

脳の揺らぎは情報を制限しない

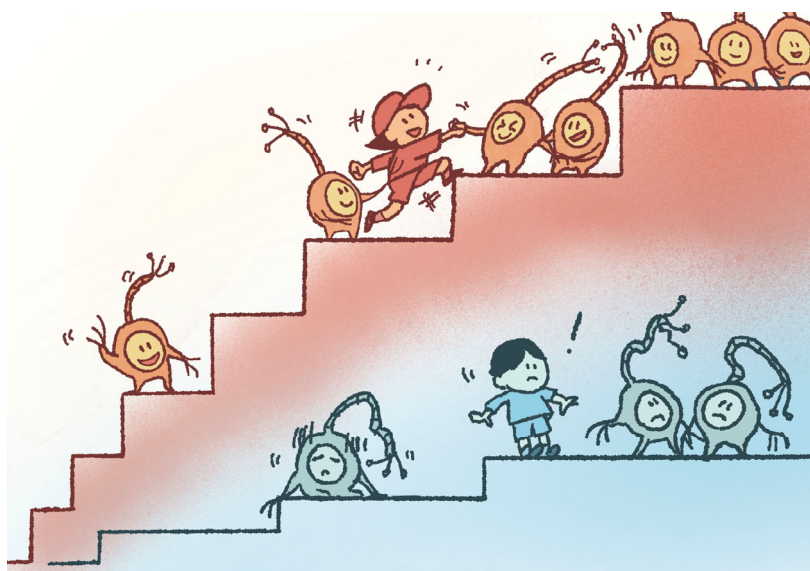
—高次元ノイズのスケール不変性から、30 年来の問いに答える—

概要

神経細胞を増やせば脳が読み取れる情報は際限なく増えるのか、それとも神経細胞同士が共有する揺らぎ（ノイズ）によって、やがて上限に達し、制限されるのか。神経科学では 1990 年代以来、共有ノイズによって情報は制限されると考えられてきました。カリフォルニア大学ロサンゼルス校の S. Amin Moosavi 氏、ハーバード大学の Sai Sumedh R. Hindupur 氏、京都大学大学院情報学研究科の島崎秀昭准教授（兼：北海道大学人間知・脳・AI 研究教育センター客員准教授）らの国際共同研究チームは、マウス一次視覚野（V1）¹の大規模神経活動データと数理理論を組み合わせ、神経集団から読み取れる情報量（よく似た刺激を見分ける精度）が神経細胞の数とともにどう増えるかを解析しました。その結果、共有ノイズは情報を制限せず、情報量は神経細胞の数とともに上限なく増え続け得ることを明らかにしました。

記録できる神経細胞数には限りがあり、その先は観測から直接にはわかりません。予測には仮定が必要ですが、近年の大規模解析はいずれも、それぞれの仮定のもとで情報は制限されると結論していました。本研究はこの仮定を二つの根拠に置き換えました。一つは、マウス V1 の神経活動に見られる規則性です。ノイズの構造も、信号との関係も、集団の大きさを変えて正規化すれば同じ形を保ち（スケール不変性²）、いずれもべき乗則³に従うことがわかりました。もう一つは、大きな集団から一部を取り出して観測することが課す制約です。両者から観測範囲外の振る舞いが導かれ、べき乗則の指数と情報の制限との関係が明らかになりました。実測された指数を当てはめると、情報量は増加の速度を落としてつつも上限なく増え続けることがわかりました。論文では、情報が制限される必要十分条件から制限を課す相関の構造にいたるまで、集団符号化⁴の包括的な理論も提示しています。これらの結果は、大規模な神経活動から情報の限界を見積もる新たな道を開きます。

本成果は 2026 年 9 月 25 日午後 2 時（米国東部標準時）に米国の国際学術誌「*Science Advances*」にオンライン掲載されました。



神経細胞の数を増やしたときに読み取れる情報量の増え方を表したイメージ図（Illust. Robin Hoshino）

1. 背景

脳はなぜこれほど多くの神経細胞を持つのでしょうか。神経細胞を増やしても読み取れる情報が制限されるのであれば、数を増やす利点は限られます。本研究が扱うのは、この問いの根幹にある問題です。

