

立体視の可塑性

一 川 誠

Plasticity in Stereoscopic Vision

Makoto ICHIKAWA

This article is summarizing the plasticity in binocular stereopsis, that is, the processing that extracts depth information from binocular disparity. In particular, we will see how the plasticity in the binocular stereopsis has been investigated, and how the stereoscopic depth perception adaptively change in order to pertain to the conditions under which binocular disparity is inconsistent with the other depth cues, or tactile information. Results of the previous studies suggest that, in order to understand the plasticity in the binocular stereopsis, we have to investigate the change not only in the processing of binocular disparity, but also in the relationship between binocular stereoscopic processing and the processing of the other cues.

Key words: optical transformation, adaptive change, depth perception

立体視の可塑性は、両眼視差やその他多くの奥行き手がかりが利用可能な刺激事態を用いて検討されてきた。こうした多様な情報からの奥行き知覚の成立過程の特性を検討した実験的研究の多くでは、奥行き手がかり間や、視覚と触運動感覚などの他の知覚様相との間に不一致を導入する。この導入においては、伝統的にはプリズムやレンズ、鏡などを用いた光学の変換が使われてきたが、最近では、CG（コンピューター・グラフィクス）を用いてバーチャルな対象に関する奥行情報を操作した研究などが増えつつある。本論文では、これまでの研究によって立体視の可塑性について明らかになってきたことを概観する。そのうえで、多様な情報が利用可能な状況において、立体視を含む奥行き知覚全体がもつ可塑性について解説する。

1. 奥行き手がかり間の不一致の導入

奥行き手がかり間に不一致を導入する研究の多くにおいて、両眼視差と他の手がかりを組み合わせてすることにより、奥行き知覚の特性が検討されている。たとえば、両眼視差と運動視差^{1,2)}、運動性奥行き手がかり³⁻⁵⁾、陰影⁶⁾や単眼的輪

郭^{7,8)}などの手がかりが示す奥行き方向や奥行き量についての情報において、手がかり間に不一致を導入する。刺激観察において導入された不一致の内容によってどのような見かけの奥行き量や奥行き方向（凹凸）が得られるのかを調べることで、奥行き知覚における情報統合の様式に関する多くの研究が行われている。これまでの研究では、見かけの奥行き量に関しては、それぞれの手がかりからの情報が、各手がかりの信頼性に基づいて決定される重みを用いた「重みづけ平均」として記述できる様式によって統合されることが報告されている^{1,2,9)}。

こうした情報統合の研究においては、情報間の不一致の有無や不一致の程度は実験試行ごとに変更され、長時間持続されることはない。他方、両眼視差と他の手がかりとの間の不一致を持続させた場合、奥行情報の処理過程においてさまざまな変化が生じる。特に、手がかり間の不一致を長期間持続させた場合、情報間の不一致を補うような変化、いわば順応的な変化が生じることが報告されている¹⁰⁻¹³⁾。手がかり間の不一致の持続により生じるこうした順応的变化の特性を調べることに基づいて、奥行き知覚

が、情報の体系的な変容に対して適応的に変化しうる、可塑性をもった過程であることが示されている¹⁴⁾。

次章では、おもには光学の変換を用いた研究によって解明されてきた立体視の可塑性の特性について概観し、手がかり間の不一致によって両眼視差の処理系（両眼立体視過程）がどのように変化するかを紹介する。次いで、両眼視差の処理系と他の手がかりの処理系との関係がどのように変化するかに関する先行研究の結果も概説する。

2. 変換のタイプと可塑性

手がかり間の不一致が持続したことによる奥行知覚の変化を検討したこれまでの研究においては、光学の変換のタイプによって奥行知覚の変化が生じたり、獲得された変化が変換終了後に消失するのに必要な変換の期間、変化の生じ方などが異なることが知られている。すなわち、対象の奥行特性のうち、奥行の量（大きさ）に関する情報を変換した場合と比較すると、奥行方向（凹凸）を変換した場合のほうが、変化が生じたり、消失するのに長い期間が必要である。以下のセクションでは、奥行量の変化、奥行量の変換それぞれを持続した場合に、奥行知覚において生じる変化の特性について紹介する。

2.1 奥行量に関する変換

2.1.1 テレステレオスコープによる変換

両眼視差の量の変換を引き起こす光学の装置にはさまざまなあるが、そのうちテレステレオスコープ (telestereoscope) とよばれる視野変換装置では、鏡の組合せにより両眼間距離を光学的に大きくする（あるいは、小さくする）ことによって、実空間内での対象観察において得られる両眼視差の大きさを拡大（縮小）する（図1）。たとえば、被験者にテレステレオスコープを通して針金で作った立体の回転を観察させた場合、両眼性手がかりと運動性奥行 (kinetic depth) の手がかりとの間に奥行量についての情報の不一致が導入される。その結果、非剛体的なワイヤーが回転しているような知覚が生じる。この光学の変換を約10分間持続させた後、両眼視差単独で知覚される奥行量を測定したところ、特定の大きさの両眼視差が呈示された際に、光学の変換前よりも小さな奥行が知覚される¹³⁾。この結果は、光学の変換による両眼視差の拡大を補うような奥行知覚の変化が生じたことを示唆する。また、この変化の程度は観察時間に伴って増加すること、裸眼観察に戻ったり閉眼したりすると残効は急速に消失することなどが明らかになった。また、両眼視差の処理に関してはこのようにさまざまなことが見いだされたが、運動性奥行効果に基づく奥行知覚は光学の変換の持続の後でもほとん

