

## モダリティ間相互作用研究の展開

立教大学文学研究科 小林まおり 立教大学 長田佳久

Interaction between perceptual modalities

Maori KOBAYASHI & Yoshihisa OSADA (Rikkyo University)

**Abstract** Our perception of the world clearly benefits from information delivered through multiple modalities. How do we perceive the information from different modalities as one phenomenon? This problem has been examined by investigating multi-modal interaction. Many studies have showed that an auditory stimulus affects visual stimulus detection. But these results vary dependency on the time of presentation the stimuli, their spatial relationship, and the stimulus presentation method. In this paper, we survey the effects which on auditory stimulus exerts on visual stimulus detection, consider what theories may explain the results, and suggest future research.

**Key words:** multi-modal interaction, audio-visual interaction, attention, visual detection task

### モダリティ間相互作用とは

我々は日常生活において複数の感覚モダリティを通じて外界を知覚している。脳内の異なる領域で処理された複数の感覚モダリティ情報から一つの事象を知覚するために、知覚系はこれらの情報を統合し、一つの表象を得ると考えられる。異なるモダリティで処理された特徴を抽出し、まとまりある事象を知覚する過程をモダリティ間における統合過程 (Vrroomen, Bertelson, & de Gelder, 2001) といい、そのメカニズムについてモダリティ間相互作用の研究を通じて検討されてきた。モダリティ間相互作用とはある感覚モダリティの刺激がそれとは異なる感覚モダリティの刺激の知覚に影響を及ぼすことをいう。例えば腹話術の場面では実際には腹話術師が話しているにも関わらず人形の口から話されているように知覚される。このように視覚刺激が音源定位に影響を与えることを腹話術効果 (Canon, 1970) といい、モダリ

ティ間相互作用の代表的な例として考えられている。その他に視覚刺激が音韻知覚に影響を及ぼすマガーク効果 (McGurk & Macdonalds, 1976)、湾曲している物体を見ながら棒を触ると、直線の棒であるにも関わらず曲がっているように知覚される視覚的捕獲 (visual capture) などが報告されている。

歴史的には視覚刺激によってその他のモダリティの知覚が歪んで知覚されるという報告が多かったために人間の知覚は視覚優位であるという考え方が主流であった。しかし、Gebhard & Mowbray (1959) は視覚のちらつき頻度が聴覚のちらつき頻度に引きずられて、ちらつき頻度が増加して知覚されることを発見した。さらにこの現象の反対の効果、つまり視覚的ちらつきの頻度によって聴覚的ちらつきの頻度が変化して知覚されないことを報告し、必ずしも視覚優位に統合が行われているわけではないことを示唆した。同様の報告はRegan & Spekreijse (1977) によっても報告され

ている。このような聴覚刺激が視覚に及ぼすという研究結果から Welch, & Warren (1980) は modality appropriateness 仮説を展開している。この仮説は1つの事象に対して、2つの感覚モダリティが矛盾した情報を提供した場合、より正確な分解能をもつモダリティが稼働する。例えば空間に関しては視覚情報に、時間に関しては聴覚情報に従った知覚がなされる。最近では、二つの連続音と同時に一つのフラッシュが提示されると二回のフラッシュが知覚される二重フラッシュ知覚 (Shams, Kamitani, & Shimojo, 2000) や、視覚の時間解像度が聴覚刺激によって変化するということも報告され、この仮説を支持する結果となっている。

このようにモダリティ間相互作用の現れ方から、モダリティ情報の統合の際、基軸となるモダリティが推測され、統合のメカニズムの一端が示唆されてきた。一方、統合後の知覚の変容も検討されている。我々の感覚は光や音といった外界の多様な物理特性を持った刺激に適合しているため、感覚モダリティ間の相互作用によって単一の感覚モダリティのみに依存した場合に生じる知覚の多義性が減少し、恐らく単一モダリティでは実現できないような時間的、空間的な分解能を達成することができると考えられている。

閾値の低減や反応時間の短縮といった促進的な相互作用は古くから報告されてきたが、最近では多義的な視覚運動刺激に聴覚刺激を提示すると多義性の低減が生じる (Sekular, Sekular, & Law, 1997) 等の効果が発見され、この見解を支持するものとなっている。

