

二重光における明るさ加重

滝 浦 孝 之

(受付 2004 年 10 月 12 日)

背 景 と 目 的

輝度が一定の光刺激を長時間持続視すると、その明るさは、ゆっくりとではあるが次第に低下するよう感じられる。この現象は網膜の明順応によるものである。また暗いところで照明をつけた場合、最初まぶしかった光も少し経つとまぶしさを感じなくなるが、これも同様の理由による。これらの体験を別にすると、われわれは日常生活の中で、輝度一定の刺激の明るさが時間とともに変化するのを意識することはない。しかし、熟練した被験者による実験室での注意深い観察により、光刺激の立ち上がり（出現）・立ち下がり（消失）直後には、わずかな期間ではあるが、明るさ、あるいは暗さの感覚が時間とともに何度か増減を繰り返す場合があることが明らかにされている。Figure 1 は Bidwell (1894) の観察結果である。このグラフでは、明るさ感覚の変化の山と谷の時間的な位置は近似的なものと考えざるを得ないが、明らかに刺激の立ち上がり後のわずかな時間内に、

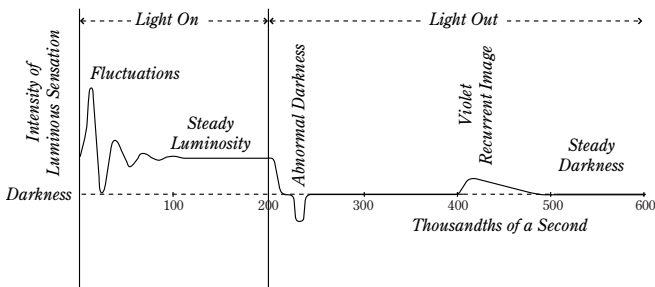


Figure 1. Rapid fluctuation of the brightness sensation just after the step-like luminance increment. Figure cited from Bidwell (1894).

明るさの感覚は波状に変動し、やがて一定となり、刺激の立ち下がりがまでそのレベルを維持することが示されている。瞳孔反応の潜時はおおむね 100 - 200 ms であり (清水, 1994), またその反応速度も比較的緩やかであるため (松永, 1990), この結果を瞳孔反応によるものと考えerことは不適切である。また光刺激の立ち下がりが直後における暗さの感覚においても、短期間での増減がみられることが Cogan (1989) により報告されている。

以上は、数百 ms と比較的持続時間の長い刺激を用いた場合の観察であるが、パルス光と呼ばれる数 - 数十 ms 程度の持続時間の刺激¹⁾ に対しては、より明瞭な形で振動的な明るさないし暗さの感覚が体験される。例えば、深い暗順応状態にある目にパルス光を提示した場合、陽性残像と陰性残像とが交互に繰り返し出現することは古くから知られている (Dittler & Eisenmeier, 1909; Fröhlich, 1921)。Dittler & Eisenmeier (1909) などは、実に 8 つの相よりなる残像を記述している。これらの残像強度は時間的に後のものほど弱くなり、またその持続時間も増加することが明らかにされている。

これらの現象は、刺激の立ち上がりないし立ち下がりに対する視覚系の応答が単一の相からなるものではなく、いくつかの正の相と負の相とが時間的に交替して出現する律動的なものであることを思わせる。二重光、すなわち網膜上の同一領域に継時的に提示される 2 つのパルス光に対する反応時間データから、パルス光に対する視覚系の応答が、少なくとも正 - 負 - 正の 3 つの相からなることを示した Ueno (1977) の結果は、この推測を強く支持するものである。またフリッカーに対する時間的変調感度や二重光に対する検出閾を求めた研究でも、閾レベルのインパルス入力に対して、視覚系は正 - 負 - 正の 3 相あるいはそれ以上の相からなる応答を生じることを示しているものがある (Stork & Falk, 1987; Uchikawa & Yoshizawa,

1) 持続時間の短い光刺激を指すのに、英語では flash ないし pulse of light という語が用いられるが、本稿ではこのような刺激をパルス光と、またそれにより惹起された知覚内容をフラッシュとそれぞれ呼称する。

