965(2.375 - 4.262)
90-105	2.285(1.997 - 3.750)	2.406(2.094 - 3.838)	2.279(1.851 - 3.442)	2.378(1.999 - 3.572)	2.313(2.004 - 3.771)	2.349(2.028 - 3.808)
105-120	1.846(1.643 - 3.261)	1.870(1.675 - 3.402)	1.847(1.454 - 2.857)	1.850(1.589 - 2.960)	1.909(1.537 - 3.287)	1.888(1.633 - 3.359)

n=11. 対応する頭皮上空間分布毎に各周波数帯域律動波の rest 区間と tapping 区間の振幅平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である。数値は中央値 (四分位範囲; 25%値 - 75%値), 有意水準 (P) を *P<0.05 で示す。

a. rest

b. 外的ペース運動5Hzのtapping

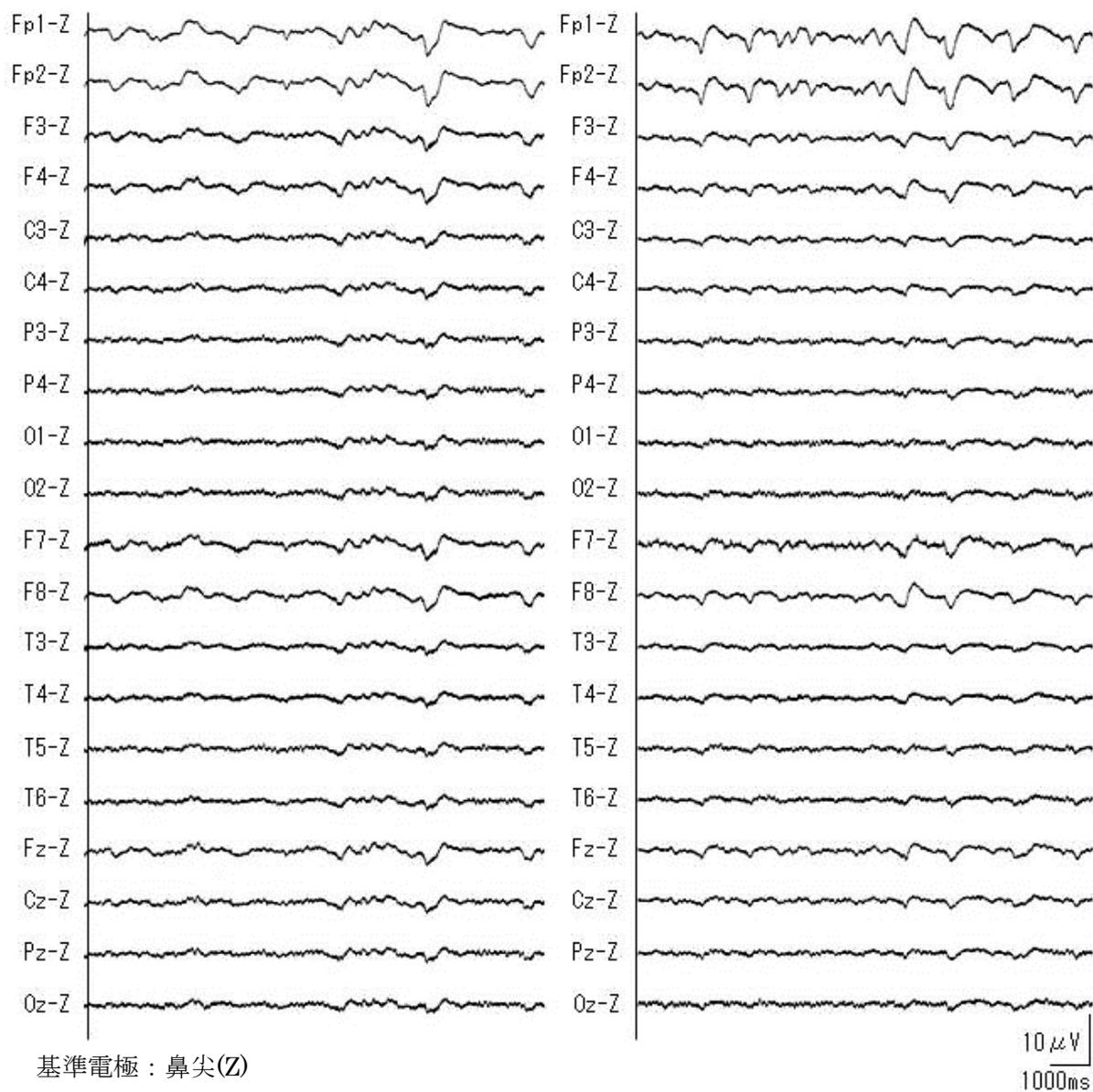


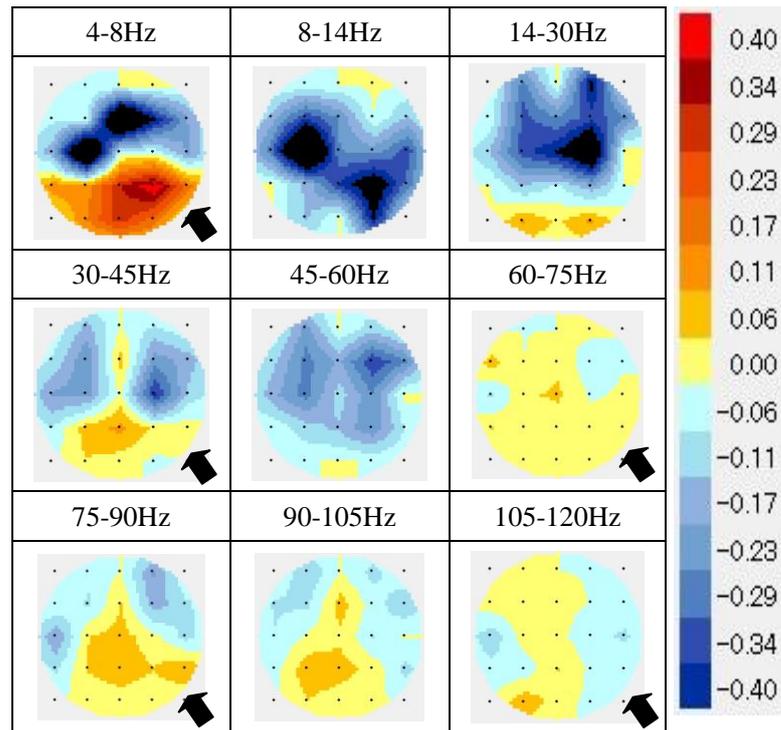
図4 外的ペース運動5Hzのtapping課題時のrest区間とtapping区間の総加算波形 (n=11)

