

時間間隔知覚の短縮はサッカードなしでも起こる

寺尾 将彦 *.*.*.*.* * 渡邊 淳司 *.*.*.*.* * 八木 昭宏 *.*.*.*.* * 西田 眞也 *.*.*

* 関西学院大学 文学研究科

〒 662-8501 西宮市上ヶ原一番町 1-155

** 日本学術振興会

*** NTT コミュニケーション科学 基礎研究所

**** 科学技術振興機構 さきがけ

***** 関西学院大学 文学部

1. 序

時間知覚（時間の長さの判断）には時間幅や判断対象によって異なるメカニズムが関与している¹⁻³⁾。中でも 100 ms 程度の非常に短い時間知覚はその時間幅から記憶や認知の影響を受けない比較的低次の神経システムが関与していると考えられる。この時間幅に関して、Morrone ら (2005)⁴⁾はサッカードによって空間⁵⁾と同様に時間も縮んで知覚されることを報告している。その現象はサッカードの直前に呈示された二つの刺激の刺激間隔 (SOA) が 100 ms から 50 ms 程度の約半分に縮んで知覚されるというものであった。

サッカードによってなぜ時間が縮んで知覚されるのかについて、サッカードに関わる脳内部位が時間表現とも関わることから^{6,7)}サッカードによって脳内の時間表現が変調された可能性があげられている^{4,8,9)}。一方、サッカード時には脳内の時間表現の変調だけでなく入力信号（特に magno 系的な過渡的信号）が減衰し、見かけの刺激強度が低下する^{10,11)}ことが知られている。Morrone らの実験で用いられた時間間隔とはフラッシュ状の二つの刺激の SOA である。SOA とは二つの刺激の過渡的变化の時間間隔であることから、サッカードに伴う過渡的变化への反応の減衰や刺激強度の低下が時間短縮に深

く関わっている可能性も十分に考えられる。

我々はサッカードに伴う見かけの刺激強度の低下自体が時間短縮に影響するのかを検討した。その結果、見かけの刺激強度が 100 ms 程度の短い幅の時間知覚に重要な役割を果たすことが明らかとなった。

2. 方法

正常な視力を持つ成人 5 名（うち 1 名は筆頭著者）が実験に参加した。刺激の例を図 1(A) に示す。判断刺激の大きさは $6^\circ \times 57'$ で、上下は 30° 離れていた。背景は緑 (CIE $x=0.28$

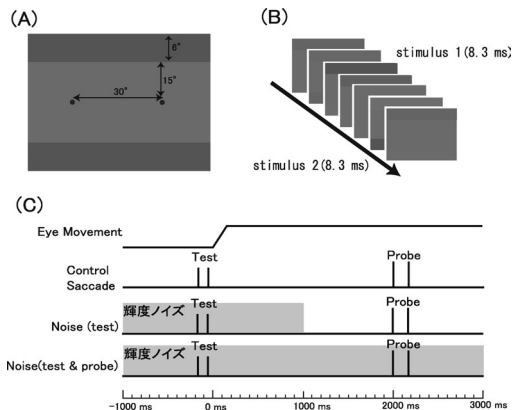


図 1 (A) 使用した刺激の例。ただし上下の判断刺激は同時には出現しない。(B) 輝度ノイズが呈示されたテスト刺激の例。(C) コントロール (SOA=100), サッカード条件, ノイズ (テスト) 条件, ノイズ (テスト & プロブ) の実験シーケンス。