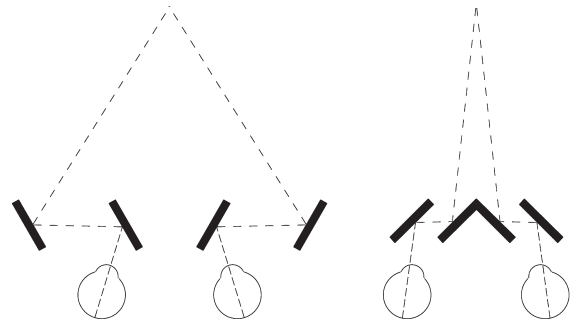


図1 テレステレオスコープ。特定の対象を観察した際、光学的に両眼間距離を拡大する変換（左）では、裸眼観察よりも大きな両眼視差が得られる。他方、両眼間距離を縮める変換（右）では、裸眼観察時よりも小さな両眼視差が得られる。

ど変化しなかった。両眼視差と他の手がかりの間に不一致がある場合、両眼視差のほうが優位な手がかりで、両眼視差にしたがった奥行の見えが成立しやすいことが多くの研究^{1,2,6,15)}で見いだされているが、情報の不一致が持続した場合、両眼視差の処理過程は他の手がかりよりも順応的变化を被りやすいのかもしれない。

2.1.2 プリズムやレンズによる変換

プリズムやレンズを用い、一方の眼の像を水平方向に拡大（縮小）することで、両眼視差と他の手がかりの間に不一致を導入することが奥行知覚にどのような影響を及ぼすのかも検討されてきた。この光学の変換の導入する両眼視差は、前額平行面が奥行方向に傾いているような見え方を引き起こす。この光学の変換についても、変換装置を着用して歩行などを数十分間続けると、光学の変換が導入した両眼視差と他の手がかりとの不一致を補うような変化が生じることが示されている^{16,17)}。光学装置ではなく、CGと触運動感覚的情報を呈示するバーチャルリアリティー環境用の装置を用いて両眼視差と触運動感覚との間に不一致を導入した研究でも、両眼視差の処理過程が触運動感覚的情報によって修正される¹⁸⁾。

ただし、前額平行面が奥行方向に傾いて見えるような垂直視差を生じさせるようなレンズによる変換を1～4時間持続させた研究においては、知覚的奥行量にみられる変化は、20分ほどで最大になった後に減少に転じた¹⁹⁾。レンズを用いて一方の眼に呈示される像を水平方向に拡大する光学の変換を6日間持続させた研究においても、完全順応にはいたらなかった²⁰⁾。この6日の変換では、2日目に完全順応に近づいたものの、そのすぐ後の測定では変化の程度が1日目の水準に戻ってしまった。これらの結果は、数時間から数日間程度の光学の変換の持続によっては完全な順応は成立しないこと、順応的变化の過程が次第に完全な順応にいたる単調な過程ではないことを示している。

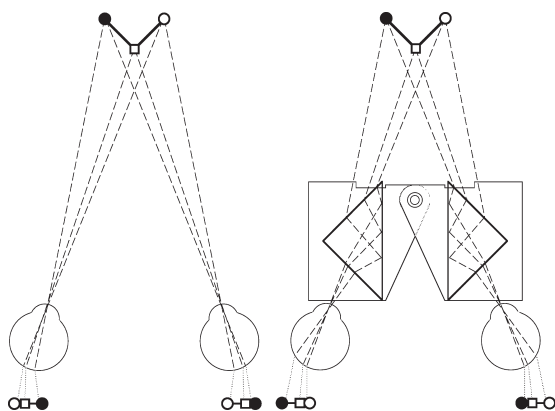


図2 Wheatstone 型シュードスコープ。裸眼時（左）と比較すると、両眼の映像を左右反転させることにより、両眼視差、両眼輻輳と対象の奥行関係との対応関係が逆転される（右）。

視差量にかかわる光学的変換に対する奥行知覚の変化については、視差と見かけの奥行量との対応関係が変化するという仮定¹⁰⁾や、両眼視差以外の手がかりの知覚への影響が増すという仮定²¹⁾などが提案されている。おそらく、両方の変化が可能と考えられる。すなわち、奥行情報統合過程に関する重みづけ加算モデル⁹⁾にしたがって両眼視差と単眼の手がかりとに対する重みの変化を検討した研究²⁰⁾では、各手がかりに対する重みの変化はほとんど観察されず、両眼視差と見かけの奥行量との対応関係のみが変わったことが示唆された。他方、視差量の変換を数日間持続させた場合、奥行手がかりの豊富な環境では、奥行方向に傾いて見えていた面が変換開始当初よりも前額平行に近く見えるようになるなど、明瞭な奥行知覚の変化が生じるのに対し、両眼視差以外の手がかりがほとんどない状況では奥行知覚はほとんど変化しない^{21,22)}。このことは、奥行知覚における順応的变化において、両眼視差以外の手がかりの存在が奥行知覚の過程の変化にかかわっていることを示唆している。

