

両眼視野闘争と連続フラッシュ抑制が示す

抑制の空間周波数特性

本居 快¹⁾・山本 彩加²⁾

Spatial frequency characteristics of suppression by binocular rivalry and continuous flash suppression

Kai MOTOORI and Ayaka YAMAMOTO

両眼に異なる情報が入力された場合、両眼間で知覚の交代が生じ、1眼の刺激が抑制される。これを両眼視野闘争という。また、より強力に1眼の入力を抑制する現象に連続フラッシュ抑制がある。両眼視野闘争と連続フラッシュ抑制とでは、抑制の機序が同一か異なっているかについて、確定的な答えは出していない。そこで本研究では、両眼視野闘争と連続フラッシュ抑制が示す抑制の空間周波数特性について検討した。本研究は、1眼に両眼視野闘争、あるいは連続フラッシュ抑制の抑制刺激を呈示し、もう1眼にGabor刺激を呈示した。Gabor刺激のコントラストを0~100%に変化させ、Gabor刺激が知覚されたコントラスト値を測定した。その結果、Gabor刺激の空間周波数が低いほど抑制が深い傾向が、両眼視野闘争と連続フラッシュ抑制のいずれにおいても確認された。これは、空間周波数情報に対する両眼視野闘争と連続フラッシュ抑制の抑制メカニズムが類似していることを示唆するものである。

Keywords : 両眼視野闘争, 連続フラッシュ抑制, 空間周波数特性, 抑制

Binocular rivalry, Continuous flash suppression, Spatial frequency characteristics, Suppression

1. 目的

我々が日常世界を知覚する時、知覚される情報はごく一部であり、それを超える情報の入力が生じている。しかし、知覚されない情報は、処理されていないわけではなく、脳が潜在的に処理しており、知覚の安定に用いられていると考えるのが妥当であろう。このような知覚されない刺激に対する情報処理の検討は、両眼視野闘争(Binocular Rivalry: 以下 BR)が用いられる(Wheatstone, 1838)。BRとは、両眼に異なる情報が入力された場合、両眼統合され、一時的に1眼の入力が知覚されなくなり、両眼間で知覚の交代が生じる現象である。

-
- 1) 愛知淑徳大学大学院心理医療科学研究科博士後期課程視覚科学専修
 - 2) 愛知淑徳大学健康医療科学部医療貢献学科視覚科学専攻

しかし、BRは、一方の刺激の優位性と他方の刺激の抑制は常に完全ではなく、知覚状態の遷移は確率的に発生するため、観察者と実験者の両方にとって予測不可能であり、実験手法としての安定性に欠ける(Blake & Logothetis, 2002)。そこで、BRより強力に1眼の入力を知覚抑制する方法として、Tsuchiya & Koch (2005)によって、連続フラッシュ抑制(continuous flash suppression : 以下CFS)現象が開発された。CFSとは、短時間で素早く変化する高コントラストの視覚刺激を片眼に呈示すると、他眼に同時呈示された低コントラストの視覚刺激が長時間見えなくなる現象である。両眼視野闘争では数秒で知覚が交代するのに対し、CFSを用いると、1分あるいはそれ以上の時間、片眼の知覚が抑制され続けることが報告されている(Tsuchiya & Koch, 2005)。CFSとBRの関係については、CFSを特に強い抑制を引き起こすBRの変種と考える説や(Shimaoka & Kaneko, 2011)、BRより強い刺激を用いたこととは異なるメカニズムによってCFSが支持されているとする説(Tsuchiya, Koch, Gilroy, & Blake, 2006)などがあり、まだ明らかとはなっていない。

そこで本研究は、BRとCFSともに同様の知見が報告されている空間周波数特性に着目した。BRとCFSに共通する空間周波数特性は、知覚抑制された刺激側の空間周波数によって抑制度が異なることを示している。Liu, Tyler & Schor (1992)によると、BRは空間周波数が高い格子パターンを用いた時に、知覚持続時間が長くなることが報告されている。また、Yang & Blake(2012)、Tsuchiya & Koch(2005)によると、Gabor刺激をCFSと同時呈示し観察させたとき、低空間周波数のGabor刺激ほど、知覚潜時が延長することを報告した。このように、BRとCFSの知覚抑制は、高空間周波数の刺激を呈示することによって減少し、低空間周波数に対しては増加することが示唆されている。

