

## —色光の進出・後退現象を中心として—

元木正典\*\* 増田直衛\*\*\* 飯田健夫\*\*\*\*

夜間の追突事故への対策として、自動車後部信号灯システムの機能分離論、特に青色あるいは緑色尾灯の採用が提案されている。この場合には、尾灯の色の違いによる車間距離判断への影響を検討しておく必要がある。色によって進出して見えるものと、後退して見えるものがあることは、古くから色の進出・後退現象として知られているが明確でない点が多い。ここでは、まずこの現象と眼球の光学的特性との関係について概観した。次に色光の見かけの距離におよぼす、色、明るさ、大きさの影響について実験的に検討した。その結果、明るさ、大きさは明確な効果を示したが、色の影響は一貫した傾向を示さず、無視してもさしつかえないことを示唆した。

**A Human Factors Study of Automotive Rear Lighting and Signaling System:  
concerning the apparent "advancement and -recedence" of colored light**

Masanori MOTOKI\*\* Naoe MASUDA\*\*\* Takeo IIDA\*\*\*\*

Nighttime auto collisions are a major highway problem. To reduce such accidents a variety of ideas have been put forward including proposals aimed at sophisticating current rear lighting systems by using green or blue colored lamps, in addition to the red ones now being used. Any such attempt to use different colors for different rear light functions forces a consideration of the impact that using different colors might have on driver judgement of the intervals between his vehicle and vehicles in front of him.

The fact that light of different colors is perceived as advancing or receding has been known for some time. Yet, many important facets of this phenomenon have yet to be satisfactorily explained. In this article, the authors provided an overview of the relationship between such phenomenon and the special optical characteristics of the human eye. The authors discussed their experiments concerning the influence of color, brightness, and area on driver perception of apparent depth and distance. It was demonstrated that the influences of brightness and area were clearly observed. However, it was suggested that color differences do not have to be taken into consideration as far as driver perception is concerned.

1. はじめに 自動車後部信号灯システムの  
機能分離論およびcolor-codingとその問題点

夜間の追突事故対策\*\*\*\*\*として、自動車後部信号

\*本研究の一部は第1回国際交通安全学会研究助成金の援助を受けて実施された。また本研究は千葉大学教養部心理学教室において実施されたことを附記し同教室に感謝する。更に有益な御助言を頂いた、千葉大学人文学部大山正教授、千葉大学教養部野口薫助教授、日本自動車研究所横井清和氏に深く感謝の意を表する。

\*\* (財)日本自動車研究所 研究員(知覚心理学、人間工学)

Engineer, Japan Automobile Research Institute

\*\*\* 国際商科大学 講師(心理学)

Assistant Professor, International College of  
Commerce and Economic

\*\*\*\* 通商産業省工業技術院製品科学研究所技官(知覚心理学、人間工学)

Engineer, Ministry of International Trade and  
Industry, Agency of Industrial Science and  
Technology.

原稿受理 昭和51年9月25日

灯システムの改善が考えられる。現在のように尾灯と制動灯の色が同一であり、主として光度差によって区別する方式では、前方に見える赤色灯火により車両が存在することは識別出来ても、走行中であるのか停止しているのかを識別することが困難な場合も多い。道路運送車両法の保安基準によれば「尾灯兼用の制動灯は、主制動装置を操作している場合のみ、その光度が5倍以上に増加する構造であること」が規定されている。追従走行で前車の尾灯を見ていて、急に明るくなるような変化を検出する場合には、この程度の光度差で容易に識別できるが、停止中の

\*\*\*\*\* 道路照明、前照灯の改善あるいは後部反射材の採用等も考えられる。特に無灯火で駐車している車両への追突防止には、反射材を用いたナンバープレート(Reflectorized Licence Plate)の効果を目にするべきであろう。(富永, 1976)

車両の制動灯が既に点灯しているのを見て、その絶対値により識別するのはかなり困難と思われる。しかも現在の自動車の灯火の明るさは車種によりかなり差があるので、前方に見える赤色灯火が、明るい尾灯なのか、あるいは暗い制動灯なのかを識別するのが一層困難になっている。また現在のように尾灯も制動灯も赤色であると、赤色灯火による危険表示の意味が打消される可能性も考えられる。

