

## 事象関連電位によるデルブーフ錯視の検討(5)

—内円が分割，短縮する条件における脳の応答について—

今 井 章（信州大学人文学部）

キーワード：幾何学的錯視，デルブーフ錯視，事象関連電位，N1 振幅，N2 振幅，P3 振幅

### DELBOEUF ILLUSION INVESTIGATED BY THE EVENT-RELATED POTENTIALS: BRAIN RESPONSES UNDER A CONDITION OF SPLIT AND REDUCED INNER CIRCLE

AKIRA IMAI

Department of Psychology, Faculty of Arts, Shinshu University

Key words: geometrical-optical illusion, Delboeuf illusion, event-related potentials (ERPs), N1 amplitude, N2 amplitude, P3 amplitude

### 問 題

これまで筆者らは，いわゆる幾何学的錯視（以下，錯視と記述）の神経基盤を探る試みをデルブーフ錯視（Delboeuf illusion）について行ってきた。デルブーフ錯視とは，その中心的構成要素としての2重同心円が左右に配置された単円との比較において，内円と外円との直径比2/3の場合に極大的に内円が過大視，外円が過小視される錯視である。この錯視は，後藤を中心とした研究グループにより“3種類の成立要因（同化・対比／空間・位置／角度・方向）の特徴的な組み合わせによって合理的に説明できる”と提唱された3要因相互作用モデル（後藤，2008；後藤・甲村・大屋・寺本・丸山・久世・高橋，2005；Goto, Uchiyama, Imai, Takahashi, Hanari, Nakamura, & Kobari, 2007）では，同化・対比の軸上に“他の要因の影響”をほとんど受けることなく配置されている図形（後藤・甲村他，2005）である。すなわち，デルブーフ錯視は同化・対比の成立要因が顕著に大きい錯視図形（後藤・内山・今井・高橋・羽成・中村・小針，2005）であり，他の要因からの複合的影響を考慮する必要のない，もっぱら同化と対比という要因に絞ってその効果を検討することが可能な錯視図形である。しかも，デルブーフ錯視では，内円の縮小，あるいは外円の拡大に伴い，同化の影響が弱まる一方で対比の影響が強くなっていくという，同化から対比へのダイナミックな変換過程が認められるというユニークな特徴がある。そして，この同化から対比への変

換過程には、何らかの神経生理学的背景メカニズムの存在が推定されるが、いまだ未確定である。

このような問題意識から、我々はデルブーフ錯視を検討対象として、その刺激を観察する場面における事象関連電位 (event-related potential; ERP) を測定し、同化と対比という成立要因に関わる脳の神経的応答について検討してきた (今井, 2012, 2013; 今井・後藤, 2009, 2010)。その結果、同化過程のみが関与していると考えられる観察場面 (今井・後藤, 2009) では、前頭部から中心部に優勢な P3 振幅が、閾値付近の刺激ステップに対して減少し、刺激ステップが閾値から離れるにつれて増強することが示された。また、外円の直径を徐々に拡大させていった場合 (今井・後藤, 2010) では、同化から対比への変換に伴い錯視量が内円に対する過大視から過小視へと移行した結果としての精神測定関数と、中心部から頭頂部に優勢な P2 振幅値がよく対応することが示された。加えて、内円が縮小し内外円ともに同化の影響が対比へと変換していく事態についての検討 (今井, 2012) では、一貫して外円に対する過小視、すなわち同化の顕著な影響が認められ、この事態においては、前頭部から中心部にかけての N1 振幅、および中心部から頭頂部にかけての P3 振幅が、精神測定関数とよく対応していた。さらに、今井 (2013) では、外円周長が分割・短縮され、完全円から 4 分割された縮小円へと変換する刺激系列を提示して検討したところ、外円が完全円の場合は内円に対する過大視、すなわち同化の影響が強いが、外円が分割され円周長が徐々に縮小していくと内円に対する過小視傾向が現れ、対比への変換過程が生じていた。この条件下では、前頭部から中心部における N1 と P2 振幅、および中心部から頭頂部における P3 振幅の関与が示唆された。しかし、得られた精神測定関数との対応という点からは、N1 および P2 振幅のほうが P3 振幅よりも一致しており、同化と対比の変換過程への対応に関して ERP 成分による差異があることが示唆された。

