

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26730078

研究課題名(和文)脳リズム構造に着目したマルチモーダル感覚情報処理機構の解明

研究課題名(英文)Clarification of the multisensory information processing mechanism with a focus on brain rhythm structure

研究代表者

青山 敦(AOYAMA, Atsushi)

慶應義塾大学・環境情報学部(藤沢)・准教授

研究者番号：40508371

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：左右が反転した立体音響空間をウェアラブルに実現し、この特殊空間への約1ヶ月間に亘る接触時における順応過程を脳磁界計測法を用いて調べた。この接触によって、新しい統合ルールに基づいて情報間の誤差を補正する知覚と関連した早い順応、統合処理の優先度を変化させる行動と関連した遅い順応、およびそれらの中間過程の存在が明らかになった。また早い順応と遅い順応は、各々、脳リズムと誘発応答に反映されていると考えられた。マルチモーダル感覚情報処理は、一般にユニモーダルな脳活動の和では説明できない付加活動の観点から議論されてきたが、動的特性を有する構造化された脳リズムも重要であることが本研究によって明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Left-right reversed stereophonic space was achieved in a wearable manner, and adaptation processes during about one-month exposure to this unusual space were examined using magnetoencephalography. The exposure revealed the presence of early adaptation related to perception in which cross-sensory errors are compensated based on a new integration rule, late adaptation related to behavior in which a priority of integration processing is changed, and their intermediate process. Moreover, the early and late adaptations are considered to be reflected in brain rhythms and evoked responses, respectively. Although multisensory information processing has been typically discussed from a viewpoint of additive brain activity that cannot be explained by a summation of unimodal activity, this study revealed the importance of structured brain rhythms with dynamic characteristics in addition to it.

研究分野：脳情報学

キーワード：神経科学 脳・神経 脳情報科学 脳機能計測 感覚情報処理 多感覚統合

1. 研究開始当初の背景

(1) 人間は、外部環境から取得する視覚・聴覚・触覚情報等を脳内で複合的に処理(マルチモーダル感覚情報処理)し、外部環境を内的に矛盾なく再構成することで、個々の感覚情報処理から想定されるレベルよりも豊かな知覚経験(環境把握)や優れた行動制御(対環境応答)を実現している(Stein, 2012)。更には、新しい環境に対する適応性や外乱に対する頑健性も同時に兼ね備えているため、バーチャルリアリティにおける五感情報の統合技術や五感脳情報の読み出し技術等、多方面への工学応用が期待されている(青山他, 2007)。しかしながら、単一感覚研究の未熟さや実験の複雑さが故に、複数の感覚を同時に扱った脳研究は少なく、マルチモーダル感覚情報処理の脳内メカニズムの詳細解明にはなかなか進展が見られなかった。

(2) 神経生理学においては、2系統の感覚刺激の同時入力に対して発火する多感覚ニューロンが哺乳類の上丘深層部において発見され(Meredith et al., 1985)、動物実験を中心に国内外で研究されてきた。一方で近年、fMRI(機能的磁気共鳴撮像法)、MEG(脳磁界計測法)、NIRS(近赤外分光法)等の人間の脳機能を非侵襲に調べる手法が出現し、マルチモーダル感覚情報処理もその研究対象となった。研究の多くは、ユニモーダル条件で説明不可能なマルチモーダル条件の脳活動を差分演算によって抽出する手法[例 視聴覚応答-(視覚応答+聴覚応答)]を取っており、一次感覚野から上側頭溝・頭頂間溝等の高次領野に亘って広範囲で多感覚ニューロンの存在が明らかになった(Calvert, 2001; Stein, 2012)。そのためマルチモーダル処理においては、ニューロン活動量の非線形的な増加が質的向上に寄与していることが分かったが、適応性や頑健性といった応用価値が高く特有の機能がどのような神経機序に根ざしているのかは不明であった。

