

京都大学	博士（文学）	氏名	山崎大暉
論文題目	曖昧な大きさ知覚を支える視聴覚相互作用の諸相		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>我々は豊かな奥行き感を持った動的な三次元空間を体験しているが、視覚情報処理の出発点である目の網膜に映る外界は二次元画像である。すなわち網膜像上では外界に関する奥行き情報や距離情報が欠けており、このような二次元網膜像から三次元空間構造を再構成する過程はいわば不良設定問題 (ill-posed problem) であるにも関わらず、脳は絶えず安定した三次元空間知覚を実現している。環境との安全な相互作用のためには、三次元空間に存在する物体を認識し、物体の張る網膜像と距離によって正確で安定的な大きさ知覚を導く必要がある。十分に明るい環境では豊富な視覚の手がかりを用いた高確度で高精度な大きさ知覚が可能であるが、暗闇などの視覚入力が制限される環境では、距離-大きさ知覚の曖昧性は高くなる。このような曖昧な視覚状況において脳が大きさ知覚を安定化させる仕組みを解明することは、我々の三次元知覚の成り立ちを詳細に理解することに繋がる。</p> <p>日常に存在する物体や事象の多くは視覚情報のみならず複数の感覚情報を同時に発生させ(例：弾むボールと音)、我々はそれらを異なる感覚様相の処理を通じて知覚することができる。1980年代に差し掛かると感覚様相間の相互作用や複数感覚情報の統合に関する研究が盛んに行われ(Stein, B. E., 2012, MIT Press), 視覚や聴覚が独立した情報処理機能を持つだけでなく、それらが相互に影響し合うことで我々の知覚を構成することが実際に明らかにされてきた。感覚様相の中でも視覚と聴覚は、身体に制約を受けない広範囲の空間情報の取得に適していると言える。そのため、特に視覚入力が制限される状況においては、視聴覚情報を複合的に用いることが豊かで安定した三次元知覚に繋がると考えられる。しかし、過去の多感覚研究において水平・垂直次元で構成される二次元平面の知覚に関する知見が蓄積されてきた一方で、奥行き次元や身体前後空間を含む三次元空間の知覚における視聴覚相互作用の理解は遅々として進んでこなかった(Van der Stoep, N. et al., 2015, <i>Neuropsychologia</i>, 70, 335-349. など)。このような研究の遅れは、視聴覚的な距離知覚の確度が低いことによる研究の困難さに起因することが指摘されており、三次元知覚における視聴覚相互作用の様相はほとんど未解明である。視覚と聴覚が相互作用して外界の知覚を上げる仕組みや、脳が視聴覚情報を統合処理する仕組みを解明することは、我々が絶えず体験している豊かな三次元的知覚意識の成立機序を理解するために必須である。本論文ではこの問題に対し、曖昧な視覚状況下の大きさ知覚に聴覚情報が影響する可能性を検討した3件の実験研究を報告し、安定した三次元知覚の形成に視聴覚相互作用が貢献するという仮説を支持するエビデンスを提供する。</p>			

研究1では、接近・後退運動知覚を生じる聴覚刺激を実験参加者の身体前後位置から呈示し、それが接近・後退知覚を生じる視覚刺激の大きさ知覚に及ぼす影響を検討した。新規に考案した実験パラダイムを用いた3件の実験の結果、接近的聴覚刺激によって接近的視覚刺激の大きさが過大視されることが一貫して示された。このような視聴覚相互作用は身体前後空間における視聴覚刺激の空間的一致に依存して生じた。また、この結果は聴覚刺激の音圧を統制した場合にも同様に見られたことから、音圧レベルそのものではなく音圧変化による接近情報が大きさ知覚に影響したことが示唆される。研究1で見られた視聴覚接近情報の組み合わせに選択的な大きさ知覚の変容は、環境の中から素早く接近物体を検出し、安全に反応するために有効な機能であると言える。また脳が様々な視聴覚情報を統合処理する際、奥行き運動方向および三次元的な空間位置の一致性が条件となっていることが示唆される。

