

立体視アノマリー研究小史

—— 立体視の下位機構, 両眼性課題の成績, 立体視アノマリーの分布 ——

相田 紗織・下野 孝一

東京海洋大学

Mini-review of research findings on stereo-anomalous observers:
Proposed stereoscopic subsystems, performance on binocular tasks,
and population frequency

Saori AIDA and Koichi SHIMONO

Tokyo University of Marine Science and Technology

People who are stereo-anomalous or stereo-deficient have difficulty in perceiving differences in depth of binocular stimuli with horizontal disparity and/or in their disparity signs. We review the methods for identifying stereo-anomalies, the research trend in examining stereo-anomalies, and the frequency of occurrence of stereo-anomalies. Methods that have been used to identify stereo-anomalies can be categorized into three types that are based on the depth discrimination task, depth reproduction task, and clinical tests. Research trends in studying stereo-anomalies fall into the following three categories: proposals of subsystems underlying binocular stereopsis, examination of the performance of stereo-anomalous observers in tasks regarding other binocular (or monocular) phenomena, and estimates of the population frequencies of stereo-anomalies. We identify possible effects of different stimulus conditions on the identification of stereo-anomalies; differences in stimulus conditions may have contributed to the types of proposed subsystems and the conflicting estimates of the population frequency of stereo-anomalies. We discuss possible future research directions concerning stereo-anomalies.

Key words: binocular stereopsis, stereo-anomalies, population, subsystems, binocular tasks, perceptual learning

キーワード: 両眼立体視, 立体視アノマリー, 人口比, 下位機構, 両眼性課題, 知覚学習

1. はじめに

両眼で外界を観察したとき, 外界の3次元対象は網膜に結像し, さまざまな波長や輝度から構成された網膜像を作り出す。このとき左右両眼に映った対象の網膜像の相対的な水平位置は同一ではなく, 互いに異なっている。左右網膜像の水平方向の相対的位置差, つまり, 水平網膜像差 (horizontal binocular disparity, 以下網膜像差) は, 奥行き知覚を生む手がかりの1つとして知られている。たとえば, 図1Aに示すように, 奥行き方向に離れた対象N, Fを考えると, 対象が作り出した左右眼の網膜像の水平位置は異なってい

る。実際の3次元対象が作り出す左右網膜像は, 一对の2次元画像を両眼それぞれに独立に提示することによっても作り出すことができる (図1B)。一般にこの2次元画像はステレオグラム (stereogram) と呼ばれ, 左右の画像を半視野 (half-field) と呼ぶ。また, 網膜像差をもつステレオグラムが作り出す奥行き感のことを両眼立体視 (binocular stereopsis, 以下立体視) と呼ぶ。

歴史上最初に, 網膜像差をもつステレオグラムが奥行き感を生じうることを示したのは Wheatstone (1838) である。彼は鏡を使って, 両眼に独立に2次元画像を提示した。ただし, 彼の使ったステレオグラムの半視野刺激はそれぞれ明白な形をもち, 単眼性の奥行き手がかりを含む

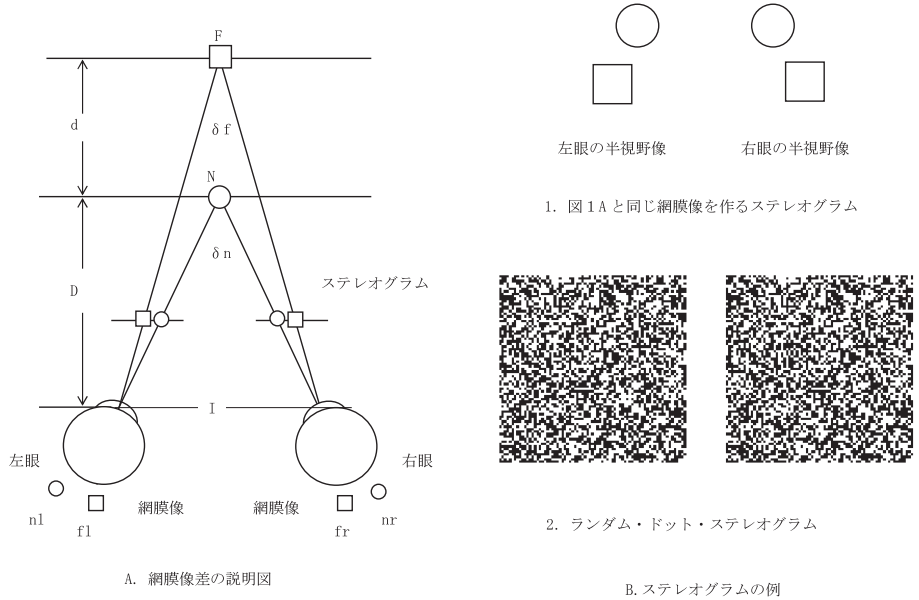


図1 立体視，網膜像差，ステレオグラムの模式図(A)と線ステレオグラム(B1)，RDSの例(B2)。一般に網膜像差は対象が両眼に対してなす角度の差($\delta f - \delta n$)で定義され，その角度差はステレオグラムの水平位置の差に対応する。図1Aに示すように，観察者が観察距離(D)にある対象(N)を凝視するとき，後ろの対象(F)と手前の対象(N)の間の奥行き(d)は網膜像差($\delta f - \delta n$ ，あるいはステレオグラムの水平位置差)に依存していることがわかる。

ものであった。その後，Juleszは，同一のランダム・ドット・パターン(random dot pattern)からなる背景に相対的な網膜像差をもつランダム・ドット・パターンを重ねることで，ランダム・ドット・ステレオグラム(random-dots stereogram 以下，RDS)を作り，半視野から単眼性の奥行き手がかりを除くことに成功した(Julesz, 1971) (図1B2)。図から明らかなように，RDSの場合，少なくとも網膜像差をもった刺激の形は単眼では観察されない。しかしながら，このような刺激を実体鏡などで観察すると，網膜像差に応じて背景から飛び出して見えたり，凹んで見えたりする。この見えは刺激を融合(fusion)したときにしか生じないので純粋に両眼性と考えられ，網膜像差は純粋に両眼性の奥行き手がかりと考えられるようになった。融合とは，左右の網膜像差刺激(以下，像差刺激)を両眼で観察したとき，あたかも奥行きをもった1つの像を観察しているかのように感じる現象(単一視)をもたらす一連の過程のことである(例えば，Howard & Rogers, 2002; 下野・江草・大野, 1997)。

一方，網膜像差をもったステレオグラムを提示

しても奥行きを感じない観察者も少なからず報告されている。このような観察者は一般にstereanomalous, stereo-blind, あるいはstereo-deficientと呼ばれるが，本論文ではこれらの観察者を総称して立体視アノマリーと呼ぶ。立体視アノマリーには特定の種類の像差刺激に対してのみ奥行きを感じない者から，像差刺激一般に対して奥行きをまったく感じない者まで報告されており，彼らの立体視の不全，不調の程度はさまざまである。もちろん，片方の眼の機能が失われた観察者は，ステレオグラムが提示されても網膜像差に基づいた明白な奥行きは知覚できない。したがって，両眼視機能の一部に不全，不調のある観察者，たとえば斜視(strabismus)あるいは弱視(amblyopia)の観察者の中に，立体視を有しない者がいることは十分予測できる。斜視とは対象を凝視したときに視軸(visual axis—通常，対象と中心窩を結ぶ線分)にずれが生じる視覚異常であり，両眼性の機能に問題を生じることが知られている(たとえば，長谷部, 2007; 石原・鹿野, 1991)。また弱視とは，一般に単眼あるいは両眼の視力低下で，眼の検査で器質的な病変が見つからないよ

うな、見かけ上健康な眼の視力の低下として定義され、幼年期の刺激遮断（たとえば先天性白内障）、斜視、不同視症など、両眼相互作用の不適切な経験によってもたらされると考えられている（たとえば、Levi & Li, 2009）。さらに、大脳視覚野に損傷があるとみられる脳損傷の患者の中にも立体視がうまくいかない患者も報告されている。本論文では脳損傷が引き金になった立体視アノマリーに関するレビューは行なわないが、興味のある方は、本田（1998, pp. 97-113）や Howard and Rogers（2002, pp. 488-490）、Parker（2007）などを参照していただきたい。また最近、Read et al.（2010）は、一酸化炭素中毒で視覚領域（特に腹側領域）に障害を受けた視覚失認患者 DF（Goodale & Milner, 2004 鈴木・工藤訳 2008）のさまざまなタイプの立体視能力を測定している。

ところが1970年 Richardsによって、隻眼、弱視、斜視といった両眼視機能の特別な不全のない観察者でも立体視の不全、不調が観察されるという報告がなされた。さらに、Richards（1970, 1971）は、立体視アノマリーを同定することを、立体視機構の下位機構¹⁾を推論する1つの手法として提案した。この提案は色覚異常の研究で使われた考えのアナロジーである。一般に色覚異常（color anomaly）の観察者は、ある特定の波長間の色弁別に不全があり、この不全は色覚系の初期段階の下位機構の欠損、感度低下、あるいは不調によってもたらされると考えられている。同様に立体視アノマリーが示す立体視の部分的な不全は、立体視を媒介する機構の下位機構の欠損、あるいは感度低下と考えられる。この考えは、Richards（1970）によって提案された下位機構（2. 参照）に対応する神経機構が発見されたことによって強く支持された（たとえば、Mustillo, 1985）。

しかしながら、立体視アノマリーの同定法は必ずしも研究間で一致しなかった。この不一致は従来提案されている下位機構の分類に影響を与えた可能性がある。本論文では立体視アノマリーの同

定法についてレビューを行い、さらにどのような下位機構が提案されているかについて考察する。

また、立体視アノマリー研究には立体視の下位機構の解明という流れに加え、両眼視機能の推定という流れがある。単純に考えれば、立体視の不全、不調はいろいろな両眼視機能の不全、不調を予測させる。というのは、もし立体視とある両眼視機能が同じ下位機構を共有しているとすれば、その下位機構が不調な場合、両者とも機能が低下すると予測されるからである。したがって、立体視アノマリーの両眼視機能を調べることによって、それらの処理機構の構造についてある程度の推論が可能である。1970年以降、立体視アノマリーの両眼視機能の研究ではさまざまな両眼性課題（3.2を参照）を使って、斜視や弱視の観察者と両眼視機能の正常な観察者の課題の成績を比較してきた。一般に、それらの両眼性課題で立体視アノマリーの成績は低く、その原因は斜視や弱視など出生初期に生じた何らかの視覚異常に帰されることが多かった（たとえば、Blake & Cormack, 1979）。従来、臨界期に両眼性皮質細胞の正常な発達が妨げられると、立体視能力を含む両眼視機能の回復は困難と考えられてきたが、近年の研究は立体視がまったくできない観察者でも知覚学習によってある程度回復できることが報告されている（たとえば、Ding & Levi, 2011）。そこで本論文では立体視アノマリーの両眼視機能研究を歴史的に考察し、知覚学習による立体視回復の意味について考察する。