脳は、多数の神経細胞が協調して外界の情報を表現するシステムです。個々の神経細胞の活動は大きく揺らぎますが、神経集団全体としては、刺激の向きや強さといった情報を安定に表現できます。このように、多数の神経細胞の活動パターンによって情報を表す仕組みは「集団符号化」と呼ばれます。集団符号化では、同じ情報が複数の神経細胞にまたがって表現される冗長性が重要な役割を果たします。一方で、神経活動には、同じ刺激のもとでも試行ごとに変わる揺らぎが常にあり、複数の神経細胞と一緒に揺らぐ場合、これは「ノイズ相関⁵⁾」と呼ばれます（図1 A）。この共通の揺らぎが信号を覆い隠し、神経細胞を増やしても読み取れる情報量は制限される——これが1990年代以来30年にわたり、神経科学で受け入れられてきた基本的な見方です（図1 B）。

近年、数千から数万個の神経細胞の活動を同時に記録する実験技術が進展し、大規模集団における情報量の増え方を実データから調べられるようになりました。これらの大規模解析も、主要な活動成分だけを抽出する次元削減や、単純な関数形を当てはめた外挿を用いて、いずれも情報は制限されると結論していました。しかしそこでは、実際に観測される高次元の神経活動の性質や、観測に関わる制約が、十分には考慮されていませんでした。

ノイズと信号の関係が、情報の運命を決める

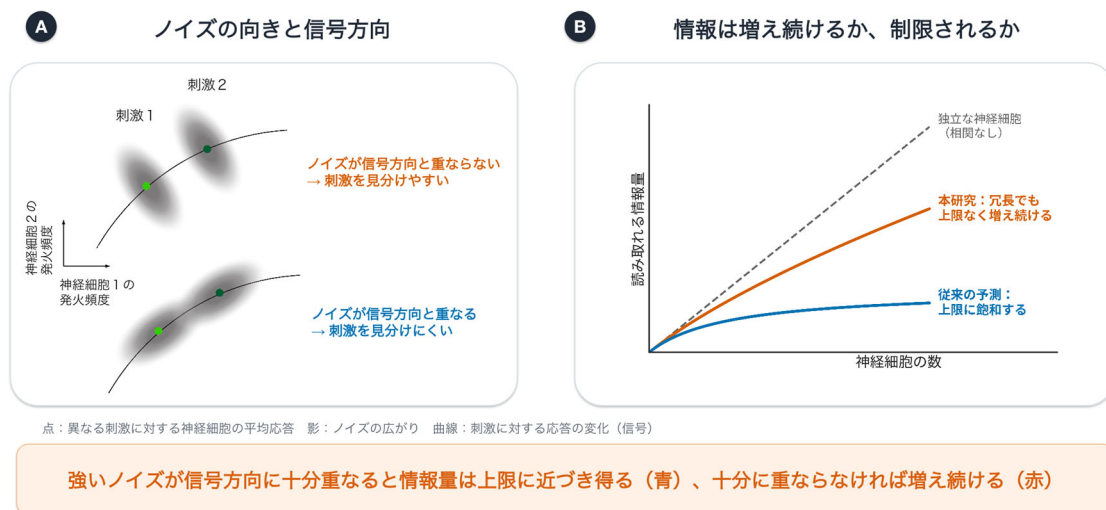


図1 ノイズと信号の関係が、情報の運命を決める。(A) 神経集団の応答は刺激に応じて変化する（曲線：信号）、そのまわりには共通の揺らぎ（灰色の影：ノイズ）がある。ノイズが信号の変化方向と重ならないければ、二つの刺激に対する応答分布は分かれ、見分けやすい（上）。分布が重なると、見分けにくい（下）。詳しくは、脳科学辞典「[神経符号化](#)」（脳科学辞典編集委員会）も参照。(B) 神経細胞の数を増やしたときに読み取れる情報量の増え方。従来は上限に飽和すると考えられてきたが（青）、本研究はマウス一次視覚野では上限なく増え続けることを示した（オレンジ）。破線は神経細胞の活動が互いに独立な場合。

