

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：32670

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24650058

研究課題名(和文) 薄明視における視知覚の質的变化の解明と補償システムの開発

研究課題名(英文) Towards the understanding of visual motion perception during mesopic vision and the development of compensation systems

研究代表者

竹内 龍人 (Takeuchi, Tatsuto)

日本女子大学・人間社会学部・教授

研究者番号：50396165

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：日常の生活環境において人間が晒されている明るさ(環境光)は、実に1000億倍という広い範囲に渡る。その中で、錐体系と桿体系が同時に機能する薄明視では視覚に基づく行動パフォーマンスの低下が指摘されている。本研究では、視覚運動ブライミングという錯視現象を利用した実験心理学的手法により、この低下の原因探求および補償システムに関する検討を目的とした。実験の結果、錐体系と桿体系からの情報を時空間的に統合するメカニズムの機能が不完全であるが故に、薄明視における低下が生じることがわかった。またこの低下を補償するためには、桿体系からの情報の時間遅れを補正した上で空間的な情報統合を促進させればよいことを示した。

研究成果の概要(英文)：In natural environment, ambient light levels change between day and night by a factor of a hundred billion. We empirically know that some action-related visual motion tasks are not well conducted under mesopic vision, in which both cones and rods operate. The purpose of this study was to examine the cause of this degradation of motion perception and its compensation. We utilized a phenomenon called visual motion priming, in which the perceived direction of a directionally ambiguous test stimulus is influenced by the moving direction of a priming stimulus. The priming and test stimulus were spatially separated. Based on the psychophysical experiments, we found that different spatiotemporal properties of cones and rods at mesopic levels may disturb the spatiotemporal integration of visual stimuli, which leads to the disappearance of visual motion priming during mesopic vision. The processing delay of rod pathways during mesopic vision should be compensated to recover motion priming.

研究分野：実験心理学

キーワード：視覚 運動視 薄明視 明所視 暗所視 錯視

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 日常生活環境において人間が晒されている明るさ(環境光)は、実に1000億倍という広い範囲に渡る。人間の目には、それに対応するために錐体系と桿体系というダイナミックレンジの異なる2つのメカニズムが機能している。環境光に基づく視機能は、錐体系のみが機能する明所視、錐体系と桿体系が同時に機能する薄明視、そして桿体系のみが機能する暗所視に分けられる。

視覚の感度は明所視下で最大となることもあり、通常の視覚研究は明所視下で行われてきた。また桿体系の機能を明らかにすべく、暗所視下の視覚に関する研究も進められた。その結果、暗順応のメカニズムについては多くのことが明らかになっている。

(2) 明所視や暗所視の理解が進んでいる一方で、薄明視に関する視覚研究は、一部の分野(色覚、時間特性)を除いてはほとんど進展がみられていない状況である。しかしながら、薄明視は明所視と暗所視のたんなる中間段階ではなく、特異的な性質を持つとする経験的報告も蓄積されている。例えば薄明視下では、球技におけるボールの視認性の低下や交通事故の増加といった、運動物体に対する視認性の低下(あるいはそれに基づく行動パフォーマンスの低下)を示唆する現象がこれまでに報告されている。薄明視下でこうした現象がなぜ生じるのか、その背後のメカニズムは何か、視認性の低下を補償するためには何をしたらよいか、といった問題を解くためには、色覚と時間特性以外の視機能や視知覚、特に運動視が薄明視において特異的であるのか、その点を実験的に示す必要がある。

### 2. 研究の目的

薄明視は、明所視から暗所視に至るまでの中間段階として見過ごされることが多かった。特に運動視に関しては、薄明視下の研究はきわめて少ない。そこで本研究では、以下の3点を主な研究目的とした。

(1) 薄明視下における運動視が特異的であるのか否か、その点を明らかにする。薄明視下の視知覚は、錐体系と桿体系の相互作用の結果生じると考えられる。とはいえ、そういった相互作用が質的に異なる視知覚をもたらすのか、その点は定かではない。Billinoら<sup>1</sup>は、バイオロジカルモーションディスプレイにおける歩く方向を同定する感度は、薄明視下で最も低下することを示した。この結果は、薄明視下の運動視が特異的である可能性を示唆している。そこで後述するように、より単純化した視覚刺激を用いて薄明視下の運動視が明所視下や暗所視下のそれと比較して特異的か否かを検討する。合わせて薄明視下における運動視の基礎となる神経生理学的なメカニズムに関する洞察を得るための実験を遂行する。