(3) 研究代表者は時間分解能と空間分解能を併せ持つMEGを使用し、いち早く複数の感覚を対象とした脳計測研究を展開してきた(Aoyama et al., 2006/2007/2009/2013)。最近の研究においては、相互に対応付けられた視覚情報(V_i)と聴覚情報(A_i)が不一致となる際に(例 A_1V_1 , A_2V_2 , A_1V_2 , A_2V_1 , ...), 聴覚野や視覚野の活動が100ms後から増大し、認知や行動の意思決定が行われる500msも前からマルチモーダル感覚情報の整合性を脳内で識別し得ることを明らかにした(Aoyama et al., 2011)。注目すべきことに、その背景に存在する脳リズム構造として、低周波活動の同期性変調や低周波活動の位相に同期した高周波活動の振幅増大(位相振幅カップリング)が視聴覚連合野で観測された。同様の構造は、唇の動きに反する音声入力に対しても報告されており(Arnal et al.,

2011)、マルチモーダルな感覚情報の誤差伝播を反映すると考えられている。従って、これらの固有な脳リズム構造を調べれば、これまでニューロン活動の量的な議論に終始していたマルチモーダル感覚情報処理に対して動的側面から迫ることが可能となる。

2. 研究の目的

(1) マルチモーダル感覚情報の"誤差が最大"または"有り得ない状況"となる極端な環境を人工的に創り出すことで、可能な限り明瞭な形で脳リズム構造の変化を主にMEGを用いて捉えることを目指す。具体的には、右耳に呈示された音が左耳から聞こえ、左耳に呈示された音が右耳から聞こえるような特殊環境をウェアラブルデバイスのみで創出し、主に視覚情報との関係を見る。その上で、視聴覚情報の相関関係に応じた脳リズム構造の詳細(振幅や位相・関連する脳部位・部位間の結合性等)を通常環境/特殊環境への順応前・特殊環境への短期順応後・特殊空間への長期順応後で比較する。プリズムを用いた視空間反転の研究では、短期順応と長期順応の存在が知られているため(Redding et al., 2005; Sekiyama et al., 2012)、左右反転立体音響でもを設ける必要があると考えられる。本研究では、この特殊環境への順応過程を追うことでマルチモーダル感覚情報処理に迫る。

(2) 本研究は、複数の感覚を同時に扱った先端脳計測研究であり、通常では有り得ない感覚情報が入力される特殊環境への順応過程を追う、誤差伝播に固有な脳リズム構造の変化を解析して動的なマルチモーダル感覚情報処理に迫る、という研究代表者独自の2つのアイデアに立脚する。左右反転立体音響を創出するウェアラブルデバイスは、近年になって実用化されたものであり、類似研究がない。また順応効果を観られれば良いため、磁性体であっても脳計測時に外せるという利点もある。MEGによる詳細な脳リズム構造解析は、時間分解能が劣るfMRIや空間分解能が劣るEEG(脳波)では困難な研究である。本研究では、このような特徴を活かすことで研究を推進する。

3. 研究の方法

(1) 脳リズム構造の確認と特性の把握

最初に、通常環境において視聴覚照合課題に対するMEG計測を行うことで、先行研究で報告されている低周波活動の同期性変調や位相振幅カップリング等が実際に観測されることを確認し、これらの脳リズム構造の特性を把握した。視聴覚照合課題では、左耳または右耳に音刺激を、左視野または右視野に視覚刺激をランダムな組み合わせで同時呈示し、実験協力者には、左右に関して視聴覚情報が一致か不一致かを右示指と右中指で応答してもらった(図1)。このように

事前に脳リズム構造の確認と特性把握を行うことで、左右聴空間反転の順応効果を正確に捉えることに繋がった。

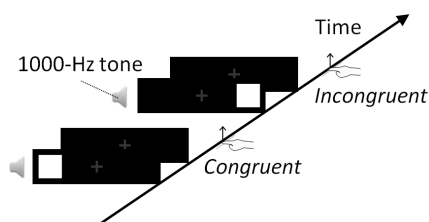


図1 視聴覚照合課題

(2) 特殊環境の構築と短期順応実験

近年になって製品化されたバイノーラルマイクロフォン・イヤフォンや高音質サウンドレコーダーを用いて、左右の音が反転した高精度の立体聴空間をウェアラブルデバイスのみで構築した(図2)。その上で、この左右反転聴システムの遅延時間や音源定位精度の検証を行い、その後の順応実験に備えた。次に実験協力者に、可能な限りの保護観察下において、就寝や入浴等の時間を除いてこの反転聴システムを1~2週間連続装着してもらった。この期間後に視聴覚照合課題に対するMEG計測を行い、左右反転立体音響への短期順応に対する脳活動を調べた。特に順応前の脳活動と比較することで、違和感の減少と相関のある特徴を調べた。

