臨界融合周波数以上の点滅刺激による明るさ知覚への影響

Effect of the Brightness on the Suprathreshold Flicker Light Field

正会員 森 峰 生^{†1}, 正会員 畑 田 豊 彦^{†2}, 石 川 和 夫^{†2}
寺 島 信 義^{†3†1}, 大 頭 仁^{†4†1}Mineo Mori^{†1}, Toyohiko Hatada^{†2}, Kazuo Ishikawa^{†2}, Nobuyoshi Terashima^{†3†1}, and Hitoshi Ohzu^{†4}

あらまし フリッカが知覚されない点滅光の明るさ知覚を、明暗弁別閾値法と明るさマッチング法を用いて測定した。その結果、CFF 近辺からある程度高い点滅周波数までは明るさ知覚が抑制され、フリッカが知覚されていなくても明るさ知覚に影響があることがわかった。

キーワード：フリッカ，明暗弁別，明るさ知覚，時間特性

1. ま え が き

点滅する光源のフリッカが知覚できない点滅周波数として、臨界融合周波数 (Critical Fusion Frequency: CFF) を求めることができる。これは視覚系の時間周波数特性のカットオフ周波数と考えることができ、その特性については Kelly らをはじめとして、多くの研究がなされてきている^{1)~3)}。ところが、CFF 以上の周波数で点滅する刺激に対する視覚特性は調べられてきてはいない。また、コンピュータディスプレイを見続ける作業を行うと、紙面による作業とは異なる疲労感を覚え、CFF 以上の点滅光下での作業であっても視覚疲労への影響があるという報告も見られる⁴⁾⁵⁾。さらに、動物実験(サル)において、CFF 以上である 60 Hz の点滅光による大脳視覚皮質からの反応パルス列に、その周波数成分が残存していることも報告されている⁶⁾。以上のことから、点滅光の提示周波数が、フリッカが知覚できない CFF 以上の周波数であったとしても、あ

る程度の周波数までは視覚過程において定常光とは異なる処理がなされ、何らかの影響を及ぼしていることが推測される。このような、定常光とは異なる疲労の発生要因を解明するには、CFF 以上の点滅光の視覚特性への影響を詳しく調べる必要がある。

一方、点滅光の明るさは、CFF 以下では Brücke-Bartley 効果により明るく感じられ、CFF 以上においては Talbot-Plateau の法則により時間平均光量が等しい定常光と同じ明るさに感じるとされてきた³⁾。時間平均の光量が等しい点滅光が、定常光とは異なるところは、それが点滅光として処理されているとき、on-off 反応を引き起こす成分を持っているということであり、もし CFF 以上で点滅する刺激光に対して定常光と異なる処理が行われているならば、on-off 反応によって、明るさの知覚も何らかの影響が及ぼされる可能性がある。そこで本研究では、フリッカが知覚されない点滅光に対する明るさの知覚について、明暗弁別閾値法および明るさマッチング法を用いて測定した。

2. 明暗弁別への影響(実験 I)

明るさ知覚の基本特性となる視覚に光覚閾がある。背景光がない条件での光覚閾は吸収光量子数のゆらぎに依存するが、背景光に刺激光を重畳したときの光覚閾、すなわち増分閾を測定する明暗弁別閾値法は、背景光を順応光とすれば刺激の検出能力の測定と考えることができる⁷⁾。したがって点滅光に対する on-off 反応の影響が残り、定常光とは異なる刺激となっているならば、定常光と点滅光の増分閾も異なることが予想される。そこで実験 I として、定常光の背景に点滅光を重畳させたときの増分閾を求め、提示周波数によってどのように変化するかを調べた。

1998 年 2 月 3 日受付, 1998 年 2 月 20 日採録

†1 通信・放送機構 早稲田リサーチセンター

(〒169-0051 東京都新宿区西早稲田 1-21-1, TEL 03-5286-3830)

†2 東京工芸大学 工学部

(〒243-0297 厚木市飯山 1583, TEL 0462-42-9506)

†3 早稲田大学 理工学総合研究センター

(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1, TEL 03-5286-3173)

†4 早稲田大学 理工学部

(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1, TEL 03-5286-3225)

†† Waseda Research Center, Telecommunications Advancement Organization (TAO) of Japan

(1-21-1 Nishi-Waseda, Shinjuku-ku, Tokyo 169-0051, Japan)

