

小学生の奥行き知覚発達過程のモデル化

吉井直子[†] 高田雅美[†] 城和貴[†]

本研究では、奥行き知覚に関するモデルを構築する。このモデルの対象は、7歳から11歳の小学生である。モデルを構築するために、エッジ画像、グレースケール画像、カラー画像の2次元画像を用いて実験を行う。実験結果より、男女別に、回帰分析によってモデルを構築する。

Modeling the Developmental Process of Depth Perception of Elementary Students

Naoko Yoshii[†], Masami Takata[†] and Kazuki Joe[†]

In this paper, a model for depth perception is constructed. The target of this model is elementary students from seven to eleven years old. Some experiments using three types of pictures with edge image, gray scale image and color image are performed to construct a model for boys and/or girls with regression analysis.

1. はじめに

認知スタイルとは、身の回りの情報をどのように処理するかという情報処理の様式、すなわち、認知の仕方である[13]。H.A.Witkinの研究では、一般的に男性の方が女性より方向感覚が良いと述べられている[4]。ただし、この研究対象は、大人であり、子供に対する実験は報告されていない。そこで、本研究では、男子と女子の発達の違いを見出すために、7歳から11歳の子供を対象に2次元画像の奥行き知覚について分析を行う。このモデルは、子供の2次元画像の奥行き知覚に関する成長具合を確認する目安として用いることが可能である。

大人と同様の空間認知テストは、子供にとって難しすぎる。そこで、本研究では、独自の認知テストを用意する。この際、エッジ画像、グレースケール画像、カラー画像を用いる。

第2章では、奥行き知覚と子どもの2次元画像の認識について説明する。また、子どもの画像認識の既存研究を概説する。第3章では研究課題を調査するための実験方法を解説する。第4章は本研究における実験結果を提示する。第5章では、得られた実験データから、男女別画像別の奥行き知覚の発達モデルを回帰分析によって構築する。最後に、第6章の結論で確認されたことの要約を提示する。

2. 奥行き知覚と2次元画像の認識

通常、感覚とは、眼などの感覚器官の基本的な機能であり、いわば、生体と環境との最初の接点における機能である。そして知覚とは、感覚的経験の適切な解釈に関わる機能である。この両者の厳密な境界は曖昧である。さらに最近では、学習、記憶、思考など1層高次の精神機能も含めて、認知と総称されることも多い。また空間の3次元性の知覚は、まとめて奥行き知覚と呼ばれ、広義に立体視と呼ばれている[11]。

子どもが画像を読み取る場合、個々の情報を読み取る段階から、個々に情報を結び付けて体系的に読み取る段階へと質的に異なった読み取りに移行する[9]。

Hockらの2段階モデル[7]は、画像記憶に関する発達の違いを説明するとき用いられることが多い。2段階モデルでは、初めに、画像の事物が認識され、現実に一致した事物間の関係が認識されるという「スキーマ（心理的な描写や概念）の表象を形成する段階」と、次に、画像内の詳細な情報を選択し、体制化する処理を行う段階である「スキーマを操作する段階」から構成される。これらはPiagetの発達段階の特徴と一致している[14]。前操作期（2歳から7歳まで）の子どもは、画像のスキーマを表象できるが、スキーマの操作が困難である。頭の中での活動が体系性を持つようにな

[†]奈良女子大学大学院人間文化研究科
Graduate School of Humanities and Sciences, Nara Women's University



図 1 公園の画像



図 2 幼稚園内の屋内画像



図 3 幼稚園内の合成画像



図 4 幼稚園内の屋外画像



図 5 家の室内画像



図 6 大学の屋外画像

るのは、7, 8 歳ごろである。7, 8 歳以降の思考は操作的で可逆的になっていく。以上より、子供の認知発達を分析するためには、既存の空間認知テストではなく、子供専用のテストを用意すべきである。