そこで1960年代より後部信号灯システムの機能分離論、特に青色あるいは緑色尾灯の採用が提案されてきた (Allen, 1964; 長町, 1968; Nickerson, 1968; Mortimer, 1970; Mortimer, 1973. )。

Mortimerによれば、後部信号灯はcolor-codingによりそれぞれ機能別とし、尾灯は青緑、制動灯は赤、方向指示灯は橙としてFig. 1に示すように配置するのが最も情報伝達が良く望ましいとされた。

また最近ではRSV(Research Safety Vehicle)計画においても、同様の提案がされている。

日本自動車研究所においても、これまでに自動車後部信号灯システムの評価について、反応時間、生体電気反応あるいは尾灯による車間距離判断等の実験が行われ、機能分離の方向が望ましいとの結論が得られている (石田・横井, 1973; 横井・石田, 1973. )。

ところで後部信号灯は車両の存在、停止、方向変化、後退等の情報を伝えるだけではなく、先行車までの距離判断をするための手掛りでもある。特に夜間、照明のない道路では、車間距離や相対速度を判断する最も重要な手掛りとなる。したがって後部信号灯システムの機能分離、特に青色あるいは緑色尾

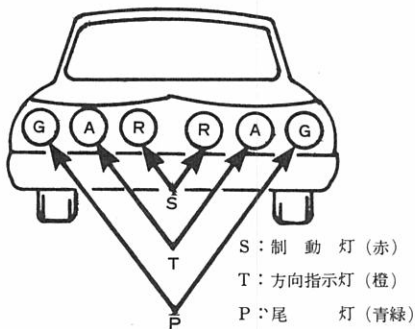


Fig.1 後部信号灯の配置  
The rear lighting configuration

\* ポストESV(Experimental Safety Vehicle, 実験安全自動車)計画とも考えられ、1980年代中頃の量産を前提とした安全自動車のイメージ作りを目的とした計画。(佐野, 1976)

灯の採用を考える場合には、信号灯の色の違いによる車間距離判断への影響を検討しておく必要がある。

横井ら (1973) の、実車を用いて行われた尾灯による車間距離判断の実験では、赤、青、橙の3種の灯火について検討し、赤色灯火がやや近くに見える傾向を示したが明確な結論は得られなかった。

そこで本研究では、自動車後部信号灯システム、特に尾灯による車間距離判断に関する基礎研究として、色光の色の違いが見かけの距離におよぼす影響について、実験心理学的手法により検討した。

## 2. 色の進出・後退現象と色収差説

眼から同一の距離にあっても、色によって近くに見えたり、遠くに見えたりすることは、古くはゲーテの「色彩論」にもその記述が見られる。一般的には、長波長の色 (赤) は近くに、短波長の色 (青) は遠くに見えるとされており、前者を進出色、後者を後退色と言う。赤がもっとも進出し、黄、橙がそれに続き、青がもっとも後退するとされている (大山, 1958)。

この現象について、光学者、生理学者、眼科医、心理学者などにより、数多くの研究がなされてきた。そのなかで、もっとも強力に唱えられてきたのは、<sup>\*\*</sup>眼球内色収差と距離知覚のいわゆる生理的手掛り (水晶体調節、両眼輻輳、両眼視差) とを結びつけて論ずる立場であろう。そこで、これらの生理的手掛りについて一つずつ検討してみる。

### 2-1 水晶体調節

ある対象を注視するとき、水晶体は眼球から対象までの距離に応じて、レンズの彎曲を調節して、網膜上に鮮明な像を得ようとする。遠距離にある対象を見るときは、水晶体が薄くなるように毛様筋が働き、近距離にある対象を見るときには、逆に厚くなるように働く。

もし、短波長光と長波長光とが、眼から同一の距離にあったとすると、これらは屈折率が異なり、軸上色収差が生ずるので、網膜上に鮮明な像を得るためには、長波長光の方が短波長光より、水晶体の彎曲を増加させ、焦点距離を短くする必要がある (Fig. 2)。これは、われわれが近くの対象を見つめるときの水晶体調節と一致している。よって、眼の水晶体調節と遠近判断とが結びついているとすると、長波

\*\* 波長 (色) による屈折率の違いから生ずる収差を色収差という。特に、波長によって焦点距離が異なることを問題にするとき、軸上色収差、また、結像面 (ここでは網膜) 上での位置が異なることを問題とするとき、横の色収差と呼ぶ。