さらに、立体視研究者はどの程度の人口比で立体視が行えない人が存在するかについても調べている（たとえば、Richards, 1970; Tam & Stelmach, 1998; van Ee & Richards, 2002）。先述したように、斜視あるいは弱視の観察者が立体視を含む両眼視機能に何らかの問題を抱える可能性のあることはよく知られており、長谷部（2007）によれば斜視の有病率は1~4%、Patterson（2007）によれば6~8%、Levi and Li（2009）によれば2~4%である。彼らに加え、斜視や弱視などの特別な不全、不調を両眼視において示さない個人においても、立体視アノマリーは全体の30%程度であるという主張もある（Richards, 1970）。このような観察者は、最近頻繁に上映されている3次元映画や、2010年に放送が始まっ

1) 本論文では、心理物理学実験によって存在が示唆された場合に下位機構という用語を、生理学的研究によってその存在が示唆された場合に神経機構という用語を使う。下位機構という用語は、Richardsによって使われたものであり、立体視アノマリー研究に及ぼした彼の貢献に敬意を表し、この用語を使う。

た3次元テレビの視聴に問題を抱えている可能性もある (Tam, Speranza, & Vazquez, 2012)。その意味で、立体視アノマリーの人口比についての研究を3Dコンテンツの観賞という観点から概観しておくことは意味があろう。

以上のようなことを踏まえ、本論文は以下のような構成とした。2. においては3種類の立体視アノマリー分類法 (奥行き弁別, 奥行き量測定, 臨床立体視テスト) のそれぞれの特徴をまとめている。3. においては従来提案されてきた立体視下位機構についての研究, 立体視アノマリーの両眼視を中心とした視覚機能についての研究, また立体視アノマリーの人口比の研究をまとめている。さらに4. では、立体視アノマリーの今後の研究の方向について議論している。

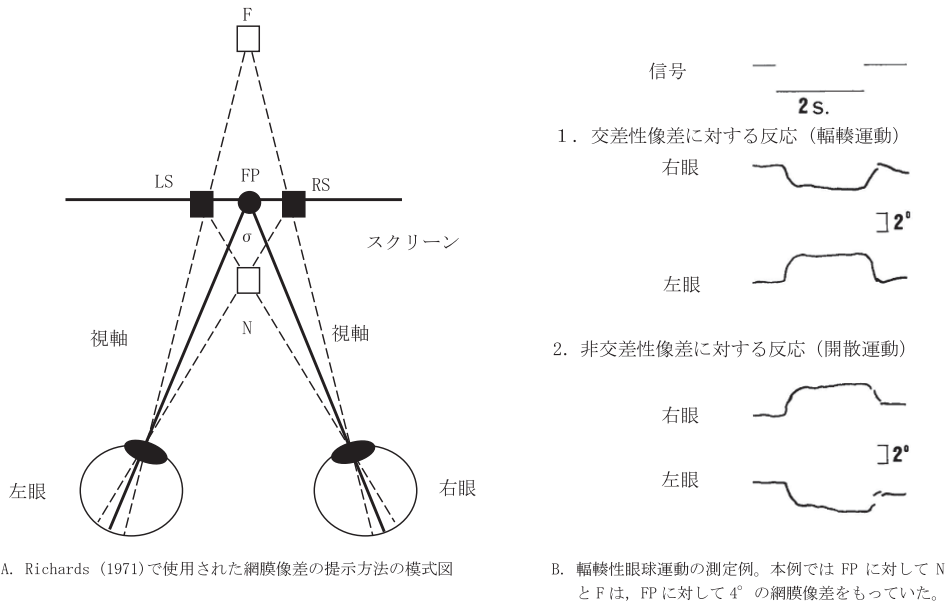
2. 立体視アノマリー同定法

2.1 奥行き弁別

Richards (1970, 1971) の研究の特徴は、斜視や弱視など両眼視機能に特別な不全、不調のない観察者でも立体視の不全、不調が観察されると報告したことである。Richards (1970) は比較的大きい網膜像差 (0.5~4°) をもつ刺激を比較的小さい時間 (80 ミリ秒) 提示した。彼の方法ではまず、凝視刺激 (FP) が提示され、観察者が FP

を凝視した後、刺激 (N) [あるいは刺激 (F)] が短時間提示された (図 2A)。彼の方法では FP は提示されたままで、刺激 (N) はスクリーン上の刺激 (LS) を右眼に、刺激 (RS) を左眼に提示することで作り出された。また刺激 (F) は RS を右眼に、LS を左眼に提示することで作り出された (図 2)。Richards はさらに右眼あるいは左眼に網膜像差をもたない“ゼロ網膜像差”刺激も提示し、これら3種類の像差刺激 (交差性, 非交差性, そしてゼロ) 間の弁別感度を調べた。彼の使ったゼロ網膜像差刺激は、単眼性であり、左眼、あるいは右眼に提示された。交差性網膜像差 (以下、交差性像差) とは、凝視点より前の、つまり観察者により近い対象が作り出す網膜像差であり、非交差性網膜像差 (以下、非交差性像差) とは凝視点より後ろの対象が作り出す網膜像差である。観察者はこの短時間提示された像差刺激の見かけの奥行き方向を、凝視刺激に比較して、“前”、“後ろ”、あるいは“同じ”に見えるかを判断した。その結果 Richards は、交差性, 非交差性, あるいはゼロ網膜像差刺激に対応した奥行きの弁別ができない観察者がみられると報告した。

Richards (1970, 1971) と同様、奥行き弁別法を使った初期の研究の多くでは、両眼の輻輳位置の変化、あるいは輻輳性眼球運動 (vergence eye movement) が奥行き弁別判断に影響しないよう



A. Richards (1971) で使用された網膜像差の提示方法の模式図

B. 輻輳性眼球運動の測定例。本例では FP に対して N と F は、FP に対して 4° の網膜像差をもっていた。

図 2 Richards (1971) の刺激提示方法の模式図 (A) と輻輳性眼球運動の測定例 (B)

に、像差刺激は短時間提示された。両眼である対象（たとえば図 2A の FP）を凝視したときの両眼位置は輻輳位置と呼ばれ、そのとき両眼の視軸がなす角（たとえば図 2A の θ ）を輻輳角と呼ぶ。一般に暗室の中で、凝視刺激 FP を消した後に像差刺激 N を提示すれば、両眼は FP から N の方向へ、輻輳角が増加する方向へ動く。この輻輳性眼球運動は輻輳運動 (convergence) と呼ばれる。一方、凝視刺激 FP を消した後に像差刺激 F を提示すれば、両眼は FP から F の方向へ、つまり輻輳角が減少する方向へと動く。この輻輳性眼球運動は開散運動 (divergence) と呼ばれる。図 2B に交差性及び非交差性像差に対する輻輳運動と開散運動の測定例を示した。この例の場合、まず FP が提示され、その後 N（あるいは F）が 2 秒提示され、その後また FP が提示された。相対的に小さな刺激が、たとえば 2° の網膜像差をもち 2 秒間提示されると、平均 130~250 ミリ秒ほど遅れて眼球は異なる方向に同量動き始め、約 1 秒で新しく提示された対象を凝視するかのように運動する (Howard & Rogers, 2002)。そのために輻輳性眼球運動は網膜像差の検出の指標と考えられてきた（たとえば Jones, 1977; 下野ら, 1982）。さらに、輻輳性眼球運動は奥行きの手がかりになるので（たとえば, Shimono & Egusa, 2005）、初期の研究では像差刺激を輻輳運動の潜時時間内で提示することが多かった。潜時時間内で提示すれば、少なくとも刺激を提示している間は輻輳運動が生じない。したがって、輻輳性眼球運動が奥行き判断に使われる可能性が低くなると考えられた。

短時間提示された刺激に対する奥行き弁別という手法を選んだ研究者たちは、立体視アノマリーを定量的に定義するためにさまざまな方法、たとえば Richards (1970) や Jones (1977) は信号検出理論を、Herring and Bechtoldt (1981) は系列範疇法を、Jones (1977) や下野・松尾・中溝 (1989) は臨界比法 (Critical Ratio) を使って立体視アノマリーの同定と分類を試みた。これらの同定法と分類法の利点、問題点のより詳しい議論は、下野ら (1989) を参照していただきたい。

より最近の研究によれば、奥行き弁別法の問題は分類法というよりむしろ、刺激提示時間が極端に短いということである。Patterson and Fox (1984) 及び Tam and Stelmach (1998) は、提

示時間の増加とともに立体視アノマリーと分類される観察者が減少することを示している。この点に関する議論は 3.3 で詳しく行う。

また、奥行き弁別法のもう 1 つの問題点は、像差刺激が継時的に提示されている点である。つまり、像差刺激が提示されたとき凝視刺激は提示されていないという点である。このような刺激提示方法は、初期の研究のいくつか（たとえば、Jones, 1977; 下野ら, 1982, 1989）で行われている。これらの研究では、凝視刺激と両眼球位置間の絶対網膜像差（以下、絶対像差）と像差刺激と両眼球位置間の絶対像差が継時的に提示された。一方、図 1B で示したようなステレオグラムの場合、たとえば図 1B1 に示した線ステレオグラムでは外側の矩形と内側の円形の間に、図 1B2 に示した RDS では外側のランダム・ドット・パターン（背景刺激）と内側のランダム・ドット・パターン（奥行き刺激）の間に絶対網膜像差（以下、相対像差）がある。Collewijn and Erkelens (1990) は、Jones (1977) において立体視アノマリーの頻度が多い理由は、絶対像差が継時的に提示されたためであると主張している (3.1 参照)。絶対像差と相対像差の概念的区別は、それぞれの像差刺激に対して選択的に反応する皮質領域の領野が異なるという事実からも支持されている (Cumming & Parker, 1999; Parker, 2007)。

奥行き弁別を指標とした立体視能力の指標としては、立体視力 (stereo acuity) もよく使われる。立体視力とは奥行き弁別が可能で最小の相対像差量 (奥行き弁別力の閾値) として定義され、正常な立体視力は一般に数 10' の相対像差である (Howard & Rogers, 2002)。弱視や斜視の観察者の両眼性課題遂行能力を調べる研究においては、数' から数 10' 程度以上の立体視力を示す観察者を立体視アノマリーと呼ぶことが多い (たとえば、Ding & Levi, 2011)。立体視アノマリー研究では、立体視力は 2.3 で述べる臨床立体視テスト (以下、臨床テスト) のように簡易的な方法で求められることも多い。

2.2 奥行き量測定

立体視の機能を調べる指標としては奥行き弁別以外に、見かけの奥行き量を考えることできる。しかしながら、立体視アノマリー研究の中で見か

けの奥行き量を測定した研究は少ない。その理由はおそらく、奥行き弁別に比べ奥行き量の再生は個人差が大きい（松田，1996）ために、立体視アノマリーの定義が弁別課題より困難なためであろう。

