

空間視の発達

山 口 真 美

Development of Infant's Spatial Vision

Masami K. YAMAGUCHI

I reviewed the infant's development of the spatial vision. Human vision system has several depth cues to see the spatial world. Each depth cue developed different time course. Due to the dissociation of the maturity systems between the ventral stream and dorsal stream, some of the visual mechanisms developed earlier. According to this developmental system of the visual brain, some of the depth cues developed earlier. Additionally I reviewed two types of the developmental studies of the spatial vision; the one is the studies of the ecological point of view and the other is the vision studies.

Key words: infant, development, depth cue, spatial vision

目の前にある空間世界を自由に動き回るためには，奥行きのある三次元空間を知覚することが必要だ。空間視の欠損は，日常生活を送る上で大きな障害となる。発達障害であるウィリアムズ症候群（Williams 症候群）の子どもたちには，こうした空間視能力に選択的な障害があると考えられている。

ウィリアムズ症候群とは，染色体異常が原因で2万人に1人の確率で起こる疾病で，その特有な認知能力が注目されている¹⁾。その特徴は，コミュニケーション能力や聴覚機能の高さと空間認識能力の低さのギャップにある。社交的で誰にでも明るく流暢に喋ることができる一方で，空間視能力の低さは顕著で，自分の家の中ですら迷子になることがある。

Atkinson²⁾とBraddickはこのような発達障害が生じる原因を，腹側系（ventral stream）と背側系（dorsal stream）のそれぞれの経路の形成上の問題と位置づけている。すなわち，背側系が腹側系よりも先んじて発達するものの，背側系のほうが壊れやすいというのである。そして現存するさまざまな発達障害の原因は，この背側系の壊れやすさにあると彼らは示唆している。

空間を認識することは，生きていく上で欠くことができないものである。では，いつから空間認識は形成されるのだろうか。

1. 空間知覚の生得性

空間知覚は生存するために必須であることから生得的であるという説と，環境の中で動き回ることによって獲得されるという説，この2つの対立がある。

空間知覚の生得性を調べる実験は，E. Gibson & Walk³⁾によって作られた有名な視覚的断崖（visual cliff）に起源がある。E. Gibsonの自伝⁴⁾によれば，インプリンティングの実験補助をしているときに生まれたばかりのヒツジが柵から落ちないようにする姿を見て，空間視の生得性を思いついたそうだ。

視覚的断崖とは断崖の上に硬質ガラスをはめた，人工的な断崖である。実験では断崖の浅いほうに被験体をのせ，落差の大きい断崖のほうに進むかどうかを調べる（図1参照）。被験体は生後間もないヤギやネズミで，視覚経験の効果を調べるため暗闇の中で育てられた。

実験の結果，視覚経験のない生体でも，断崖を目の前に

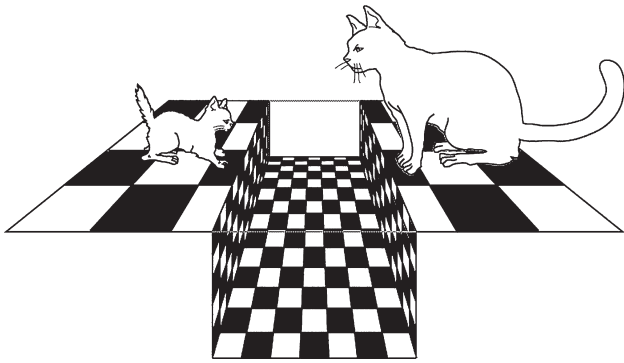


図1 視覚的断崖の実験。

して、渡ろうとしないことがわかった。奥行き知覚には、視覚経験の影響は少ないようである。

一方で視力発達には、視覚経験が必要不可欠であることがさまざまな研究から明らかにされている^{5,6)}。たとえば視力は視覚剝奪されると発達しないことから、視覚経験によって改善されることが知られ⁵⁾、生後6か月をピークに発達することも知られている⁶⁾。こうしたパターン視や物体認識に結びつく視力発達と比べると、空間視は視覚経験が必要ではないようにもみえる。空間視は生きていくことに不可欠であるからこそ、視力とは異なる発達過程を経る可能性が考えられるのである。