2.2 奥行方向に関する変換

2.2.1 シュードスコープによる変換

両眼視差の手がかりを他の奥行手がかりと矛盾させることによって奥行知覚を検討する最初の研究は、単独の奥行手がかりとしての両眼視差の発見者である Wheatstone により行われた²³⁾。彼がこのような観察を実施したのは、奥行手がかり間の不一致が存在する状況での知覚を調べることによって、単独の奥行手がかりとしての両眼視差の働きが分析できるだけでなく、もろもろの手がかり間の関係をも理解できると考えたためであった。

Wheatstone が両眼視差の方向の変換に用いたのは、2 個の直角プリズムからなるシュードスコープ (pseudo-

scope) とよばれる装置 (図 2) であった。この装置を通して観察すると、視野が左右反転することにより、両眼視差の方向も裸眼観察の場合と逆になる。すなわち、裸眼では凸の対象の観察で生じる交差視差が凹の対象の観察で生じ、凹の対象の観察で生じる非交差視差が凸の対象の観察で生じる。また、両眼視差の方向に加えて、両眼像の融合に必要な両眼輻輳も裸眼の場合とは逆になる。すなわち、両眼は、より遠くを注視するときには内転せねばならず、より近くを注視するときには外転せねばならない。このように両眼性の手がかりである両眼視差と両眼輻輳とがシュードスコープの装着によって逆転されるのに対し、その他の奥行手がかりはシュードスコープを通した観察でも変化しない。そのため、両眼性の奥行手がかりと他の奥行手がかりとの間に、裸眼時には存在しない不一致が生じる。

このシュードスコープを通して観察すると、メダルや茶碗、胸像、庭木の枝などの奥行方向が実際とは逆に見える。ただし、実際と逆の奥行がいつも見えているわけではない。実際とは逆の奥行と実際の通りの奥行との交替が、ときには突然、ときには段階的に生じることも報告されている²³⁾。これらの観察からは、シュードスコープを通して観察した場合、陰影や遠近法のような単眼性の奥行手がかりが両眼性の奥行手がかりよりも優勢となることがあるものと考えられる。

2.2.2 左右反転眼鏡、逆転眼鏡による変換

このように、Wheatstone は、視野変換によって両眼視差とその他の手がかりからの奥行情報が矛盾する状況での奥行知覚の定性的な特徴について検討した。しかしながら、このように奥行手がかり間に不一致のある状況が、長期間にわたって持続した場合の奥行知覚の変化については検討しなかった。両眼視差方向の反転の持続が奥行知覚におよぼす効果については、Wheatstone 型のシュードスコープと同様に左右視野を水平方向に逆転することに基づいて両眼視差方向を逆転する左右反転眼鏡、あるいは左右視野を 180 度逆転することにより両眼視差方向を逆転する逆転眼鏡の連続装着実験において検討されてきた。

こうした反転眼鏡による視差方向反転の持続が奥行知覚過程におよぼす効果については、研究によって一見異なる結果が得られている。たとえば、逆転眼鏡を 15 日間連続装着した被験者に、両眼性手がかり以外の手がかりを制限するために垂直方向に張られた 2 本の線の間の前後関係を判断させた実験では、眼鏡装着期間を通じて奥行知覚は実際とは逆のままであった²⁴⁾。しかしながら、左右反転眼鏡や逆転眼鏡の長期装着による奥行知覚過程の変化を検討した他の研究での日常観察報告では、奥行知覚が順応的に変

化することが示唆されている。逆転眼鏡を14日間連続装着した際の日常の奥行知覚に関して、眼鏡装着開始当初はテーブル上の皿などの凹凸が実際とは逆に見えていたのが、逆転眼鏡装着8日目にはそのような見えが生じなくなった²⁵⁾。また、左右反転眼鏡を21日間連続装着した被験者の日常観察でも、奥行知覚の異常は装着期間の比較的初期に消失した²⁶⁾。他の左右反転眼鏡の連続装着中の日常観察報告においても、奥行知覚の順応的变化が示唆されている^{27,28)}。

ただし、両眼視差方向の反転の持続による奥行知覚の順応的变化を示唆するこうした研究においても、数日間の眼鏡装着期間中に奥行知覚の逆転が完全に消失することはないと報告されている²⁵⁾。こうした報告からは、光学の変換の持続によって奥行知覚が外界適応的に変化するものの、変換が12日間程度では視差方向の反転に対して完全な順応的变化が得られないことがうかがわれる。

このように、両眼視差方向を反転する光学の変換の持続が実空間内の対象の奥行関係の知覚におよぼす効果を検討した研究²⁴⁾では、両眼視差以外の手がかりが制限された場合には明確な順応的变化がみられないのに対し、さまざまな手がかりが利用可能な状況における観察²⁵⁻²⁸⁾では、何らかの順応的变化が生じていることを示唆する結果が得られている。