初期の研究では、Richards (1971) が弁別課題に加え、奥行き量のマッチング課題を行っている。彼のマッチング課題では、観察者は像差刺激が消えた後に、その刺激の見かけの奥行き位置をプロンプト刺激で再生した。その結果、交差性像差刺激あるいは非交差性像差刺激の弁別課題の成績が低い観察者各1名において、それぞれの像差刺激に対する見かけの奥行き量は（網膜像差をもたない）単眼刺激に対する奥行き量とほぼ同じであった。彼は像差刺激と単眼刺激に対する奥行き感に差がない観察者を立体視アノマリーと考えた。しかしながら同時に、彼は非交差性像差に対する奥行き弁別が困難であるが、同じ像差刺激に対してマッチング課題が可能な観察者を報告した。つまり立体視アノマリーの中には、奥行きの弁別は混乱するが、見かけの奥行き量は正常に再生できる観察者もいることになる（4. 参照）。

Shimono (1984) も奥行き弁別法で同定した立体視アノマリーの見かけの奥行き量を量推定法で測定し、弁別法と推定法の結果がほぼ対応していることを示している。さらに、van Ee and Richards (2002) は観察者に17種類の像差刺激（ $-4\sim 4^\circ$ ）を短時間提示したのち、見かけの奥行き

量を再生させた。彼らは、像差刺激としてスクリーンに対して同じ網膜像差をもつ水平方向に離れた2本の垂直線分（図3Aでは交差性の網膜像差をもっている）（面テスト）か、一定の網膜像差内に複数の奥行き方向に傾いた一群の棒状刺激（図3Bでは非交差性の網膜像差をもっている）（体積テスト）を使った。このとき観察者は見かけの奥行き量を、比較刺激（2本の水平線分）の垂直距離で再生した。比較刺激は凝視刺激（線分）が提示された前額面（スクリーン）に提示された。彼らは、比較刺激の幅（水平方向距離）に対する線分の垂直距離の比（奥行き/幅比）を像差刺激の関数としてプロットし、その反応パターンから立体視アノマリーを定義した。彼らの方法は広い領域の網膜像差を調べられるという利点がある。ただし、次に述べる臨床テストに比べ著しく時間がかかるという欠点がある。

2.3 臨床テスト

弁別法以外に、立体視アノマリーの両眼視機能を調べる研究で多く使われる方法に臨床テストがある。たとえば、線ステレオグラム、Frisby 立体視テスト、TNO 立体視テスト、Titmus 立体視テスト、Randot 立体視テスト、Baush & Lomb Orthorater, あるいは Julesz の立体視テスト (Julesz, 1971) などである。これらのテストでは観察者はステレオグラムを観察し、奥行き感が得られるかどうか、あるいは像差刺激の奥行きの方

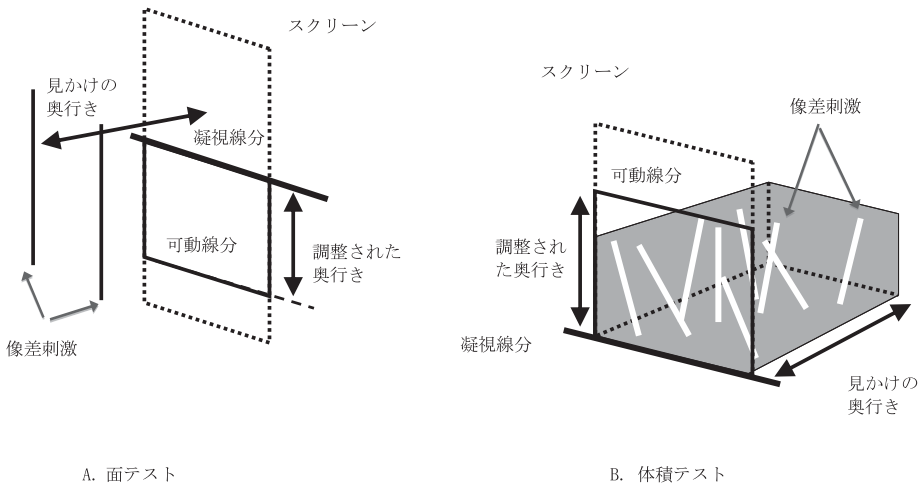


図3 van Ee and Richards (2002) で使われた立体視テストの模式図 [面テスト (A) と体積テスト (B)] (van Ee & Richards, 2002 を改変)

向を報告する。もし奥行きが見えなかったり、報告した奥行き方向が誤っていたりした場合、あるいはまた立体視力が正常より極端に低い場合に彼らは立体視アノマリーと見なされる。このテストで同定された立体視アノマリーは、現在両眼視機能が不全、不調（たとえば、斜視や弱視）であるか、あるいは現在特別な不全、不調はないがかつて斜視の手術を受けた経験を持っていることが多い。

しかしながら、初期の奥行き弁別法や奥行き量測定法で使われた網膜像差と、臨床テストで使われた網膜像差の間には、その大きさ、種類、提示時間に差があった。奥行き弁別法が使われた初期の研究の一部では絶対像差が用いられたが、臨床テストではステレオグラムは（図 1B で示されるステレオグラムと同様）相対像差をもっていた。したがって、同じ用語を使ってはいるが、弁別法で調べた立体視機構と臨床テストで調べた立体視機構は同一でない可能性がある（3.3 参照）。また、前者のうち、たとえば、Jones (1977)、下野ら (1982, 1989) では比較的大きな絶対像差が、また一方、Richards (1970, 1971) では比較的大きな相対像差が使われた。さらに、後者（たとえば、Anderson, Mitchell, & Timney, 1980; McColl, Zieger, & Hess, 2000; Movshon, Chambers, & Blakemore, 1972）では比較的小さな相対像差が使われた。立体視には網膜像差の大きさによる下位機構があるという主張もある（Jones, 1977; Norcia, Suiter, & Tyler, 1985; Shimono, 1984; Wilcox & Allison, 2009）ので、2種類の立体視アノマリー同定法が同一の機構の不調を測定しているかは議論の余地がある。

さらに、臨床テストでは一般に眼球運動を制御しておらず、観察時間の制限のないことも多かったが、3.3 で議論するように眼球運動や観察時間は立体視アノマリーの同定に影響を及ぼす可能性がある。したがって、立体視アノマリーという同じ用語を使いながら、奥行き弁別法や奥行き量推定法で同定された場合と臨床テストで同定された場合では、異なる“立体視アノマリー”について議論している可能性もある（Kooi et al., 2010; 下野, 1988, 2007）。しかしながら、臨床テストは、弁別法や推定法に比べて手続きが簡単である、同定にかかる時間が短い、（市販の装置が購入でき

れば）特別な装置がいらないという利点がある。

3. 立体視アノマリー研究の流れ

Richards (1970) 以降、立体視アノマリー研究に基づいていくつかの立体視下位機構の提案がなされている。そこで使われている論理は先述したような色覚アノマリーのアナロジーである。3. で述べるように立体視アノマリーには独特の反応を示すものもいる（Rychkova & Ninio, 2009）が、その反応を十分説明できるほど研究が進んでいるわけではない。われわれはその原因を色覚アノマリー研究に比べ、簡易的で精度の高い測定法が開発されていないためであろうと考えている。このような問題点を含んではいるが、本論文では従来示唆されているいくつかの下位機構について簡単に述べる。示唆された下位機構の一部についてのレビューは、Howard and Rogers (2002)、下野 (1988, 2007) などでも行われている。本論文では下野 (2007) で十分議論できなかった部分を補足する。

また、先述したように、立体視アノマリー研究には彼らの両眼視機能を調べた一群の研究がある。斜視や弱視など出生初期（臨界期）に導入された何らかの視覚異常をもつ観察者は立体視アノマリーであることが多く、彼らの両眼性課題への成績が研究の対象になった。彼らは、初期の不適切な視覚経験のために、両眼性皮質細胞の正常な発達が妨げられ、立体視能力の獲得がうまくいかず、両眼性課題の成績が低くなると考えられていた。1970年代から2000年にかけて行われた両眼性課題に関する多くの研究の結果はこの予測と一致し、この考えの妥当性が示された。しかし最近の弱視や斜視の観察者を使った研究は、臨界期の不適切な経験は必ずしも両眼性課題を遂行するすべての能力を奪わないし、臨界期以降も知覚学習によって単眼視力や両眼性課題の遂行能力が上昇することが示されている（たとえば、Ding & Levi, 2011; Hess, Mansouri, & Thompson, 2010; Levi, 2005）。立体視アノマリーの両眼性機能に関する研究のレビューは、Howard and Rogers (2002, pp. 490-493) でも行われているので、本論文では彼らのレビュー以降に行われた両眼性機能の研究を中心にレビューを行う。また、本論文では立

立体視アノマリーの輻輳性眼球運動についてのレビューも行う。従来、輻輳性眼球運動を媒介する機構は、立体視機構と関連があると考えられおり、立体視アノマリーの輻輳性眼球運動を調べることは、輻輳性眼球運動と立体視を媒介する機構に関して一定の推論が可能であると考えられてきたからである。さらに、立体視アノマリーの単眼視課題での成績と立体視機構との関連を示唆している研究についても言及する。

3.1 提案あるいは示唆された立体視下位機構

以下、立体視アノマリー研究によって提案、あるいは示唆された下位機構についてまとめているが、それらの多くは立体視アノマリー研究以外の立体視研究から示唆されたものとよく対応する。ただし、立体視アノマリーの研究結果から、「分離可能な下位機構がある」と主張するためには、一般に二重解離 (double dissociation) という判断基準が重要である。この考えによれば、たとえば網膜像差処理機構が A, B2 つの下位機構に分離可能であることを示すには、A 下位機構が不調な観察者と B 下位機構が不調な観察者の両方の存在が必要である。提案されたすべての下位機構がこの基準を満足しているわけではない。今後下位機構の存在を確認するには、マッチング課題や順応課題のような機構分離の手法あるいは脳画像研究による研究と組み合わせることが有効と考えられるが、この点については、4. で議論する。[マッチング法や順応法についての研究例は、Howard and Rogers (2002) や林部 (1995, 2004, 2011) などを参照。また、視覚研究における機構分離に関する議論は、たとえば、洪田 (1980) を参照。]

網膜像差の符号：すでに述べたように、立体視アノマリー研究によって提案された立体視の下位機構は、網膜像差の符号 (交差性像差と非交差性像差) に関するものが最初である (たとえば、Richards, 1970)。符号に対応した下位機構が存在することは、生理学的な実験結果とよく対応しており (Mustillo, 1985)、交差性刺激と非交差性刺激に対する見かけの奥行きの特徴が異なることはよく報告される (たとえば、Patterson et al., 1995; Shimono et al. 2002)。

