

## 両眼競合知覚の神経機構

駄竹 清秀<sup>†</sup> 酒井 裕<sup>‡</sup> 吉澤 修治<sup>‡</sup>

† 埼玉大学大学院理工学研究科

〒330-8570 さいたま市下大久保 255

‡ 埼玉大学工学部

〒330-8570 さいたま市下大久保 255

E-mail: † {dachiku,sakai,yoshi}@bios.ics.sitama-u.ac.jp

**あらまし** 両眼に異なる視覚刺激を与えると、どちらか一方を優勢に知覚する。この知覚現象を両眼競合現象と呼ぶ。この知覚現象に関する知見は、両眼からの視覚刺激の融合メカニズムを解明する手がかりとなりうる。本稿では、このような両眼競合が局所的な結合をもつ方位選択性素子の集団によって再現されることを示し、両眼競合に関する心理実験によって明らかにされている定性的な性質を再現するためには、どのような結合を持つべきか検討する。

**キーワード** 両眼競合, 方位選択性, 結合の異方性

## Neural Mechanism of Binocular Rivalry

Kiyohide DACHIKU<sup>†</sup> Yutaka SAKAI<sup>‡</sup> and Shuji YOSHIZAWA<sup>‡</sup>

† Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

255 Shimoohkubo, Saitamashi, Saitama, 330-0014 Japan

‡ Faculty of Engineering, Saitama University

255 Shimoohkubo, Saitamashi, Saitama, 330-0014 Japan

E-mail: † {dachiku,sakai,yoshi}@bios.ics.saitama-u.ac.jp

**Abstract** When two eyes view radically different patterns, only one pattern which is dominant is perceived at a time. This perceptual dominance is termed binocular rivalry, which may provide a new tool for investigating the mechanism of binocular fusion. Here, we show that this phenomenon is explained by using a network which consists of locally connected neurons with orientation preference. Also, we investigate the property of the connection which is required for realization of the qualitative results shown by the psycho-physical experiments on the binocular rivalry.

**Keyword** binocular rivalry, orientation preference, connection anisotropy

## 1. はじめに

両眼にそれぞれ融合することのない異なる視覚刺激を与えると、片眼からの知覚がもう一方を抑制して、片眼からの知覚だけが優勢になる。この知覚現象は両眼競合と呼ばれる。優勢な知覚は不安定であり、しばしばもう片方に切り替わる。この切り替わりの割合や片眼の知覚が優勢でいる時間は、“視覚刺激の強さ”に依存する。“視覚刺激の強さ”とは特に、刺激となっているイメージの“明るさ”や“コントラスト(明暗の差)”である。では、この両眼競合現象は脳でどのような視覚情報処理の機構で起きているのだろうか。考えられる一つの可能性は、von Helmholtz(1910)が、この競合は注意の意図的な変化によって起こっていると指摘したように、片眼への選択的注意のような大域的な機構である。また、von Helmholtz(1910)、Liuら[1]は、両眼競合における優勢な知覚の切り替わりは、部分的にも起こり得て、ある部分は右眼、ある部分は左眼が優勢となり、つぎはぎ状になっているように知覚されると指摘した。このことは、この競合が局所的な情報処理、したがって比較的、初期の視覚処理の段階で起きている可能性を示唆しているように見える。

Wilsonら[2]は、両眼競合現象について以下のような心理実験を行った。図1のような画像を被験者に呈示する。はじめに、片眼に渦巻状模様の環(図1、中央)を呈示し、もう一方の眼に放射状模様の環(図1、左)を呈示する。片眼に呈示する渦巻状模様の環のコントラストを予め高くしておく。そうすると被験者は渦巻状模様の環を優勢に知覚する。次に、放射状模様の環の一部分のコントラストを上げると、その部分から優勢側が切り替わって伝わっていく(図2)。彼らはこの伝播速度を測定した。同様に、放射状の模様の環の代わりに円心状模様の環(図1、右)を呈示し、切り替わって伝わっていく伝播速度を測定した。その結果、伝播速度は、放射状模様よりも円心状模様の方が速くなった。また、刺激の傾きが放射状と円心状のほぼ中間である渦巻状(図1、中央の逆向き)の伝播速度は、放射状と円心状のほぼ中間になった。このことから、Wilsonらは、刺激模様の傾きに対して、伝播していく方向が垂直であるほど遅く、平行であるほど速く伝播すると結論した。

