

視覚体性感覚間の注意の相互作用に関わるヒト脳活動の計測 Cortical activity of humans related to cross-modal link of visuo-tactile attention.

研究代表者 金沢工業大学工学部人間情報工学科 助教授 濱田泰一
Human Information Science, Kanazawa Institute of Technology, Associate
Professor Yasukazu Hamada

要約

脳には、目、耳そして皮膚などの感覚器を通して無数の情報が入力される。これら感覚情報を処理することで、自分がおかれている環境の変化をモニターし、適切な行動を発現する。これら情報のうち、重要な情報に意識をむけるメカニズムが注意である。注意により感覚情報処理は促進され、処理精度が高くなることが知られている。近年、機能的MRIや脳磁計により、ヒトの脳活動を無侵襲に計測できるようになり、視覚、聴覚あるいは体性感覚（触覚）のそれぞれの感覚における注意のメカニズムが明らかになりつつある。しかしながら、音がする方向に視線を向けたり、手に何かが触れたときにそこを見るなどという異なる感覚間での注意のやりとりのメカニズムに関わる研究は少ない。本研究では、世界で最高水準にある脳磁計を用いて、視覚-聴覚-触覚間の注意の相互作用に関わる脳活動を計測し、異なる感覚における注意の相互作用のメカニズムの解明をめざす。

Abstract

Attention is an important mechanism to select sensory information for behavior-genesis and to facilitate the information processing. Recently, a research field known as “brain imaging” or “neuro-imaging” using functional MRI, PET and MEG (magnetoencephalography) has been established and cortical activities, which are related to attention genesis and/or attentional modulation to the sensory cortices, have been visualized. Almost all of these studies mentioned single modal attention mechanism of visual, auditory or tactile attention. However, multi-modal attentions in different sensory modality might interact each other when we direct our attention toward something. Therefore, it is necessary to investigate this attentional interaction called “cross-modal attentional link”. In the proposed study, I try to elucidate a mechanism of cross-modal link of visuo-tactile attention by using a 160-channel whole head type magnetoencephalography.

研究目的

「注意」は脳における情報処理のプライオリティを決め、「重要な」感覚情報の処理を選択的に促進させるシステムである。刺激に対する感覚閾値の低下や刺激に対する反応時間の短縮（情報処理速度の向上）などを指標とした注意の心理学的研究が数多くあるが、そのメカニズムの解明には、注意を単に「心的」現象に留めるのではなく、脳における物理的実像の観察が必要であると思われる。近年、機能的MRI、PET及び脳磁計を用いた

ヒト脳の非侵襲的計測により、注意に関わる脳活動が観察されるようになり、多くの皮質部位が報告されている。これら研究の殆どは単一の感覚モダリティにおける注意を観察の対象としているが、注意が視覚、聴覚そして体性感覚など複数の感覚モダリティ間の相互作用により生成されるならば、注意に関わる皮質活動間の関係を系統的に解明するためには、複数の感覚モダリティにおける注意の相互作用を解析することが重要であると思われる。本研究においては、全頭型160チャン

ネル脳磁計(MEG: Magnetoencephalography)を用いたヒト脳活動の計測により、能動的注意が2次体性感覚皮質の活動を増強することを指標として、視覚的注意が体性感覚の注意生成に及ぼす影響の空間特性を解析し、そのメカニズムを考察することを目的とした。

研究経過

全頭型160チャンネル脳磁計システム(横河電機)での皮質活動計測に先立ち、体性感覚刺激及び視覚的注意のターゲットとなる視覚刺激を呈示するためのシステムを構築した。体性感覚刺激としての電流刺激は電気刺激装置(日本光電)を用い、視覚刺激は、発光ダイオードの光を光ファイバーで導き、磁気シールドルーム内の被験者の眼前に提示できるようにした。体性感覚刺激及び視覚刺激の呈示タイミングを生成するプログラムを作成した。計測・刺激呈示システムの準備の後、被験者を募集し、脳磁計測に先立ち、頭部のMRI画像を撮像した。

被験者は、21~49歳の右利き男性8名であり、実験に参加することへの同意を得た。被験者は脳磁計のデュワに頭をつけ、眼前60cmにある光ファイバーの先端を固視し、ランダムな時間間隔で呈示される視覚刺激を見落とさないようにすることで視覚的注意を固視点に向けるように指示されている。図1に示すように、右手を固視点の左15cm、固視点と同じ位置、固視点の右15、30、45cmの位置におき、それぞれの位置における体性感覚誘発磁場を計測した。このとき、左手の位置は一定とした。なお、両手は眼前の板の下に置かれ、被験者には見えない。

右手の人差し指の掌側に電極を付け、感覚閾値の3倍(3.0-4.5 mA)の電流強度をもつ方形波パルス(パルス幅0.2ms)を、2~3Sのランダムな時間間隔で与えた。電流刺激により誘発される体性感覚誘発磁場(SEF: Somatosensory Evoked Field)を、160個のSQUIDセンサーをもつ全頭型脳磁計システ