刺激の奥行情報をより厳密に統制するためにステレオグラムを用いたり、CGを用いて手がかり間や視覚と触運動感覚間に不一致を導入し、その持続が奥行知覚におよぼす効果を実験室実験で検討する研究も行われている。そうした研究においても、両眼視差方向の反転の持続により、奥行知覚の変化が生じることが示されてきている。

被験者に左右反転眼鏡を9日間¹²⁾、もしくは10~11日間¹¹⁾にわたって連続装着させた研究では、反転眼鏡装着2~3日目以降の時期に、ハプロスコープを通した(裸眼での)ステレオグラム観察において、両眼視差に対応する奥行とは逆方向の奥行が知覚されるようになることが報告されている。特に、線画によって構成されたステレオグラム(図3a, b)の観察では、光学の変換による両眼視差方向の反転をほぼ補うような順応的变化が生じることが示されている¹²⁾。ただし、いったん獲得された変化が、光学の変換が持続する間、安定して持続する場合と、視差と見かけの奥行方向との関係が不安定になる場合とがある。つまり、奥行知覚の変化は、必ずしも完全順応へといたる一方向的なものではない¹¹⁾。また、ランダムドットステレオグラムの観察では、光学の変換の期間中、見かけの奥行方向が不安定になることはあったものの、両眼視差方向の反転

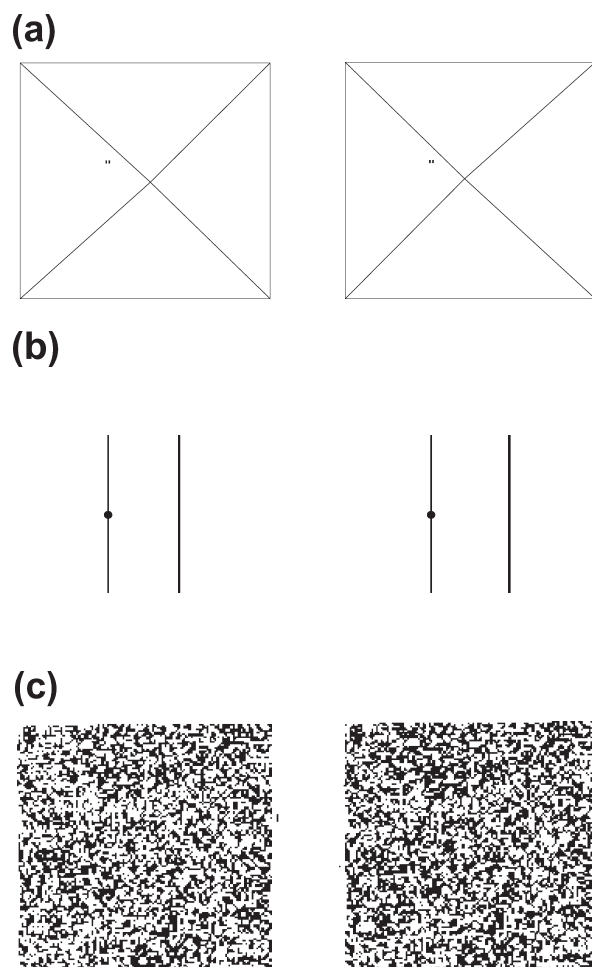


図3 観察に用いられたステレオグラム。(a) ピラミッド型の線画ステレオグラム^{11,12,34)}、(b) 2本の線分からなる線画ステレオグラム^{11,34)}、(c) ランダムドットステレオグラム^{11,12,34)}。

を補うような安定した順応的变化が生じることはなかった^{11,12)}。奥行知覚に変化の生じる時期やステレオグラムの種類、変化の程度には大きな個人差があることも報告された。被験者によっては、視野変換を続けるにつれて知覚される奥行量が減少することが見いだされた。また、ステレオグラム観察中、両眼視差が規定する奥行方向とその逆の奥行方向の見えが交替する、視差の同じ部分が異なる奥行に見える、ステレオグラム全体が平坦に見える、奥行は知覚されるが凹凸の方向がわからない、などの両眼視差の処理系に混乱が生じていることを示唆する見えがしばしば報告された¹¹⁾。

眼球運動も、光学の変換の持続が奥行知覚におよぼす効果に影響することが示されている。ステレオグラム中の注視点を固視する条件では、眼を自由に動かして観察できる条件と比べると、両眼視差とは逆の奥行の生起頻度は有意に低くなる¹¹⁾。眼球運動の制限が、視差とは逆の奥行知覚の出現に影響するものと考えられる。

逆転眼鏡を長期装着した観察者に関する実験^{29,30)}でも、左右反転眼鏡を用いた研究¹¹⁾と同様の結果が報告されている。また、ランダムドットステレオグラムの観察で、光学の変換の持続に伴って、両眼単一視の潜時に変化はみられなかったが、奥行知覚の潜時はいったん著しく増大し、その後減少することも見いだされた^{31,32)}。