$y=0.60$) で判断刺激は赤 (CIE $x=0.62$ $y=0.34$) であった。判断刺激の輝度は 11.3 cd/m^2 で背景の輝度は刺激に対し主観的等輝度 (交照法によって決定) が用いられた。ディスプレイは GDM F 520 (Sony) か CALIX (TOTOKU) のどちらかの CRT モニターが用いられた (ともにフレーム周波数は 120 Hz)。判断刺激はフラッシュ状に 1 フレームのみ呈示された。サッカード時に生じている過渡的信号への反応の低下を再現するために、背景と同色で輝度のみが高速で変化するフリッカ状のダイナミック輝度ノイズを用いることにより、サッカードを行わずに判断刺激の過渡的信号を弱めることを試みた。輝度ノイズが付加された状態では、判断刺激が提示される上下二つの領域の輝度が、上下無相関に、1 フレーム毎に背景輝度の $\pm 25\%$ の範囲でランダムに変化した。図 1(B) に輝度ノイズ呈示を図示した。SOA は上下それぞれ一回ずつ呈示される判断刺激対の時間間隔で定義した。判断刺激対は一試行に 2 度呈示され、一度目をテスト刺激、二度目をプローブ刺激とした。被験者はテスト刺激と、プローブ刺激の SOA を比較し、どちらが長く知覚されたかを 2 件法で回答した。テスト刺激の SOA は 100 ms で固定され、プローブ刺激の SOA は試行毎に 8 ms から 200 ms の間で変化した。ノイズの呈示開始時刻はテスト刺激が呈示される前の約 1000 ms 前から始まり、テスト刺激の呈示後 1000 ms 続いた。プローブ刺激はテスト刺激呈示後 2000 ms 後に呈示された。テスト刺激にのみ輝度ノイズが呈示されるこの条件をノイズ (テスト) 条件とした。

これに加えて、テスト刺激でもプローブ刺激

と同様にノイズが呈示されないコントロール条件と、追試として注視点の右に 30° 離れた目標点へサッカードを行い、サッカードの直前にテスト刺激が呈示されるサッカード条件を設けた。この条件は 5 名のうち 3 名が参加した。さらに、輝度ノイズによってテスト刺激の判断が困難になり、それが判断に影響する可能性を検証するために、テスト刺激とプローブ刺激のどちらにも輝度ノイズが呈示されるノイズ (テスト & プローブ) 条件を設けた。この条件は 5 名のうち 3 名が参加した。図 1(C) に各条件の 1 試行のシーケンスを示した。各条件はブロック間で行われた。

3. 結 果

3.1 ダイナミック輝度ノイズによる過渡的信号処理の妨害

データは、累積ガウス関数でフィッティングした。得られたカーブから 50% の値を主観的等価点 (Point of Subjective Equality: PSE) として求めた。この値によってテスト刺激の SOA が 100 ms のとき、どれくらいの長さに知覚されていたかを推定した。図 2(A) は実験で得られたカーブの代表例である。また図 2(B) は平均の PSE を示している。コントロール条件では、テスト刺激とプローブ刺激の SOA の比較は正しく行われているが、輝度ノイズがテスト刺激に加わると、カーブがほぼ同じ形状で左側にシフトしている。PSE を見てみると輝度ノイズが加わった場合、 100 ms の半分程度に減少し、輝度ノイズによる減少はサッカード条件と同じかそれ以上であることがわかる。これらの結果から、輝度ノイズによる過渡的信号の妨害によっても

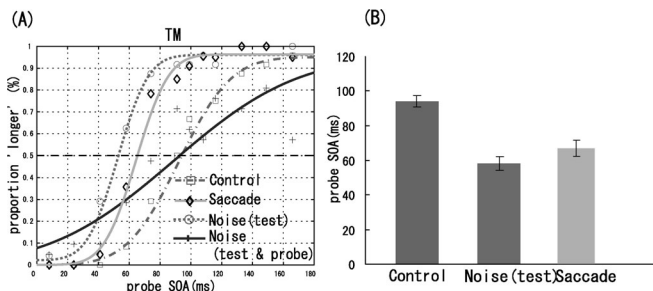


図 2 (A) 得られたカーブの代表例。コントロール (SOA=100), サッカード, 輝度ノイズ (test 刺激のみ), 輝度ノイズ (テスト & プローブ) (B) コントロール条件, サッカード条件, 輝度ノイズ条件の平均 PSE. エラーバーは標準誤差を示す。