ムで計測した。

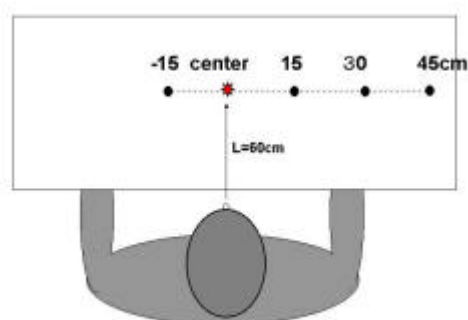


Fig.1 Hand posture

40回の電流刺激による誘発磁場を加算平均することにより、計測信号のS/N比をあげた。また、磁場計測には、カットオフ周波数が1 HzのHigh-pass filter、200 HzのLow-pass filter及び55-65 HzのBand-elimination filterを用いた。

計測された誘発磁場を用い、頭部を球とみなした球体モデル(座標系)を想定し、逆問題を解くことにより、計測磁場に対応する等価電流源(電流双極子)のモーメント強度と位置を計算により推定した。計算された等価電流源をMRI画像に重畳して表示することにより、脳活動の解剖学的部位を同定した。なお、脳磁計測の過程で2次体性感覚皮質の活動は、手の形状、例えば物を摘もうとするときと手掌を自然にひろげているときではその活動が相違し、また、腕の位置により変化することが観察されたので、これら手の形状及び腕の位置と体性感覚皮質活動の関係の解析も並行して行うこととした。

研究成果

図2に計測された誘発磁場波形の例を示す。電流刺激は時間軸上の0msで与えられ、潜時90msと150ms付近に顕著なピークがみられた。90ms以前の皮質活動は、20ms、40msそして60ms付近にもみられ、これらはN20、P40そしてP60成分として知られる1次体性感覚皮質の活動である。本研究においては、90msの潜時の皮質活動を解析した。この磁

場成分は比較的遅い 1 次体性感覚野の成分と 2 次体性感覚野の活動成分が含まれている。図 3 に潜時 90 ms での等磁場線図を示す。

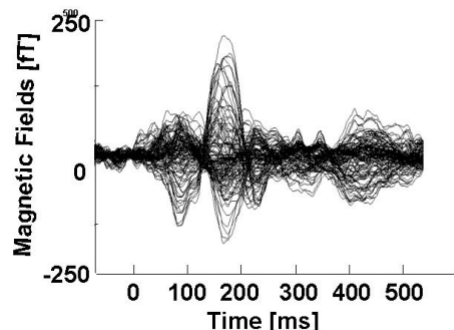


Fig.2 Evoked magnetic fields

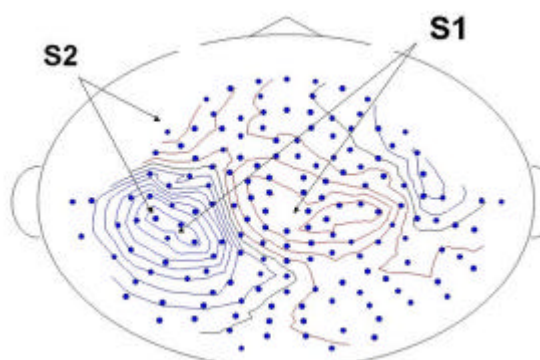


Fig.3 Isofield map at latency of 90ms

図 3 に見られる 2 組の顕著なダイポールパターンの領域にあるセンサーの磁場データから等価電流源を推定して、MRI 画像上に示したものが図 4 である。ダイポールは、中心溝後壁とシルビウス溝上縁に位置することから、それぞれ 1 次及び 2 次体性感覚皮質の活動を示すことが分かる。

図 5 は、1 次及び 2 次体性感覚皮質活動に対する等価電流源のダイポールモーメント強度の平均値を示す。モーメント強度は各被験者が手を固視点（視覚的注意の center）においたときのモーメント強度により標準化されている。

手が center の位置にあるとき、1 次体性感覚皮質活動のモーメント強度の被験者全員 (n=6) の平均は 22.4 ± 4.5 nAm (平均 \pm 標準誤差) であった。

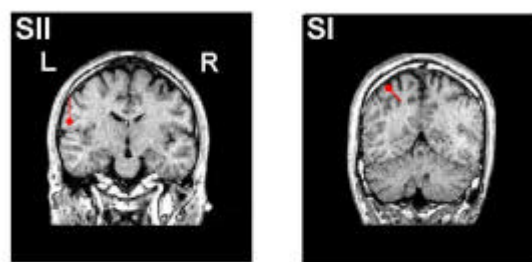


Fig.4 Dipole location on the MRI

Fig. 5 Dipole moment for SI and SII activation

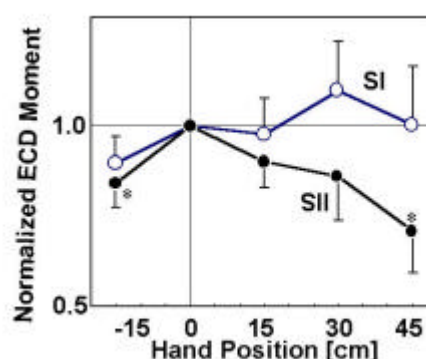


Fig. 5 Dipole moment for SI and SII activation

固視点の左 15cm、右 15cm、30cm 及び 45cm におけるモーメント強度と center での強度の差異を、それぞれ、t-検定により検定したところ、その強度に有意な差は見とめられなかった ($p > 0.05$)。