### 聴覚刺激が視覚刺激検出に及ぼす効果

聴覚刺激が視覚刺激検出に及ぼす効果を Ryan (1940) は "dynamogenic interaction" と呼び、直接的な相互作用を示すものとして位置づけている。現在では聴覚刺激が視覚刺激検出に及ぼす効果は促進的な相互作用であるという見解が得られているが、長い間一貫した結果が得られず論争が続いた問題でもあった。なぜ一貫した結果が得ら

れなかったか。この要因として視覚刺激と聴覚刺激の提示によって相互作用が全く異なることが考えられる。このことを踏まえ、本稿では視聴覚刺激の提示法ごとに聴覚刺激が視覚刺激に及ぼす効果を概観し、そのメカニズムについて述べる。

### 聴覚刺激および視覚刺激を長時間提示する場合

聴覚刺激を数秒間から数分間提示し、その間に提示された視覚刺激の検出への影響を検討する方法は歴史的にも古く、1800年代から行われている。この方法の利点は注意や予期といった非感覚的な要因を排除できる点であり、感覚モダリティ間の絶縁性を確かめようとする切り口の研究である (丸山, 1994)。

Kravkov (1934) は白地上に黒図形を配置した刺激を用いて、黒図形への単眼の視力が聴覚刺激によって上昇することを報告した。このような聴覚刺激による促進効果は音の提示とともに斬減して、約5分後にはもとの状態に戻るといふ。彼は聴覚刺激によって視覚系の興奮性が高まり、光に対する興奮が高まった結果、闕下にあった白図形の輪郭が知覚されるようになり、白図形の感覚的輪郭が黒の方に移動すると考えた。しかし Kravkov の研究を追試した研究 (小山内, 1955) では促進効果は認められず、聴覚刺激の効果は無影響であったと報告している。Kravkov 以前の研究においても聴覚刺激の視覚への効果は促進、抑制、無影響の3種類が報告されており、一貫した結果は得られていなかった。丸山 (1964) は従来の研究では視覚刺激と聴覚刺激の提示時間の関係や聴覚刺激の周波数が異なるため、その効果に差があるのではないかと考え、詳細な実験を行った。

彼は聴覚刺激の周波数を操作し、聴覚刺激が光覚閾に与える効果を調べた。その結果、音の高さによって相互作用は促進、抑制、無影響の3方向に分類されることを見いだした。個人差はあるものの一般に3000Hzから1000Hzでは促進効果が、500Hzから100Hzにかけて抑制効果が認められ、1000Hzから500Hzでは無影響であった。また、視

野の領域によっても左右されうることを示した。視野の中心部では音の提示直後に促進、抑制の鋭い変化が認められ、やがて音があるにもかかわらず、緩やかに効果は衰える。周辺視野に移るにつれ音の効果の最大値は遅れて現れるという。

この結果を丸山 (1964) は聴覚刺激から視覚刺激への影響は聴覚神経系において網膜および外側膝状体を含めた視神経伝達路、および皮質の領域でも網膜と点对点对応が保持されているところまでのいずれか、またはこれらの組み合わせに投射されたものと推定した。音の効果は神経管の興奮の波及・伝搬による疎通あるいは加重および抑制といった神経管の一次元的相互交渉によるものであり、効果が投射される部位は視覚神経系のなかでも上記3つの領域であろうと推定している。さらに音の効果は視覚神経伝導路または低次の視覚領野、またはこの両者に及んでいる(注:筆者改定)と限定できる。さらにこれらの領域が影響を受ける受け方は聴覚神経系から直接投射を受けてまたは興奮の流入を受けて影響を蒙る場合と相互作用の源はどこか別の領域にあってその結果がこれらの領域に投射される場合とのふたつのケースが可能であると考えている。

彼らが用いた方法は視聴覚刺激ともに長時間提示されるため、聴覚刺激自体が視覚刺激検出に及ぼす効果を検討する方法として位置づけられる。しかし、この方法ではいずれも微弱な効果であることが明らかになっている。このことから丸山 (1994) は感覚間では微弱な相互作用が見られるもののチャンネル間の絶縁性はかなり高いと推測している。