網膜像差の大きさ：一般に、立体視において網

膜像差の大きさと見かけの奥行き量は 1 対 1 に対応せず、単一視の領域では見かけの奥行き量は網膜像差の大きさとともに増加するが、複視の領域では網膜像差が一定程度を超えると奥行き量は低下を始めることが知られている (Howard & Rogers, 2002; 金子, 2007)。Jones (1977) は、比較的小さい網膜像差には正常な立体視をもつ観察者も、相対的に大きな網膜像差に対する奥行き弁別が困難な場合があることなどから、両者は異なる下位機構に依存していると主張している。前者は微細立体視 (fine stereopsis)、後者は荒粗立体視 (coarse stereopsis) と呼ばれることが多い。前者では像差刺激は融合し、後者では複視が生じている。なお、用語は異なるが、網膜像差の大きさに沿って下位機構を仮定する考え方は、かつて Ogle (1952) によって主張されている。視覚誘発電位を指標にした研究でも、Jones (1977) の考えと一致する結果が得られている (Norcia et al., 1985)。さらに、最近 Wilcox and Allison (2009) は従来の微細立体視と荒粗立体視に関する研究をレビューし、微細立体視と分類される領域では、後述する 1 次立体視機構と 2 次立体視機構が、荒粗立体視と分類される領域では 2 次立体視機構が働いているだろうと主張している。

輝度変化とコントラスト変化：線ステレオグラムにせよ RDS にせよ、一般に網膜像差は左右の眼に提示された類似の輝度分布をもった刺激の位置差で表現される。つまり、網膜像差とは輝度によって定義された左右の対応するエッジ間の水平方向の位置差である。しかしながら、たとえば両眼刺激の輝度コントラスト変化 (包絡線) の水平位置差で定義される網膜像差も仮定することができる (たとえば、Wilcox & Hess, 1997)。このような輝度分布に基づかない網膜像差は 2 次的網膜像差と呼ばれている。McColl et al. (2000) は、臨床テストで立体視アノマリーと定義された観察者の、短時間提示された (150 ミリ秒) 像差刺激に対する奥行き弁別を測定した。彼らは、ガボール刺激 (局所的にある輝度分布をもっている正弦搬送波パターンのコントラストをガウス関数で重畳した刺激) を使い、搬送波とガウス包絡線のいずれにも網膜像差がある場合とガウス包絡線のみ網膜像差がある場合の弁別力を比較した。(ガボール刺激については、たとえば、蘆田, 2006,

を参照。) その結果, 臨床テストで奥行き弁別ができなかった1名の観察者と臨床テストで非常に低い立体視力を示した観察者3名が2次の網膜像差を検出することができた。この結果は立体視機構に1次と2次の機構があることを示唆している。1次の網膜像差と2次の網膜像差の生理的な基盤が異なることは, ネコの大脳皮質細胞の反応からも示唆されている (Tanaka & Ohzawa, 2006)。

像差刺激の空間周波数と大きさ: Schor and Wood (1983) は4名の立体視が正常な観察者と1名の交差性像差アノマリー (臨床テストで立体視力が著しく低いと判断された観察者) の奥行き弁別能力と見かけの奥行き量を測定した。彼らの使った刺激は垂直方向の大きさは一定で, 水平方向にドッジ関数を使って作成された狭い空間周波数帯域にその輝度分布 (その中心周波数は0.075~19.2 cycles/deg まで, 1オクターブ毎に変化した) をもつ像差刺激であった。したがって, 彼らの刺激の大きさは, 低空間周波数刺激の場合相対的に大きく, 高周波数刺激の場合相対的に小さかった。その結果, 低空間周波数刺激を使って小さい像差刺激への感度 (立体視力) を測定したとき, また同様の刺激を使って見かけの奥行き量を測定したとき, 感度および奥行き量は正常者に比べて著しく低下していたが, 低空間周波数刺激を使って大きい像差刺激の奥行きを測定したときには正常者と類似の反応を示した。(空間周波数についての説明はたとえば, 市原, 2010, を参照。)

Ding and Levi (2011) もまた, 立体視アノマリーの立体視能力が空間周波数に依存していることを示している。彼らはランダム・ドット・パターンに0.34~21.76 cycles/deg までの中心周波数をもつ (1.26オクターブの半値幅帯域をもつ) 2次元の等方性バンドパスフィルターをかけた像差刺激を使って, 立体視が正常な2名の観察者と3名の立体視アノマリーの立体視力を測定した。その結果, 正常な観察者は4~6 cycles/deg 付近で立体視力のピークがあったが, 立体視アノマリーは1~2 cycles/deg 付近の立体視力のピークがあった (ただし, 立体視アノマリーの立体視力のピークは正常者に比べ, 20倍ほど感度が低い) (Ding & Levi, 2011, 図3Cを参照)。

以上のようにいくつかの研究は, 立体視アノマリーでも低空間周波数からなる像差刺激は検出す

ることができることを示している。正常な観察者と立体視アノマリーで報告された空間周波数のピークは, マスキング法の結果から推論された下位機構の空間周波数特性 (Shioiri et al., 1994; Yang & Blake, 1991) と比較的よく一致している。

ただし, 一般に低空間周波数をもつ刺激は高空間周波数をもつ刺激に比べ相対的に大きい。したがって, 得られた結果が空間周波数の効果なのか刺激の大きさの効果なのかを区別することは難しい。いずれにせよ, 刺激の大きさも奥行き弁別に影響を与えることは, 先述の Ding and Levi (2011) によって示されている。彼らは立体視アノマリーの立体視能力回復訓練の中で, 比較的小さいドットが高い密度で描かれていた (たとえば図1B2に示されるような) RDS では奥行きを感じないが, コントラストは高いが, ドットの密度が低く, またその大きさ (直径) が大きい (たとえば50'程度の) DRDS (dynamic random-dots stereogram) では奥行きを感じる2名の観察者を報告した。(ここで使われたDRDSは, ある時間間隔で, 互いに絶対像差が少し異なるがドット間の空間的位置が無相関であるRDSを交互に提示している。もし網膜像差量の変化が検出できれば, その変化の奥行きに対して正しい奥行き弁別ができる。) ただし, そのDRDSに対する網膜像差の検出閾 (立体視力) は正常者よりもきわめて低かった (Ding & Levi, 2011, 図3Bを参照)。

網膜像差の提示位置: 刺激の種類ばかりではなく, 刺激の提示位置によっても下位機構が存在することを示唆する研究もある。たとえば, Shimono et al. (1983) は, 図2Aに示すような正中面上付近での奥行きをシミュレートした像差刺激の奥行きは正しく報告できないが, 周辺視野に提示された網膜像差に対しては正しく報告できる観察者を報告している。また, 動的立体視が正中面上付近ではできないが, 周辺視野では可能な観察者も報告されている (Anderson et al., 1980)。さらに, 弱視の観察者に中心視付近では奥行き弁別が困難であるが, 周辺視での弁別は可能な観察者も報告されている (Howard & Rogers, 2002)。これらの事実は, 視野の中心と周辺では立体視機構が分離可能であるという考えと一致する。

網膜像差の時間的变化: Regan, Beverley, and Cynader (1979) は, 心理物理学の実験結果と神

経生理学的実験から得られた結果から、3次元方向に連続的に変化する網膜像差を処理する下位機構（動的立体視, dynamic stereopsis）と静的な網膜像差を処理する下位機構（静的立体視, static stereopsis）は独立であるという仮説を提出し、いずれか一方の奥行き感度が低い立体視アノマリーを同定している。また臨床テストで立体視アノマリーと同定された観察者の中にも、正中面に沿った網膜像差の連続的な変化に奥行きを感じる者も報告されている（Anderson et al., 1980）。さらに、Titmas stereo test（静止像差刺激）には奥行きを感じない外斜視の子供（5～10歳）の17名中10名が、奥行き方向に連続像差が変化するRDS刺激には奥行きを感じたという報告もある（Fujikado et al., 1996）。Rouse et al. (1989) は比較的小さな静的網膜像差をもつ刺激で立体視アノマリーと同定された11名の観察者のうち5名が、網膜像差によってのみ定義された表面をもつ、シリンダー状に回転する刺激の奥行き回転方向を正しく検出したと報告している。これらの研究では眼球位置の制御がなされていないので、理論的には眼球位置が奥行き知覚に影響した可能性は残る。しかしながらこれらの研究は、静的立体視に問題のある人々でも、刺激に3次元方向の運動を加えた場合に奥行きが感じやすくなることを示している。この点に関しては3.3 立体視アノマリーの人口比の項で再度議論する。

3.2 立体視アノマリーの視覚機能

臨界期と両眼視機能：生理学的な実験により、出生後の最初の数ヶ月間（臨界期）に両眼に正常でない刺激を与えられたサルやネコの両眼性皮質細胞は、正常に育てられた場合と比較して、著しく減少していることが明らかになっている。正常ではない刺激は、たとえば単眼にプリズムを装着して斜視を作り出したり、単眼を遮蔽したり、あるいは一方の眼にレンズを装着して網膜像をぼけさせたりして作り出した。このような刺激によって両眼網膜像が融合し単一視が達成できるような正常な視環境を壊し、実験的に正常な両眼視の発達の阻害を試みたのである。この試みは一般的には成功し、このような刺激で育てられたサルやネコは皮質細胞の異常だけでなく、行動的に見ても正常な奥行き弁別を示さないことも報告されて

いる（たとえば, Crawford et al., 1996）。これらの事実は、ヒトにおいても、出生初期に導入された何らかの視覚異常（たとえば斜視や弱視など）は両眼性皮質細胞の正常な発達を妨げ、立体視の能力を低下させることを示しており、立体視能力には臨界期があることを示唆している。

立体視アノマリーの両眼性機能については、両眼加重現象、順応効果の両眼間転移現象、輻輳性眼球運動、ユトロキチャー弁別課題などについて研究が行われている（Howard & Rogers, 2002）。両眼加重現象とは各単眼での課題成績に比べ、両眼での課題成績が一定の基準より上にある現象であり、成績の上昇が両眼相互作用を示すと解釈されている。今まで、明るさ（たとえば, Baker et al., 2007）、コントラスト閾値（たとえば, Lema & Blake, 1977）、瞳孔の大きさ（Sireteanu, 1987）などに関して研究が行われている。両眼間転移現象とは、一方の眼に対してのみ順応を行った場合でも、その順応効果が他方の眼で測定できる現象であり、測定された順応効果量が両眼相互作用の程度を示すと考えられている。運動残効（たとえば, McColl et al., 2000; Movshon et al., 1972）、傾き残効（たとえば, Mitchell & Ware, 1974）、閾値上昇残効（たとえば, Anderson et al., 1980）などに関して研究が行われている。輻輳性眼球運動に関する研究（たとえば, Jones, 1977; 下野ら, 1982; Shimono, Nakamizo, & Kondo, 2000）については本節において後述する。これらの研究では一般的には、臨床テスト等で立体視アノマリーと分類された個人はさまざまな両眼性課題で低い成績を収めている（Howard & Rogers, 2002）。また、ユトロキチャー弁別課題とは、両眼のいずれかに刺激を提示し、観察者にいずれの眼に刺激が提示されたかを弁別させるものである。立体視が正常な観察者に比べて立体視アノマリーは弁別課題の成績がよく、この事実は立体視アノマリーでは単眼性皮質細胞が多いためであると解釈されている（Blake & Cormack, 1979）。ただし、この解釈には異論もある（Ono & Barbeito, 1985）。

