

---

 総 説
 

---

## 視覚探索における臨界色差について

和氣典二

中京大学心理学部

視覚探索に及ぼす色の効果を吟味した。若年者の場合、視力が低下すると反応時間は長くなる。また、当該刺激と妨害刺激が等輝度であり、それらの色差が大きくなると、反応時間は短縮する。文字を刺激にしても、色差の効果は観察される。その上、色差の小さいところでの反応時間は提示文字数が増えると長くなるが、色差の大きいところでは反応時間は長くならない。このことから、色差の小さいところでは逐次探索、大きいところではポップ・アウトするといえる。当該刺激と妨害刺激との輝度が種々に変化すると、色差の効果は顕著でなくなる。背景の色が変わっても、色差の効果はよく観察される。高齢者になると、反応時間は長くなるが、色差の効果は顕著に観察される。ポップ・アウトするか否かの臨界色差は視力、加齢、視野欠損などによって異なる。それゆえ、臨界色差以上の色組み合わせを表示に使用することが高齢者やロービジョン者にとって必要なことであろう。

(視覚の科学 24: 36-40, 2003)

### 1. 視覚探索とは

視覚探索とは雑多な妨害刺激のなかから目的とする刺激（テスト刺激）を探すことで、一般的には反応時間が測定される。多くの視覚探索の研究では、ポップ・アウトしやすいものとしにくいものに分けられる<sup>1)</sup>。ポップ・アウトとは当該刺激が飛び出して見える感じがすることで、被験者をしてその刺激に引きつける働きをすることをいう。ところで、妨害刺激の数が増大すれば、それにしたがってテスト刺激の反応時間が長くなる場合と、長くならない場合とがある。前者は逐次探索と呼ばれ、個々の刺激を探索するため、反応時間は長くなる。後者は並列探索と呼ばれ、刺激数が増えても、反応時間は一定値を示すままである。この並列探索をポップ・アウトと呼ぶことがある。この分類は探索の仕方の違いあるいは情報処理の違いに帰せられる。例えばある文章の中から特定の文字を探すとき、または周囲の文字と似ている文字を探すときには一文字ずつ探す。これが逐次探索である。ところがその文字に赤線が引いてあれば、すぐにその文字の存在がわかる。これがポップ・アウトの例である。妨害刺激が文字で、その中から字体の異なる文字を探索したり、幾何学的パターンを探索するような課題でも同じ事柄が生

じる。つまり、妨害刺激の数に影響されずに赤線の文字や幾何学的パターンを探索することができる<sup>2,3)</sup>。このような場合には、テスト刺激と妨害刺激との類似性が問題になろう。類似性がほとんどなければテスト刺激を容易に探索できるが、類似性が高ければ探索するのが困難になる。この類似性を数量的に扱うことができるものにテスト刺激と妨害刺激との色差がある。

### 2. 色の探索に及ぼす視力の効果

赤のパッチの中からオレンジのパッチを探す場合と、赤のパッチの中から緑のパッチを探す場合を考えてみよう。前者より後者の方が色の違いが大きいことは経験的に理解できる。この差を数量的にあらわすものがCIEの色差 $L^*u^*v^*$ あるいは $L^*a^*b^*$ である。テスト刺激と妨害刺激との色差が小さい色組み合わせでは両者の弁別が難しくなり、色組み合わせが大きくなると、弁別が容易になる。もし両刺激間の弁別が容易になれば、色の探索は容易になるのであろうか。そこで、色差と反応時間の関係について行われた我々の研究<sup>4)</sup>をみよう。

4行3列に並べられた矩形が刺激として用いられた。その矩形の大きさは $1.15^\circ \times 4.01^\circ$ である。これらの矩形のうち1個が他の矩形と色においてのみ異なる

別刷請求先：466-8666 名古屋市昭和区八事本町101-2 中京大学文学部心理学科 和氣典二  
(2003年9月2日受理)

Reprint requests to: Tenji Wake School of Psychol, Chukyo Univ  
101-2 Yagoto honmachi, Showa-ku, Nagoya 466-8666, Japan  
(Received and accepted September 2, 2003)

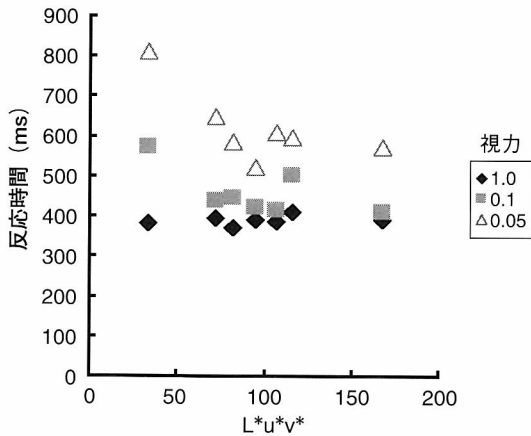


図1 色差に対する反応時間  
緑テスト刺激の場合

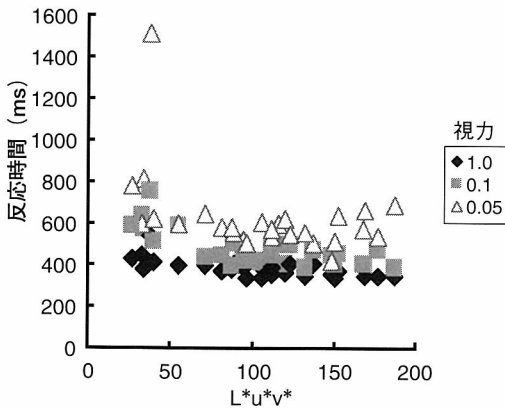


図2 反応時間に及ぼす視力と色差の効果

る。これがテスト刺激であり、他の11個は妨害刺激である。それぞれの矩形は等輝度 ( $50 \text{ cd/m}^2$ ) である。どの条件においても、テスト刺激は色々な部位の矩形にランダムな順序で提示される。テスト刺激は青、緑、黄、赤であり、それらと組み合わせられる妨害刺激は薄紫、紫、濃緑、青緑、ピンク、ブラウン、グレイのいずれかである。各色組み合わせにおける色差は  $L^*u^*v^*$  に基づいて算出された。実験は明室で行われた。被験者は15分間暗順応した後、5分間室内の照度に明順応してから測定が開始された。ディスプレイの周囲の照度は  $520 \text{ lx}$  である。刺激が提示されたとき、被験者は他のものと異なる色をもつテスト刺激を見つけだし、それをタッチする。このことによって、反応時間が求められた。テスト刺激は12個の矩形の位置すべてに提示された。これを1試行と

すると、4試行が繰り返された。被験者は両眼視力が1.0以上(矯正視力を含む)の学生である。彼らの年齢は20~23歳の範囲にあり、色覚は正常である。この研究では、視力1.0以上の被験者が occlusion foil を装着して、1.0, 0.1, 0.05 になるように視力を変えた。

12個の位置において、反応時間に大きな差がないことを確かめた後、反応時間をテスト刺激と妨害刺激との色差に対してプロットした。図1はテスト刺激が緑のときの結果である。それによると、視力が1.0の場合、色差が変わっても反応時間に変化は認められない。これに対して視力が0.1あるいは0.05になると、色差 ( $L^*u^*v^*$ ) が100以下のところでの反応時間は長くなる。黄や赤テスト刺激のときにも同様な結果が得られているが、青刺激の場合には比較的色彩差が大きくなっていったため、色差の効果はあらわれていない。図2は4色のテスト刺激の結果を重ね描きしたものである。それによると、テスト刺激の色と妨害刺激の色との組み合わせがどうであっても、反応時間はその色組み合わせの色差に従って変化する。ただし視力が1.0以上の条件では、色差が大きくなって反応時間は一定値を示すだけであるが、ロービジョンの状態になると、色差の効果は顕著に観察される。1.0以上の視力のときに色差の変化につれて反応時間が変化しなかった理由はこの実験課題がやさしすぎたということであろう。そのため、ロービジョン状態になると刺激の見えやすさが低下し、課題が多少困難になると解釈することができる。事実、和氣の文字刺激と背景とのコントラストを変えた研究によると、コントラストが小さくなると、反応時間が長くなる<sup>5)</sup>。これは見やすさが課題の困難さと関係することを示している。

### 3. 文字刺激のポップ・アウト

色差が大きくなれば、反応時間が短縮するということは多くの研究<sup>6,7)</sup> から指摘されている。それでは、色差の効果と探索時における並列探索や逐次探索といかなる関係にあるのであろうか。一般に並列探索では妨害刺激数の増減にかかわらずテスト刺激の反応時間は一定となるのに対して、逐次探索では妨害刺激数が増すと反応時間は増大する<sup>8)</sup>。そこで和氣は、マトリックス状に配列された漢字(10画)の文字数を変えて、色差の効果を検討した<sup>9)</sup>。文字の大きさは24ポイント ( $0.48^\circ \times 0.48^\circ$ ) であり、これらの文字は

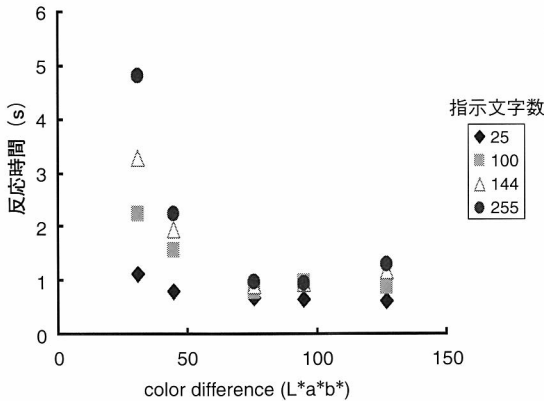


図3 文字刺激のときの色差と反応時間との関係  
刺激文字は「特」である

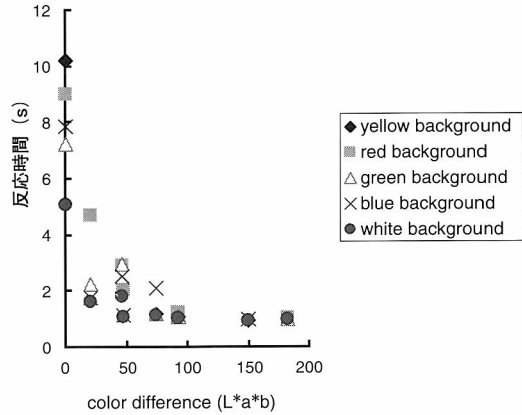


図5 背景色の効果

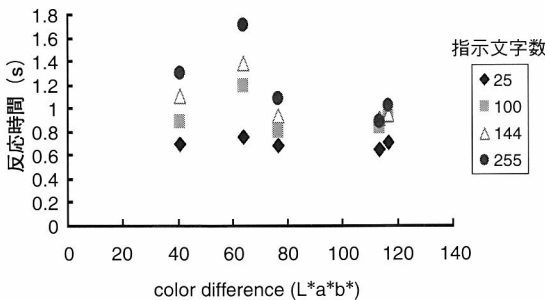


図4 輝度の異なる文字の色差と反応時間との関係

122 cd/m<sup>2</sup>の白背景の上に提示された。テスト刺激と妨害刺激の文字の輝度は12.95 cd/m<sup>2</sup>である。使用された文字数は5×5, 10×10, 12×12, 15×15個である。テスト刺激と妨害刺激は同じ文字であり、色のみが異なっている。

図3によると、どの文字数の場合でも色差が増大すると反応時間は短くなり、L\*a\*b\*色差が76以上になると、反応時間は一定値に達する。しかもこのように色差が大きい場合には、提示文字数が増大しても反応時間は変化しない。だが、色差が小さいところでは、提示文字数の増加とともに反応時間は増大している。同様な知見は別な研究<sup>10,11)</sup>においても支持されている。その研究では、「山」をテスト刺激に「火、木、石、月など」を妨害刺激に、あるいは「豆」をテスト刺激に「兎、乱、車、臣など」を妨害刺激にしている。このようにテスト刺激と妨害刺激とが色と同時に形が異なっている場合でも、色差に対して類似した傾向を示すことは興味がある。いずれにせよ、

この知見に基づけば、色差の小さいところでは逐次探索がなされ、色差が大きくなると並列探索がなされることが考えられる。そうであるなら、大きい色差で、それ以上色差が大きくなっても反応時間に影響を与えなくなる範囲ではポップ・アウト現象が観察されるといえよう。

上記の結果はテスト刺激と妨害刺激とが等輝度のときに見い出された。日常生活では異なる輝度条件のものの中から目的とするものを探すことが多い。図4は輝度の異なる色文字を使用したときの結果である。青の輝度は13 cd/m<sup>2</sup>であり、黄の輝度は102 cd/m<sup>2</sup>である。その範囲内に他の色の輝度がある。これ以外の条件は図3の実験条件と同じである。図4によると、色差の効果は顕著でなくなり、色差が約75のときに反応時間は最も長くなっている。これは刺激の輝度あるいはコントラストが探索時に有効に働き、相対的に色の効果が小さくなるからであろう。いずれにせよ、指示文字数も課題の困難さに影響するのである。

#### 4. 背景色の効果

上記の研究は白背景の上に提示された色文字のときのものである。それでは白背景に文字が提示されても、白背景のときと同じようにテスト刺激と妨害刺激との色差の効果が認められるのであろうか。そこで、棚倉ら<sup>11)</sup>と同じ文字を用いて、テスト刺激と妨害刺激との色の組み合わせを以下のようにした。薄紫—薄紫, 黄緑—黄, 薄紫—紫, 緑—黄, 赤—ピンク, 青—シアン, 赤—緑, 青—黄。色差 (L\*a\*b\*) は0~181.67まで変化している。結果は図5に示さ

れている。白背景のときには、色差が大きくなると反応時間は顕著に短縮している。その傾向は色背景の場合にも認められ、色差が大きくなると反応時間は短くなっている。その上、色背景になっても、白背景の結果とかなり一致する。だが、色差が0、つまりテスト刺激と妨害刺激が同色の場合と、色差が20.63のようにごく小さいときに、赤背景の反応時間は他の背景色のものより長くなるようである。

