

「粘菌の輸送管ネットワークは変化自在に環境に適応する」

この10年余りソーシャル・ネットワークやWWWのページリンク・ネットワークなどを対象とした複雑ネットワーク科学が注目されてきた。このようなネットワークでは人と人、Webページとページの間には空間的な隔たりはなくリンクを繋ぐことができる。しかし現実には空間に拘束されたネットワークが多く存在する。特に生物、人工物に係わらず輸送ネットワークにはその実例が多い。例えば、動物体内に広がる血管網、蟻の餌探索行列のパターン、葉脈、河の分岐、道路網、鉄道網、電力網など枚挙に遑がない。これらのネットワークは2次元平面あるいは3次元空間中に広がり、血液、栄養分、酸素、動物や人などの個体群を輸送するために空間に拘束されている。その中で生物ネットワークは進化の過程で輸送効率、ネットワークの頑強さ、ネットワーク構築のコストなどを多目的に最適化していると予想される。

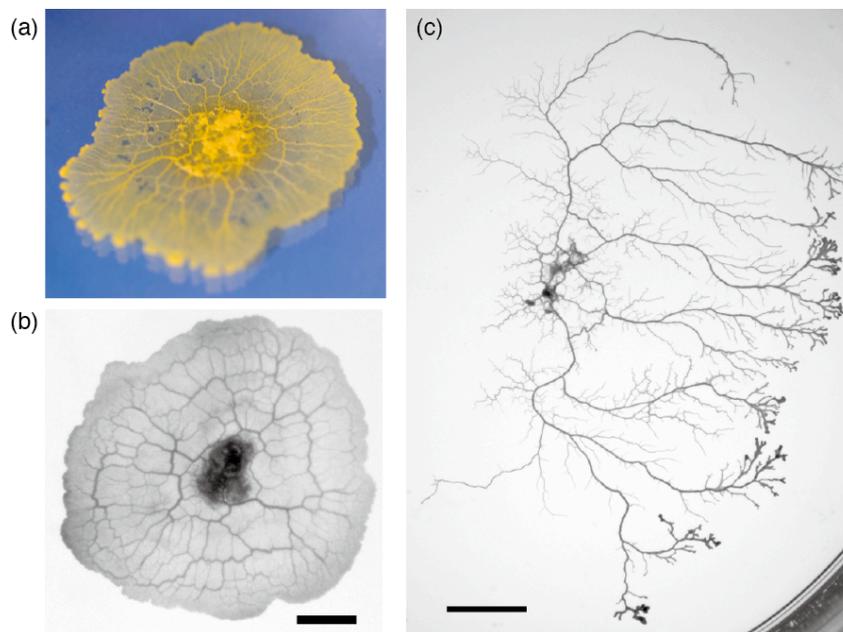


図1. 真正粘菌変形体の環境依存ネットワーク。(a)粘菌は栄養分や細胞内タンパク質などを含む細胞質を大きな細胞体中に輸送する管ネットワークをつくる。(b)栄養分を含んだ培地上の粘菌。輸送管ネットワークは網目状に発達する。その他のシート状の部分で培地中の栄養分を吸収すると思われる。スケールバーは2mm。(c)有害物質を含んだ培地上の粘菌(忌避環境)。有害物質に触れないようにほとんど輸送管だけの構造となり、樹状のネットワークを形成する。スケールバーは5mm。

最適化された輸送管ネットワークのモデル生物として真正粘菌(*Phsarum polycephalum*)変形体という巨大単細胞生物[図1(a)]が注目されている。はこだて未来大学の中垣俊之教授らのグループはこの細胞に迷路中のスタートとゴールを結ぶ最短パスを求める能力が有ることを示し、さらに複数の主要都市間を結ぶ鉄道ネットワークを事例に多目的最適化が可能であることを示唆してきた。なぜ粘菌のような単細胞生物がこのような能力を持つのか知るには、この生物の輸送管ネットワークがどのような過程を経て最適化を行っているのか調べる必要がある。

最近、早稲田大学先進理工学研究科の研究グループは、様々な環境において粘菌の輸送管ネットワークの成長過程を観察・解析し、2次元ネットワーク解析に有効な特徴量を定量的に調べた。その結果、粘菌は環境に応じて全く異なるネットワークを形成する適応的能力を持つことを明らかにした。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2010 年 7 月号に掲載された。

ソーシャル・ネットワークなどでは繋がり方(ネットワーク・トポロジー)だけが注目されがちだが、空間に拘束された輸送ネットワークではリンクの太さや長さなどの実スケールが重要となる。繋がり方に関してはネットワーク科学でよく用いられる指標(クラスター係数, 平均頂点間距離)の代わりに2次元ネットワークに有効な指標(メッシュ度, 平均頂点間ユークリッド距離)を取り入れた。その結果、粘菌の輸送管ネットワーク形成の初期過程では環境によって顕著な差はなかったが、後期過程では大きく異なることがわかった。栄養分を含んだ培地上(誘引環境)では六角格子状の密なネットワークを形成し、その広がりも小さく、細胞の重心位置は形成過程において変動は少なかった。このことは、好ましい環境にできるだけ長い時間留まり、細胞の構造も栄養分を吸収しやすいように毛細管網を形成するという多目的最適化が実現できていることを示唆している。一方、有害物質を含んだ培地上(忌避環境)では、太い輸送管から構成され、樹状で広がりサイズも大きいネットワークを形成した。木グラフ状のネットワークはネットワーク構築材料のコストを削減し、かつ、エネルギー効率が良いことがこれまで理論的に示されている。さらに、限られた細胞質資源という拘束条件の下、より遠くまで細胞の一部を伸ばしより良い環境を探索する機能まで備えている。危機的状況にある細胞がとる戦略として非常に合理的だ。

実は、電力網も良く似た形態をとるらしい。欧州では自然エネルギー発電を含め多岐にわたる発電所が国土上に多数散在しており、送配電網はそれらを網目状に結んでいる。一方、日本の送配電網は樹状型であるといわれている。このことと、栄養分(エネルギー源)が豊かか貧弱かということが関係するかどうかについては、厳密な考察が必要だが、生物の適応戦略から学べることがまだまだあることは間違いない。

論文掲載誌 *J. Phys. Soc. Jpn.* **80** (2011) No.7, p.074801

電子版 <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/80/074801> (6月27日公開済)

<情報提供：高松 敦子（早稲田大学理工学術院）>