ところでこうした動物実験と比べると、ヒトは生まれてすぐには自分で移動できない上に、視覚経験を奪って育てることも倫理上不可能である。そのため、ヒトを対象とした視覚的断崖実験は、ハイハイの生じる生後6か月で検証された³⁾。移動能力に依存した実験では、ヒトの空間視の生得性を知することは不可能なのである。

そこで着目されたのは、Gibsonの弟子であるBowerの発見した防御反応である⁷⁾。Bowerの実験では目の前に迫り来るボールの影を見せ、新生児でも頭をそらして防御する反応があることを見いだした。物体の影を見せることにより、向かってくる風圧などの手がかりを消し、純粋に視覚情報だけから、乳児が近づく物体を知覚できることを示したのである。しかしこの結果に対しYonasら⁸⁾は、目の前に迫り来る物体の影の軌跡を追うことによって自然と首がそれるのであり、ボールを避けるために頭を反らしているわけではないと主張している。そして近づく物体を目の前にした新生児は瞬目反応することから、Yonasら⁸⁾はこれが新生児の防御反応であると主張した。

近づくものに防御反応を起こすというこれらの結果は、新生児でも奥行き知覚が存在することを意味している。とはいえ、新生児が成人と全く同じように奥行き知覚ができているというわけではない。さまざまな研究から、奥行き

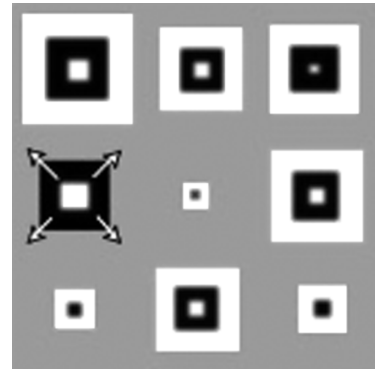


図2 拡大・縮小の実験図。いっせいに大きくなったり、小さくなったりする四角形の中に、1つだけ反対の動きをするものを入れておく。

知覚の手がかりによって発達時期が異なることが知られている。

2. 拡大と縮小、近づくことと遠ざかること

Bowerは新生児でも三次元知覚を有すると主張するが、成人と比べると幼い乳児の視覚能力には限界がある⁹⁾。決定的に異なるのが眼球の制限による視力である。生後6か月までの視力は成人と比べて非常に悪い。したがって、生後6か月以下の乳児に使用可能な奥行き手がかりにも限界があると考えべきなのである。

視力が悪くても使用可能な奥行き手がかりのひとつに、眼に映る大きさの変化がある。近づく物は徐々に拡大して目に映る。網膜像上の大きさの変化は、奥行きを知る情報のひとつである。そしてこれなら、視力が悪くても見える可能性は高い。Shiraiらは、大きさの変化に着目した実験を行った¹⁰⁾。

Shiraiらは、四角形をたくさん並べて拡大あるいは縮小させ、その中に1つだけ反対の動きを入れた。すなわち拡大する動きの中に1つだけ縮小する動きを、あるいは縮小する動きの中で1つだけ拡大する動きを混ぜる。このたった1つの動きに注目できるかを調べた(図2)。成人の場合は逆の動きに注意がいき、さらに、縮小する動きよりも拡大する動きのほうが気づきやすい¹¹⁾。

実験の結果、生後3か月児でも1つの動きの違いに気づき、しかも拡大する動きのほうに気づきやすいことがわかった。生後3か月であれば、視力は悪いながらも成人と同様に、遠ざかる動きに連動する縮小運動よりも、近づく動きに連動する拡大運動を検出しやすいようである。

さらにShiraiらは、光学的流動を用いた拡大・縮小運動知覚の実験を行った¹²⁾。おんぶされたりだっこされたりで移動する場合、視力の弱い乳児でも、中心から外へと流

れるように広がる景色の変化を観察可能と考えられる。

実験では異なるランダムドット運動が左右に2つ並べられた。拡大運動と縮小運動のどちらかを双方に提示し、そのうち一方にだけ加速度をつけ、外に向かうほど加速度を増すよう設定された。加速度があると、接近印象や後退印象が増すことが成人の実験から知られている。乳児にも加速度のある運動を知覚できるかが調べられた。

