

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：32657

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22700278

研究課題名（和文） ヒト脳における異種感覚情報処理機構の解明

研究課題名（英文） Crossmodal information processing mechanism of human brains

研究代表者

青山 敦（AOYAMA ATSUSHI）

東京電機大学・総合研究所・助教

研究者番号：40508371

研究成果の概要（和文）：外部環境に対する迅速な適応を実現している異種感覚情報処理では、異種感覚刺激の変化に対して認知的・行動的な決定が行われる大分前から感覚活動の変調が見られ、その背景には低周波帯域を使用した感覚処理間の迅速な相互情報伝播が存在することが分かった。従って、異種感覚情報処理は単なる単一感覚処理に基づく上位集約処理ではなく、感覚処理間で情報をやり取りする下位連携処理でもあり、これによって迅速な適応を実現していると考えられた。

研究成果の概要（英文）：As to crossmodal information processing that achieves rapid adaptation to an external environment, modulation of sensory activity was observed much before cognitive and behavioral decisions occurred, and rapid reciprocal propagation of information between sensory processings was detected in a low frequency band behind this modulation. It is thus considered that the crossmodal information processing is not merely based on a hierarchical scheme of unisensory processings but also on a communicative scheme of an interplay of information between the processings, thereby achieving the rapid adaption to environment.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，認知科学

キーワード：脳・神経，神経科学，計測工学，生体生命情報学，認知科学

1. 研究開始当初の背景

(1) 従来，人間の脳内情報処理は，視覚や聴覚等の各感覚情報処理の総和として捉えられてきた。しかしながら2種類の感覚刺激の同時入力にのみ発火する multisensory neuron が哺乳類の上丘深層部において発見され，人間においてもその存在が明らかにな

った (Stein BE, The New Handbook of Multisensory Processing, Cambridge, MA: MIT Press, 2012)。近年では機能的磁気共鳴撮像法 (fMRI) によって，異種感覚を司る部位が視覚野・聴覚野等の低次領野から前頭前野・頭頂間溝等の高次領野まで広範囲に渡って存在することが明らかになり，五感情報処

理を総合的な融合体として捉える重要性が脳科学の側面から提唱されるようになった。

(2) 一方で人間の生存能力に関わる外部環境の変化検知機構に関する研究は、脳波計測を中心に単一感覚においてのみ行われてきた。聴覚においては、反復的に呈示される標準音 A₁ の刺激系列に埋め込まれた稀に呈示される逸脱音 A₂ (物理的特徴が A₁ と異なる音) に対して上側頭部で自動的に発生するミスマッチ反応が発見され (例 A₁, A₁, A₁, A₁, A₂, …) (Näätänen R et al., Clin Neurophysiol 118, 2007), 音変化検知を反映する早期脳活動として国内外で広く研究されてきた。近年、視覚 (例 V₁, V₁, V₁, V₁, V₂, …) (Pazo-Alvarez P et al., Biol Psychol 63, 2003) や体性感覚 (例 S₁, S₁, S₁, S₁, S₂, …) (Kekoni J et al., Biol Psychol 46, 1997) においても類似の反応の存在が明らかになった。しかしながら脳内情報処理を五感の融合体として捉える必要性が唱えられているにもかかわらず、異種感覚情報の対応の変化 (例 X₁Y₁, X₂Y₂, X₂Y₂, X₁Y₁, X₁Y₂, …) に対する早期脳活動に関しては、研究代表者の知る限り報告がなかった。

(3) 研究代表者は先行研究において、時間・空間分解能に優れる MEG を用いて、視聴覚情報の対応の変化 (例 V₁A₁, V₂A₂, V₂A₂, V₁A₁, V₁A₂, …) に対して特異的に発現する上側頭部・下前頭部/有線野・外有線野の早期活動 D1 を初めて同定した (Aoyama A et al., Brain Res 1068, 2006; Aoyama A et al., NeuroReport 18, 2007)。但し、自動的に発現する単一感覚でのミスマッチ反応とは異なり、視覚情報と聴覚情報の間の対応の度合いに応じて活動強度が変化する特性を持っていた。従って、この特性を利用して実験的検討を行えば、人間の脳が異種感覚的な複合環境の変化に対してどのように追従し対処しているのか、その適応原理を明らかにできると考えた。