こうした研究^{11,12)}においては、眼球運動過程の何らかの変化が両眼立体視の変化に関与している可能性が示唆されている。また、奥行知覚が不安定になることに関連して、輻輳性眼球運動の混乱による異常な両眼視差が発生する可能性も指摘されている³³⁾。

左右反転眼鏡の装着期間中、両眼視差以外に遠近法や大きさの手がかりが利用できる実空間内での奥行方向判断では、正しい奥行方向の知覚の頻度が一貫して増加する。他方、ステレオグラム観察では、変換期間の経過に伴って視差とは逆の奥行の出現頻度がいったん増加してピークに達した後減少する（線画ステレオグラム観察）か、あるいは変換期間を通して奥行知覚が一貫性のある順応的变化を被らない（ランダムドットステレオグラム観察）¹¹⁾。このように、複数の手がかりが利用可能な条件での観察における奥行知覚の順応的变化が一方向的であることと、両眼性手がかりがおもな奥行情報源であるステレオグラム観察における奥行知覚の変化が一方向的でないことを比較すると、両者が同じようには進行しないことがうかがわれる。

ここまで紹介してきた反転眼鏡を用いた研究では、ステレオグラムの観察はハプロスコープを介して行われ、奥行知覚の変化は順応的变化の残効として検討されていた。この場合、実験では、いったん反転眼鏡をはずして、裸眼でステレオグラム観察が行われた。いったん眼鏡を頭部からはずすこと自体に、奥行知覚に何らかの影響をおよぼす効果があることも疑われた。しかしながら、反転眼鏡を装着したままステレオグラムや刺激を観察できる装置を用いた研究においても、ここまで紹介してきたことと一致する結果が得られた³⁴⁾。35日以上期間にわたって左右反転眼鏡を装着した4名の観察者に関して、反転眼鏡を装着したまま上述のものと同様のステレオグラム（図3）を、反転眼鏡装着期間中とその前後の期間に観察させた。この場合、奥行知覚の変化に関して、順応的变化の残効としてではなく、反転眼鏡を通しての観察における奥行知覚過程の状態として検討したことになる。どの被験者においても、いずれかの線画ステレオグラムの観察において、反転眼鏡によって反転された視差と対応した奥行方向とは逆の奥行方向の知覚がチャンスレベル以上の頻度で生じた。ただし、このような変化が生じる時期においては個人差があ

り、いったん変化が得られた後に変化の程度がそれ以前の水準に戻ることもあった。

閾上の奥行情報の統合に関するモデル⁹⁾では、他の多くの手がかりと矛盾する手がかりの信頼度は低下すると仮定されている。反転眼鏡や逆転眼鏡を通した観察では、両眼性手がかりと他の手がかりとの間に不一致があるのに対し、両眼性手がかり以外の手がかりの情報は相互に一致している。そのため、眼鏡装着期間中、両眼視差の信頼度は次第に低下すると予測される。一部の被験者において、ステレオグラム観察の際にいったん増加した視差とは逆の奥行知覚の頻度が減少したにもかかわらず、同じ時期に、複数の手がかりが利用可能な条件での奥行方向判断では正しい（外界対応的な）奥行方向判断がなされるような順応的变化がみられていた¹¹⁾。両眼視差の信頼度が低下すれば、視覚系は相対的に信頼度が増した他の手がかりからの情報によって正しい（外界適合的な）奥行知覚を成立させることが可能になるだろう。この場合、正しい奥行知覚を成立させるために、両眼視差情報の新しい処理様式（両眼視差の方向と逆の奥行方向の知覚を成立させる処理様式）は、必ずしも機能する必要がなくなると考えられる。いったん獲得された処理様式が、正しい奥行知覚の成立に必ずしも必要ないのであれば、その様式は必ずしも維持される必要はないだろう。複数の手がかりが利用可能な条件で正しい奥行方向知覚の頻度が増加した際には、このような手がかり間の相対的な信頼度の変化（特に、両眼視差の信頼度の低下）が生じていたものと考えられる。

左右反転眼鏡の長期装着によって、両眼視差の奥行知覚への寄与の減少が生じることを示す実験結果も得られている。反転眼鏡を1か月以上連続装着する観察者に、両眼視差と大きさの手がかりが異なる奥行方向、奥行量を示す格子型ステレオグラムを観察させ、見かけの奥行方向と奥行量を測定し、各手がかりが見かけの奥行方向および奥行量に対する寄与が相関分析などによって検討された³⁴⁾。その結果、眼鏡装着前の期間に比べると、反転眼鏡装着期間中は見かけの奥行方向と奥行量ともに、大きさ手がかりの寄与の程度が増すのに対し、両眼視差の寄与の程度は著しく減少することが認められた。これは、眼鏡装着中、見かけの奥行方向と奥行量とが、反転眼鏡によって変換を被らない大きさの手がかりによって決定されやすくなったことを示す。これらの結果からは、光学の変換の持続が、変換されている両眼視差の処理過程だけではなく、奥行知覚全体の中で各手がかりの奥行知覚への寄与の程度をも変化させていることがうかがわれる。