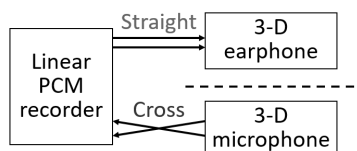


図2 左右反転聴システムの構成

(3) 長期順応実験

実験協力者に、可能な限りの保護観察下において、就寝や入浴等の時間を除いてこの反転聴システムを約1ヶ月間連続装着してもらった。週に1度、視聴覚照合課題に対するMEG計測を行い、左右反転立体音響への長期順応に対する脳活動を経時的に調べた。特に、違和感の減少や手指の応答性の変化と相関のある特徴を調べた。

(4) 一般性の検証と総合的考察

視聴覚照合課題を用いて得られた知見の一般性を、聴覚と運動の関係の観点から検証した。聴覚と運動の関係を調べるにあたっては、選択反応時間課題を採用し、視聴覚照合課題と同様にMEGデータの解析を行った。選択反応時間課題においては、左耳または右耳に音刺激をランダムに呈示し、実験協力者には、左音に対して左示指、右音に対して右示指で応答する課題と、左音に対して右示指、右音に対して左示指で応答する課題を交互に行ってもらった。最後に、本研究で得られた全ての知見を総括し、ニューロン活動の量的な議論に終始しない動的なマルチモーダ

ル感覚情報処理を総合的に考察した。

4. 研究成果

(1) 脳リズム構造の確認と特性把握

順応前の通常環境において、視聴覚照合課題に対するMEGデータを解析したところ、先行研究で報告されている低周波活動の同期性変調や位相振幅カップリング等の脳リズム構造が観測され、実験協力者毎にその特性を把握することができた。また一致刺激よりも不一致刺激に対して大きな聴覚誘発応答が得られた。右示指と右中指による平均反応時間については、一致刺激の方が不一致刺激よりも全般的に早かった。これらの結果をベースに短期順応実験や長期順応実験の解析を行った。

(2) 特殊環境の構築と短期順応実験

計画通り、左右反転聴システムをウェアラブルデバイスのみで構築することができた(図3)。このシステムを介した音呈示の遅延時間は2msであり、(左右が反転している)全方位に対して高い音源定位精度を示した。そのため、順応を引き起こすのに十分な時空間精度を有しているとみなし、短期順応実験に臨んだ。



図3 構築した左右反転聴システム

短期順応実験では、主観的な違和感は約1週間で減少し始め、積極的な音源定位を行わない限り、鏡像関係の視聴覚情報が一致として解釈され始めた。また視聴覚照合課題下で計測したMEGデータにおいては、順応初期では通常環境と変わらず、一致刺激よりも不一致刺激で大きな聴覚誘発応答が見られ、通常環境と類似の脳リズム構造が観測されたが、約1週間後には、脳リズム構造のみ様相が変わり始めた。そのため、低周波活動の同期性変調や位相振幅カップリング等の脳リズム構造が違和感に関連していると考えられた。平均反応時間は、全般的に長くなる傾向があった。このように、左右反転聴システムを1~2週間連続装着することで、主に知覚に関わる順応効果を脳レベルで確認できた。

(3) 長期順応実験

長期順応実験では、主観的な違和感は約1週間で減少し始め、以後、漸的に減少していった。視聴覚照合課題下で計測したMEGデータにおいては、聴覚連合野において低周波活動の同期性変調や位相振幅カップリング等の脳リズム構造が徐々に変化してい

た(図4)。また、1~3週目では一致刺激より不一致刺激で大きかった聴覚誘発応答の強度が、約1ヶ月後には一致刺激で僅かに大きくなった。同様に、不一致刺激より一致刺激で短かった平均反応時間も、約1ヶ月後に不一致刺激で僅かに早くなった。したがって、左右反転立体音響への長期にわたる接触においては、新しい統合ルールに基づいて情報間の誤差を補正する知覚と関連した視聴覚連合野由来の早い順応、統合処理の優先度を変化させる行動と関連した聴覚野由来の遅い順応、及びそれらの中間過程が存在することが明らかになった。このように、左右反転聴システムを約1ヶ月間連続装着することで、知覚と行動に関わる順応効果を脳レベルで確認できた。