2. 研究の目的

(1) 人間は、外部環境から取得した異なる複数の感覚情報 (視覚・聴覚・体性感覚情報等) を脳内で複合的に処理 (異種感覚情報処理) することで、統合的な知覚を獲得し、外部環境に対して迅速かつ安定的に対処・適応している。しかしながら、人間の生存能力に関わるこの重要な機構に関しては不明な点が多い。本研究では、前述の背景の下、時間分解能に優れる脳磁界計測法 (MEG) を用いて、異種感覚刺激の変化に対する早期脳活動を計測し、刺激変化から早期脳活動誘発、行動までの一連の異種感覚的な環境に対する対処・適応過程を段階的に明らかにすることを

目的とする。具体的には、優位感覚である視覚と聴覚に注目し、以下の実験的検討を行った。

① 刺激⇔脳：視聴覚刺激の変化と早期脳活動の関係

視聴覚で同定された早期脳活動 D1 に関して、刺激パラメータ (視聴覚情報の対応度等) を変化させ、脳活動特性を明らかにする。

② 脳⇔行動：早期脳活動とボタン応答による反応時間の関係

視聴覚情報の対応変化に対する早期脳活動とボタン応答の反応時間の検討を行い、脳活動レベルと行動レベルでの変化検知の関係を明らかにする。

③ 刺激⇔脳⇔行動：刺激変化から脳活動、行動までの関係

視聴覚情報の対応変化によって早期脳活動が誘発し行動に現れるまでの一連の対処・適応過程から、異種感覚情報処理に関する機能的モデルを検討し、人間の異種感覚環境に対する適応原理の総合的かつ多角的検討を行う。

(2) 本研究の基本アイディアは、非定常状態である外部環境の変化検知の脳内過程から、定常時の環境適応原理を明らかにすることである。研究代表者は、その解明の鍵となる異種感覚情報の対応の変化に対する早期脳活動の同定に逸早く成功している。また東京電機大学総合研究所千葉共同利用施設 (現名称) は、我が国の生体磁気研究の黎明の地である。研究設備に関しては、磁気ノイズ源が少ない千葉ニュータウンにおいて、本研究で必要不可欠な全頭型 MEG 計測装置が世界最高性能レベルの磁気シールドルーム内に設置されており、国内随一の脳磁気計測環境を有する。本研究は、刺激変化検知に対する複数の脳活動の動態を見る必要があり、時間分解能に劣る fMRI や空間分解能に劣る脳波計測では不可能な研究である。そのため良好なデータ収集が期待でき、研究環境の面からも優位な立場にある。本研究では、このような優位性を活かすことで研究を推進した。

3. 研究の方法

(1) 脳活動計測には、Neuromag 社製 122 チャンネル全頭型 MEG 計測装置を使用した。計測は磁気シールドルーム内で行い、実験協力者に対して視覚聴覚刺激を呈示して、早期脳活動や行動との関係を調べた。

① 刺激⇔脳

2 種類の視覚刺激と 2 種類の聴覚刺激を対応させ、その対応の変化 (例 V₁A₁, V₂A₂,

V1A1, V2A2, V2A1, ...) に対する脳活動計測と行動計測を行った (図1). 具体的には, 中心視野内で上方向または下方向に短時間移動する縞模様刺激を用い, 視覚刺激の移動直後, 上または下方向に各々対応付けられた 1250Hz または 1000Hz のトーンバースト音を両耳に呈示した. 縞模様刺激の移動方向はランダム, 移動距離は一空間波長分とした. 視聴覚の間隔を 100, 300, 500ms の3セッションで実験を行い, これによって視聴覚情報の対応付けに必要な時間を制御した. ここで, 視覚情報と聴覚情報が対応付けられた2種類の一致刺激と対応の矛盾する2種類の不一致刺激 (視聴覚刺激の複合変化) を設け, 不一致の確率が各々のセッションで 10% となるようにした. 視覚刺激の上/下方向, 聴覚刺激の高音/低音に関しては, 各々等頻度となるように調整されている. 視聴覚刺激同士の間隔は 1100ms とし, 各条件につき4種類のペア刺激をランダムに 1000 回を呈示した. ここで 250 回毎に 30s の休憩時間を挟み, 実験順序は実験協力者間でランダムとした. 脳磁界計測後, 聴覚呈示を基準に刺激毎に加算平均した. 次に一致刺激と不一致刺激に対する差分磁場を求め, 視聴覚情報の変化に対して特異的な脳活動を評価した. また差分磁場の刺激後の各サンプルに対して, dSPM (MNE software) を適用し, 経時的な活動源解析を行った.