1993; Uetsuki & Ikeda, 1970)。

パルス光の提示によって視覚系内に律動的な応答が惹起されることを、間接的ではあるが強く示唆する視覚的現象に、比較的最近 Bowen とその共同研究者により報告された“double-flash illusion”がある (Bowen, 1989; Bowen, Clingerman, Domanico & Eliot, 1986; Bowen, Mallow & Harder, 1987)。これは光刺激の立ち下がりからおよそ 70–200 ms 後に提示された単一パルス光が2つ以上のフラッシュとして、あるいは 50–200 ms 程度の提示時間差で同一網膜領域に提示された二重光が3つ以上のフラッシュとして知覚されるという現象であり、現象の強度やその時間的特徴における個人差はかなり大きいものの、刺激の空間的布置や持続時間等の条件の変化に対して比較的頑健である。Bowen (1989) は、double-flash illusion の生起するメカニズムについて次のように述べている。すなわち、パルス光によって視覚系内に引き起こされた応答は正の相と負の相とが時間的に交替する多相的なものであるが、振幅の大きな最初の正の相のみがフラッシュの知覚の基礎となり、振幅の小さな2番目以降の正の相は有意な視覚的効果を生じさせないため、われわれが単一パルス光に対して知覚するフラッシュは1個のみである。しかし、double-flash illusion の生ずる刺激事態では、パルス光に対して生じた多相性の応答と、減分ステップあるいは別のパルス光に対する多相性の応答とがほぼ in-phase となり、前者の2番目以降の正の相と後者の正の相との間で振幅の加算が生じ、それによって合成された応答の3つ以上の正の相の振幅がフラッシュの知覚に必要なレベルに達するために、知覚されたフラッシュの数が物理的なパルス光の数を上回る (Figure 2)。

in-phase の状態の2つの多相性応答の正の相の間で振幅の加算が生じるのであれば、2つの応答が out-of-phase となり、一方の応答の正の相と他方の応答の負の相とが時間的に重なった場合には、両者の間に抑制性の相互作用が生じると考えられる。この場合、パルス光の明るさが、そのパルス光により惹起された応答の正の相の振幅の大きさと直接的に関係するのな

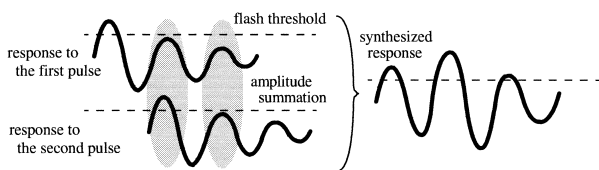


Figure 2. Schematic representation of the amplitude summation of the two multiphasic responses in phase under the condition where the double-flash illusion occurs. The response evoked by each pulse in the double pulse of light has only one positive lobe whose amplitude exceeds threshold of flash perception. The resultant synthesized response has three positive lobes with supraliminal amplitude.

らば、二重光の明るさは提示時間差の関数として波状に変化すると予想される。Baumgardt & Segal (1946) は、二重光間隔が非常に短い場合には明るさの増強が、また 50–100 ms 程度の間隔では明るさの低下がそれぞれ生じることを報告しており、また Bleck & Craig (1968) は、個人差は大きいとしながらも、この仮説を支持する結果を得ている。しかし一方で、ごく短い二重光間隔での明るさの加重以外に、二重光間隔が明るさに及ぼす効果を見出していない研究もまた存在する (Donchin & Lindsley, 1965; Stecher, 1967; Stecher, Sandberg & Minsky, 1970; Takiura, 2001)。

従って、二重光間隔が二重光の明るさに及ぼす影響はまだ十分明らかにされていないと言わざるを得ない。上記の研究では、いずれも明るさの測定には明るさマッチング法ないしマグニチュード推定法が用いられていたが、本研究では、これらの方法よりも明るさの増強の検出感度が高いとされる方法を用い、パルス光の提示時間差が二重光の明るさにどのような影響を及ぼすか検討した。