さらに、子どもの 2 次元画像の認識に関する既存研究は少なく、男子と女子を分けて分析したものは、我々が知る限り存在しない。そこで、奥行き知覚の発達過程について実験を行い、男女別に考察し、奥行き知覚発達過程のモデル化を新たに提案すべきである。

3. 実験方法

3 章では、実験で用いた提示用画像の説明を 3.1 節で行い、実験対象児の詳細を 3.2 節で示す。そして、3.3 節で実験の方法について述べる。

3.1 提示用画像

本実験では、6 枚のオリジナル画像を用意する。この 6 枚のオリジナル画像に対して、それぞれ、カラー画像、グレースケール画像、エッジ画像を作成し、全部で 18 枚の画像を実験で使用する。画像のサイズは、縦 89 mm 横 127 mm とする。

次に選択した 6 枚の画像の詳細について示す。図 1 から図 3 は、公園の画像、幼稚園内の画像、幼稚園内の画像を合成した画像に対して、グレースケールをほどこしたものである。また、図 4 から図 6 は、幼稚園内の屋外画像、家の屋内画像、奈良女子大学記念館の入り口の画像に対して、エッジをほどこしたものである。

3.2 対象児

本実験は、2008 年 11 月に、任意の子供に対して実施されている。この際、7 歳から 11 歳までの子供は 85 人であった。表 1 は、対象児の内訳を表す。

3.3 方法(手続き)

3.1 節で準備した 6 枚の写真に対して、20 種類の質問を作成する。そのため、3 種類の画像があるので、対象児は 60 問答えることになる。画像提示の順序は、エッジ画

像、グレースケール画像、カラー画像とする。

以下、質問と質問の手順の例として、図 7 を用いて説明する。

第 1 に、質問者は対象児にエッジ画像を見せる。質問者は画像の 2 ヶ所を指して、「これ(つかまり棒)とこれ(白い中央の壁)ではどちらが遠くに見えますか?」と質問する。モノの名称を伝えるのではなく、モノを指すことによって、対象児は、遠くにあるモノの名称が言えなくても正し判断することができる。また、対象児が回答する際も、指差しをさせる。正しく指差しできれば正解とする。我々の実験では一対比較法を使用する。また、3 件法を用いるため「わからない」「同じ」という答えは不正解とする。第 2 に、対象児は「これ(つかまり棒)とこれ(木の家)ではどちらが遠くに見えますか?」という質問に答える。第 3 に、「これ(白い左の壁)とこれ(白い中央の壁)ではどちらが遠くに見えますか?」という質問に答える。

エッジ画像の質問は終了したので、グレースケール画像を用いて、エッジ画像と同じ 3 つの質問に答える。次に、同様の手順でカラー画像の質問に答える。

他の画像の質問内容についても、図 6 と類似のものを厳選している。尚、記録は、質問検査記録用紙に書き、補助的に記録メディア(MP3)を使用する。

表 1 対象児

年齢(合計数)	男子	女子
7 歳(18 人)	9 人	9 人
8 歳(18 人)	10 人	8 人
9 歳(17 人)	7 人	10 人
10 歳(19 人)	12 人	7 人
11 歳(13 人)	4 人	9 人



図 7 幼稚園内の屋外画像

4. 実験結果

4章では実験結果を表示し、考察を行う。表2は、実験によって得られた結果の平均正解率である。実験結果から、全ての画像において男子のほうが正解率は高いことが分かる。また、10歳児の正解率が最も高くなっている。特に、エッジ画像は男子と女子の正解率の差が大きい、ということが明らかとなる。

表2より、男子と女子の共通点として、エッジ画像の正解率が低い、カラー画像の正解率が高い、10歳児の正解率が最も高い、7歳から10歳まで、年齢と正解率の間には相関があることが分かる。エッジ画像の正解率は、年齢が高くなっても他の画像ほどのびない。これは、エッジ画像には、奥行き知覚の絵画的手がかりとなる陰影やコントラストがないためであると考えられる。一般的な教育現場で使われているプリント印刷物は、グレースケールである。また、黒板への板書は、エッジ画像である。多くの子供がこれらの画像から図形を読み取りにくいことが分かっている。表2の結果は、このことと一致する。