しかし、上記の空間周波数特性の報告は、CFSとBRが別個の実験で行われており、直接その効果を比較した検討はされていない。そこで本研究は、片眼に呈示したGabor刺激の空間周波数値によって、BRとCFSの抑制が変動するのかを、同一の実験設定を用いることで比較検討した。また、抑制の深さを知覚潜時ではなく、Gabor刺激のコントラストを0.0%から100%に変動させた時に、Gabor刺激を知覚することができたコントラスト値(コントラスト閾値)として分析した。

2. 方法

2.1. 実験参加者

正常な両眼視と矯正視力log MAR値0.0以上を有している平均年齢21歳(SD=±0)の大学生4名を実験参加者とした。実験参加者は、愛知淑徳大学健康医療科学部所属の学生であった。愛知淑徳大学健康医療科学部研究倫理委員会の承認(承認番号:健視倫理2020-43号)を受けたインフォームド・コンセントを行った。全員無報酬で実験に参加した。

2.2. 実験装置

刺激呈示は、液晶モニター(Eizo FlexScanSX2462W: refresh rate: 60Hz, 解像度: 1920×1080 pix)を用い、1画面内の左右に刺激を呈示した。実験観察装置は、反射型実体鏡とブラックボックスを用いて作成した両眼分離機を用いた(図1)。観察距離57.3 cmであった。

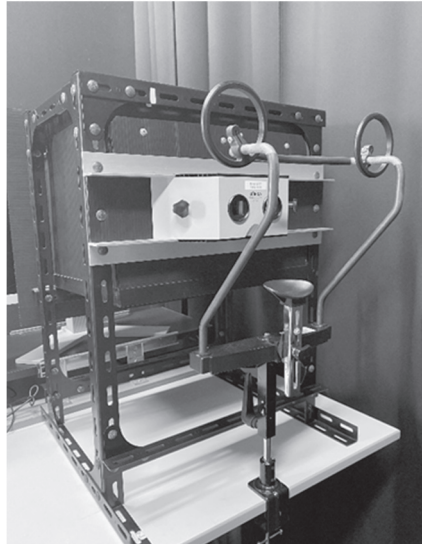


図1 本実験で用いた両眼分離機

2.3. 刺激

抑制刺激として、1辺が 4.0° の正方形のランダムドットを用いた(図2左)。ランダムドットのドット密度は50%であり、ドットサイズは $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ の正方形要素で構成され、空間周波数は5.0 cpdであった。また、ランダムドットは、BR条件時に静止画、CFS条件時に10.0 Hzで点滅している刺激の2つを作成した。

抑制刺激と同時呈示する刺激として、直径 4.0° でgauss関数のかけたGabor縞を用いた(図2右)。縞の空間周波数は0.62 cpd, 1.24 cpd, 1.86 cpdであった。Gaborパッチ刺激は、 120° か 60° の傾きにランダムに呈示した。また、固視点は十字刺激を用い、色は黒色で、サイズは $1^\circ \times 1^\circ$ であった。刺激のコントラスト設定は、Mengxin et al. (2019)の実験を参考に行った。実験準備時は、ランダムドット刺激と縞刺激ともに、Michelsonコントラスト20%とした。スペースキーを押すとランダムドットはマイケルソンコントラスト20%のまま、縞は50sかけてMichelsonコントラストを0%から100%となるように設定した。背景はRGB(127.5, 127.5, 127.5)となり、背景輝度は 43.3 cd/m^2 であった。この背景色を中心としてMichelsonコントラスト20%の縞刺激を作成した。