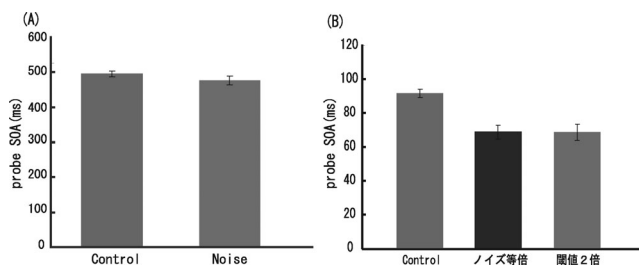


図3 (A) SOA (500ms) の輝度ノイズ条件とコントロール条件の平均 PSE. (B) コントロール条件, ノイズ等倍条件, 閾値二倍条件の平均 PSE. それぞれエラーバーは標準誤差を示す.

サッカードと同様の時間短縮がおこることが明らかになった。また、図 2(A) のノイズ（テスト & プロブ）条件のカーブをみると、カーブの傾きがなだらかになっているが、物理的に同じ長さを正しく判断できていることがわかる。これは輝度ノイズによる SOA の短縮は時間判断が難しくなったことにより短いと判断する割合が増えた結果ではないことを示している。

3.2 ダイナミック輝度ノイズは長い時間間隔にも影響するか

最近 500 ms 付近において刺激の持続時間が短く知覚される減少が報告されており^{12,13)}, 500 ms 付近での短縮とサッカードによる短縮が同じメカニズムによるものかどうか議論されている^{12,14)}. そこで輝度ノイズによる SOA の短縮は 500 ms の時間幅でもおこるのかを検討した。

被験者の課題は SOA が 500 ms になったこと以外は同じであった。テスト刺激の SOA は 500 ms に固定され、プロブ刺激の SOA は 250 ms から 750 ms の間で疑似ランダムに決定された。また、コントロールとして、テスト刺激に輝度ノイズが呈示されない条件を設けた。図 3(A) に平均 PSE を示した ($N=4$)。ここから明らかなように、輝度ノイズとコントロールとでほとんど差が認められない。やや減少しているようにも見えるが、圧縮率 (100ms=62%, 500ms=96%) には大きな違いが見られる。この結果から 500 ms 付近で報告されている他の現象とはメカニズムが異なることが示唆される。

3.3 見かけの刺激強度の低下のみでも時間短縮はおこるのか

ダイナミック輝度ノイズは刺激の見かけの刺激強度（とくにその過渡的成分）を低下させる。

もしこれが時間短縮を導く要因ならば、ノイズを用いなくとも見かけの刺激強度を弱めるだけで時間短縮が起こる可能性がある。そこで、輝度ノイズが呈示されている時の見かけの刺激強度に合わせて色コントラストを低下させた事態で時間短縮が生じるのかを検討した。

見かけの刺激強度を合わせるために、被験者毎に輝度ノイズ呈示時のコントラスト閾と実際の実験で用いたコントラストとの比率を求め、ノイズが呈示されない時のコントラスト閾の等倍のコントラストで判断刺激を提示した（ノイズ等倍条件）。ただ、この場合の見かけの刺激強度は被験者間でばらつく。そこで、見かけの刺激強度そのものによる効果を確認するために、全被験者の刺激強度をノイズが呈示されない時のコントラスト閾の 2 倍にそろえて刺激提示する実験も行った（閾値 2 倍条件）。これらの実験でのテスト刺激の SOA は 100 ms で行われた。

図 3(B) に平均 PSE ($N=4$) を示した。輝度ノイズほどではないにせよ、コントラストの低下によって SOA が短縮していることがわかる。この結果から、見かけの刺激強度の低下によって時間短縮が起こることが明らかになった。

4. 考 察

本研究によって、見かけの刺激強度が短時間の時間間隔の符号化に重要な役割を果たしていることが明らかになった。これは、サッカードによる時間短縮においてもサッカードに伴う刺激強度の低下が影響している可能性を示唆している。