実験の結果、生後2か月という幼い時期であっても速度の速い条件であれば、加速度のある拡大運動を識別し、生後3か月以降になると、成人と同様に加速度のある拡大運動を識別できることがわかった。生後2～3か月は、視覚脳の発達からすると非常に幼く、皮質が完成される時期にあたる。それでも運動エネルギーが強ければ生後2か月でも接近印象の強い拡大運動を知覚でき、生後3か月以降になれば成人と同じように接近印象のある拡大運動を知覚できることは、接近する拡大運動が重要な情報源であることを示唆するものである。

さらなる立体情報を付け加えた、凸凹図形を拡大・縮小し、乳児の注意を調べる実験を Shirai らは行っている¹³⁾。凸凹図形は後に説明するが、陰影による奥行き手がかりである。

情報は多くなったものの、乳児にとっては刺激そのものが複雑なため知覚できる月齢は高くなり、生後5か月児であれば、拡大する凸図形を好んで見るということがわかった。このような動きには、成人も敏感であり¹⁴⁾、凸図形を拡大させて見せると、接近印象をより強く実感すると考えられている。

これまでの実験成果をまとめると、空間知覚の中では自分に近づく方向の知覚が乳児にとって重要であると推測される。

3. 両眼立体視

両眼立体視は、立体を見るための基本的な手がかりである。ステレオスコープを乳児に着け両眼立体視の発達を調べた実験がある。Bower らは新生児にステレオスコープを装着して反応を調べたところ¹⁵⁾、生後1週でも立体像に手伸ばし反応を示すことを見いだしている。しかし現在では手伸ばし反応はこれほど幼い乳児では出ないとされ、あまりにも早すぎるこの結果には疑問がもたれている。

Braddick ら¹⁶⁾は、ステレオスコープで立体に見えるものと見えないものを見せたときの、乳児の脳波反応 (VEP) を比べている。すると早くも生後2か月、通常は生後3か月以降で、立体に見えるか見えないかで脳波に違いがあらわれるようになることが発見された。つまり両眼視差の成

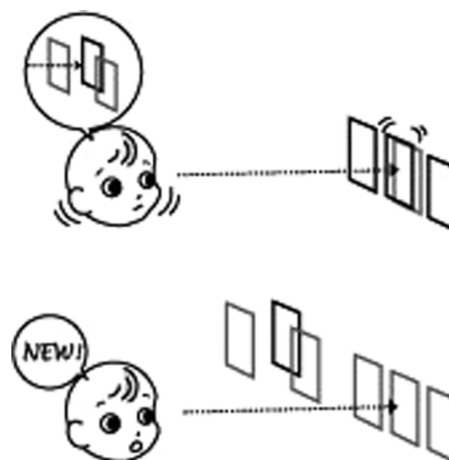


図3 運動視差を調べる実験。

立には発達差もあるが、両眼視差が正確になるのはおおそ生後3～4か月ごろということになる。

4. 運動視差

背側系は腹側系よりも先に発達するということから、動きを見ることの発達はや早い。動きをもとにした奥行き手がかりである「運動視差」も比較的早く発達する。

乳児を対象に「運動視差」の発達を調べる実験を行ったのは Von Hofsten らである¹⁷⁾。実験では同じ大きさと形の3本の棒が動いている映像を見せる。この3本の棒のうち真中の1本だけ、乳児の身体の動きにともなって動くように仕掛けてある。こうすることにより、運動視差から真ん中の棒だけが後ろにあるかのように知覚する (図3)。

乳児は3本の棒の位置関係を学習する。そしてその後、止まっている3本の棒の映像を2種類見せられる。1つは3本が同じ距離にある映像、もう片方は真中の棒だけ後ろにある映像である。このうちどちらが、学習した棒の位置関係と同じとみなされているかが調べられた。

学習した棒は、運動視差の手がかりを利用できなければ、すべて同じ距離にあるように知覚される。もし乳児が運動視差を利用できないとするなら、3本とも同じ距離にあるように見えるはずだ。もちろん、運動視差の手がかりを使えるとするならば、このような知覚は成立しない。その場合、真ん中の棒だけ後ろにあるように見える。

実験の結果、生後3か月の乳児でも運動視差を利用できることがわかった。真ん中の棒だけが後ろにあると知覚していたのだ。生後3か月というのは、奥行きを見るあらゆる手がかりの成立の中でも早い。動きがかかわる視覚は完成が早いようである。



図4 エイムズの窓.