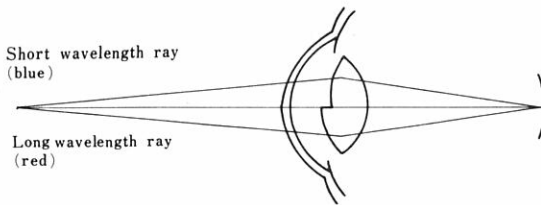


Fig.2 軸上色収差と水晶体調節作用  
Longitudinal chromatic aberration and accommodation of the eye

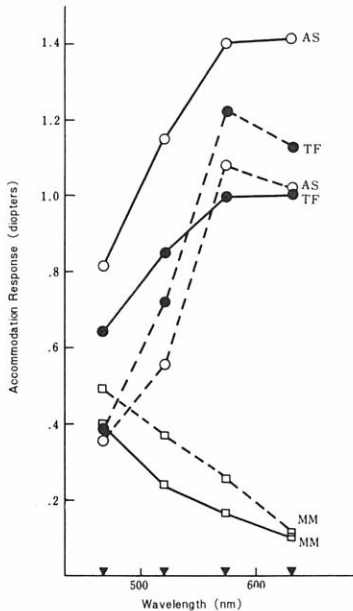
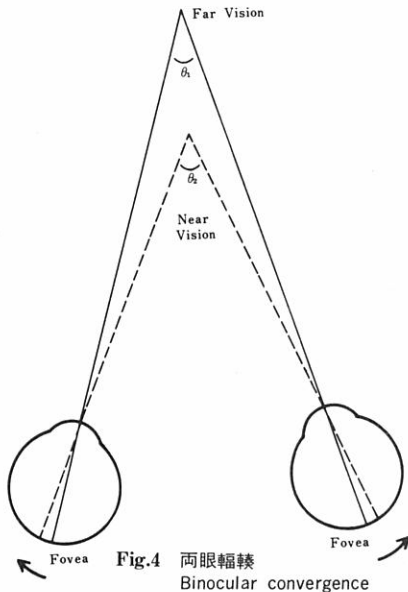


Fig.3 波長による水晶体調節の変化  
実線は両眼視、破線は単眼視条件を示す  
Accommodation response as a function of wavelength.  
Solid and broken line show binocular and monocular viewing condition, respectively



長光の方が短波長より近くに見えることになる。  
飯田・元木・大山(1976)は軸上色収差による水晶体調節が実際に生じているのかどうかを、暗黒中にストライプを持つ色光のみが見える事態においてレーザ・オプトメータにより検討している。結果をFig. 3に示す。同図からも明らかなように、単眼視、両眼視ともに、波長の違いによる調節作用の変化は顕著にあらわれている。長波長光になるに従い、屈折力は増大、すなわち、赤色光を凝視するとき焦点は近くへ、青色光の場合は遠方に移ることが認められる。しかし、一般的な色収差とは逆の傾向を示す被験者(MM)もあり、水晶体調節も単なる光学的特性によってのみ変化するものではない可能性がある。

また、色の進出・後退現象が多くの場合、単眼視より両眼視の方が、はっきり認められることから(増田・元木、1975)、水晶体調節のみでこの現象を説明することは困難である。さらに、水晶体調節そのものが、距離知覚の重要な手掛りかどうか疑問視する立場もある。

2-2 両眼輻輳

1つの対象をはっきり眼でとらえようとすると、眼はレンズの焦点を合わせるだけでなく、両眼は対象がそれぞれ、もっとも明瞭に見える中心窩に像を結ぶように回転する。この両眼の視線のなす角を輻輳角という。対象が遠くにあれば、視線はほぼ平行に近くなり輻輳角は0に近づき、対象が近くにあるほど輻輳角は大となる(Fig. 4)。

長波長光と短波長光とが、眼から同一距離に同時提示される事態では、軸上色収差による拡散像(どちらかの波長光に焦点を合わせたとすると、他の波長光はボケた像となる)が生じる。多くの人は、視線と光軸とが一致していないため、この拡散像は、中心窩に対して左右非対称になり、これを補正するため、輻輳角が変化する可能性がある(Fig. 5)。そこで、2色光を同時提示し、自由に視線を動かすことが許される事態では、これらの輻輳角差により、この2色光間で奥行距離の差\*が知覚される可能性がある。