Wilsonらの実験で、一部分が優勢になると、そこから徐々に広がり伝わっていくことから、各部分での知覚情報がそのまわりの知覚に影響していることがわかる。このことは、優勢知覚の切り替わりが、局所的な機構で生じていることを示唆している。そして、その伝播速度の違いは、局所的な伝播速度の異方性に起因していると考えられる(図3)。

伝播速度の異方性は、神経細胞間の局所的な結合形



図1： Wilsonらの実験の呈示画像



図2： 優勢の切り替わり

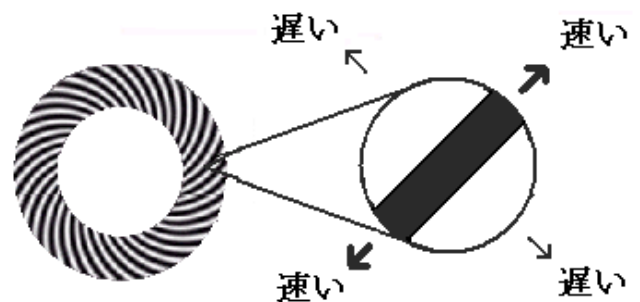


図3： 局所的な伝播速度の異方性

態の異方性によって再現することができる。大脳皮質の初期視覚野には方位選択性細胞と呼ばれる神経細胞が存在する。方位選択性細胞は、網膜上の特定の範囲に映った特定の傾きをもつ輪郭に選択的に反応する。このような神経細胞が担当する網膜上の範囲を受容野と呼ぶ。優勢知覚の伝播速度の異方性は、このような方位選択性細胞間の局所的な結合形態の異方性によって再現可能である。例えば、図4のように、同じ最適方位を持つ細胞間の結合が、その最適方位方向ほど結合範囲が広いとすれば、呈示されている刺激模様の傾き方向に速く伝播すると考えられる。

本研究では、方位選択性細胞の局所的な結合形態の要素として2つの特性(結合の強さ、結合の範囲)に注目し、どのような異方性をもてばWilsonらの実験が再現できるかを調べる。

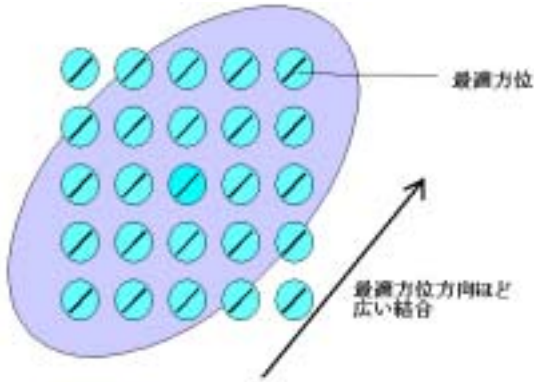


図 4 : 同じ最適方位を持つ細胞間の結合の異方性

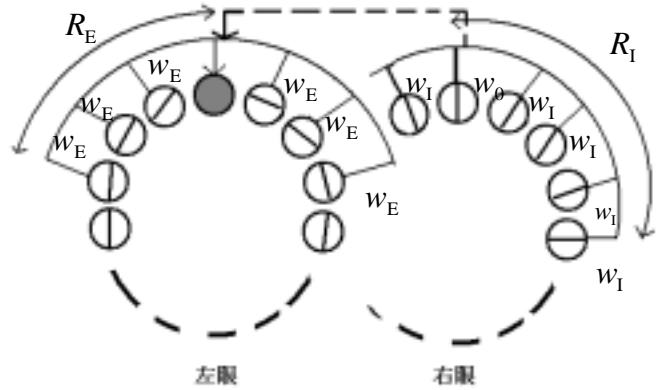


図 5 : 環状の 1 次元モデル

## 2. モデル

すべての細胞の受容野は網膜上全体を覆うものとする。各視野に左眼と右眼に対応する様々な方位に選択的に反応する方位選択性素子が存在し、それらの中に以下のような結合があるものとする。

