興奮は、続いた線なら結合の平方根の速さで広がり、飛び飛びの節なら結合が弱いと途中で止まる

— 代表値で、無髄の神経は直径の平方根、有髄の神経は直径に比例して速くなり、**25** m/s に要る直径は **500** μm と **4.166667** μm で、断面積は **14400** 倍ちがう — 分離子は、興奮を運ぶ道が続いているか飛び飛びか（髄鞘があるか） — [論文793]

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)
Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan｜山岸勇輝ラボ
2026年9月

— From thinking to syncing. —

要旨

神経の興奮が伝わる速さは、線維が太いほど速い。ただし髄鞘のない線維は直径の平方根で、髄鞘のある線維は直径に比例して速くなる、と知られている。続いた線を伝わる興奮と、飛び飛びの節を伝わる興奮を一つの双安定の式で表し、速さと、飛び飛びのときだけに起きる「止まる」ことを数える。新しい定理も法則も主張しない。 第一に、同じ速さに要る太さは、道の形で桁違いになる——代表値で 25 m/s に要る直径は無髄 500 μm、有髄 4.166667 μm、断面積の比 14400（第2節）。 第二に、結合が強いと、飛び飛びの節も続いた線と同じ速さで伝わる——結合 $g = 3$ で続いた線の式の 0.996181 倍（第3節）。 第三に、結合が弱いと、飛び飛びの節は式より遅い——$g = 0.05$ で 0.713506 倍（第3節）。 第四に、これが本稿の芯である。飛び飛びの節では、結合が弱いと興奮が止まる——$g = 0.018$ では時間 3000 たっても次の節へ移らず、$g = 0.019$ では端まで広がる（第4節）。 第五に、止まるのは、はじめの置き方や刻みのせいではない——時間の刻みを半分にしても、はじめに興奮させる節を 5 個から 10 個にしても、$g = 0.018$ は止まる（第4節）。 第六に、分離子は、興奮を運ぶ道が続いているか飛び飛びか（髄鞘があるか）である——「つながりが弱ければ遅くなるだけ」は、道が続いているか飛び飛びかを言うまで真偽が決まらない（第5節）。 キーワード：神経の伝導速度、有髄神経、跳躍伝導、双安定の鎖、伝播の停止、反応拡散。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——髄鞘のない線維の速さが直径の平方根、髄鞘のある線維の速さが直径に比例すること、双安定の反応拡散の式の進行波の速さ $\sqrt{D/2}(1-2a)$、飛び飛びの細胞をつないだ鎖では結合が弱いと伝播が止まることは、いずれも既知である（ラシュトン 1951、キーナー 1987）。模型は無次元である——双安定の式 $u(1-u)(u-a)$ で $a=0.25$ と置いた抽象的な鎖で、実在の神経の膜の電流は入れない。直径との対応は置き方である——続いた線では拡散の強さが直径に比例し、飛び飛びの節では節の間隔が直径に比例して結合が変わらない、と置いたときの尺度の話である。速さの係数は代表値である——無髄は直径 500 µm で 25 m/s、有髄は直径 1 µm あたり 6 m/s を引用の桁として置いた。病気を扱わない——髄鞘が壊れる病気で何が起きるかは述べない。既刊との関係：論文272 は、同じ「2 倍に感じる」が刺激の側では 6.70 倍ひらくことを示した——その射程注記は神経の機構を扱わず、受容器も符号化も立ち入らないと明記していた。そこでは感じ方と刺激の大きさの対応を数えた。ここではその手前、興奮が線維を伝わる速さが道の形でどう決まり、飛び飛びの道では止まりうることを数える。加えたのは、代表値で二つの尺度の速さを並べ、25 m/s に要る断面積の比 14400 を出したこと、双安定の鎖で速さを数値で出し、結合が強いと続いた線の式に近づくことを示したこと、止まる境を $g=0.018$ と 0.019 のあいだに挟み、刻みとはじめの置き方を変えて確かめたこと、分離子を「道が続いているか飛び飛びか」に置いたことである。

1. 記法と問い

設定：興奮の度合いを u、双安定の反応を $f(u)=u(1-u)(u-a)$ とする。続いた線では拡散の強さ D で、飛び飛びの節では隣との結合 g で興奮が伝わる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D\,\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + f(u), \qquad c = \sqrt{\frac{D}{2}}\,(1-2a)$$

$$\frac{du_n}{dt} = g\,(u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}) + f(u_n)$$

続いた線の速さ c は $\sqrt{D}$ に比例する。飛び飛びの鎖も、結合が強ければ $\sqrt{g/2}(1-2a)$ 節/時間に近い。$a=0.25$ と置く。

問い：興奮を運ぶ道が続いているときと飛び飛びのときで、伝わり方は何が違うか。

2. 太さと速さ

計算 2.1：代表値の係数（無髄は直径 500 µm で 25 m/s、有髄は直径 1 µm あたり 6 m/s）で、五つの直径の速さと、25 m/s に要る直径を出した。

直径	無髄（直径の平方根）	有髄（直径に比例）	比
1 µm	1.118034 m/s	6.000000 m/s	5.366563
5 µm	2.500000 m/s	30.000000 m/s	12.000000
20 µm	5.000000 m/s	120.000000 m/s	24.000000

25 m/s に要る直径は、無髄 500.000000 µm、有髄 4.166667 µm。直径の比 120.000000、断面積の比 14400.000000。

> 観察 2.2
>
> 同じ速さに要る太さは、道の形で桁違いになる。冪が 1/2 と 1 で違うので、直径が大きいほど比は開き、25 m/s を得るのに要る断面積は 14400 倍ちがう——太くして速くする道と、飛び飛びにして速くする道は、同じ速さに別の太さを払う。