## 5. 探索非対称

前述のように並列探索の場合、刺激数が増しても反応時間は変わらないが、逐次探索の場合、刺激数が増すと反応時間は長くなる。この知見を文字を刺激にして確かめるために行われた和氣<sup>10)</sup>の結果をみよう。テスト刺激の文字は妨害刺激の文字と異なることは前述した。文字の大きさは30ポイント(0.6°×0.6°)であり、提示された文字数は5×5、10×10、15×15個である。これらの文字は98.88 cd/m<sup>2</sup>の白背景の上に提示される。文字の輝度は35.94 cd/m<sup>2</sup>である。テスト刺激文字と妨害刺激文字との色の組み合わせは青—シアン、緑—黄、赤—ピンク、赤—緑、青—黄である。そのうち、色差の小さい組み合わせは青とシアンであり、色差(L\*a\*b\*)は58.65である。色差の大きい組み合わせは赤と緑の118.05や青と黄の149.34である。いま、色差の小さい青テスト刺激とシアン妨害刺激の場合、文字数が増大すると反応時間は急速に長くなる。だが、逆の組み合わせ、つまり、シアンテスト刺激と青妨害刺激の場合には、文字数が増大しても反応時間はわずかしこ増大しない。同様な結果は赤とピンクの組み合わせでも得られている。これは探索非対称という現象である。探索非対称の存在は、色の探索が色差だけに支配されていないことを示している。

Treismanら<sup>8)</sup>は、緑小円の中から赤小円を探す場合と逆の組み合わせで緑小円を探す場合とでは、刺激数が増えても反応時間はほとんど変わらなかった。それにもかかわらず、赤刺激を探す方が緑刺激を探すより長い反応時間を示している。和氣<sup>10)</sup>の赤と緑の組み合わせの結果では、赤文字を探す場合と緑文字を探す場合とでは、全く差がなかった。Treismanら<sup>8)</sup>の研究と和氣の研究との違いは使用された刺激数の違いにある。そのため、上記の矛盾は刺激数の違いに依存すると考えることができる。この場合、和氣の研究のように一定の領域内に文字が密に並んでい

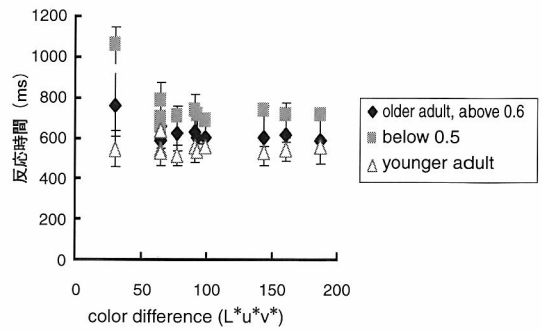


図6 加齢の効果

るような条件では、逐次探索といっても必ずしも1個ずつ探索しているという保障はなく、複数個の文字を同時に探索することもある。すると、課題が困難になるにつれて、より少ない文字を探索することになる。それゆえ、色差が変化すると、刺激数の増大につれて反応時間が短縮するときの勾配が異なることになるのかもしれない。色差が大きいと、課題がやさしくなり、被験者に負荷をかけないため、勾配がほとんどなくなると考えることができる。棚倉ら<sup>11)</sup>は色差によってこの勾配が異なることを示しており、この考えを支持する結果を得ている。

## 6. 加齢と視力の効果

高齢者の視力に関する多くの研究は加齢とともに視力が低下することを示している(例えば市川<sup>12)</sup>)。更に北原<sup>13)</sup>は、この視力の低下の原因を水晶体の濁りに求めている。これらの知見は高齢者のなかには視力の異なる人が多くいることを示している。また、高齢者は黄斑変性など特有の眼疾患にかかりやすい。彼らは視力だけでなく視野にも障害があらわれることがある。ここに問題が2点ある。第1は視力や視野に障害をもつ高齢者が我々の周囲に多くいるということである。すると、彼らが社会参加をするときどのような援助ができるかが大きな問題になる。第2に加齢のメカニズムを知るにはどうしたらよいかである。そのためには、視力や視野が侵されていない被験者を用いて、加齢の効果を知る必要がある。

図1の研究では、視力の効果を若年者を用いた結果を示したが、高齢者ではどうなるであろうか。図6は図1と似た条件であるが、色の組み合わせを減らして高齢者と若年者を比較した結果である。若年者は1.0以上の視力をもつ健常者である。若年者の場



合、図1の1.0以上の視力の結果と同様に色差が大きくなっても、反応時間はほとんど変わらない。ところで、この研究に参加した高齢者の視力は0.3~1.2まで様々であったので、高齢者群を0.5以下の視力と0.6以上の視力に分けてデータを整理した。すると、高齢者は若年者より長い反応時間を示すだけでなく、色差の効果も観察される。更に、0.6以上の視力を有する高齢者群の反応時間より0.5以下の視力をもつ高齢者群の反応時間の方が顕著に長い。

そこで、文字刺激を用いて、白内障のため水晶体除去手術を受けた高齢者と若年者の臨界色差を求めた(棚倉佳代ら:高齢者における並列処理と逐次処理.第38回日本眼光学学会・第16回眼科ME学会総会発表)。両眼視力1.0以上の若年者、白内障術後で両眼視力1.0以上の高齢者、高齢ロービジョン者について検討した。前述のように、テスト文字と妨害文字との色差が小さいときには、妨害文字数が増すと反応時間は増大する。だが、色差が大きいくところでは、妨害文字数が増しても反応時間は増大しない。前者は逐次探索といわれるものであり、後者は並列探索といわれるものである。更に、色差が小さくなると、高齢者の成績は若年者のものより劣ることから、高齢者の色弁別能は若年者より低下していると考えられることができる。そこで、テスト文字と妨害文字との類似性を数量的に表現するため、色差を尺度とし、逐次探索から並列探索に移行するのに必要な最小色差を臨界色差と定義し、それは色差を組織的に変えることによって求めると考えた。その結果は次のように要約される。1)若年者、高齢者(視力1.0以上)ともに色差が増すと、反応時間は臨界色差まで短縮する。だが、色差がそれ以上になっても、反応時間は変化しない。臨界色差( $L^*a^*b^*$ )は若年者で41.02、高齢者で56.95である。2)緑内障や糖尿病網膜症の疾病を有するロービジョン者の場合でも、色差が大きくなると、反応時間は短縮する。3)ロービジョン者の場合、反応時間は各人の保有視力に影響される。眼疾患を有する1.0以上の視力の人と、白内障の手術を受けた視力1.0の高齢者とはほとんど成績に差がない。だが、視力0.8~0.5の眼疾患保有者では、反応時間は長くなり、視力0.3以下になると、更に長くなる。4)緑内障では、色差が小さく視野欠損度が大きいと、反応時間は長くなる。5)若年者の視力を人為的に変えると、視力と反応時間との間には、対数関

係が成立する。

## 7. 最後に

反応時間に影響を与える刺激側の要因としては、色差、文字の大きさ、複雑さ、文字数など種々のものを挙げるができる。また、被験者側の要因としては、視力、視野、加齢、病気の進行状況を挙げるができる。現在我々は、疾病の種類だけでなく、症状の程度を含めて、ロービジョン者の保有する視覚を視力や視野で心理物理学的に表現することができるかどうかを検討している。いずれにせよ、被験者側の負の効果は目標物とその周囲にあるものとの色差をはじめとして形や提示部位など、刺激側を変えることによって補われると考える。また、この種の研究は応用的には高齢者やロービジョン者の生活の質(QOL)を真の意味で高める上で大変役に立つであろう。

## 文 献

- 1) Treisman AM & Gelade JL: A feature integration theory of attention. *Cognit Psychol* 12: 97-136, 1980.
- 2) Schneider W & Schffrin RM: Controlled and automatic human information processing. 1. Detection, search and attention. *Psychol Rev* 84: 1-66, 1977.
- 3) 梶原直樹, 和氣典二, 高橋 博: 視覚探索における文字属性と加齢の効果. *Vision* 13: 149-162, 2001.
- 4) Wake T, Wake H & Kitahara K: The effect of the color differences and the position of target on visual search in low acuity vision. *Proceeding of the Fifteenth Annual Meeting of the International Society for Psychophysics* 384-388, 1999.
- 5) 和氣典二: 高齢者による視覚探索. *日本生理人類学会第39回大会講演集* 71-74, 1998.
- 6) Nagy AL & Sanchez RR: Critical color differences determined with a visual search task. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 7: 1209-1217, 1990.
- 7) Duncan J & Humphreys GW: Visual search and stimulus similarity. *Psychol Rev* 96: 433-458, 1989.
- 8) Treisman AM & Gormican S: Feature analysis in early vision: Evidence from search asymmetries. *Psychol Rev* 95: 15-48, 1988.
- 9) 和氣典二: ロービジョン者の視行動とバリアフリー. *眼鏡学ジャーナル* 6: 3-12, 2002.
- 10) 和氣典二: 高齢者と色彩. *A・F・Tジャーナル* 18: 6-7, 2002.
- 11) 棚倉佳代, 和氣典二: 高齢者における並列処理と逐次処理—色差を変数とした場合—. *日本人間工学会誌第43回大会講演集* 38: 254-255, 2002.
- 12) 市川 宏: 老化と眼の機能. *臨眼* 35: 9-26, 1981.
- 13) 北原健二: 高齢者の視覚機能. *電子情報通信学会誌* 82: 502-505, 1999.

## Mesotest II を用いた薄暮時コントラスト感度の測定

後藤 浩也\*†, 前田直之\*†, 黒田輝仁\*†, 池田欣史\*\*, 林 仁\*\*, 西田幸二\*, 渡辺 仁\*, 不二門 尚\*†, 田野保雄\*

\*大阪大学大学院医学系研究科感覚器外科学講座, †大阪大学大学院医学系研究科感覚機能形成学講座  
\*\*友誼会総合病院眼科

## Contrast Sensitivity in Mesopic Vision Measured with Mesotest II

Hiroya Goto\*†, Naoyuki Maeda\*†, Teruhito Kuroda\*†, Yoshifumi Ikeda\*\*, Hitoshi Hayashi\*\*, Koji Nishida\*, Hitoshi Watanabe\*, Takashi Fujikado\*†, Yasuo Tano\*

\*Department of Ophthalmology and Visual Science, Osaka University Graduate School of Medicine

†Department of Visual Science, Osaka University Graduate School of Medicine

\*\*Department of Ophthalmology, Yukokai General Hospital

---

屈折矯正手術後では、明視時の視力が良好でも夜間の運転困難を訴える症例が存在し、薄暮時の視機能を測定することが重要と考えられる。今回我々は、Oculus社製 Mesotest II を用い、明視時の眼鏡矯正視力が1.0以上の正常眼35眼、屈折矯正術後眼35眼、円錐角膜眼18眼について薄暮時コントラスト感度を測定した。完全矯正眼鏡を装着し、グレア光がある場合とない場合のそれぞれで4段階のコントラストレベルの視標を提示し、認識できた最小のコントラストレベルを薄暮時コントラスト感度とした。その結果、ドイツ眼科学会の推奨する夜間自家用車免許基準を達成できた割合は正常眼で91%、屈折矯正術後で49%、円錐角膜で6%であった。通常の視力検査結果が良好でも薄暮時コントラスト感度が不良な例が存在し、その評価には Mesotest II が有用であると考えられた。(視覚の科学 24: 41-46, 2003)

キーワード：薄暮時コントラスト感度、円錐角膜、屈折矯正手術、運転免許

---

Considering the circumstances that some patients following refractive surgeries complain of difficulties in night driving even if they have clinically acceptable photopic visual acuity, the measurement of visual function in mesopic conditions should be valued more than before. We tested mesopic contrast sensitivity in 35 normal eyes, 35 eyes after refractive surgeries, and 18 keratoconic eyes using Mesotest II (Oculus, Germany). The best spectacles-corrected visual acuity (BSCVA) was 20/20 or better for all eyes. The test was performed with best correcting spectacles under the conditions with and without glare light. We presented four contrast levels of optotypes, and the lowest contrast level that the patient could correctly recognize was recorded as mesopic contrast sensitivity. 91% of normal eyes, 49% of post refractive surgery eyes and 6% of keratoconic eyes fulfilled the critical level according to the German Ophthalmologic Society for driving a car at night. Even when a driver has apparently normal visual function by standard visual acuity test, mesopic contrast sensitivity can be deteriorated, so that Mesotest II is thought to be useful for evaluating the visual function under mesopic condition.