本研究では、今井 (2012, 2013) および今井・後藤 (2009, 2010) に引き続き、同化・対比の成立要因が顕著に大きいデルブーフ錯視を対象として、この錯視図形を観察させながら ERP を測定し、同化と対比という成立要因に関わる脳の神経基盤を探ることとした。本研究では、今井 (2013) の検討で残された課題である、デルブーフ錯視を構成する同心円の内円を分割し、その円周長が縮小する刺激図形を用いて、同化が最も顕著に生ずる内外円比  $2/3$  の完全同心円から、内円の円周長が  $1/18$  まで短縮する図形を作成して検討することにした。この事態で ERP を取得すれば、完全同心円では同化が最も顕著に作用すると考えられることから、この事態から内円が短縮していくことにより、同化の影響が徐々に低下すると思われる。この事態で外円に対する反応を取得すれば、精神測定関数としては外円に対する過小視 (同化) から過大視 (対比) への変換を示す曲線が得られるであろう。この時、同化の影響力の低下に応じた ERP 成分の変動が確認できると考えられる。

## 実 験

### 方 法

**実験参加者** 矯正を含め視力、および色覚が健常な大学生 4 名 (男性 3 名, 平均 20.0 歳) が実験に参加した。なお、いずれの参加者も錯視についての知識は有していたが、このよう

な実験に参加することは初めてであった。

**刺激** 内外円比が $2/3$ の、内外円ともに完全円からなる $360^\circ$ 条件、内円周長が $60^\circ$ ずつ4分割され、内円周長が全体では $240^\circ$ に短縮される $240^\circ$ 条件、同様に $45^\circ$ ずつ4分割される $180^\circ$ 条件、 $30^\circ$ ずつ4分割される $120^\circ$ 条件、 $5^\circ$ ずつ4分割される $20^\circ$ 条件を設定し、それぞれを標準刺激とした。したがって、標準刺激とした各条件の分割された内円の総円周長は、完全円に対して、 $12/18$ 、 $9/18$ 、 $6/18$ 、 $1/18$ となっていた。標準刺激の左右いずれかの位置に、円の中心点間距離で視角 $3.0^\circ$ 離れた位置に比較刺激として単円を提示し、デルブーフ錯視図形を構成した。標準刺激はPC (NEC-PC9801vm)によりカラーCRT上の黒色背景 ( $0.02 \text{ cd/m}^2$ )に白色 ( $20.0 \text{ cd/m}^2$ )で描き、直径で視角 $1.0^\circ$ で外円を、 $0.67^\circ$ で内円を提示した。比較刺激としての単円は常に視角 $1.0^\circ$ で提示した。以上のように、完全同心円、および内円周が4分割されて短縮された4種類を併せて計5種類のデルブーフ錯視図形を作成した。

**脳波の記録と解析** 国際10—20法により正中線上の前頭部 (Fz)、中心部 (Cz)、頭頂部 (Pz)、および後頭部 (Oz) から両耳朶連結基準でポリグラフィシステム (日本光電 RMP-6000) を用いて導出した。銀—塩化銀 (Ag-AgCl) 電極を電極糊 (日本光電 Elefix) を介して頭皮上に配置し、さらに垂直水平成分の眼球静電図を、右眼窩上下部位と左右の外眼角に配置した電極より記録した。各電極間抵抗は  $5 \text{ K}\Omega$  以下とし、生体電気用アンプ (日本光電 AN-621G) により  $0.08\text{—}100 \text{ Hz}$  の帯域アナログフィルターと  $60 \text{ Hz}$  のハムフィルターを介して増幅した。刺激提示前  $200 \text{ ms}$  から刺激提示後  $800 \text{ ms}$  までの間を、サンプリング周波数  $500 \text{ Hz}$  で収録・解析ソフト (キッセイコムテック EPLYZER II) により A/D 変換後、PC (Dell Vostro200) に記録しオフライン処理した。脳波は各部位、各標準刺激、および外円に対する判断結果 (大/小) ごとに加算平均した。