†2 Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Polytechnics

(1383, Iiyama, Atsugi-shi, Kanagawa 243-0297, Japan)

†3 Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

(3-4-1, Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan)

†4 School of Science and Engineering, Waseda University

(3-4-1, Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan)

2.1 方法

(1) 装置および刺激

刺激提示装置は、網膜に到達する光量を一定にするために、図1に示すような2光路型マクスウェル光学系を用いた。ピンホールPHおよびレンズL1による光束は、ビームスプリッタBS1により参照光用光路Rと検査光用光路Tに分けられる。回転チョップCHにより、検査光は明暗時間比1:1で矩形波状に点滅する。実験Iにおいては、参照光用光路Rにより参照視野と検査視野の両方に定常光が提示され、検査光用光路Tの平行光束の一部にマスクMSをかけることにより、点滅光が検査視野に重畳して提示される(図2)。重畳される光量はウェッジW1により調整できる。視野全体の大きさは光路中に挿入した視野マスクにより直径10 degとした。検査光が重畳されていないときの網膜照度 E は2000 Tdとした(付録)。なお光源はハロゲンランプを直流安定化電源によって点灯させているので、白色の定常光が得られる。また、検査視野と参照視野との境界面は、マスクMSの位置を網膜に対する共役点からずらすことにより、ぼかしている。これは明瞭なエッジの存在による空間的な影響を除去するためである。

(2) 手順

増分閾の測定として、光路中のウェッジW1を被験者

図1 刺激提示用マクスウェル光学系

Schematic of the Maxwellian-view optical system that combined two channels: T, R. The chopper; CH on the optical path; T generated flickering test field. Reference field was displayed stable light by the path; R.

に回転させることにより、検査光が検出できたときの網膜照度の時間平均 ΔE (Td)を求めた。点滅光の提示周波数は、フリッカが明確に知覚される30 HzからCFF以上の150 Hzまでとした。被験者として30歳代の男性MMと20歳代の男性TSを用いた。それぞれの測定は実験日や時間帯および提示周波数の順序を変えて5回行った。また同時に参照視野に対するCFFの測定も行い、疲労等によりCFF値が通常とは5%以上異なるときは測定を行わないようにした。

2.2 結果および考察

図3に各被験者の増分閾についての測定結果を示す。グラフの横軸は検査視野に重ねて提示した点滅光の周波数(Hz)、縦軸は検査光が検出できたときの時間平均網膜照度 ΔE (Td)を表す。なお、結果は5回の測定値の平均を、また付された縦線は標準偏差の幅を表す。図中の矢印は参照視野の網膜照度2000 Tdにおける各被験者のCFFとなる周波数である。CFF以下ではBrücke-Bartley効果により検出閾が低下し、明るく知覚されている様子がわかる。提示周波数の上昇とともに検出閾は増加するが、CFFを超えても上昇し、70~75 Hzで減少に転じて、80 Hz以上ではTalbot-Plateauの法則が成立し、ほぼ一定となった。

点滅が知覚されているときのBrücke-Bartley効果は、短時間提示の刺激光が同一輝度の長い提示時間の刺激光より明るく見えるというBroca-Sulzer効果の集まりによって明るさ感が増すと考えられてきた³⁾。これはon-offの変調度を検出するためと考えられ、フリッカが知覚できなくなった時点で変調度は検出されなくなり、光エネルギーの時間的な積分量の検出に移行してTalbot-Plateauの法則が成立するものと考えられてきた。しかし実験の結果は、CFF以上の70~75 Hz近辺では何らかの抑制効果が働き、増分閾が上昇する傾向が見られた。これは、フリッカが知覚できないCFF以上であっても、ある程度の周波数領域まではon-off反応が残り、それが抑制効果として働いたためではないかと考えられる。またTalbot-Plateauの法則は、その影響がなくなる高周波数領域に至ってから成立するものと考えられる。なお、今回は被験者数や実験回数が

図2 提示視野と実験IおよびIIで用いた刺激特性

Spatial configuration and temporal sequence of stimuli for experimentation I and II. $E=2000\text{Td}$.

図 3 各点滅周波数に対する明暗弁別閾値法による増分閾
Discrimination threshold as the flicker light superposed
upon the stable light field.

図 4 各点滅周波数に対する明るさマッチングによる参照
視野と等価刺激となる検査視野の時間平均網膜照度
Retinal illumination of the flicker light matched the
stable light field.