- ・ 異眼間で抑制結合（両眼競合）
- ・ 同眼間で興奮結合（優勢な知覚の伝播）

この二種類の結合の強度および範囲は各方位選択性素子の最適方位に対して異方性を持っているとする。

以上のような系に対して Wilson らの実験と同様な刺激画像（図 1）が、呈示されたとする。このとき受容野内に呈示されている傾きに最適に反応する素子のみが活動すると仮定し、それ以外の方位選択性素子を無視する。また、円環図形（図 1）の幅を無視し、円上に受容野が位置する素子のみを考える。この仮定より、Wilson らの問題は、図 5 のような環状の 1 次元モデルに帰着できる。このとき、結合形態の異方性は、1 次元軸方向の結合強度・結合範囲の違いとして扱うことができ、そこで本研究では、1 次元軸方向の結合強度・結合範囲の違いと伝播速度との関係を調べる。

次に、このモデルの詳細な構造について述べる。

素子  $i$  に対する刺激のコントラストを入力  $u_i$ 、

左眼に対応する素子の発火率を  $x$ 、

右眼に対応する素子の発火率を  $y$  とすると、

$$x_i(t+1) = g(u_i(t) - w_0 y_i(t))$$

$$+ w_E \sum_{k=1}^{R_E} ((x_{i+k}(t) + x_{i-k}(t)))$$

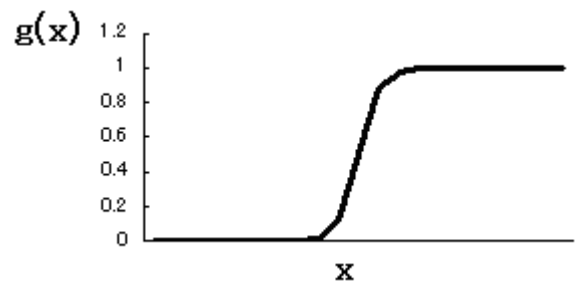


図 6 : 素子  $i$  の出力（発火率）

$$- w_I \sum_{k=1}^{R_I} ((y_{i+k}(t) + y_{i-k}(t)))$$

ここで 
$$g(x) \equiv \frac{1 + \tanh(x)}{2}$$

とする（図 6）。

各パラメータの意味は下記の通りである（図 5）。

- $R_I$  : 抑制性結合の範囲
- $R_E$  : 興奮性結合の範囲
- $w_I$  : 抑制性結合の強度
- $w_E$  : 興奮性結合の強度

また、片眼に対する素子の数を 1000 個とする。

## 3. シミュレーション方法

まず、あらかじめ左眼の素子の発火率を上げておく。そうすると右眼の素子を抑制して左眼が優勢に知覚し

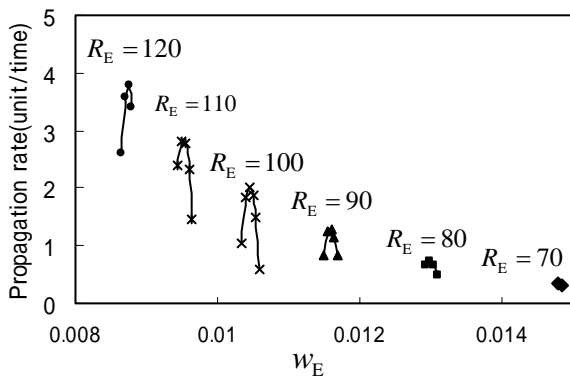


図 7 : 興奮強度  $w_E$  に対する伝播速度の変化 ( $R_E$  一定)

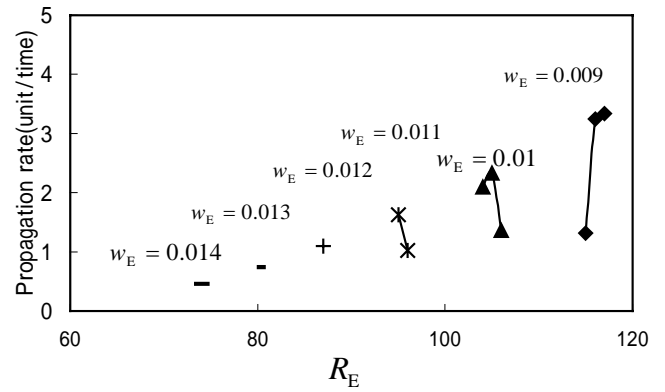


図 8 : 結合範囲  $R_E$  に対する伝播速度の変化 ( $w_E$  一定)