次に、男子と女子の違いとして、女子の正解率は、9歳から10歳の間で急激に上がる点あげられる。この特徴は、実験の質問2④の結果にも現れている。図10は、質問2④で用いる幼稚園内の屋内画像である。質問2④は、部屋の外にあるテラスの軒先と、部屋の中のガラス戸のどちらが遠くにあるかを問うものである。実験結果は、7歳児カラー画像の正解率は61.11%（男子88.89%、女子33.33%）、8歳児カラー画像

表 2 正解率（平均値）

年齢	エッジ画像		グレースケール画像		カラー画像	
	男子	女子	男子	女子	男子	女子
7	0.7556	0.7278	0.7722	0.7611	0.8111	0.8056
8	0.8100	0.7278	0.8300	0.7611	0.8400	0.8056
9	0.8429	0.7550	0.8286	0.8000	0.8571	0.8100
10	0.8708	0.8214	0.8659	0.8714	0.8792	0.8786
11	0.8125	0.7778	0.8500	0.8444	0.8750	0.8333

部屋の外の軒先 部屋の中のガラス戸



図 8 幼稚園内の屋内画像

の正解率は94.44%（男子100%、女子87.50%）である。つまり、多くの7歳児女子は「部屋の外にあるテラスの軒先の方が、部屋の中のガラス戸より遠く（後ろ）にある」と判断していることになる。この質問に対して、8歳児以降では正解率が非常に高い。これは、既存研究の2段階モデルの説明とも一致している[7]。男子と女子の発達の違いは、この質問2④の正解率からもわかる。

2章で述べたHockらの2段階モデルやPiagetの発達段階の特徴は、男子と女子の両方含めた年齢についての説明である。質問2④は1例にすぎないが、男子と女子の間で発達に違いが見られるならば、分けてモデル化すべきである。

表 3 基本統計量 (男子エッジ画像と女子エッジ画像)

統計量	男子エッジ画像			女子エッジ画像		
	年齢 x	正解率 y	1/x	年齢 x	正解率 y	1/x
n	42	42	42	43	43	43
合計	370.00	34.450	—	386.00	33.200	—
平均	8.8095	0.8202	—	8.9767	0.7721	—
分散	1.7256	0.0106	0.0003109	2.0227	0.0045	0.0003422
標準偏差	1.3136	0.1030	—	1.4222	0.0667	—
共分散	0.0443	—	-0.0006361	0.0249	—	-0.0003518

5. 発達モデルの構築

5章では、得られた実験データから男女別画像別に奥行き知覚の発達モデルを回帰分析によって構築する。尚、モデル構築時に必要となる基本統計量を表3から表5に示す。まず初めに、5.1節で男子エッジ画像において、発達モデルの式を求めた手法を詳しく述べる。また、女子エッジ画像の発達モデルも求める。次に、5.2節では男女別のグレースケール画像における発達モデルを、5.3節では男女別のカラー画像における発達モデルを各々示す。また5.4節で、求めた発達モデルの式について診断を行う。

5.1 エッジ画像における発達モデル

表4から表6を見ると、男子のほうが分散の値は小さい。しかし、9割を超す高い正解率が8歳から10歳の男子には見られた。1章で採り上げたH.A.Witkinの研究[4]では、一般的に男性の方が女性より方向感覚が良い、と述べられている。この既存研究と本実験結果を単純に比較することはできないが、2次元画像の奥行きをよく知覚できる男子がいた、という結果は得られた。

