

傾き残効はフラッシュ・ラグ効果と独立に生じる

吹上 大樹・村上 郁也

東京大学大学院 総合文化研究科
〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1

1. はじめに

運動する刺激の近傍に静止した刺激を一瞬だけ呈示すると、フラッシュ刺激が運動刺激の進行方向に対し実際よりも後ろにずれて知覚される。このフラッシュ・ラグ効果 (flash-lag effect: FLE) と呼ばれる錯視には大きく分けて2種類の見方があり、運動刺激が運動方向にずれて見えるため錯視が起こるとい位置ずれの錯視だとする見方¹⁾の他に、フラッシュ刺激が運動刺激に比べて遅れて知覚されるために錯視が起こるとい時間ずれの錯視だとする見方²⁾がある。しかしながら、運動方向が定義できないようなランダム運動においても十分な大きさのFLEが生じることが確かめられており²⁾、FLEの本質に時間ずれの要素が大きく関わっていることは確かである。

本研究では、このFLEの時間ずれが視覚情報処理過程のどの段階で生じるのかを調べることを目的とした。そのために、ランダム運動する運動刺激を用いてFLEを生じさせ、それが傾き残効 (tilt aftereffect: TAE) に影響を与えるか否かを検討した。具体的には、FLEが生じることで初めて安定して傾きがつくられるような刺激を用いて、その傾きに対してTAEが生じるかどうか調べるという方法をとった。これによりもしTAEが生じたなら、それはFLEが起こってからTAEが生じたということになるため、FLEのメカニズムはTAEの責任中枢よりも低次に存在することになる。逆にTAEが生じなければ、

FLEのメカニズムは、TAEの責任中枢よりも低次にはないといことができる。

2. 実験 1

実験1では、順応に用いる刺激に対して実際にFLEが生じることを確かめた。

2.1 方法

被験者 著者1名と実験の目的を知らない10名が実験に参加した。視力ないし矯正視力は全員とも正常だった。

装置 実験は暗室で行われ、刺激は全てコンピュータ (アップルコンピュータ社製, Power-Mac G5) に制御されたCRTモニター (22型, MITSUBISHI RDF233H, 平均輝度 46.3 cd/m², 1024 pixels×768 pixels, リフレッシュレート 120 Hz) に呈示した。観察距離は52 cmだった。実験中被験者は顎上に頭を固定し、右眼のみで画面の中心を固視し続けた。固視を維持しやすくするため、延長線が画面の中心で交差するような線分を刺激の周辺に呈示した。

刺激 画面上の刺激の様子を図1右側に示した。刺激は全て平均輝度の灰色背景上に呈示した。運動刺激とフラッシュ刺激は共に複数の縦長の白い長方形 (25 min×60 min, 92.1 cd/m²) が、水平方向には65 minの間隔を空けて、垂直方向には70 minの間隔を空けて、規則的に並んだものからできていた。運動刺激は水平方向の長方形群が2行、フラッシュ刺激は3行からなり、各刺激は単独で傾き成分を持たないようにしていた。運動刺激とフラッシュ刺激の左右は、画面に対して固定された累積ガウス関数を輝度コントラストに乗ずることによりぼかした。

呈示刺激の時空間プロットを図1左側に示した。運動刺激は、16フレームの間同じ位置に留まった後、ランダムな水平位置にジャンプするというのを繰り返した。刺激は80フレームを1サイクルとし、これを何サイクルも繰り返して呈示した。フラッシュ刺激は1サイクル中に1回、1フレームだけ呈示した。フラッシュ刺激の位置は、ターゲット位置の運動刺激（ターゲット運動刺激と呼ぶ）に対して固定されており、ターゲット運動刺激とフラッシュ刺激が組み合わせることで、左右どちらかに全体として約15degの傾きを持つ格子状の刺激が作られるようになっていた。ターゲット位置は、各サイクルで運動刺激が留まる5つの位置のうち、3番目と4番目の位置から毎サイクルランダムに選ばれた。