表2 外的ペース運動 5Hz の tapping 課題による感覚運動野の振幅変化

frequency (Hz)	F3		Fz		F4	
	rest	tapping	rest	tapping	rest	tapping
4-8	6.656(5.872 - 8.134)	6.453(5.818 - 7.361)	8.061(6.267 - 8.869)	7.047(6.454 - 9.817)	6.980(5.502 - 8.200)	6.349(5.450 - 9.628)
8-14	4.866(4.045 - 5.712)	4.228(3.613 - 5.520)	5.539(4.221 - 6.687)	5.386(4.030 - 6.603)	4.469(4.144 - 5.710)	4.528(3.837 - 5.875)
14-30	5.891(5.414 - 7.016)	5.596(4.966 - 6.456) *	5.598(5.126 - 6.620)	5.452(4.796 - 5.837) **	6.404(5.942 - 7.313)	5.972(5.679 - 6.575) *
30-45	4.923(4.087 - 5.315)	4.390(3.787 - 5.277)	4.447(3.754 - 4.610)	4.197(3.381 - 4.425) *	5.152(4.987 - 5.945)	4.886(4.377 - 5.363)
45-60	3.040(2.702 - 3.583)	2.748(2.289 - 3.263) *	2.543(2.245 - 3.223)	2.407(2.161 - 2.722) *	3.502(3.242 - 3.678)	3.143(2.850 - 3.512) *
60-75	2.497(2.170 - 3.137)	2.331(1.971 - 2.525) *	2.064(1.729 - 2.474)	2.033(1.535 - 2.220)	2.818(2.363 - 3.577)	2.587(2.398 - 2.706)
75-90	3.233(2.829 - 4.077)	3.118(2.605 - 3.415)	2.631(2.258 - 3.082)	2.355(2.097 - 3.075)	3.571(3.158 - 4.327)	3.302(2.796 - 3.596)
90-105	2.898(2.341 - 3.540)	2.765(2.370 - 3.062)	2.389(2.001 - 2.645)	2.129(1.941 - 2.696)	3.131(2.778 - 3.624)	2.849(2.549 - 3.683)
105-120	2.276(2.015 - 2.840)	2.141(1.895 - 2.613)	1.979(1.587 - 2.173)	1.740(1.546 - 2.090)	2.454(2.178 - 2.988)	2.473(2.090 - 2.781)
frequency (Hz)	C3		Cz		C4	
	rest	tapping	rest	tapping	rest	tapping
4-8	6.527(5.304 - 9.032)	6.026(5.592 - 7.814)	7.593(6.607 - 9.024)	7.093(5.981 - 8.930)	6.326(5.379 - 8.687)	6.499(5.221 - 8.223)
8-14	5.447(4.491 - 7.180)	4.896(4.149 - 5.578)	5.721(4.708 - 7.870)	5.943(4.605 - 6.629)	5.176(4.723 - 7.812)	5.054(4.164 - 5.794)
14-30	5.693(5.509 - 6.813)	5.330(5.096 - 6.089) *	6.347(5.588 - 7.620)	6.261(5.095 - 6.821) **	6.298(5.369 - 7.734)	5.812(4.786 - 6.687) **
30-45	4.321(4.075 - 4.909)	4.264(3.856 - 4.577) *	4.645(3.909 - 5.100)	4.388(3.448 - 4.717) *	4.291(3.987 - 6.491)	4.350(3.450 - 5.976) *
45-60	2.666(2.431 - 3.514)	2.580(2.361 - 2.928) *	2.751(2.352 - 3.669)	2.446(2.253 - 3.025) *	2.804(2.292 - 3.932)	2.406(2.220 - 3.980) *
60-75	2.241(1.885 - 2.560)	2.106(1.876 - 2.322) *	2.084(1.797 - 2.519)	1.972(1.604 - 2.292) *	2.267(1.833 - 3.529)	1.979(1.667 - 2.873) *
75-90	2.893(2.655 - 3.405)	2.714(2.402 - 3.139) *	2.657(2.356 - 3.267)	2.519(2.100 - 3.151)	2.867(2.380 - 4.682)	2.557(2.226 - 3.796)
90-105	2.595(2.428 - 2.982)	2.341(2.153 - 2.727)	2.374(2.067 - 2.827)	2.208(1.992 - 2.714)	2.421(2.114 - 4.263)	2.235(2.032 - 3.603)
105-120	2.087(1.891 - 2.378)	1.826(1.764 - 2.267)	2.009(1.642 - 2.242)	1.779(1.575 - 2.147)	2.153(1.736 - 3.427)	1.821(1.610 - 2.936)
frequency (Hz)	P3		Pz		P4	
	rest	tapping	rest	tapping	rest	tapping
4-8	7.282(5.993 - 8.911)	6.399(5.917 - 9.127)	6.933(6.446 - 9.219)	7.161(6.046 - 9.347)	6.510(6.011 - 8.988)	6.649(5.332 - 8.806)
8-14	5.923(5.505 - 10.333)	6.195(4.776 - 8.769)	5.856(5.328 - 10.839)	6.003(4.840 - 9.546)	6.196(5.363 - 10.107)	5.745(4.921 - 8.954)
14-30	6.431(5.796 - 8.078)	6.110(5.557 - 7.690) *	6.298(5.632 - 7.909)	6.191(5.405 - 7.236) *	6.322(5.359 - 7.706)	5.971(5.129 - 7.646) *
30-45	4.657(4.063 - 5.226)	4.135(3.875 - 5.359)	4.466(4.031 - 5.228)	4.109(3.650 - 4.740) *	4.643(3.881 - 5.569)	4.386(3.566 - 4.906) *
45-60	2.828(2.376 - 3.736)	2.686(2.203 - 3.125)	2.729(2.308 - 3.739)	2.535(2.198 - 3.064) *	2.669(2.192 - 4.152)	2.563(2.135 - 3.159) *
60-75	2.206(1.902 - 2.483)	2.106(1.775 - 2.551)	2.111(1.840 - 2.488)	1.986(1.686 - 2.285)	2.158(1.835 - 2.799)	2.068(1.713 - 2.465)
75-90	2.763(2.651 - 3.175)	2.658(2.216 - 3.309)	2.649(2.504 - 3.247)	2.547(2.205 - 3.176)	2.721(2.552 - 3.455)	2.730(2.187 - 3.431)
90-105	2.494(2.367 - 2.808)	2.238(2.114 - 2.989)	2.397(2.174 - 2.837)	2.213(2.041 - 2.756)	2.399(2.218 - 3.262)	2.425(1.981 - 3.044)
105-120	2.048(1.865 - 2.216)	1.785(1.626 - 2.368)	2.003(1.718 - 2.183)	1.774(1.567 - 2.146)	2.080(1.654 - 2.794)	1.947(1.533 - 2.383)

n=11. 対応する頭皮上空間分布毎に各周波数帯域律動波の rest 区間と tapping 区間の振幅平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である。数値は中央値（四分位範囲; 25%値 - 75%値），有意水準（P）を *P<0.05, **P<0.01 で示す。

a. 外的ペース運動 1Hz



b. 外的ペース運動 5Hz

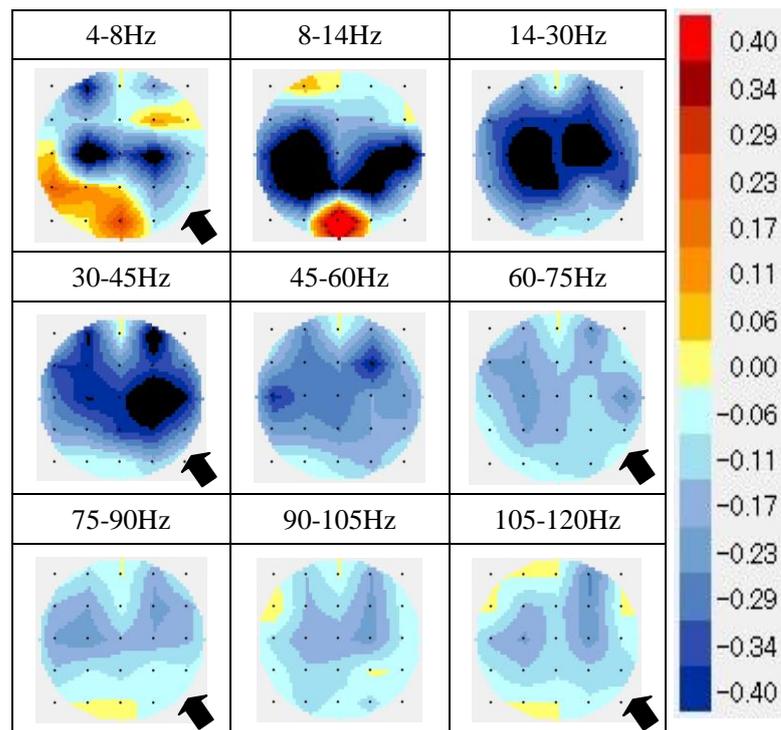


図5 外的ペース運動 1Hz と 5Hz 時の各周波数帯域律動波の頭皮上空間分布

n=11. mapping は中央値で作成している．中央値は表3に示す．矢印は，外的ペース運動 1Hz と 5Hz tapping 課題で，対応する頭皮上空間分布毎に各周波数律動波の振幅変化量の平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果， $P < 0.05$ であるものを示している．