3. 飛び飛びの節の速さ

計算 3.1：60 個の節の鎖で、はじめの 5 個を興奮させ、節 20 から 40 までの速さを測って、続いた線の式と比べた。

結合 g	速さ（節/時間）	続いた線の式	比
0.05	0.056408	0.079057	0.713506
0.1	0.096759	0.111803	0.865437
0.3	0.186204	0.193649	0.961553
1.0	0.349664	0.353553	0.988998
3.0	0.610034	0.612372	0.996181

> 観察 3.2
>
> 結合が強いと、飛び飛びの節も続いた線と同じ速さで伝わる。$g = 3$ で式の 0.996181 倍、$g = 1$ で 0.988998 倍である——節の間隔が興奮の広がりに比べて短ければ、飛び飛びであることは効かない。

観察 3.3

結合が弱いと、飛び飛びの節は式より遅い。$g = 0.1$ で 0.865437 倍、$g = 0.05$ で 0.713506 倍に落ちる——続いた線の式は、結合が弱くなるほど飛び飛びの鎖を言い当てなくなる。

4. 止まる境

計算 4.1：14 個の節の鎖で、はじめの 5 個を興奮させ、時間 3000 のあとに興奮している節の数を数えた（時間の刻み 0.02）。

結合 g	時間 3000 のあとに興奮している節	伝わり方
0.010	5 個	止まる
0.015	5 個	止まる
0.018	5 個	止まる
0.019	14 個	端まで広がる
0.020	14 個	端まで広がる

時間の刻みを 0.01 にしても $g = 0.018$ で 5 個、$g = 0.019$ で 14 個。$g = 0.018$ ではじめに興奮させる節を 10 個にしても 10 個のままだった。

観察 4.2

これが本稿の芯である。飛び飛びの節では、結合が弱いと興奮が止まる。止まる境は $g = 0.018$ と 0.019 のあいだにあり、その下では興奮が時間 3000 たっても次の節へ移らない——続いた線の式なら $g = 0.018$ でも速さは 0 にならないが、飛び飛びの鎖では興奮の縁が節と節のあいだに引っかかって動かなくなる。

観察 4.3

止まるのは、はじめの置き方や刻みのせいではない。刻みを半分にしても、はじめの興奮を 10 個にしても、境の下では広がらず、境の上では広がった——短い時間だけ見ると、ゆっくり広がる鎖を「止まった」と取り違えるので、長い時間で数えた。

5. 分離子

観察 5.1

分離子は、興奮を運ぶ道が続いているか飛び飛びか（髄鞘があるか）である。続いた線なら結合を弱めても速さが平方根で落ちるだけだが、飛び飛びの節なら $g = 0.018$ で止まる——「つながりが弱ければ遅くなるだけ」は、道が続いているか飛び飛びかを言うまで真偽が決まらない。

観察 5.2

論文272 と並べる。272 は、感じ方の 2 倍が刺激の側で 6.70 倍ひらくことを、神経の機構に立ち入らずに示した——ここではその手前で、興奮が伝わる速さと止まる境が道の形で決まることを数えた。

観察 5.3

言わないこと。実在の膜の電流、直径と結合の実際の対応、髄鞘が壊れる病気は扱わない——示したのは、飛び飛びの道には、続いた道に無い「止まる境」があることである。

6. 点呼と結び

1. **25 m/s** に無髄 **500 µm**（計算 2.1）：太くする道。
2. 有髄 **4.166667 µm**（計算 2.1）：飛び飛びにする道。
3. 断面積の比 **14400**（観察 2.2）：桁違い。
4. $g = 3$ で **0.996181**（観察 3.2）：続いた線と同じ。
5. $g = 0.05$ で **0.713506**（観察 3.3）：式より遅い。
6. $g = 0.018$ で止まる（計算 4.1）：本稿の芯。

7. $g = 0.019$ で広がる（計算 4.1）：境の上。
8. 刻みを半分にしても同じ（観察 4.3）：刻みのせいではない。
9. はじめの興奮 10 個でも止まる（観察 4.3）：置き方のせいではない。
10. 道が続いているか飛び飛びか（観察 5.1）：分離子・論文272。

結び：興奮は、続いた線なら結合の平方根の速さで広がり、飛び飛びの節なら結合が弱いと途中で止まる。代表値で、無髄の神経は直径の平方根、有髄の神経は直径に比例して速くなり、25 m/s に要る直径は 500 µm と 4.166667 µm、断面積は 14400 倍ちがう——同じ速さに、道の形で別の太さを払う。双安定の鎖では、結合 $g = 3$ の節の速さは続いた線の式の 0.996181 倍、$g = 0.05$ で 0.713506 倍に落ち、$g = 0.018$ では時間 3000 たっても次の節へ移らず、$g = 0.019$ では端まで広がる。刻みを半分にしても、はじめの興奮を増やしても境は同じ側にとどまった——飛び飛びの道には、続いた道に無い止まる境がある。分離子は、興奮を運ぶ道が続いているか飛び飛びか（髄鞘があるか）である。既刊との位置——論文272 は感じ方と刺激の対応を数えた。ここは興奮が伝わる速さと止まる境を数えた。正直に言えば——模型は無次元の双安定の鎖で、実在の神経の膜も病気も扱っていない。

参考文献

1. Keener, J. P. (1987). Propagation and its failure in coupled systems of discrete excitable cells. *SIAM Journal on Applied Mathematics*.
2. Rushton, W. A. H. (1951). A theory of the effects of fibre size in medullated nerve. *The Journal of Physiology*.
3. 山岸勇輝 (2026). 『同じ「2 倍に感じる」が、刺激の側では 6.70 倍ひらく』[論文272]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22169965

— From thinking to syncing. —

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

© 2026 Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan · Licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)