続く研究2では、各人の耳の位置で録音することにより三次元音響を再現することができるバイノーラル録音により実験参加者ごとに正確な距離感を与える聴覚刺激を用いることで、視覚距離情報が曖昧な環境下での大きさ知覚における聴覚距離情報の影響を検討した。聴覚的な絶対距離情報および相対距離情報を操作した2件の実験の結果、聴覚刺激に対して知覚される主観的距離に応じて視覚物体の大きさ知覚が有効にスケールアップされることが明らかになった。この結果は、脳が網膜情報と聴覚距離情報を統合することによって距離-大きさ知覚の曖昧さを解消可能であることが示唆される。またこのように聴覚距離情報を用いて物体の大きさをスケールアップする能力は、曖昧な視覚状況下での三次元知覚の安定化に貢献すると考えられる。

研究2から聴覚距離情報を用いた大きさスケールアップの有効性が示されたが、この過程には聴覚的距離知覚に基づく視覚的大きさの推論といった意識的過程が関与する可能性があり、聴覚距離情報が自動的な大きさ知覚過程に影響するかは不明であった。続く研究3では、バイノーラル録音を用いて作成した聴覚刺激を用いて聴覚距離情報を操作し、聴覚的に与えられる物体距離が大きさ知覚に及ぼす影響を恒常法による心理物理実験で検討した。本研究の目的は聴覚距離情報の影響を直接的に検討することであったため、大きさ知覚に影響を及ぼすことが知られている聴覚刺激の音圧および知覚的ラウドネスを統制した (Takeshima, Y. & Gyoba, J., 2013, *Attention, Perception, & Psychophysics*, 75, 501- 507.)。2件の実験の結果、聴覚距離情報に応じて視覚刺激の見かけの大きさが変化することが一貫して示された。このことから、視覚系が聴覚入力から抽出された距離情報を網膜像と統合することで、三次元物体の大きさを推定することが示唆される。さらに、研究3で見られた聴覚距離情報による大きさ知覚変化の方向は、遠い物体が近い物体よりも大きく見える大きさ恒常性錯視と一致した (ポンゾ錯視と関連)。大きさ恒常性が視覚野V1をハブとする低次視覚過程によって実現されていることを考慮すると (レビューとして, Sperandio, I., &

Chouinard, P. S., 2015, *Multisensory Research*, 28, 253- 283.), 研究3の結果は聴覚距離情報による自動的な視覚情報処理過程の変化を反映すると考えられる。またこのような聴覚距離情報の効果は聴覚刺激の音圧に依存せず見られたことから、大きさ知覚形成過程において聴覚距離情報が支配的な役割を担うことが示唆される。

これらの研究により、脳が二次元網膜像から物体の大きさを知覚する過程において、聴覚情報を有力な手がかりとして利用していることを示す複数の結果を得た。本論文の研究結果をまとめると、大きさ知覚に寄与する聴覚情報は接近情報および距離情報に大別される。さらにこれらの聴覚情報による視知覚変容過程において、それぞれ異なるプロセスの関与が示唆される。まず、研究1で見られた接近音による大きさ過大視現象には、接近情報特異的に生じる皮質レベルでの視聴覚相互作用の関与が示唆される(例えば, Cappe, C. et al., 2012, *The Journal of Neuroscience*, 32, 1171-1182 を参照)。次に、研究2で見られた聴覚距離情報を用いた大きさスケールングには、聴覚的な距離知覚に基づき物体の見かけの大きさを推定する意識的プロセスの関与が示唆される。さらに研究3で見られた聴覚距離情報による大きさ恒常性錯視には、大きさ恒常性を支えると考えられる自動的な視覚情報処理プロセスが関与していることが示唆される。本論文が報告するこれらの研究結果に加え、物体の大きさと音の強さに関する視聴覚連合が大きさ知覚にトップダウン的影響を及ぼすことを示す過去の知見を併せると、大きさ知覚を支える視聴覚相互作用メカニズムが少なくとも4つのプロセスから構成される階層構造を持つことが示唆される。