表 3 外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題による振幅変化の差

frequency (Hz)	F3		Fz		F4	
	1Hz	5Hz	1Hz	5Hz	1Hz	5Hz
4-8	-0.039(-1.227 - 0.323)	-0.078(-1.131 - 0.542)	-0.613(-0.815 - 0.824)	-0.040(-0.784 - 0.537)	-0.353(-1.030 - 0.828)	0.122(-0.797 - 0.633) *
8-14	-0.291(-0.437 - -0.166)	-0.274(-0.867 - 0.183)	-0.190(-0.428 - 0.033)	-0.124(-0.560 - 0.159)	-0.004(-0.392 - 0.137)	-0.109(-0.641 - 0.076)
14-30	-0.270(-0.665 - -0.064)	-0.323(-0.739 - -0.270)	-0.200(-0.669 - 0.340)	-0.343(-0.508 - -0.135)	-0.281(-0.597 - 0.088)	-0.347(-0.703 - 0.072)
30-45	-0.199(-0.400 - 0.032)	-0.310(-0.421 - -0.038)	0.065(-0.292 - 0.316)	-0.215(-0.385 - 0.015)	-0.079(-0.352 - 0.337)	-0.288(-0.748 - 0.095)
45-60	-0.481(-0.221 - 0.136)	-0.245(-0.390 - -0.065)	-0.237(-0.142 - 0.099)	-0.184(-0.381 - 0.046)	-0.479(-0.293 - 0.142)	-0.353(-0.705 - -0.021)
60-75	0.001(-0.098 - 0.056)	-0.160(-0.247 - -0.108) *	0.036(0.008 - 0.154)	-0.094(-0.281 - 0.015) **	-0.034(-0.141 - 0.126)	-0.112(-0.324 - 0.057)
75-90	-0.060(-0.169 - 0.103)	-0.150(-0.393 - 0.073)	0.052(-0.054 - 0.331)	-0.026(-0.403 - 0.096)	-0.127(-0.242 - 0.049)	-0.170(-0.559 - 0.127)
90-105	-0.059(-0.320 - 0.066)	-0.114(-0.337 - 0.106)	0.075(-0.050 - 0.214)	-0.074(-0.320 - 0.128)	-0.025(-0.214 - 0.108)	-0.172(-0.696 - 0.071)
105-120	0.027(-0.134 - 0.121)	-0.120(-0.338 - 0.057)	0.018(-0.083 - 0.156)	-0.083(-0.398 - 0.062)	-0.003(-0.185 - 0.034)	-0.190(-0.531 - 0.176)
frequency (Hz)	C3		Cz		C4	
	1Hz	5Hz	1Hz	5Hz	1Hz	5Hz
4-8	-0.632(-1.011 - 0.932)	-0.549(-1.172 - 0.235)	-0.018(-0.747 - 0.539)	-0.259(-0.877 - 0.366)	-0.006(-0.427 - 1.216)	-0.440(-0.511 - 0.386)
8-14	-0.624(-0.825 - 0.035)	-0.635(-1.022 - 0.160)	-0.203(-0.542 - 0.178)	-0.176(-0.601 - 0.187)	-0.175(-0.248 - 0.296)	-0.367(-0.777 - 0.020)
14-30	-0.277(-0.659 - 0.223)	-0.496(-1.062 - -0.312)	-0.351(-0.511 - 0.058)	-0.329(-0.779 - -0.297)	-0.511(-0.714 - -0.085)	-0.497(-0.841 - -0.289)
30-45	-0.172(-0.559 - 0.284)	-0.354(-0.622 - -0.027)	0.011(-0.315 - 0.262)	-0.328(-0.496 - -0.011) *	-0.313(-0.451 - 0.137)	-0.515(-0.802 - 0.059)
45-60	-0.334(-0.221 - 0.114)	-0.216(-0.388 - -0.070)	-0.360(-0.073 - 0.152)	-0.248(-0.407 - 0.004)	-0.380(-0.196 - -0.003)	-0.149(-0.398 - 0.017)
60-75	0.039(-0.129 - 0.165)	-0.186(-0.290 - -0.053) *	0.061(-0.001 - 0.108)	-0.112(-0.263 - -0.045) **	-0.008(-0.201 - 0.052)	-0.079(-0.299 - 0.023)
75-90	0.048(-0.179 - 0.327)	-0.185(-0.483 - -0.097)	0.072(-0.055 - 0.266)	-0.116(-0.447 - 0.129)	0.017(-0.133 - 0.124)	-0.143(-0.533 - 0.110)
90-105	0.010(-0.233 - 0.228)	-0.142(-0.398 - 0.033)	0.039(-0.118 - 0.229)	-0.137(-0.342 - 0.141)	-0.051(-0.155 - 0.077)	-0.177(-0.389 - 0.186)
105-120	0.027(-0.134 - 0.180)	-0.161(-0.384 - 0.012)	0.016(-0.065 - 0.183)	-0.069(-0.385 - 0.095)	-0.039(-0.091 - 0.121)	-0.184(-0.393 - 0.145)
frequency (Hz)	P3		Pz		P4	
	1Hz	5Hz	1Hz	5Hz	1Hz	5Hz
4-8	0.127(-0.392 - 0.914)	0.135(-0.883 - 0.356)	0.295(-0.845 - 0.822)	0.045(-0.689 - 0.364)	0.395(-0.418 - 1.087)	-0.182(-0.987 - 0.504)
8-14	-0.112(-0.723 - 0.310)	-0.523(-1.483 - 0.237)	-0.301(-0.661 - 0.286)	-0.349(-1.352 - 0.294)	-0.435(-0.614 - 0.403)	-0.457(-0.837 - 0.288)
14-30	-0.093(-0.334 - 0.331)	-0.345(-0.485 - -0.012)	-0.039(-0.307 - 0.320)	-0.367(-0.627 - -0.073)	-0.131(-0.374 - 0.287)	-0.118(-0.495 - -0.040)
30-45	0.078(-0.356 - 0.203)	-0.188(-0.415 - 0.098)	0.114(-0.385 - 0.296)	-0.313(-0.515 - 0.065)	0.039(-0.354 - 0.319)	-0.337(-0.663 - 0.108)
45-60	-0.264(-0.078 - 0.175)	-0.179(-0.282 - 0.033)	-0.304(-0.111 - 0.083)	-0.200(-0.265 - 0.020)	-0.332(-0.194 - 0.116)	-0.148(-0.252 - -0.058)
60-75	0.001(-0.056 - 0.170)	-0.156(-0.227 - 0.037)	0.014(-0.010 - 0.137)	-0.118(-0.203 - 0.048) *	0.033(-0.049 - 0.153)	-0.053(-0.248 - 0.011)
75-90	0.056(-0.086 - 0.276)	-0.041(-0.340 - 0.059)	0.082(-0.082 - 0.265)	-0.071(-0.385 - 0.129)	0.053(-0.102 - 0.216)	-0.003(-0.365 - 0.080)
90-105	0.088(-0.152 - 0.243)	-0.087(-0.312 - 0.142)	0.073(-0.123 - 0.252)	-0.081(-0.333 - 0.159)	0.034(-0.160 - 0.241)	0.015(-0.250 - 0.065)
105-120	-0.031(-0.086 - 0.191)	-0.091(-0.289 - 0.055)	0.052(-0.088 - 0.200)	-0.063(-0.313 - 0.100) *	-0.012(-0.121 - 0.184)	-0.070(-0.317 - 0.099)

n=11. 1Hz と 5Hz tapping 課題で、対応する頭皮上空間分布毎に各周波数帯域律動波の振幅変化量の平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である。数値は中央値 (四分位範囲; 25%値 - 75%値), 有意水準 (P) を *P<0.05, **P<0.01 で示す。