限られ、また結果にばらつきが見られるが、増分閾の照度レベルが被験者により異なっているにもかかわらず、同様の傾向が示された。また増分閾である網膜照度 ΔE が背景光の照度に比べて通常増分閾より高くなったのは、検査視野と参照視野との境界面をぼかしたため、閾値検出機構に影響を及ぼす空間的な刺激効果を除去したためと考えられる。

3. 明暗知覚への影響 (実験 II)

実験 I では点滅光は背景光に重畳されているため、明部と暗部のコントラストは低くなっていた。また増分閾の測定は刺激の検出能力という側面を持つ。そこで実験 II では、図 2 の右下に示すように、点滅のコントラストを大きくし、高次中枢での反応と考えられる明るさ知覚への影響を、定常光との明るさマッチングにより調べた。

3.1 方法

実験 I において両方の視野に定常光を提示していた光路 R の途中にもマスクを挿入し、図 2 右に示すように、参照視野に 2000 Td の定常光のみを提示し、マッチングレベルを調整する検査視野には点滅光のみを提示した。被験者は光路中のウェッジ W1 を制御し、検査視野の明るさを参照視野と同じ明るさに知覚できるように調整する。提示

する点滅光の周波数は実験 I と同じ条件とした。被験者も実験 I と同じで、実験は 3 回行った。また実験日や時間帯を変え、提示する点滅周波数の順序も変えた。測定に先立ち、参照視野に時間平均照度が 2000 Td、明暗時間比 1:1 の点滅光を提示して CFF 値を測定し、疲労等の影響を排除した。

3.2 結果および考察

図 4 に各被験者の明るさマッチングの測定結果を示す。横軸は提示した点滅光の周波数(Hz)、縦軸は参照視野と等価刺激となる検査視野の時間平均網膜照度 E_m (Td) を表す。点線は参照視野の網膜照度 E を表す。図中の矢印は測定に先だって参照視野に提示した点滅光に対する CFF の周波数を表す。なお結果は 3 回の平均値を、また縦線は標準偏差の幅を表す。

結果は、明るさマッチングにおいても、実験 I の結果と類似した。このことから、明るさ知覚においても増分閾と同様に、点滅光の周波数が CFF 以上でも、ある程度高い周波数領域までは定常光とは on-off 反応による抑制効果があることが示唆される。なお Talbot-Plateau の法則に移行する周波数が実験 I の結果より 5~10 Hz 高くなっている点については、点滅光の変調成分が増したことによる on-off 反応の抑制効果の強さによる違いなのか、単なる測

定誤差にすぎないのか、今後のより詳しい検討が必要である。

4. む す び

フリッカが知覚されない点滅光による視機能への影響を検討するために、明暗弁別閾値法による点滅光の増分閾と、明るさマッチング法による定常光と等価刺激となる点滅光の時間平均網膜照度の測定を行った。その結果、点滅光はCFF近辺からある程度高い周波数領域までは、明るさ知覚への抑制効果を持つことが確認された。これは点滅光のフリッカを知覚していなくても、on-off反応が、Brücke-Bartley効果への寄与とは異なり、抑制効果を及ぼすためと考えられた。そして、さらに高い点滅周波数領域になって、on-off反応による影響がなくなってからTalbot-Plateauの法則が成立すると考えられた。

今後の課題としては、順応レベルや点滅光の時間的なコントラストを変化させて、より一般的な特性を調べることや、加齢による影響などを検討する必要がある。また空間的な成分による影響についても、2分視野の境界線の明瞭化を初め、視野内に空間的なパターンを加えた刺激条件による実験により検討する必要がある。さらに、光源のフリッカ閾については光刺激の時間変化の波形に依存する⁸⁾ことから、矩形波以外の点滅光波形による検討も残されている。

また、本研究の結果から、例えば視覚作業用のディスプレイのフレーム周波数などがCFF以上であっても、on-off反応が残存していることによって、視覚疲労の発現要因となっていることが示唆される。最終的には視覚疲労への影響についても詳しく調べていく予定である。

おわりに、本研究の機会を与えていただきました通信・放送機構早稲田リサーチセンターのプロジェクトリーダーである早稲田大学の富永英義教授をはじめ、本研究を始めるにあたって多大なる協力をいただいた東京工芸大学大学院(当時)八田耕治氏、ならびに被験者としてご協力いただいた方々に深く感謝いたします。