しかしながら、同じ臨床テストで同定した立体視アノマリーであっても、両眼性課題で使われる刺激特性、それらの提示位置によっては課題成績に差があることも報告されている。そのような報告は残効の両眼間転移現象でよく報告される。た

たとえば, McColl and Mitchell (1998) は, 輝度で定義されたサイン波状のグレーティングを刺激に使用して運動残効の両眼間転移を使った場合ほとんど両眼間転移を示さないが, ランダム・ドット・キネマトグラム (random dot kinematogram, 以下 RDK) を刺激に使用した場合には両眼間転移を示す観察者を報告した。(彼らの使った RDK では, 最初にたとえば図 1B2 に示すようなランダム・ドット・パターンを示し, 次にある時間遅れでそれぞれのドットの運動方向が異なるランダム・ドット・パターンが提示された。このような刺激を観察すると, 各ドットの運動の他に, 刺激の全体的な運動方向を知覚することができる。) 彼らはこの結果をそれぞれの刺激特性を媒介する機構が分離可能であるという観点から議論している。

両眼性課題に関する立体視アノマリーの反応が研究ごとで必ずしも一致しないことから, Howard and Rogers (2002) は, 立体視アノマリー (特に弱視の観察者の場合) の両眼視特性を調べる場合, 刺激の提示位置, 刺激の空間周波数, 刺激の大きさに対して, 注意を払うべきであると述べている。というのは, 弱視の観察者の場合, 刺激の提示位置 (たとえば, 周辺視あるいは中心視), 刺激の大きさ, 空間周波数によっては, “残っている” 立体視能力 (残留立体視, residual stereopsis) があるからである。[先述した Ding and Levi (2011) の研究は, Howard and Rogers (2002) の記述が適切であったことを示している。]

そのような残留立体視は, もしあるとすれば, 分離可能な立体視の下位機構の一部が不全, 不調になったと解釈できる。しかしながら同時に, 不適切な環境で発達した, 正常な視覚機能には存在しない機構を示している可能性もある。たとえば今まで述べてきた立体視の一般的常識からは逸脱しているが, Rychkova and Ninio (2009) は, 斜視の観察者の一部が, “単眼” の異なる位置に呈示されたステレオグラムの半視野を “融合” し奥行きを感じる, という報告をしている。斜視眼が内側に向いている観察者の場合, 中心窩と鼻側網膜のそれぞれに, 斜視眼が外側に向いている観察者の場合, 中心窩と耳側網膜のそれぞれに半視野を提示したとき, 奥行きを報告した (このとき他

方の眼は遮蔽されている)。報告された奥行き印象 (奥行き量や奥行きをもった部分の形状) は一般的な立体視で得られるような明白なものではないが, このような観察者の存在は, 従来の立体視の概念から逸脱するものである。この事実は立体視の下位機構というより, 斜視などの正常ではない経験が作り出した機構の存在を示すものかもしれない。

知覚学習 (Perceptual Learning, PL) と立体視の可塑性: 従来の研究は, 臨界期における両眼への不適切な刺激は, 立体視を含む両眼性課題を遂行する複数の機構に対して重篤な影響を与えることを示しているが, 最近の研究は, 臨界期の不適切な刺激があっても必ずしも両眼性課題を遂行する能力が消失するわけではなく, 臨界期を過ぎても知覚学習によっていろいろな両眼視能力や単眼視力が回復しうることを示している。つまり, 臨界期を過ぎても両眼視に関する視覚系にはある程度の可塑性 (plasticity) があることがわかってきた。

臨界期の不適切な刺激があっても両眼性課題の遂行能力が消失するわけではないことを示す研究は, Baker et al. (2007) によって行われている。彼らは, 8名の弱視の観察者 (7名が RDS 臨床テストで立体視アノマリーと同定された) を使った両眼明るさ加重実験において, 弱視眼と正常眼それぞれの眼の輝度検出閾と両眼での輝度検出閾を比較し, 弱視の観察者でも, 両眼とも正常眼をもつ観察者と同程度の両眼加重が認められることを示した。この結果に基づいて Baker らは, 従来の主張は測定方法の誤りによるものであると主張している。というのは, それまでの研究では, 正常眼の輝度検出閾と両眼での輝度検出閾を比較して, 両者に大きな差がないことを根拠に立体視アノマリーに両眼加重がないと主張していたからである。Baker らの結果は, 立体視アノマリーの両眼性課題の遂行能力 (の一部) は臨界期の不適切な刺激に晒された後でも比較的 normally 機能することを示唆するとともに, 立体視アノマリーの両眼性課題の遂行成績に関する議論 (の一部) の根拠は再検討する必要があることも示唆している。

生後初期の不適切な視覚経験が視覚機能に回復不可能なほどの影響を及ぼさない可能性は, 最近の弱視の観察者の知覚学習研究によっても示され

ている（たとえば、Hess et al., 2010; Levi, 2005）。弱視の種類にもよるが、従来弱視の治療にはよく遮蔽法（patching）と呼ばれる方法（正常眼を覆い、弱視眼で日常風景を観察させることにより弱視眼の視力が高めようとする方法）が使われている。この方法は臨界期という概念の影響を受けて、生後の早い時期に行わないとその効果は低いと考えられており、比較的年齢が上の子供や大人に対しては行われていない（Hess et al., 2010; Levi, 2005）。また、両眼に同時に刺激を提示しないので、両眼性の視覚機能の発達を妨げる可能性も指摘されている。しかしながら最近、Hess et al. (2010) は臨界期を過ぎた9名の斜視性弱視の観察者（そのうち7名は臨床テストで立体視がまったくなく、2名はある程度の残余立体視能力があった）の両眼性課題の成績を上昇させることに成功した。彼らは一方の眼に、その構成要素（信号ドット）が同一方向（上か下）に動くRDKを、他方の眼にその構成要素（ノイズドット）がランダムな方向に動くRDKを両眼分離提示したときの、ドット全体の運動閾値を測定した。閾値の指標は運動方向が正しく検出できたときの、刺激全体のドット数に対する信号ドットの割合であった。従来の結果から、弱視眼に信号を入れた場合、正常眼へ提示したノイズからの抑制で閾値が上昇するが、正常眼に信号を入れた場合、弱視眼へ提示されたノイズから影響は受けにくいので、閾値の値はいずれの眼に信号（ノイズ）を入れるかで異なることが予測された。しかしながら、閾値測定の繰り返し、つまり練習試行が多い観察者では弱視眼に信号を入れた場合と正常眼に入れた場合で閾値の値が近づいてきた。Hessら（2010）はこの結果を両眼での相互作用が行われた結果であると解釈し、練習の後臨床テストで視力と立体視力を測定した。その結果、両者とも改善していた。

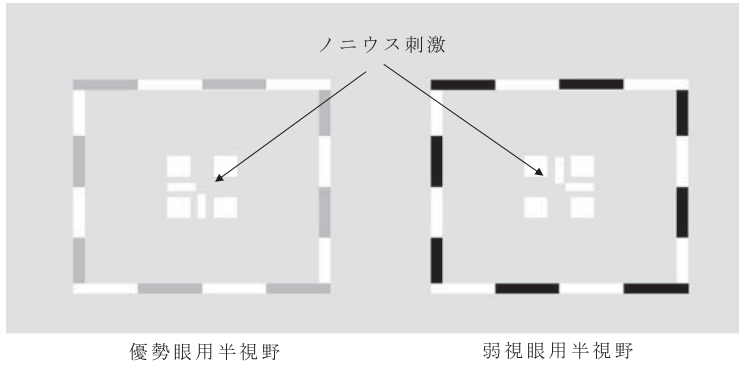
さらに最近、Ding and Levi (2011) は図4に示すような刺激を使って立体視アノマリーの訓練を行った。彼らはまず、左右の半視野刺激が融合する確率が高まることを期待して、弱視眼にはコントラストが高い半視野刺激を、正常眼（あるいは優勢眼一視力がより高い眼）にはコントラストの低い刺激を提示した（図4A）。このとき観察者は図の中央部のノニウス刺激が一直線になるように訓練を行った。[ノニウス刺激とは両眼に

別々に提示される一対の単眼刺激のことで、眼球位置を固定したり、推定したりする場合に使われる。この刺激を使うことで眼球位置を固定しながら、相対像差を提示することができる（たとえば、Shimono et al., 1998; 下野・中溝・東山, 2000, などを参照)]。眼球位置の制御と融合の訓練が終わった後、観察者は図4Bに示すような上下の矩形刺激を観察した。上の刺激は下の刺激に対して交差性あるいは非交差性像差をもち、観察者は奥行きを弁別を行った。個人差はあるが3000~16000回程度の練習の後、単眼視力や先述したいくつかの立体視テストで成績が上昇した。Ding and Levi (2011) によれば、このような訓練の後立体視能力を獲得した観察者は日常生活でもより奥行きの見えが明瞭になったとのことである²⁾。[立体視弁別の訓練が立体視能力を高める可能性はFoley and Richards (1974) によっても示唆されている。]

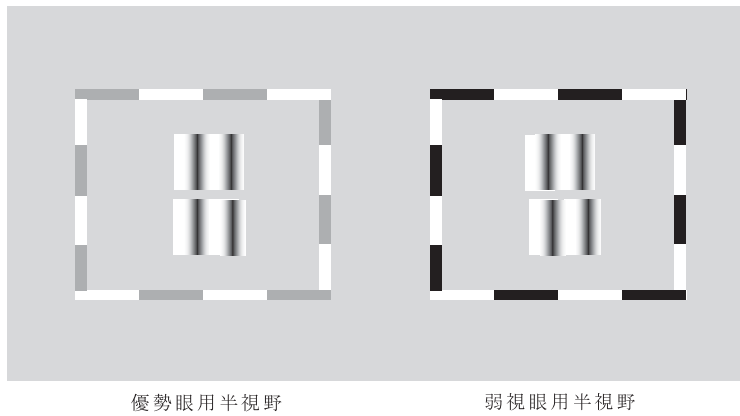
輻輳性眼球運動と立体視アノマリー：先述したように輻輳性眼球運動は、見えの奥行きと同様に網膜像差検出の指標としてみなされてきた。そのために立体視アノマリーと正常な輻輳性眼球運動を示さない輻輳アノマリー（vergence anomaly）の関係を調べると、両者がどの程度共通の機構を介して処理されているかが、ある程度推論できると考えられてきた。ただし、先述したように、初期の研究では絶対像差と相対像差の区別が明白ではないので、議論が混乱していた可能性がある。本論文ではその点に注意を払いながら研究のレビューを行う。