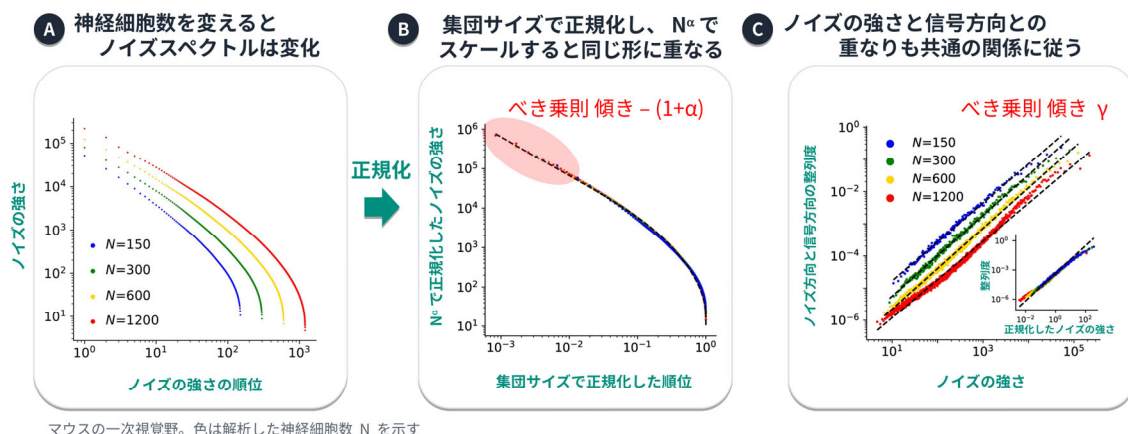
2. 研究手法・成果

研究チームは、集団活動から刺激の微小な違いをどれだけ読み取れるかを表す線形フィッシャー情報量⁶を用いました。この情報量は、神経活動の平均応答が刺激に応じてどの方向に変化するかという「信号」と、試行ごとの活動のばらつきである「ノイズ共分散」との関係から決まります。

ノイズ共分散に固有値分解を用いると、神経集団のノイズを向きの異なるいくつもの互いに無相関な変動成分に分けることができ、それぞれの成分がどれだけ強く揺らいでいるか（強さ）を調べられます。強さを大きい順に並べたものが固有値スペクトル⁷です。神経活動のノイズ固有値スペクトルが、集団の大きさを変えても適切に正規化すれば同じ形に重なること（スケール不変性）、そしてその形が順位に対してべき乗則で減少することは、近年の研究でよく知られています。ここでいう「べき乗則」とは、たとえば順位が2倍になるたびに、固有値が同じ割合で小さくなるような関係です。この関係は、両対数グラフでは直線として現れます。理論はこの事実から出発します。

大きな集団から一部の神経細胞だけを取り出して観測するという状況（部分抽出⁸）を考えると、スケール不変性の指数と、スペクトルのべき乗則の指数との間に制約が生じます。具体的には、この制約のもとでは、スケール不変性の指数が正の値 α のとき、スペクトル先頭部のべき乗則の減衰指数は $1+\alpha$ となります。このとき、先頭部の固有値は集団の大きさに比例して増大する「強いノイズ」として現れることがわかりました。一方、スペクトルの大部分はそれより緩やかにしか増えない小さなノイズ成分で占められます。

マウス一次視覚野で共通して現れる2つのスケール則



マウスの一次視覚野。色は解析した神経細胞数 N を示す

実測された2つのスケール則を、神経集団の部分抽出を考慮した理論と組み合わせて、情報量の増え方を判定する

図2 マウス一次視覚野で実測された二つのスケール則。(A) 両対数グラフで表した集団サイズごとのノイズ固有値スペクトル。(B) 集団サイズで正規化すると、スペクトルは共通の曲線に重なる。強いノイズ成分に対応するスペクトルの先頭部では、固有値が順位に対してべき乗則に従って減少し、両対数グラフ上でほぼ直線状に並ぶ。(C) ノイズ方向と信号方向との整列度も、ノイズの強さに対して共通のべき乗関係を示す。これらのスケール則を部分抽出の理論と組み合わせて、情報量の増え方を判定する。