2.2.3 CGにおける変換

両眼視差と他の情報源との不一致が奥行知覚の変化を引き起こすことは、シュードスコープのような光学的装置の長期装着によってのみ見いだされることではない。近年の立体視研究の多くではCGが使われることが多いが、立体視の可塑性に関する研究においてもCGを使った検討が行われており、CG観察においても奥行情報の不一致が立体視の変化を引き起こすことが報告されている。たとえば、CGと触運動感覚的情報を呈示する装置を用いて、触覚と両眼視差もしくは肌理勾配^{きめ}の手がかりが示す面の傾きの方向を逆転させた研究³⁵⁾において、30～45分程度の学習の間に、触運動感覚と一致した手がかりの重みが増すことが見いだされている。

上述したように、視差量についての光学的変換を続けた場合、見かけの奥行量に関しては、このような手がかり間の関係の変化は認められなかった²⁰⁾。しかしながら、視差方向³⁴⁾や面の傾き方向の反転³⁵⁾のように、両眼視差と他の手がかりとの間の不一致の程度が大きいときは、手がかり間の関係も変化しやすいものと考えられる。

CG観察の場合、数日間にわたるような順応過程を実現するのは困難なので、視差方向の反転を補うような順応的变化の過程を検討するには最適な方法ではない。しかしながら、CGを使った研究には、従来の光学的変換に基づく方法よりも、視覚刺激および触覚刺激の統制が簡易という利点がある。情報間に大きな不一致がある条件でも、数十分程度の観察で各手がかりに割り当てられる重みが増加することから、今後、CG観察における重みの変化の検討を通して奥行知覚過程の可塑性や適応可能性に関する理解が進められることが期待される。

2.2.4 手がかり間の不一致の持続に対する可塑性の生態学的意義

ここまで紹介した先行研究は、視差量の変換から視差方向の変換のように極端な変換に対してまで、視覚系は適応的变化が可能であることを示唆している。実際、日常的な場面においても、視力矯正用の眼鏡やコンタクトレンズの装着においても同様の変化が観察者の知覚情報処理様式において生じているものと考えられる²⁰⁾。奥行知覚におけるこのような可塑性は、水中にある対象までの距離判断などにおいても有用であろう。両眼視差をはじめとしたさまざまな奥行情報や、視覚的情報と触運動感覚的情報との間に不一致があるような環境においても、人間の視覚系の適応的ポテンシャルはかなり高いものと考えられる。

3. 立体視における他の経験的効果

3.1 練習効果

ここまで、奥行手がかり間に不一致を導入することに基づく立体視の可塑性に関する研究事例を紹介してきた。こうした順応的变化に関する研究以外にも、立体視の過程が経験によって変化することを示す研究がある。たとえば、ランダムドットステレオグラムの観察では、大きな練習効果があることが古くから知られていた。多くの観察者は、はじめてランダムドットステレオグラムを観察した際に、安定した奥行の知覚が成立するまでに長い時間を要するが、観察を繰り返すうちに、観察開始から1秒も経たないうちに奥行知覚が成立するようになる。かつては、この練習効果は、両眼融合に必要な眼球運動を獲得する過程において生じるものと考えられていた³⁶⁾。しかしながら、両眼視差により規定される奥行形状が同一となるような複数のステレオグラムを観察する場合でも、視差を呈示するエレメントの方向成分が学習刺激とテスト刺激とで異なると、練習効果は生じない³⁷⁾。こうした結果は、ランダムドットステレオグラム観察における練習効果が、眼球運動の習熟によってのみ説明できるわけではなく、刺激の局所的成分の特性にかかわる処理が練習効果に寄与していることを示唆する。また、視差によって規定される奥行構造を視野の異なる位置に呈示しても、このような練習効果は失われる³⁸⁾。ステレオグラムの長期観察の後に平坦な面を見ると、ステレオグラムの視差が示すのとは反対方向の奥行が見えるという残効が生じることが知られており³⁹⁾、継時対比現象とよばれる³³⁾。この残効はかなり広い視野にわたって生じることが知られており⁴⁰⁾、視覚皮質の中では受容野の大きい、比較的后段の領域がかかわっていることが示唆されている。しかしながら、ステレオグラム観察における練習効果の視野位置依存性は、継時対比現象の基礎にある過程よりも、小さな受容野をもつ皮質領野における処理に基礎をもつことがうかがわれる。

3.2 多義的な図形の観察

両眼視差と単眼の手がかりや刺激の特定の属性とが繰り返し対呈示されることにより、単眼的情報からの奥行情報の処理過程が影響を受けることが示されている。たとえば、2通りの奥行方向知覚が可能なネッカーキューブの観察において、可能な2通りの奥行方向のうち一方を両眼視差によって呈示したとする。この両眼視差によって規定された奥行方向と刺激の特定の単眼的特性（たとえば、キューブの呈示位置、運動方向など）との対呈示を1時間ほど繰り返すと、その特性（特定の呈示位置や運動方向）をもつネッカーキューブ刺激を単眼呈示した際（したがって、