**手続** 電極装着後、参加者に以下のような教示を行った。参加者の課題は、標準刺激 (同心円) と比較刺激 (単円) とを比較し、比較刺激が標準刺激の外円に対して“大きい”か“小さい”かの判断をキー押しによって行うことであった。恒常法を用い、まず第1刺激として標準刺激をCRT中央部に  $500 \text{ ms}$  提示した後、第2刺激として比較刺激を標準刺激と共に、左右いずれか中心点間距離で  $3.0^\circ$  離れた位置に  $150 \text{ ms}$  提示した。その後、 $1000 \text{ ms}$  のブランク画面を経てキー押しを促す画面が提示され、参加者にはこの画面提示後にキー押しを行わせた (Figure 1)。参加者は常に“比較刺激が標準刺激の外円と比較して大きいか小さいか”を2件法で判断し、大小判断それぞれに該当するPC用キーボードにより左手人差し指と右手人差し指でキー押しをして回答した。左右のキーに大小判断のどちらを割り当てるかは、参加者間でカウンターバランスを図った。標準刺激は5種類であり、これらが各6回ずつランダムに提示され、計30試行で1ブロックを構成した。比較円は1つのブロック内では一貫して左、または右のどちらか一方にのみ提示された。参加者はブロック間に適宜、休憩を挟みながら左に比較円が提示される6ブロック、右に提示される6ブロックを、カウンターバランスしながら計12ブロック行った。本試行の前には、練習として10試行を行った。

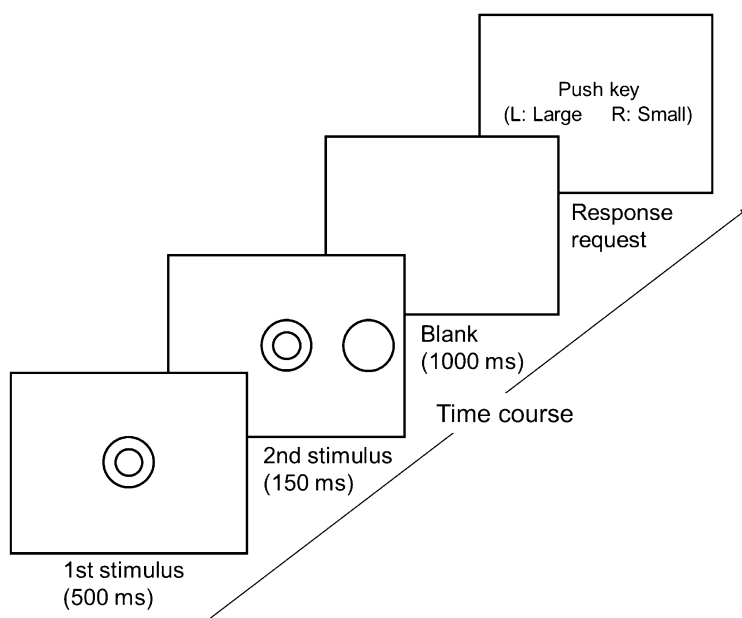


Figure 1 Schematic illustration of stimulus presentation and its time course. The first stimulus (concentric circle) is presented for 500 ms duration, which is followed by the second stimulus of 150 ms duration. After the 1st and 2nd stimulus presentations, a blank screen appears for 1000 ms. At the end of the blank screen, a response by key pressing is prompted. The figure shows as an example of the stimulus condition of 360° for inner circle.

## 結 果

### 1. 大小判断による精神測定関数

Figure 2 には、4 名の平均である精神測定関数が示されている。比較円に対する大小反応率は、360° 条件ではほぼ“大”反応であり、この完全な同心円が提示された条件で外円が過小視、すなわち同化の影響がみられているといえる。しかし、内円の円周長が分割、短縮していく 240° 条件以降は大反応が減少し、“小”反応へと完全に変換はしないものの、大小反応が拮抗する漸近線レベルに到達していることが認められる。このことから、内円の円周長が分割、短縮する条件では、外円の過小視は過大視へと変換しなかったといえる。したがって、見えの結果としては、360° 条件では同化による外円の過小視がみられ、過小視の反応率は低減するものの、その傾向が 20° 条件まで維持されていたと思われる。