次に、視野内にひとつの色光のみであっても軸上色収差が水晶体調節によって補正されないと仮定すると、前記と同様に、中心窩に対して、左右非対称

\* ここでは、対象と対象との奥行距離(exocentric distance)あるいはrelative depth)を奥行距離の差といい、自分から対象までの距離(egocentric distance)を絶対的な距離ということにする。

の拡散像が生ずる。これを補正するために輻輳角が変化し、また波長が異ると、拡散の程度が異なるので波長によってそれぞれの輻輳角が異なる可能性がある。この輻輳角は自分から対象までの絶対的な距離を与える手掛りとされているので、暗黒中にひとつの色光のみが提示される条件でも、波長によって絶対的な距離が異って知覚される可能性がある。しかし、Fig. 3 で示したように、軸上色収差は水晶体調節によって補正されており、ひとつの色光のみでは、拡散像は生ぜず、波長によって輻輳角が異なることはないであろう。したがって、絶対的な奥行距離に対する、色収差による輻輳角の影響を考えることは困難である。

2-3 両眼視差

ところで、読者の多くは街のネオンサインが同一平面上にあるのにもかかわらず、ある色は手前に見え、他の色は後方に見えることに気づいているに違いない。あるいは、最近の駅の案内表示板で、黒地の上的色文字が明瞭に奥行が異って見えることもある。このように、黒い背景上に、2色以上が近接してあると、明瞭に奥行感の違いが観察されることがある。これを、特に両眼色立体視 (color stereopsis, chroma stereopsis) と呼んでいる (Vos. 1960; 高崎・加藤, 1974)。

これは、前に述べた2色光提示条件における軸上色収差と輻輳角差によると理解することも可能であろうが、凝視を固定した事態を考えると、横の色収差と両眼視差を考える方が都合がよい\*。

人間の両眼は約6cm左右に離れているため、2対象の奥行距離が異ると、網膜上に投影される像は、左右眼では異っている。これを両眼視差という。この左右像の差異に対しては、極めて鋭敏な感覚があり、視角5~10秒の違いを発見できるとされている (人間の普通の意味での視力では視角1/2~1分程度の違いを見分けられるに過ぎない)。これが、2対象間の奥行距離の差に対して、極めて有力な手掛りとなる (Fig. 6)。

2色光が近接して同時提示されると横の色収差による像のずれが両眼視差となり奥行距離の差が知覚されるであろう。横の色収差は、瞳孔使用領域によって異り、瞳孔中心よりこめかみ側使用では、網膜上で長波長光は短波長光よりこめかみ側に結像し、逆に鼻側使用では長波長光は短波長光より鼻側に結

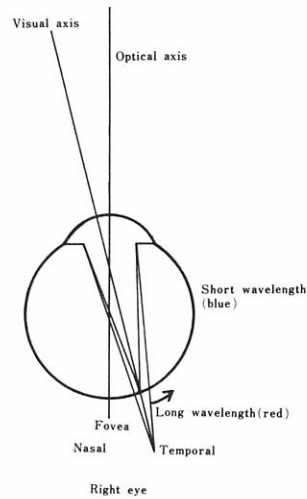


Fig.5 視軸・光軸の不一致から生ずる軸上色収差  
Longitudinal chromatic aberration by difference between visual and optical axis

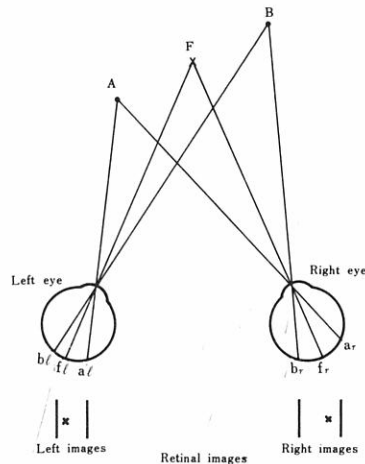


Fig.6 両眼視差  
Binocular disparity

像する。よって、瞳孔使用領域を両眼ともこめかみ側にすると長波長光の進出、両眼とも鼻側使用では短波長光の進出が予測される (Fig. 7)。

増田・元木 (1976) は赤色光と緑色光とを同時に提示し、凝視点をもうけ、人工瞳孔を用い強制的に瞳孔使用領域を変化させて検討した。結果の一部を Fig. 8 に示す。横軸は2色光間の空間距離、縦軸は判断された2色光間の空間距離であり、グラフ内のパラメータは-が鼻側使用、+がこめかみ側使用の人工瞳孔観察、NPが自然瞳孔観察の結果を示す。空間距離によって奥行距離に違いがあるが、鼻側