Jones (1977) は、比較的小さい相対像差をもつRDSの奥行きが正しく検出できる、つまり微細立体視が正常な観察者（30名）に、比較的大きな絶対像差を提示し、彼らの奥行き弁別反応と輻輳性眼球運動を同時に測定した。その結果、彼によって立体視アノマリーとされた観察者は、必ずしも輻輳アノマリーではなかった、しかしながら、輻輳アノマリーとされた観察者は、立体視ア

2) 同様の喜びを語った観察者の手記が、最近発表されている（Barry, 2009 宇丹訳 2010）。この手記はわれわれに、立体視を獲得することにより、日常生活上どのようなことが改善され、そして改善されたことがどれほどの喜びと感じられるか具体的に教えてくれる。



A. 融合訓練用ステレオグラムの例



B. 立体視訓練用ステレオグラムの例

図4 Ding & Levi (2011) で使われた融合訓練用刺激の例 (A) と立体視練習用刺激の例 (B) (Ding & Levi, 2011 を改変)。立体視練習用の刺激は、鋭いエッジをもつ正弦波格子模様かあるいはガウス包絡線をもつ正弦波格子模様からなっていた。

ノマリーであった。Fredenburg and Harwerth (2001) は、正常な微細立体視 (臨床テストで 20" 以下の立体視力を有していた) を示す観察者に、比較的小さい絶対網膜差を提示し、奥行き弁別度と輻輳運動量を測定した。その結果、両者は必ずしも共変関係ではなく、奥行き弁別はできるが輻輳性眼球運動を示さない観察者も報告された。これらの結果は、相対像差に正常な奥行き反応を示す観察者の場合、絶対像差の大きさに関係なく、奥行き弁別と輻輳性眼球運動は必ずしも同一の反応を生まないことを示している。

さらに Shimono et al. (2000) は、2 種類の像差刺激を使った奥行き弁別テストで、3 名の立体視アノマリーを同定し、彼らと立体視が正常な観

察者を使って、パルス状に比較的大きく変化する絶対像差に対する眼球運動と矩形波状に変化する絶対像差に対する眼球運動を測定した (表 1)。像差刺激は比較的小さい相対像差 (27') をもつ RDS と比較的大きな絶対像差 (2°) をもつ刺激 (LED で構成されていた) であった。彼らの観察者のうち、相対像差、絶対像差の両方に奥行きを感じなかった H. T. はパルス状に変化する交差性絶対像差に対しては輻輳運動を、奥行き方向に絶対像差が変化する刺激に対しては輻輳運動も開散運動も示した。つまり、微細立体視が不調な観察者でも輻輳性眼球運動を示したのである。観察者数が少ないので明白な結論を出すのは難しいが、相対像差が検出できない観察者でも奥行き反応と

表1 下野ら (1982), Shimono et al. (2000) で報告された, 立体視アノマリーと正常者の奥行き弁別能力と輻輳性眼球運動

観察者	立体視				輻輳性眼球運動		
	相対網膜像差 (27')		絶対網膜像差 (2°)		絶対網膜像差 (2°)	絶対網膜像差 (2°/s, 0.7°/s)	
	交差性	非交差性	交差性	非交差性	パルス状変化	矩形波状変化	
M. K (正常者)	○	○	○	○	○	○	○
K. S (立体視アノマリー)	○	○	×	○	×	○	○
T. M (立体視アノマリー)	○	○	×	×	×	×	○
H. T* (立体視アノマリー)	×	×	×	×	○	×	○

輻輳性眼球運動反応は必ずしも同一の反応を示していない。これらの結果は、相対像差を処理する立体視機構と絶対像差を処理する輻輳運動機構は、(網膜像差検出の初期の段階である程度の共通した機構があるとしても)、立体視アノマリー研究の初期に考えられたほどは機構を共有していないことを示唆している。

単眼性課題の成績：網膜像差と並んで運動視差(motion parallax)も奥行きの手がかりとしてよく知られている。運動視差とは頭部運動(あるいは対象の運動)に伴って生じた網膜上の相対網膜運動のことであり、単眼性の奥行き手がかりである(Howard & Rogers, 2002; 中溝・斎田, 1990)。一定の条件下において、観察者が頭部運動と同期した網膜像の相対運動を観察すると、その網膜像から奥行きが復元できる。従来の研究から、運動視差と網膜像差がある程度共通の機構で媒介されているが知られている(たとえば, Rogers & Graham, 1982; 氏家, 1995)。この点から考えて、立体視アノマリーが運動視差検出でどのような特性を示すかを調べることは、立体視機構と運動視差機構の交互作用を考える際に重要である。

Thompson and Nawrot (1999) は 10 名の斜視性弱視の観察者(弱視でない眼の視力が 0.5 以上)の立体視力と運動視差刺激に対する奥行き閾値を測定している。彼らの立体視力はランドルト環ステレオテストや Stereo-fly テストで測定され、その中央値は 400" であった。また、ランダム・ドット・パターンを頭部運動と同期させて作りだした運動視差の場合、弱視眼における奥行き閾値の中央値は 400" であった。一方、弱視患者の正常眼の視力と同様の視力をもった正常な観察者の

立体視力の中央値は 20" であった。Thompson and Nawrot (1999) は、網膜像差手がかりを使って測定した奥行き閾値と運動視差手がかりを使って測定したそれが類似したという結果は、両者を処理する機構は共通であるという見解と一致すると議論している。

一方、高山 (1999, 下野 2007 に引用) は、臨床テスト (TNO) で立体視を報告しない弱視、外斜視、内斜視などの眼機能に障害のある立体視アノマリー (4 名) を使って運動視差に対する反応を Thompson and Nawrot (1999) と同様の装置を使って調べた。その結果、立体視アノマリーは正常な観察者と同じような奥行きをもった面を報告した。高山の結果は一見、Thompson and Nawrot (1999) の結果と矛盾するように思える。しかしながら、両者(運動視差と網膜像差)を処理する機構は一部下位機構を共有していると仮定すると、この矛盾は説明できる。

また、van Ee (2003) は、図 3B に示すような網膜像差をもった棒状刺激に運動視差を加えた場合、立体視アノマリーがどの程度の奥行き量を感じるかを測定した。測定法は体積テストと同様である。その結果、立体視アノマリーの程度が高いほど見かけの奥行き量を低く見積もった。彼らは立体視アノマリーの程度を示す指標として、 $-1 \sim 1^\circ$ までの網膜像差の見かけの奥行き量(奥行き/幅比, 2.2 参照)の絶対値の加算平均を使っている。これらの結果は、立体視アノマリーの観察者が運動視差手がかりを使って奥行きを感じるわけではないことを示唆している。ただし van Ee (2003) では、立体視アノマリーは Thompson and Nawrot (1999) や高山 (1999,

下野 2007 に引用) の観察者と違い, 斜視や弱視は報告されておらず, 彼らの立体視アノマリーの指標が独特であるので, 他の結果と同列に議論するのは難しい。

運動視差に関する研究以外でも, 単眼視(運動視)の機能と立体視機構との関連を指摘する研究もある。Reed and Burdett (2002) は, 斜視の観察者の正常眼と斜視眼で, Fine Grain Motion (FGM) 現象における仮現運動量を測定した。彼らの立体視能力は, 40~80' と正常な数値(数")に比べかなり低かった。実験の結果, 正常眼でも斜視眼でも FGM に大きな差はなかったが, その見かけの運動量は観察者の立体視力と相関があり(正常眼, $r=0.4$; 斜視眼 $r=0.7$), 立体視力が低下するとともに増加する傾向があった。彼らはこの結果に基づいて, 単眼で生じる FGM 現象と立体視には共通の機構があると主張している。(FGM とは, 数'程度離れた2点をそれぞれ継次的に提示されるときに生じる仮現運動は, 提示位置が中心窩から周辺視野になるにつれて, 2点間の距離が物理的に同じでも見かけの運動量が増加するという現象である。)

立体視力と単眼視能力の関係はまた, Ho and Giaschi (2007) によっても報告されている。彼らは, RDK の運動方向が検出できる最大の運動距離(Dmax)を, 弱視と斜視の観察者そして正常視力をもつ観察者で測定した。その結果, Dmax は立体視力と有意な相関があった。つまり, 立体視力が低下すると Dmax が増加した。また, 相関は使われた RDK の種類で異なり, 1.5 cycles/deg より低い空間周波数成分をフィルターで除いた RDK に比べ, その成分を残した RDK ではより高かった。彼らはこの結果を微細立体視と荒粗立体視, あるいは1次立体視と2次立体視の文脈で論じている。

3.3 立体視アノマリーの人口比

立体視アノマリーがどの程度の人口比であるかについては, 1970年代から2000年代にかけていくつかが研究が行われている。本論文で議論してきたように, ある観察者を立体視アノマリーと同定するための方法や刺激の提示が研究間で異なる場合があり, 従来報告された立体視アノマリーの人口比には刺激提示法などの個別の要因が影響した

可能性もある。本論文ではどのような要因がアノマリーの分布に影響するかについて議論しつつ, 3D 映像を観察する場合どの程度の人が立体感を楽しめないかについて議論を行う。

網膜像差の種類(相対像差と絶対像差): Richards (1970) は, 交差性あるいは非交差性の相対像差を検出できない, あるいは両者とも検出できない立体視アノマリーは観察者全体の30%であると報告した。一方, Jones (1977) と下野ら(1989) は, 絶対網膜像差を短時間提示し, その結果, 観察者の50%以上が立体視アノマリーであると報告した。彼らの観察者は Richards (1970) と同様の課題を行った。Collewijn and Erkelens (1990) が主張したように, 絶対像差は第一義的には輻輳性眼球運動の手がかりであり, 相対像差と比べ奥行きの手がかりとしては相対的に“弱い”と考えると, 初期の研究で得られた高い立体視アノマリーの頻度もうなずける。

眼球位置の効果: van Ee and Richards (2002) は, ノニウス刺激を使い眼球位置を固定した上で, 相対像差をもつ刺激を提示時間100ミリ秒と2000ミリ秒で提示し, 奥行き量を指標として立体視アノマリーを同定した(2.を参照)。その結果, 立体視アノマリーは提示時間に関係なく奥行き再生が不調であった。また, 立体視アノマリーの頻度は観察者全体の30%であった。この発生頻度は初期の研究(たとえば, Richards, 1971)と一致している。これらの結果から, van Ee and Richards (2002) は立体視アノマリーの分布は刺激の提示時間に依存せず, 立体視アノマリーの存在が少ないと主張する研究ではおそらく, 観察者は眼球位置などの2次の手がかりを使ったのであろう, と主張している。彼らの研究は直接眼球位置の効果を調べた結果ではないが, すでに述べたように, 相対像差が融合できないほど大きい場合には眼球位置によって見かけの奥行きは異なることは知られている(Shimono & Egusa, 2005) ことから考えると彼らの主張は一定の説得力がある。

提示時間の効果: 立体視の理論を考える上では, 輻輳性眼球運動の効果を排除するために刺激を短時間提示することは必要であるが, 観察者にとって奥行き弁別課題が困難になることは容易に予測できる。この点から考えて, “立体視アノマリー”は, 下位機構の問題というよりむしろ, 短時間提