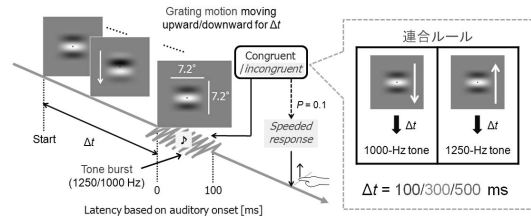


図1 視聴覚刺激

② 脳⇔行動

異種感覚の変化に対して発現する早期脳活動が, 認知・行動生成にどのように影響を及ぼしているのかを検討した. 具体的には上記の実験において, 移動方向と音高の不一致に対して, 実験協力者は可能な限り早く右示指でボタン応答するように指示した. 更に一致刺激と不一致刺激に対する応答の差が生じる最短のオンセット潜時を求め, 早期脳活動と平均反応時間 (不一致刺激における聴覚刺激のオンセットから右示指での応答のオンセットまでの時間) との比較を行った.

③ 刺激⇔脳⇔行動

異種感覚刺激の変化と早期脳活動の関係, 早期脳活動と行動の関係を総括し, 異種感覚刺激の変化入力から早期脳活動の発現, 認知・行動の生成に至る一連の異種感覚情報処

理機構の総合的検討を行った. 特に, 早期誘発脳活動や行動の背景に存在する脳律動変化に注目し, 複素ウェーブレットを用いた時間周波数解析を行って, 律動変化の特性や情報伝達等の機能的な役割を検討した.

(2) 上記の異種感覚刺激の複合的な変化に加えて, 異種感覚刺激の同時変化に対する脳活動や感覚統合障害の知見による多角的な検討を行った. 視聴覚刺激の同時変化 (例 V1A1, V1A1, V1A1, V1A1, V2A2, ...) や一方の刺激の変化 (例 V1A1, V1A1, V1A1, V1A1, V1A2, ...) 等に対する早期脳活動を MEG で計測した. 視覚刺激として, 2×2 の市松模様のパターン V_a または V_b を使用し, 左右の視野に同じパターンを 50ms 表示させた. 聴覚刺激として, 1000Hz の純音 A_a または 1050Hz の純音 A_b を使用し, 視覚刺激と同時に両耳に 50ms 呈示した. この時, V_a と A_a の組み合わせ (標準刺激) を高頻度 (87.5%) 出現させ, 稀に V_b と A_a の組み合わせ (視覚逸脱刺激), V_a と A_b の組み合わせ (聴覚逸脱刺激), V_b と A_b の組み合わせ (視聴覚逸脱刺激) を各々低頻度 (4.2%) で出現させた. 4 種類の視聴覚刺激は 400ms の間隔でランダムに合計 2400 回呈示し, 600 回毎に, 30s の休憩時間を挟んだ. 解析方法は, 異種感覚刺激の複合的な変化の場合と同様に行った.

4. 研究成果

(1) 異種感覚刺激の複合変化と早期脳活動の関係について MEG 計測による実験的検討を行った.

① 刺激⇔脳 (主に平成 22 年度に実施)

視聴覚刺激の複合変化と誘発される早期脳活動の検討を行った. 先行研究と同様に, 聴覚呈示後 100–200ms において, 視聴覚刺激の複合変化 (不一致) に対して特異的な両側性の活動が聴覚野を含む上側頭部で観測された (図2左). この活動は視聴覚間隔が 300, 500ms の条件で顕著であり, 視聴覚間隔が長い程, 活動強度は大きかった. 加えて, 500ms の条件においては視覚野を含む楔部の活動も観測された (図2右). 従って, 視聴覚情報の対応付けに必要な時間に依存して, 聴覚野や視覚野が相互に感覚情報を処理していることが分かった. またこれらの早期脳活動の潜時に関しては, 視聴覚間隔に依存

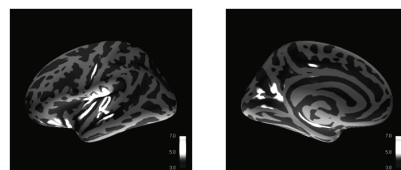


図2 視聴覚の複合的变化に対する早期脳活動

せず、刺激呈示後約 100ms で一致と不一致の活動に統計的に有意な差が見られた。このことから多感覚的な連合知覚は各々の感覚野において、刺激呈示後約 100ms で形成されることが分かった。