方 法

被 験 者

被験者は筆者自身および大学生の計 4 名であり、いずれも裸眼視力ないし矯正視力は正常であった。いずれの被験者も心理物理学的測定の経験を

有しており、測定に先立ち150回の練習試行が行われた。筆者以外の被験者は実験の目的を知らされていなかった。

装 置

刺激の提示は緑色 LED (SHARP LT9560E: 主波長 565 nm, 半値幅 12 nm) を光源とする 2 チャネルのマックスウェル視光学系が用いられた。実験の制御と反応の記録はパーソナルコンピュータ (NEC PC-9801US) によって行われた。

刺 激

刺激は直径 1.43°, 持続時間 10 ms の 2 個のパルス光よりなる二重光であり、その網膜照度は 743.9 td (輝度 236.9 cd/m²) および 74.4 td (同 23.7 cd/m²) であった。刺激の観察は右眼により行われた。暗順応条件では刺激の上下左右 0.5° の位置に暗い赤色小光点が定常的に提示され、被験者はそれらを頂点とする仮想的な菱形の対角線の光点を注視するよう求められた。明順応条件では二重光と空間的に重畳する 15.1 td (輝度 4.8 cd/m²) の背景が定常的に提示された。

手 続 き

SOA の変化に伴う二重光の明るさの変化は、Bowen & Pokorny (1978) が、単一パルス光の持続時間の変化に伴う明るさの変化を検討するために用いたものと同様な方法により検討された。

警告音の 2 秒後に SOA が 100 ms の二重光が提示され、その 1 秒後に 2 つの二重光が 1 秒間隔で提示された。後の 2 つの二重光のうち、一方の SOA は他方の SOA (25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300 ms) に 50 ms を加えた値に設定された。50 ms という SOA の差は、5 ms ないし 10 ms の 2 つのパルス光に対して double-flash illusion が生起する最適 SOA が約 100 ms であり (Bowen, 1989; Takiura, 2001), 従って

本実験で用いられた 10 ms のパルス光によって惹起される律動的応答の周波数は 10 Hz 程度と予想されたために採用された。

この二重光の対の提示順序, およびそれぞれの対の中でどちらの二重光を先に提示するかはランダムに決定された。

被験者の課題は, 継時的に提示される 3 つの二重光の最初のもの無視し, 残りの 2 つのうち, より明るい判断されるものを強制選択することであった。被験者は二重光の明るさを, 2 つのパルス光の全体に対して判断するよう求められた。この手続きに対しては, 刺激が明確に分離して知覚された場合に, 明るさの判断の対象が被験者間で統制されていないという批判が加えられるかもしれないが, 二重光が 2 つの独立したフラッシュとして知覚される場合には, 二重光の明るさの評価はより明るいフラッシュの明るさに基づいて行われるという仮定に基づき, この教示が採用された。Bleck & Craig (1968) の実験では, 二重光事態において, 第 1 フラッシュの明るさはパルス光の提示時間差の影響を受けず, 従って二重光の明るさに変化がみられるならば, それは第 2 フラッシュの明るさの変化に帰せられると仮定し, 本実験と同様の教示が被験者に与えられた。

結果はコンピュータのマウスのボタンをクリックすることにより報告された。1 人の被験者につき, 1 つのセッションでのそれぞれの SOA における判断回数は 10 回であった。セッションは被験者ごとに 5 回繰り返された。

結 果

横軸を二重光の対の短い方の SOA, 縦軸を SOA の短い二重光がより明るい判断された試行の割合として結果を図示した場合, 予想されるグラフは 2 種類のもので区別される。SOA の短い領域でのみ明るさの加重が生じる場合に予想されるグラフを Figure 3(a) に, SOA の変化に伴い二重光の明るさが波状に増減する場合に予想されるグラフを Figure 3(b) にそれぞれ示す。Figure 3(a), Figure 3(b) とともに, 上のグラフは SOA の変化に