手続き 実験では、ターゲット運動刺激のオンセット時刻に対するフラッシュ刺激のオンセット時刻 (SOA) をさまざまに変えて測定を行った。条件は被験者毎に2 (フラッシュ刺激とターゲット運動刺激により作られる傾き：右傾きあるいは左傾き) × 40 (SOA) 個存在した。各試行では、被験者が回答用のキーを押すまで

刺激が連続して呈示された。被験者は、フラッシュが呈示された瞬間に左右どちらの傾きが知覚されたか2AFCで回答した。実験には恒常法が用いられ、各被験者から条件毎に16個分の回答を得た。

2.2 結果

図2に実験1の結果を示す。各データ点は、全被験者の回答から得た「フラッシュ刺激が呈示された瞬間に右の傾きが知覚された確率」である。左傾き条件は反転させて右傾き条件に含めた。実線は実データにワイブル密度関数をフィットさせたものである。灰色の領域は、フラッシュ刺激がターゲット運動刺激と重なるタイミングで呈示されたSOAの範囲を表す。つまり、物理的にはこの範囲でのみ常に右傾きが作られ、他の範囲ではランダムになっていた。したがって、もしFLEを全く起こさず呈示された刺激に忠実に回答するような観察者がいたら、破線のような結果が得られるはずである。しかし被験者の結果は、SOAが0より小さい場合、つまりフラッシュ刺激がターゲット運動刺激のオンセットよりも前に呈示された条件でも、右の傾きをチャンスレベル以上に知覚していたこ

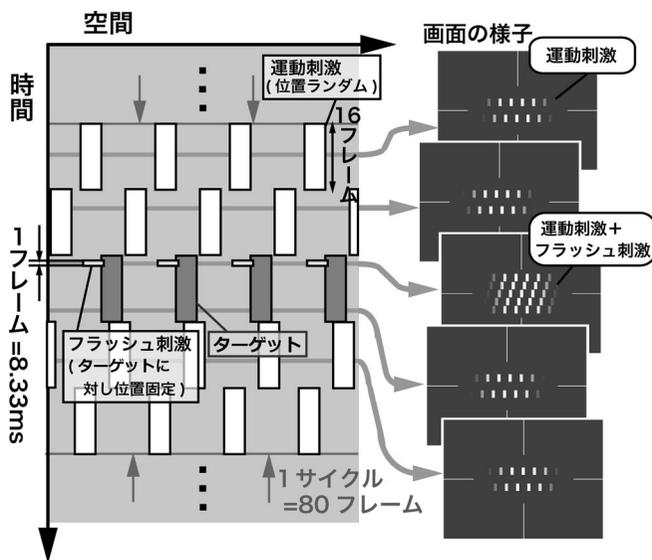


図1 刺激の時空間プロット。横軸は刺激の空間位置を、縦軸は時間を表す。右側の図はさまざまな時刻における画面上の様子である。

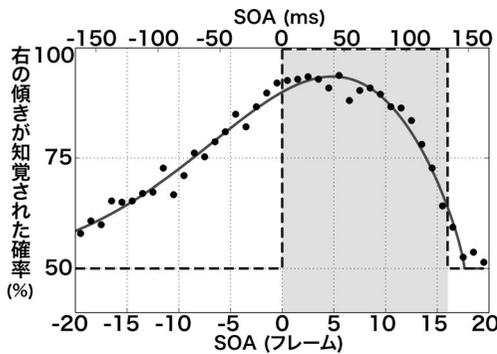


図2 SOA 毎の右傾き知覚確率。黒丸は全被験者の回答から得た右傾き知覚確率を表す。実線は実データに対して、左右反転させて高さと同位置に自由度をもたせたワイブル密度関数をフィットしたもの。破線はFLEが0msである場合に予想される仮想データ。

とを示している。これは、FLEが生じてフラッシュ刺激の知覚タイミングが運動刺激に比べて遅れていたことを意味している。ここで、FLEの大きさを、実データにフィットさせたワイブル密度関数(実線)の重心が、FLEが0の仮想データ(破線)の重心からどれだけずれているかという量として求めると、約60msという値が得られた。