反応率を角変換後、内円周長を要因とした 1 要因分散分析を行ったところ有意 ( $F(4, 12)=12.75, p<.001$ ) となり、360° 条件が他の 4 条件と比較して有意に反応率が大きかった。

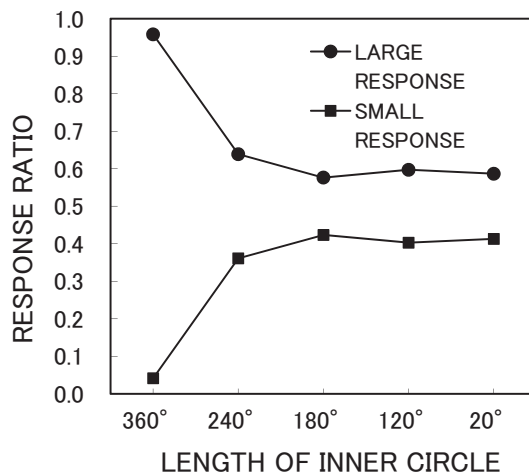


Figure 2 Psychometric functions obtained for a combination of length of inner circle shown by the degree.

## 2. 事象関連電位

脳波は、頭皮上の各部位、標準刺激の内円周長条件、および判断結果ごとに、刺激提示前200 ms から提示後800 ms までを加算平均し、ERP の波形を得た。

なお、Figure 2 に認められるように、参加者による判断結果である大小反応率は、内円周長が360° から20° 条件まで“大”反応が優勢であったことから、分析対象とした ERP は各条件において多数の反応が得られた反応カテゴリーについてのみとした。すなわち、いずれの条件でも“大”反応について得られた ERP を分析対象とした。

上述のことから、Figure 3 には各部位における、各円周長条件における大反応に対する ERP の総平均波形を示してある (Figure 3a ~ 3e)。

得られた ERP の波形から、今井 (2013) と同様、刺激提示後110—200 ms に出現した陰性方向への成分を N1, 210—260 ms に出現した陽性方向への成分を P2, 400—600 ms に出現した陽性方向への成分を P3 とし、刺激提示前200 ms の平均電位をベースラインとしてこれらの区間内のピーク振幅を求めた。これらの平均振幅をプロットしたものが、Figure 4 ~ 6 に示されている。

**N1 振幅** N1 振幅について内円周長—判断の組み合わせ (360°, 240°, 180°, 120°, 20°) × 部位 (Fz, Cz, Pz, Oz) の分散分析を行った。その結果、内円周長—判断の組み合わせの主効果 ( $F(4, 12)=3.32, p<.05$ )、および部位の主効果 ( $F(3,9)=12.15, p<.01$ ) が有意であった (Figure 4)。下位検定を行ったところ、内円周長—判断の組み合わせの主効果については有意な比較結果が得られなかった。部位の主効果については、Oz 振幅が Fz および Cz の振幅に比較して有意に増大していた。