\* 凝視を固定しない、自由視条件では、両眼視差と輻輳角差とを区別することはできない。

\*\* 空間距離の-は、両色光の重なりを意味し、重なった部分は加法混色により黄色に見え、現象的には透明印象が生じる。

使用では緑色光の進出、こめかみ側使用では赤色光の進出が明瞭に認められる。また、被験者TFrは、第2色覚異常（緑色盲、赤と緑を色相の差により区別することが困難）であるが、他の2名の正常色覚者と同様の傾向を示していることから、この条件での両眼色立体視は眼球内色収差に起因する現象と考えられる。このように、人工瞳孔を用い、瞳孔使用領域を強制した条件での両眼色立体視は顕著に認められるものの、自然瞳孔時（NP）においては、被験者TFr以外、色の効果がはっきりしない。

増田・元木（1975）では、2色光を同時提示し、さまざまなボタンにおいて自然視で検討した。その結果、個人内では一貫した傾向を示すが、赤色光の進出する者、緑色光の進出する者、色の効果がはっ

きりしない者とわかれてしまい、個人間では色の効果は一義的ではなかった。

色の進出・後退現象を眼球内色収差と距離知覚のいわゆる生理的手掛りにより説明する立場を検討してみると、この現象が顕著に見られるのは、2色光が近接して同時提示される条件のみである（両眼色立体視）。この条件においては、自然視での個人差をどう説明するかはともかくとして、眼球内色収差と輻輳角差あるいは両眼視差により説明することが妥当である。しかし、これらの手掛りは、あくまで、2対象が同時提示される時、2対象間の奥行距離の差のみを示すに過ぎない。自動車運転時に問題となるような、自分の車から先行車までの絶対的な距離を示してくれるものではない。よって、この両眼

色立体視により、2色光間で奥行距離の差が生じたとしても、先行車までの車間距離判断には影響があるとはいえない。

そこで、眼球内色収差といわゆる生理的手掛りにより説明する立場を離れて色の効果を検討する必要がある。特に、自動車の夜間運転時、後部信号灯以外に距離知覚の手掛りがない状況を想定して、暗の中にひとつの色光のみが提示される条件で検討する必要がある。この事態で色の効果があるかどうか、また、それはいわゆる経験の手掛り、たとえば色光の明るさや大きさの手掛りと比較して、どの程度かを検討しなければならないであろう。