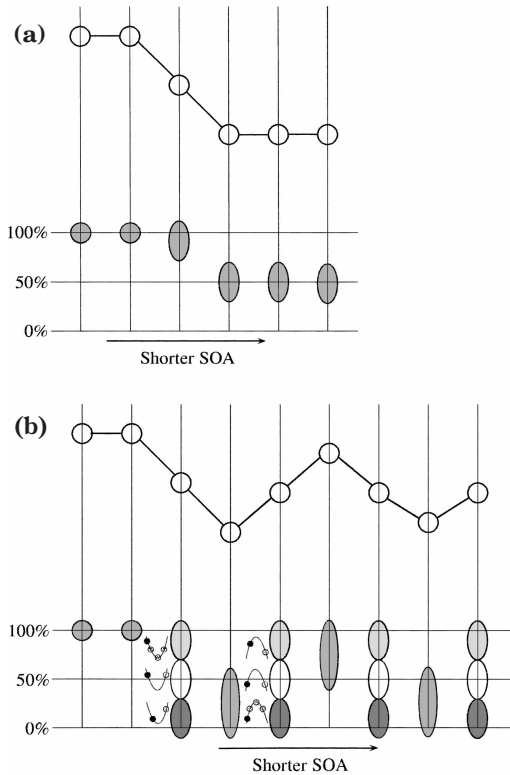


Figure 3. Two types of the hypothetical result to be expected in the present experiment for the brightness change of the double pulse of light with SOA. (a) Hypothetical outcome for the nonoccurrence of oscillatory change in brightness. (b) Hypothetical outcome for the occurrence of oscillatory change in brightness. See text for detail.

伴う二重光の明るさの変化を示し、下のデータポイントの並びは結果のグラフを示す。データポイントが縦軸方向に伸びた楕円形をしているのは、誤差の範囲を考慮したためである。

Figure 3(a) によると、二重光の2つのパルス光の間における明るさの加重が SOA の短い領域でのみ生じる場合には、結果のグラフは、SOA が短い場合には100%付近の値を取るが、SOA が長くなると低下し、その後

50%付近の値を取る。この場合、グラフの値が50%を有意に下回ることはない。一方、SOA の変化に伴い二重光の明るさが波状に増減する場合には、Figure 3(b) に示すように、結果のグラフには50%を下回る領域が出現する。対をなす二重光の SOA のうち短い方の増加に伴い、予想される結果のグラフは初め100%の値を取り、二重光の明るさの減少中には50%付近、あるいはその上下の値を取る。すなわち、SOA の短い方の二重光が SOA の長い二重光より明るいと判断された場合には、データポイントは50%と100%の間の値を取り、前者と後者が同じ明るさと判断された場合には50%付近の値を取り、後者が前者よりも明るいと判断された場合には0%と50%の間の値を取ると予想される。データポイント脇の差込図はこの様子を示したものである。SOA の短い方の二重光の明るさが極小となれば、データポイントは0-50%の値を取り、極大となれば50-100%の値を取る。ただし、二重光の明るさの増減の程度は SOA の増加とともに減少するため、これらの値は次第に50%に近づく。

結果を Figure 4 に示す。この場合、二重光に対する明るさの増強は、縦軸の値が50%を上回るにより示される。

結果には個人差が大きい。暗順応条件においては、SOA が短ければ、SOA がより短い二重光の方が明るく感じられた。これは明るさの加重が生じたことを意味する。明るさの加重の程度は、SOA が 50 ms まではあまり変化がなく、SOA がそれを超えると大きく減少したが、SOA が 100-150 ms までは認められた。SOA がそれ以上では、二重光の明るさは SOA の影響を受けなかった。これらの結果は二重光の網膜照度から独立であった。

明順応条件では SOA が 50 ms ですすでに明るさが大きく減少したが、明るさの加重の生じる SOA の範囲は暗順応条件より広く、SOA が 200 ms 付近まで明るさの加重が生じた。被験者 HM では SOA が 50 ms の場合にグラフに急激なアンダーシュートが生じたが、これは他の被験者では見られなかった。

