

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K00209

研究課題名（和文）左右反転立体音響を用いた人間の環境適応性の脳機能解析

研究課題名（英文）Analysis of brain function related to human adaptability to environment using left-right reversed stereophonic audition

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：左右の音が反転して聞こえるウェアラブルシステムを長期にわたって装着した際の脳活動に基づいて、（視聴覚環境に対する）人間の環境適応性のメカニズムに迫った。視覚情報と聴覚情報の統合モデルの動態（獲得・定着・選択・解除・再獲得等）に着目して脳活動を解析したところ、人間は複数の統合モデルを脳内に保持でき、（視聴覚）入力の変数が最小となるモデルを排他的に適用することで、自然には存在しない（視聴覚）環境にも適応できることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、環境適応性という人間の生存や進化に関わる重要な機能の一端を明らかにした点、左右反転立体音響への順応という新しいアプローチが環境適応性の解明において有効であることを示した点に学術的意義がある。また、知能ロボットの環境適応技術、バーチャルリアリティーにおける感覚情報の設計技術、発達障害に対する感覚統合療法を始めとして、多岐にわたる応用まで見据えられる点に社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：Mechanism of human adaptability to (audiovisual) environment was investigated based on brain activity during long-term wearing of a wearable system that achieves left-right reversal of sounds. The brain activity was analyzed with a focus on dynamics (acquisition/settlement, selection, release/reacquisition, etc.) of an integration model of visual and auditory information, and revealed that the human can retain multiple integration models in the brain and adapt to even an (audiovisual) environment that does not exist in nature by applying a model with a minimum error of (audiovisual) input in an exclusive manner.

研究分野：脳情報学

キーワード：神経科学 脳・神経 脳情報 脳機能計測 多感覚統合

1. 研究開始当初の背景

(1) 人間は、様々な環境に対して柔軟に適応できる能力を持っている。その背景には、視覚情報や聴覚情報等の感覚情報を脳内で複合的に処理することで、統合モデル(ルール)に従って外部環境を内的に再構成する感覚統合処理が存在し(Stein, 2012)、その統合モデルの動態(獲得・定着、選択、解除・再獲得等)が環境適応性の本質だと考えられる。しかしながら、人類の生存や進化に関わるこの重要な能力が、いかにして実現されているのかは未解決の問題である。

(2) この問題に取り組むにあたって、自然には存在しない特殊な感覚空間への順応に注目した。特殊な感覚空間への順応については、左右または上下の視覚情報が入れ替わって見えるプリズム眼鏡を用いて、主に視覚において古くから研究されてきた(Stratton, 1897)。しかしながら、最優位感覚である視覚の空間反転では、視覚と運動の関係は分かっても、感覚同士の関係を調べにくいという問題があった。一方で、右側(左側)から来た音が左耳(右耳)で聞こえるような聴空間に対する順応を調べた報告は、反転視と比べて非常に少なかった。僅かな研究例として、Young は 2 つのトランペット状の集音器を左右交差して耳に取り付ける迷聴器を作成し、迷聴器を 18 日間断続的に装着した際に、知覚される音源の方向が視覚情報の影響を受けやすくなることを報告した(Young, 1928)。このことは、左右反転聴への順応によって視聴覚統合に変化が生じることを示しているが、左右反転聴への長期順応過程を調べた脳研究は(研究代表者の知る限り)存在しなかった。