(2) 一言で薄明視といってもその範囲は広く、約6対数スケールに渡る。また明るい薄

明視の領域では速い(fast)桿体系、暗い薄明視の領域では遅い(slow)桿体系が機能しているとされている。そこで、もし薄明視下において運動視が特異的であることが判明したら、その特異性がどの範囲の環境光レベルにまで渡るのか、その点を実験的に解明する。この情報により、薄明視下における運動視の特異性をもたらすメカニズムに関する洞察が得られると考えられる。

(3) 薄明視における運動視の特異性を補償するためのシステム開発に向けて、実験により補償すべき環境光の範囲や時空間的な範囲の定量化を目指す。

### 3. 研究の方法

先に述べたように薄明視下では、バイオロジカルモーションへの感度低下<sup>1</sup>、および自動車運転や球技といった複雑な視覚パターンの認識が必要な課題における難易度の高まりが観察されている。このことから、時空間的に離れた視覚情報を統合することにより運動視が成立するような視覚刺激を使うことにより、薄明視下における運動視の特異性を検討することが可能になると考えられる。そこで本研究では、視覚運動プライミング<sup>2</sup>と呼ばれる現象を引き起こす視覚刺激(図1)を実験において用いることとした。

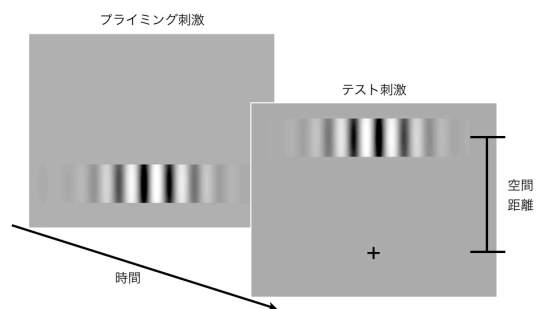


図1 視覚運動プライミングを引き起こす視覚刺激

この視覚刺激配置では、プライミング刺激がある提示された後に、それとは異なる空間位置(網膜偏心度)にテスト刺激が提示される。図1に示した配置としたのは、時空間的に離れた視覚情報の統合過程を検討すると共に、錐体系/桿体系という二つのシステムが同時に機能しているという薄明視の特異性を考慮したからである。つまり、中心に提示されたプライミング刺激の検出には桿体系に加えて錐体系が、周辺に提示されたテスト刺激の検出には桿体系が関わりと推定される。この刺激配置を用いることにより、錐体系からの情報と桿体系からの情報がどのように統合されるかという問題を検討することが可能になる。

プライミング刺激(空間周波数: 0.5 cpd)は左右どちらかの一方方向にドリフト運動す

る。テスト刺激は2フレームからなり、その位相が180度反転する曖昧運動刺激である。プライミング刺激の提示位置や持続時間といったパラメータに依存して、プライミング刺激とテスト刺激を含めた全体のパターンの見かけの運動方向が変わる。プライミング刺激により活性化された運動検出機構の反応が時間的に持続し、テスト刺激に対する運動検出機構の反応が修正されると考えられる。ここで時空間的に離れた運動情報の統合が生じた場合には、パターン全体が同一方向に観察される。これを「正のプライミング」と呼ぶ<sup>3</sup>。

一方で、プライミング刺激の持続時間が長い場合には、運動残効と類似の現象が観察される。つまりテスト刺激がプライミング刺激と逆方向に動いて見える。この場合には、視覚刺激全体としては、動いている途中で急に運動方向が転換されるように知覚される。これを「負のプライミング」と呼び、プライミング刺激に対する短時間の順応が引き起こしたと考えられる。プライミング刺激とテスト刺激が組み合わさり、単独の対象としての動きの知覚がもたらされていることから、この場合にも視覚刺激を時空間的に統合するメカニズムが機能していると考えられる。