滝浦：二重光における明るさ加重

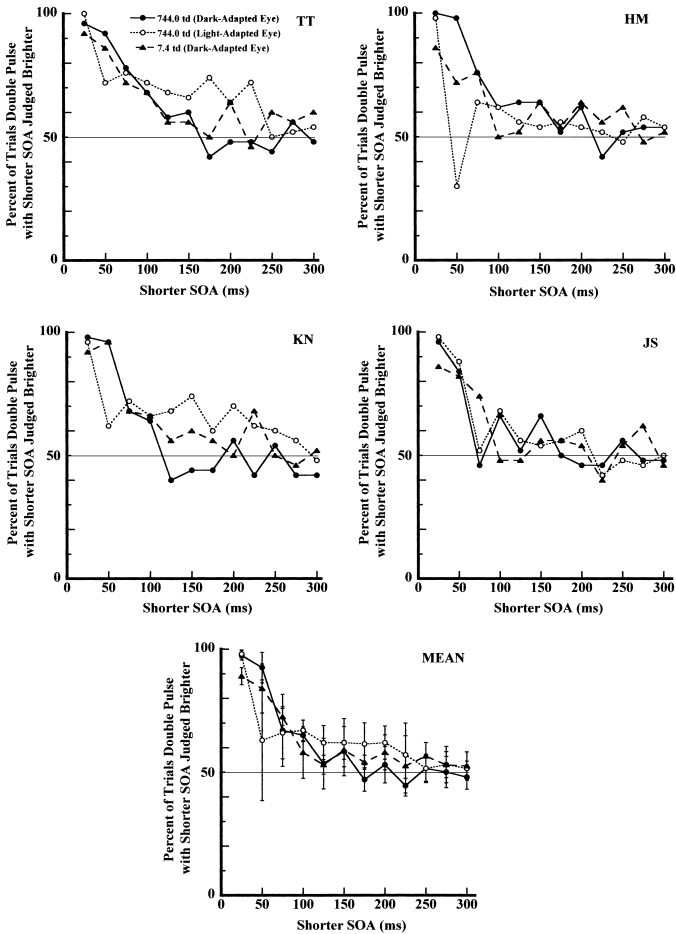


Figure 4. Percent of trials in which the double pulse of light with shorter SOA by 50 ms was judged to be brighter as a function of shorter SOA.

本実験では、暗順応条件、明順応条件のいずれにおいても、グラフは Figure 3(a) で予想された形状となり、二重光の明るさは SOA の関数として波状に変化するのではなく、SOA が短ければ明るさの加重が生ずるが、SOA が長ければ一定となることを示す結果となった。

極限法により測定された二重光融合閾を Figure 5 に示す。(a) は二重光

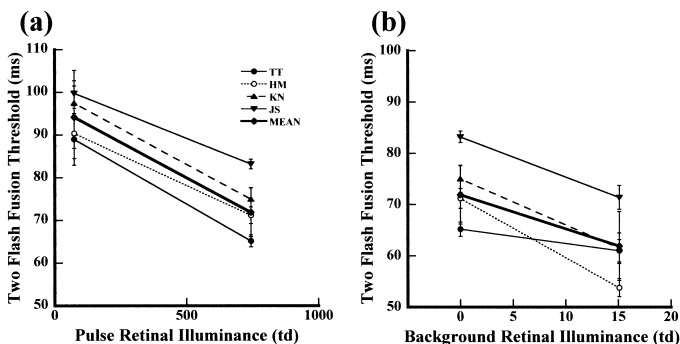


Figure 5. Two flash fusion threshold under the present stimulus condition. (a) Thresholds for double pulses of light of 74.4 td and 743.9 td in retinal illuminance. (b) Thresholds for double pulses of light of 743.9 td with and without the background of 15.1 td.

の網膜照度が 74.4 td と 743.9 td の場合の閾値を示し、また (b) は背景なしの場合と 15.1 td の背景を提示した場合の閾値を示す。各被験者のグラフの 1 つのポイントは 10 個の測定値に基づく。このグラフから、被験者 JS を除く 3 名の被験者では、二重光が融合して知覚される場合だけでなく、分離して知覚される場合にも、明るさの加重が弱いながらも生じていることが示された。