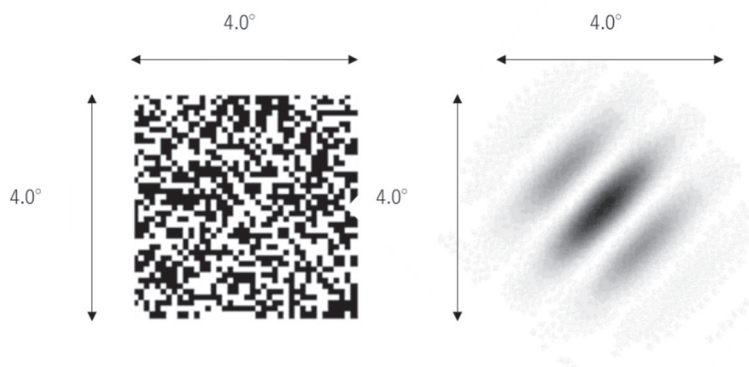


図2 本実験で用いた刺激

抑制刺激と同時呈示される刺激としてGabor縞刺激を用いた(右側)。抑制刺激としてランダムドット刺激を用いた(左側)。BR条件においては静止画で、CFS条件時には10Hzで点滅していた。

2.4. 実験条件

抑制刺激要因として、ランダムドットが静止している BR と、ランダムドットが 10 Hz で点滅している CFS 条件の 2 水準設定した。また、抑制刺激が呈示された眼によって、コントラスト閾値が変化するか検討するために、呈示眼要因として、抑制刺激の呈示眼が“優位眼条件”と“非優位眼条件”の 2 水準設定した。縞刺激の空間周波数要因として、縞刺激の空間周波数を 0.62 cpd, 1.24 cpd, 1.86 cpd の 3 水準設定した。

2.5. 手続き

最初に、被験者の感覚的優位眼を検出するために、The Miles & Porta test (Miles, 1930; Crovitz & Zener, 1964) を用いて、優位眼を決定した。

本実験の手続きについて図 3 に示した。ランダムドットの呈示位置は、ランダムドット呈示眼条件によって変動し、それに伴って、ランダムドット呈示眼の反対側に縞刺激を呈示した。刺激の呈示位置は、それぞれの被験者の瞳孔間距離に合わせた。初めに、十字の固視点を 5 s 呈示した。次に、ランダムドット刺激と縞刺激を各眼それぞれに呈示し、ランダムドット刺激によって縞刺激が知覚抑制されたら、スペース Key を押させて、実験をスタートさせた。実験は、縞刺激の Michelson コントラストを 0% から 100% に徐々に上昇させた。

実験参加者には、縞刺激を知覚したタイミングで、縞刺激の傾き方向を、キーボードにて報告させた。縞刺激が垂直方向を 0° としたとき、時計周りに 60° 方向に傾いている場合は右矢印 Key, 120° 方向に傾いている場合は左矢印 Key を押させた。縞刺激の傾きの報告は、縞刺激を確実に知覚しているかどうか確認するための二重課題であった。

実験データは、二重課題である縞の傾き方向が正答したデータを使用した。縞が見えなくなりスペース Key を押してから縞の向きが分かり矢印 Key を押すまでの、Key 押し時間込みの知覚抑制時間を測定し、そこから予備的実験で求めた Key 押しの単純反応時間を差し引いた値を知覚抑制時間とした(式①)。

$$\text{式① 知覚抑制時間} = \text{Key 押し時間込みの知覚抑制時間} - \text{Key 押し単純反応時間}$$

上記の式①で求めた知覚抑制時間を元に、毎 16.6ms で 0.033% のコントラストが増加する縞刺激のコントラスト値を算出し、抑制が生じなくなるコントラスト閾値を求めた(式②)。

$$\text{式② コントラスト閾値} = \text{知覚抑制時間} \times 0.033 / 100$$

抑制刺激要因(BR, CFS)と呈示眼要因(優位眼, 非優位眼), 空間周波数要因(0.62cpd, 1.24cpd, 1.86cpd)の 3 要因(12 水準)を完全ランダムに呈示し、各被験者の繰り返し回数は 5 回行った。求めたコントラスト閾値を用いて、3 要因完全独立分散分析を行い、各要因がコントラスト閾値に影響するかどうか検討した。