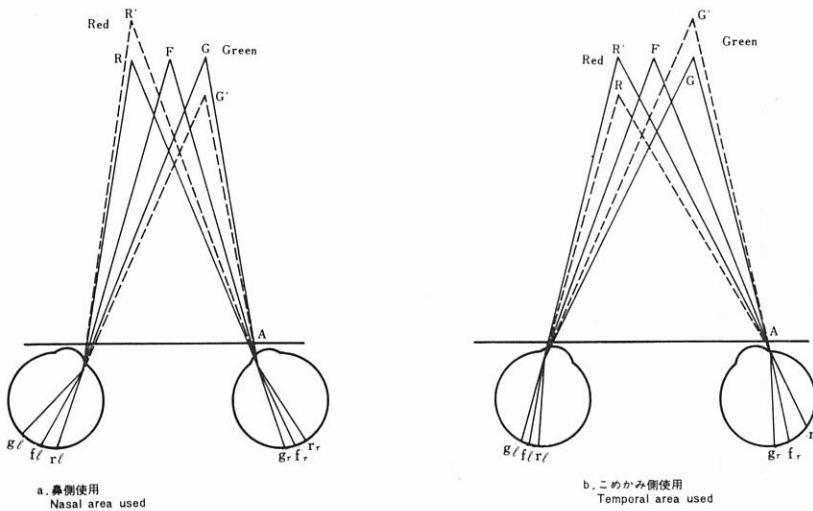


Fig.7 横の色収差と両眼視差  
Lateral chromatic aberration and binocular disparity

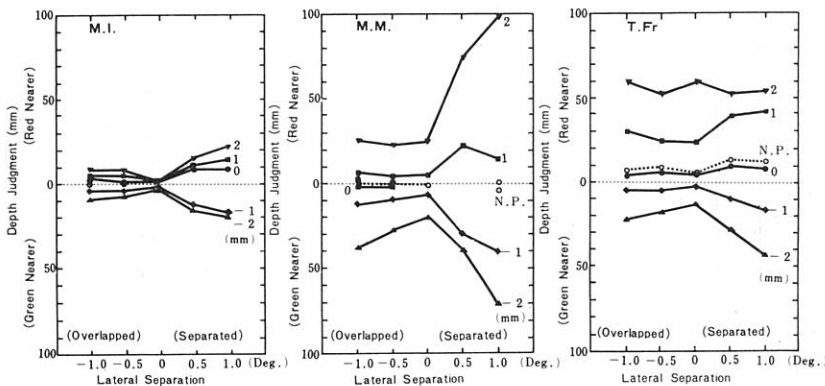


Fig.8 人工瞳孔時、自然瞳孔時における両眼色立体視  
Color stereoscopy with artificial and natural pupils

3. 色光の見かけの距離におよぼす、色、明るさ、大きさの影響

夜間、照明のない道路で先行車との車間距離判断をする場合、尾灯を最も重要な手掛りとしなくてはならない状況が多い。このような状況での距離判断には、生理的手掛りは決定的な役割を果たさず、むしろ経験的な手掛りが問題となることが前節で示された。

元木・大山(1975)では、暗黒中に色光を提示して、色光の見かけの距離におよぼす、色、明るさ、大きさの影響を検討した。

方法としては、被験者の左前方114.6cmの距離に波長(465nm, 518nm, 574nm, 630nm, それぞれ、青、緑、黄、赤に見える)、輝度(1:1000の範囲で4段階)、面積(直径1cm, 2cm, 4cm、視角にしてそれぞれ30°, 1°, 2°)の様々な組み合わせの色光が左半円形の検査領域として提示された。なお色光は干渉フィルタによる単波長光を用い、波長、輝度の実験条件を統制した。右前方に提示される右半円形の白色光は一種のモノサシであり、検査領域と見かけ上距離が等しくなるように、被験者が手もとのスイッチで任意の位置に調整するように教示された。被験者は正常色覚、正常視力の男女3名で、完全暗室中で顔面固定をして両眼で観察した。

結果をFig. 9に示す。ここでは検査領域の直径、波長別に、被験者の平均値を用いて、比較調整された見かけの距離を、輝度の対数に対してプロットした。水平の破線はコントロール条件(検査領域に、調整領域と同じ輝度、面積の白色光を提示した条件)であるので、この水平線より上の部分ではコントロール条件より後退して遠くに見えたことになり、下

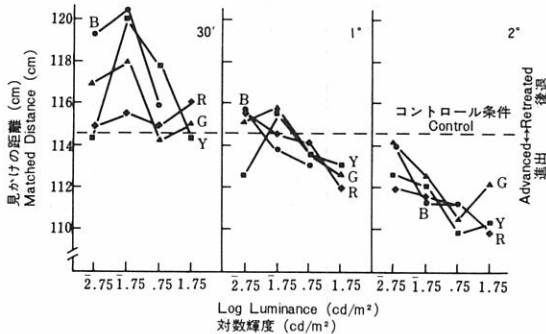


Fig.9 対数輝度に対する見かけの距離  
Matched distance as a function of log luminance

の部分では進出して近くに見えたことになる。

まず面積の影響が最も目立ち、30°における測定値はほとんどコントロール条件より後退しているが、2°においてはすべてがコントロール条件より進出している。つまり面積の大きいものほど近くに見える傾向を示している。次に明るさの影響については、最も面積の小さい30°において距離判断がかなり困難であり、測定値のバラツキが大きく、明らかでないが、それ以外の条件ではほぼ輝度の対数に比例して進出している。つまり明るいものほど近くに見える結果を示している。ところが色の影響については一貫した傾向が見出せなかった。

また距離判断の正確度(判断のバラツキの程度)については、面積が大きいほど、また明るいほど正確度が高く、色別では黄、緑の正確度が高く、青が最も低かった。

ところで以上の結果は、現実の交通場面とかなり異なった室内実験で求められたものである。特に観察距離が1m程度と短く、調整法により測定されたので、現実の夜間運転時における、後部信号灯による車間距離判断の予測に、この結果を直接適用することには、問題が残るであろう。