② 脳⇔行動 (主に平成 23 年度に実施)

①で観測された早期脳活動と行動の関係について検討を行った。視聴覚刺激の複合変化に対する実験をボタン押し課題下で行ったところ、①と同様に視聴覚変化後 100ms 程度で左右の上側頭部と楔部が活動した。更に、ボタン押しの平均反応時間は 500–700ms となり、視聴覚間隔が長い程、平均反応時間は短くなった。このことから、視聴覚連合知覚は聴覚野と視覚野において 100ms 程度で形成されるのに対して、認知的・行動的な決定は約 500ms 後に行われ、感覚皮質活動がその決定を促進していることが分かった。

③ 刺激⇔脳⇔行動 (主に平成 24 年度に実施)

①と②を総合し、視聴覚刺激の複合変化入力から行動に至るまでの一連の過程を詳細に解析して、異種感覚情報処理の迅速性や適応性の本質に関する検討を行った。具体的には、視聴覚変化に対するボタン押しの約 500ms も前に視覚野と聴覚野で変化を検知していることに注目し、その背景に存在する脳律動の解析を行った。時間周波数解析の結果、変化前の視聴覚情報の差区間では、 θ 帯域 (4–7Hz) と α 帯域 (8–13Hz) の活動増大が見られ、変化後には、差区間での活動に依存した θ 活動の増大と依存しない α 活動の減少が後頭側頭部で見られた (図 3)。また θ 活動の増大の直後に視覚野と聴覚野の早期脳活動が開始し、その後 α 活動が減少して、ボタン押しが行われることが分かった。変化後の θ 活動の増大は、予測の棄却と更新による再構成処理を反映していると考えられる。従って低周波帯域を用いた感覚間の予測的な相互情報伝播機構が、異種感覚情報処理における迅速性や適応性を実現していると考えられた。

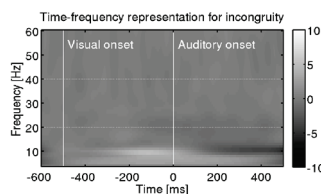


図 3 低周波律動の変調

(2) 異種感覚刺激の同時変化に対する早期脳活動について MEG 計測による実験的検討を行った。視聴覚逸脱刺激と聴覚逸脱刺激に対して、刺激後 100–250ms の左右聴覚野で顕著なピーク活動 N1m の増大が確認された。

この増大分は、繰り返し呈示される聴覚刺激の急な変化に対して無意識的に発現するミスマッチ反応 (Näätänen R et al., *Clin Neurophysiol* 118, 2007) であると考えられる。注目すべきことに、視聴覚逸脱刺激のミスマッチ反応の強度の方が聴覚逸脱刺激と視覚逸脱刺激の強度の加算よりも大きく、視聴覚刺激の同時変化によってのみ出現する成分の存在が明らかになった。視覚刺激の変化が伴った場合に強度が増大していたため、視覚野を介さず皮質下の部位で相互作用の促進/抑制の制御が行われている可能性が考えられた。これらの知見から、脳内における異種感覚情報処理は、高次の連合野に加えて、低次の感覚野や皮質下の部位が重要な役割を果たしていることが示唆された。

(2) 従来、感覚統合は各々の感覚情報処理が終了した後、高次連合野で始まると考えられてきた。例えば視聴覚統合は、視覚野の処理や聴覚野の処理が終了した後、連合野である上側頭溝で始まると考えられてきた。しかしながらこの場合、感覚統合の迅速性や恒常性の説明がつかなかった (Stein BE, *The New Handbook of Multisensory Processing*, Cambridge, MA: MIT Press, 2012)。本研究では、視聴覚情報の変化に対する対処過程に注目し、視聴覚情報を僅かな時間だけずらして呈示することによって、呈示直後から感覚野間 (視覚野と聴覚野の間) で予測的に情報をやり取りして統合処理が始まることを明らかにした。この統合処理に伴う脳活動は、統合の主観的経験 (環境把握) や行動 (対環境応答) が生じる前から始まることも分かり、更にその背景の脳律動から、低周波帯域を使用して予測誤差を感覚間で迅速に相互伝播し共有する機構の存在が示唆された。脳内における誤差伝播は近年注目されており (Arnal LH et al., *Nat Neurosci* 14, 2011)、早期脳活動の連携にも重要な役割を果たしていることが明らかになった。本研究でも扱った単一感覚処理や感覚統合障害 (Xenomelia 等) の知見と総合すると、異種感覚情報処理は単なる単一感覚処理の和に基づく上位集約的な処理ではなく、感覚処理間で予測的に情報をやり取りする下位連携的な処理でもあることが分かり、これによって異種感覚情報処理における迅速な環境適応性が実現されていると考えられた。