一義的な奥行を規定していた両眼視差は呈示されない), その特性とともに両眼視差が規定していた奥行方向のキューブが高い頻度で知覚されるようになる⁴¹⁾。このことは、古典的条件づけのように、両眼視差の奥行方向情報が他の特性の情報と連合し、奥行の知覚を決定しうることを示唆している。

立体視の可塑性についての研究成果を概観すると、奥行知覚の過程を理解するためにも、両眼視差やそれ以外の手がかりの処理過程における変化だけではなく、個別の手がかりの処理過程間の関係においても解明することが重要であることがわかる。ランダムドットステレオグラムの発明³⁶⁾以降、単独で奥行知覚を成立させることが可能な刺激特性の奥行手がかりとしての同定と、その手がかりの処理過程についての検討がなされてきた。この各手がかりの処理過程については、他の過程とは相互独立的なモジュール的過程として想定されてきた⁴²⁾。しかしながら、ここまでみてきたように、各手がかりの処理過程は決して他と相互独立的ではなく、お互いに影響をおよぼし合いながら、各手がかりの処理過程の処理様式、および各手がかりの奥行知覚への寄与の仕方を変化させる過程であると考えられる。実際、異なる手がかりの処理過程が相互に独立ではなく、密接な関係にあることが、複数の手がかり間の奥行情報の不一致を一時的に導入した研究においても示されている⁴³⁻⁴⁵⁾。単独の手がかりの処理過程にフォーカスを当ててきたこれまでの多くの奥行知覚研究の中では、複数の処理系間の関係に関しては十分に検討されてきたとはいえない。両眼立体視の発見の時期に提起されていたこの問題に対する答えを模索し、複数の手がかりのある状況下での奥行知覚についての理解を深めることは、今後の立体視研究の課題といえる。

文 献

- 1) M. Ichikawa and S. Saida: "How is motion disparity integrated with binocular disparity in depth perception?," *Percept. Psychophys.*, **58** (1996) 271-282.
- 2) B. J. Rogers and T. S. Collett: "The appearance of surfaces specified by motion parallax and binocular disparity," *Q. J. Exp. Psychol. A*, **41** (1989) 697-717.
- 3) F. Domini, C. Caudek and H. Tassinari: "Stereo and motion information are not independently processed by the visual system," *Vision Res.*, **46** (2006) 1707-1723.
- 4) E. B. Johnston, B. G. Cumming and M. S. Landy: "Integration of stereopsis and motion shape cues," *Vision Res.*, **34** (1994) 2259-2275.
- 5) M. S. Landy and E. Brenner: "Motion-disparity interaction and the scaling of stereoscopic disparity," *Vision and Attention*, eds. L. R. Harris and M. R. M. Jenkin (Springer

- Verlag, New York, 2001) pp. 129-151.
- 6) H. H. Bulthoff and H. A. Mallot: "Integration of depth modules: Stereo and shading," *J. Opt. Soc. Am. A*, **5** (1988) 1749-1758.
- 7) K. A. Stevens and A. Brookes: "Integrating stereopsis with monocular interpretations of planar surfaces," *Vision Res.*, **28** (1988) 371-386.
- 8) K. A. Stevens, M. Lees and A. Brookes: "Combining binocular and monocular curvature features," *Perception*, **20** (1991) 425-440.
- 9) M. S. Landy, L. T. Maloney, E. B. Johnston and M. Young: "Measurement and modeling of depth cue combination; In defence of weak fusion," *Vision Res.*, **35** (1995) 389-412.
- 10) W. Epstein: "Recalibration by pairing a process of perceptual learning," *Perception*, **4** (1975) 59-72.
- 11) M. Ichikawa and H. Egusa: "How is depth perception affected by long-term wearing of left-right reversing spectacles?" *Perception*, **22** (1993) 971-984.
- 12) S. Shimojo and Y. Nakajima: "Adaptation to the reversal of binocular depth cues: Effects of wearing left-right reversing spectacles on stereoscopic depth perception," *Perception*, **10** (1981) 391-402.
- 13) H. Wallach, M. E. Moore and L. Davidson: "Modification of stereoscopic depth-perception," *Am. J. Psychol.*, **76** (1963) 191-204.
- 14) 江草浩幸, 一川 誠: "視野変換と奥行知覚の変化", 知覚の可塑性と行動適応, 牧野達郎編 (ブレーン出版, 1998) pp. 89-101.
- 15) M. L. Braunstein, G. J. Andersen, M. W. Rouse and J. S. Tittle: "Recovering viewer-centered depth from disparity, occlusion, and velocity gradients," *Percept. Psychophys.*, **40** (1986) 216-224.
- 16) W. Epstein and C. L. Morgan: "Adaptation to uniocular image magnification: Modification of the disparity-depth relationship," *Am. J. Psychol.*, **83** (1970) 322-329.
- 17) A. Mack and D. Chitayat: "Eye-dependent and disparity adaptation to opposite visual-field rotation," *Am. J. Psychol.*, **83** (1970) 352-371.
- 18) J. E. Atkins, R. A. Jacobs and D. C. Knill: "Experience-dependent visual cue recalibration based on discrepancies between visual and haptic percepts," *Vision Res.*, **43** (2003) 2603-2613.
- 19) D. Y. Lee and K. J. Ciuffreda: "Short-term adaptation to the induced effect," *Ophthalmic Physiol. Opt.*, **3** (1983) 129-135.
- 20) W. J. Adams, M. S. Banks and R. van Ee: "Adaptation to three-dimensional distortions in human vision," *Nat. Neurosci.*, **4** (2001) 1063-1064.
- 21) H. M. Burian: "Influence of prolonged wearing of meridional size lenses on spatial localization," *Arch. Ophthalmol.*, **30** (1943) 645-668.
- 22) L. C. Morrison: "Further studies on the adaptation to artificially-induced aniseikonia," *Br. J. Physiol. Opt.*, **27** (1972) 84-101.
- 23) C. Wheatstone: "Contributions to the physiology of vision-Part the second: On some remarkable and hitherto unobserved phenomena of binocular vision," *Philos. Trans. R. Soc.*, **142** (1853) 1-17.
- 24) P. H. Ewert: "A study of the effect of inverted retinal stimulation upon spatially coordinate behavior," *Genet. Psychol. Monogr.*, **7** (1930) 177-363.
- 25) J. Peterson and J. K. Peterson: "Does practice with inverting lenses make vision normal?" *Psychol. Monogr.*, **50** (1938) 12-37.
- 26) 積山 薫: 左右反転眼鏡の世界 (ユニオンプレス, 1987).