さらには、こうした正負のプライミングが観察されない場合もありうる。つまり、プライミング刺激は運動して見えるが、テスト刺激は点滅して見えるということである。この場合には、両刺激は時空間的に統合されなかったといえる。

図1に示した視覚刺激をさまざまな環境光下で観察し、プライミング刺激とテスト刺激の統合が生じる条件を明確にすることを実験の目的とした。環境光レベルは、図1の刺激を提示するディスプレイの前に種々のNDフィルタを設置し、画面の明るさ(輝度)を様々なレベルに設定することにより操作した。同時に実験参加者の瞳孔径を眼球運動計測器により計測し、網膜照度を算出した。得られた網膜照度から、実験観察者の状態が明所視、薄明視、暗所視のどの状態であるのかが推定できる。実験前には30分間の暗順応を行った。

#### 4. 研究成果

(1) 明所視下(高網膜照度レベル)において視覚運動プライミングの出現を推定したところ、図2に示した結果が得られた。

図2では横軸がプライミング刺激とテスト刺激間の空間距離、縦軸が正のプライミングの知覚確率を示している。したがって縦軸の値が50%以下だった場合は、負のプライミングが主に知覚されていたことを意味する。

プライミング刺激の持続時間が長い時(766.7ミリ秒)は、負のプライミングが常に優位であった。これはテスト刺激が順応刺激と離れていても生じる遠距離運動残効と同等の現象と考えられる。一方でプライミン

グの持続時間が短い時(133.3ミリ秒)には、プライミング刺激とテスト刺激が同じ位置に提示された場合や両刺激の空間距離が短い場合には正のプライミングが優位に観察された。空間距離が長くなるにつれてプライミングは負の方向へと切り替わり、さらに空間距離が長くなるとプライミングの効果が完全に消失した。

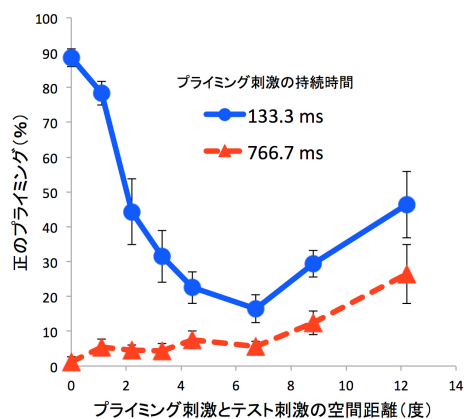


図2 明所視下における視覚運動プライミングの空間距離と持続時間の効果

この結果は、中心と周辺との相互作用がある程度の時間幅をもって機能する中心興奮-周辺抑制型の運動検出メカニズムが存在し、時空間的に離れた視覚運動情報を統合している可能性を示唆している。つまり、プライミング刺激とテスト刺激の空間距離が短い場合は、双方がメカニズムの中心部分において処理されるために、単一の運動方向が知覚される。一方でプライミング刺激とテスト刺激の空間距離が長い場合には、それぞれの刺激がメカニズムの興奮領域と抑制領域に分かれて処理されるが故に、テスト刺激の運動方向が反転して知覚される。

また、このメカニズムにおける周辺領域の大きさは最大で12度程度であるといえる。

(2) 図2で明らかになった視覚運動プライミング効果が薄明視においても現れるのかどうかを実験的に検討した。その結果を図3に示す。環境光レベルに関わらず、プライミング刺激とテスト刺激が同位置に提示された場合は正のプライミングが観察された。空間距離が3度を超える場合は、明所視(2.4 log Td)と暗所視(-1.1 log Td)においては負のプライミングが観察された。ところが薄明視(-0.1 log Td)においてはプライミング効果が消失し、正負どちらのプライミングも観察されなかった。知覚的印象で言えば、明所視下と暗所視下ではプライミング刺激とテスト刺激が一体化して動く印象(単一対象が常に一方向に運動する、あるいは単一対象が突然方向転換する)が得られた一方で、薄明視下ではプライミング刺激は運動して、テス