(Jpn J Vis Sci 24: 41-46, 2003)

Key Words: Mesopic contrast sensitivity, Keratoconus, Refractive surgery, Driver's license

---

別刷請求先：565-0871 吹田市山田丘 2-2 大阪大学大学院医学系研究科感覚器外科学講座 後藤浩也  
(2003年3月3日受理)

Reprint requests to: Hiroya Goto Dept of Visual Sci & Ophthalmol, Osaka Univ Graduate School of Med  
2-2 Yamadaoka, Suita 565-0871, Japan  
(Received and accepted March 3, 2003)

## 1. 緒 言

一般的な視力検査は、明視時に高コントラストの文字視標を提示して得られる最小分離閾として測定されている<sup>1)</sup>。この意味では laser in situ keratomileusis (以下 LASIK) をはじめとする屈折矯正手術によって良好な裸眼視力が期待できるようになった。しかし、術後にハローやグレアといった夜間運転困難を訴える例がみられるのも事実である。Hill は LASIK 術後 200 名にアンケート調査を行い、大多数が手術結果に満足しているとはいえ、夜間の視機能については 24% が悪化したと報告している<sup>2)</sup>。

道路交通法施行規則によって定められている日本の運転免許における視力基準は、やはり明視時の高コントラスト視力についてのみであり、薄暮時やグレアによる視機能低下は考慮されていない。1998 年の「道路交通法施行規則の一部改正の政令」によって、高齢者講習はかた運転適性検査が実施されることとなり、その一環として夜間視力計が導入されているが、とくに基準は定められていない。

Oculus 社製 Mesotest II はドイツ眼科学会の基準に従った夜間視力測定装置である<sup>3)</sup>。Mesotest II では薄暮時の文字コントラスト感度を 4 段階で測定することができ、グレア負荷を追加できる。今回我々は、Mesotest II を用いて薄暮視力およびグレア感度を測定し、正常眼、屈折矯正手術後眼および円錐角膜における薄暮時のコントラスト感度について検討した。

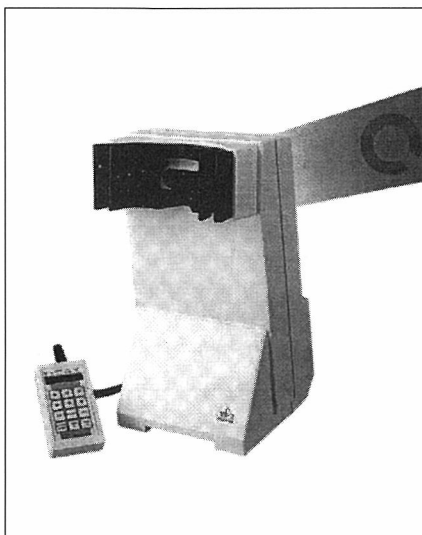


図 1 Mesotest II 外観

## 2. 対象および方法

対象は、40 歳以下で明視時の眼鏡矯正視力が 1.0 以上の 68 例 88 眼である。内訳は屈折異常以外に眼疾患のない正常眼が 35 例 35 眼、屈折矯正術後眼が 20 例 35 眼、軽度の円錐角膜または円錐角膜疑いが 13 例 18 眼である。正常者については左右を無作為に抽出し、1 例につき 1 眼について検討した。円錐角膜は、細隙灯顕微鏡検査および TMS-2N ビデオケラトスコープ (トーマ社製) で診断した。屈折矯正術後眼は photorefractive keratectomy (PRK) 術後が 8 例 12 眼、LASIK 術後が 12 例 23 眼で、術後 3 カ月以上経過しており、点状表層角膜症や上皮下混濁など視機能に影響を与えると考えられる混濁病変などが認められないものに限った。レーザー照射に際し、オプティカルゾーンは全例 6.0 mm で、LASIK でのフラップ径は 8.5 mm で設定された。対象の平均年齢は正常 27.3 ± 7.2 歳、屈折矯正術後 32.0 ± 7.3 歳、円錐角膜 32.1 ± 7.3 歳であった。

オートレフラクトメーターによる他覚的屈折値を参考に、クロスシリンダー法を用いて明室で完全矯正視力を測定した。そして 10 分間以上の暗順応の後、完全矯正眼鏡を装用した上で、Mesotest II を使用して薄暮コントラスト感度およびグレア感度を測定した。

Mesotest II の外観写真を図 1 に示す。Mesotest II は暗室に設置し、視標のコントラスト、ランドルト環の方向や被験眼の変更を行うためのコントローラーの照明が被験者の視界に入らないように留意した。

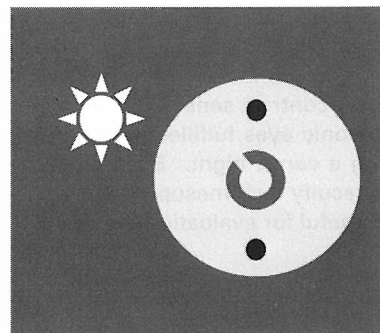


図 2 Mesotest II 内部イメージ  
ランドルト環視標：4 段階のコントラスト  
背景輝度：グレア光がないとき 0.032 cd/m<sup>2</sup>、  
グレア光負荷時 0.1 cd/m<sup>2</sup>  
グレアライト：周辺 3°、10,000 cd/m<sup>2</sup>

Mesotest II 内部のイメージを図2に示す。眼鏡着用したまま覗き込めるプラスチックソフトカバーがあり、覗き込むと内部に5mのバーチャル画像として0.1の大きさに相当するランドルト環が見える。ランドルト環の上下には視標を見失ったときのための赤い固視を点灯することができる。背景輝度は $0.032\text{ cd/m}^2$ で、グレア負荷時には $0.1\text{ cd/m}^2$ である。グレアライトは $10,000\text{ cd/m}^2$ で、左方向から $3^\circ$ の周辺グレア光として負荷される。ランドルト環の大きさは一定であるが、コントラストを変化させることができる。ランドルト環のコントラストは95.7%, 80%, 63%, 50%の4段階である。ランドルト環は8方向のうち左右の2方向を除いた6方向を提示することができる。Mesotest II の視標のイメージを図3に示す。薄暗いなかにならランドルト環が浮かんでいるように見える。コントラストが低下すると、ランドルト環は闇にとけ込んでいくように見える。

測定はグレア光のない場合およびグレア光を負荷した場合の2条件で行った。左眼、次いで右眼の順に測定した。夜間近視を考慮し、装置に内蔵された $-0.5\text{ D}$ ,  $-1.0\text{ D}$ ,  $-1.5\text{ D}$ のレンズを必要に応じて追加した。自覚的に変化のない場合 $-0.5\text{ D}$ のレンズを付加することを原則としたため、全例で $-0.5\text{ D}$ のレンズを追加することとなった。

視標は高コントラストから順次コントラストを低下させて提示した。視標の位置を見失った場合は固視灯を点灯し、被験者がランドルト環の位置を確認したら固視灯は消灯し、同時にランドルト環の方向を変更することで、固視灯との位置関係からランド

ルト環の方向を推測することを防止した。

各コントラストレベルにおいて、6方向のランドルト環のうち3方向以上を正答できた場合、そのコントラストレベルを認識できたものとした。各被験眼について、4段階のコントラストレベルで認識可能であった最もコントラスト感度のよい、すなわち最も低いコントラストレベルを薄暮時文字コントラスト感度として記録した。また、自家用車運転、およびトラック運転のそれぞれでドイツ眼科学会が夜間運転時に必要としているコントラストレベルを確認できたかどうかについても評価した。

### 3. 結 果

グレアなしで測定した薄暮時コントラスト感度における疾患別の各コントラストレベル認識率を図4aに示す。正常眼では最も低コントラスト視標である50%のコントラストにおいても91%で認識できたのに対し、屈折矯正手術後では41%のみが認識可能で、円錐角膜では全例で認識できなかった。同様に、グレア光を負荷した場合の薄暮時のコントラスト感度について図4bに示す。グレア光が負荷されないときと同様に、正常、屈折矯正手術後、円錐角膜の順で認識率が低下していたが、一般的にグレア光のないときと比べて認識率が低下する傾向にあった。図5にはグレアなしおよびグレア負荷時のいずれでも認識できたコントラストレベルを示している。これはグレアの有無で認識できたコントラストレベルが異なる場合、感度の低い方のコントラスト感度を結果としたものである。グレア光を負荷した場合にコントラスト感度が低下したものが多いため、図5における結果は図4bとほぼ同じになっている。

ドイツ眼科学会は夜間運転時にはグレアなしおよびグレア光を負荷したときのいずれにおいても、少なくとも自家用車ではコントラスト80%、トラックでは63%のコントラストレベルを認識できることが必要としている<sup>3)</sup>。すなわち、自家用車の運転についていうと、図5において認識できたコントラストが80%, 63%, 50%のいずれかの群に入っている必要がある。この基準に従うと、夜間運転の自家用免許を取得できるのは正常眼で91%, 屈折矯正術後で49%, 円錐角膜では6%となった。また、トラック免許を取得できるのは正常眼で82%, 屈折矯正術後で40%, 円錐角膜では0%となった。

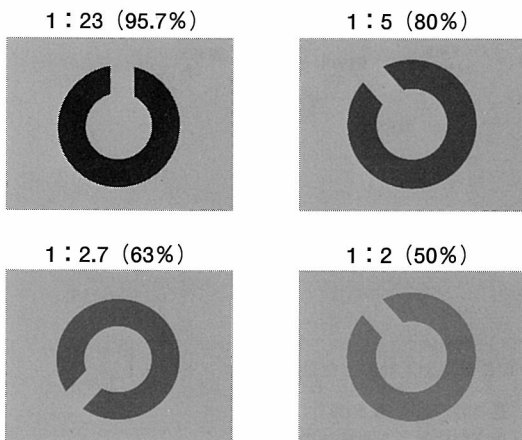


図3 Mesotest II 視標イメージ 同一の背景輝度  
ランドルト環のコントラストが4段階に変化する。

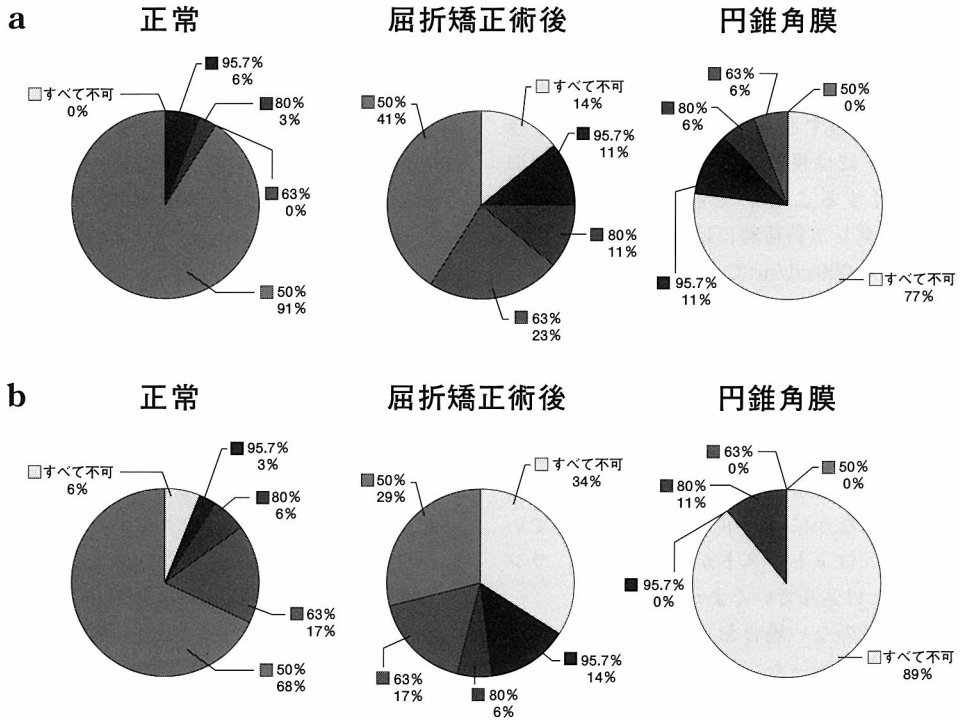


図4 a: グレアなしで認識できたコントラスト  
6方向のランドルト環のうち3方向を正答できた最も低いコントラスト。  
b: グレア光下で認識できたコントラスト  
6方向のランドルト環のうち3方向を正答できた最も低いコントラスト。

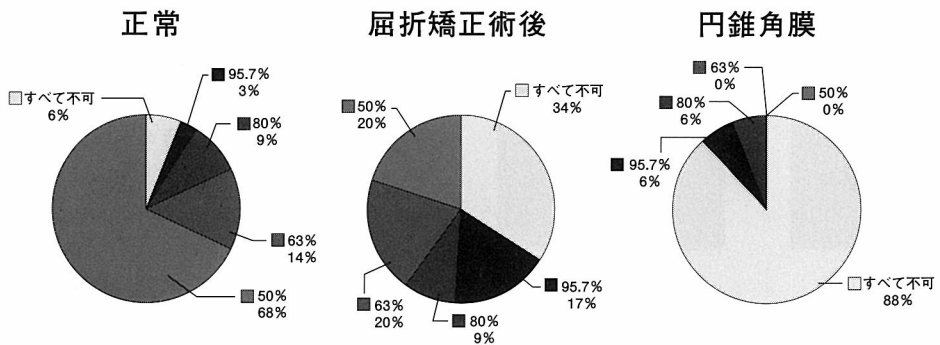
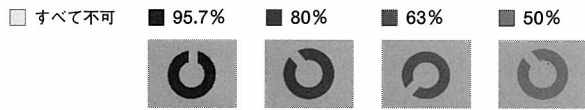
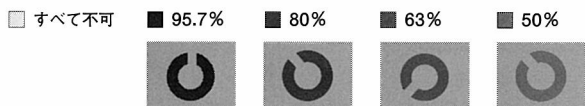


図5 グレアなしでもありでも認識できたコントラスト  
グレアなし、グレアありのいずれでも3方向を正答できた最も低いコントラスト。



#### 4. 考 按

コントラスト感度測定には、縞視標コントラスト感度、低コントラスト視力、文字コントラスト感度などいくつかの測定法がある。コントラスト感度測定により、通常の高コントラストの視力表を用いた視力検査では判別できない微妙な視機能の低下を検出することが可能である<sup>9)</sup>。文字コントラスト感度は、同一の大きさの、種々のコントラストのアルファベットなどを文字視標として用いて、コントラスト感度を測定しようとするものである。佐藤らは屈折矯正術後、円錐角膜などの角膜形状異常症例に対して文字コントラスト感度を測定し、矯正視力が良好でも角膜形状異常眼では文字コントラスト感度が有意に低下したと報告している<sup>9)</sup>。

Mesotest II では、視標の大きさは一定でコントラストのみ変化するので、コントラスト検査としては薄暮時の文字コントラスト感度測定と考えられる。Mesotest II が通常の文字コントラスト感度検査と異なるのは、視標がアルファベットでなくランドルト環であることの他に、これまでのコントラスト感度測定は明室で検査するものであるのに対し、薄暮時の測定であるという点があり、瞳孔径拡大による角膜形状異常由来の不正乱視がより強く影響する可能性がある<sup>9)</sup>。本研究ではこれまでのコントラスト感度測定以上に鋭敏に視機能低下を検出可能と考えられ、また運転免許試験においても採用可能であるMesotest II を選択した。

自動車の安全運転には、明視時のみならず薄暮時においても良好な視機能が必要不可欠であるが、運転免許試験には視機能の客観的評価として明視時視力検査のみが実施されている。道路交通法施行規則第23条においても自動車などの運転に必要な適性についての免許試験が定められており、第1種普通免許については、「視力が両眼で0.7以上、かつ、一眼でそれぞれ0.3以上であることまたは一眼の視力が0.3に満たない者もしくは一眼が見えない者については、他眼の視野が左右150度以上で、視力が0.7以上であること」と規定されている。これらはすべて明視時の視力規定であり、眼鏡やコンタクトレンズ、屈折矯正手術や眼内手術の既往の有無は問われていない。