この理論をマウス一次視覚野 (V1) の実データに当てはめました。わずかに異なる刺激を提示された、5匹のマウスの約1万8千~2万1千個の神経細胞の記録を用い、ランダムに選んだ神経集団のサイズを変えながら、信号の大きさ、ノイズ固有値、ノイズと信号の整列度を推定しました。その結果、マウス V1 のノイズ固有値スペクトルにも、このスケール不変性とべき乗則が確かに見いだされました (図2 A, B)。スケール不変

性の指数は正であり、スペクトルの減衰指数は 1 を超え、強いノイズ成分が実際に存在することがわかりました。ただし、強いノイズの存在だけでは、情報が制限されるかどうかは決まりません。

情報が制限されるかどうかは、信号がこの全スペクトルとどのような関係にあるかで決まります。重要なのは、情報がすべての変動成分からの寄与の合計で決まることです。ここで各ノイズの寄与を左右するのが、その揺らぎのパターンが信号方向とどれだけ重なるかを表す整列度⁹です。信号が強いノイズの方向に十分に集中していれば、情報は制限されます。反対に、信号が強いノイズの方向に集中しておらず、小さなノイズ成分にも十分に重なっていれば、情報は増え続けます。

そこで、信号が全スペクトルにどのように整列しているかを調べました。その結果、ノイズの強さ（固有値）と整列度との間にも、新しいスケール不変なべき乗則があることを発見しました（図 2 C）。このべき乗則は、強いノイズほど信号と整列していることを表しており、その度合いはべき乗則の指数 γ で表されます。研究チームは、このべき乗則の指数 γ について、情報が制限されるかどうかを分ける臨界値を理論的に導き、 γ がこの値を上回るときに限って情報が制限されることを示しました。

実測された整列度の指数は、理論から導かれた境目の値を下回っており（図 3 A）、信号は強いノイズの方向に集中せず、小さな成分にも広く残っていると判定されました。したがって、マウス V1 の神経活動ではノイズ相関が冗長性を生み、情報の増加率を低下させるものの、情報量そのものを上限に閉じ込めるには不十分であると結論づけられました。情報量は独立な神経集団のように線形には増えませんが、神経細胞の数が増えるにつれて上限なく増え続けると予測されます（図 3 B）。

5 匹すべての測定値が、情報が増え続ける領域に位置した

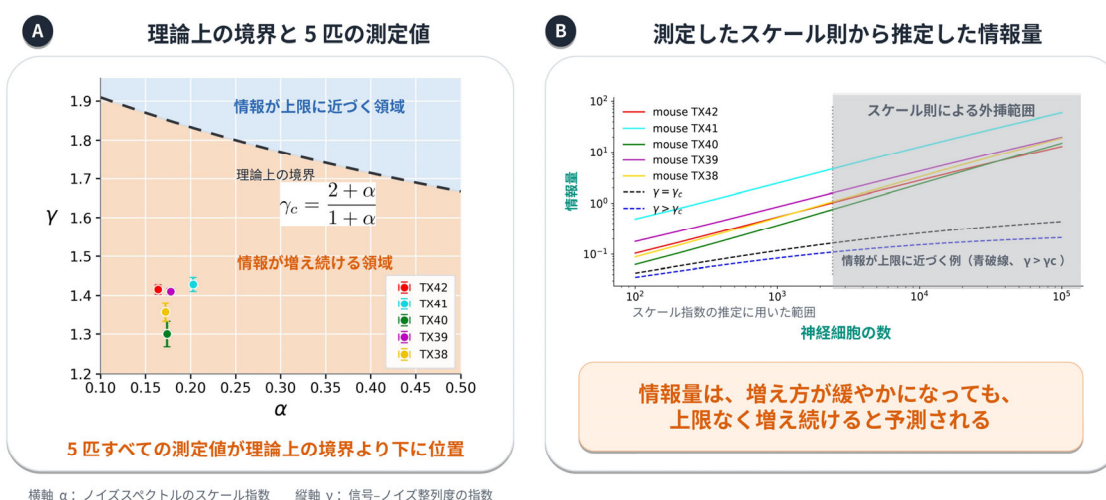


図 3 実測されたスケール指数と、そこから予測される情報量の増え方。(A) 5 匹すべての測定値は理論上の境界より下にあり、情報が増え続ける領域に位置した。(B) 測定されたスケール則から推定した情報量。色付き実線は各マウスの推定、黒破線は理論上の境界、青破線は情報が上限に近づく場合を示す。灰色はスケール指数の推定範囲を超えた外挿領域。

