

ネットワークの三角構造が担う情報伝達の役割を解明

数理モデルから生物の情報処理メカニズムに迫る

ポイント

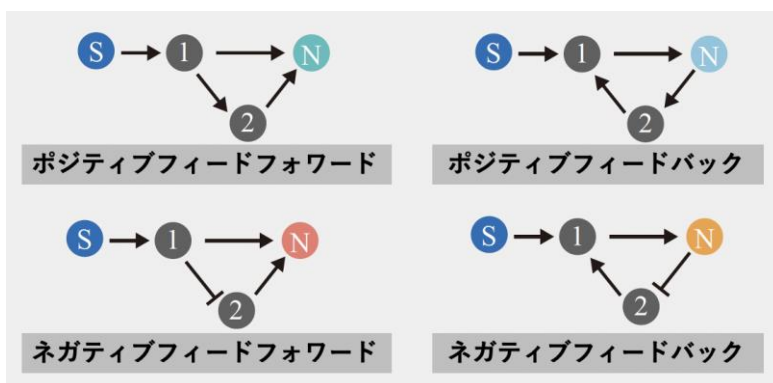
- ① 生物系の情報伝達は、神経や遺伝子のネットワーク上で行われるが、どのようにして機能的な情報処理が実現されているのかはよく分かっていない。
- ② 本研究で、ネットワークモデル上の情報の流れを記述する公式を独自に導出し、生物ネットワークでしばしば見られる三角構造がもつ情報伝達の役割を解明した。
- ③ ネットワーク上の情報処理プロセスの最小単位が理解できたことから、生物の情報処理ネットワーク全体のメカニズムの解明に繋がっていくことが期待される。

概要

神経や遺伝子のネットワークが生物にとって重要な情報処理を行っていることに疑いの余地はありませんが、一方で、なぜ生物ネットワークが適切に情報を処理できているのかは、極めて難しい問題です。生物ネットワークを模した数理モデルを考え、その情報伝達の特徴を理論的に調べることは有力な手段ですが、単純なネットワークモデルであっても情報の流れを記述する公式を導くことは容易ではなく、生物ネットワークでしばしば見られる三角構造（ネットワークモチーフ）がどのような情報伝達の役割を果たしているのかは分かっていませんでした。

九州大学数理・データサイエンス教育研究センター/大学院芸術工学研究院の森史助教と京都大学医生物学研究所の岡田崇特定准教授の研究チームは、ネットワークモデル上の情報流を記述する公式を独自に導出し、それを適用することで、各ネットワークモチーフがもつ情報伝達の役割を明らかにしました。具体的には、ポジティブフィードフォワードモチーフは高周波の入力を、ネガティブフィードフォワードモチーフは低周波の入力を遮断するフィルターの役割を備えていることが分かりました。情報処理ネットワークにおける情報転送プロセスの最小単位を明らかにした今回の発見は、ネットワーク全体の情報処理メカニズムの解明に繋がることが期待されます。

本研究成果は米国の雑誌「Physical Review Research」に2023年1月24日（現地時間）に掲載されました。



(左図)代表的なネットワークモチーフ。生物ネットワークでは、しばしば、このような三角構造が見られるため、情報伝達においても重要な役割を果たしていると考えられていたが、情報の流れの特徴は明らかにされていなかった。

【研究の背景と経緯】

生物の神経ネットワークや遺伝子制御ネットワークでは、様々な情報処理が行われています。1つの神経細胞の発火は、別の神経細胞の発火に影響し、また、1つの遺伝子の発現は、別の遺伝子の発現に影響します。このように、神経細胞や遺伝子といった素子が複雑に絡まり合い、ネットワークが形成されることで、情報処理が実現されています。しかしながら、そのようなネットワークがなぜ適切に情報を処理できるのかという素朴な疑問に答えることは、極めて難しい問題です。この問題にアプローチする上で、生物ネットワークを模した数理モデルを考え、その情報伝達の特徴を理論的に明らかにすることは、有力な手段です。しかしながら、単純なモデルであっても、情報の流れの一般公式を導出することは容易ではなく、生物ネットワークでしばしば見られる三角構造（ネットワークモチーフ）がどのような情報伝達の特徴を持っているのかも分かっていませんでした。

【研究の内容と成果】

研究チームは、まず、ブーリアンネットワーク(※1)と呼ばれる数理モデルを用い、ネットワーク上の情報の流れが入力シグナルの性質にどのように依存するかを記述する一般公式を世界で初めて導きました(参考図)。この公式を、ネットワークモチーフに適用し、各ネットワークモチーフがもつ情報の流れの特徴を明らかにしました。具体的には、ポジティブフィードフォワードモチーフ(※2)は、高周波の入力シグナルを遮断するローパスフィルターの役割を持ち、ネガティブフィードフォワードモチーフは、低周波を遮断するハイパスフィルターの役割を持つことが明らかになりました。さらに、そのようなフィルター機能の起源が、長さの異なる情報経路間の相互作用によって生み出されていることも分かりました。一方で、長さの異なる情報経路を複数持たないポジティブ/ネガティブフィードバックモチーフは、フィルター機能を持ちません。

【今後の展開】

モチーフというネットワークの最小単位の情報伝達の特徴が明らかになった今、この三角構造を組み合わせるとどういった情報伝達の特徴が生まれるのかを調べるのが、次のステップになります。研究チームが導出した情報の流れの一般公式は、このような組み合わせに対しても有効であるため、継続的な成功が期待されます。ネットワークの小さい構造単位から始めて、段々と大きな構造を調べていくことで、最終的には、ネットワーク全体の情報伝達の特徴、さらには、情報処理メカニズムの解明に繋がっていくことを期待しています。

【用語解説】

(※1)ブーリアンネットワーク…神経ネットワークや遺伝子ネットワークの代表的な数理モデル。ネットワークの各ノードは、1つ1つの神経細胞や遺伝子に対応する。「0」か「1」で表されるノードの状態は、それぞれのノードに割り振られたブール関数に従って更新される。

(※2)ポジティブ/ネガティブフィードフォワードモチーフ…生物ネットワークの中でしばしば見られる典型的なつながりのパターンの1つ。図のような構造を持つ。

【参考図】

ブーリアンネットワークにおける情報の流れの一般公式

$$T_{S \rightarrow N} = \sum_{k=2}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k(k-1)} \sum_{\alpha_1} \cdots \sum_{\alpha_k} \left(E[\mathcal{P}_{\alpha_1} \cdots \mathcal{P}_{\alpha_k}] - E[\mathcal{P}_{\alpha_1}] \cdots E[\mathcal{P}_{\alpha_k}] \right)$$

1つ1つの \mathcal{P}_{α} は、以下のような情報経路に対応する。



【謝辞】

本研究は JSPS 科研費（JP19K03663, JP22K03453, JP22K06347）の助成を受けたものです。

【論文情報】

掲載誌：Physical Review Research

タイトル：Information-transfer characteristics in network motifs

著者名：Fumito Mori and Takashi Okada

D O I : 10.1103/PhysRevResearch.5.013037