夜間の交通量増大や高齢者ドライバーの増加に対応して、夜間視力検査が講習などで導入されている

が、ここでの夜間視力とは暗順応と黄昏順応時の視力を指す<sup>7)</sup>。具体的には夜間視力回復時間と、通常の視力測定と同様に大小のランドルト環視標を提示して得られる小数視力で評価している報告がみられる<sup>9)</sup>。ここでいう夜間視力と今回測定した薄暮時視力とは、その意味合いが全く異なるものであることに留意する必要がある。

今回の対象は、通常の視力検査で矯正視力が1.0以上あり、現在の運転免許における視力検査については全例合格となる。しかし、薄暮時のコントラスト感度についてドイツ眼科学会の推奨する基準を適用すれば、正常眼で9%、屈折矯正術後眼で51%、円錐角膜で94%が自家用車免許取得において不合格、トラックの免許に至っては正常眼で18%、屈折矯正術後眼で60%、円錐角膜で全例が不合格となる。

円錐角膜だけでなく、角膜屈折矯正手術後に角膜不正乱視が増加することによってコントラスト感度が低下することが報告されている<sup>9)</sup>が、更に、薄暮時には屈折矯正手術におけるレーザー照射径と瞳孔径との関係が問題となり、更に視機能が低下すると予想される。実際今回の対象においても、屈折矯正術後眼では薄暮時のコントラスト感度は低下していた。

Mesotest II におけるグレアは周辺グレアとして設定されているものの、瞳孔径への影響は無視できないと考えられる。2002年の眼光学学会において、我々は「イリスリコーダ C7364を使用した薄暮時の瞳孔径測定」として、40歳以下の18例26眼（正常眼10例10眼、屈折矯正術後8例16眼）についてMesotest II におけるグレアの有無での瞳孔径の変化を報告した。正常眼において、グレアなしでの瞳孔径は平均5.9mm、グレア負荷で平均4.4mmと有意に縮瞳しており、屈折矯正術後眼でも同様であった。

多くの症例ではグレア光負荷で薄暮時コントラスト感度が低下していたが、屈折矯正術後では改善した症例が散見されており、グレアにより瞳孔径がレーザー照射径よりも縮小し、角膜由来の不正乱視が減少した可能性がある。グレアによる縮瞳と瞳孔径による収差の減少に関しては今後の検討課題としたい。

自動車運転時の視界条件は、天候、時間により大きく変化する。通常の視力検査は明室で高コントラストの視標が用いられるが、実際の視界では対象物の大きさ、明るさ、コントラストは多種多様である。明視時の高コントラスト視力測定は視機能の大まかな目安とはなり得るが、屈折矯正手術の発達をはじめ

めとする眼科医療の急速な進歩および夜間交通量の増加といった現代の交通環境に対応するには、今回の薄暮時視力測定のような更に詳細な視機能評価が必要と考えられる。

Mesotest II を用いた薄暮時のコントラスト感度測定は、通常の視力検査では一見良好な視力にみえても、視機能が正常に比べて低下している可能性のある運転者を判別することが可能であり、適切な指導や免許の部分的制限などを行うことで、交通安全の向上に寄与できる可能性があると考えられた。

#### 文 献

- 1) 西信元嗣：眼光学の基礎．第1版，145-181，金原出版，東京，1990.
- 2) Hill JC: An informal satisfaction survey of 200 patients after laser in situ keratomileusis. J Refract Surg 18: 454-459, 2002.
- 3) Schlote T, Kriegerowski M et al: Mesopic vision in myopia corrected by photorefractive keratectomy, soft contact lenses, and spectacles. J Cataract Refract Surg 23: 718-725, 1997.
- 4) 後藤浩也：コントラスト感度．角膜トポグラフィと波面センサー，211-223，メジカルビュー社，東京，2002.
- 5) 佐藤 茂，前田直之<sup>他</sup>：角膜形状異常症例に対する文字コントラスト感度測定．眼紀51: 930-934, 2000.
- 6) 魚里 博：屈折矯正における眼球光学系と視機能検査．視覚の科学22: 66-84, 2001.
- 7) 所 敬：明るさと視力（夜間視力・グレア視力）．丸尾敏夫編，眼科診療プラクティス57，視力の正しい測り方，63，文光堂，東京，2000.
- 8) 渥美一成，恩田 健<sup>他</sup>：LASIK 術前後の夜間視力．眼臨95: 1136, 2001.
- 9) Tomidokoro A, Soya K et al: Corneal irregular astigmatism and contrast sensitivity after photorefractive keratectomy. Ophthalmology 108: 2209-2212, 2001.



## 伝統的景観を演出する景観照明における印象評価とその因子構造

長山 信一, 中嶋 芳雄\*, 高松 衛\*

国立高岡短期大学産業デザイン学科, \*富山大学工学部

### Studies on the Impression Evaluation and Factor Structure for the Effective Landscape Lighting of Traditional Landscape

Shin-ichi Nagayama, Yoshio Nakashima\* and Mamoru Takamatsu\*

Department of Industrial Design, Takaoka National College,

\*Faculty of Engineering, Toyama University

伝統的景観を演出する景観照明の印象評価とその因子構造を探った。金沢市内の景観をモデルとし、Semantic Differential technique (SD 法) を用いて、6 種類の伝統的景観の昼景と夜景の印象評価データを収集し、因子分析を行った。印象評価の鍵となるコンセプトを明らかにし、その因子構造の解明を試みた。その結果、印象評価の鍵となるコンセプトは寄与度の高い順に『感性』、『個性』、『評価性』であることが判明した。更にライトアップの結果、昼景と比較して夜景の『評価性』尺度の低下傾向がみられたが、情緒性を高度に演出した景観では、『評価性』尺度の低下を防ぎ、評価を高めることが判明した。また、ライトアップ効果を最も発揮したものは、ガス灯による情緒の演出された景観であり、負の評価を招いたものは、蛍光水銀ランプによる演色性の欠如した景観であった。

(視覚の科学 24: 47-53, 2003)

キーワード：伝統的景観, 景観照明, SD 法, 因子分析

In this study, we tried to analyze the impression evaluation and factor structure for the effective landscape lighting of traditional landscapes. We collected impression evaluation data for dayscapes and nightscapes for six kinds of traditional landscapes in Kanazawa as our models, by using the semantic differential technique. We tried to analyze the factor structure and clarify key factors for impression evaluation, by using the factor analysis technique. From the results of factor analysis for traditional landscapes, we identified three basic key factors: "Sensitivity", "Originality" and "Evaluation", in descending order of the factor contribution rate. The nightscape's "Evaluation" factor presented a depreciation in the comparison of day and night. The nightscape which was highly produced by traditional beauty, prevented the "Evaluation" factor's depreciation and raised the nightscape's "Evaluation" factors. Also, we found that the nightscapes produced by gas light brought excellent landscape lighting effects, and that the lack of color rendering properties by mercury fluorescent lamps brought the lowest evaluation.

(Jpn J Vis Sci 24: 47-53, 2003)

Key Words: Traditional landscape, Landscape lighting, Semantic Differential technique, Factor analysis

別刷請求先：933-8588 高岡市二上町180 高岡短期大学産業デザイン学科 長山信一  
(2003年3月31日受理)

Reprint requests to: Shin-ichi Nagayama Dept of Industrial Design, Takaoka National College  
180 Futagami-machi, Takaoka 933-8588, Japan  
(Received and accepted March 31, 2003)

## 1. 緒 言

今日の生活の質の向上を指向する市民ニーズの高まりとともに、文化の香りが高く豊かで潤いある街づくりが求められている。そうした社会の要請に呼応して、全国的な“まちづくり”の一環として、あるいは現代社会のルーツとしての伝統的景観の保存・再生といった活動が活発化し、定着しつつある。また、伝統的景観には精神的な安らぎやノスタルジー、更には現代建築には求め得ぬ、長い年月を経て磨き抜かれた伝統美や格調の高さがあり、地域の歴史や伝統が育んだ文化情報もある。そうした伝統的な文化遺産を景観照明によって目覚めさせ、守りつつ新たな魅力と機能を付加することが求められる。このように、景観照明の果たす役割は一層その重要性を増してきている。

ところで、伝統的景観や景観照明に関連した研究としては岡島ら<sup>1)</sup>、奥谷ら<sup>2)</sup>、中村<sup>3)</sup>、長山ら<sup>4)</sup>の論文が存在する。岡島ら<sup>1)</sup>は「街並のイメージ分析」をテーマとして、日本の伝統的街並における空間特性について述べている。奥谷ら<sup>2)</sup>は景観照明の印象評価について、画像処理によるフラクタル次元の分析を行い、印象評価とフラクタル次元の関連を述べている。また中村<sup>3)</sup>は、ライトアップの印象と輝度分布の結び付きを明らかにし、印象評価の構造を分析している。一方我々<sup>4)</sup>は、都市景観照明の心象評価の定量化に関する研究を行っている。

以上述べたように、一般の都市景観に関しての印象評価について定量化し、分析した研究事例は数例<sup>1-4)</sup>存在するが、伝統的景観を演出する景観照明についての印象評価を分析した研究は見当たらないのが現状である。

そこで本論文では、伝統的景観の代表例の一つとして金沢市内における事例を取り上げ、それらを印象評価し、因子分析した結果について報告する。

## 2. 実験方法

本実験では、伝統的景観が現代社会の生活と融合した景観モデルとして金沢市を取り上げ、Semantic Differential technique (以下 SD 法)<sup>5-10)</sup>を用いて、データの定量化を図った。

景観サンプルは、金沢市の伝統的景観から、景観照明やライトアップが計画的になされ、市民に広く認知されている建造物や街並から6種類選定した。

①長土塀 (土塀に囲まれた武家屋敷跡)、②主計町 (伝統的な町家の街並)、③東茶屋街 (古都の情緒を今に伝える遊郭跡)、④金城楼 (伝統と格調を感じさせる和風割烹料亭)、⑤金沢城石川門 (伝統的な城郭建築の表門)、⑥兼六園ことじ灯籠 (三名園、兼六園のシンボルの灯籠) である。

SD 法用景観サンプルの撮影は、5月中旬の快晴の日に、「昼景」は太陽南中時の前後2時間、点灯「夜景」は日没2時間後から1時間の観測条件下で、景観全体を把握できる観察点より同一アングルで、一眼レフカメラ (Nikon F2) を用いて実施した (図1)。⑥兼六園ことじ灯籠は9月のライトアップ時に同一条件下で撮影した。

SD 法用データシートは、縦軸に既往研究<sup>1-4)</sup>を参考に選んだ評価項目と、基本的評価項目<sup>8)</sup>および景観評価に必要と判断した評価項目の、合計27種類の形容詞対である。それぞれの項目は、7段階尺度で評価される。

実験は暗室で行った。12景観を液晶プロジェクタ (EPSON, LCDPROJECTOR, ELP-5100, 100V, 240W) でスクリーン (高さ1.8m×幅2.4m) へ順不同に投影し、呈示刺激画像とした。記入方法についてはあらかじめ次のような教示を与えた。「印は定められた場所に付ける、付け落としてはならない、1尺度1答であること」である。景観ごとに約1分間観測させた後、印象評価をデータシートに記入させた。全員の記入を確認した後、次の設問に進ませた。被験者応答の集計結果事例を図2に示す。印象評価および因子分析の算定基礎データとした。

被験者は大学生93名、教官と関係者7名の合計100名 (男性30名、女性70名) であり、平均年齢は21.7歳である。眼科的な疾病者は含まれていない。

## 3. 結果および考按

### 1) 因子分析

6景観の昼景および夜景の、12種類のデータに基づき因子分析を行った。解法は主因子法を用いた。Varimax 回転後の因子分析結果を表1に示す。第8因子まで抽出できたが、寄与度が1以上を必要条件と考えた。第3因子までの累積寄与率は88.25%に達し、三因子で十分説明されると判断した。

第1因子は因子負荷量の高い順に「楽しい、軽い、陽気な、活気のある、にぎやかな、刺激的な、面白い、柔らかい、派手な、変化に富んだ、暖かい、開

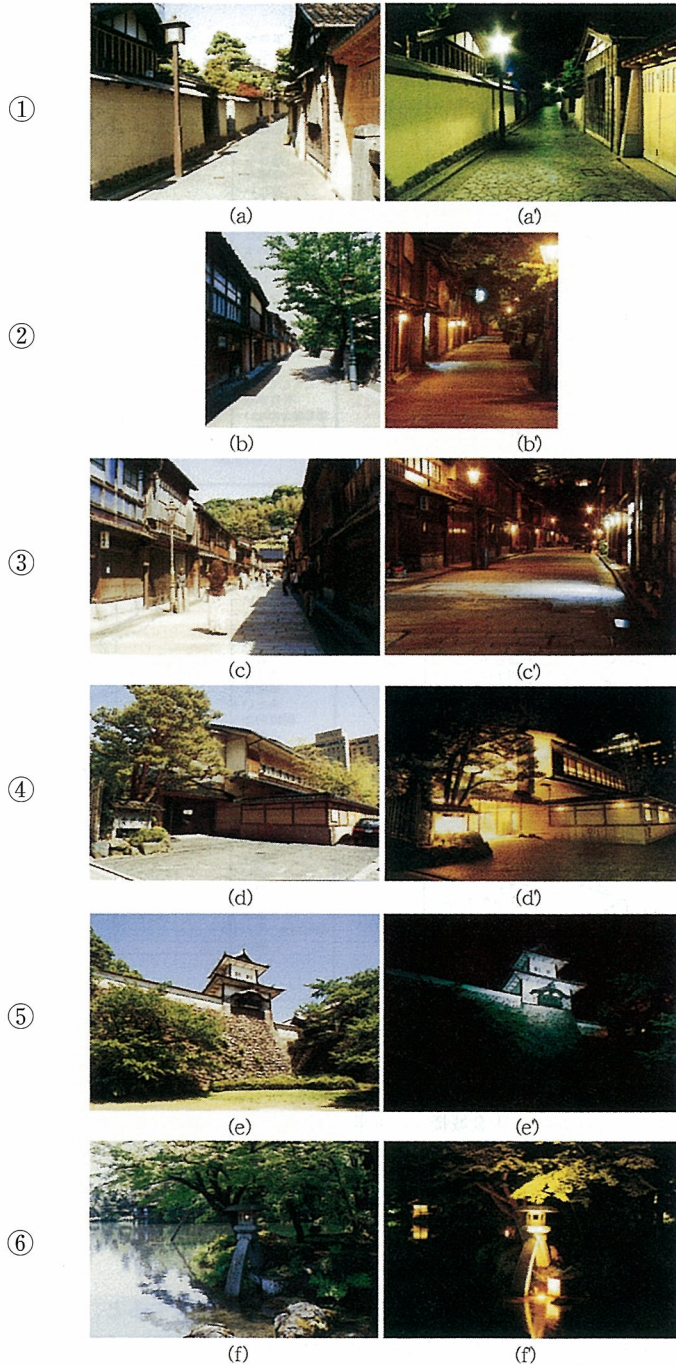


図1 景観サンプル写真

- ①長土堀 : (a) 昼景, (a') 夜景
- ②主計町 : (b) 昼景, (b') 夜景
- ③東茶屋街 : (c) 昼景, (c') 夜景
- ④金城楼 : (d) 昼景, (d') 夜景
- ⑤金沢城石川門 : (e) 昼景, (e') 夜景
- ⑥兼六園ことじ灯籠 : (f) 昼景, (f') 夜景