5. 絵画的奥行き手がかり

美術の授業で習った遠近法では、手前にある対象は大きく、遠くにいくほど小さく描く。現実世界で奥行きを見るときにもこうした見方は利用され、絵画的奥行き手がかりと呼ばれる。

絵画的奥行き手がかりを利用して外界にかかわるかどうかについて、Yonas らが実験を行っている¹⁸⁾。図4にある「エイムズの窓」と呼ばれる錯視図形が利用された。片側がつぶれたような窓は、大きい窓枠が実際よりも手前に、小さい窓枠は奥に見えるようにできている。

実験に入る前にYonas らは、乳児は手を伸ばせる距離にあるものに手を伸ばし、さらに遠い物体よりも近い物体に選択的に手を伸ばすことを確認した。その後の実験では片眼にパッチを貼った生後7か月児の目の前に、エイムズの窓を置いた。大小の窓枠は、どちらも乳児からの距離が同じになるようにまっすぐ置く。刺激に両眼視差が使われていないため、片眼のほうが見やすいのである。

すると生後7か月の乳児は、大きな窓枠を積極的に触ろうとした。実験前に乳児がより近い物体に手伸ばしたことから推測すると、乳児はエイムズの窓の錯視に見事にだまされているようである。つまりエイムズの窓は絵画的奥行き手がかりから、大きい窓枠はより近くにあるかのようになっている。大きい窓枠が近いと知覚できたために、乳児は頻繁に手を伸ばしたと推測できるのである。この結果から生後7か月の乳児は、絵画の手がかりに従って奥行きを判断し、絵画の手がかりを利用して空間にかかわる行動を行うと結論づけられた。

ここでYonasの生態学的視点からの奥行き知覚についての主張を紹介しておこう。空間視の発達について考える際には重要な観点である。彼の主張では、奥行き手がかりを知覚するということは、その手がかりを利用して外界に働きかけて初めて知覚できたと結論づけることができると

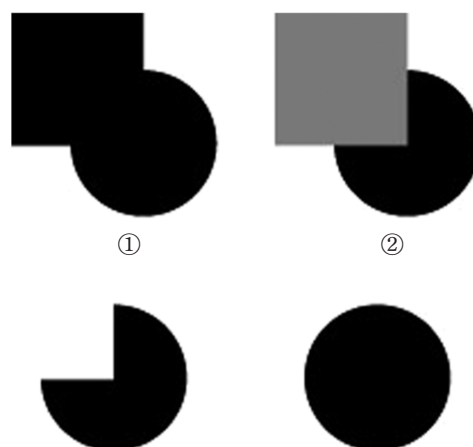


図5 モーダル・アモーダルの実験図.

いう。つまり、被験者が単に「見えた」と主張するだけでは不十分で、「知覚した手がかりを用いて行動する」のを確認する必要があるというのである。この姿勢は、Gibson & Walk の視覚的断崖実験³⁾、Bower⁷⁾とYonas⁸⁾の防御反応の実験に一貫してみられるものである。とはいえ運動発達の遅いヒトの場合、外界に働きかける行動を確認するためには、運動発達を待たねばならない。この実験計画では、知覚成立の確認は運動発達に依存することになる。そして近年の研究成果を鑑みると、知覚は運動よりも先行して生じることが証明されつつあるのだ。

6. 遮蔽からの奥行き

物体同士の前後関係から空間関係を把握することができる。こうした遮蔽からの奥行き知覚の発達は比較的遅い。遮蔽した物体を認識すること自体が乳児には難しいからだ。このような発達メカニズムを解明したのが、Otsuka らの実験である¹⁹⁾。

その発達メカニズムは、モーダル知覚・アモーダル知覚と呼ばれる、2つの知覚機能の発達差から知ることができる。図5①がモーダル知覚で、丸と四角形の輪郭は融合し、融合した「輪郭線」を知覚することによって丸と四角を知覚できる。図5②がアモーダル知覚で、丸が部分的に四角形に隠され、丸を知覚するためには隠れている輪郭を補って見る必要がある。

Otsuka らはこの2つの図を用いて、生後3か月から6か月までの乳児を対象とした実験を行った。モーダル知覚の成立を調べる実験では、図5①を学習させる。そして完全な丸と欠けた丸のどちらを学習した図に見ていたかを調べたのである。アモーダル知覚の成立を調べる実験でも同様に図5②を学習させ、完全な丸と欠けた丸のどちら