そこでいろいろな距離(5mから75mまで5段階)における、色光の見かけの距離におよぼす、色、明るさ、大きさの影響について、絶対判断による確認実験を行なった。

方法としては、色(赤、緑)、輝度(1:100の範囲で3段階)、面積(直径5cm, 10cm, 20cm)の様々な組み合わせの円形の色光が各距離(5m, 10m, 25m, 50m, 75m)にランダムに提示された。被験者は提示された色光までの見かけの距離を直接評定した。被験者は正常色覚者4名、色弱者1名で、顔面固定をして両眼で観察した。

その結果は、前述の調整法による結果と同様に、大きさの影響が最も顕著であり、明るさの影響も一貫した傾向を示したが、色(赤と緑)の違いによる影響については一貫した傾向を見出せなかった。

このことは、前述の調整法による結果が、測定法や観察距離による特殊なものでなく、尾灯による車間距離判断に対する予測に適用しても、不都合のないことを示していると考えられる。

4. まとめ

2節で、色の進出・後退現象と眼球の光学的特性との関係を検討した結果、先行車の尾灯によって車

間距離判断をする場合には、尾灯の色が違ってはほとんど影響がないであろうことが予測された。また3節での結果では、色光の見かけの距離を規定する要因としては大きさ、明るさは明確な効果を示すが、色は一貫した効果を示さず、ほとんど無視できる程度であった。すなわち青色あるいは緑色尾灯の採用を考える場合には、色による車間距離判断への影響は無視してもさしつかえないことを示唆している。

距離判断の正確度については、面積が大きいほどまた明るいほど正確度が高くなる傾向を示した。また色別では青の正確度が低く、見かけ上にもじんで見えるので、少なくとも純度の高い青を尾灯に採用することは問題があると思われる。

#### 参考文献

- (1) Allen, M. J.: Misuse of red light on automobiles, *American Journal of Optometry, and Archives of American Academy of Optometry*, 1964, Vol. 41, No. 12, Pp. 695-699.
- (2) 飯田健夫、元木正典、大山正：「色光の進出・後退現象 その3 眼球調節の測定」日本心理学会第40回大会論文集、1976.
- (3) 石田敏郎、横井清和：「自動車後方照明の評価について(その1)」自動車技術会学術講演会前刷集(秋期)、1973.
- (4) 増田直衛、元木正典：「色光の進出・後退現象 その2」日本心理学会第39回大会論文集、1975.
- (5) 増田直衛、元木正典：「色光の進出・後退現象 その4 両眼視差の検討」日本心理学会第40回大会論文集、1976.
- (6) Mortimer, R. G.: *Automotive rear lighting and signaling research*, PB191149, 1970.
- (7) Mortimer, R. G. *et al.*: *Passenger car and truck signaling and marking research. I. Regulations, intensify requirements and color filter characteristics*, PB225 169/2 1973.
- (8) 元木正典、大山正：「色光の進出・後退現象 その1」日本心理学会第39回大会論文集、1975.
- (9) 長町三生：「緑色尾灯の是非論をめぐって」自動車技術 1968, Vol. 22, No. 8, Pp. 737-739.
- (10) Nickerson, R. *et al.*: *Investigation of some of the problem of vehicle rear lighting*, PB 179922, 1968.
- (11) 大山正：「色彩面の進出・後退現象の測定」照明学会誌、1958, Vol. 42, No. 12, Pp. 526-532.
- (12) 佐野彰一：「RSV計画とその後の進展について」自動車技術 1976, Vol. 30, No. 2, Pp. 92-98.
- (13) 高崎宏、加藤正明：「色による進出後退現象」光学 1974, Vol. 3, No. 6, Pp. 360-366
- (14) 富永誠美：「交通安全対策の課題」IATSS review 1976, Vol. 2, No. 1, Pp. 4-5
- (15) Vos, J. J.: *Some new aspects of color stereoscopy. Journal of the Optical Society of America*, 1960, Vol. 50, No. 8, Pp. 785-790.
- (16) 横井清和、石田敏郎：「自動車後方照明の評価について(その2)」自動車技術会学術講演会前刷集(秋期)、1973.