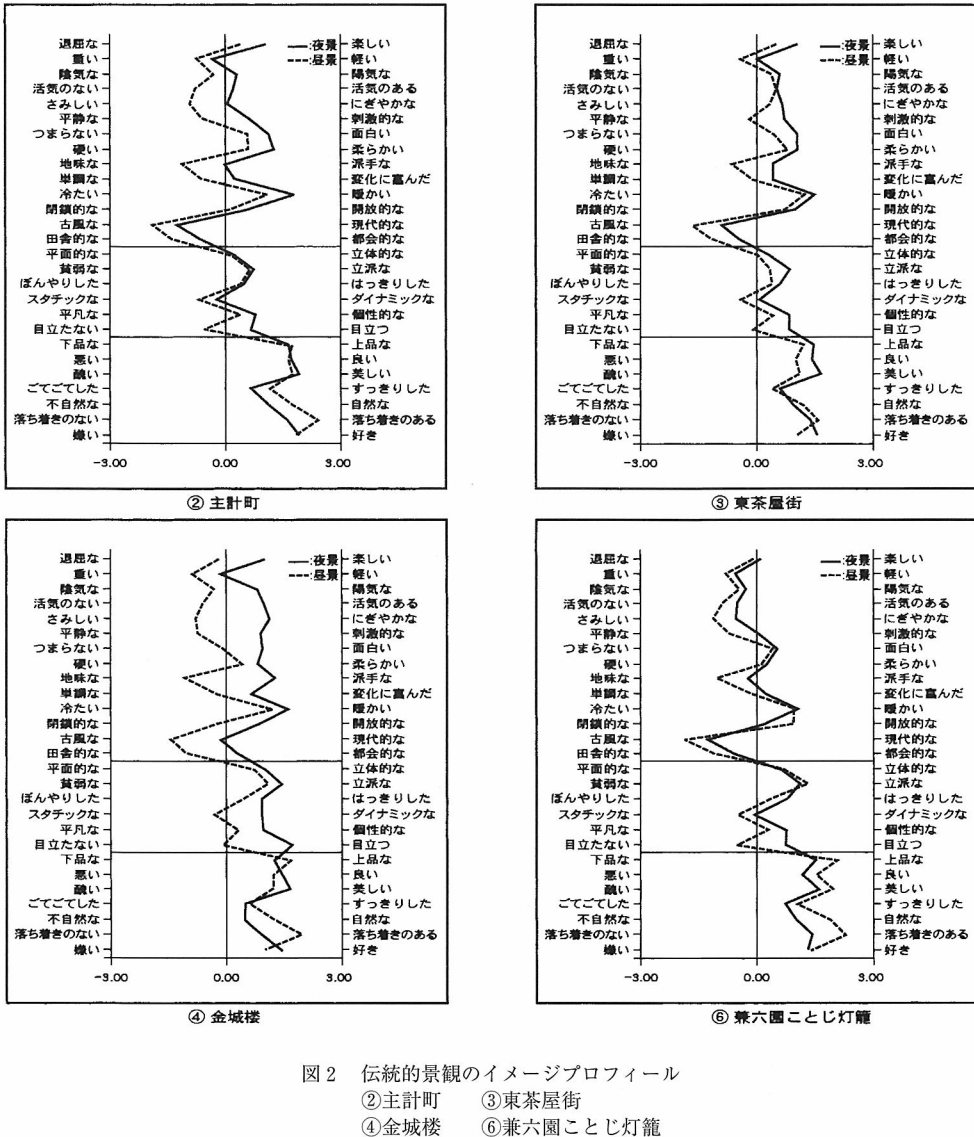


図2 伝統的景観のイメージプロフィール  
 ②主計町 ③東茶屋街  
 ④金城楼 ⑥兼六園ことじ灯籠

放的な、現代的な、都会的な」の14評価尺度で構成され、代表するコンセプトは『感性』。寄与率は39.46%である。

第2因子は「立体的な、立派な、はっきりした、ダイナミックな、個性的な、目立つ」の6評価尺度で構成され、コンセプトは『個性』。寄与率は24.77%である。

第3因子は「上品な、良い、美しい、すっきりした、自然な、落ち着いた」の7評価尺度

で構成され、コンセプトは『評価性』。寄与率は24.02%である。

関連研究と比較すると、岡島らの結論では「伝統的な街並の景観評価は『華-寂』『剛-柔』『整-雑』の3漢字対で説明することができる」とあるが、『華-寂』は本研究の三つのコンセプトの総合に、『剛-柔』は『感性』に、『整-雑』は『評価性』にほぼ該当する。

奥谷ら<sup>2)</sup>は、様々な景観画像の印象評価の結果、『柔らかさ』『目立ちやすさ』『美しさ』の3主要因子

『目立ちやすさ』はおおむね『個性』と一致し、『美しさ』は、ほぼ『評価性』と一致した。

また中村<sup>3)</sup>は、「昼景、点灯夜景の比較をする場合は、『目立ち』『落ち着き』『柔らかさ』の3軸で考えればよい」と述べている。『目立ち』は本研究の『個性』に、『落ち着き』は『評価性』に、『柔らかさ』は『感性』におおむね一致している。ただし、固有値の順序が異なる。本研究の固有値の順序は『感性』『個性』『評価性』であり、その点に伝統的景観の特徴が示されていると考える。

以上のように、主要因子のコンセプトや固有値の順序の適合度合より本研究の妥当性を裏付けるものと考ええる。

## 2) イメージ評価

図2は4種類の伝統的景観事例の印象評価のイメージプロフィールである。縦軸には因子分析結果より、因子負荷量の高い順に、評価尺度の形容詞対を配置した。上から14番目と15番目の間と、20番目と21番目の形容詞対の間に境界線を設け、三因子の境界を示した。因子のコンセプトは上から『感性』『個性』『評価性』である。横軸には下辺に+3~-3までの数直線を配置した。

図2の景観の共通点は“伝統性”である。特徴は『感性』尺度の「重い、暖かい」や時代感覚をあらわす「古風な、田舎的な」の評価が高い。『個性』尺度の「立派な」の評価が高く、『評価性』尺度の「上品な、良い、美しい」も高い。『感性』尺度のプロフィー

表1 因子分析結果 (Varimax 回転後)

評価尺度 (形容詞対)	因子負荷量			共通性 h <sup>2</sup>
	第1因子	第2因子	第3因子	
楽しい-退屈な	0.953	0.010	0.194	0.945
軽い-重い	0.931	-0.042	-0.123	0.884
陽気な-陰気な	0.914	0.113	-0.025	0.848
活気のある-活気のない	0.912	0.177	-0.099	0.873
賑やかな-さみしい	0.911	0.232	-0.140	0.903
刺激的な-平静な	0.885	0.352	-0.172	0.937
面白い-つまらない	0.881	0.132	0.140	0.813
柔らかい-硬い	0.799	-0.395	0.395	0.951
派手な-地味な	0.756	0.606	-0.213	0.984
変化に富んだ-単調な	0.701	0.546	-0.248	0.852
暖かい-冷たい	0.665	-0.144	0.558	0.774
開放的な-閉鎖的な	0.660	0.066	0.443	0.636
現代的な-古風な	0.615	0.488	-0.436	0.807
都会的な-田舎的な	0.608	0.580	-0.314	0.805
立体的な-平面的な	-0.211	0.945	-0.053	0.941
立派な-貧弱な	-0.133	0.943	0.186	0.942
はっきりした-ぼんやりした	0.062	0.872	-0.266	0.836
ダイナミックな-スタティックな	0.330	0.857	-0.369	0.980
個性的な-平凡な	0.348	0.777	-0.263	0.794
目立つ-目立たない	0.546	0.759	-0.328	0.982
上品な-下品な	-0.245	-0.117	0.937	0.951
良い-悪い	0.408	-0.123	0.894	0.981
美しい-醜い	0.340	-0.007	0.877	0.884
すっきりした-ごてごてした	-0.322	-0.119	0.802	0.761
自然な-不自然な	-0.293	-0.500	0.787	0.955
落ち着きのある-落ち着きのない	-0.366	-0.454	0.781	0.950
好き-嫌い	0.485	-0.256	0.745	0.856
寄与度	10.654	6.686	6.486	23.827
寄与率 (%)	39.462	24.765	24.024	88.251
累積寄与率 (%)	39.462	64.227	88.251	



ルは横軸のOptを中心に全景観ともに振れ幅が大きい。『評価性』尺度のプロフィールは全景観ともに正の領域に大きく張り出している。4景観事例のプロフィールは多くの類似点をもっている。

昼景と夜景のスコア差について、最も大きいものは④金城楼であり、次いで②主計町、③東茶屋街の順である。考察すると④金城楼は割烹料亭であり、昼景のイメージプロフィールは他の景観と近似しており差はないが、夜景では、図1より営業上のライトアップを行った結果、イメージプロフィールに顕著な差があらわれている。すなわち、イメージ評価向上の主要な原因はライトアップにあると考えられる。

一方、昼景と比較して夜景の「上品な、すっきりした、自然な、落ち着いたある」の『評価性』尺度に低下傾向があらわれている。ライトアップ方法の問題点とも考えられるが、全景観共通の現象であることが判明した。この現象は中村<sup>3)</sup>の論文でも「むしろ『落ち着いた』に関して評価が下がるのが問題である。暗い背景に対して明るい対象物が浮き上がることや、照明光の色や演色性のために不自然な印象を与えることが影響していると考えられるが、更に考察する必要があると報告されており、その指摘と一致する。

ところで、③東茶屋街の「自然な、落ち着いたある」も多少低下傾向を示しているが、他の『評価性』尺度「上品な、良い、美しい、すっきりした」の夜景の評価が昼景より高く、指摘と異なる要素がある。すなわち、ガス灯で景観の情緒性を高度に演出した場合は『評価性』尺度の低下を防ぎ、むしろ評価を

高めることが判明した。

また、③東茶屋街や④金城楼の夜景のようにイメージプロフィールの大部分がOptより大幅に正の領域にシフトしている事例からは、イメージ評価を向上させるライティングは十分可能であると考えられよう。

### 3) 因子得点と Distant Score

各景観サンプルの因子得点をプロットしたものが図3(1)および(2)である。因子軸を評価尺度として得点の高低が判別できる。昼景は○、夜景は●で示し、実線で結んだものは同一建造物である。矢印は夜景の方向を示し、括弧内の数値は三因子軸による直交座標の昼景と夜景の因子得点間の距離：Distant Score (以下DS)をあらわす。

(1) 第1因子軸と第3因子軸による比較では、第1因子軸『感性』尺度は因子負荷量の最も高い「楽しい-退屈な」であらわし、第3因子軸『評価性』尺度は「上品な-下品な」であらわした。

ライトアップの効果は、昼景と比較した夜景の因子得点座標とDSにあらわれると考えられる。図3(1)より、最もライトアップ効果を発揮しているものは③東茶屋街でDSは6.921。感性軸では「退屈な」から「楽しい」へ+5.1pt変化し、評価性軸では「下品な」から「上品な」へ+3.7pt変化した。理由は、図1よりガス灯が4灯とあり、昔にタイムスリップしたような情緒あふれる景観が演出されたからである。次に、⑥兼六園ことじ灯籠がDS2.958、⑤金沢城石川門がDS2.412の順であった。

一方、ライトアップが最も負の評価を招いたものは①長土堀でDS-7.411。感性軸で「楽しい」から

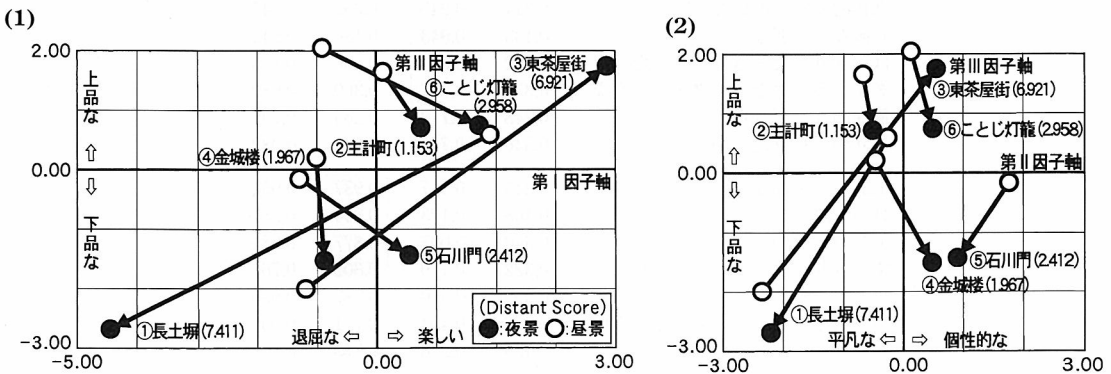


図3 因子得点と Distant Score  
 (1) 第1因子軸と第3因子軸による比較  
 (2) 第2因子軸と第3因子軸による比較

「退屈な」へ-6.3pt変化し、評価性軸で「上品な」から「下品な」へ-3.2pt変化した。理由は図1より、ポール灯に蛍光水銀ランプが使用された結果、主要な景観構成要素である温かい土塀の色調が、夜景では一変して鉛に覆われたような、演色性の欠如した景観となったためである。