それでは、発達モデルを求めるために、初めに7歳から11歳までの男子(n=42)についての基本統計量を表3に示す。次に最小2乗法を用いて発達モデルを求める。

回帰式を $y = a/x + b$ と定義し、

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 = \sum_{i=1}^n \left\{ y_i - \left(\frac{a}{x} + b \right) \right\}^2 \quad (1)$$

を最小にするような定数 a, b を求める。そのために、上式を定数 a, b について偏微

表 4 基本統計量 (男子グレースケール画像と女子グレースケール画像)

統計量	男子グレースケール画像			女子グレースケール画像		
	年齢 x	正解率 y	1/x	年齢 x	正解率 y	1/x
n	42	42	—	43	43	—
合計	370.00	34.750	—	386.00	35.450	—
平均	8.8095	0.8274	—	8.9767	0.8244	—
分散	1.7256	0.0081	0.0003109	2.0227	0.0047	0.0003422
標準偏差	1.3136	0.0901	—	1.4222	0.0685	—
共分散	0.0397	—	-0.0005513	0.0424	—	-0.0005889

分する。ここで表3より $a = (1/x \text{の共分散}) / (1/x \text{の分散})$, $b = (y \text{の平均}) - a / (x \text{の平均})$ によって求めることができるので

$$y = -2.0460 / x + 1.0578 \quad (2)$$

$$(7 \leq x \leq 11, x : \text{年齢}, y : \text{正解率})$$

が得られる。

次に、同様にして7歳から11歳までの女子(n=43)についての基本統計量を求め表3に示す。そして、最小2乗法を用いて発達モデルを求めると(3)式を得る。

$$y = -1.0281 / x + 0.8896 \quad (3)$$

$$(7 \leq x \leq 11, x : \text{年齢}, y : \text{正解率})$$

5.2 グレースケール画像における発達モデル

初めに基本統計量を表4に示す。先ほどと同様に最小2乗法を用いて回帰式を求め、(4)式に男子の発達モデルを(5)式に女子の発達モデルを示す。

$$y = -1.7732 / x + 1.0333 \quad (4)$$

$$(7 \leq x \leq 11, x : \text{年齢}, y : \text{正解率})$$

$$y = -1.7210 / x + 1.0211 \quad (5)$$

$$(7 \leq x \leq 11, x : \text{年齢}, y : \text{正解率})$$

5.3 カラー画像における発達モデル

同様の手順で基本統計量を表5に示し、最小2乗法を用いて回帰式を求める。そし

表 5 基本統計量 (男子カラー画像と女子カラー画像)

統計量	男子カラー画像			女子カラー画像		
	年齢 x	正解率 y	1/x	年齢 x	正解率 y	1/x
n	42	42	42	43	43	43
合計	370.00	35.550	—	386.00	35.950	—
平均	8.8095	0.8464	—	8.9767	0.8360	—
分散	1.7256	0.0059	0.0003109	2.0227	0.0038	0.0003422
標準偏差	1.3136	0.0767	—	1.4222	0.0613	—
共分散	0.0315	—	-0.0004204	0.0249	—	-0.0002804

て、(6) 式に男子の発達モデルを (7) 式に女子の発達モデルを示す。

$$y = -1.3522/x + 1.0334 \quad (6)$$

($7 \leq x \leq 11$, x : 年齢, y : 正解率)

$$y = -0.8196/x + 0.9297 \quad (7)$$

($7 \leq x \leq 11$, x : 年齢, y : 正解率)

5.4 発達モデルの診断

この項では、発達モデルの (2) 式から (7) 式について、回帰診断を行う。これは、次の 6 つの条件を満たしているかで判断する。

- ①被説明変数と説明変数は線形関係である。
- ②誤差項に自己相関 (系列相関) がない。
- ③誤差項の分散が均一である。
- ④誤差項が正規分布に従っている。
- ⑤各説明変数間に強い相関関係 (多重共線性) が存在しない。
- ⑥データに極端な外れ値がない。