(3) 左右反転聴に関する脳研究が存在しなかった理由として、大掛かりな装置なしでは聴空間を精緻に反転することが技術的に困難だったことが挙げられる。Young の迷聴器を含め、単に左右の音を入れ替えることはできても、立体音響として反転することは容易ではなかった。しかしながら研究代表者は、最新の技術を用いて高精度の左右反転立体音響をウェアラブルに創出するデバイスの作成に成功し、このデバイスを約 1 ヶ月間にわたって装着することで、約 1 週目で主観的な違和感が減少し始めること、約 1 ヶ月目で非反転音と比べて反転音に対する手指の反応時間が同等かそれ以上に早まることを明らかにした。更には、と同時期に、視聴覚連合野(上側頭溝)における構造化された脳リズム(位相振幅カップリング等)、聴覚野における誘発活動(N1 成分)の強度変化を各々観測した。このように左右反転立体音響への段階的な順応現象は知覚や行動、脳活動のレベルで捉えられているものの、環境適応性の肝となる統合モデルの動態については分かっていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、ウェアラブルな左右反転立体音響への長期にわたる順応過程の脳活動に基づいて、視聴覚統合モデルの動態(獲得・定着、選択、解除・再獲得等)を検討し、(視聴覚環境に対する)人間の環境適応性のメカニズムに迫ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 段階的順応現象の確認、および視聴覚統合モデルの獲得・定着の検討：十分な配慮の下、実験参加者に左右反転立体音響デバイスを約 1 ヶ月間にわたって可能な限り装着して貰い、週に 1 回、視聴覚照合課題や視聴覚サイモン課題下で脳計測(脳波・脳磁図)を行って得たデータを解析した。両課題共に、左耳または右耳に聴覚刺激を、左視野または右視野に視覚刺激をランダムに同時呈示した。視聴覚照合課題では、実験参加者に視聴覚刺激の左右の一致/不一致を弁別して貰ったのに対して、視聴覚サイモン課題では、無関係な特徴(音の高低と視覚的手掛かりの上下)の一致/不一致を弁別して貰った。まず、視聴覚照合課題において、研究代表者の先行研究で観測された段階的順応現象の確認を行った。続いて、両課題の左右の一致/不一致に対する脳活動と手指の反応時間(弁別時間)によって、顕在的な視聴覚統合の変化と潜在的な視聴覚統合の変化を各々評価し、視聴覚統合モデルの獲得・定着を検討した。このとき、聴覚イメージの動態について別途調べ、聴覚だけでなく聴覚イメージにも注目して検討を行った。

(2) 視聴覚統合モデルの選択の検討：獲得・定着した視聴覚統合モデルがどのように選択されるかを観るために、(1)で計測したデータに関して、左右の一致/不一致に対する脳活動と手指の反応時間だけでなく、手指の反応エラー(弁別エラー)にも注目して更に解析を行った。

(3) 視聴覚統合モデルの解除・再獲得の検討：順応期間後に左右反転立体音響デバイスを外すと、左右反転立体音響から通常の聴空間に戻ることとなり、獲得した視聴覚統合モデルは適用できなくなる。そのため、左右反転立体音響の統合モデルは解除され、通常の視聴覚統合モデルが

再び優位になると考えられる。この過程において(1)と同様の検討を行い、統合モデルの解除について検討した。更には、デバイスを再装着し、最初の順応と再順応における違いを調べ、統合モデルの再獲得について検討した。

(4) 知見の多角的検証と取り纏め：本研究において、視聴覚連合野の構造化された脳リズムは特に重要な知見である。この脳リズムが視聴覚情報の誤差検出 (Arnal, 2011) に関わっているかを調べるため、視聴覚連合野への経頭蓋電気刺激による実験的検討を行った。また、視聴覚統合モデルに関する知見の一般性を検証するために、研究報告の多い反転視空間における知見との対照を行った。最後に、視聴覚統合モデルに関する知見の取り纏めを行った。