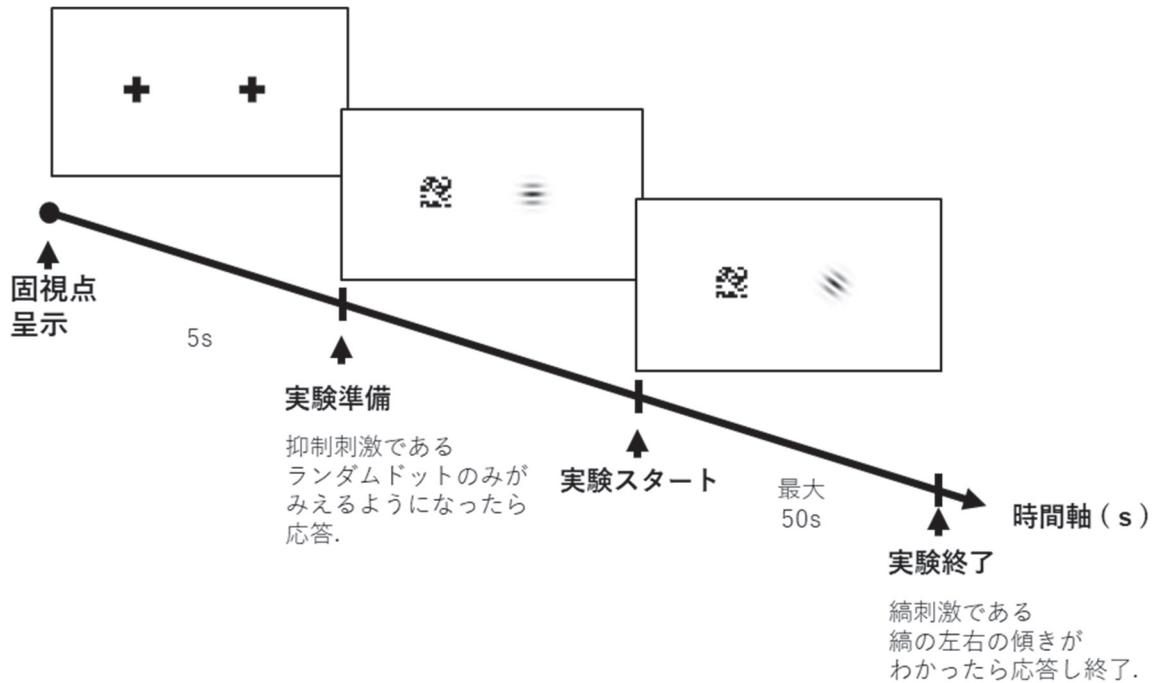


図3 本実験における手続き

3. 結果

BR と CFS で抑制の深さに違いがあるのか、また、抑制の深さに縞の空間周波数や抑制刺激であるランダムドットを呈示する眼によって異なるのかをコントラスト閾値によって検討した。そこで、抑制刺激要因、縞の空間周波数要因、ランダムドット呈示眼を要因とする 3 要因完全独立分散分析を行った。その結果、抑制刺激の主効果($F(1, 455) = 111.424, p < .001$)、縞刺激の空間周波数の主効果($F(2, 455) = 41.791, p < .001$)、ランダムドット呈示眼の主効果($F(1, 455) = 3.967, p < .05$)、全てが有意であった。

交互作用については、抑制刺激と空間周波数の交互作用($F(2, 455) = 8.432, p < .001$)が認められ、抑制刺激とランダムドット呈示眼の交互作用($F(1, 455) = 2.966, p < .10$)に有意傾向が認められた。また、空間周波数とランダムドット呈示眼条件の交互作用と、抑制刺激と空間周波数とランダムドット呈示眼条件の 2 次の交互作用は有意ではなかった(*n.s.*)。

そこで、抑制刺激条件と空間周波数条件の交互作用について検討した。図 4 に各抑制刺激条件における Gabor 刺激の空間周波数に伴うコントラスト閾値の変化を示した。抑制刺激と空間周波数の交互作用が認められたことから、単純主効果検定を行い、Bonferroni 法で多重比較の検討を行った。その結果、BR における縞の空間周波数条件は 0.62 cpd と 1.24 cpd、1.86 cpd の間には有意差が認められ($p < .01$)、1.24 cpd と 1.86 cpd の間には有意差は認められなかった(*n.s.*)。したがって、図 4 より、BR では縞の空間周波数が 0.62 cpd 条件で他の空間周波数条件よりも有意にコントラスト閾値が高いことが示された。また、CFS における縞の空間周波数条件は 0.62 cpd と 1.24 cpd、1.86 cpd の間に有意差が認められ($p < .001$)、1.24 cpd と 1.86 cpd の間には有意差は認められなかった(*n.s.*)。したがって図 4 より、CFS では縞の空間周波数が 0.62 cpd 条件で他の空間周波数条件よりも有意にコントラスト閾値が高いことが示された。縞の空間周波数条件の効果は、各抑制条件間で 0.62 cpd が 1.24