示による観察者の弁別力の低下による、とも考えることができる (Patterson & Fox, 1984; Tam & Stelmach, 1998)。Tam and Stelmach (1998) は、この考えの妥当性を調べるために、ノニウス刺激を凝視刺激として使い、7.5' の交差性あるいは非交差性相対像差をもつ刺激を異なる提示時間 (20-1000 ミリ秒) で提示した。その結果、20 ミリ秒の提示時間では、両眼視力とも正常な観察者のうち約 50% の観察者が奥行きを弁別できなかったが、1000 ミリ秒の提示時間では 5% の観察者が奥行きを弁別できなかった。さらに彼らは、自身の研究も含め、奥行き弁別法を使った 9 つの研究でどの程度の観察者が立体視アノマリーとして分類されたかを提示時間の関数として再プロットした (図 5)。図から明らかなように、立体視アノマリーの割合は刺激提示時間の関数として減少している。

それでは、結局人口の何 % の人が立体視アノマリーなのか。今までの研究によれば、この問いに対する答えは、立体視アノマリーをどのように定義するか、どのような種類の像差刺激を使うか、刺激提示時間をどのように設定するかによる、ということになる。もし輻輳性眼球運動の効果を除き、立体視機構自体の解明を目指すならば、像差刺激は短時間提示されるべきであり、その結果、立体視アノマリーは数 10% となるだろう (たとえば Kooi ら, 2010; Richards, 1970)。しかしながら、刺激提示時間を増やして奥行き弁別能力を測ると立体視アノマリーは数 % (たとえば, Tam & Stelmach, 1998) となるだろう。さらに輻輳性

眼球運動などの眼球運動を許した場合、奥行き弁別が困難な観察者は減るであろうし、運動シーンを含む 3D 映像などを観察する場合はさらに奥行きを観察できない観察者は減ると考えられる。というのは一般に輻輳性眼球運動は奥行きの手がかりとなりうるし (たとえば, Shimono & Egusa, 2005), 運動シーンには運動視差が含まれているからである。先述したように、立体視アノマリーでも運動視差から奥行きを知覚できることがわかっている。

4. 今後の立体視アノマリー研究

立体視アノマリーの研究は、立体視の下位機構を推定することに一定程度の役割を担ってきた。特に網膜像差の符号に関連した下位機構、像差刺激の奥行き運動に関連した下位機構などはその存在を示唆する結果が比較的多い。また、小さい相対像差の検出の不調な立体視アノマリー (多くは弱視や斜視をもつ観察者だった) は、いくつかの両眼性課題で不調を示し、「立体視アノマリーでは両眼性皮質細胞が少ない」という考えも一定程度支持された。その意味で立体視アノマリーについて研究することは、立体視に関連した現象を媒介する機構を調べる有用な方法であった。

しかしながら、ある種の基準を使って特定の網膜像差のみを検出できない観察者を同定できたとしても、そのことが直接立体視の下位機構の存在を証明するわけではない (2. 参照)。この問題がある程度補ってくれる 1 つの方法は、脳画像研究であろう。もし特定のタイプの立体視アノマリーと正常な立体視を有する観察者の間で網膜像差に対する脳の活動反応の程度、あるいは活動の領域が異なれば、すなわち心理物理学的証拠と脳画像研究結果に何らかの対応関係が得られれば、下位機構が存在するという考えを支持することになる。立体視アノマリー研究ではないが、最近、正常な立体視をもつ観察者の脳画像研究によって、どの種類の像差刺激に対してどの皮質領域が特異的に反応するかについては少しずつ明らかにされつつある (Parker, 2007, 表 1 を参照)。たとえば, Preston et al. (2008) は網膜像差に反応する皮質領域を相関 RDS (一般的な RDS のように背景に対して内部の図形が相対像差をもつ刺激) と反相

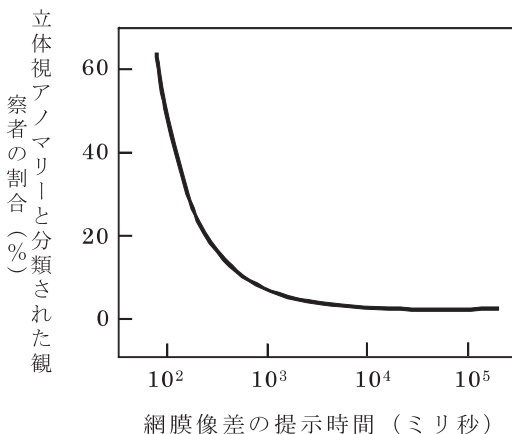


図5 像差刺激の提示時間の関数としての立体視アノマリーの比率 (Tam & Stelmach, 1998 を改変)

関 RDS (相関 RDS の内部の図形, つまり像差刺激を左右眼で入れ替えた刺激) に対する反応を, fMRI (機能的磁気共鳴画像) を使って特定した。その結果, 両 RDS に対する反応は初期視覚野と中間背側視覚野は同じような特性を示したが, 背側領域と高次腹側領域である外側後頭葉 (lateral occipital area) では網膜像差に選択的な反応を示した。また, 背側領域では網膜像差の大きさに対して, 外側後頭葉では網膜像差の種類 (交差性か非交差性) に対して特異的な反応が生じた。言い換えれば, 彼らの研究は像差刺激の網膜像差の大きさと網膜像差の種類は脳の異なる場所で処理されていることを示したことになる。この研究結果は Richards (1971) が報告した特異的な立体視アノマリーの反応 (奥行きを弁別は混乱するが, 見かけの奥行き量は正常に再生できる) を説明できるかもしれない。

また, Jurcoane et al. (2009) は, 弱視を伴う立体視アノマリーと正常な立体視を所有する観察者を使って, 傾き残効を生じる刺激を観察中の脳活動を fMRI で調べた。その結果, 単眼で傾き残効が生じる時には, 両グループで V1 領域と高次視覚野で活発な活動が観察されたが, 両眼間転移を引き起こす条件では, 正常な立体視を所有する群でのみ転移に対応する脳活動が観察された。つまり, 心理物理学的指標と生理学的指標とに対応関係が見られた。このように, 網膜像差への (正常な) 立体視をもつ観察者と立体視アノマリーの皮質反応を比較することにより, 立体視の下位機構や両眼性課題を媒介する機構に関してより精密な議論が可能になるだろう。

立体視下位機構を推論するための方法は立体視アノマリー研究だけではない。マスキング法や選択的順応法 (たとえば, Howard & Rogers, 2002; 林部, 1995, などを参照) などを使うことによっても立体視の下位機構は推論することができる。3. で議論した下位機構は, 立体視が正常な観察者を使って得られた結果から推論されたものとよく一致する。今後の研究の方向の 1 つは, 提案された下位機構の存在を確認するために, 立体視アノマリーと正常な観察者の両者に対してマスキング法や選択的順応法を行い, 提案された下位機構が分離可能であるかについて調べることである。

さらに, 今後の立体視アノマリー研究の方向に

関して, Patterson (2007) は, 立体視アノマリーがホログラフィや立体ディスプレイを観察したときにどのような反応をするかを調べることを提案している。彼の言うように, 立体ディスプレイでは, 他の奥行き手がかり (運動視差, 重なり, 調節など) が網膜像差と同時に提示されるので, 立体視アノマリーも奥行きを感じるができる可能性が高まる。もし立体ディスプレイを使って, それらの奥行き手がかりを組織的に制御できれば, 立体視アノマリーの奥行き感を調べることで, 人間がどのように奥行き手がかりを統合しているかを調べるができるだろう。

謝 辞

本論文の作成にあたり, 草野勉博士研究員 (東京海洋大学), アブストラクトの作成にあたり, Wa James Tam 博士 (CRC Canada) に貴重なご意見を頂いた。ここに記して感謝いたします。また, “立体視アノマリー” は, 1980 年代初頭より 10 年間ほど, 第 2 著者と中溝幸夫教授 (北九州大学), 近藤倫明教授 (北九州大学), 渋谷幸一氏 (故人) と行った研究テーマの 1 つであった。研究のきっかけを頂いた各氏に感謝いたします。

文 献

- Anderson, P., Mitchell, D. E., & Timney, B. (1980). Residual binocular interaction in stereoblind humans. *Vision Research*, 20, 603-611.
- 蘆田 宏 (2006) ガボール視覚刺激と空間定位 *Vision*, 18, 23-27.
- Baker, D. H., Meese, T. S., Mansouri, B., & Hess, R. F. (2007). Binocular summation of contrast remains intact in strabismic amblyopia. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 48, 5332-5338.
- Barry, S. R. (2009). *Fixing my gaze: A scientist's journey into seeing three dimensions*. Massachusetts: Perseus Books Group. 宇丹貴代実 (訳) (2010) 視覚はよみがえる —— 三次元のクオリア 筑摩書房.
- Blake, R., & Cormack, R. H. (1979) Psychophysical evidence for a monocular visual cortex in stereoblind humans. *Science*, 203, 274-275.
- Collewijn, H., & Erkelens, C. J. (1990). Binocular eye movements and the perception of depth. In E. Kowler (Ed.), *Eye movements and their role in visual and cognitive processes* (pp. 213-261). Amsterdam: Elsevier Press.
- Crawford, M. L. J., Harwerth, R. S., Smith, E. L., & Von