ただし、本研究が示したのは、マウス V1 で観測された共有ノイズが情報を制限しないということです。実際に読み取れる情報量には、網膜から送られてくる刺激情報の量や、V1 とその関連領野に存在する神経細胞の総数といった別の制約がありますが、これらは本理論の対象外です。

実データでは、情報の増加は、少数の主要成分に限らず、ノイズスペクトル全体の累積寄与によって生じます。主要な成分だけを残す次元削減は、この寄与を取りこぼし、情報量を過小評価し得ます。本研究は、従来

の大規模解析で報告されてきた情報の制限の一部が、こうした解析手法に由来する見かけの効果であり得ることを示しました。また、試行数が限られている場合には、ノイズ固有値および信号との整列度の推定に偏り（バイアス）が生じます。そこで研究チームは、この偏りを補正する新たな理論的手法も開発し、本結論が試行数の制約による見かけの効果ではないことを確認しました。

最後に、本研究は、長年の理論的な論点にも決着をつけました。刺激の変化に伴う平均応答の変化と同じ方向に生じるノイズ相関は「微分相関¹⁰」と名づけられ、あわせて「情報を制限する相関は微分相関に限られる」という主張が2014年に提唱されました。この考え方は、その後の理論・実証研究において、神経集団の情報を制限する相関成分を検出・評価する際の重要な指針となり、微分相関に対応する成分の有無や強さを調べる研究が進められてきました。しかし、この主張は特定の共分散構造についてのみ証明されており、どの条件で一般に成立するかは未解決でした。研究チームは、集団に神経細胞を1つ加えるたびに情報がどう変わるかを追う解析を行い、大きな集団から一部を取り出して観測する状況では、情報を制限する相関が存在するなら、それが微分相関に一致することを証明しました。同時に、一般の共分散行列ではこの一致が成り立たない場合があることも示し、この主張が成立する条件と範囲を明確にしました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究は、脳の神経集団が持つ情報符号化能力を評価するための新しい理論的基盤を与えます。ノイズ相関は情報に厳しい上限を課するという従来の見方に対し、冗長性と上限のない情報増加が両立し得ることを示した点は、集団符号化の理解を塗り替えるものです。

この知見は、脳が内部状態や自発活動による高次元の揺らぎを抱えながらも、外界刺激の情報を表現する仕組みの理解につながります。同時に、歩行、注意、覚醒状態などが小さなノイズ成分や信号との整列度を変えることで、大規模神経集団の符号化精度に大きく影響する可能性も示唆します。今後は、異なる脳領域、動物種、行動状態において同様のスケール不変性とべき乗則が成り立つかを検証する必要があります。

科学的な波及として、本研究は、霊長類の脳の大型化を情報処理の観点から考える手がかりになります。霊長類の進化では大脳皮質の神経細胞数が大きく増えてきたことが知られています。しかし、仮に共有ノイズが読み取れる情報量に上限を課するのであれば、神経細胞数を増やしても、大型化の利点は限られます。マウス V1 を対象とした本研究は、共有ノイズが存在しても、神経細胞数とともに情報量が増え続け得る一例を示しています。同様のスケール則が霊長類の大脳皮質にも成り立つなら、共有ノイズは脳の大型化による情報処理上の利点を妨げないと予想されます。

また、ノイズは計算の敵とは限りません。素子の揺らぎが避けられないアナログ計算機や、揺らぎを積極的に利用する確率的計算（アニーリングマシンなど）の開発が進んでいます。こうした系では、素子を増やせば精度が上がり続けるのか、それとも素子間で共有されるノイズで制限されるのかが、本研究と同じ構造の問題になります。本研究が示すのは、ノイズを消すことだけでなく、強いノイズの向きを信号方向からずらすことも重要だということです。ノイズ除去に加え、ノイズの幾何学も設計する——この発想は、ノイズを抱えた機械の大規模化に指針を与える可能性があります。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、以下の科学研究費助成事業の支援を受けて実施されました。