3. 実験 2

実験2では、実験1と同一の刺激に順応させてTAEの測定を行った。

3.1 方法

被験者 実験1に参加した10名(著者含む)の他、新たに別の1名(矯正視力正常)が参加した。

装置 装置は実験1と同じものが用いられた。

刺激 順応刺激として、実験1と同一の刺激を用いた。テスト刺激は横長のガボールパッチ(水平方向の $\sigma=120$ min, 垂直方向の $\sigma=54$ min, 搬送波の周期=0.67 cpd, 最大コントラスト=20%, 位相は試行毎にランダム化)を用いた。テスト刺激は時間軸に対し1次元ガウス関数($\sigma=9$ ms)でコントラストに勾配をつけて呈示した。

手続き 実験条件は被験者毎に2(フラッシュ刺激とターゲット運動刺激により作られる傾き: 右傾きあるいは左傾き) $\times 33$ (SOA)条件存在した。TAEの値は被験者が垂直に知覚したテスト刺激の物理的な傾き(右傾きを正とした)として推定した。各試行では、まず順応刺激が6サイクル(各セッションの最初の試行では90サイクル)呈示され、続けて0.15sのISI後にテスト刺激が0.11s呈示された。被験者はその後に挿入される0.75sの回答時間の間に、テスト刺激が左右どちらに傾いて見えたかを2AFCで回答した。実験には階段法が用いられ、各セッションでは一つの条件に固定して繰り返し順応-テストを行った。このようなセッションを休憩をはさんで実施し、各被験者から条件毎に4個のTAEの推定値を得た。ただし、全被験者のうち1名は33個のSOA条件のうち17条件のみの測定となった。

3.2 結果

全被験者のTAE推定値の平均をSOA毎にプロットしたものを図3に示す。図3では、左傾き条件は反転させて右条件に含めた。分散分析の結果、傾き要因とSOA要因の間に有意な交互作用が見られた($F=(32,2700)$, $p<.001$)。中塗りの点はその下位検定の単純主効果(右傾き条件 vs. 左傾き条件)が有意であったことを意味する(灰丸: $p<.05$, 黒丸: $p<.01$)。灰色で塗られた領域はフラッシュ刺激が呈示された瞬間、常に画面上で右傾きが作られていたSOAの範囲である。もしFLEがTAEに関わる処理のなされるまでに生じていなければ、この範囲でのみTAEが生じ、他では生じないと予想される。実データは、概ねこの予想と一致した傾向を持つものの、やや分布が左にずれており、少量のFLEをはらんでいることがうかがえる。しかし実験1で得られた見えの傾きの結果とは異なり、メインのピークの外側に負のTAEが存在し、その外側に今度は正のTAEが再び現れている。

こうした結果は、視覚系初期の時間応答特性の影響を受けたと考えることで説明できる。ま

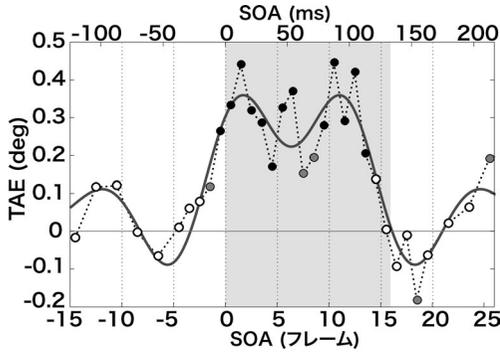


図3 SOA 毎の TAE. 白丸, 灰丸および黒丸は全被験者の TAE 推定値の平均を表す (灰丸: $p < .05$, 黒丸: $p < .01$). 実線は実データに対して時間応答特性を考慮に入れた TAE のモデルをフィットしたもの.

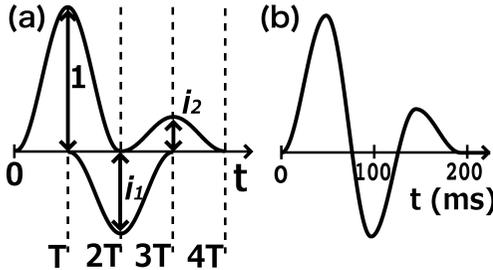


図4 フィットtingに用いた TIRF. (a) 用いた TIRF の説明図. 周期が等しく高さが異なる三つの cosine 波 (1 周期分) を足し合わせたものを用いた. (b) フィットtingによって得られた TIRF. パラメータは $(i_1, i_2, T) = (0.61, 0.32, 48 \text{ ms})$ だった.