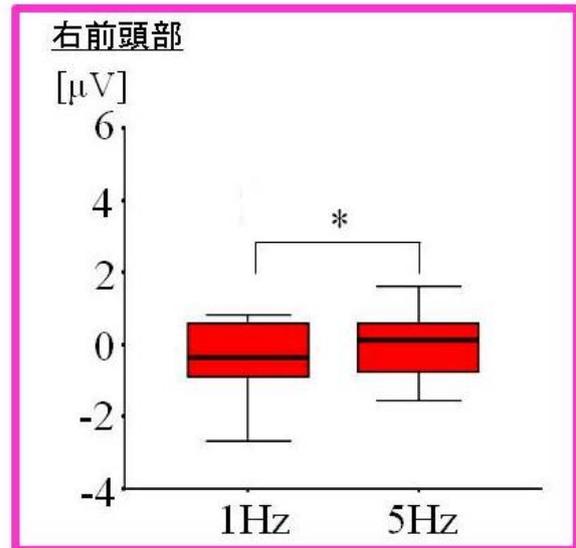
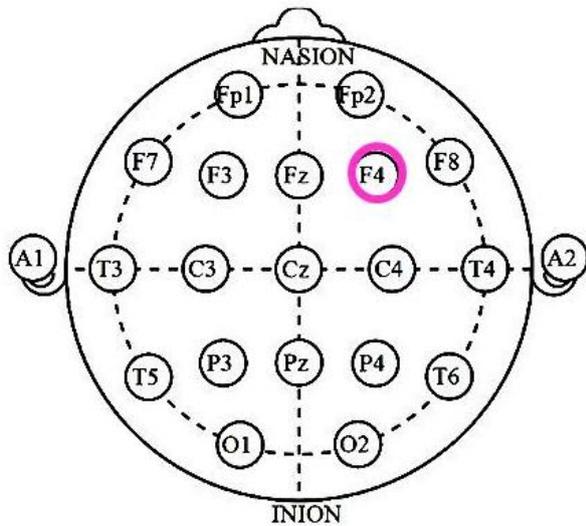


図6 外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題時の θ 帯域律動波振幅の差

n=11. 外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題で、 θ 帯域律動波 4-8Hz の F4 における振幅変化量の平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である。箱の中央は中央値、箱の上限・下限は四分位範囲 75% 値・25% 値、ひげの上限・下限は最大値・最小値を示している。有意水準 (P) を * $P < 0.05$ で示す。

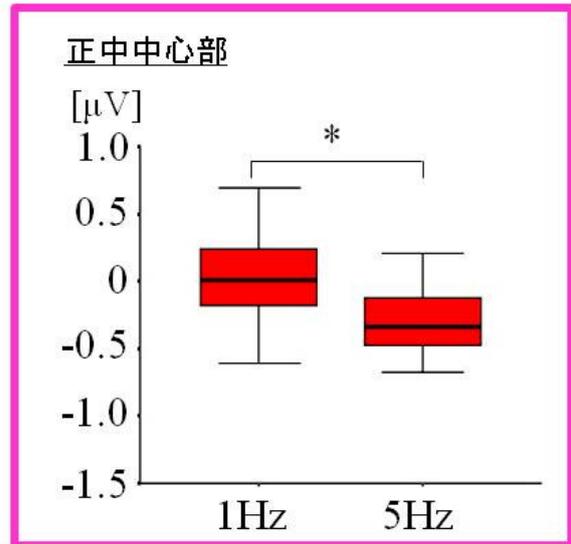
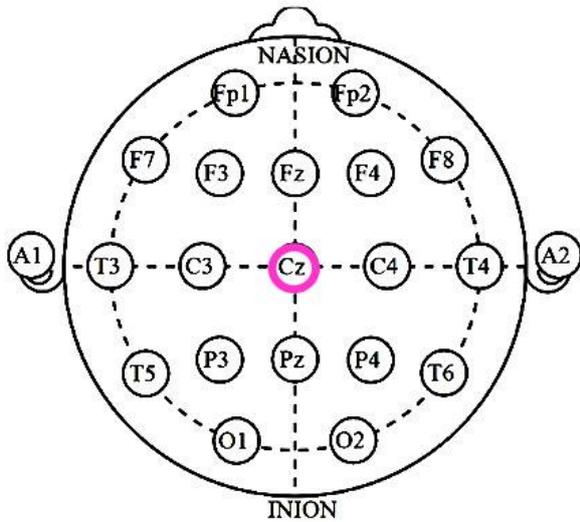


図7 外的ペース運動1Hzと5Hzのtapping課題時のlow- γ 帯域律動波(30-45Hz)振幅の差
 n=11. 外的ペース運動1Hzと5Hzのtapping課題で, low- γ 帯域律動波30-45HzのCzにおける振幅変化量の平均値をWilcoxonの符号付順位和検定した結果である. 箱の中央は中央値, 箱の上限・下限は四分位範囲75%値・25%値, ひげの上限・下限は最大値・最小値を示している. 有意水準(P)を* $P < 0.05$ で示す.