考 察

今回の実験では、SOA の変化に伴う二重光の明るさの変化は、先行パルス光に対する多相性の応答と後続パルス光に対するその前期成分同士の振幅の加算により生じることを示唆する結果が得られた。しかし二重光の明るさは SOA の増加とともに波状に増減するという Bleck & Craig (1968) の結果は確認されず、double-flash illusion により示唆されるような、先行パルス光に対する応答の後期成分と後続パルス光に対する応答の相互作用の証拠は見出すことができなかった。この結果は、2 つの 10 ms のパルス光に対する明るさを明るさマッチング法により測定した Donchin & Lind-

sley (1965), Stecher (1967), Stecher, Sandberg & Minsky (1970), および Takiura (2001) の結果と合致する。また, Schneider & Bartley (1966) と Takiura (1998) は, 中程度の周波数のフリッカーに対する明るさ増強効果 (Brücke-Bartley 現象) は, 持続時間が一定 (5 ms ないし 20 ms) のパルス光列に対しては認められないことを報告しているが, この結果も本実験での結果と同様に, フラッシュ間での明るさの加算の程度は SOA とともに波状に変化しないことを示すものである。この場合, パルス光の数が増加すると, 応答が正の相単独となり, そのためパルス光列に対しては明るさの増強が生じなくなるとする考えは妥当ではない。なぜなら, Ikeda & Fujii (1966) は 3 ないし 4 個のパルス光に対する閾レベルでのインパルス応答は, 二重光事態でのそれと同じく正負 2 つの相よりなることを示しており, また閾レベルでの応答は閾上レベルでの応答の振幅が減少した形状をしていると考えられるからである。

以下では, Bleck & Craig (1968) の実験と本実験での結果の矛盾の原因について考える。

まず, Bleck & Craig (1968) では直径 1° の二重光とマッチング刺激の中心が 6° 離れて提示されていたのに対して, 本実験での刺激は全て中心窩に提示されたという違いがある。しかし Bleck & Craig の実験の被験者も, 実際には二重光とマッチング刺激の両方を中心視で観察していた可能性がある。Bleck & Craig の実験では注視点を用いておらず, マッチング刺激が定常的に提示され, 二重光も常に網膜上の同じ領域に提示されたため, 明るさマッチングを行う際に被験者の眼球運動が生じていたかもしれないのである。Rabelo & Grüsser (1961) は, 空間的に離れた断続光と定常光の 2 つの刺激の間で明るさマッチングを行う場合, 注視点を設けていなければ, 被験者は 2 つの刺激を交互に観察してマッチングを行う傾向があることを報告している。

次に, 本実験での明るさの比較の対象であった 2 つの二重光の SOA における 50 ms という差が, 本実験でのパラダイムで二重光の明るさの変化を

検出するのに適切な値ではなかったという可能性が考えられる。そこで SOA の差を 25 ms と 100 ms の 2 種類に設定し、744.0 td の二重光を暗順応眼に提示して実験を行った。結果を Figure 6 に示す。Figure 6 に示されたグラフは、Figure 4 に示されたものと同様に、波状的変化を示しておらず、本実験の結果の特徴は、二重光の対の SOA の差の値による影響を受けないといえる。

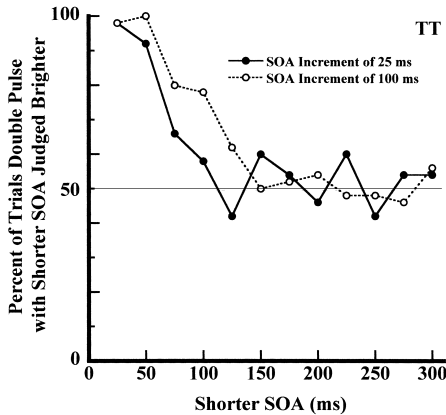


Figure 6. Results with shorter SOAs by 25 ms and 100 ms.

また、本研究をはじめ、Bleck & Craig (1968) の結果に否定的な結果の得られた諸研究において用いられた二重光のそれぞれのパルス光の持続時間の値は、10 ms ないし 20 ms であり、これは Bleck & Craig の実験での 25–75 ms という値よりかなり小さい。パルス光の明るさは、その持続時間とともに増加し、本実験での刺激の網膜照度である 743.9 td に近い強度水準の刺激では、50–100 ms 付近で最大となることが知られている (Aiba & Stevens, 1964; Katz, 1964; Stecher, Sandberg & Minsky, 1970; Takiura, 1998)。パルス光の明るさが応答の振幅と関係しているならば、パルス光の持続時間が増加するにつれ、応答の振幅も増大するが、この場合、フラッシュの知覚を生じさせる最初の正の相だけでなく、それに続く閾下振幅の