4. 研究成果

(1) 段階的順応現象の確認、および視聴覚統合モデルの獲得・定着の検討：左右反転立体音響への長期順応過程において計測した視聴覚照合課題下の脳活動を解析し、先行研究で観測された諸現象を確認した。具体的には、約1週目で減少する主観的な違和感、それに相関して変容する視聴覚連合野における構造化された脳リズム（位相振幅カップリング等）、約2週目で一時的に遅くなる手指の反応時間、それに相関して増大する前頭の高周波脳リズム、約1ヵ月目で僅かに逆転する反転音と非反転音に対する手指の反応時間、それに相関して変化する聴覚野における誘発活動（N1成分）の強度を観測した。これらの現象から、視聴覚情報の誤差を調節して知覚に影響を及ぼす処理、視聴覚情報の誤差に基づいて同情報の組み合わせの優先度を最適化する中間処理、視聴覚情報の組み合わせの優先度を調節して行動に影響を及ぼす処理の存在が各々確認できた。次に、視聴覚サイモン課題下の脳活動を解析したところ、は観測されなかった。よって、空間情報に関する顕在的な視聴覚統合は、約1週目で新たな統合モデルに徐々に従うようになるが、潜在的な視聴覚統合は通常の（古い）統合モデルに従い続け、約1ヵ月目で新しい統合モデルの影響を受けるようになることが分かった。

(2) 視聴覚統合モデルの選択の検討：左右反転立体音響への長期順応過程において、約2週目で手指の反応時間だけでなく反応エラーも最大となった。このとき増大した前頭の高周波脳リズムは意思決定を反映しており (Heekeren, 2006)、反応エラーは、新しい統合モデルと通常の統合モデルの競合によって生じたと考えられる。そのため、人間は複数の視聴覚統合モデルを脳内に保持でき、併存している視聴覚統合モデルの中から、視聴覚情報の誤差が最小となる統合モデルを最適なモデルとして排他的に適用していることが分かった。

(3) 視聴覚統合モデルの解除・再獲得の検討：左右反転立体音響への長期順応後に通常の聴空間へと戻ると、違和感や手指の反応時間・エラー、またこれらと相関する脳活動（視聴覚連合野の脳リズムや聴覚野の誘発活動等）が順応前の状態に戻り、左右反転立体音響に再接触すると、長期順応後の状態に近付いた。よって、新たな視聴覚統合モデルを一度獲得すると、接触する視聴覚環境に応じて統合モデルを適応的に切り替えられることが分かった。

(4) 知見の多角的検証と取り纏め：視聴覚連合野に対して経頭蓋電気刺激を与えたところ、視聴覚情報の空間的な統合が阻害された。このことから、視聴覚連合野における脳リズムが誤差検出 (Arnal, 2011) に関わっている可能性が高まった。また、左右反転視空間を用いた先行研究では、反転視への約10日間の接触で行動制御の再校正が、約1ヶ月間の接触で身体イメージの再編が起こると報告されている (Sekiyama, 2012)。そのため、視聴覚統合モデルの知見が視覚でも部分的に当て嵌まることが分かり、得られた知見の信頼性が高まった。したがって、視聴覚統合モデルの獲得・定着、選択、解除・再獲得に関する一連の知見から、人間は複数の統合モデルを脳内に保持でき、（視聴覚）入力の影響が最小となるモデルを排他的に適用することで、自然には存在しない（視聴覚）環境にも適応していることが分かった。

< 引用文献 >

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

Stratton GM, Some preliminary experiments on vision without inversion of the retinal image, Psychological Review, Vol. 3, 1896, 611-617.

Young TP, Auditory localization with acoustical transposition of the ears, Journal of Experimental Psychology, Vol. 11, 1928, 399-429.

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

Heekeren HR, Marrett S, Ruff DA, Bandettini PA, Ungerleider LG, Involvement of human left dorsolateral prefrontal cortex in perceptual decision making is independent of response modality, Proceedings of the National Academy of Sciences,

Vol 103, 2006, 10023-10028.