ト刺激は点滅して知覚された。この傾向はプライミング刺激の速度には依存しなかった。

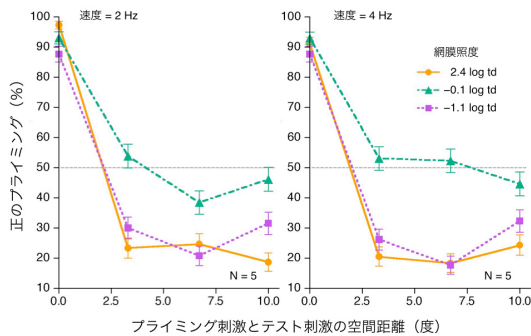


図3 視覚運動プライミングにおける環境光・空間距離・速度の効果

以上の結果から、薄明視では明所視や暗所視とは運動視の印象が質的に異なる事態が生じることがわかった。この特異性は、薄明視下において時空間的に離れた視覚運動情報の統合に問題が生じる故に生じている、と推測される。

(3) 薄明視の領域は広く、3 対数単位以上に渡る。そこで、運動視においてみられる特異的な印象変化が薄明視のどの領域で観察されるのを明らかにすべく、広い範囲の環境光レベル (2.0~-1.5 log Td) で視覚運動プライミングの実験を繰り返した。その結果を図4に示す。

図4は横軸が網膜照度、縦軸がプライミングの知覚確率である。図4から読み取れるように、約1対数単位の範囲において視覚運動プライミングが完全に消失し(テスト刺激のオンセットのずれが無い0.0 msであるシアン色の実線と赤い矢印で示した部分)、その他の薄明視領域でもプライミングや弱まる傾向にあった。このことから、薄明視の広い範囲において運動視が変容することがわかった。その一方で、明所視下と暗所視化では、プライミング刺激の効果が現れ、一体化した運動が知覚された。

プライミングの消失は、主に速い桿体系システムが活性化している環境光レベルで顕著であった。また、速い桿体系の関与が高まるにつれ(0.8 log Td 近辺)、プライミングは急速に消失した。このことから、速い桿体系が視覚運動情報処理に介入するやいなや、運動情報の時空間的な統合に問題が生じる可能性があるといえる。

(4) 図1に示した視覚刺激の例では、プライミング刺激に対しては桿体系に加えて錐体系が、テスト刺激に対しては桿体系が応答していると推定される。薄明視において運動視の特異性が生じるのは、錐体系と桿体系の時間特性の違いが情報統合を阻害しているためであるという仮説を立て、その検証実験を

遂行した。

薄明視における桿体系の処理の遅れにより、錐体系からの情報と桿体系からの情報との間に時間的にずれが生じ、そのために視覚運動プライミングが消失するのであれば、テスト刺激の提示を早めることにより、プライミング効果が復活する可能性がある。実験でこの点を検討したところ、図4に示したように、テスト刺激の提示を早めていくと、プライミング効果が観察されるようになった。テスト刺激を41.7ミリ秒早く提示すると、環境光レベルに関わりなく、視覚運動プライミングが観察されることがわかった。40ミリ秒という時間は、これまでに知られている桿体系の知覚的な遅れと合致する<sup>4</sup>。以上の結果は、錐体系と桿体系の時間特性の違いがプライミングの消失を招いているとする仮説を支持している。

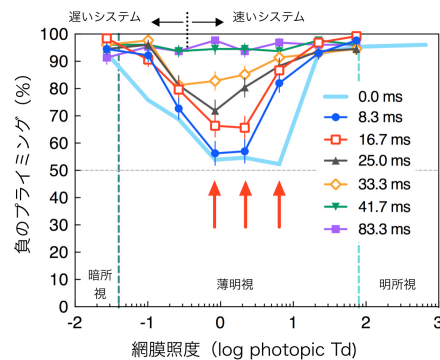


図4 視覚運動プライミングにおける網膜照度とテスト刺激の時間ずれの効果

錐体系からの情報と桿体系からの情報は網膜レベルで統合されているわけではなく、少なくとも大脳皮質における第一次視覚野では分離している。薄明視下の運動視では、第一次視覚野以降において、錐体系と桿体系の情報統合に問題が生じていると結論できる。