#### 聴覚刺激と視覚刺激を同期して提示する場合

聴覚刺激と視覚刺激のonsetおよびoffsetをそろえ、同期させて提示する方法である。Meredith & Stein (1996) は聴覚刺激と視覚刺激を同期して提示し、視覚刺激の知覚される明るさをマグニチュード推定法によって判断させたところ、聴覚刺激と視覚刺激が同位置に提示された場合、知覚される明るさが増すことを示した。反対にT

hompson, Voss, & Brogden (1958) は聴覚刺激の絶対閾を測定する際、聴覚刺激に同期して視覚刺激の明るさを増加させたところ、聴覚刺激の絶対閾が上昇することが認められることを報告した。このように視覚刺激と聴覚刺激の同時性および空間的に一致すると刺激に対する閾値が下がることが明らかにされている。このような同時性の重要性についてSteinら (1993) は生理学的見解を示している。彼らによると視覚刺激と聴覚刺激が同時に提示されることによって上丘深層にある多感覚応答ニューロン (multisensory neuron) が発火し、刺激への反応が増強するという。

#### モダリティ間相互作用における生理学的機序

ネコやサルなどの上丘は大脳皮質下にある脳幹の背側部に位置する。上丘は機能的には大きく浅層と深層とに2分される。浅層では全ての神経細胞が視覚刺激に反応する神経細胞であるのに対し、深層では単一の視覚、聴覚あるいは体性感覚刺激に反応する単一感覚応答細胞のほかに、多感覚応答細胞が記録される。これらのことから上丘の浅層は主に視覚機能に関与するのに対して、深層は主に多感覚の統合機能に関与すると考えられている (Stein, 1984)。

Meredith & Stein (1993) は麻酔したネコの上丘深層から多感覚応答細胞を記録し、1種類の感覚刺激を単独に与えた反応と複数の感覚刺激を同時に与えた場合の反応を比較検討した。その結果、単一の感覚刺激を与えたときの反応に比べて、複数の感覚刺激を同時に与えたとき反応が増強することが明らかになった。特に神経細胞の平均発火数は視覚刺激のみを提示した場合に比べて視覚刺激と聴覚刺激を同時に与えたときの反応は120%も増加した。この増加率は聴覚刺激のみを提示した場合の反応と視覚刺激のみを提示した場合の反応を足しあわせたものと比較してもはるかに多く、多感覚応答ニューロンの応答は非線形な性質であることが明らかになっている。興奮性の相互作用を生じる細胞のほかに上丘の深層の多感覚応答細胞には単一の感覚刺激を単独に与えた時の反

応と比べて、複数の感覚刺激を同時に与えた時に反応が減少する抑制性の細胞も記録されている。

彦坂 (2000) によれば、複数の感覚入力に対する反応が単一の感覚入力に対する反応より大きくなる非線形な性質は次のような利点があると考えられる。異なる感覚情報が同時に入力された場合、異なる感覚情報間に増強効果が生じることによって、1つ1つの感覚刺激が閾値に近い弱いものであっても、それらが組み合わせられることにより環境の微妙な変化を増幅し検出可能にする。また抑制効果が生じることによって普通の状態では上丘細胞の活動を増加させてしまう刺激であっても、その他の感覚刺激が存在すると上丘細胞の活動に対して効果のないものにしてしまう。このような感覚刺激間の相互作用を生じる刺激は上丘細胞によってそれぞれ異なり、視覚刺激と聴覚刺激だけでなく、視覚刺激と体性感覚刺激、あるいは聴覚刺激と体性感覚刺激間においても報告されている。

ではどのような条件で上丘細胞は興奮性反応を示し、抑制性の反応を示すのか。これらの反応の違いは主に異なる刺激間の時間関係と空間関係に依存することが明らかにされている。Stein & Meredith (1993) によると最大の感性間相互作用は2種の刺激のonsetあるいは潜伏の一致には依らず、刺激の入力結果である活動パターンの重なりに依存するという。異なる感覚情報が処理される時間はその感覚ごとに異なる。たとえば視覚刺激が65-100msであるのに対し、触覚刺激は26ms、聴覚刺激は13msで上丘の神経細胞に到達する。また遠刺激がそれぞれの感覚受容器に到達する時間自体が異なることを考えると時間的幅をもって処理がなされていることは合理的である。Stein & Meredith (1984) はこのような処理時間が異なる刺激に対する反応間の相互作用が生じるには相互作用の時間窓 (time window) は少なくとも100ms程が必要であるとし、この時間は多くの多感覚応答ニューロンの最適相互作用期間と一致するとしている。一方、空間的に一致した多感覚の刺激は反応強化を生じさせる傾向があるが、空間的に離れた刺激は抑制作用が生じるか、あるいは