本研究では、現在の環境において感覚情報同士が適切に統合されることを前提として異種感覚情報処理の議論を行ってきた。しかしながら特殊環境 (例 左右反転した視空間環境) においては、統合ルールが変わってしまい、適切な統合が不可能になる。今後は、特殊環境下への順応過程を追うことによって、本研究で観測された脳活動がルールに依

存してどのように変遷するのかを調べ、人間が有する環境への適応性を更に追求していきたい。

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 19 件)

- ① 青山敦, 視聴覚間における予測的連合の不整合に対する脳律動変化, 第 27 回日本生体磁気学会大会論文集, 査読有, Vol.25, No. 1, 2012, 78–79.
- ② Atsushi Aoyama, Peter Krummenacher, Antonella Palla, Leonie Maria Hilti, Peter Brugger, Impaired spatial-temporal integration of touch in xenomelia (body integrity identity disorder), *Spatial Cognition and Computation*, 査読有, Vol.12, 2012, 96–110.
DOI: 10.1080/13875868.2011.603773
- ③ Takayoshi Kogai, Atsushi Aoyama, Kaoru Amano, Tsunehiro Takeda, Visual mismatch response evoked by a perceptually indistinguishable oddball, *Neuroreport*, 査読有, Vol. 22, No. 11, 2011, 535–538.
DOI: 10.1097/WNR.0b013e328348ab76
- ④ Kenichi Yuasa, Atsushi Aoyama, Kaoru Amano, Tsunehiro Takeda, Measurement of brain activity related to conceptual recognition during sensory and semantic tasks, *Proceedings of the 8th International Symposium on Noninvasive Functional Source Imaging of the Brain and Heart & 8th International Conference on Bioelectromagnetism*, 査読有, 2011, CD-ROM.
- ⑤ 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*, 査読有, 2011, CD-ROM.

[学会発表] (計 36 件)

- ① Kenichi Yuasa, Kaoru Amano, Atsushi Aoyama, Tsunehiro Takeda, The analysis of objective recognition free from stimulus modality, 18th International Conference on

Biomagnetism, 2012/8/29, Maison de la Chimie (Paris).

- ② Atsushi Aoyama, Shinya Kuriki, Cortical oscillatory changes related to violation of cross-sensory prediction and association, 18th International Conference on Biomagnetism, 2012/8/27, Maison de la Chimie (Paris).
- ③ Kenichi Yuasa, Kaoru Amano, Atsushi Aoyama, Tsunehiro Takeda, Measurement of brain activity related to conceptual recognition during sensory and semantic tasks, Annual Meeting of Society for Neuroscience (Neuroscience 2011), 2011/11/15, Walter E. Washington Convention Center (Washington, DC).
- ④ Atsushi Aoyama, Shinya Kuriki, Rapid prediction and association of multisensory information in the human brain, 2011 International Symposium on Computational Models for Life Sciences, 2011/10/11, Toyama International Conference Center (Toyama).
- ⑤ Atsushi Aoyama, Shinya Kuriki, Cortical activity related to crossmodal prediction and association: an MEG study, 2011 Asia Symposium on Brain Science, 2011/5/9, National Taiwan Normal University (Taipei).
- ⑥ Atsushi Aoyama, Peter Krummenacher, Leonie Maria Hilti, Peter Brugger, Impaired tactile temporal order judgments in body integrity identity disorder, 29th European Workshop on Cognitive Neuropsychology, 2011/1/24, Academia Cusano (Bressanone).
- ⑦ Atsushi Aoyama, Shinya Kuriki, Magnetoencephalographic study of rapid association of cross-modal and cross-temporal information, 29th International Congress of Clinical Neurophysiology, 2010/11/1, Kobe International Conference Center (Kobe).

6. 研究組織

(1)研究代表者

青山 敦 (AOYAMA ATSUSHI)
東京電機大学・総合研究所・助教
研究者番号：40508371