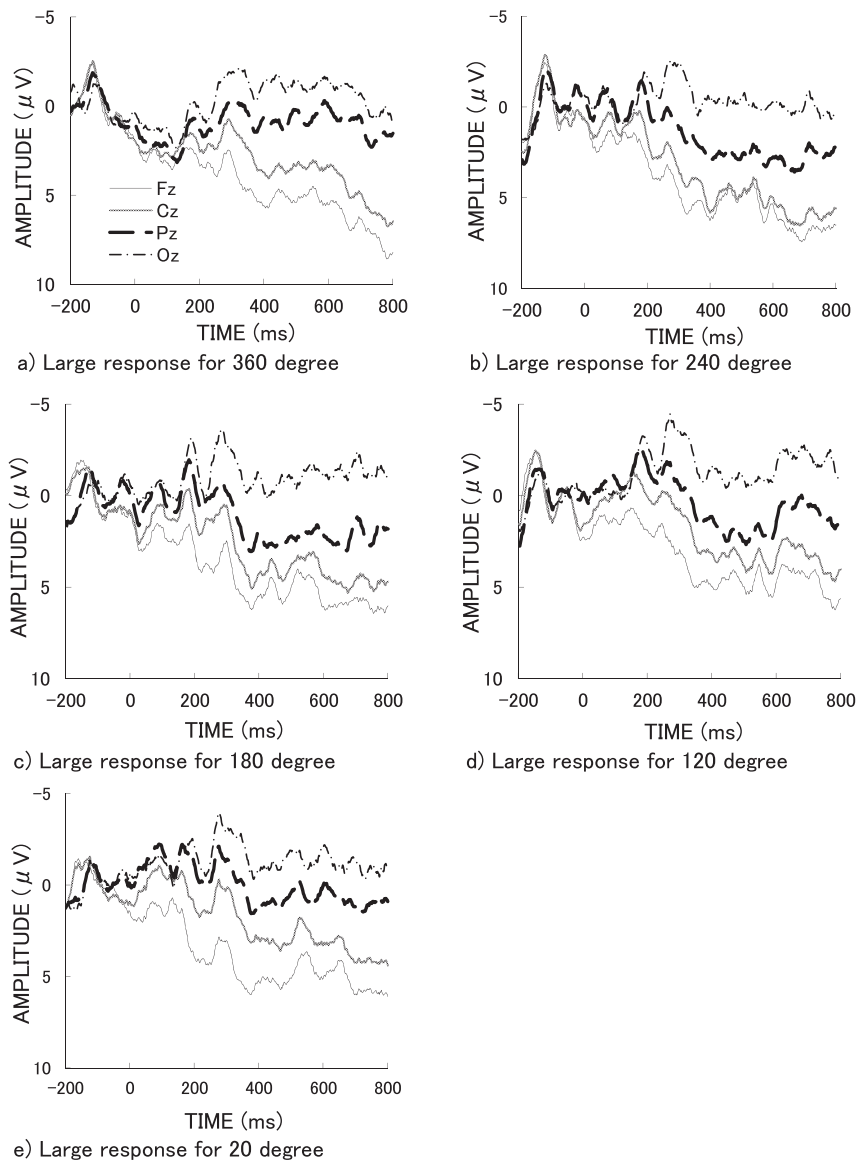


Figure 3 Grand averaged wave forms of ERPs at each scalp site obtained for a combination of length of inner circle shown by the degree.

**P2 振幅** N1 振幅と同様に、内円周長一判断の組み合わせ×部位の分散分析を行ったところ、部位の主効果 ( $F(3,9)=16.81$ ,  $p<.01$ ) のみが有意であった (Figure 5)。下位検定を行ったところ、Fz における振幅は Cz, Pz および Oz における振幅に比較して有意に増大していた。また、Cz と Oz との間にも有意差が認められた。

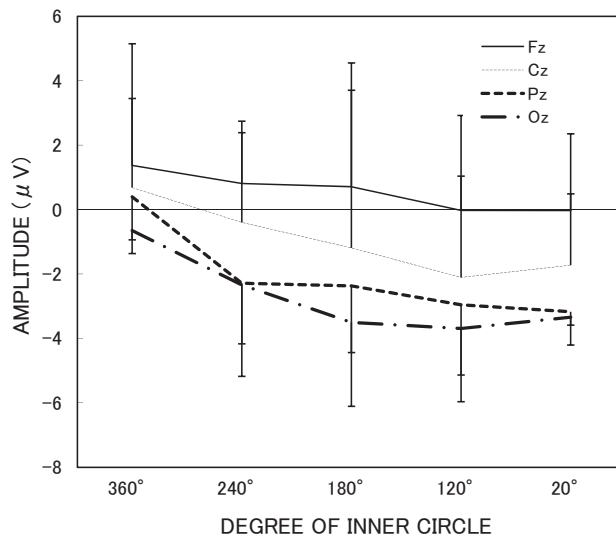


Figure 4 Mean amplitudes of N1 component at each scalp site obtained for a combination of length of inner circle shown by the degree. A vertical line of each data point is a standard error of mean.