はなんの効果も示さないことが明らかになっている (Meredith, & Stein, 1986)。

このような多感覚応答細胞の特性は聴覚刺激が視覚刺激検出に及ぼす効果に対応する。聴覚刺激と視覚刺激が同期する場合、多感覚応答細胞の興奮性の発火が増加し、反応を増強する。そのため本来ならば閾値に近い微弱な視覚刺激の入力が増幅され、知覚可能になると推測される。また視覚刺激と聴覚刺激間のSOAが大きくなった場合にモダリティ間相互作用が消失してしまう現象ともよく一致する。しかし上丘深層の多感覚応答ニューロンの反応がいかにして視覚系あるいは聴覚系といった個々の感覚系に対して投射し、効果を及ぼすのかについてはいまだ不明な点が多く、更なる研究が待ち望まれている。

#### 視覚刺激よりも聴覚刺激を先に提示する場合

Posner, Snyder, & Davidson (1980) の先行手がかり法 (precueing technique) に代表される方法である。ターゲット刺激よりも先に手がかり刺激を提示する。その際、手がかり刺激をターゲット刺激と同側に提示する条件 (valid条件) および反対側に提示する条件 (invalid条件) のターゲット刺激検出に要する反応時間を手がかり刺激が提示されない条件 (neutral条件) と比較する。手がかり刺激とターゲット刺激が視覚刺激である場合、neutral条件に比べvalid条件では反応時間が短縮され、invalid条件では長くなる。これは一般には先行手がかりに従って目標提示位置に注意を向けていたことによる効果と考えられている。この手がかり刺激を聴覚刺激、ターゲット刺激に視覚刺激を用いて、聴覚的な手がかり刺激が視覚に及ぼす効果を検討する実験が行われている。

Badard, El Massioui, Pillon, & Nandrino (1993) は、矢印によって空間のある位置を示した場合、その位置に提示される音刺激に対する選択反応時間が短くなることを報告している。手がかり刺激が視覚刺激である場合と同様に、聴覚的な手がかり刺激が視覚刺激検出に促進効果を及ぼすことが報告されている。さらにSpence & Driver

(1997) は聴覚刺激の効果を詳細に検討し、視覚刺激よりも聴覚刺激が200ms前後早く提示されると効果は最大になることを報告した。同様の効果はWard, McDonald, & Lin (2000) によっても示されている。彼らは、先行する聴覚刺激に向けられた注意が視覚刺激の処理を促進すると考え、空間に向けられる注意をcross-modalなものとして捉えている。しかし、彼らの実験ではこの手がかり効果は手がかりが視覚刺激、ターゲットが聴覚刺激の場合には認められないことから、手がかりの効果は非対称であるとしている。

### モダリティ間相互作用における注意の役割

聴覚刺激に向けた注意が視覚刺激の処理を促進することから、注意は視覚および聴覚に共通する機能であると考えられる。空間は視覚だけのものではなく聴覚においても体性感覚によっても空間を知覚することができ、空間知覚は（したがって空間的注意も）感覚の個々のモダリティをつなぐ(cross-modal)あるいは超えた(supramodal)ものである(彦坂, 1994)。このように空間的注意が視覚および聴覚あるいは他の感覚モダリティにわたる機能であると考えられる研究者は多い。例えば線運動錯視(Shimojo, Miyauchi, & Hikosaka, 1992)はその典型的な現象である。しかし、腹話術効果などには空間的注意によって左右されないなどの報告があり、すべてのモダリティ間相互作用を説明し得るものではないと思われる。

一方、注意はかなりモダリティ特化された機能であることを示す報告も多い。Duncan, Martens & Mowbray (1997) は2つの聴覚刺激と視覚刺激を用いて実験を行ったところ、同一モダリティ内では干渉が生じるのに対し、異種モダリティ間では干渉が見られなかった。このことから彼らは注意のリソースはモダリティを超えたものではなくモダリティ特化されている可能性を示唆した。この実験を出発点として注意はモダリティ特化しているのか、していないのかといった議論が始まった。Potter, Chun, Banks & Muckenhoupt (1998) らはRSVP(高速系列視覚刺激提示課題)