cpd, 1.86 cpd と比較して有意にコントラスト閾値が高く, 1.24 cpd と 1.86 cpd 間には有意差がないという同様の傾向を示した。

また, 縞の空間周波数 0.62 cpd, 1.24 cpd, 1.86 cpd の全ての空間周波数条件において抑制刺激条件間に有意差が認められた(全て $p < .001$)。よって図 4 より, 縞の全ての空間周波数条件において BR よりも CFS の方が有意にコントラスト閾値が高くなることが示された。

次に, 抑制刺激条件と呈示眼条件の交互作用について検討した。図 5 に各抑制刺激条件における各呈示眼条件でのコントラスト閾値を示した。抑制刺激と呈示眼の交互作用に 10%水準で有意傾向が認められたことから, 単純主効果検定を行い, Bonferroni 法で多重比較の検討を行った結果, BR 条件における呈示眼条件間に有意差は認められなかった($n.s.$)が, CFS 条件における呈示眼条件に有意な差が認められた($p < .01$)。したがって, CFS 条件において, 抑制刺激を優位眼に呈示した場合の方が非優位眼に呈示した場合と比較してコントラスト閾値が有意に高くなることが認められた(図 5)。

また, ランダムドット呈示眼が優位眼, 非優位眼の両条件において抑制刺激条件間に有意な差が認められた($p < .001$)。つまりランダムドット呈示眼が優位眼であった場合も非優位眼であった場合も, CFS 条件の方が BR 条件と比較してコントラスト閾値が統計的有意に高くなることが示された (図 5)。

