

(続紙 1)

京都大学	博士 (人間・環境学)	氏名	山本哲也
論文題目	ヒト奥行き知覚過程における多重性に関する脳機能イメージング法による研究		
論文内容の要旨			
本学位申請論文は、ヒトの奥行き知覚においてさまざまな手掛かりが統合されるメカニズムを明らかにするために、fMRI(functional magnetic resonance imaging; 機能的磁気共鳴画像法)技術を用いた3つの脳活動計測実験をまとめたものである。本論文では、数ある奥行き手掛かりの中でも、特に、手掛かりそのものの処理に関する知見が豊富な運動手掛かりに焦点を当て、単眼性奥行き手掛かりの統合過程をfMRIを用いて解明することを試みた。 第1章では、本研究の背景と目的が述べられた。ヒト奥行き知覚においては、2次元に縮退した網膜像から外界の奥行き情報を得るために脳が様々な手掛かりを利用して奥行き情報を再構築しており、このメカニズムの解明が奥行き知覚の神経科学研究の重要な課題である。従来の研究は、分離してモジュールとして処理される各奥行き手掛かりの情報処理経路の同定に関心を払ってきた。しかし、並列的に処理された各々の奥行き手掛かりが脳内でどのように統合され、最終的な奥行き知覚に至るかという問題に対しては、十分な検証が行われていない。この問題を解決するために、運動手掛かりを基軸として、運動情報処理の脳内相関の精緻化を行い、異なる種類の運動手掛かりのモジュール性、運動手掛かりと絵画的な手掛かりの統合を実験的に検討することを本研究の目的とした。 第2章では、本研究の議論の核心となるヒト低次視覚野のレチノトピー表象を概説し、fMRIを利用したヒト視覚野のレチノトピー同定手法である位相符号化法の詳細について述べた。 第3章では、運動情報処理の脳内相関を精緻化するために、運動知覚過程のみならず、奥行き知覚過程においても重要な役割を果たすと考えられるMT+をMTとMSTの2つの副領域として同定する実験が報告された。これらの同定はサルではごく一般的であるが、ヒトでは同定のための方法がこれまで完全には確立されていない。本実験では、レチノトピー構造に注目し、簡便かつ高精度で2つの副領域を同定する新たな方法を考案し検証した。従来と同定刺激の改良に加え、撮像データの高解像度化を計算的に実現する超解像技術を導入することで、MT+内のレチノトピーを捉えることに成功した。単なる同定だけでなく、結果の再現性も確認することで、標準的な方法として広く用いられるだけの信頼性も実証した。 第4章では、異なる種類の運動手掛かりのモジュール性を検証する実験を行った。運動手掛かりには、運動性奥行き効果、運動視差、立体運動効果等、様々なものが存在し、個々の運動手掛かりの神経機構が解明される中、立体運動効果については例外			

的に刺激統制の難しさから焦点が当てられずにいた。そこで、この障害を克服する実験デザインと視覚刺激を考案し、他の手掛かりによる知見との比較を通して奥行き情報処理のモジュール性を検証した。運動速度勾配を含む運動性奥行き効果や運動視差の場合と同様に、V3B、L0、MT+を含む外側後側頭領域が運動速度勾配を欠いた立体運動効果においても賦活したことから、この領域で運動手掛かりからの奥行き知覚のための共通的な情報処理が行われている可能性が示唆された。これは運動手掛かりにおける奥行き情報処理のサブモジュール性を支持しないものであった。

第5章では、運動手掛かりと絵画的な手掛かりの統合を検討する実験を行った。我々が利用する様々な奥行き手掛かりは協調的に作用するのが普通であるが、これらが人為的に矛盾的に共存させられると、奥行き知覚に破綻が生じる。本実験では、この奥行き知覚の破綻に注目し、運動・形態・テクスチャーという3つの奥行き手掛かりを矛盾的に存在させ、視覚刺激の変化に対応する脳活動の変化に加え、視覚刺激の変化に伴う奥行き知覚の変化とこれに対応する脳活動の変化の様子を捉えることを試みた。なお、視覚刺激には、輝度コントラストのパラメトリックな増加に対し、被験者の奥行き知覚が次第に困難となる逆行的な振る舞いをするものを新たに考案し、刺激変化と知覚変化の脳活動の影響を捉えやすくする工夫を図った。実験の結果、用いた刺激に対する被験者の奥行き知覚の個人差が非常に大きかったにもかかわらず、その個人差をも精密に反映した脳活動がV3B、V7、L0、MSTで見られた。このことから、これらの領域が単眼的な奥行き情報統合過程に重要な役割を担っていることが示唆された。

第6章では第3-5章の結果、及び両眼視差手掛かりを用いた先行研究で明らかにされている事実を踏まえ、総合考察を行なった。V3B、L0、MSTといった領域が単眼性のみならず、両眼性の奥行き手掛かりの統合過程にも関与した総合的な奥行き情報処理モジュールであること、但し、あらゆる奥行き情報がこれらの領域だけで処理されているほど、強固なモジュール性が成立している訳ではなく、周辺領域に特定の奥行き手掛かりの処理に積極的に関与する、サブモジュールを想定できることが主張された。

(論文審査の結果の要旨)