を用いて異種モダリティ間の干渉を検討し、注意の瞬き(attentional blink)現象が生じないことを示した。さらに同様の結果はSoto-Faraco & Spence (2002)の研究でも得られ、視覚刺激と聴覚刺激が空間的に同位置だったことから空間的注意が同一であっても感覚間で干渉が生じないことを論じた。

線運動錯視は聴覚刺激が視覚的注意を稼動する、あるいは触刺激によって視覚的注意が稼動し得る可能性を示唆した現象である。これに対して注意の瞬きはあるモダリティにおいてblinkを生じる刺激は他のモダリティには影響を与えないことを示しており、モダリティ特化した処理を示唆する。また注意の瞬きが視覚的注意の処理資源に関与するとされていることから、各モダリティに向けられる注意はそのモダリティ毎に容量が制限されることを示唆するとも考えられる。このように注意はモダリティ特化しているのか、それともモダリティを超え得る機能であるのか、という点は議論が尽くされていない。またそれぞれの説の根拠となる研究で扱われた課題はかなり異なり、異なるメカニズムによって処理されている可能性がある。

### モダリティ間相互作用研究の現状と展望

これまで視聴覚刺激の提示法がモダリティ間相互作用を左右することを述べてきた。視聴覚刺激を長時間提示すると聴覚刺激が視覚刺激検出に及ぼす効果は非常に微弱なものとなり、このことから聴覚刺激自体が視覚に及ぼす効果は非常に小さく、長時間提示した刺激においてはモダリティ間の絶縁性はかなり高いことが示唆される。一方、視・聴覚刺激を同期して提示すると視覚刺激の明るさは増幅して知覚され、その効果は視聴覚刺激の時間関係によって変容することから、モダリティ間相互作用には同時性が重要であり、多感覚応答ニューロンの活動といった生理学的なメカニズムの関与が推測される。また聴覚刺激が視覚刺激よりも先行する場合、その検出にかかる反応時間は短縮する。この効果は視・聴覚刺激が空間的に一致するとき最大になることから、聴覚刺激に向け

られた空間的注意が視覚刺激検出を促進すると考えられている。

このように聴覚刺激の存在が視覚刺激検出に及ぼす効果といった比較的単純な相互作用の検討においても、視・聴覚刺激の時間関係・空間関係、刺激の提示方法、被験者に課す課題によって、その及ぼす効果の大きさや方向性が変化するだけでなく、導き出される理論も異なる。聴覚刺激が同期する視覚刺激の検出に促進効果を及ぼす場合、視聴覚刺激間の時間的ずれは100ms前後であるのに対して、聴覚の先行手がかり刺激が視覚ターゲット検出に影響を及ぼすのは200ms前後の手がかり先行時間を要する。このような効果の現れ方の違いはモダリティ間相互作用に複数のメカニズムが存在することを示す。モダリティ間相互作用の代表的な例として挙げた腹話術効果においても、認知的メカニズムや、視覚刺激に注意が向けられることによって音源定位が変化するのだという注意説などの複数のメカニズムが考えられている。腹話術効果に関しては空間的注意が及ぼす効果について疑問視する声が少ない(例えば, Bertelson, Vroomen, de Gelder, & Driver, 2000; 北島・山下, 1999) が, 全てのモダリティ間相互作用において注意が関与しないと結論することはできないだろう。あるモダリティ間相互作用で得られた示唆がそれとは異なるモダリティ間相互作用においても得られるとは限らず, 種類の異なるモダリティ間相互作用研究がそれぞれ示唆してきた統合メカニズムが乱立し, 混沌としているのが現状である。今後の課題としては, これらの複数のメカニズムの関連性を明らかにし, 包括的な感覚統合のモデルを検討することが必要となる。