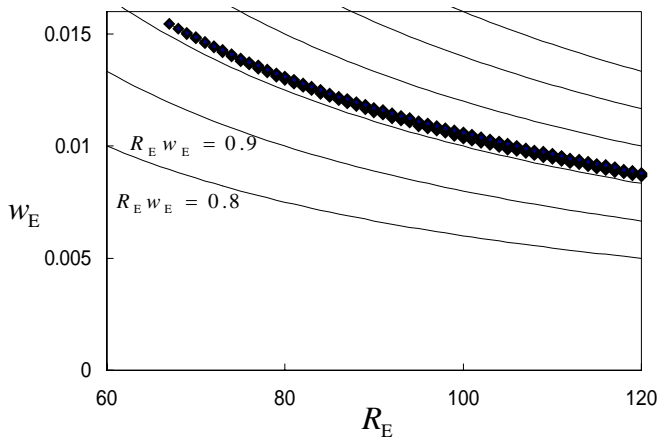


図 9 : 伝播可能なパラメータ領域 ( $R_E, w_E$ )

( ) 最後まで伝播したパラメータ

(実線)  $R_E w_E = \text{一定}$  の等高線

ている状態になる．次に右眼の刺激画像の一部（素子 30 個）のコントラストを一定時間上げると、その部分から優勢に知覚されている部分が切り替わって伝わっていく．そして、最後の素子まで発火率が反転したのについて伝播速度を測定した．伝播速度は、コントラストを上げ下げした時から最後の素子の発火率が反転するまでにかかった時間と、それまでに発火率の反転が起こった素子数より算出した．

## 4. 結果

### 4.1. 興奮性結合の異方性

興奮性結合についての異方性を調べるために、パラメータ  $w_I, R_I$  を下表のように固定した．

$w_I$	$R_I$
0.01	100

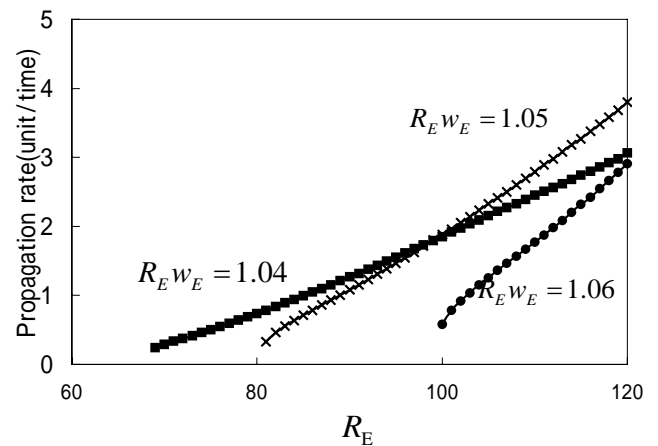


図 10 :  $R_E w_E = \text{一定}$  での伝播速度の変化

はじめに、興奮性結合の範囲を固定したまま、興奮性結合の強度を変え、次に強度を固定して範囲を変えた場合について各パラメータでの伝播速度を計測した（図 7、図 8）．この結果は最後まで伝播した時の値のみをプロットしてある．この二つの結果から、どちらか片方のみを変えた時は、伝播速度は非単調に変化し、また、最後まで伝播するパラメータの範囲は狭いことがわかる．そこで、この二つのパラメータのどのような領域で最後まで伝わるかを調べた(図 9)．図上の等高線のようなラインは、結合範囲内にある素子すべての結合強度の総量が一定すなわち、

$$R_E \times w_E = C$$

を表す．

図 9 から、最後まで伝播する二つのパラメータ領域は、 $R_E w_E = 1.05$  であるライン付近に沿って分布している．また、それはごく狭い範囲であることがわかる．よって、伝播する可能性を保ったまま伝播速度を変化させるためには、 $R_E w_E = 1.05$  のライン付近に沿ってパラメータを変化させなければならない．

図 1 0 は、 $R_E w_E =$ 一定にしてパラメータ  $R_E$  を変えた結果である。結合の範囲の増加に対して、伝播速度は単調に増加した。したがって、 $R_E w_E =$ 一定に保ったまま、 $R_E$  と  $w_E$  が異方性を持つような結合形態で伝播速度の異方性が再現可能であることがわかった。