(5) これらの実験結果を踏まえると、薄明視における運動視機能の低下を補うための補償メカニズムに要請される必要条件は、

- 1~2対数単位の低環境光レベルで機能する
- 空間的には約10度まで離れた対象の統合を促進させる
- 時間的には300ミリ秒程度(プライミング刺激とテスト刺激の合計時間)まで離れた対象の統合を促進させる
- 速い桿体系がもたらす遅れ(最大で40ミリ秒)を補正する

となる。最後に紹介した研究結果(図4)は、海外の学術誌に投稿中である<sup>5</sup>。補償システムの実装に関する具体的な問題については、今後さらに検討していく必要がある。

<引用文献>

1. Billino, J., Bremmer, F., Gegenfurtner, K. R. (2008) Motion processing at low light levels: Differential effects on the perception of specific motion types. *Journal of Vision*, 8, 14, 1-10.
2. Takeuchi, T., Tuladhar, A., Yoshimoto, S. (2011) The effect of retinal illuminance on visual motion processing. *Vision Research*, 51, 10, 1137-1145.
3. Pinkus, A. & Pantle, A. (1997) Probing visual motion signals with a priming paradigm. *Vision Research*, 37, 5, 541-552.
4. Takeuchi, T. & De Valois, K. K. (2009) Visual motion mechanisms under low retinal illuminance revealed by motion reversal. *Vision Research*, 49, 8, 801-809.
5. Yoshimoto, S., Okajima, K., Takeuchi, T. (submitted) Motion perception during mesopic vision.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ①吉本 早苗、竹内 龍人、視覚運動プライミングにおける空間的距離の効果、基礎心理学研究、査読有、33 巻、2014、19-27  
DOI:10.1167/14.1.10
- ②竹内 龍人、吉本 早苗、錯視の科学とその映像メディアへの応用、映像情報メディア学会誌、査読無、68 巻、2014、855-860  
URL:<http://ci.nii.ac.jp/naid/1100098920>  
11
- ③ Sanae Yoshimoto, Tatsuto Takeuchi, Visual motion priming reveals why motion perception deteriorates during mesopic vision, *Journal of Vision*, 査読有、13 巻、2013, 1-21  
DOI:10.1167/13.8.8
- ④ 吉本 早苗、竹内 龍人、薄明視における視覚運動プライミングの反転、心理学研究、査読有、83 巻、2012、357-362  
DOI:10.4992/jjpsy.83.357

[学会発表] (計 4 件)

- ① Sanae Yoshimoto, Mariko Uchida-Ota, Katsunori Okajima, Tatsuto Takeuchi, Deterioration of visual motion perception in mesopic vision, *Vision Sciences Society (VSS2014)*, 査読有、2014 年 5 月 16 日~2014

年 5 月 21 日、St. Pete Beach, USA.

② 吉本 早苗、竹内 龍人、薄明視における運動知覚 ~錐体・桿体の応答速度差が及ぼす影響、日本心理学会第 77 回大会、査読無、2013 年 9 月 19 日~2013 年 9 月 21 日、札幌コンベンションセンター (札幌市)

③ 吉本 早苗、竹内 龍人、なぜ薄明視下では運動知覚が困難になるのか?、日本基礎心理学会第 31 回大会、査読無、2012 年 11 月 3 日~2012 年 11 月 4 日、九州大学 (福岡市)

④ Sanae Yoshimoto, Tatsuto Takeuchi, Why is it difficult to see moving objects in the dusk? The 8th Asia-Pacific Conference on Vision (APCV2012), 査読有、2012 年 7 月 13 日~2012 年 7 月 15 日、Incheon, Korea

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹内 龍人 (TAKEUCHI, Tatsuto)  
日本女子大学・人間社会学部・教授  
研究者番号: 50396165

(2) 研究分担者

岡嶋 克典 (OKAJIMA, Katsunori)  
横浜国立大学・環境情報研究科(研究院)・准教授  
研究者番号: 60377108

(3) 研究協力者

吉本 早苗 (YOSHIMOTO, Sanae)