- Noorden G. K. (1996). Loss of stereopsis in monkeys following prismatic binocular dissociation during infancy. *Behavioural Brain Research*, 79, 207-218.
- Cumming, B. G., & Parker, A. J. (1999) Binocular neurons in V1 of awake monkeys are selective for absolute, not relative, disparity. *The Journal of Neuroscience*, 19, 5602-5618.
- Ding, J., & Levi, D. M. (2011). Recovery of stereopsis through perceptual learning in human adults with abnormal binocular vision. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United State of America*, 108, E733-E741.
- Foley, J. M., & Richards, W. (1974). Improvement in stereosanomaly with practice. *American Journal of Optometry & Physiological Optics*, 51, 935-938.
- Fredenburg, P., & Harwerth, R. S. (2001). The relative sensitivities of sensory and motor fusion to small disparities, *Vision Research*, 41, 1969-1979.
- Fujikado, T., Hosohata, J., Ohmi, G., & Tano, Y. (1996). A clinical evaluation of stereopsis required to see 3-D images, *Ergonomics*, 39, 1315-1320.
- Goodale, M. A., & Milner, A., D. (2004). *Sight unseen : An exploration of conscious and unconscious vision*. New York : Oxford University Press. 鈴木光太郎・工藤信雄(訳) (2008) もうひとつの視覚—〈見えない視覚〉はどのように発見されたか 新曜社.
- 長谷部聡 (2007) 両眼視の病理と眼科診療, 光学, 36, 32-38.
- 林部敬吉 (1995) 心理学における3次元視研究 酒井書店育英堂.
- 林部敬吉 (2004) 3次元視研究の展開 酒井書店育英堂.
- 林部敬吉 (2011) 3次元視研究の新展開 ブイツーンリューション.
- Herring, R. D., & Bechtoldt, H. P. (1981). Categorical perception of stereoscopic stimuli. *Perception & Psychophysics*, 29, 129-137.
- Hess, R. F., Mansouri, B., & Thompson, B. (2010), A new binocular approach to the treatment of Amblyopia in adults well beyond the critical period of visual development. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 28, 793-802.
- Ho, C. S., & Giaschi, D. E. (2007). Stereopsis-dependent deficits in maximum motion displacement in strabismic and anisometropic amblyopia. *Vision Research*, 47, 2778-2785.
- 本田仁視 (1998) 視覚の謎 症例が明かす〈見るしくみ〉 福村出版.
- Howard, I. P., & Rogers, B. (2002). Depth Perception, vol. II, *Seeing in depth*. Toronto : Porteous.
- 市原 茂 (2010) 5章視覚系の空間周波数特性 S3 群 (脳・知能・人間) 2編 (感覚・知覚・認知の基礎) 知識ベース 知識の泉 電子情報通信学会.
- 石原 忍・鹿野信一 (1991) 小眼科学 改訂22版 金原出版.
- Jones, R. (1977). Anomalies of disparity detection in the human visual system. *Journal of Physiology*, 264, 621-640.
- Julesz, B. (1971). *Foundation of cyclopean perception*. Chicago : University of Chicago Press.
- Jurcoane, A., Choubey, B., Mitsieva, D., Muckli, L., & Sireteanu, R. (2009). Interocular transfer of orientation-specific fMRI adaptation reveals amblyopia-related deficits in humans. *Vision Research*, 49, 1681-1692.
- 金子寛彦 (2007) 両眼立体視の特性とモデル 内川恵二・塩入 論(編) 講座感覚・知覚の科学 視覚II 視覚系の中期・高次機能 (pp.100-124) 朝倉書店.
- Kooi, F. L., Dekker, D., van Ee, R., & Brouwer, A. (2010). Real 3D increases perceived depth over anaglyphs but does not cancel stereo-anomaly. *Displays*, 31, 132-138.
- Lema, S. A., & Blake, R. (1977). Binocular summation in normal and stereoblind humans. *Vision Research*, 17, 691-695.
- Levi, D. M. (2005). Perceptual learning in adults with amblyopia: A reevaluation of critical periods in human vision. *Developmental Psychobiology*, 46, 222-232.
- Levi, D. M., & Li, R. W. (2009). Improving the performance of the amblyopic visual system. *Philosophical Transactions of The Royal Society B*, 364, 399-407.
- 松田隆夫 (1996) 実体鏡視における奥行き感の個人差 基礎心理学研究, 15, 54.
- McColl, S. L., & Mitchell, D. E. (1998). Stereodeficient subjects show differences in interocular transfer of two motion adaptation aftereffects. *Vision Research*, 38, 1889-1900.
- McColl, S. L., Zieger, L., & Hess, R. F. (2000). Stereodeficient subjects demonstrate non-linear stereopsis. *Vision Research*, 40, 1167-1177.
- Mitchell, D. E., & Ware, C. (1974). Interocular transfer of a visual after-effect in normal and stereoblind humans. *Journal of Physiology*, 236, 707-721.
- Movshon, J. A., Chambers, B. E. I., & Blakemore, C. (1972) Interocular transfer in normal humans and those who lack stereopsis. *Perception*, 1, 483-490.
- Mustillo, P. (1985). Binocular mechanisms mediating crossed and uncrossed stereopsis. *Psychological Bulletin*, 97, 187-201.
- 中溝幸夫・斎田真也 (1990) 運動視差——研究史と最近の研究動向 福岡教育大学紀要, 39, 239-264.

- Norcia, A. M., Suiter, E. E., & Tyler, C. W. (1985). Electrophysiological evidence for the existence of coarse and fine disparity mechanisms in human. *Vision Research*, *25*, 1603-1611.
- Ogle, K. N. (1952). On the limits of stereoscopic vision. *Journal of Experimental Psychology*, *44*, 253-259.
- Ono, H., & Barbeito, R. (1985). Utrocular discrimination is not sufficient for utrocular identification. *Vision Research*, *25*, 289-299.
- Parker, A. J. (2007). Binocular depth perception and the cerebral cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, *8*, 379-391.
- Patterson, R. (2007). Human factors of 3-D displays. *Journal of the Society for Information Display*, *15*, 861-871.
- Patterson, R., Cayko, R., Short, G. L., Flanagan, R., Moe, L., Taylor, E., & Day, P. (1995). Temporal integration differences between crossed and uncrossed stereoscopic mechanisms. *Perception & Psychophysics*, *57*, 891-897.
- Patterson, R., & Fox, R. (1984). The effect of testing method on stereoanomaly. *Vision Research*, *24*, 403-408.
- Preston, T. J., Li, S., Kourtzi, Z., & Welchman, A. E. (2008). Multivoxel pattern selectivity for perceptually relevant binocular disparities in the human brain. *The Journal of Neuroscience*, *28*, 11315-11327.
- Read, J. C. A., Phillipson, G. P., Serrano-Pedraza, I., Milner, A. D., & Parker, A. J. (2010). Stereoscopic Vision in the Absence of the Lateral Occipital Cortex. *PLoS One*, *5*, e12608.
- Reed, M. J., & Burdett, F. (2002). Apparent motion processing in strabismic observers with varying levels of stereo vision. *Behavioural Brain Research*, *133*, 383-390.
- Regan, D., Beverley, K. I., & Cynader, M. (1979). Stereoscopic subsystems for position in depth and for motion in depth. *Proceedings of the Royal Society of London. B.*, *204*, 485-501.
- Richards, W. (1970). Stereopsis and stereoblindness. *Experimental Brain Research*, *10*, 380-388.
- Richards, W. (1971). Anomalous stereoscopic depth perception. *Journal of the Optical Society of America*, *61*, 410-414.
- Rogers, B., & Graham M. (1982). Similarities between motion parallax and stereopsis in human depth perception. *Vision Research*, *22*, 261-270.
- Rouse, M. W., Tittle, J. S., & Braunstein, M. L. (1989). Stereoscopic Depth Perception by Static Stereodeficient Observers in Dynamic Displays with Constant and Changing Disparity. *Optometry & Vision Science*, *66*, 355-362.
- Rychkova, S. I., & Ninio, J. (2009). Paradoxical fusion of two images and depth perception with a squinting eye. *Vision Research*, *49*, 530-535.
- Schor, C. M., & Wood, I. (1983). Disparity range for local stereopsis as a function of luminance spatial frequency. *Vision Research*, *23*, 1649-1654.
- 渋田孝一 (1980) 視覚システムにおけるフィルタリングと視覚研究におけるフィルタリング. 哲学年報, *42*, 53-75.
- Shimono, K. (1984). Evidence for the subsystems in stereopsis: fine and coarse stereopsis. *Japanese Psychological Research*, *26*, 168-172.
- 下野孝一 (1988) 両眼単一視と立体視に関する心理学的研究 九州大学博士論文.
- 下野孝一 (2007) 立体視の異常と個人差: ステレオアノマリー研究小史. 光学, *36*, 317-323.
- Shimono, K., & Egusa, H. (2005). Effect of binocular eye position on perceived depth with double images. *Japanese Psychological Research*, *47*, 188-195.
- 下野孝一・江草浩幸・大野 侗 (1997) 両眼単一視: 融合理論と抑制理論の限界 心理学評論, *40*, 414-431.
- 下野孝一・近藤倫明・渋田孝一・中溝幸夫 (1982) 両眼網膜視差にもとづく奥行弁別判断と輻輳反応 心理学研究, *53*, 136-143.
- Shimono, K., Kondo, M., Shibuta, K., & Nakamizo, S. (1983). Hemispheric processing of binocular retinal disparity. *Psychologia*, *26*, 246-251.
- 下野孝一・松尾太加志・中溝幸夫 (1989) ステレオアノマリーの分類——双対尺度法による奥行き弁別反応の分析 福岡教育大学紀要, *38*, 171-180.
- 下野孝一・中溝幸夫・東山篤規 (2000) 距離知覚とバーゼンス 心理学評論, *43*, 335-348.
- Shimono, K., Nakamizo, S., & Kondo, M. (2000). Oculomotor responses of stereoanomalous observers to pulse-and ramp-disparities. *Japanese Psychological Research*, *42*, 91-101.
- Shimono, K., Ono, H., Saida, S., & Mapp, A. (1998). Methodological caveats for monitoring binocular eye position with Nonius stimuli. *Vision Research*, *38*, 591-600.
- Shimono, K., Tam, W. J., Stelmach, L., & Hildreth, E. (2002). Stereoillusory motion concomitant with lateral head movements. *Perception, & Psychophysics*, *64*, 1218-1226.
- Shioiri, S., Hatori, H., Yaguchi, H., & Kubo, S. (1994). Spatial frequency channels for stereoscopic depth. *Optical Review*, *1*, 311-313.
- Sireteanu, R. (1987). Binocular luminance summation in humans with defective binocular vision. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, *28*, 349-

- 355.
- Tam, W. J., Speranza, F., & Vazquez, C. (2012). Problem-driven three-dimensional television research involving human visual perception studies. *Japanese Psychological Research*, 54, 89-104.
- Tam, W. J., & Stelmach, L. B. (1998). Disparity duration and stereoscopic depth discrimination. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 52, 56-61.
- Tanaka, H., & Ohzawa, I. (2006). Neural Basis for Stereopsis from Second-Order Contrast Cues. *The Journal of Neuroscience*, 26, 4370-4382.
- Thompson, A. M., & Nawrot, M. (1999). Abnormal depth perception from motion parallax in amblyopic observers. *Vision Research*, 39, 1407-1413.
- 氏家弘裕 (1995) 立体視：奥行きてがかりとしての両眼網膜像差および運動視差 *Vision*, 7, 9-16.
- van Ee, R. (2003). Correlation between stereomanaly and perceived depth when disparity and motion interact in binocular matching. *Perception*, 32, 67-84.
- van Ee, R., & Richards, W. (2002). A planar and a volumetric test for stereomanaly, *Perception*, 31, 51-64.
- Wheatstone, C. (1838). Contributions to the physiology of vision—Part the first. On some remarkable, and hitherto unobserved, phenomena of binocular vision. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 128, 371-394.
- Wilcox, L. M., & Allison, R. S. (2009). Coarse-fine dichotomies in human stereomanaly. *Vision Research*, 49, 2653-2665.
- Wilcox, L. M., & Hess, R. F. (1997). Scale selection for second-order (non-linear) stereomanaly. *Vision Research*, 37, 2981-2992.
- Yang, Y., & Blake, R. (1991). Spatial frequency tuning of human stereomanaly. *Vision Research*, 31, 1176-1189.

— 2012. 2. 17 受稿, 2012. 7. 9 受理 —