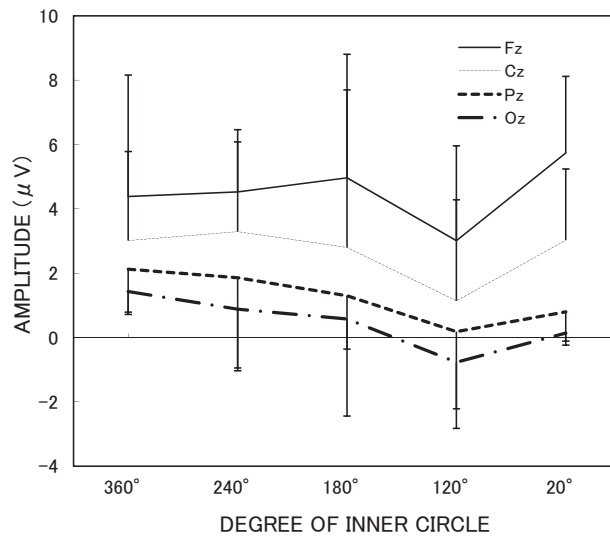


Figure 5 Mean amplitudes of P2 component at each scalp site obtained for a combination of length of inner circle shown by the degree. Others are the same as in Figure 4.

**P3 振幅** N1 振幅と同様に、内円周長—判断の組み合わせ×部位の分散分析を行ったところ、部位の主効果 ( $F(3,9)=9.23$ ,  $p<.01$ ) のみが有意であった (Figure 6)。下位検定では、Fz と Cz における振幅が Oz における振幅に比較して有意に増大していた。



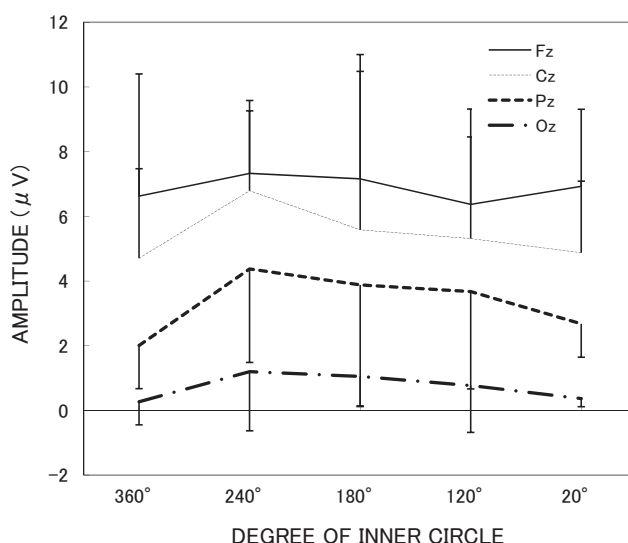


Figure 6 Mean amplitudes of P3 component at each scalp site obtained for a combination of length of inner circle shown by the degree. Others are the same as in Figure 4.

## 考 察

本研究では、同化・対比の成立要因が顕著に大きい錯視であるデルブーフ錯視について、その主要な構成要素である同心円の内円について分割、短縮する条件を設定してERPを測定し、同化と対比という成立要因に対する脳の神経的応答について検討した。デルブーフ錯視は一般に、同心円の内円と外円との直径比が2/3の場合、同化作用が最も顕著に生ずるといわれ、内円については過大視が、外円については過小視が極大的に生ずる。この内外円比を持つ同心円の内円を分割しながら徐々に内円周長を減少させると、内円が外円に及ぼす同化的な影響は徐々に減衰し、やがて内円と外円との同化から対比へと変換すると期待された。今井・後藤（2009, 2010）や今井（2012, 2013）と同様な手続きにより検討を行った結果、内円が完全な状態である同心円条件下では外円の過小視が認められ、通常のデルブーフ錯視の観察条件と同様な結果が得られた（Figure 2）。この完全な同心円条件から、内円周長を徐々に減少させていくと、外円の過大視傾向へと移行するように見えは変化した。過大視には至らなかった。したがって、この条件下で取得されたERPは同化（外円の過小視）から対比（外円の過大視）への変換過程には対応しておらず、今井（2013）とは異なる観察場面において得られたものと考えられる。分析では、主要なERP成分としてN1, P2, およびP3の振幅を対象とした。その結果、N1については、内円周長—判断の組み合わせの有意な主効果が認められたが、P2およびP3についてはいずれも、内円周長—判断の組み合わせの主効果は有意とならなかった。以下では、この結果について考察してみたい。