いくつかの正の相の振幅も増大すると考えられる。従って、本実験で用いられた 10 ms という持続時間のパルス光では、惹起された多相性の応答の後期成分の振幅が小さいために、二重光の SOA が大きい場合に、パルス光間での応答の振幅の加算の程度が有意な明るさの変化を生じさせるレベルのものではなかった可能性もある。しかし、Figure 7 に示すように、パルス光の持続時間が 50 ms の場合でも、パルス光が 10 ms の場合に比べ、グラフの特徴は変化しなかった。従って刺激の持続時間の違いも、本研究と Bleck & Craig の研究とでの結果の違いを説明するものではない。

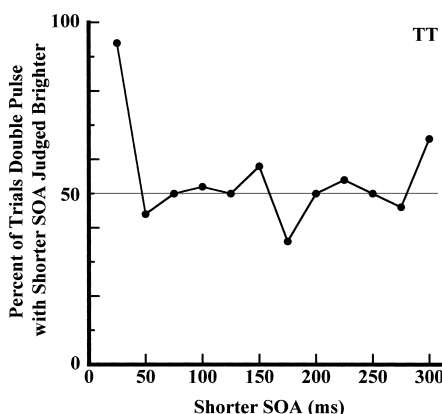


Figure 7. The result with light pulses of 50 ms in duration.

本実験での被験者の課題は、Bleck & Craig (1968) で採用された 2つの刺激間の明るさマッチングではなく、2つの刺激のうちより明るいと判断されるものを強制選択することであった。しかしこの課題の違いも、Bleck & Craig の結果とわれわれの結果との違いの原因とは考えにくい。なぜなら、Takiura (2001) は、本実験と類似した刺激事態で明るさマッチング法を用い、SOA の変化に伴う二重光の明るさの変化は波状的なものではなく、本実験で見出されたような単調減少的なものであることを報告しているからである。2つの刺激間での明るさマッチングと明るさの弁別という 2種類

の課題は、特定の心理物理学的課題の遂行に要求される刺激の観察に関して Boynton & Onley (1962) の提唱した分類では、いずれも Class IV observation という同一のカテゴリに含めうる。

以上のように、Bleck & Craig (1968) と本実験での結果の相違を生じさせた原因については今のところ明らかではない。Bleck & Craig の実験と同一の刺激事態での再検討が望まれるわけであるが、残念なことに、彼らの論文には、刺激と背景の正確な輝度が記載されていない(ただし、刺激の輝度に関しては、マッチング刺激の輝度変化範囲の記述から 100 cd/m^2 程度と推測される)など、実験手続きの記述にやや不明な点があり、追試を困難にしている。

今回の実験では double-flash illusion の同時測定を行っていなかった。今後は double-flash illusion の生起との関係で二重光の明るさの問題を検討する必要がある。

引用文献

- Aiba, T. S., & Stevens, S. S. (1964). Relation of brightness to duration and luminance under light- and dark-adaptation. *Vision Research*, 4, 391–401.
- Baumgardt, E., & Segal, J. (1946). La fonction inhibitrice dans le processus visuel. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de la Société de Biologie et de ses Filiales et Associées*, 140, 231–233.
- Bidwell, S. (1894). On the recurrent images following visual impressions. *Proceedings of the Royal Society of London*, 56, 132–145.
- Bleck, F. C., & Craig, E. A. (1968). Brightness of paired photic pulses with pulse duration and separation varied. *Perception & Psychophysics*, 4, 257–260.
- Bowen, R. W. (1989). Two pulses seen as three flashes: a superposition analysis. *Vision Research*, 29, 409–417.
- Bowen, R. B., Clingerman, S., Domanico, R., & Eliot, B. (1986). Individual differences in the perception of the double flash illusion. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 27, Supplement (ARVO), 72.
- Bowen, R. W., Mallow, J. V., & Harder, P. J. (1987). Some properties of the double-flash illusion. *Journal of the Optical Society of America, Series A*, 4, 746–755.