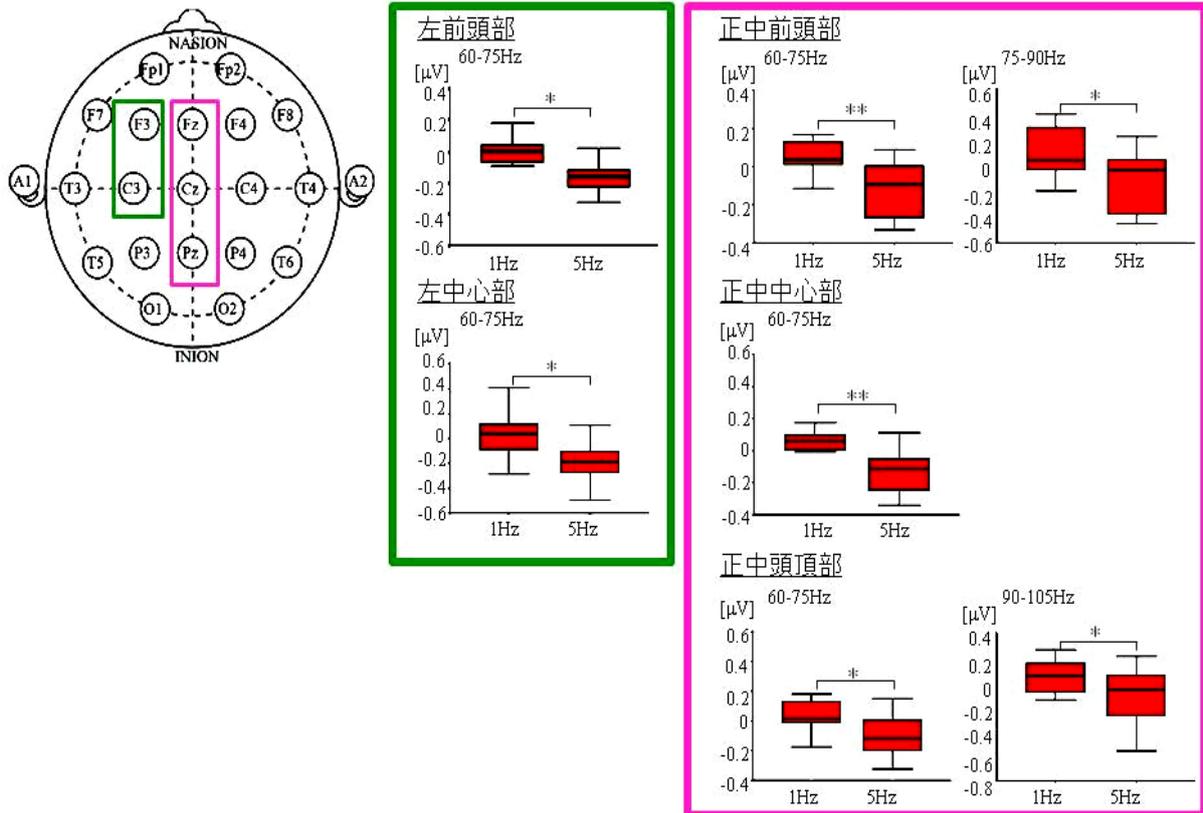


図8 外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題時の high- γ 帯域律動波振幅の差

n=11. 外的ペース運動 1Hz と 5Hz の tapping 課題で、high- γ 帯域律動波 60-75Hz の F3・Fz・C3・Cz・Pz, 75-90Hz の Fz, 90-105Hz の Pz における振幅変化量の平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である。箱の中央は中央値、箱の上限・下限は四分位範囲 75%値・25%値、ひげの上限・下限は最大値・最小値を示している。有意水準 (P) を * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ で示す。

a. rest

b. 自己ペース運動1Hzのtapping

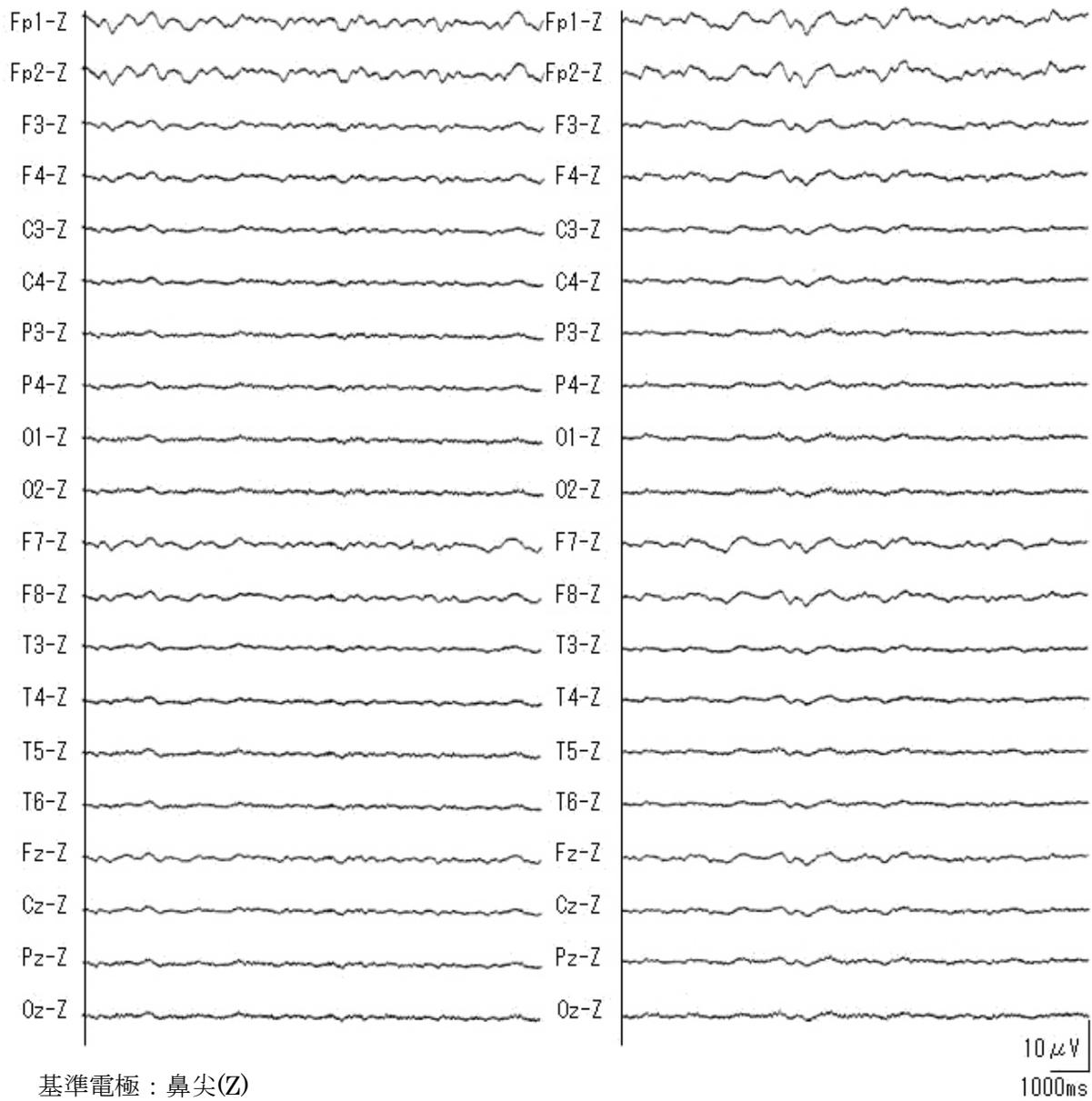


図9 自己ペース運動1Hzのtapping課題時のrest区間とtapping区間の総加算波形 (n=11)