手を center においた場合、2 次体性感覚皮質活動のモーメント強度の平均は、 34.8 ± 5.5 nAm (平均 \pm 標準誤差) であり、その活動潜時は、 93.0 ± 13.3 ms であった。手の位置が左 15 cm のときと右 45cm の場合に、center におけるモーメント強度が統計学的に有意に小さくなった (paired t-test: $p < 0.05$, $n=7$)。活動潜時は手の位置により有意に異なることはなかった。

このように、1 次体性感覚皮質の活動強度は手の位置により変化することはなかったが、2 次体性感覚皮質の活動は手の位置が固視点から遠い場合に有意に弱くなることが分かった。Hamada らの先行研究において、人指し指に与えられる電流刺激により誘発される 2

次体性感覚皮質の活動強度は、その指に注意を向けたときに約50%増加することが報告されているが(Hamada et al, Clin. Neurophysiol. 2003)、本研究における結果においても、手を固視点の右45cmにおいた場合に比し、centerに手を置いた場合に、活動強度が約40%増加していることより、右45cmの位置においては、先行研究における注意を向けていない場合の活動強度に相当すると考えられる。

手の位置が、右15cm及び30cmの場合に、モーメント強度が有意に小さくならなかったのに対し、左15cmでは有意に小さくなったことより、注意の空間勾配は視覚的注意の中心(固視点:center)に対して左右対称ではないことがわかった。つまり、視覚的注意の2次体性感覚皮質活動への影響の空間分布は左右対称ではなく、このことは視覚的注意の体性感覚における空間的注意への影響が空間的に非対称であることを示唆する。

注意により皮質活動、特に感覚皮質の活動が増加することは、脳磁計(MEG)、脳波計(EEG)、機能的MRIやPETによる研究により多くの報告があるが、いかにして皮質活動が増強するかというメカニズムは明らかにされていない。脳磁計で計測される誘発磁場の増強は、(1)個々の細胞内電流の増加、(2)活動するニューロン数の増加、(3)ニューロンの活動タイミングの同期性の上昇、あるいは(4)活動潜時のばらつき減少(誘発磁場を加算平均することによる)が考えられる。Steinmetzらは、サルを用いた体性感覚皮質活動を電気生理学的に計測し、サルが体性感覚刺激に注意をむけているときに2次皮質の神経細胞の活動タイミングの同期性が上昇することを報告している(Steinmetz et al., Nature 2000)。また、Chawlaらは、機能的MRIを用いたヒト脳の計測で、感覚刺激が無くても、注意を向けることにより対応するモダリティの感覚皮質のbackground activityが増加することを報告している(Chawla et al. Nat. Neurosci. 1999)。これらの知見から、注意を向けることにより感覚皮

質のbackground activityが増加することが、その後皮質に到達する感覚刺激により誘発される神経細胞活動の同期性をあげることに関与する可能性がある。このbackground activityを増加させる神経機序もまた明らかにされていないが、視床神経核である視床枕や髄板内核から感覚皮質への興奮性の神経投射はこのメカニズムの神経機序の候補のひとつであろう。視覚と体性感覚の空間座標の変換は頭頂間溝周辺の皮質で行われていることが知られているが、この部位から視床枕への神経投射があることを考え合わせると、注意生成による皮質活動の増強メカニズムがこれらの神経基盤の上にあることを推測することができる。本研究では、この神経機序を明らかにすることはできなかったが、異なる感覚モダリティにおける注意の相互作用の空間特性を部分的に明らかにすることができた。

今後の課題と発展

注意による誘発磁場の増強を指標に注意生成のメカニズムを解明しようとする多くの先行研究があるが、それらの研究においては、加算平均磁場を解析の対象としている。神経細胞活動の同期性を電気生理学的知見と比較検討するためには、非加算平均データを用いた磁場強度の解析が必要である。今後の研究の展開として、本研究における実験パラダイムに対して、非加算磁場の計測を行い、神経活動の同期性に対する注意の影響を解析することにより、注意の皮質活動増強機序を検討し、異なる感覚モダリティ間の注意の相互作用のメカニズムをより精密に考察したいと思う。

発表論文

Hamada Y and Suzuki R

Hand posture modulates cortical finger representation.

NeuroImage 25(3):708-717, 2005