## 引用文献

- Bedard, M.A., El Massioui, F., Pillon, B., & Nandrino, J.L. 1993 Time for reorienting of attention: A premotor hypothesis of the underlying mechanism. *Neuropsychologia*, **31**, 241-249.
- Bertelson, P., Vroomen, J., de Gelder, B., & Driver, J. 2000 The ventriloquist effect does not depend on the direction of deliberate visual attention. *Perception & Psychophysics*, **62**, 321-332.
- Canon, L.K. 1970 Intermodality inconsistency of input and directed attention as determinants of the nature of adaptation. *Journal of Experimental Psychology*, **84**, 141-147.
- Duncan, J., Martens, S., & Ward, R. 1997 Retriected attentional capacity within but not between sensory modalities. *Nature*, **387**, 808-810.
- 彦坂和雄 2000 視覚と他の感覚の統合の生理学的機序 日本視覚学会(編)朝倉書店 Pp.511-517.
- 彦坂興秀 1994 注意の神経機構 安西祐一郎・苧阪直行・前田敏博・彦坂興秀(編)岩波講座認知科学9 注意と意識 岩波書店 Pp. 90-168.
- 北島律之・山下由己男 1999 視覚的注意が音源定位に及ぼす影響 心理学研究 **69**, 459-467.
- Kravkov, S.V. 1934 Changes of visual acuity in one eye under the influence of the illumination of the other or of acoustic stimuli. *Journal of Experimental Psychology*, **28**, 805-812.
- 丸山欣也 視覚と聴覚とに現れる異系感性相互作用 心理学研究 **35**, 204-216.
- 丸山欣哉 1994 感覚間の相互関連と情報処理 大山正・今井省吾・和気典二(編)新編 感覚・知覚ハンドブック 誠信書房 Pp. 80-98.
- McGurk, H., & MacDonald, J. 1976 Hearing and seeing voices. *Nature*, **264**, 746-748.
- Meredith, M.A., & Stein, B.E. 1986 Spatial factors determine the activity of multi-sensory neurons in cat superior colliculus. *Brain Research*, **365**, 350-354.
- Posner, M.I., & Snyder, C.R.R., & Davidson, B.J. 1980 Attention and the detection signal. *Journal of Experimental Psychology: General*, **109**, 160-174.

- Potter, M.C., Chun, M.M., Banks, B.S., & Muckenhoupt, M. 1998 Two attentional deficits in serial target search: The visual attentional blink and an amodal task-switch deficit. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*, **24**, 979-992.
- Rhodes, G. 1987 Auditory attention and the representation of spatial information. *Perception & psychophysics*, **49**, 17-22.
- Ryan, T.A. 1940 Interrelation of the sensory systems in perception. *Psychological Bulletin*, **37**, 659-698.
- Sekuler, R., Sekuler, A.B. & Lau, R. 1997 Sound alters visual motion perception. *Nature*, **385**, 308.
- Shams, L., Kamitani, Y., & Shimojo, S. 2002 What you see is what you hear. *Nature*, **408**, 788.
- Shimojo, S., Miyauchi, S., & Hikosaka, O. 1992 Visual motion sensation yielded by non-visually driven attention. *Investigative Ophthalmology & Vision Science*, **32**, S1354.
- Soto-Fraco, S. & Spence, C. 2002 Modality specific auditory and visual temporal processing deficits. *The quarterly journal of experimental psychology*, **55**, 23-40.
- Spence, C., & Driver, J. 1997 Audiovisual links in exogenous covert spatial orienting. *Perception & Psychophysics*, **59**, 1-22.
- Stein, B.E., London, N., Wilkinson, L.K., & Price, D.D. 1996 Enhancement of perceived visual intensity by auditory stimuli: a psychological analysis. *Journal of Cognitive Neurosciences*, **8**, 497-506.
- Stein, B.E., & Meredith, M.A. 1993 *The Merging of the Senses*. Massachusetts: MIT press.
- Thompson, R.F., Voss, J.F., & Brogden, W.J. 1958 Effects of brightness of simultaneous visual stimulation on absolute auditory sensitivity. *Journal of Experimental Psychology*, **55**, 45-50.
- Vroomen, J., Bertelson, P., & de Gelder, B. 2001 Auditory-Visual spatial interaction: Automatic versus intentional components. In de Gelder, B., DeHaan, E.H.F., & Heywood, C.A. (Eds.), *Out of Mind*. N.Y.: Oxford University press. Pp. 140-150.
- Ward, L.M., McDonald, J.J., & Lin, D. 2000 On asymmetries in cross-modal spatial attention orienting. *Perception & Psychophysics*, **62**, 1258-1264.