表 4 自己ペース運動 1Hz の tapping 課題による振幅変化

frequency (Hz)	F3		Fz		F4	
	rest	tapping	rest	tapping	rest	tapping
4-8	6.649(5.704 - 10.434)	7.562(5.506 - 9.076)	7.246(6.929 - 10.487)	7.647(6.393 - 9.760)	6.425(5.445 - 10.004)	7.680(5.239 - 9.554)
8-14	4.285(4.035 - 5.548)	4.614(3.593 - 5.597)	5.291(4.221 - 5.724)	5.371(4.130 - 5.938)	4.863(4.012 - 5.496)	4.942(3.963 - 5.701)
14-30	5.493(4.774 - 5.991)	5.199(4.612 - 6.362)	5.216(4.678 - 5.598)	5.101(4.594 - 5.749)	5.624(4.723 - 6.479)	5.553(4.512 - 6.716)
30-45	4.212(3.635 - 5.268)	4.112(3.221 - 4.766)	4.146(3.133 - 4.640)	3.855(2.916 - 4.591)	4.694(3.495 - 5.256)	4.470(3.733 - 5.089)
45-60	2.544(2.263 - 2.969)	2.624(2.079 - 3.027)	2.234(1.853 - 2.602)	2.297(1.767 - 2.864)	2.797(2.042 - 3.471)	2.595(2.043 - 3.598)
60-75	2.021(1.807 - 2.691)	2.206(1.649 - 2.448)	1.762(1.511 - 2.271)	1.848(1.538 - 2.356)	2.484(1.729 - 2.811)	2.405(1.705 - 2.793)
75-90	2.599(2.294 - 3.265)	3.004(2.288 - 3.346)	2.228(1.973 - 2.805)	2.363(2.034 - 3.154)	3.057(2.259 - 3.803)	3.295(2.341 - 3.596)
90-105	2.430(2.067 - 3.205)	2.541(2.061 - 2.985)	2.014(1.841 - 2.329)	2.033(1.794 - 2.794)	2.681(2.111 - 3.487)	2.872(2.143 - 3.379)
105-120	1.936(1.699 - 2.428)	2.068(1.608 - 2.412)	1.676(1.482 - 1.849)	1.730(1.399 - 2.262)	2.115(1.762 - 2.788)	2.310(1.678 - 2.764)
frequency (Hz)	C3		Cz		C4	
	rest	tapping	rest	tapping	rest	tapping
4-8	6.507(5.472 - 8.456)	6.496(5.623 - 7.964)	7.288(6.761 - 9.459)	8.069(6.640 - 9.448)	6.148(5.681 - 7.908)	6.571(5.186 - 8.427)
8-14	5.039(4.400 - 5.846)	5.117(4.258 - 5.740)	5.351(4.818 - 7.112)	6.232(5.055 - 6.611)	5.262(4.447 - 6.216)	5.480(4.248 - 6.067)
14-30	5.368(5.267 - 5.774)	5.196(4.952 - 5.884)	5.512(5.334 - 6.545)	5.319(5.140 - 6.226)	5.300(4.868 - 5.861)	5.165(4.961 - 5.519)
30-45	4.253(3.375 - 4.892)	4.234(3.318 - 4.703)	4.499(3.290 - 4.835)	4.049(3.245 - 5.103)	4.335(3.196 - 5.580)	4.198(3.194 - 5.109)
45-60	2.523(2.017 - 2.760)	2.392(2.078 - 2.992)	2.414(2.017 - 2.830)	2.441(1.901 - 3.029)	2.381(2.052 - 3.091)	2.901(1.904 - 3.186)
60-75	1.973(1.853 - 2.246)	1.935(1.663 - 2.561)	1.874(1.569 - 2.322)	1.901(1.628 - 2.504)	1.917(1.629 - 2.791)	2.359(1.640 - 2.551)
75-90	2.595(2.335 - 3.135)	2.569(2.248 - 3.309)	2.356(2.070 - 3.132)	2.460(2.139 - 3.332)	2.384(2.314 - 3.608)	2.968(2.213 - 3.455)
90-105	2.282(2.047 - 2.782)	2.351(1.946 - 2.928)	2.125(1.902 - 2.548)	2.125(1.892 - 2.966)	2.157(2.019 - 3.190)	2.465(1.928 - 3.356)
105-120	1.814(1.629 - 2.151)	1.911(1.543 - 2.269)	1.699(1.498 - 1.973)	1.764(1.463 - 2.306)	1.785(1.597 - 2.485)	1.939(1.573 - 2.684)
frequency (Hz)	P3		Pz		P4	
	Rest	Tapping	Rest	Tapping	Rest	Tapping
4-8	6.408(5.999 - 8.476)	6.731(6.108 - 8.825)	6.536(5.957 - 8.613)	7.231(6.031 - 8.710)	6.059(5.761 - 8.439)	6.662(5.449 - 8.377)
8-14	5.991(4.916 - 8.144)	6.254(5.000 - 7.952)	6.258(5.151 - 8.154)	5.891(4.911 - 8.105)	6.267(4.866 - 9.433)	5.998(4.326 - 9.105)
14-30	6.226(5.292 - 6.770)	6.103(5.415 - 6.461)	6.012(5.319 - 6.840)	5.781(5.363 - 6.133)	6.161(5.331 - 6.814)	5.520(5.405 - 6.250)
30-45	4.147(3.355 - 5.083)	4.479(3.423 - 4.995)	4.205(3.194 - 4.924)	4.233(3.391 - 4.759)	4.067(3.221 - 5.023)	4.307(3.366 - 4.878)
45-60	2.609(2.071 - 2.977)	2.601(2.163 - 3.134)	2.555(1.941 - 3.036)	2.382(2.020 - 3.144)	2.590(1.945 - 3.058)	2.426(1.980 - 3.131)
60-75	2.028(1.750 - 2.673)	2.055(1.714 - 2.609)	1.937(1.608 - 2.615)	1.940(1.615 - 2.649)	1.962(1.619 - 2.704)	1.969(1.633 - 2.679)
75-90	2.688(2.344 - 3.250)	2.640(2.293 - 3.383)	2.452(2.196 - 3.272)	2.493(2.197 - 3.436)	2.528(2.270 - 3.348)	2.517(2.187 - 3.530)
90-105	2.302(2.102 - 2.868)	2.285(1.991 - 2.964)	2.164(1.942 - 2.829)	2.171(1.929 - 2.970)	2.173(2.044 - 2.996)	2.207(1.934 - 3.083)
105-120	1.831(1.571 - 2.159)	1.823(1.519 - 2.331)	1.753(1.522 - 2.171)	1.794(1.486 - 2.316)	1.798(1.560 - 2.276)	1.811(1.540 - 2.447)

n=11. 対応する頭皮上空間分布毎に各周波数帯域律動波の rest 区間と tapping 区間の振幅平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である。数値は中央値（四分位範囲; 25%値 - 75%値を示す。有意差は認められない。