ただし、①について非線形な関係が認められた場合には次のような 2 つの対処方法を用いる。1 つ目は、各変数のデータを適切に変換 (対数変換など) し、データのばらつきを線形にして回帰分析を行う方法である。2 つ目は、非線形なモデルを前提とした回帰分析を行う非線形回帰である[17]。

①についてであるが、構築した (2) 式から (7) 式は線形ではないため非線形回帰

表 6 男子エッジ画像における発達モデル式 (2) についての分散分析結果

要因	偏差平方和	自由度	平均平方	F 値	P 値	判定
回帰変動	0.0547	1	0.0547	5.5975	0.0229	*
誤差変動	0.3906	40	0.0098	—	—	—
全体変動	0.4453	41	—	—	—	—

*:5%有意

を行う。ただし、数学的にかなり複雑になるため詳細については 17) に記されている。①に関しては、統計ソフトを補助的に使用し、総合的な判断を用いることにする。

②と③についてであるが、誤差項に自己相関が発生しているかどうかを診断するために、ダービン・ワトソン統計量 (DW) (Durbin-Watson test statistics) 検定を用いる。

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=2}^n e_i^2} \quad (8)$$

ただし、 e_i は i 番目の残差を表す。統計量 Dw は 2 の値に近いほど自己相関がほとんどない状態を示し、0 の値に近いほど強い系列相関が発生していることを示す。統計量 Dw に対する確率分布を求めることは難しいので、通常は簡便な方法で有意性を評価する。即ち、 $Dw > 1.41$ のとき、有意水準 0.05 で自己相関が存在しない、と判断する。求めた(2)式から(7)式の Dw 統計量は、それぞれ、2.1920, 1.6268, 2.2784, 2.0371, 2.3596, 2.0366 である。ゆえに、②と③に関して、全てのモデル式は条件を満たしていることになる。

④についてであるが、②と③において問題が発生しなかったこと、その場合、調査した文献などでは詳しく診断していないことから省略する。尚、④までいえば、すなわち、誤差項の分布に正規分布を仮定することができれば、この推定量は非常に優れた推定量と判断でき、最小分散不偏推定量と呼ばれる。17)の文献の中で、詳しくは 15)を参照するよう述べているため、我々もこれ以上議論しないことにする。ただし、誤差項の診断という観点において、(2)式から(7)式を総合的に判断すると問題はない。

⑤については、各説明変数の間に強い相関が有る場合、多重共線性が存在すると言われる。我々が用いた説明変数は年齢のみで、説明変数は 1 つしかない。⑤は説明変数が 2 つ以上ある場合に調べればよいため、ここでは採り上げる必要はない。

⑥の外れ値については、外れ値検定 (スミルノフ・グラブス検定 / Smirnov-Grubbs test) を用いる。その結果、全てのモデル式において、有意水準 0.05 と 0.1 で検定を行

表 7 分散分析結果の F 値

	(3) 式	(4) 式	(5) 式	(6) 式	(7) 式
F 値	3.623†	5.476 *	11.288 **	4.281*	2.670

** 有意水準 1%, * 有意水準 5%, † 有意水準 10%

ったが、外れ値は存在していない。

最後に、発達モデル式の分散分析結果を記載する。表 6 は (2) についての分散分析結果である。(2) 式と同様に分散分析を行い、F 値をまとめたものが表 7 である。表 7 より、(3) 式は有意水準 10%、(4) 式と (6) 式は有意水準 5%、(5) 式は有意水準 1% であることから、我々の構築したモデル式は良好であると判断できる。ただし、(7) の F 値=2.670 は、11% 有意 (2.6686) くらいの値である。

以上の結果から、例えば (2) 式の場合は、Dw 統計量が 2.1920 で、誤差項における自己相関がなく、外れ値も存在しない。分散分析の結果からも統計学的に問題のないよいモデルであるとみなすことができる。(3) 式と (7) 式は、分散分析結果からみると (2) 式より精度は落ちるが、問題のないモデルである。また、(4) 式から (6) 式については (2) 式と同様に、よいモデルであるとみなすことができる。