- ・ 科学研究費助成事業 基盤研究（C）2020 年度「大規模・非線形な神経細胞集団活動を可視化する統計解析技術の開発」 研究代表者：島崎秀昭（課題番号：JP20K11709）

- 科学研究費助成事業 学術変革領域研究 (A) 2021 年度「センサスデータ駆動による適応回路の理論構築」
研究代表者：島崎秀昭（課題番号：JP21H05246）
- 科学研究費助成事業 基盤研究 (B) 2025 年度「樹状突起上の高次統計計算による集団符号化」 研究代表者：島崎秀昭（課題番号：JP25K03085）

<用語解説>

1. **一次視覚野 (V1)**：大脳皮質で視覚情報を最初に処理する主要な領域の一つ。本研究では、マウス V1 における視覚刺激応答オープンデータを解析した。
2. **スケール不変性**：観測する神経細胞の数などシステムの規模を変えても、適切に正規化すると同じ統計的法則が現れる性質。本研究では、ノイズ固有値スペクトルと信号との整列度の双方にこの性質が確認された。
3. **べき乗則**：ある量が別の量の何乗かに比例する関係。両対数のグラフでは直線として現れる。本研究では、固有値スペクトルの形と、整列度と固有値の関係の双方に見られた。
4. **集団符号化**：多数の神経細胞の活動パターン全体によって、刺激や行動に関する情報を表現する仕組み。
5. **ノイズ相関**：同じ刺激のもとでも、複数の神経細胞の活動が共通して変動すること。信号方向との関係によって、情報の読み取りを助ける場合も妨げる場合もある。
6. **線形フィッシャー情報量**：個々の神経細胞の発火率や活動量から、刺激の微小な違いをどれだけ正確に読み取れるかを表す指標。値が大きいほど、最適な線形デコーダによる推定誤差が小さい。
7. **固有値スペクトル**：神経集団のノイズを互いに無相関な変動成分に分解し、各成分の揺らぎの強さを大きい順に並べたもの。
8. **部分抽出 (サブサンプリング)**：大きな集団の中から一部の神経細胞だけを取り出して観測すること。本研究の理論の前提となる観測状況。
9. **整列度**：ノイズの各変動成分が、刺激による応答変化の方向（信号方向）とどれだけ重なるかを表す量。
10. **微分相関**：刺激変化に伴う平均応答の変化、すなわち信号方向と同じ方向に生じるノイズ相関。信号とノイズの区別を難しくし、情報を制限し得る。

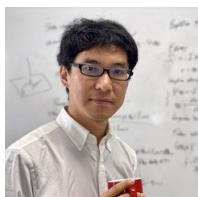
<研究者のコメント>



Moosavi 本研究の核心は、ノイズ固有値スペクトルと、ノイズと信号の整列度に見いだされた、スケール不変なべき乗則です。これらの法則は集団サイズによらないため、実験で観測できる有限の神経集団を超えて、情報量の増え方を評価できます。二つのべき指数の関係だけで、情報が上限を持つ領域と持たない領域のさかい目が決まります。このシンプルな構造にたどり着けたことを嬉しく思っています。



Hindupur マウス一次視覚野の大規模神経活動データから、集団サイズごとのノイズ固有値スペクトルと信号との整列度を慎重に推定しました。実データで明瞭なスケール不変性を確認できたのは驚きでした。さらに、スケール指数を変えた模擬データでも、情報量が上限に近づく場合と上限なく増える場合が理論どおりに現れ、興奮しました！



島崎 神経細胞同士が共有する揺らぎが情報を制限するという、30 年来の定説を覆す結果になりました。非常に長い議論を経て作り上げたもので、美しい理論と重厚な実験データ解析を両輪として、線形に読み出される情報量の包括的な理論を構築できたことを嬉しく思います。本理論が神経符号化研究の次のスタンダードとなることを期待しています。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Population coding under the scale invariance of high-dimensional noise

(高次元ノイズのスケール不変性のもとにおける集団符号化)

著 者：S. Amin Moosavi, Sai Sumedh R. Hindupur, Hideaki Shimazaki

掲 載 誌： *Science Advances* 掲載日：2026 年 9 月 25 日 DOI：10.1126/sciadv.adz9632