#### 4.2. 抑制性結合の異方性

抑制性結合についての異方性を調べるために、パラメータ  $w_E, R_E$  を下表のように固定した。

$w_E$	$R_E$
0.0105	100

興奮性結合の時と同様に、まず、抑制性結合の範囲を固定したまま、結合の強度を変え、次に、強度を固定して範囲を変えた場合について、各パラメータでの伝播速度を計測した。最後まで伝播したパラメータのみをプロットした(図 1 1、図 1 2)。その結果どちらの場合も、興奮性結合の時と比べて、単調増加の部分が多いが非単調であった。次にこの二つのパラメータの伝播可能な領域を調べた(図 1 3)。興奮性結合の時と同様に、 $R_I w_I =$ 一定のラインに沿って分布している。また、興奮性結合の時と比べるとより広い領域で伝播可能であることがわかった。次に、 $R_I w_I =$ 一定にし、この二つのパラメータを変えた場合の結果が図 1 4 である。これも興奮性結合と同様に結合の範囲  $R_I$  の増加に対して単調に増加した。したがって  $R_I w_I =$ 一定に保ったまま、この二つのパラメータが異方性を持つような結合形態で伝播速度の異方性が再現可能である。

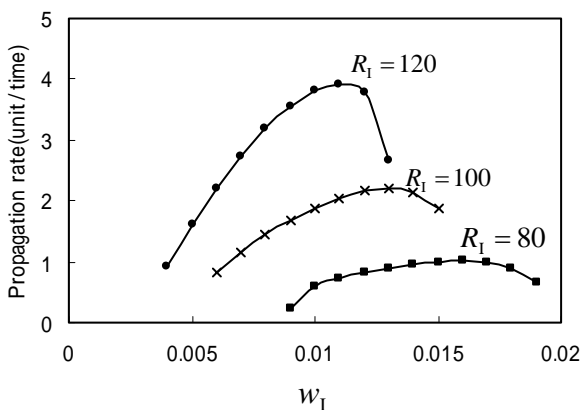


図 1 1 :  $w_I$  に対する伝播速度の変化 ( $R_I$  一定)

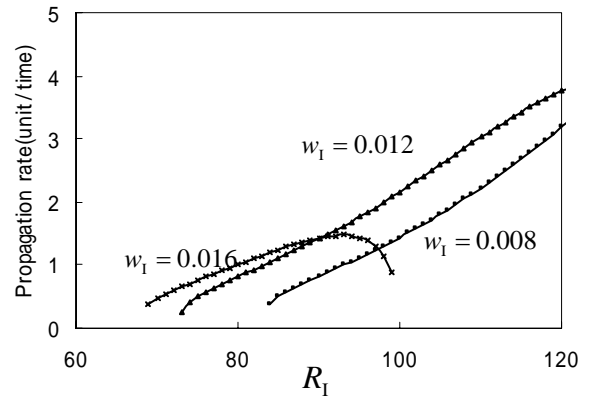


図 1 2 :  $R_I$  に対する伝播速度の変化 ( $w_I$  一定)

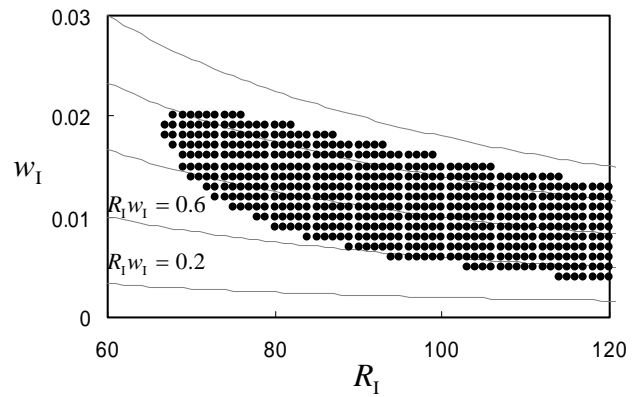


図 1 3 : 伝播可能なパラメータ領域 ( $R_I, w_I$ )