6. 結論

子どもの 2 次元画像の認識に関する既存研究は少なく、男女別に分析したものは、我々が知る限り存在しない。そこで、奥行き知覚の発達過程について実験を行い、男女別画像別に考察し、奥行き知覚発達過程のモデルを構築した。

我々の実験結果から、2 次元画像の奥行き知覚について男子と女子の間には発達の違いがある、ということが明らかとなる。この例としては、全ての画像において男子のほうが正解率は高いこと、そして 9~10 歳の女子の成長が急速なことである。以上より、7 歳から 11 歳の子どもの間では、2 次元画像の奥行き知覚において男子と女子の間に発達の違いがある、と結論すべきである。

次に、構築した男女別画像別の奥行き知覚発達モデル式は、検証結果より比較的良好な式であると判断できる。診断結果を見ると、6 つのモデル式で精度に差が生じている。(2)、(4)、(6) 式は男子のモデル式であり、(3)、(5)、(7) 式は女子のモデル式である。女子の発達は 9 歳頃から急激に伸びるため、個々のデータに注意を払う必要がある。今後は、モデルの改良を試みたい。

謝辞 幼児の奥行き知覚実験にご協力頂いた奈良女子大学付属幼稚園の園児と教員の皆様に心よりお礼申し上げます。森本副園長先生にはご指導を頂き、深く感謝致しております。

参考文献

- 1) Biederman, I: Human image understanding; Recent research and a theory, Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol.32, No.1, pp.29-73 (1985).
- 2) Biederman, I. & Ju, G: Surfaces .edge-based determination of visual recognition, Cognitive Psychology, Vol.20, pp.38 -64 (1988).
- 3) Goodman, G.S.: Picture memory; How the action schema affects retention, Cognitive Psychology, Vol.12, pp.473 -495 (1980).
- 4) H.A.Witkin, D.R.Goodenough: Cognitive styles and origins, International Universities Press (1981).
- 5) Hampson, E. In (A. Matsumoto ed.): Sexual Differentiation of the Brain, CRC Press, Boca Raton, FL, pp.279-300 (2000).
- 6) Hier, D.B., Crowley, W.F: New Engl. J. Med.306, pp.1202 -1205 (1982).
- 7) Hock, H.S., Romanski, L, Galie, A and Williams, C.S: Real-word schemata and scene recognition in adults and children, Memory & Cognition, 6, pp.423-431 (1987).
- 8) Horn 著, NTT ヒューマンインターフェース研究所プロジェクト RTV 訳: ロボットビジョン, pp. 231, pp. 267-294 (1993).
- 9) Kose, G., Beilin, H., and O'Connor, J.M.: Children's comprehension of actions depicted in photographs, Developmental Psychology, Vol.19, pp.636-643 (1983).
- 10) Marr, D. 乾 敏郎, 安藤 広志 訳: ビジョン—視覚の計算理論と脳内表現—, 産業図書 (1987).
- 11) 松田隆夫著: 視知覚, 株式会社培風館, pp.136-167 (2007).
- 12) Nakayama, K. & Shimojo, S: Experiencing and perceiving visual surfaces, Science, Vol.257, pp.1357-1363, (1992).
- 13) 日本教育工学会編: 教育工学事典, 実教出版 pp.371-372 (2000).
- 14) Piaget, J. and Inhelder, B: Memory and intelligence, New York: Basic Books (1963).
- 15) 佐和隆光: 回帰分析, 朝倉書店 (1979).
- 16) Shepard, R.N., & Cooper, L.A: Mental images and their transformation, Cambridge (1982).
- 17) 上藤一郎・森本榮一・常包昌広: 調査と分析のための統計, 丸善株式会社, pp.108-113 (2008).