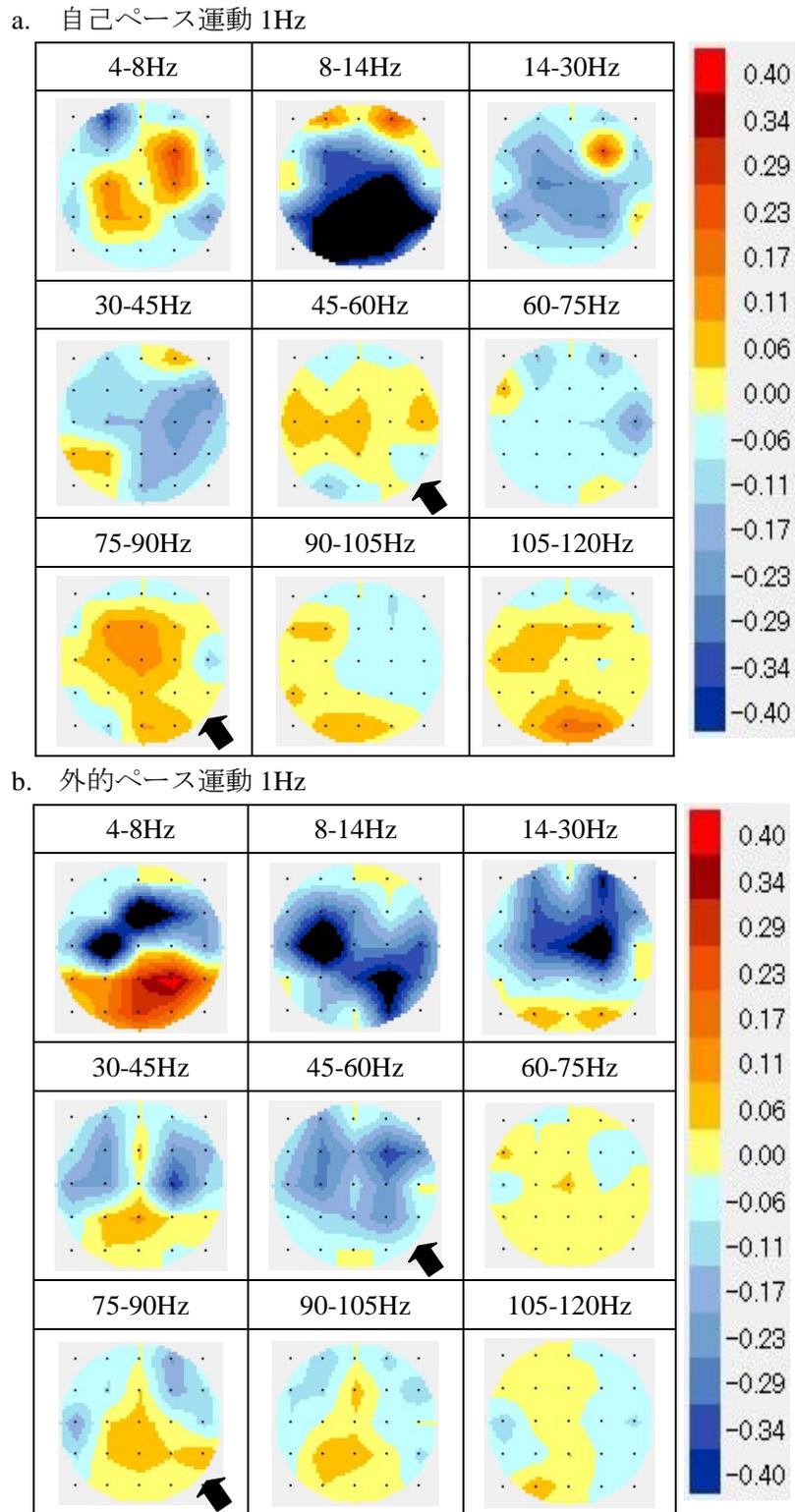


図 10 自己ペース運動 1Hz と外的ペース運動 1Hz の tapping 課題時の各周波数帯域律動波の頭皮上空間分布

n=11. mapping は中央値で作成している. 中央値は表 5 に示す. 矢印は, 自己ペース運動 1Hz と外的ペース運動 1Hz の tapping 課題で, 対応する頭皮上空間分布毎に各周波数の振幅変化量の平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果, $P < 0.05$ であるものを示している.

表5 自己ペース (SI) 運動 1Hz と外的ペース (ET) 運動 1Hz の tapping 課題による振幅変化の差

frequency (Hz)	F3		Fz		F4	
	SI1Hz	EI1Hz	SI1Hz	EI1Hz	SI1Hz	EI1Hz
4-8	-0.007(-0.863 - 1.858)	-0.039(-1.227 - 0.323)	0.035(-0.541 - 0.717)	-0.613(-0.815 - 0.824)	0.251(-0.445 - 1.926)	-0.353(-1.030 - 0.828)
8-14	-0.291(-0.471 - 0.384)	-0.291(-0.437 - -0.166)	-0.231(-0.550 - 0.414)	-0.190(-0.428 - 0.033)	-0.108(-0.404 - 0.380)	-0.004(-0.392 - 0.137)
14-30	-0.162(-0.379 - 0.341)	-0.270(-0.665 - -0.064)	-0.082(-0.355 - 0.386)	-0.200(-0.669 - 0.340)	0.241(-0.199 - 0.563)	-0.281(-0.597 - 0.088)
30-45	-0.082(-0.346 - 0.356)	-0.199(-0.400 - 0.032)	-0.069(-0.400 - 0.244)	0.065(-0.292 - 0.316)	-0.135(-0.384 - 0.449)	-0.079(-0.352 - 0.337)
45-60	0.006(-0.125 - 0.221)	-0.481(-0.221 - 0.136)	0.046(-0.142 - 0.122)	-0.237(-0.142 - 0.099)	0.033(-0.205 - 0.234)	-0.479(-0.293 - 0.142)
60-75	-0.051(-0.237 - 0.293)	0.001(-0.098 - 0.056)	-0.014(-0.107 - 0.085)	0.036(0.008 - 0.154)	-0.004(-0.203 - 0.228)	-0.034(-0.141 - 0.126)
75-90	0.140(-0.135 - 0.405)	-0.060(-0.169 - 0.103) **	0.134(-0.126 - 0.334)	0.052(-0.054 - 0.331) **	0.064(-0.135 - 0.535)	-0.127(-0.242 - 0.049) **
90-105	0.072(-0.306 - 0.287)	-0.059(-0.320 - 0.066)	-0.031(-0.101 - 0.233)	0.075(-0.050 - 0.214)	-0.049(-0.170 - 0.588)	-0.025(-0.214 - 0.108)
105-120	0.076(-0.135 - 0.277)	0.027(-0.134 - 0.121)	0.054(-0.122 - 0.196)	0.018(-0.083 - 0.156)	0.076(-0.161 - 0.424)	-0.003(-0.185 - 0.034)
frequency (Hz)	C3		Cz		C4	
	SI1Hz	EI1Hz	SI1Hz	EI1Hz	SI1Hz	EI1Hz
4-8	0.151(-0.312 - 0.899)	-0.632(-1.011 - 0.932)	-0.011(-0.414 - 0.688)	-0.018(-0.747 - 0.539)	0.180(-0.428 - 0.890)	-0.006(-0.427 - 1.216)
8-14	-0.261(-0.729 - 0.299)	-0.624(-0.825 - 0.035)	-0.337(-0.536 - 0.326)	-0.203(-0.542 - 0.178)	-0.486(-0.536 - 0.332)	-0.175(-0.248 - 0.296)
14-30	-0.216(-0.595 - 0.273)	-0.277(-0.659 - 0.223)	-0.194(-0.421 - 0.393)	-0.351(-0.511 - 0.058)	-0.143(-0.539 - 0.513)	-0.511(-0.714 - -0.085)
30-45	-0.108(-0.473 - 0.322)	-0.172(-0.559 - 0.284)	-0.104(-0.438 - 0.211)	0.011(-0.315 - 0.262)	-0.189(-0.468 - 0.378)	-0.313(-0.451 - 0.137)
45-60	0.061(-0.169 - 0.217)	-0.334(-0.221 - 0.114)	0.074(-0.227 - 0.181)	-0.360(-0.073 - 0.152)	0.008(-0.156 - 0.350)	-0.380(-0.196 - -0.003) *
60-75	-0.039(-0.171 - 0.128)	0.039(-0.129 - 0.165)	-0.047(-0.114 - 0.087)	0.061(-0.001 - 0.108)	-0.058(-0.164 - 0.060)	-0.008(-0.201 - 0.052)
75-90	0.082(-0.159 - 0.346)	0.048(-0.179 - 0.327) **	0.129(-0.130 - 0.362)	0.072(-0.055 - 0.266) **	0.073(-0.120 - 0.572)	0.017(-0.133 - 0.124) **
90-105	0.010(-0.133 - 0.242)	0.010(-0.233 - 0.228)	-0.045(-0.110 - 0.264)	0.039(-0.118 - 0.229)	-0.024(-0.187 - 0.166)	-0.051(-0.155 - 0.077)
105-120	0.060(-0.188 - 0.193)	0.027(-0.134 - 0.180)	0.040(-0.129 - 0.229)	0.016(-0.065 - 0.183)	-0.007(-0.179 - 0.262)	-0.039(-0.091 - 0.121)
frequency (Hz)	P3		Pz		P4	
	SI1Hz	EI1Hz	SI1Hz	EI1Hz	SI1Hz	EI1Hz
4-8	0.109(-0.398 - 0.420)	0.127(-0.392 - 0.914)	0.096(-0.354 - 0.811)	0.295(-0.845 - 0.822)	-0.062(-0.387 - 0.764)	0.395(-0.418 - 1.087)
8-14	-0.407(-0.841 - 0.300)	-0.112(-0.723 - 0.310)	-0.504(-0.822 - 0.310)	-0.301(-0.661 - 0.286)	-0.569(-0.735 - 0.208)	-0.435(-0.614 - 0.403)
14-30	-0.096(-0.326 - 0.178)	-0.093(-0.334 - 0.331)	-0.184(-0.534 - 0.315)	-0.039(-0.307 - 0.320)	-0.206(-0.563 - 0.439)	-0.131(-0.374 - 0.287)
30-45	0.068(-0.332 - 0.421)	0.078(-0.356 - 0.203)	-0.107(-0.357 - 0.254)	0.114(-0.385 - 0.296)	-0.144(-0.401 - 0.280)	0.039(-0.354 - 0.319)
45-60	0.026(-0.179 - 0.101)	-0.264(-0.078 - 0.175)	0.053(-0.169 - 0.145)	-0.304(-0.111 - 0.083)	-0.004(-0.202 - 0.168)	-0.332(-0.194 - 0.116)
60-75	-0.035(-0.154 - 0.094)	0.001(-0.056 - 0.170)	-0.015(-0.096 - 0.096)	0.014(-0.010 - 0.137)	-0.025(-0.129 - 0.060)	0.033(-0.049 - 0.153)
75-90	0.037(-0.137 - 0.354)	0.056(-0.086 - 0.276) **	0.068(-0.098 - 0.349)	0.082(-0.082 - 0.265) **	0.016(-0.105 - 0.366)	0.053(-0.102 - 0.216) **
90-105	0.004(-0.114 - 0.305)	0.088(-0.152 - 0.243)	0.006(-0.127 - 0.320)	0.073(-0.123 - 0.252)	-0.016(-0.127 - 0.266)	0.034(-0.160 - 0.241)
105-120	0.033(-0.089 - 0.239)	-0.031(-0.086 - 0.191)	0.059(-0.108 - 0.234)	0.052(-0.088 - 0.200)	0.013(-0.142 - 0.237)	-0.012(-0.121 - 0.184)