N1 振幅については、内円周長—判断の組み合わせの主効果、および部位の主効果が有意



であった。しかし、内円周長—判断の組み合わせの主効果についての下位検定では、どの対比較も有意とはならなかった。また、部位の主効果では、Oz 振幅が Fz および Cz の振幅に比較して有意に増大していた。同心円に対する見えは、内円が完全円の場合、外円がほぼ過小視されていたが、内円が分割、短縮するにしたがって過小視傾向が縮小するものの過大視へと移行はしておらず (Figure 2)、対比は生じなかったといえる。N1 振幅はこの事態において、内円周長の短縮に応じてその振幅を増大させる変動を見せたものの (Figure 4)、内円周長条件間における差異をもたらすには至らなかった。この点で、外円を同様に操作した今井 (2013) とは異なっており、同化から対比への移行の有無が結果の違いをもたらした可能性が指摘できる。

むしろ、この N1 振幅についての傾向は、内円を徐々に縮小させた事態についての検討 (今井, 2012) と類似した結果といえる。今井では、内外円比2/3の同心円の内円直径を徐々に縮小させて、同化から対比への移行過程を調べようとしたが、実際の見えとしては、その条件下では一貫して外円に対する過小視、すなわち同化の顕著な影響のみが認められていた。その結果、前頭部から中心部にかけての N1 振幅、および中心部から頭頂部にかけての P3 振幅が、精神測定関数とよく対応していた。すなわち、内円が分割、短縮する事態における本研究の N1 振幅の変動と一致する傾向と考えられる。

本研究では、N1 振幅とは異なり P2 および P3 振幅については、内円周長—判断の組み合わせの主効果は有意とはならず、両成分とも部位の主効果のみが有意となっていた。両成分の変動傾向では、P2 振幅は360° から120° 条件までは減少傾向がみられるものの、20° 条件ではむしろ増大している (Figure 5)。また P3 振幅は全体に平坦であり、内円周長の変動に応じた振幅の変化はより不明確である (Figure 6)。上記で述べたように、外円を同様に操作した今井 (2013) では同化から対比への移行が明確に認められており、この移行過程の有無が結果の違いをもたらしていたと思われる。その一方、内円を縮小させた今井 (2012) でも P2 振幅については精神測定関数との対応は認められておらず、P2 振幅についての結果の傾向は、むしろここでも一致しているといえる。他方、P3 振幅については今井 (2012) と今井 (2013) とも一致せず、本研究では精神測定関数との対応が認められなかった。

以上のように、内円が分割され、その円周長が徐々に縮小する条件下で観察された外円の見えの変動には、同化の縮減過程が反映されていたとすれば、本研究で認められた N1 振幅のみがこの過程と関連することが示唆される。

これまでの研究では、N1 振幅は選択的注意の指標 (Hillyard, Hink, Schwent, & Picton, 1973) であることなどが示されてきているが、この初期成分においても“見えの変容”に伴う振幅の変動が生じうることは、今井 (2012, 2013) と同様に示されたといえる。しかしながら、内円を操作した場合、本研究においても、また今井 (2012) においても、一貫して同化から対比への明確な移行過程が認められず、見えとしては同化過程が主に関与するという結果が得られている。したがって、“同化”のみが関与する場合と“同化と対比”とが関与する場合とでは、ERP 各成分のふるまいに差異が生ずる可能性もある。本研究結果、および今井 (2012, 2013) で共通することは、いずれも“同化過程”の関与が示されていることであり、そのことと一貫して対応する ERP 成分は、N1 振幅であるといえる。すなわち、同化には N1 振幅の強い関与が示唆される。

以上のように、本研究結果から、内円が分割されその円周長が短縮する条件下でのデルブーフ錯視では、同化のみの過程が生じていたと考えられ、この条件下では全頭部的な N1 振幅の関与が示唆された。一方、デルブーフ錯視ではないものの、リップスの円対比錯視を用いて対比のみが関与する過程での ERP を取得した検討（今井，2011）では、N1、P2、P3 のいずれの振幅もそこで得られた精神測定関数との明確な対応が認められていない。したがって今後は、デルブーフ錯視と ERP との対応について得られたこれまでの結果が、同化と対比という拮抗する過程の変化の中で得られたものなのか、あるいは、デルブーフ錯視特有の刺激布置が関与していることに因るのか、その他の錯視図形も含めた検討から精査する必要がある。