- Bowen, R. W., & Pokorny, J. (1978). Target edge sharpness and temporal brightness enhancement. *Vision Research*, **18**, 1691–1695.
- Boynnton, R. M., & Onley, J. W. (1962). A critique of the special status assigned by Brindley to “psychophysical linking hypotheses” of “class A.” *Vision Research*, **2**, 383–390.
- Cogan, A. I. (1989). Anatomy of a flash. 1. Two-peak masking and a temporal filling-in. *Perception*, **18**, 243–256.
- Dittler, R., & Eisenmeier, J. (1909). Über das erste positive Nachbild nach kurz-dauernder Reizung des Sehorganes mittels bewegter Lichtquelle. *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*, **126**, 610–647.
- Donchin, E., & Lindsley, D. B. (1965). Retroactive brightness enhancement with brief paired flashes of light. *Vision Research*, **5**, 59–70.
- Fröhlich, F. W. (1921). Untersuchungen über periodische Nachbilder. *Zeitschrift für Sinnesphysiologie*, **52**, 285–292.
- Ikeda, M., & Fujii, T. (1966). Diphasic nature of the visual response as inferred from the summation index of n flash. *Journal of the Optical Society of America*, **56**, 1129–1132.
- Katz, M. S. (1964). Brief flash brightness. *Vision Research*, **4**, 361–373.
- 松永勝也 (1990). 瞳孔運動の心理学 ナカニシヤ出版
- Rabelo, C., & Grüsser, O. -J. (1961). Die Abhängigkeit der subjektiven Helligkeit intermittierender Lichtreize von der Flimmerfrequenz (Brücke-Effekt, brightness enhancement) : Untersuchungen bei verschiedener Leuchtdichte und Feldgröße. *Psychologische Forschung*, **26**, 299–312.
- Stork, D. G., & Falk, D. S. (1987). Temporal impulse responses from flicker sensitivities. *Journal of the Optical Society of America, Series A*, **4**, 1130–1135.
- 清水 豊 (1994). 瞳孔の運動 大山 正・今井省吾・和気典二 (編) 新編感覚・知覚心理学ハンドブック 誠信書房 Pp. 895–900.
- Schneider, C. W., & Bartley, H. (1966). Changes in sensory phenomena and observer criteria at low rates of intermittent photic stimulation. *Journal of Psychology*, **63**, 53–66.
- Stecher, S. (1967). Discrimination of luminance differences between temporally separated paired flashes. *Journal of the Optical Society of America*, **57**, 1271–1272.
- Stecher, S., Sandberg, M., & Minsky, P. J. (1970). Successive luminance difference thresholds and brightness as a function of the interstimulus interval and duration of successive flashes. *Perception & Psychophysics*, **7**, 79–85.

- Takiura, T. (1998). A relationship between the brightness enhancement in extrafovea and the on-responses estimated by the visual masking technique. *Tohoku Psychologica Folia*, **57**, 58–74.
- Takiura, T. (1999). Brightness enhancement for flash is due to both flash duration and frequency. *Tohoku Psychologica Folia*, **58**, 78–90.
- Takiura, T. (2001). The double-flash illusion: partial evidence for summation of two oscillatory response in phase. *Tohoku Psychologica Folia*, **60**, 1–19.
- Uchikawa, K., & Yoshizawa, T. (1993). Temporal responses to chromatic and achromatic change inferred from temporal double-pulse integration. *Journal of the Optical Society of America, Series A*, **8**, 1697–1705.
- Ueno, T. (1977). Temporal characteristics of the human visual system as revealed by reaction time to double pulses of light. *Vision Research*, **17**, 591–596.
- Uetsuki, T., & Ikeda, M. (1970). Study of temporal visual response by the summation index. *Journal of the Optical Society of America*, **60**, 377–381.

Summary

Brightness of double pulse of light with variable pulse separation

Takayuki Takiura

Brightness change of the double pulse of light as a function of pulse separation was investigated. Brightness summation occurred only with shorter pulse separation. No brightness enhancement was observed with pulse separation beyond 100–150 ms. These results suggest that with double pulse stimulation the amplitude summation does not yield the significant brightness increase between the later positive phases in the oscillatory response for the preceding pulse of light and the earlier positive phases in the response for the succeeding one.