(2) 第2因子軸と第3因子軸による比較では、第2因子軸『個性』尺度は「個性的な-平凡な」であらわし、第3因子軸は(1)図同様「上品な-下品な」であらわした。

とくに、ライトアップが効果を発揮した③東茶屋街は、評価性軸で「下品な」から「上品な」へ+3.7pt変化した。一方、ライトアップが負の評価を招いた①長土塀は、評価性軸で「上品な」から「下品な」へ-3.2pt変化した。

#### 4. む す び

伝統的景観として金沢市を取り上げ、SD法を用いて印象評価し、因子分析した結果について報告する。

1. 伝統的景観を演出する景観照明の印象評価を構成する主要因子のコンセプトは、固有値の高い順に『感性』・『個性』・『評価性』の三因子であることが判明した。
2. ライトアップの結果、昼景と比較して夜景の『評価性』尺度「上品な、はっきりした、自然な、落ち着いたある」の低下があらわれたが、情緒性を高度に演出した景観では『評価性』尺度の低下を防ぎ、評価を高めることが判明した。

3. ライトアップ効果を最も発揮したものは、ガス灯による情緒性を演出した景観であり、負の評価を招いたものは蛍光水銀ランプによる演色性の欠如した景観であった。

本研究結果が伝統的景観の再生・保存を取り入れた「まちづくり」や、地域の活性化およびイメージアップに対する一助となれば、我々の幸いとするところである。

#### 文 献

- 1) 岡島達雄, 渡辺勝彦: 街並みのイメージ分析-日本の伝統的街並みにおける空間特性(その1). 日本建築学会計画系論文報告集 379: 123-128, 1987.
- 2) 奥谷 明, 多田裕一, 山口就平, 梶見和孝: 景観照明の印象評価とフラクタル次元について. 神戸大学発達科学部研究紀要 7: 123-135, 1999.
- 3) 中村芳樹: 都市景観照明の印象評価. 照学誌 74: 143-149, 2000.
- 4) 長山信一, 中嶋芳雄, 高松 衛: 都市景観照明の評価に対する定量化に関する研究. 視覚の科学 23: 32-37, 2002.
- 5) 岩下豊彦: SD法によるイメージの測定-その理解と実施の手引き. 1-63, 川島書店, 東京, 1996.
- 6) Osgood CE: Semantic differential technique in the comparative study of cultures. American Anthropologist 66: 171-200, 1964.
- 7) Osgood CE: Studies on the generality of affective meaning systems. Am Psychol 17: 10-28, 1964.
- 8) 石井一郎, 元田良孝: 景観工学. 48-65, 鹿島出版会, 東京, 1990.
- 9) 富田忠道, 栗田正一, 川上元郎: Semantic differential法による照明効果測定. 色学誌 16: 11-23, 1969.
- 10) 杉浦芳夫, 加藤近之: SD法による都市公園のイメージ分析. 総合都市研究 46: 53-79, 1992.



原 著

## 運動視における色情報の役割とメカニズム

— モデルによる一考察 —

吉澤達也<sup>\*、†、††</sup>, Kathy T Mullen<sup>†</sup>, Curtis L Baker Jr<sup>†</sup>,Michael J Hawken<sup>††</sup>, 河原哲夫<sup>\*</sup><sup>\*</sup>金沢工業大学人間情報システム研究所, <sup>†</sup>McGill Vision Research, Department of Ophthalmology, McGill University,<sup>††</sup>Center for Neural Science, New York University

## Contribution of Chromatic Information on Motion Perception and Models of Its Mechanism

Tatsuya Yoshizawa<sup>\*、†、††</sup>, Kathy T Mullen<sup>†</sup>, Curtis L Baker Jr<sup>†</sup>,Michael J Hawken<sup>††</sup> and Tetsuo Kawahara<sup>\*</sup><sup>\*</sup>Human Information System Laboratory, Kanazawa Institute of Technology<sup>†</sup>McGill Vision Research, Department of Ophthalmology, McGill University,<sup>††</sup>Center for Neural Science, New York University

輝度情報処理過程と色情報処理過程の独立性に関する電気生理学的、心理物理学的研究は古くから行われている。輝度情報処理過程を経て運動知覚が生成されることから、運動視に色情報はほとんど寄与していないとする知見が多数報告されてきた。近年、色情報が運動視に寄与していることを示す知見が報告され、そのメカニズムを解明するための研究が系統的に行われている。しかし、それらの先行知見は色運動知覚の基礎的な実験結果の集積を目的とするものがほとんどである。そこで本稿では、色運動メカニズムのモデルを提案し、その有効性を先行知見で報告されている実験結果をもとに検討する。 (視覚の科学 24: 54-59, 2003)

キーワード：色運動メカニズム, 運動知覚, 色情報, 輝度情報, クロストーク

A number of studies on parallel processing of luminance and chromatic information have been done in primate physiology and psychophysics. Since many of them have indicated that motion perception is mediated by a luminance channel, it has been considered that chromatic information does not contribute, as a key role, to produce motion signals. Recent works have however suggested that chromatic information does contribute to motion perception in some ways. Here we propose models to understand the chromatic motion mechanism on the basis of these works. (Jpn J Vis Sci 24: 54-59, 2003)

Key Words: Chromatic motion mechanism, Motion perception, Chromatic signal, Luminance signal, Cross-talk

## 1. 緒 言

輝度情報と色情報は並列かつ独立に処理されることが、霊長類の電気生理学的、解剖学的知見および心理物理学の知見において多数報告されている。

また、運動視は輝度メカニズムだけにより処理されていると報告されている。しかし近年、電気生理学的および心理物理学の知見において色メカニズムも運動視に寄与していることが報告されている。これらの両メカニズムに基づく運動視の知見について

別刷請求先：924-0838 松任市八東穂3-1 金沢工業大学人間情報システム研究所 吉澤達也  
(2003年5月1日受理)

Reprint requests to: Tatsuya Yoshizawa Human Information System Laboratory, Kanazawa Institute of Technology  
3-1 Yatsukaho, Matto 924-0838, Japan  
(Received and accepted May 1, 2003)

Yoshizawa ら<sup>4, 5)</sup>や Mullen ら<sup>6)</sup>は色運動を検出する二つのメカニズムが存在していることを報告している。彼らは、輝度または色度変調により定義されるそれぞれ2種類の仮現運動またはスムーズな運動の刺激に輝度あるいは色メカニズムを選択的に抑制するようなマスキングノイズを加え、運動検出閾に対するノイズの効果を測定した。各運動刺激は図1に示すような空間的に輝度または色度変化の構造が異なる2種類の運動パターンを用いた。図1Aは正弦波(時間周波数  $fft$ , 空間周波数  $ffsc$ )が運動するパターン(1次運動: first-order motion), Bは搬送波(正弦波, 空間周波数  $fssc$ )の振幅を変調する包絡波成分(時間周波数  $fst$ , 空間周波数  $fsse$ )が運動するパターン(2次運動: second-order motion)の輝度または色度プロファイルである。ただし、2次運動パターンにおいて搬送波は運動しない。図1C, Dはそれぞれ1次, 2次運動刺激の1例である。

1次の運動パターン(図1A, C)は特定の時空間周波数( $fft$ ,  $ffsc$ )で輝度または色度が変調するため、

それに選択的な運動検出器によって運動検出が行われる。これに対して、2次の運動パターン(図1B, D)の場合は搬送波が固定されているため(時間周波数0, 空間周波数  $fssc$ ), 刺激の輝度または色度の時空間変調を検出する1次運動検出器のような機構ではその運動を検出できない。これらのことから、運動検出器として少なくとも二つ以上のメカニズムが存在することが報告されている<sup>7)</sup>。

上記のような刺激を用いた Yoshizawa ら<sup>4, 5)</sup>や Mullen ら<sup>6)</sup>の実験結果は、マスキングノイズのコントラストを増加したとき、色の1次運動は輝度ノイズの影響を受けたが、色度ノイズには影響されなかった。一方、色の2次運動は輝度ノイズには影響されなかったが、色度ノイズによって抑制された。これらのことから色の2次運動は色メカニズムによって媒介されるが、1次運動は主に輝度メカニズムにより検出されることが示唆されることを報告している。

そこで本稿では、色の運動メカニズムの基本的性質に関する先行知覚をもとに、色の運動知覚メカニ

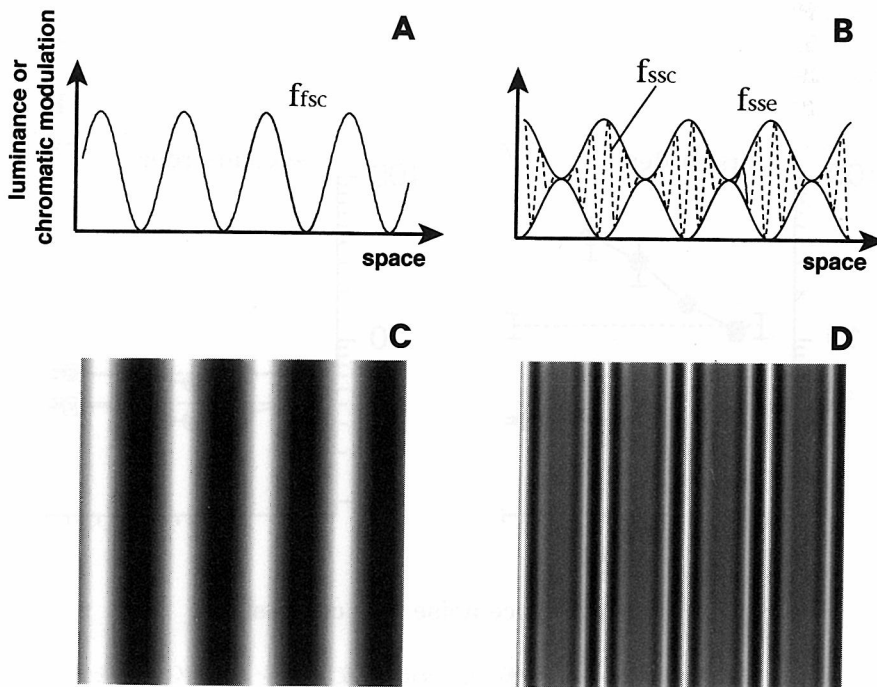


図1 二つの運動刺激の輝度または色度のプロファイルとそのパターン例  
左側(A, C)は1次運動(first-order motion), 右側(B, D)は2次運動(second-order motion)の特性を示している。上段(A, B)のプロファイルは縦軸が輝度または色度, 横軸は空間位置をあらわす。Bの2次運動のプロファイル中の実線は包絡波成分, 破線は搬送波成分をあらわし, 搬送波成分は運動しない。

ズムを明らかにするために、そのモデルを提案し、妥当性について検討する。

## 2. 心理物理学的知見

ここでは、運動視における色情報処理メカニズムのモデル構築のための心理物理学的知見について検討する。

### 1) 輝度運動信号と等輝度運動信号のクロストーク

Mullen & Baker<sup>9)</sup>や Willis & Anderson<sup>9)</sup>は、1次等輝度運動（等輝度正弦波グレーティング）の知覚が1次輝度運動（輝度正弦波グレーティング）による運動残効の影響のため、輝度運動と同じ方向に運動する等輝度運動の知覚感度が低下することを報告している。これは、色度変化で定義される1次運動と輝度変化で定義される1次運動の信号が共通のメカニズムによって生成されていることを示している。

### 2) 輝度信号抑制時の等輝度運動知覚

Yoshizawa とその共同研究者らは一連の実験<sup>4-6, 10)</sup>において等輝度色運動の知覚が輝度マスキングノイズによって影響されるか否かを調べた。図2は等輝

度の仮現運動の知覚に及ぼす輝度ノイズの影響を調べた実験<sup>9)</sup>の結果である。図2A, Bはそれぞれ1次等輝度運動、2次等輝度運動刺激に対する刺激検出閾値コントラスト（○）と運動方向弁別閾値コントラスト（●）を輝度マスキングノイズのコントラストの関数としてあらわしている。各図の縦軸は閾値コントラスト、横軸は輝度マスキングノイズのコントラストである。図中の一点破線および点線は、それぞれ輝度マスキングノイズがないときの刺激検出閾値と運動方向弁別閾値をあらわし、誤差棒は標準偏差をあらわす。

図2Aにおいて、1次の等輝度運動刺激（first-order）に対する刺激検出閾値は輝度マスキングノイズのコントラストに依存しないが、運動方向弁別閾値は輝度ノイズのコントラストの増加とともに上昇している。一方、図2Bにおいて、2次の等輝度運動刺激（second-order）に対する両閾値は輝度マスキングノイズのコントラストに依存していない。

同様の結果が正弦波のドリフティング・グレーティングを用いた実験<sup>5, 6, 10)</sup>からも得られている。

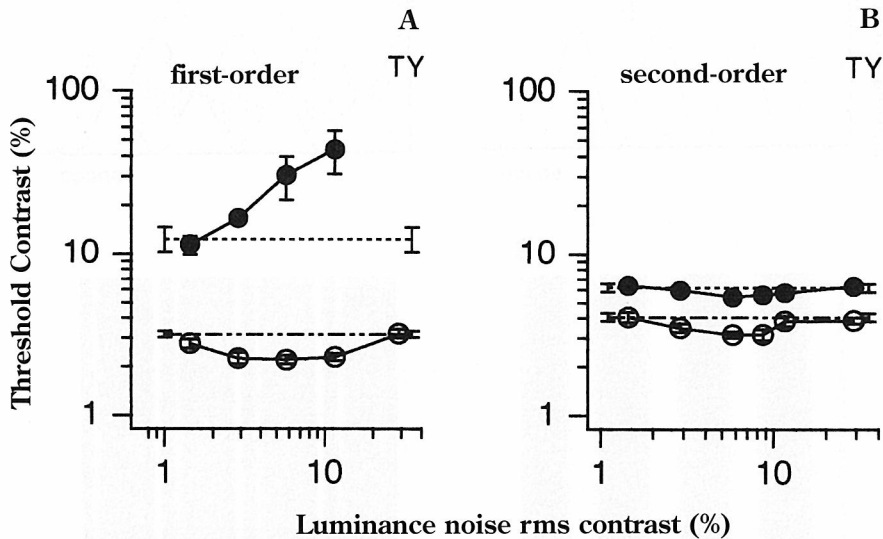


図2 Yoshizawa ら<sup>9)</sup>の等輝度運動知覚に及ぼす輝度マスキングノイズの影響を調べた実験結果のリプロット  
各図の縦軸は閾値コントラスト (%), 横軸は輝度マスキングノイズの rms コントラスト (%). A: 1次等輝度運動刺激に対する刺激検出閾値 (○) と運動方向弁別閾値 (●). 一点破線, 点線はそれぞれ輝度マスキングノイズがないときの閾値をあらわす。B: 2次等輝度運動に対する刺激検出閾値 (○) と運動方向弁別閾値 (●)。