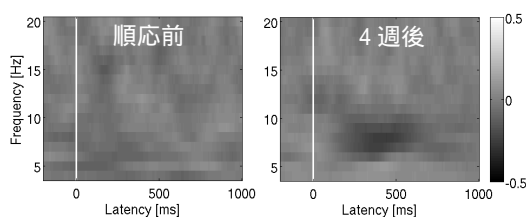


図4 低周波活動の同期性変化

(4) 一般性の検証と総合的考察

選択反応時間課題では、行動レベルにおいて、約1週間で主観的な違和感が減少し始めること、約2週間で手指の応答性が一時的に遅くなること、約1ヶ月間で同側音に比べて対側音に関連した手指の応答性が相対的に早くなること等が分かった。脳レベルにおいては、約1週間で脳リズム構造が変化すること、約2週間で聴覚野と運動野間の機能的結合性が一時的に弱まること(図5)、約1ヶ月間で同側音に比べて対側音に関連した聴覚誘発応答が相対的に大きくなること等が分かった。これらの知見は視聴覚照合課題で得られた知見と類似しており、モダリティに依存しない共通の機序である可能性が示された。

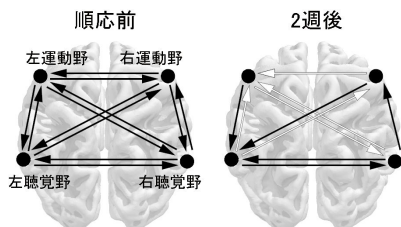


図5 機能的結合性の変化

以上のように、マルチモーダル感覚情報処理では、知覚と主に関連する脳リズムによる処理と行動と主に関連する誘発応答による処理が併存しており、接触頻度の高い環境や事象に対して段階的に最適化されることが明らかになった。従来研究の多くは、ニューロン活動量の非線形的な増分に注目して、マルチモーダル感覚情報処理を議論してきた

が、本研究によって動的特性を有する構造化された脳リズムも重要であることが明らかになった。

<引用文献>

Stein BE, The New Handbook of Multisensory Processing, Cambridge, MA: MIT Press, 2012.

青山 敦, 遠藤 博史, 本多 敏, 武田 常広, 視聴覚情報の整合性を用いた予測情報処理機構の脳磁場解析, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 12, 2007, 45-56.

Meredith MA, Stein BE, Descending efferents from the superior colliculus relay integrated multisensory information, Science, Vol. 227, 1985, 657-659.

Calvert GA, Crossmodal processing in the human brain: insights from functional neuroimaging studies, Cerebral Cortex, Vol. 11, 2001, 1110-1123.

Atsushi Aoyama, Hiroshi Endo, Satoshi Honda, Tsunehiro Takeda, Modulation of early auditory processing by visually based sound prediction, Brain Research, Vol. 2068, 2006, 194-204.

Atsushi Aoyama, Hiroshi Endo, Satoshi Honda, Tsunehiro Takeda, Neuroreport, Vol. 18, 2007, 1987-1990.

Atsushi Aoyama, Satoshi Honda, Tsunehiro Takeda, Magnetoencephalographic study of auditory feature analysis associated with visually based prediction, International Journal of Bioelectromagnetism, Vol. 11, 2009, 144-148.

Atsushi Aoyama, Tomohiro Haruyama, Shinya Kuriki, Early auditory change detection implicitly facilitated by ignored concurrent visual change during a Braille reading task, Journal of Integrative Neuroscience, Vol. 12, 2013, 1-15.

Atsushi Aoyama, Shinya Kuriki, Magnetoencephalographic study of crossmodal prediction and association of sensory information, Proceedings of the 8th International Symposium on Noninvasive Functional Source Imaging of the Brain and Heart & 8th International Conference on Bioelectromagnetism, 2011, CD-ROM.