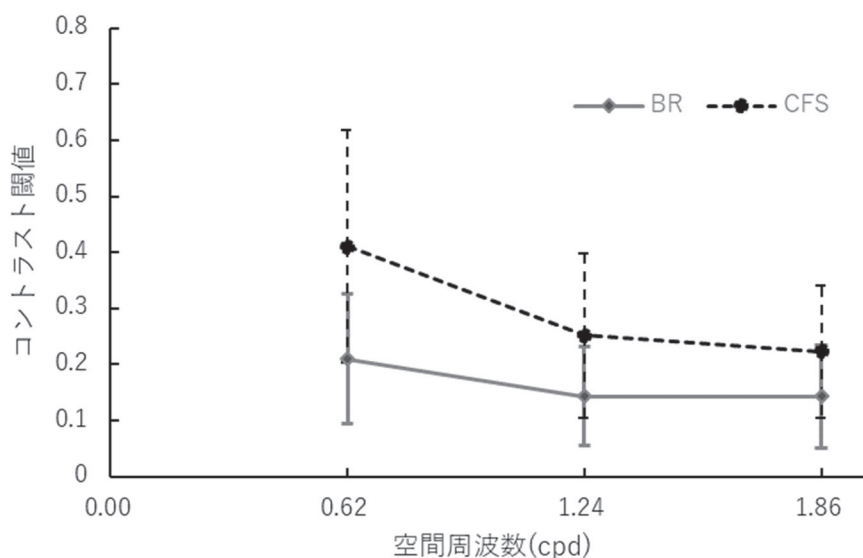


図 4 各抑制刺激条件における Gabor 刺激の空間周波数に伴うコントラスト閾値の変化

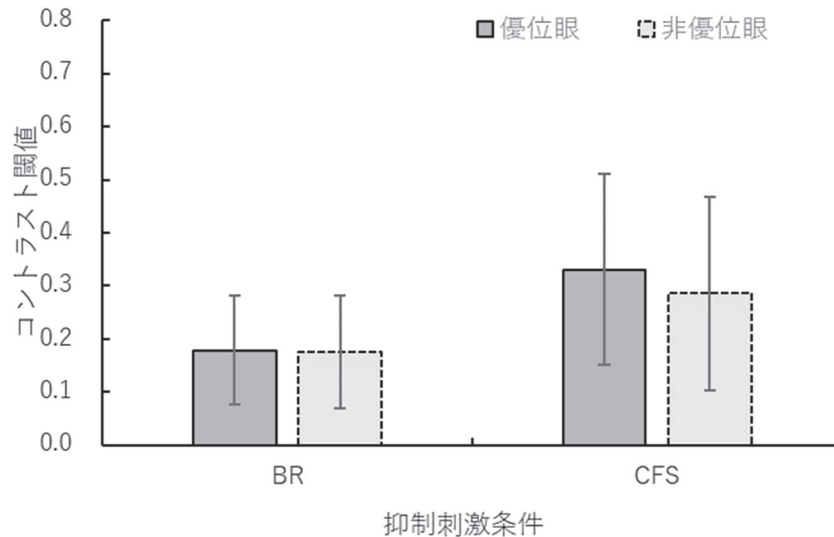


図5 各抑制刺激条件における各呈示眼条件でのコントラスト閾値

4. 考察

本研究では、片眼に呈示した Gabor 刺激の空間周波数によって、BR と CFS の抑制が変動するのかを比較検討した。また、抑制の深さを知覚潜時ではなく、Gabor 刺激の検出コントラスト閾値として分析した。コントラスト閾値が高いことは、抑制が深いことを意味する。その結果、BR と比較して CFS 刺激の方が有意にコントラスト閾値が高く抑制が深いことが示された。CFS は BR より抑制度が高いことが報告されており (Tuchiya et al., 2006)、先行研究を支持する結果となった。

また、BR、CFS とともに、片眼に同時呈示された縞の空間周波数が 0.62 cpd 条件で他の空間周波数条件よりも有意に抑制が深くなることが示された。この効果は特に CFS で顕著であった。これらの所見は、BR が空間周波数が高い格子パターンを用いた時に、知覚持続時間が長くなる (低空間周波数側の知覚持続時間が減少する) 報告 (Liu, Tyler & Schor, 1992) と一致していた。また、CFS についても同様な知見が報告されており、CFS の知覚抑制は、低空間周波数の Gabor 刺激ほど、知覚潜時が延長することと一致した (Yang & Blake, 2012; Tsuchiya & Koch, 2005)。上記の報告は、それぞれ BR 単独の実験や、CFS 単独の実験として報告されており、相互の関係性については検討されていない。本結果は、BR と CFS の抑制の深さに対する空間周波数への依存性が確認されたが、統計的な相互作用は認められなかった。このことは、BR と CFS に関する空間周波数に対する先行研究の知見が、共通のメカニズムであることを支持するものである。

また、眼優位性の効果について、BR は抑制刺激呈示眼がコントラスト閾値に対して有意な差は認められなかったが、CFS は、非優位眼と比較して優位眼の方が有意にコントラスト閾値が高く、抑制が深いことが示唆された。BR における眼優位性の効果は低いことが報告されており (Komori, Tada, Kimura, Kaahara, Ohashi, Okamoto, & Yamazaki, 2000; Ding, Naber, Gayet, Stigchel, & Paffen., 2018)、彼らの報告を支持する結果となった。また、CFS については、基本的な実験パラダイムとして、優位眼側に CFS 刺激を呈示することが多い。Yang, Blake, & McDonald (2010) によると、眼優位性と CFS の抑制には相関があることが示唆されており、本結果も優位眼側のコントラスト閾値が高い結果であったことから、彼らの結果を支持するものであった。また、空間周波数と刺激呈示眼の交互作用は認められておらず、刺激呈示眼が優位眼、非優位によって空間周波数に対する抑制の深さは生じないことが示唆された。

本実験結果を解釈するにあたり、注意する点として、本実験で用いた CFS 刺激の刺激強度が、他

の先行研究と比較して、弱い可能性がある。本実験で定義した CFS 刺激は、同様の柄のランダムドットを点滅させたものであり、刺激のリフレッシュが行われていない。CFS 刺激については、時間周波数や輝度、テクスチャーなどを操作することによって、同時呈示する刺激の知覚潜時の変動が多く報告されている(Yang & Blake, 2012; Hong & Blake, 2009; Moors, Wagemans & de-Wit, 2014; Han, Lunghi & Alais, 2016., Zhu, Drewes & Melcher, 2016; Blakemore & Carripbell, 1969.)。これらの報告は、CFS 刺激の属性がコントラスト閾値に影響する可能性を示唆している。この点の影響に関しては今後の研究課題である。