これらの結果は、1次の等輝度運動の知覚には輝度信号が主な役割を果たしていることを示している。また、刺激自身の検出には輝度マスキングノイズの影響がないことから、等輝度刺激自身に輝度成分は混在しておらず、等輝度刺激による動的な輝度信号が内的に生成されることを示唆している。このような輝度信号の内的生成について Stromeier ら<sup>11)</sup>は、色光に対する時間遅れの波長依存性などに起因し、そのような動的な信号は輝度チャンネルだけに生じると報告している。

更に、Yoshizawa ら<sup>9)</sup>や Mullen ら<sup>9)</sup>は、上記の知見を確認するために、彼等が用いた刺激に等輝度マスキングノイズを加えて同様の実験を行った。図3に Yoshizawa ら<sup>9)</sup>の結果を示す。図3A, Bはそれぞれ1次等輝度運動、2次等輝度運動刺激に対する刺激検出閾値コントラスト(○)と運動方向弁別閾値コントラスト(●)を、等輝度マスキングノイズのコントラストの関数としてあらわしたものである。各図の縦軸は閾値コントラスト、横軸は輝度マスキングノイズのコントラストである。図中の一点破線および点線は、それぞれ輝度マスキングノイズがないときの刺激検出閾値と運動方向弁別閾値をあらわし、誤差棒は標準偏差をあらわす。

図3Aでは1次等輝度運動刺激に対する運動方向弁別は等輝度マスキングノイズの影響がほとんどない

のに対して、刺激検出閾値は等輝度マスキングノイズのコントラストの上昇に伴って増加していることがわかる。一方、2次輝度運動刺激に対する両閾値は等輝度マスキングノイズのコントラストの上昇に伴って増加している(図3B)。

これらの結果は、1次等輝度運動の知覚には輝度情報を処理するメカニズムが、2次等輝度運動の知覚には色度情報を処理するメカニズムが主に寄与しているという知見を支持している。

### 3. 色運動知覚メカニズムのモデル

ここでは、上記の知見や他の同様の先行知見(例えば、Dobkins & Albright や Gegenfurtner & Hawken を参照)<sup>12, 13)</sup>をもとに色運動知覚メカニズムにおける情報の流れをあらわす運動知覚モデルを提案する。

図4は先行知見を説明することが可能な二つの運動知覚モデルである。各モデルは破線により三つのブロックで構成されている。左側は輝度(L)または等輝度色刺激(C)をあらわし、中央は刺激検出メカニズム(LUM, COL)をあらわす。破線右側は運動検出器(first-order motion mechanism, second-order motion mechanism)をあらわす。各矢印は信号の流れを示している。モデル間の主な違いは1次等輝度運動刺激により生成される動的な内的輝度信号がどのようなメカニズムにより処理されるかという点に

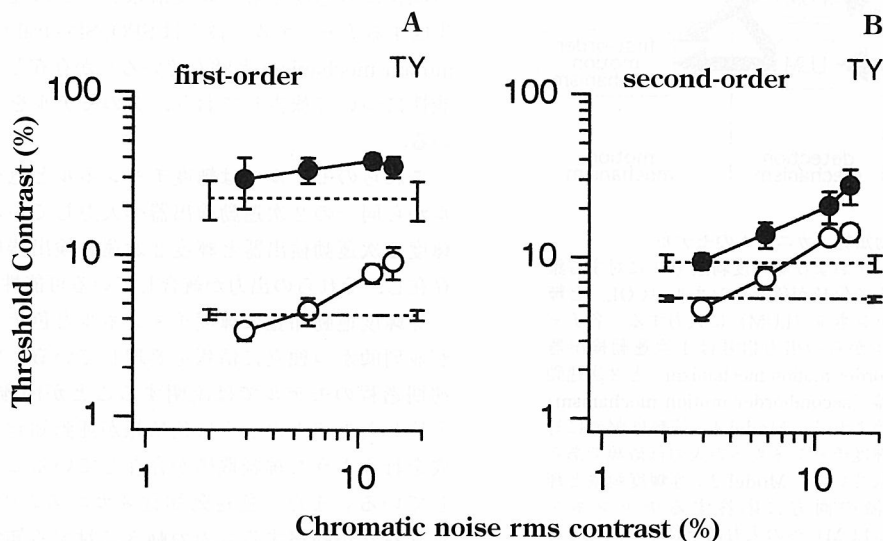


図3 Yoshizawa ら<sup>9)</sup>の等輝度運動知覚に及ぼす等輝度マスキングノイズの影響を調べた実験結果のリプロット。各図は横軸が等輝度マスキングノイズの rms コントラスト (%) をあらわす以外は図2と同様。

ある。Model 1ではその輝度信号が輝度メカニズムを介して運動情報の生成を行っているのに対し、Model 2では輝度、色度の両情報を処理するメカニズムがそのような輝度信号を利用して運動情報の生成を行う。

Model 1は従来の色チャンネルと輝度チャンネルが並列的に入力された視覚情報を処理しているという知見（例えば、Lennie, Krauskopf & Sclar）<sup>10</sup>を基本とし、等輝度刺激に対する時間応答特性の波長依存性により生じる輝度情報が輝度チャンネルだけに入力されることを報告した Stromeyer ら<sup>11</sup>や1次等輝度運動の信号が輝度チャンネルにより生成されていることを示した Yoshizawa ら<sup>9</sup>による心理物理学的知見、

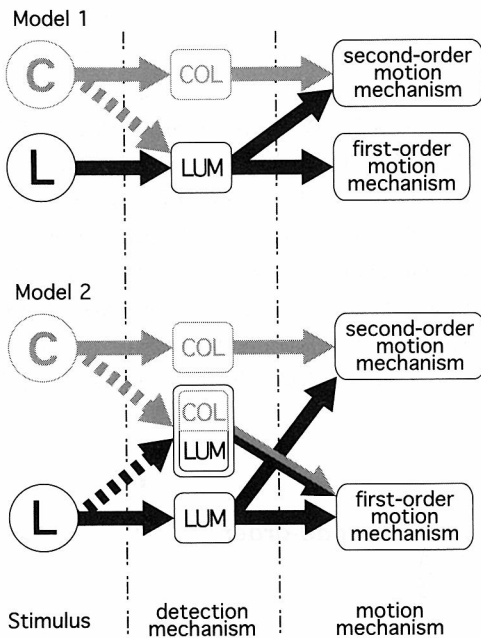


図4 色運動知覚メカニズムのモデル  
 輝度 (L) および等輝度刺激 (C) に対する錐体からの信号が色チャンネル (COL) と輝度チャンネル (LUM) に入力する。各チャンネルからの出力信号は1次運動検出器 (first-order motion mechanism) と2次運動検出器 (second-order motion mechanism) へ伝達される。Model 1: 等輝度刺激に対する輝度チャンネルへの入力は破線であらわされている。Model 2: 等輝度刺激と輝度刺激の両方に応答するチャンネル (COL/LUM) への入力はそれぞれ破線であらわされている。このチャンネルから1次運動検出器への入力は灰黒の実線矢印であらわされている。

および Lee ら<sup>15-17</sup>のマカクザルの生理学的知見をもとに、等輝度刺激が輝度チャンネルにより処理される経路を加えたものである。上述した Yoshizawa ら<sup>9</sup>が用いた等輝度刺激自身は測色的ではなく心理物理学的に等輝度に設定されているため、各被験者の視覚系にとっては十分等輝度であり、輝度アーティファクトはない。図2Aが示すように刺激検出閾値が輝度マスキングノイズの影響を受けていないことはそれを支持している。

一方、Cavanagh & Anstis<sup>18</sup>はそのような等輝度刺激によって生成される微小輝度成分では運動信号としては十分でないことを報告している。ただし、彼らの計算モデルによる検証は Stromeyer ら<sup>11</sup>や Yoshizawa ら<sup>9</sup>が主張する内的な輝度信号を対象としているのではなく、各神経細胞レベルでの等輝度特性が異なること（例えば、Gegenfurtner & Hawken）<sup>19</sup>を対象としている。

Model 2は従来の輝度チャンネルおよび色チャンネル以外に輝度と色度変化の両方に応答するメカニズムが存在し、1次等輝度運動の信号は主にそのメカニズムにより生成される。Johnson ら<sup>20</sup>は、マカクザルの視覚1次野に輝度と色度変化の両方に感度をもつ細胞が少なからず存在していることを報告しており、生理学的にこのモデルを支持している。更に Stromeyer ら<sup>11</sup>は、心理物理学実験の結果より従来の輝度チャンネルと色チャンネル以外にも一つ色光の波長にも感度をもつ輝度情報をもとに運動信号を生成するチャンネル（彼らは SPO: SPectral Opponent motion mechanism と呼んでいる）が存在している可能性について報告しており、このモデルを支持している。

これらのモデルでは輝度チャンネルと色チャンネルから同一の2次運動検出器へ入力しているが、等輝度2次運動検出器と輝度2次運動検出器は別々に存在し、それらの出力が統合している可能性もある。

等輝度運動知覚は輝度チャンネルと色チャンネルが並列的かつ独立に情報を処理しているという視覚初期過程のモデルでは説明することが困難であり、上述したモデルのように色情報が運動知覚の信号生成を行うような神経機構が存在していることを示唆している。また、色運動知覚メカニズムの存在は、日常我々が観察するものの動きに対する知覚が対象と背景の間に物理的な輝度差があまりなくても生じられることを示唆している。

#### 4. ま と め

本稿では色運動知覚メカニズムの働き、および基本特性について先行知見を検討することにより、新たな色運動知覚メカニズムのモデルを提案し、その妥当性について考察した。

本稿で提案したモデルにはL-M（赤-緑）反対色メカニズムだけが扱われているが、L+M-S（黄-青）反対色メカニズムを組み込んだモデルが今後必要である。

本稿で提案した二つのモデルのどちらが神経機構として存在しているかは現在までの先行知見だけでは不明である。今後、Model 1で提案した等輝度刺激より内的に生成される輝度情報をもとにした運動信号が主に等輝度運動知覚に利用されているのか、または、Model 2でその存在を言及した輝度および色度の両方に感度をもつ神経機構が運動知覚に寄与しているのかを明らかにする生理学的または脳機能イメージングの研究が必要である。

#### 文 献

- 1) Livingstone MS & Hubel DH: Psychological evidence for separate channels for the perception of form, color, movement, and depth. *J Neurosci* 7: 3416-3468, 1987.
- 2) Dobkins KR & Albright TD: What happens if it changes color when it moves?: The nature of chromatic input to macaque visual area MT. *J Neurosci* 14: 4854-4870, 1994.
- 3) Cropper SJ & Derrington AM: Rapid colour-specific detection of motion in human vision. *Nature* 379: 72-74, 1996.
- 4) Yoshizawa T, Mullen KT & Baker CL Jr: Absence of a chromatic linear motion mechanism in human vision. *Vision Res* 40: 1993-2010, 2000.
- 5) Yoshizawa T, Mullen KT & Baker CL Jr: The motion of red-green chromatic gratings is mediated by a luminance-based mechanism. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 41 (Suppl): 2798, 2000.
- 6) Mullen KT, Yoshizawa T & Baker CL Jr: Luminance based mechanisms mediate the motion perception of "isoluminant" chromatic gratings: The role of "temporal chromatic aberration". *Vision Res* 43: 1235-1247, 2003.
- 7) Smith AT & Snowden RJ: *Visual Detection of Motion*. Academic Press, San Diego, 1994.
- 8) Mullen KT & Baker CL Jr: A motion after effect from an isoluminant stimulus. *Vision Res* 25: 685-688, 1985.
- 9) Willis A & Anderson SJ: Separate colour pathways underlie the detection and discrimination of moving chromatic targets. *Proc R Soc London B Biol Sci* 265: 2435-2441, 1998.
- 10) Yoshizawa T, Mullen KT & Baker CL Jr: Signed chromatic apparent motion is mediated by luminance signals. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 42 (Suppl): 4667, 2001.
- 11) Stromeyer CF III, Kronauer RE, Ryu A, Chaparro A & Eskew RT Jr: Contributions of human long-wave and middle-wave cones to motion detection. *J Physiol* 485: 221-243, 1995.
- 12) Dobkins KR & Albright TD: The influence of chromatic information on visual motion processing in the primate visual system. In: Watanabe T ed, *High-Level Motion Processing*, 53-94, The MIT Press, Cambridge, 1998.
- 13) Gegenfurtner KR & Hawken MJ: Interaction of motion and color in the visual pathways. *Trends Neurosci* 19: 394-401, 1996.
- 14) Lennie P, Krauskopf J & Sclar G: Chromatic mechanisms in striate cortex of macaque. *J Neurosci* 10: 649-669, 1990.
- 15) Lee BB, Martin PR & Valberg A: Sensitivity of macaque retinal ganglion cells to chromatic and luminance flicker. *J Physiol* 414: 223-243, 1989.
- 16) Lee BB, Martin PR, Valberg A & Kremers J: Physiological mechanisms underlying psychophysical sensitivity to combined luminance and chromatic modulation. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 6: 1403-1412, 1993.
- 17) Lee BB, Pokorny J, Smith VC, Martin PR & Valberg A: Luminance and chromatic modulation sensitivity of macaque ganglion cells and human observers. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 7: 2223-2236, 1990.
- 18) Cavanagh P & Anstis SM: The contribution of color to motion in normal and color-deficient observers. *Vision Res* 31: 2109-2148, 1991.
- 19) Gegenfurtner KR & Hawken MJ: Temporal and chromatic properties of motion mechanisms. *Vision Res* 35: 1547-1563, 1995.
- 20) Johnson EN, Hawken MJ & Shapley R: The spatial transformation of color in the primary visual cortex of the macaque monkey. *Nat Neurosci* 4: 409-416, 2001.