( ) 最後まで伝播したパラメータ  
 (実線)  $R_I w_I =$ 一定の等高線

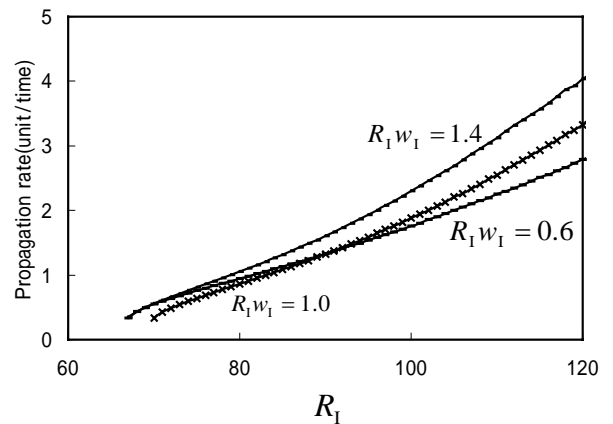


図 1 4 :  $R_I w_I =$ 一定での伝播速度の変化

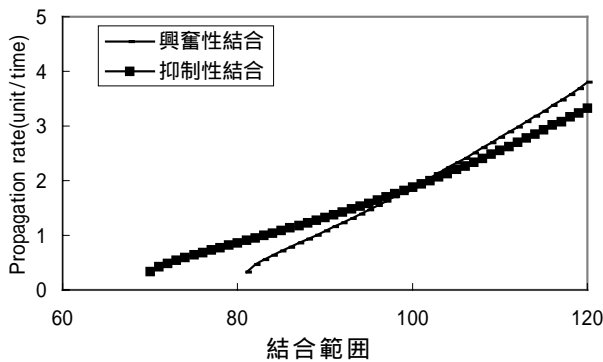


図 15 : 興奮結合と抑制結合の比較

### 4.3. 興奮性結合と抑制性結合の異方性の違い

前節より興奮性結合と抑制性結合についてある一定のパラメータ領域において異方性を再現できた。そこで、興奮性結合および抑制性結合の異方性の比較を試みた。図 15 は、 $R_E w_E = 1.05$  と  $R_I w_I = 1.0$  を再記したもので、興奮性結合のパラメータを変えていった場合と、抑制性結合のパラメータを変えていった場合である。その結果どちらの場合も同じような伝播速度の単調増加となっている。しかし、図 9 と図 13 より、伝播可能なパラメータの範囲が大きく異なる。抑制性結合の異方性の方が広い範囲である。したがって、伝播速度の異方性は、抑制性結合の異方性を使った方が再現しやすい。

## 5. まとめ

興奮性結合および抑制性結合ともに、結合強度、結合範囲のどちらか一方を変えていった場合、伝播速度は非単調な変化をし、また、結合範囲内の結合強度の総量が一定である時には、どちらの場合も結合範囲に対して伝播速度は単調に増加した。伝播可能なパラメータ領域は、抑制性結合の方が広いことがわかった。

## 6. 議論

Wilsonらの実験結果である優勢な知覚が切り替わって伝わっていく速さの異方性は、局所的な興奮性結合または抑制性結合の異方性によって再現できることが示された。また、抑制性結合の方がより再現しやすいことがわかった。しかし、本稿での考察の範囲で再現

しやすいことから直に抑制性結合の異方性の存在を主張することはできない。

今後の課題として、モデルのサイズを変えたときに生ずる問題を検討する必要がある。特に、結合範囲  $R$ 、結合強度  $w$  にサイズ依存性があるかどうかを調べることが重要である。

## 参考文献

- [1] Lui, L., Tyler, C. W. & Schor, C. " Failure of rivalry at low contrast : Evidence of a suprathreshold binocular summation," Vision Research, vol.32, pp.1471-1479(1992)
- [2] Hugh R. Wilson, Randolph Black, Sang-Hum Lee " Dynamics of travelling waves in visual perception," NATURE, VOL.421, PP.907-910, August 2001.
- [3] Frank Sengpiel, Colin Blakemore, Richard Harrad " Interocular Suppression in the Primary Visual Cortex: a Possible Neural Basis of Binocular Rivalry," Vision Res, No.2, pp.179-195(1995).
- [4] 佐藤宏道, 脳科学大辞典, 甘利俊一, 外山敬介, 朝倉書店, pp.102-108.