本研究の結果は、CFS と BR の知覚抑制のメカニズムが、空間周波数に関与する処理系においては同一である可能性を示唆する。Tuchiya et al. (2006) は CFS の抑制メカニズムとして、複数回フラッシングが入力されその蓄積により、抑制効果が生じているとしている。この報告は、CFS が BR より単純に刺激強度が高まり、両眼闘争が起きることから生じるものではないことを意味する。しかし、本結果や先行研究(Tyler & Schor, 1992; Yang & Blake, 2012; Tsuchiya & Koch, 2005)から示唆されているように、BR と CFS の示す抑制の、空間周波数への依存性はメカニズムの共通性を示唆するものであると考えられる。

引用文献

- Blakemore & Carripbell (1969). On the existence of neurons in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of retinal images. *Journal of Physiology*, 203, 237-260.
- Blake, R. & Logothetis, N. K. (2002). Visual competition. *Nat. Rev. Neurosci*, 3, 13–21.
- Crovitz, H. & Zener, K. (1962). A group-test for assessing hand and eye- dominance. *American Journal of Psychology*, 75, 271–276.
- Han, S.E., Blake, R., & Alais, R. (2018). Slow and steady, not fast and furious: Slow temporal modulation strengthens continuous flash suppression. *Consciousness and Cognition*, 58, 10-19.
- Han, S., Lunghi, C., & Alais, D. (2016). The temporal frequency tuning of continuous flash suppression reveals peak suppression at very low frequencies. *Scientific Reports*, 6, 35723, 2016.
- Hong, S.W. & Blake, R. (2009). Interocular suppression differentially affects achromatic and chromatic mechanisms. *Attention, Perception, and Psychophysics*, 71 (2), 403-411.
- Komori, T., Tada, Y., Kimura, T., Kawahara, Y., Ohashi, T., Okamoto, K. & Yamazaki, K. (2000). Influence of visual acuity and eye dominance on binocular rivalry. *Journal of Advanced Science*, Vol.12, No.1&2, 61-62.
- Liu, L., Tyler, C.W., & Schor, C.M. (1992). Failure of rivalry at low contrast: Evidence of a suprathreshold binocular summation process. *Vision Research*, 32, 1471-1479.
- Miles, W. R. (1930). Ocular dominance in human adults. *Journal of General Psychology*, 3, 412-420.
- Moors, P., Wagemans, J. & de-Wit, L. (2014). Moving stimuli are less effectively masked using traditional continuous flash suppression (CFS) compared to a moving Mondrian mask (MMM): A test case for feature-selective suppression and retinotopic adaptation. *PLoS One*, 9 (5).
- Shimaoka, D. & Kaneko, K. (2011). Dynamical systems modeling of continuous flash suppression. *Vision Research*, 51, 521–528.
- Tsuchiya, N. & Koch, C. (2005). Continuous flash suppression reduces negative afterimages. *Nature Neuroscience*, 8(8), 1096-1101.
- Tsuchiya, N., Koch, C., Gilroy, L. A., & Blake, R. (2006). Depth of interocular suppression associated with continuous flash suppression, flash suppression, and binocular rivalry. *Journal of Vision* 6, 1068–1078.

- Wheatstone, C. F. R. S. (1838). Contributions to the physiology of vision – Part the first. On some remarkable, and hitherto unobserved, phenomena of binocular vision. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 128, 371-394.
- Yang, E. & Blake, R. (2012). Deconstructing continuous flash suppression. *Journal of Vision*, 12(3):8, pp.1–14.
- Yang, E., Blake, R., & McDonald, J. E. (2010). A new interocular suppression technique for measuring sensory eye dominance. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 51, 588–593.
- Yun, D., Marnix, N., Surya, G., Stefan Van der S., & Chris L. E. (2018). Assessing the generalizability of eye dominance across binocular rivalry, onset rivalry, and continuous flash suppression. *Journal of Vision*, Vol18, 6.
- Zhu, W., Drewes, J., & Melcher, D. (2016). The influence of temporal properties of the mask on continuous flash suppression effectiveness. *PLoS One*, 11 (7).

(2021年 1月 29日 受付)
(2021年 2月 15日 受理)