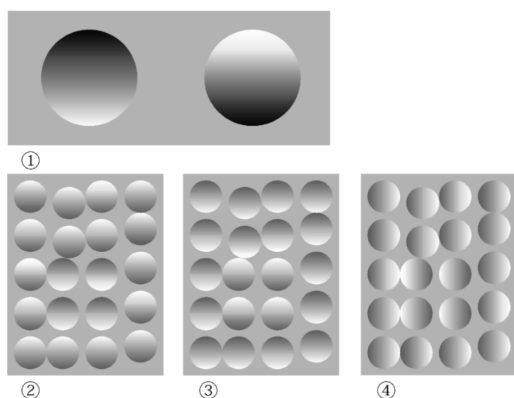


図6 陰影の実験図。

を学習した図に見ていたかを調べた。

実験の結果、モーダル知覚は生後3か月で成立するものの、アモーダル知覚はそれより遅く生後5か月ごろになって成立することがわかった。アモーダル知覚は物体同士の位置関係から空間位置を認識することに関連する。それは図の知覚の中でも遅く成立するのである。

アモーダル知覚とほぼ同時期に成立するのが、運動透明視だ。ドットパターンの動きから2つの平面がずれて動いているように知覚され、奥行きをともなった構造が知覚されるのが運動透明視だ。

Kanazawa らは、ドットを等速度で動かして運動透明視が成立するパターンと、運動透明視が成立しないパターンとを作り、乳児に提示した²⁰⁾。この2つのパターンを識別できるかを調べたのである。実験の結果、成人と同じ条件下で運動透明視が成立するのは、生後5か月ごろだということがわかっている。重なりから空間世界を見るには、発達の的に時間がかかるようである。

7. 陰影からの奥行き表現

陰影からも、立体感を感じることができる。先の拡大・縮小の実験に登場した、凸凹の図(図6 ①)だ。

このような知覚が成立するのは、太陽が常に頭上にある地球環境に生きていることが関係するといわれる。陰影を判断するとき「上方に光源があると、影は下にできる」という地球環境による規則が利用され、立体構造を判断できるというのである。上方光源の図を横にすると凸凹の区別がつかなくなることから、上方からの光源が重要であることがわかる。

こうした知覚は生得的か、あるいは地球環境での経験から学習されるのが問題とされた。そもそも上下の感覚は、起きて生活している状態ではじめて実感できるものである。生まれてから寝てばかりの乳児では上下という実感

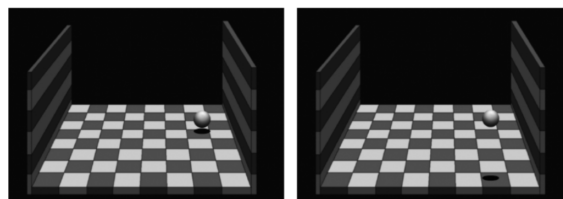


図7 キャストシャドー実験図。

が少ないため、自分で動き回ることができるようになってから成立する可能性がある。

Imura らは、図6 ②～④を乳児に見せて、凸凹への気づきやすさを調べる実験を行った²¹⁾。実験の結果、生後4か月の乳児は成人と同様に上方光源での違いを強く感じ、横にすると違いに気づきにくくなることが判明した。

Yonas らは、陰影手がかりを利用して生態学的に妥当な行動を乳児が示すか調べる実験を行っている²²⁾。陰影手がかりだけでも、乳児は手伸ばし行動を示すかを調べたのである。実験に先立ち、実際にへこんだ物体とでっぱった物体を並べて見せ、より近いと感じるでっぱった物体に乳児が手伸ばし行動をすることを確認した。そこで今度は、陰影手がかりにも同じ手伸ばし反応を示すかを調べた。図6 ①の凸凹図を並べて単眼で見せると、生後7か月の乳児は凸の図に積極的に手を伸ばすことが判明した。陰影情報だけでも、空間にかかわる行動を引き起こす力があることがわかったのである。

物体が落とす影と物体との位置関係からも、空間の構造を知覚できる。図7のように、影の位置が変わるだけで、物体そのものの位置が変わって見える。Imura らの実験から²³⁾、このような知覚は生後6か月の乳児でも可能であることが示された。

三次元の空間世界を見るためには、さまざまな奥行き手がかりがあり、それぞれ発達時期が異なることが示された。中でも動きに関連する手がかりから先に発達すると考えられる。空間視の発達を考える上で重要な問題は、生態学的に妥当な行動を指標に検討する実験と知覚(見えること)の成立を検討する実験の2種があるということである。最近の研究成果からは運動機能よりも知覚(見え)が先行して発達することが示されている。

文 献

- 1) M. Nakamura, Y. Kaneoke, K. Watanabe and R. Kakigi: "Visual information process in Williams syndrome: Intact motion detection accompanied by typical visuospatial dysfunctions," *Eur. J. Neurosci.*, **16** (2002) 1810-1818.