本学位申請論文は、ヒト奥行き知覚における手掛かりの統合過程に関わる脳活動を fMRI (機能的磁気共鳴画像) 法によるレチノトピー表象 (網膜部位再現性) の測定を利用して詳細に調べた3つの実験を中心にまとめたものである。多様な奥行き手掛かりのなかで、申請者はその神経相関が比較的よく調べられている運動手掛かりに着目し、「異なる種類の運動手掛かりの神経相関の間の関係」と「運動手掛かりと絵画的な手掛かりの統合過程」の2つのテーマを設定して研究を進めている。また、運動手掛かりをより精緻に検討するために運動情報の処理領域の下位分割も試みた。

申請者が行った3つの実験は、以下のことを明らかにした。

1. fMRI技術と位相符号化法によるデータ解析テクニックを用いて、ヒト大脳皮質視覚野における運動情報処理領域MT+の副領域MT, MSTの同定を行った。サルを用いた神経生理学研究からMTとMSTという2つの領域で、それぞれ異なる種類の運動情報処理が行なわれていることが知られているが、ヒトの場合にはこの分割の方法が確立されていない。ごく最近、いくつかの方法が提案されているが、これらは非常に複雑なデータ解析を必要とするものであった。これに対し、今回の申請者の研究では、同定のための刺激を工夫し、超解像技術を応用することで、従来法に比べて極めて簡便にMT、MSTの副領域を分割することに成功し、従来法と同程度に正確な分割を高い信頼性で実現できることを確認している。この成果は、申請者自身の奥行き知覚における運動手掛かりを検討する上で重要であるのみならず、運動知覚一般に関する脳内機構を明らかにする上で大きな貢献であるといえる。

2. 次に、運動手掛かりを用いた奥行き知覚の一種である立体運動効果を取り上げ、その神経相関をfMRI実験によって検討した。奥行き知覚に用いられる視覚運動手掛かりには運動性奥行き効果、運動視差、立体運動効果等、様々なものが知られているが、これらの異なる運動情報が脳内でどのように処理されているかはよくわかっていない。それぞれの手掛かりに特化したモジュールが存在し、脳内の別の領域で処理されているのか、あるいは、手掛かりの種類によらず共通した領域が処理を担っているのかを検討するために、立体運動効果の神経相関を他の手掛かりに関する知見と比較検討した。立体運動効果とはある特定の2次元図形を前額平行面上で視軸について回転させたときに奥行きが知覚される現象である。通常の運動手掛かりは速度勾配を伴うものであるが、立体運動効果は速度勾配を持たない点で異質性が高い。このため、速度勾配を持つ手掛かりとは異なる処理経路を持つ可能性が考えられた。結果として、他の手掛かりと同様、V3B、L0、MT+を含む外側後側頭領域が運動速度勾配を欠いた立体運動効果においても賦活した。このことは、これらの領域が速度勾配とは無関係により一般的な運動による奥行き知覚に関与していることを示唆する。立体運動効果については刺激の統制の困難さからその神経相関はほとんど検討されておらず、この結果は運動手掛かり処理の脳内機構に関して新たな知見をもたらすものである。この研究成果は国際誌であるJournal of Visionに掲載されている。

3. 最後に、運動手掛かりと絵画的な手掛かりの統合を検討する実験を行った。我々は通常単一の奥行き手掛かりだけを用いることはなく、複数の手掛かりを組み合わせで知覚している。通常は、これらの手掛かりは協調しているが、実験的にこれらが矛盾する状況を作り出すことで奥行き知覚の破綻や錯覚を生じさせることができる。これらは奥行き手掛かりの統合を理解するための重要な手法で、申請者は4章で用いた立体運動効果と形態、テクスチャの手掛かりを組合せ、それらの間に体系的に矛盾を導入することで手掛かり統合の脳内機構を検討した。この結果、奥行き知覚と関連した脳活動がV3B、V7、L0、MSTで見られた。この実験では、観察者によって手掛かりの統合の仕方に大きな個人差が見られたが、この個人差とは無関係に奥行き知覚と関連する活動を検出できたことは特筆に価する。また、第3章の成果であるMT、MSTの分割の結果を有効に活用することによって、立体運動効果に伴う奥行き知覚に強く関与するのがMTではなく、MSTであることを示すことに成功した。この研究では、実験デザインの工夫により高次の主観的現象である奥行き知覚と、輝度コントラスト等のより低次の要因を効果的に分離できており、方法論的な価値も高い。

申請者は、以上の実験結果、及び両眼奥行き手掛かりに関する先行研究などを総合して、奥行き知覚の異なる手掛かりごとにモジュールが存在するのではなく、単一のモジュールが総合的に奥行き情報処理を担っていると考えられること、同時に、その周囲により機能の限定されたサブモジュールが存在すると主張した。奥行き知覚という主観的現象の背後にある脳機能の解明には解決すべき問題は多くあるが、本研究、特に領域分割の手法や奥行き知覚の効果と他の要因を分離するための実験デザインは今後の研究にとって重要な貢献を果たしている。

このように、本学位申請論文は、人間の共生的認知機能研究をめざして創設された共生人間学専攻、認知・行動科学講座にふさわしい内容を備えたものと言える。

よって、
本論文は博士（人間・環境学）の学位論文として価値のあるものと認める。また、平成22年2月1日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

Webでの即日公開を希望しない場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降