本論文の研究結果から示唆される視聴覚相互作用の階層構造は、多感覚知覚が感覚入力に基づくボトムアップ処理と、注意や学習といった高次認知過程からのトップダウン処理との相互作用によって形成されるという過去の知見と一貫性を持つ(例えば, Talsma, D. et al., 2010, *Trends in Cognitive Science*, 14, 400-410.)。さらに、聴覚接近情報および聴覚距離情報の影響が聴覚刺激の音圧に関わらず生じることを示した研究1および研究3の結果から、聴覚刺激が三次元空間情報を含まない場合には視聴覚連合に基づくトップダウン的影響が生じるが、聴覚刺激が接近や距離情報を与える場合には自動的に駆動する視聴覚情報処理プロセスが大きさ知覚を決定すると考えられる。このことは大きさ知覚形成過程におけるボトムアップ処理の優位性を示唆し、大きさ知覚を支える視聴覚相互作用メカニズムの階層構造の一端を明らかにするものである。

今後の研究においては、本論文で明らかになった大きさ知覚変容現象を実現する脳内メカニズムの解明が期待される。聴覚情報によって自動的に大きさ知覚が変化する仕組みを理解するためには、聴覚入力から有用な情報(距離情報など)を抽出し、異なる感覚様相である視覚系に伝達するプロセスを明らかにする必要がある。さらに異なる感覚入力に基づく空間情報がどのような脳内過程で相互に利用可能な情報として表

象され、また実際に統合処理されているのかを明らかにすることにより、安定的な三次元知覚を支える視聴覚相互作用の詳細な理解が進むことが期待される。また、本論文が示す視聴覚相互作用の持つ階層的メカニズムを統合的に説明する数理モデルの構築が望まれる。現在の多感覚研究では多感覚的な量的情報の重み付け統合を表現する数理モデルが主流であるが(例えば、ベイズ因果推論モデル: Shams, L., Ma, W. J., & Beierholm, U., 2005, *Neuroreport*, 16, 1923-1927. など), 本論文で示された網膜像の大きさと聴覚距離情報といった異なる特徴の組み合わせ事態には直接的な適用が難しい。今後の研究では本論文の示唆する複数プロセス間の相互作用や優位性を明らかにし、それらを記述するモデルを構築することで、脳の視聴覚情報処理方略に関する理解の進展が期待される。本論文が提供する視聴覚相互作用の知見は、ヒトの多感覚知覚の新たな側面を明らかにするだけでなく、様々な社会的場面に応用される可能性がある。聴覚距離情報によって距離-大きさ知覚が安定化することを示す研究結果は、夜間の運転場面等における聴覚情報を用いたヒューマンエラー防止技術や、弱視者の聴覚補助技術の開発に役立つ可能性がある。また聴覚接近・距離情報による自動的な視知覚変化現象を利用した新たな立体映像技術や、ヒトの三次元知覚特性に根ざして外界を視聴覚的に認識するロボットの開発等に貢献することが期待される。

(論文審査の結果の要旨)

我々の行動の基礎となる感覚・知覚情報は異なる物理的属性を捉える複数の感覚様相として、独立した感覚器官を介して得られる。例えば目は電磁波の一種である光を、耳は空気の振動である音を捉える。これらの物理的に異なる情報は、実際には同じ事象から生じることも多い。例えば走る自動車は視覚と聴覚の両面で捉えることができる。そのため、外界をより正しく把握するために異なる感覚様相の情報を統合することには大きな生態学的意義がある。これまでに心理学を含む諸領域で視聴覚統合の研究が進められてきたが、主に二次元的な空間や時間次元における統合が対象となっており、三次元的な奥行き方向の距離や動きの情報についてはまだ研究があまり進んでいない。本研究は、そのような視聴覚の奥行き情報統合について、独自の工夫に基づく一連の精緻な心理物理学実験をもとに理解を深めることを目指した、意欲的なものとして高く評価できる。なお、論文題名が示すとおり本論文で主に実験の対象となるのは視覚的な大きさについてであるが、一貫して奥行き知覚が含意され、その表出そして実験的ツールとしての大きさ知覚が扱われている。

物体の接近・後退運動やその距離の情報は、脅威を避け環境中の対象と相互作用するなど、日常的に必要なものである。しかしながら、視覚は二次元的な網膜像に基づいており、聴覚は空間精度が低いため、どちらも三次元的な奥行き情報に関して十分な信頼性が得られない場合があり、両者を統合してより精度の高い情報を得られれば大きな意義がある。動きと距離は物理的には不可分の関係にあるが、知覚や身体反応の上では分けて考える必要がある。たとえば、生態学的心理学者によるタウ理論によると、向かってくる対象との衝突までの時間は視覚像の時間的变化から計算でき、絶対距離の情報は必要ない。本論文でも、接近・後退運動は研究1、距離知覚は研究2と研究3において分けて検討されている。