Arnal LH, Wyart V, Giraud AL, Transitions in neural oscillations reflect prediction errors generated in audiovisual speech, Nature Neuroscience, Vol. 14, 2011, 797-801.

Redding GM, Rossetti Y, Wallace B, Applications of prism adaptation: a tutorial in theory and method,

Neuroscience & Biobehavioral Reviews, Vol. 29, 2005, 431–444.

Sekiyama K, Hashimoto K, Sugita Y, Visuo-somatosensory reorganization in perceptual adaptation to reversed vision, Acta Psychologica, Vol. 141, 2012, 231–242.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 4 件)

Atsushi Aoyama, Shinya Kuriki, A wearable system for adaptation to left-right reversed audition tested in combination with magnetoencephalography, Biomedical Engineering Letters, 査読有, 2017, 印刷中.

DOI: 10.1007/s13534-017-0026-3

青山 敦, 重田 和宏, 本多 敏, 栗城 真也, 左右反転立体音響への長期順応過程における視聴覚空間統合の脳磁界解析, 第 20 回人間情報学会発表論文集, 査読無, 2015, 17–18.

豊田 雄基, 青山 敦, 小山 裕徳, 川澄 正史, 視覚運動情報に対する予測と認知の関係性, 情報科学技術フォーラム講演論文集, 査読無, Vol. 13, No. 3, 2014, 311–312.

青山 敦, 重田 和宏, 本多 敏, 栗城 真也, 左右反転立体音響への約 1 ヶ月に渡る順応過程における視聴覚空間統合, 日本生体磁気学会誌, 査読無, Vol. 27, No. 1, 2014, 112–113.

[学会発表](計 13 件)

Atsushi Aoyama, Shinya Kuriki, Cross-sensory recalibration of audiovisual spatial information during long-term adaptation to left-right reversed audition, 20th International Conference on Biomagnetism (BIOMAG 2012), 2016/10/2–6, Seoul (South Korea).

Atsushi Aoyama, Magnetoencephalography reveals multisensory integration processing in human brains, Workshop on Magnetic-fluids and Magnetic Particle Imaging 2015 (WMMPI2015), 2015/11/22–23, Taipei (Taiwan).

Atsushi Aoyama, Kazuhiro Shigeta, Satoshi Honda, Shinya Kuriki, Explicit and implicit audiovisual spatial integration during adaptation to left-right reversed audition: an MEG study, 2nd International Conference on Basic and Clinical Multimodal Imaging (BaCI 2015), 2015/9/1–5, Utrecht (Netherlands).

Atsushi Aoyama, Kazuhiro Shigeta, Satoshi Honda, Shinya Kuriki, Audiovisual spatial integration during long-term adaptation to left-right reversed stereophonic audition: an MEG study, 第 25 回日本神経回路学会全国大会, 2015/7/28–31, 神戸国際会議場・神戸国際展示場(神戸).

Atsushi Aoyama, Shinya Kuriki, Cross-sensory information processing in human brains: a magnetoencephalographic study, Institute of Electro-optical Science and Technology Seminar, 2014/11/14, Taipei (Taiwan).

Atsushi Aoyama, Kazuhiro Shigeta, Shinya Kuriki, An MEG study of audiovisual spatial integration during long-term adaptation to left-right reversed audition, Joint meeting of the EEG & Clinical Neuroscience Society (ECNS), International Society for Research in Neuroimaging (ISNIP), and International Society for Brain Electromagnetic Tomography (ISBET), 2014/9/3–8, Halifax (Canada).

Atsushi Aoyama, Kazuhiro Shigeta, Satoshi Honda, Shinya Kuriki, Audiovisual spatial integration during long-term adaptation to left-right reversed audition, 19th International Conference on Biomagnetism (BIOMAG 2014), 2014/8/24–28, Halifax (Canada).

[図書](計 2 件)

青山 敦 他, 情報機構, 製品開発のための生体情報の計測手法と活用ノウハウ, 2017, 15–21.

青山 敦 他, フレグランスジャーナル社, 香りと五感, 2016, 67–86.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青山 敦 (AOYAMA, Atsushi)

慶應義塾大学・環境情報学部・准教授

研究者番号: 40508371