

曖昧な大きさ知覚を支える視聴覚相互作用の諸相

主論文要旨

山崎 大暉

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的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。

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（e.g., 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。聴覚は視覚と比較して空間定位の確度が低いことが知られているが、視野に依存せず三次元空間情報を取得可能な感覚様相である。そのため、特に視覚入力が

制限された還元条件下では，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．

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（e.g., Van der Stoep, N. et al., 2015, *Neuropsychologia*, 70, 335–349）．このような研究の遅れは，視聴覚的な距離知覚の低い確度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った．視覚と聴覚が相互作用して外界の知覚を作り上げる仕組みや，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実験的エビデンスを提供する．研究1では，接近・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，聴覚刺激が接近・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．さらにこのような視聴覚相互作用が身体前後空間における視聴覚刺激の空間的一致性に依存して生じたことから，接近・後退運動による視聴覚相互作用が持つ三次元空間特性が明らかになった．また本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、音圧ではなく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利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に従っていることが示唆される。

続く研究2では、距離感のある聴覚刺激と対呈示された視覚刺激の大きさ調整課題を実施し、聴覚距離情報が曖昧な視覚物体の距離-大きさスケールリングに及ぼす影響を検討した。聴取者の両耳位置で音波を録音することによって三次元音像の再生を可能とするバイノーラル録音技術を利用し、距離感のある聴覚刺激を実験参加者ごとに作成した。絶対聴覚距離情報および相対聴覚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大きさスケールリングの結果が体系的に変化した。本結果は、視覚距離情報が与えられない還元条件下での多義的な大きさ知覚が聴覚距離情報によって有効にチューニングされることを示す証拠である。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リングする能力は、暗闇や夜間交通場面など視覚空間情報が制限される状況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リング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利用し、聴覚距離情報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。この目的のため、過去の研究から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レベルを統制し

(Takeshima, Y. & Gyoba, J., 2013, *Attention, Perception, & Psychophysics*, 75, 501–507), 聴覚距離情報の影響を直接的に検討した。実験の結果、聴覚距離情報に応じて視覚刺激の知覚的大きさが変化することが示された。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していることが示唆される。さらに聴覚距離情報による大きさ知覚の変化の方向は、遠距離物体が近距離物体よりも大きく知覚される大きさ恒常性錯視と一致した (i.e., ポンゾ錯視)。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 (for review, 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。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 (e.g., Cappe, C. et al., 2012, *The Journal of Neuroscience*, 32, 1171–1182)。次に、研究 2 で見られた聴覚距離情報を用いた大きさ

スケーリングには、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。これらの研究結果から、聴覚的な接近情報および距離情報は、大きさ知覚形成過程の自動的段階（研究1、研究3）および意識的段階（研究2）の両方に影響すると考えられ、聴覚的な大きさ知覚変容のメカニズムが異なる情報処理段階での視聴覚相互作用からなる階層構造を持つことが示唆される。本論文が示唆す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（e.g., Talsma, D. et al., 2010, *Trends in Cognitive Science*, 14, 400–410）。また、経験的に獲得される大きさ-音圧の視聴覚連合が大きさ知覚に影響することを示す過去の知見に対し、聴覚的な接近情報および距離情報による大きさ知覚の変容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の結果は、視聴覚連合の影響に対する聴覚距離情報の影響の優位性を示唆し、視聴覚相互作用による自動的な大きさ知覚変容メカニズム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（e.g., 距離情報）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（e.g., ベイズ因果推論モデル: Shams, L., Ma, W. J., & Beierholm, U., 2005, *Neuroreport*, 16, 1923–1927), 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。