問題提起と関連研究のレビューからなる1章に続き、2章では接近・後退運動の知覚における選択的な視聴覚統合を実証した実験研究(研究1)が議論される。大きさの比較課題を用いた心理物理学実験により、視聴覚が整合した接近運動、すなわち視覚的な拡大と聴覚的な音圧増大の組み合わせ時にのみ、処理が促進されて対象と比較刺激の大きさ一致判断が早まることが示された。この促進効果は、視聴覚刺激が前方から呈示された場合に得られ、聴覚刺激が背後から呈示された場合には得られなかった。接近する対象は潜在的な脅威であり早めに対応する必要があるが、去って行く対象は必ずしも脅威とはならないという点で、接近に伴う拡大運動に特異的な相互作用には生態学的に意味がある。実験において対象の動きや距離を直接判断するのではなく、比較刺激との大きさ比較判断を行わせて反応時間を指標としたのは、たとえば選択反応などにおいて生じがちな反応バイアスを極力排するための論者独自の工夫であり、慧眼と言える。なお、大きさ知覚そのものに関する選択反応を用いた追加実験においても、接近対象の過大視が確認されている。学術誌に公刊された論文は国際的にも注目され、何度か問合せを受けている。

研究2と3では、聴覚的距離情報が視覚的な大きさ判断に与える影響が検討された。両者を通して、より豊かな距離情報を提示するために個人別のバイノーラル録音技術が用いられている。研究2では、音と対呈示された視覚刺激の大きさを触覚対象と整合するよう調整させる課題、および、音と対呈示された視覚刺激をその後距離が変化した音と対応して調整させる課題が用いられた。論者は前者を絶対聴覚距離情報、後者を相対聴覚距離情報における効果と考え、ともに視覚判断が聴覚距離によって変調される一方、後者においてより正確に聴覚情報に対応した応答が得られることを見いだした。調整時には視覚刺激のみが呈示されるため、純粋な知覚的相互作用を反映したものとは必ずしも言えないことから、論者は意識的な統合として、次の研究3とは分けて考えている。条件間の違いが本当に聴覚距離の絶対・相対判断による違いによるものかどうかなどいくつか疑問が残るとはいえ、視覚的な距離が曖昧な状況下では、必ずしも聴覚情報を取り入れる必要がない視覚判断が聴覚情報による系統的な変調を受けるといふ知見には十分な意義が見いだせる。

研究3では、視覚刺激の大きさ判断が、同時に呈示された聴覚刺激の距離によって変調されることが示された。音圧は聴覚的な距離を示す重要な手掛かりとなるが、音圧が一定である場合、つまり音量が距離によって変化する条件でも同様の効果が得られた。視覚対象の距離が変わって網膜像の大きさが変わっても対象そのものの大きさは一定であると認識できることは「大きさの恒常性」と呼ばれる。本実験の結果は、聴覚情報が視覚における大きさの恒常性にほぼ自動的に寄与していることを示唆する。

これらの結果をもとに、5章では接近運動と距離と大きさの知覚における視聴覚相互作用について総合的に議論され、ボトムアップ、トップダウン処理を含む階層的な視聴覚統合プロセスについて論じられる。また、統合を支える脳機能の解明に向けた提案がなされている。問題があるとすれば、総合的な議論が表層にとどまり具体的な処理の機能的構造を明示したモデルには至っていない上、脳機能との関わりを論じながら実証のための実験研究は完遂できなかった。しかしながら、本論文は奥行き次元における視聴覚情報統合の理解に寄与する貴重な実験的エビデンスを提供するものであり、本論文の価値自体が損なわれるわけではない。論者は脳計測を含む実験研究の準備も進めており、さらに深い理解に向けて今後の研究の進展が期待される。

以上、審査したところにより、本論文は博士（文学）の学位論文として価値あるものと認められる。令和2年2月18日、調査委員3名が論文内容とそれに関連した事柄について口頭試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当分の間、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。