- 27) 太城敬良：“逆転視野眼鏡着用実験 予備的試み (2)”，人文研究（大阪市立大学文学部紀要），**40**（1988）35-65.
- 28) 吉村浩一：“左右反転眼鏡実験（13日間）における記述的データ集：被験者の言語報告と行動観察記録”，金沢大学文学部論集行動科学編，**5**（1985）1-33.
- 29) 江草浩幸，一川 誠，御領 謙：“逆転眼鏡着用による奥行知覚の変化2”，日本心理学会第54回大会発表論文集（1990）p. 481.
- 30) 御領 謙，江草浩幸：“逆転視野への適応過程（2）—知覚-運動協応過程と高次認知過程の相互作用—”，人文研究（千葉大学文学部紀要），**25**（1996）31-73.
- 31) 一川 誠：“立体視の左右反転眼鏡装着による検討”，関西心理学会第101回大会発表論文集（1989）p. 2.
- 32) 一川 誠，江草浩幸，御領 謙：“逆転眼鏡装着による立体視の検討”，日本心理学会第54回大会発表論文集（1990）p. 482.
- 33) I. P. Howard and B. J. Rogers: *Binocular Vision and Stereopsis* (Oxford University Press, London, 1995).
- 34) M. Ichikawa, T. Kimura, H. Egusa, M. Nakatsuka, J. Amano, T. Ueda and T. Tashiro: “Modification of depth and distance perception caused by long-term wearing of left-right reversing spectacles,” *Perception*, **32** (2003) 131-153.
- 35) M. O. Ernst, M. S. Banks and H. H. Bulthoff: “Touch can change visual slant perception,” *Nat. Neurosci.*, **3** (2000) 69-73.
- 36) B. Julesz: *Foundations of Cyclopean Perception* (University of Chicago Press, Chicago, 1971).
- 37) V. S. Ramachandran and O. Braddick: “Orientation-specific learning in stereopsis,” *Perception*, **2** (1973) 371-376.
- 38) V. S. Ramachandran: “Suppression of apparent movement during binocular rivalry,” *Nature*, **256** (1975) 122-123.
- 39) S. M. Anstis, I. P. Howard and B. Rogers: “A Craik-O'Brien-Cornsweet illusion for visual depth,” *Vision Res.*, **18** (1978) 213-217.
- 40) S. Taya, M. Sato and S. Nakamizo: “Stereoscopic depth aftereffects without retinal position correspondence between adaptation and test stimuli,” *Vision Res.*, **45** (2005) 1857-1866.
- 41) Q. Haijiang, J. A. Saunders, R. W. Stone and B. T. Backus: “Demonstration of cue recruitment: Change in visual appearance by means of Pavlovian conditioning,” *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **103** (2006) 483-488.
- 42) J. A. Fodor: *The Modularity of Mind: An Essay on Faculty Psychology* (MIT Press, Cambridge, 1983).
- 43) M. F. Bradshaw and B. J. Rogers: “The interaction of binocular disparity and motion parallax in the computation of depth,” *Vision Res.*, **36** (1996) 3457-3468.
- 44) V. Cornilleau-Peres and J. Droulez: “Stereomotion cooperation and the use of motion disparity in the visual perception of 3-D structure,” *Percept. Psychophys.*, **54** (1993) 223-239.
- 45) M. Ichikawa, S. Saida, A. Osa and K. Munechika: “Integration of binocular disparity and monocular cues at near threshold level,” *Vision Res.*, **43** (2003) 2439-2449.

（2007年1月23日受理）