ず, フラッシュ刺激と運動刺激の信号が正・負・正の三相性の波となって TAE の責任中枢 (方位フィルター) に入力すると仮定し, 図 4 のような時間インパルス応答関数 (TIRF) を, 画面から出力されたフラッシュ刺激とターゲット運動刺激の矩形波信号 $(F(t), M(t))$ に畳み込み, 方位フィルターに入力する直前の二つの信号の波形 $(F'(t), M'(t))$ を得る.

二つの信号 $(F'(t), M'(t))$ が方位フィルターに入力するタイミングのずれは, SOA (τ とおく) と, 方位フィルターに到達するまでに生じた FLE の量 (δ とおく) を合わせた値になると

考える. ここで, この二つの信号が繰り返し方位フィルターに入力したときに生じる TAE の値 (E とおく) を, 以下のように仮定する.

$$E(\tau) = A \int M'(t) F'[t - (\tau + \delta)] dt$$

この式の意味するところは, 以下の通りである. まず TAE は方位フィルターとして働く神経細胞が疲弊することで生じると考え, フラッシュ刺激とターゲット運動刺激の信号入力 que それらの細胞を発火させればさせるほど, TAE は大きくなるとする. フラッシュ刺激とターゲット運動刺激は組み合わせることで一定の傾き (例えば右傾きとする) をつくる配置であるから, 同時刻に入力した二つの刺激の信号 (輝度コントラストを TIRF で畳み込んだもの) が共に正であれば, 右傾きに対応する細胞が発火し, 正の TAE を起こす. 逆に一方の信号が正で, もう一方が負であれば, 左傾きに対応する細胞が発火するため, 負の TAE を起こす. 両方とも負の信号であれば, やはり右傾きに対応する細胞が発火し, 正の TAE を起こす. 数式中では, こうした関係を各時間における信号同士の積として表した. またこのモデルでは TAE 責任中枢に入力した全ての時刻の信号が累積して等しく TAE に影響すると仮定しており, これを信号の存在する全時間に対する積分として表した.

図 3 の実線は, 以上のモデルを実データに対してフィットさせたものである. このように, データの起伏の形状を三相性の時間応答特性で説明することができた. また, フィットtingによって得られたパラメータ δ の値は約 10 ms となった. これより, 眼から入った刺激が TAE に関わる処理を受けるまでに生じる FLE は 10 ms 程度ということになる.

4. 考 察

二つの実験結果から, 視覚刺激の信号が TAE の責任中枢に至るまでに生じる FLE はたかだか 10 ms で, 知覚レベルで生じる FLE の 60 ms には遠く及ばないことがわかった. TAE の責任中

枢より低次で生じるフラッシュ刺激の相対的な遅れは実効コントラストの差等に起因している可能性も考えられるため、こうした結果は、本質的な FLE が TAE の責任中枢よりも高次の段階か、あるいは別経路上で生じることを示している。本研究では二つの実験で FLE の大きさの求め方が異なるため正確な定量比較はできなかったが、TAE の結果（図 3）と見えの傾きの結果（図 2）の挙動が定性的にも大きく異なっており、このことも TAE が FLE とは独立に生じるというモデルを強く示唆している。また本研究の結果は、傾き対比を用いて同様の実験を

行った Arnold ら³⁾の結果ともよく一致している。

文 献

- 1) R. Nijhawan: Motion extrapolation in catching. *Nature*, **370**, 256–257, 1994.
- 2) I. Murakami: A flash-lag effect in random motion. *Vision Research*, **41**, 3101–3119, 2001.
- 3) D. H. Arnold, S. Durant and A. Johnston: Latency differences and the flash-lag effect. *Vision Research*, **43**, 1829–1835, 2003.