- 2) J. Atkinson: *The Developing Visual Brain*. (Oxford University Press, London, 2002).
- 3) E. J. Gibson and R. D. Walk: "The "visual cliff"." *Scientific American*, **202** (1960) 67-71.
- 4) エレノア・J. ギブソン (佐々木正人・高橋 綾訳): *アフオーダンスの発見—ジェームズ・ギブソンとともに* (岩波書店, 2006).
- 5) 山口真美: *視覚世界の謎に迫る: 脳と視覚の実験心理学* (講談社, 2005).
- 6) 大山 正ほか編: *新版感覚・知覚ハンドブック* (誠信書房, 1994).
- 7) T. G. R. バウアー (岡本夏木編訳): *乳児期—可能性を生きる* (ミネルヴァ書房, 1980).
- 8) A. Yonas, L. Pettersen and J. J. Lockman: "Young infant's sensitivity to optical information for collision," *Can. J. Psychol.*, **33** (1979) 268-276.
- 9) 山口真美: *赤ちゃんは世界をどう見ているのか* (平凡社新書, 2006).
- 10) N. Shirai, S. Kanazawa and M. K. Yamaguchi: "Asymmetry for the perception of expansion/contraction in infancy," *Infant Behav. Dev.*, **27** (2004) 315-322.
- 11) T. Takeuchi: "Visual search of expansion and contraction," *Vision Res.*, **37** (1997) 2083-2090.
- 12) N. Shirai, S. Kanazawa and M. K. Yamaguchi: "Sensitivity to linear-speed-gradient of radial expansion flow in infancy," *Vision Res.*, **44** (2004) 3111-3118.
- 13) N. Shirai and M. K. Yamaguchi: "Perception of shape from shading in infancy," *Jpn. Psychol. Res.*, **47** (2006) 286-291.
- 14) N. Shirai and M. K. Yamaguchi: "Asymmetry in the perception of motion-in-depth," *Vision Res.*, **44** (2004) 1003-1011.
- 15) T. G. R. Bower, J. M. Broughton and M. K. Moore: "Demonstration of intention in the reaching behavior of neonate humans," *Nature*, **228** (1970) 679-681.
- 16) O. J. Braddick, J. Atkinson and J. Wattam-Bell: "VEP testing of cortical binocularity and pattern detection in infancy," *Documental Ophthalmologica Proceedings Series* **45** (1986) pp. 107-115.
- 17) C. Von Hofsten, P. Kellman and J. Putaansuu: "Young infants' sensitivity to motion parallax," *Infant behav. dev.*, **15** (1992) 245-264.
- 18) A. Yonas, W. T. Cleaves and L. Pettersen: "Development of sensitivity to pictorial depth," *Science*, **200** (1978) 77-79.
- 19) Y. Otsuka, S. Kanazawa and M. K. Yamaguchi: "Perceptual transparency in 3- to 4-month-old infants," *Perception*, **35** (2006) 1625-1636.
- 20) S. Kanazawa, N. Shirai, Y. Otsuka and M. K. Yamaguchi: "Perception of motion transparency in 5-month-old infants," *Perception*, **36** (2007) 145-156.
- 21) T. Imura, M. Tomonaga, M. K. Yamaguchi and A. Yagi: "Effects of shading directions on the perception of shape from shading in infants," (submitted).
- 22) C. E. Granrud, A. Yonas and E. A. Opland: "Infants' sensitivity to the depth cue of shading," *Percept. Psychophys.*, **37** (1985) 415-419.
- 23) T. Imura, M. K. Yamaguchi, S. Kanazawa, N. Shirai, Y. Otsuka, M. Tomonaga and A. Yagi: "Perception of motion trajectory of object from the moving cast shadow in infants," *Vision Res.*, **46** (2006) 652-657.

(2007 年 1 月 10 日受理)