解 説

# Photorefractor と Cross Cylinder Aberroscope の開発

## I. Bradford Howland との初期共同研究

我々の地下研究室と、秘密のコミュニケーションシステムを創る最初の試み

Howard C. Howland (Cornell University)

(訳 伊那真生子, 三橋俊文 (Topcon 研究所), 不二門 尚 (大阪大学))

私の6歳違いの兄・Bradford Howlandは、インディアナ州ラファイエットにある古いヴィクトリア様式の我が家の地下に研究室を持っていた。父はPurdue Universityで土木工学の教授でした。兄は、私を監督しようとするまで、私に彼の研究室に入ることを禁じていた。私を研究室に入れることはめったにない機会であったと思う。何故ならはっきりなしに質問を投げかける弟がいては彼も研究しづらかっただろうからだ。もちろん、彼の研究室ですることすべてが私の興味を掻き立てた。

その研究室の中心にはコントロールパネルがあり、直流6V, 12V, 交流6V, 12V, 24V, 110Vが得られた。これらの電源は、兄がそこでアルミリングを浮かべられるほど大きな電磁石や、光電管付き回路、初歩的なビデオ信号を発することのできるスキャンディスク、非常に微細な電圧を測定できる真空管電圧計に電力を供給していた。私は今でもその研究室にあった装置を思い出すことができる。

兄が、真空管電圧計を使う実験に私を招いたとき、彼は15~16歳であったと思う。彼は、炎の揺らぎの強さによって声の信号を伝え、真空管電圧計を通し

て増殖し、一般のイヤフォンやスピーカーで聞こえるようにする火炎圧力計を作ったかったようだ。このトリック…複雑な火炎圧力計を作るためだった。兄はこの器械を秘密のコミュニケーションシステムだと言っていたが、誰がこの揺らめくキャンドルの光からその正体を想像できただろう？

この器械のイラストでは、気体の充填された chamber に膜が張られ、パイプからガスが注入される。そして誰かが膜に向かって話しかけると、炎の大きさが変化する (図1)。

この構造では、いくつかの問題に遭遇した。まず、

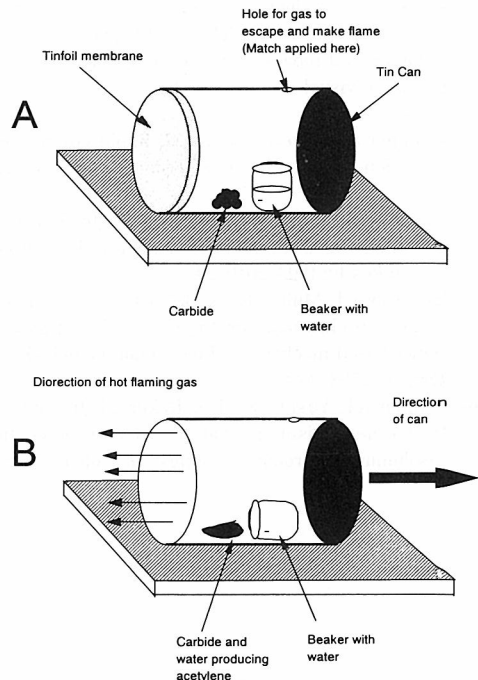


図2 Flame Photometer 作成の失敗  
A: 点火前の器械, B: 点火直後の器械の状態

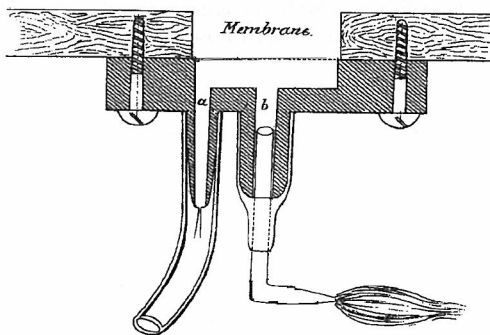


図1 Koenig's flame manometer



我々は誰もガスラインからガスを引く勇気がなかった。ここでガスに代わるものが必要となった。次に我々は、誰も薄いゴム膜を手に入れられなかった。あの時代、誰もそのようなものには馴染みがなかったのだ。ここでも代わりとなるものが必要になった。

気体には、我々は水を注入するとアセチレンガスを発するカーバイドを選んだ。膜には、薄い紙付きのアルミホイルを使うことにした。アルミホイルを空き缶全体に伸ばし、その中には25gのカーバイドと水を入れた小さなビーカーを置いた。空き缶の上には穴を開け、我々はそこから声のトーンに合わせて炎が踊るように動くことを夢想した(図2)。

9~10歳ぐらいの年齢で、炎や光を使った、秘密のコミュニケーションの実験に興味をもたない子供なんているだろうか？私はその実験で何か役割を果たすことを強く希望し、兄に自分には何ができるかを尋ねた。「お前が火をつけていいよ！」と兄は答えたのだ。

彼はカーバイドにビーカーの水がかかるように注意深く缶を傾けた後、テーブルの上に戻した。直後、缶の上に空けた穴からガスが噴き出す音が聞こえ、アルミホイルが不吉に外側に張り出した。

私はマッチをこすり、ガス穴に近づけた。すると、今でも思い出せるほどのすごい音がして爆発した。膜があったところからは炎が噴き出した。缶全体や、缶の中のビーカーがロケットのように飛び出し、地下室の壁にぶち当たった。上の台所で家事をしていた母が、悲鳴を上げて地下室に飛び込んで来て、何が起こったかを目撃した。ここで私の記憶は終わっており、その後何が起こったかについてははっきり覚えていないのだが、その後同じような実験が禁じられたことは確かだ。だが、我々の実験は、失敗に終わったとしても強烈な失敗であり、科学することはとてもエキサイティングだという印象を私に残した。

もう一つのコミュニケーションシステムはそれから20年後、ベルリンの壁を通じて会話することができるように設計された。

私は当時ロングアイランドの Oyster Bay に住んでいた。1961年の夏、ベルリンの壁が築かれた。兄 Bradford は、空軍と契約し、MIT 提携のリンカーン研究所で働いており、ベルリンの壁を通じてコミュニケーションが取れるような方法を見せるといって

ボストンから車を運転してやってきた。彼は視界の開けた場所を必要としており、ロングアイランドのビーチがデモンストレーションに最適だろうと考えていた。

彼の発明した器械は、大きな拡大鏡とその焦点の位置に立てた小さなスピーカーの中央に反射箔を貼ったものである。このシステムは反射板のように、離れた光源から平行に近い光を当てると、同じ軌跡で光を反射させることができる。レンズの光軸に沿って反射箔を移動させることによって、反射光の光束の角度を変化させることが可能である。したがって、光源近くに取り付けられた光電管は、スピーカーへの入力信号により変調された明るさの信号を受信することができる(図3)。

このシステムが安全な理由は、送られた光源に向けて非常に狭い角度で反射する光を発するだけだからである。その他の方向から見ても反射光は見えず、したがって光がなければ信号も発しないのである。

我々は、Center Island 近くのビーチまで車を走らせ、レフラクターのセットアップを行った。そして Oyster Bay 近くのビーチまで戻った。セットアップした場所から数マイルの距離があったが、簡単にレフラクターを眺めることができた。

この時点ではこの器械は完成ではなかったが、全貌が明らかになり我々は非常に満足した。Bradford はこの計画を論文に書き上げ、リンカーン研究所の上司に提出した。彼らは兄のアイデアを賞賛し、これこそが秘密のコミュニケーションシステムであると述べた。そしてこのアイデアは「極秘事項」に分類され、兄はこのアイデアについて他の誰にも言うてはならないと命じられた。

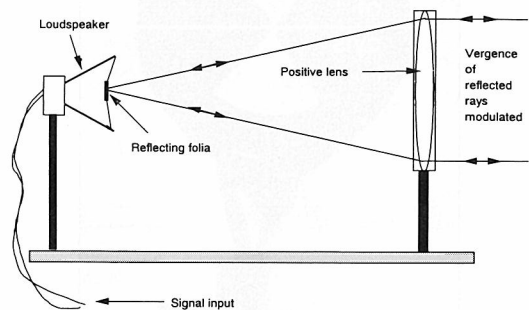


図3 我々の秘密の通信システム

電気的な音声信号は、スピーカーの中央部に取り付けられた反射箔の位置を変化させ、その結果反射光の光束の広がりを変化させる。

実際、兄も私も、このシステムの顛末についてはその後一言も知らされることはなかった。

剣を鋤の刃に：フォトリフラクション

しかしながら Bradford は、世の中には光束の広がりを変えることができる反射板が多数存在し、そのなかの一つが脊椎動物の眼であることに気が付いた。そして、眼の中に光を入射させ、反射する光を正確に受光する（技術的にいうと、double path pointspread）ことを考え付いた。そしてこの方法は、反射光が描く円や楕円の直径の測定をすることに便

利だと気付いた。そして、この直径を測ることで、眼の瞳孔径と距離、defocus を以下の数式で算出できることがわかった。

$$\text{defocus [diopeters]} = \frac{d}{2pa} \dots\dots\dots(1)$$

- a : 受光するカメラ
- p : 瞳孔径
- d : 反射した pointspread の径

Pointspread 全体を捉えるには、反射光を受光するカメラと同軸の光源がなくてはならない。図4は、我々が考え付いた最初の、多少複雑な光学的配置である。

ここに、半分銀メッキを施した鏡を光源として、1.5Dのシリンダーレンズを二つ、同軸に取りつけた。光源はカメラからのフラッシュ信号が用いられた。二つのシリンダーレンズの子午線は放射状（垂直）に配置され（図5）、円形の光を垂直線状に拡散した（図6）。

これらの「星の腕」の長さを合わせた  $d_r$  は、以下のとおりあらわすことができる。

$$d_r = g \times F \times \text{diameter of the returned pointspread} \dots\dots\dots(2)$$

- g : シリンダーレンズの度数（ここでは 1.5D）
- F : レンズの焦点距離

フォトレフラクターは、一つの（垂直）経線のみを測定することから、直交する方向にシリンダーレンズを更に追加すればよいことがわかる。しかしながら、我々は3番目の、異なる経線を測定することを思いつくまで、全体の測定結果がわからなかった。一方、レフラクターは a) 両眼同時測定が可能である、b) ごくわずかな時間で画像を得ることができる、という二つの点でユニークであり、優れていた。この

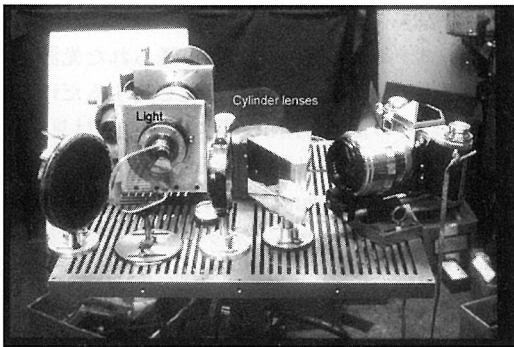


図4 Orthogonal Photorefractor の試作機

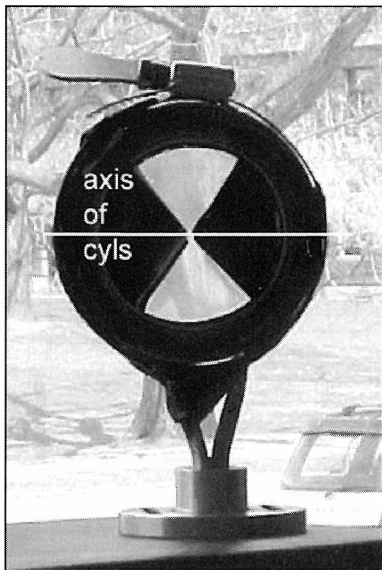


図5 Pointspread 像を、縦方向に拡散させるために用いられた、円柱レンズ部位

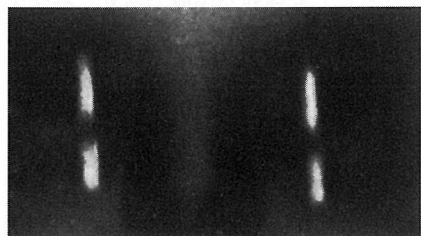


図6 Photorefractor と、二つの垂直なレンズで撮影された被験者の眼  
被験者は 4.32D の視標に焦点を合わせた。円柱レンズの経線は垂直よりややずれていることに注目。反射光は円柱レンズの境界で区切られている。写真は ASA 400 のフィルムで撮られた。

仕組みは、研究室にて使用可能なレベルとなったが、臨床機器として用いられるには更なるサイズダウンが必要だった。この仕組みがカメラアタッチメントとして使えるまでにどのようにサイズダウンを図ったか、どのようにして子供や動物の視力を調査するために使われるようになったかについては次項にて述べることとする。

#### 参 考 文 献

- 1) Koenig R: Beitrag zur "Theorie der Klangfiguren von Wheatstone". Annalen der Physik und Chemie 198: 238-245, 1864.
- 2) Howland B & Howland HC: Photographic method for study of vision from a distance. Research Laboratory of Electronics (RLE) Quarterly Progress Report (QPR) 67: 197-204, 1962.

#### 訳者コメント：

Howard Howland 教授は、兄の技術者である Bradford Howland 先生と、Photorefraction の器械および、波面収差測定装置を開発されたことで有名な先生です。これらの器械は眼科の臨床で非常に重要な測定機器となっています。また先生は、様々な動物の眼の屈折を測定するなど、ユニークな研究もされています。近視研究で有名な Dr. Schaeffel は、Howland 先生のところ留学されました。小柴昌俊さん、田中耕一さんがノーベル賞を授賞され、画期的な測定機器の開発が、重要な科学の原理の発見にいかにかが認識されるようになりました。

今回企画した、Howland 先生の研究の歩みに関する解説は、科学に興味をもった少年時代のエピソードから始まり、将来の光学研究者、研究的眼科医を育てるには、幼少時に失敗をしてもよいから（けがをしない範囲で）、物作りの面白さを体験できる環境を作ることが、重要なのではないかと考えさせられました。