n=11. SI 運動 1Hz と ET 運動 1Hz の tapping 課題で、対応する頭皮上空間分布毎に各周波数帯域律動波の振幅変化量の平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である。数値は中央値（四分位範囲; 25%値 - 75%値), 有意水準 (P) を *P<0.05, **P<0.01 で示す。

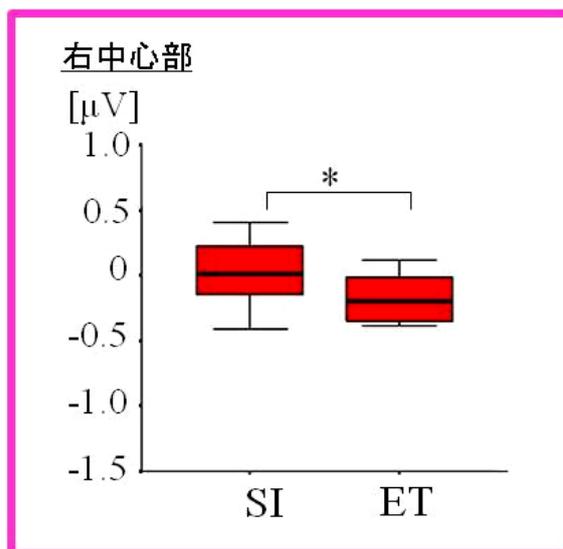
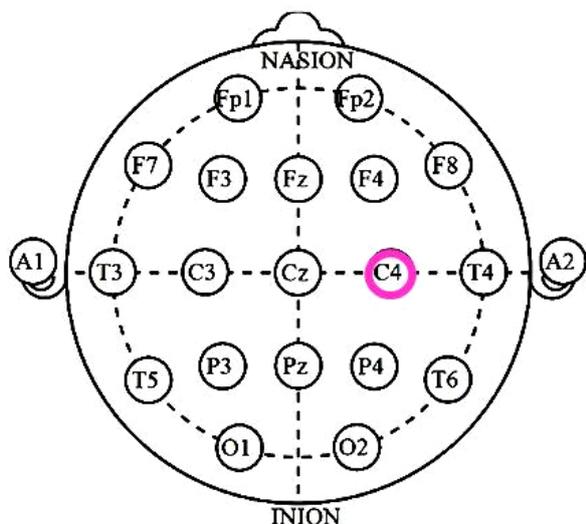


図 11 自己ペース (SI) 運動 1Hz と外的ペース (ET) 運動 1Hz の tapping 課題時の low- γ 帯域律動波 (45-60Hz) 振幅の差

n=11. SI 運動 1Hz と ET 運動 1Hz の tapping 課題で, low- γ 帯域律動波 45-60Hz の C4 における振幅変化量の平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である. 箱の中央は中央値, 箱の上限・下限は四分位範囲 75%値・25%値, ひげの上限・下限は最大値・最小値を示している. 有意水準 (P) を * $P < 0.05$ で示す.

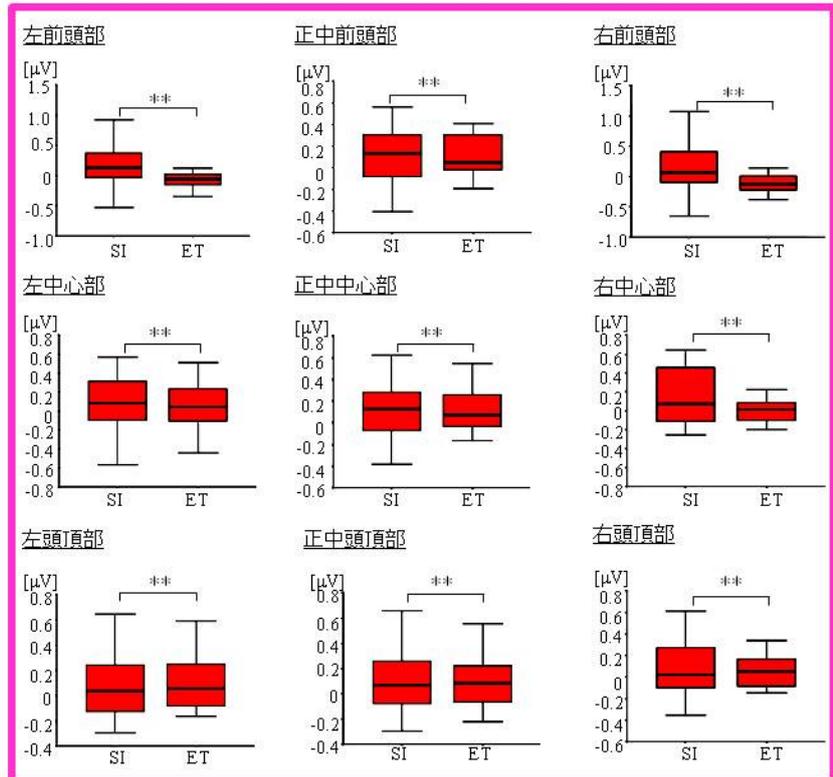
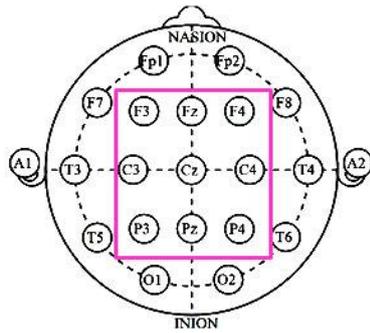


図 12 自己ペース (SI) 運動 1Hz と外的ペース (ET) 運動 1Hz の tapping 課題時の high- γ 帯域律動波 (75-90Hz) 振幅の差

n=11. SI 運動 1Hz と ET 運動 1Hz の tapping 課題で, high- γ 帯域律動波 75-90Hz の F3・Fz・F4・C3・Cz・C4・P3・Pz・P4 における振幅変化量の平均値を Wilcoxon の符号付順位和検定した結果である. 箱の中央は中央値, 箱の上限・下限は四分位範囲 75%値・25%値, ひげの上限・下限は最大値・最小値を示している. 有意水準 (P) を * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ で示す.