【文 献】

- 1) D. H. Kelly: "Visual Responses to Time-Dependent Stimuli. I. Amplitude Sensitivity Measurements", J. Opt. Soc. Am., **51**, 4, pp. 422-429 (1961)
- 2) D. H. Kelly: "Visual Responses to Time-Dependent Stimuli. II. Single-Channel Model of the Photopic Visual System", J. Opt. Soc. Am., **51**, 7, pp. 747-754 (1961)
- 3) 和気, 長谷川: "視感覚の時間的側面", 大山, 今井, 和気編, 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック, pp. 335-339 (1994)
- 4) 畑田: "ディスプレイに要求される機能", 照学誌, **73**, 12, pp. 724-728 (1989)
- 5) 森, 加々見, 石川, 畑田, 大頭: "ディスプレイフリッカによる視覚疲労時の脳波測定", 光学連合シンポジウム'96講演予稿集, pp. 273-274 (1996)
- 6) M. Gur and D. M. Snodderly: "A Dissociation between Brain Activity and Perception: Chromatically Opponent Cortical Neurons Signal Chromatic Flicker that is not Perceived", Vision Res., **37**, 4,

pp. 377-382 (1997)

- 7) 乾: "光覚閾", 大山, 今井, 和気編, 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック, pp. 318-324 (1994)
- 8) 大竹, 猪野原, 竹内: "光源のちらつきの評価方法", 照学誌, **70**, 2, pp. 51-54 (1986)
- 9) 畑田: "測光", 大山, 今井, 和気編, 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック, pp. 274-286 (1994)
- 10) 池田: "マクスウェル視の時の網膜照度の計算と測定", VISION, **1**, pp. 58-61 (1989)

〈付 録〉

定常光刺激の明るさは次式

$$E = A_p \cdot L$$

により定義される網膜照度 E_r (Td) により表す。ここで、 A_p は瞳孔面積 (m^2)、 L は視対象の輝度 (cd/m^2) である⁹⁾。なお、実験ではマクスウェル光学系を用いているので、この定義式を変換した次式

$$E = K \cdot d$$

により規定した¹⁰⁾。ここで K は瞳が置かれる位置 (マクスウェルレンズの焦点) から距離 d (m) における照度 (lx) である。

実験で用いた参照視野の網膜照度 E は I, II ともに 2000 Td とした。これは瞳孔径 4 mm で輝度 500 cd/m^2 の明るさの発光面を観察しているのと同等となる。

また、増分閾の時間平均網膜照度 ΔE 、および等価となる時間平均照度 E_m の点滅光は、図 2 に示すように、on 成分がその 2 倍、明暗時間比が 1:1 として提示される。

森 峰生 1990 年、東京工芸大学大学院工学研究科画像工学修士課程修了。同年、同学工学部写真工学科助手。1993 年、早稲田大学大学院理工学研究科博士後記課程入学。1996 年、通信・放送機構早稲田リサーチセンター研究員となり、現在に至る。この間、視覚工学の研究に従事。正会員。

畑田 豊彦 1970 年、早稲田大学大学院理工学研究科応用物理学博士課程修了。同年、同学助手。NHK 放送技術研究所研究員を経て、1981 年、東京工芸大学工学部写真工学科 (現在、光工学科) 助教授。1982 年、同学教授となり、現在に至る。この間、視覚工学、3 次元画像の研究に従事。工学博士。正会員。

石川 和夫 1972 年、東京工芸大学工学部写真工学科卒業。同年、同学技術職員。同学助手を経て、現在、東京工芸大学工学部光工学科講師。この間、眼光学、照明環境、および視覚情報処理に関する研究に従事。

寺島 信義 1964 年、東北大学工学部通信工学科卒業。同年、NTT に入社。1991 年、ATR 通信システム研究所社長。1996 年、早稲田大学理工学総合研究センター教授となり、現在に至る。この間、人工知能、臨場感通信など次世代通信の研究に従事。工学博士。

大頭 仁 1956 年、早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年、東京大学生産技術研究所研究員。1957 年、早稲田大学理工学部助手。同年、ウィーン工科大学留学。1969 年、早稲田大学理工学部専任講師。助教授を経て教授となり、現在に至る。この間、生理光学、応用光学の研究に従事。Dr. tech.