## 付 記

本研究の一部は、2013年日本心理学会第77回大会（北海道医療大学）において発表された。

## 引 用 文 献

- 後藤倬男（2008）．幾何学的錯視の成立要因についての一検討 —代表的な幾何学的錯視に対して「3種類の成立要因の関与量」を評定させた場合— 名古屋芸術大学研究紀要, **29**, 157-163.
- 後藤倬男・甲村和三・大屋和夫・寺本一美・丸山規明・久世淳子・高橋晋也（2005）．4.1幾何学的錯視の心理的な成立要因の分析（心理モデル） 後藤倬男・田中平八（共編著） 錯視の科学ハンドブック 東京大学出版会, pp. 350-364.
- 後藤倬男・内山伊知郎・今井章・高橋晋也・羽成隆司・中村信次・小針弘之（2005）．3.1.1 幾何学的錯視における同化と対比 後藤倬男・田中平八（共編著） 錯視の科学ハンドブック 東京大学出版会, pp. 164-176.
- Goto, T., Uchiyama, I., Imai, A., Takahashi, S., Hanari, T., Nakamura, S., & Kobari, H. (2007). Assimilation and contrast in optical illusions. *Japanese Psychological Research*, **49**, 33-44.
- Hillyard, S. A., Hink, R. F., Schwent, V. L., & Picton, T. W. (1973). Electrical signs of selective attention in the human brain. *Science*, **182**, 177-180.
- 今井章（2011）．事象関連電位によるリップスの大きさ錯視の検討 信州大学人文学部人文科学論集<人間情報学科編>, **45**, 43-54.
- 今井章（2012）．事象関連電位によるデルブーフ錯視の検討(3)—内円が縮小する事態における検討— 信州大学人文学部人文科学論集<人間情報学科編>, **46**, 19-31.
- 今井章（2013）．事象関連電位によるデルブーフ錯視の検討(4)—外円が分割、短縮する条件における脳の応答について— 信州大学人文学部人文科学論集<人間情報学科編>, **47**, 39-51.
- 今井章・後藤倬男（2009）．事象関連電位によるデルブーフ錯視の検討 —同化過程における脳の応答について— 信州大学人文学部人文科学論集<人間情報学科編>, **43**, 39-51.
- 今井章・後藤倬男（2010）．事象関連電位によるデルブーフ錯視の検討(2)—対比過程における脳の応答について—信州大学人文学部人文科学論集<人間情報学科編>, **44**, 55-66.

## **DELBOEUF ILLUSION INVESTIGATED BY THE EVENT-RELATED POTENTIALS: BRAIN RESPONSES UNDER A CONDITION OF SPLIT AND REDUCED INNER CIRCLE**

AKIRA IMAI

Department of Psychology, Faculty of Arts, Shinshu University

### **ABSTRACT**

This study examined the event-related potentials (ERPs) obtained under the condition that four participants compared a single circle (comparison stimulus; visual angle:  $1.0^\circ$ ) to outer circle of a concentric circle (Delboeuf illusion figure; standard stimulus) and judged of apparent size of the single circle as large or small by a key pressing. The constant method was used, and the inner circle was prepared for five kinds of circular length from  $360^\circ$  (complete circle) to reduced length of  $20^\circ$  (1/18-circle), of which constructed five stimulus conditions of inner circle. The ERPs were recorded at four scalp sites of Fz, Cz, Pz, and Oz while participants observed the illusion figure and judged of the apparent size of the single circles. The outer circle was underestimated for the conditions of  $360^\circ$ , and this tendency of underestimation was reducing along with decrease of length of inner circle, but was not shifting into the overestimation, suggesting that the processes of assimilation were appeared at all conditions. The amplitudes of N1, P2, and P3 components of ERPs were examined, and only the amplitude of N1 was proportionally changed in response to the psychometric function produced by the behavioral data. It is suggested that the amplitudes of the N1 may covary with the processes of assimilation when observer investigates Delboeuf illusion.

Key words: geometrical-optical illusion, Delboeuf illusion, event-related potentials (ERPs), N1 amplitude, N2 amplitude, P3 amplitude

(2013年10月31日受理, 12月6日掲載)