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

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Atsushi Aoyama	4. 巻 140
2. 論文標題 A method to study adaptation to left-right reversed audition	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Visualized Experiments	6. 最初と最後の頁 e56808
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3791/56808	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 青山敦	4. 巻 56
2. 論文標題 脳磁場計測による多感覚統合機能の解明 特殊空間への順応を用いた新アプローチ	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 880-883
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11499/sicejl.56.880	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Atsushi Aoyama, Shinya Kuriki	4. 巻 7
2. 論文標題 A wearable system for adaptation to left-right reversed audition tested in combination with magnetoencephalography	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Biomedical Engineering Letters	6. 最初と最後の頁 205-213
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s13534-017-0026-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 2件/うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Shu Sakamoto, Atsushi Aoyama
2. 発表標題 Neural oscillations and networks in auditory imagery-specific processes
3. 学会等名 The 2022 Conference of the Society for Music Perception and Cognition（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shu Sakamoto, Atsuya Kobayashi, Karin Matsushita, Risa Shimizu, Atsushi Aoyama
2. 発表標題 Auditory-frontal and -motor networks during distinct neural subprocesses of auditory imagery
3. 学会等名 The 50th Annual Meeting of the Society for Neuroscience (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Aoyama, Takayuki Hoshino
2. 発表標題 Adaptation-related changes in neural oscillations during exposure to left-right reversed audition
3. 学会等名 The 5th International Conference on Basic and Clinical Multimodal Imaging (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shu Sakamoto, Atsuya Kobayashi, Karin Matsushita, Risa Shimizu, Atsushi Aoyama
2. 発表標題 Neural oscillations related to multiple subprocesses in auditory imagery
3. 学会等名 The 44th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society and The 1st CJK International Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shu Sakamoto, Karin Matsushita, Atsuya Kobayashi, Risa Shimizu, Atsushi Aoyama
2. 発表標題 Oscillatory activity in multiple neural processes related to auditory imagery
3. 学会等名 The 16th International Conference on Music Perception and Cognition and The 11th Triennial Conference of European Society for the Cognitive Sciences of Music (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂本嵩, 小林篤矢, 松下佳鈴, 清水梨紗, 青山敦
2. 発表標題 聴覚想起の神経処理に関する律動の解析
3. 学会等名 日本生体医工学会第29回実社会におけるマルチモーダル脳情報応用技術研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Atsushi Aoyama
2. 発表標題 A neuromagnetic study of human adaptability to an unusual auditory environment
3. 学会等名 Automatic Control and Systems Engineering Research Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤優仁, 星野貴行, 青山 敦
2. 発表標題 経頭蓋ランダムノイズ刺激による腹話術効果の抑制
3. 学会等名 第59回日本生体医工学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤優仁, 星野貴行, 青山敦
2. 発表標題 経頭蓋ランダムノイズ刺激による腹話術効果の変調
3. 学会等名 日本生体医工学会第27回実社会におけるマルチモーダル脳情報応用技術研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤優仁, 星野貴行, 青山敦
2. 発表標題 経頭蓋電気刺激による腹話術効果の阻害に関する検討
3. 学会等名 第49回日本臨床神経生理学会学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Aoyama, Takayuki Hoshino
2. 発表標題 Explicit and implicit auditory-motor spatial coordination during exposure to left-right reversed audition: an MEG study
3. 学会等名 The 4th International Conference on Basic and Clinical Multimodal Imaging (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青山敦
2. 発表標題 左右反転聴への長期順応過程における空間統合処理の脳磁界解析
3. 学会等名 第4回LORETA cafe and 第3回関西Transcranial Electrical Stimulation Forum (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi Aoyama, Shinya Kuriki
2. 発表標題 Optimization processes of audiovisual spatial integration during adaptation to left-right reversed audition
3. 学会等名 The 21st International Conference on Biomagnetism (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Aoyama, Shinya Kuriki
2. 発表標題 Optimization of auditory-motor spatial coordination during adaptation to left-right reversed audition: an MEG study
3. 学会等名 3rd International Conference on Basic and Clinical Multimodal Imaging (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 青山敦 他	4. 発行年 2018年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 768
3. 書名 ヒトの感性に訴える製品開発とその評価	

1. 著者名 青山敦 他	4. 発行年 2018年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 552
3. 書名 VR / AR技術の開発動向と最新応用事例	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------