視覚における刺激強度は過渡的成分と定常的成分に分かれるが、特に過渡的成分が時間間隔

の符号化に重要であると考えられる。なぜならば、過渡的信号は定常的信号に比べより正確に時間情報を扱え、さらにサッカドによって過渡的信号への反応が弱まる^{10,11)}からである。等輝度色刺激の検出がサッカドの影響を受けないという報告はあるが¹⁵⁾、その過渡的成分が影響を受けないという報告はまだ無い。これは今後検討すべき課題ではあるが、たとえ等輝度であっても色の変化そのものは過渡的信号であると考えられ、刺激強度の低下により変化の過渡的信号への反応が弱まったことは十分考えられる。

本現象のメカニズムとしては、100 ms の短い時間幅でのみおこることから、二つの過渡的信号の入力時間差を記述するセンサのような低次な神経系での符号化が考えられる。入力信号としての過渡的信号が弱まれば、時間差を表現するこのセンサの出力も小さくなる。時間差を表すこの出力値が弱い場合はトップダウン的な判断基準の影響を受け、たとえばそれが同時性バイアスのようなものであれば、知覚時間の短縮が説明できる。今後本現象の詳細を検討してゆくことは、短い時間間隔の知覚メカニズム解明に大きく寄与すると期待される。

文 献

- 1) C. V. Buhusi and W. H. Meck: What makes us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing. *Nature Reviews: Neuroscience*, **6**, 755–765, 2005.
- 2) D. M. Eagleman, P. U. Tse, P. Janssen, A. C. Nobre, D. Buonomano and A. O. Holcombe: Time and the brain: how subjective time relates to neural time. *Journal of Neuroscience*, **25** (45), 10369–10371, 2005.
- 3) D.V. Buonomano and U. B. Karmarkar: How do we tell time? *Neuroscientist*, **8**, 42–51, 2002.
- 4) M. C. Morrone, J. Ross and D. Burr: Saccadic eye movements cause compression of time as well as space. *Nature Neuroscience*, **8**, 950–954, 2005.
- 5) J. Ross, M. C. Morrone and D. Burr: Compression of visual space before saccades. *Nature*, **386**, 598–601, 1997.
- 6) M. R. Ibbotson, N. S. Price, N. A. Crowder, S. Ono and M. J. Mustari: Enhanced motion sensitivity follows saccadic suppression in the superior temporal sulcus of the macaque cortex. *Cerebral Cortex*, Jul 12 [Epub ahead of print], 2006.
- 7) M. I. Leon and M. N. Shadlen: Representation of time by neurons in the posterior parietal cortex of the macaque. *Neuron*, **38**, 317–327, 2003.
- 8) M. R. Ibbotson, N. A. Crowder and N. S. Price: Neural basis of time changes during saccades. *Current Biology*, **16**, R834–R836, 2006.
- 9) D. Burr and M. C. Morrone: Perception: Transient disruptions to neural space-time. *Current Biology*, **16**, R847–R849, 2006.
- 10) D. C. Burr, M. C. Morrone and J. Ross: Selective suppression of the visual magnocellular pathway during saccadic eye movements. *Nature*, **371**, 511–513, 1994.
- 11) K. Uchikawa and M. Sato: Saccadic suppression to achromatic and chromatic responses measured by increment-threshold spectral sensitivity. *Journal of the Optical Society of America A*, **12**, 661–666, 1995.
- 12) A. Johnston, D. H. Arnold and S. Nishida: Spatially localised distortions in event time. *Current Biology*, **16**, 472–429, 2006.
- 13) R. Kanai, C. L. E. Paffen, H. Hogendoorn and F. A. J. Verstraten: Time dilation in dynamic visual display. *Journal of Vision*, **6** (12), 1421–1430, 2006.
- 14) D. C. Burr and M. C. Morrone: Time perception: space-time in the brain. *Current Biology*, **16**, R171–R173, 2006.
- 15) D. C. Burr and M. C. Morrone: Temporal impulse response functions for luminance and colour during saccades. *Vision Research*, **36**, 2069–2078, 1996.