

1 ネットワーク科学が目指すもの

林 幸雄

(北陸先端科学技術大学院大学)



ネットワークを科学するとは

まず、ネットワークを科学するとはどういうことなのか、以下の引用¹⁾から考えてみたい。

世の中でいちばん重要なネットワークは人々のつながりであろうが、それ以外にも、われわれの体を走る神経系や血液系にもネットワークはあるのだし、... (中略1)... ホタルが点滅によって交信をしている<ネットワーク>をまだ解明できないのだし、... (中略2)... ほとんど何も知っていないのだ。電気の放電パターンや樹木の枝の分かれ方や水流の分岐の仕方にも一定の法則がある。ホーソンの法則というもので、... (中略3)... 情報は三〜四本以上の分岐を必要としないということである。こうしたネットワーク形態学やネットワーク生態学は、ネットワーク社会とかネットワーク経済といわれているわりには研究されていない。おそらくネットワークという概念がまだ科学的な権利を獲得していないせいだろう。

すなわち、自然界や社会の現象を単なる事例調査や場当たり的に解釈するのではなく、何か普遍的なネットワークの生成原理やその上を流れる媒体の特性から、社会分析や工学設計などに役立つ基本メカニズムを明らかにすることが、**ネットワークを科学する**と言えるのではないだろうか。少なくとも10年以上前は、人類はそうしたレベルに達していなかったが、本稿で概説する**複雑ネットワーク科学**あるいは**ネットワーク科学**と呼ばれる新しい分野の誕生によって、現実の多くにネットワークに潜む「形態」の共通性から、これまで誰も予想すらしなかった「生態」のある側面が明らかになった。その中身については後述するが、ネットワークの「形態」と「生態」としては主に以下を考えていただきたい。

形態：静的なつながりの構造

到達範囲やステップ数（ノード間の平均距離、最大距離：半径）、コミュニティや階層化、コミュニティ間のブリッジやバックボーン（主要な太い幹線）の

配置など。

生態：動的な活動の特性

情報フローや負荷の分布、転送時間、中心的なノードやリンク（人物やその関係性）の影響力、故障耐性、成長や新陳代謝、合意形成など。

自然界の食物連鎖あるいは、体内の遺伝子やタンパク質が相互作用する生化学反応系ならいざしらず、人工物であるコンピュータネットワークやインターネットを生態系と捉えることについては、その歴史的な経緯を少し説明しておく必要がある。

ネットワークの生態系

米ゼロックス社パロアルト研究所の B. A. Huberman らは '80 年代後半に、コンピュータネットワーク環境を社会システムや生物のような生態系として捉える概念 **The Ecology of Computation** を提唱した。個々の処理を単に集めただけでは全体の振る舞いは決まらない、複雑なネットワークの本質をすでに予見していたのである。以下、その書籍²⁾の冒頭部分を紹介する。

A new form of computation is emerging. Propelled by advances in software design and increasing connectivity, distributed computational systems are acquiring characteristics reminiscent of social and biological organizations. These open systems, self-regulating entities which in their overall behavior are quite different from conventional computers, ... (中略)... These agents also make local decisions based both on imperfect knowledge about the system and on information which at time is inconsistent and delayed. They thus become a community of concurrent processes which, in their interactions, strategies, and competition for resources, behave like whole ecologies.

当時のビジネス対象や技術レベルの状況から、上記では分散処理としての色彩が濃いですが、'90 年代になると、

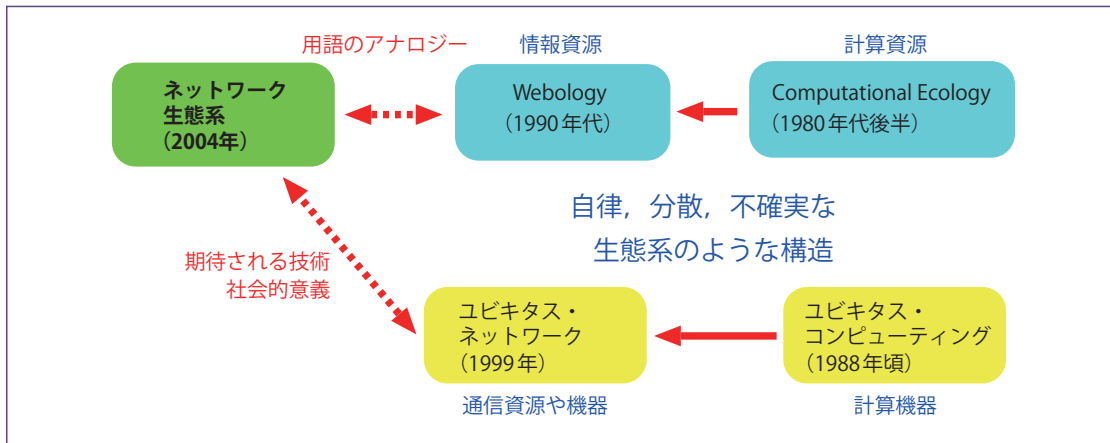


図-1 概念の関連性

WWW (World Wide Web)の急成長を彼らは意識してか、ネットワーク上に分散した情報が互いに関連して複雑な生態系のようにになると捉えた、

Webology=Information Ecology+WWW

が提唱され、WWWにおける効率的な情報収集法やリンク構造解析などが研究された。それは現実の大規模なネットワークの実測や分析のはしりにもなった。我々はそのアナロジーとして、WWWを含めたソーシャルネットワークなどのより広い研究対象を考えて、**ネットワーク生態学**と命名した新しい研究グループを、本会のフロンティア研究領域に発足させた。ネットワークを単なる物理的なシステムとしてではなく、その上で行われる人々の活動を含めた生態系と考えたのである。

一方、同じ米ゼロックス社パロアルト研究所のM. Weiserが1988年頃に提唱した言葉に**ユビキタス**がある。ユビキタスとは、それが何であるかを意識させず (invisible)、しかも「いつでも どこでも だれでも」が恩恵を受けることができるインタフェースや技術による環境のことであり、みんなで1台を使用するメインフレーム、1人で1台を使用するパーソナル・コンピュータに続く、コンピュータの新たな利用形態を表す概念であった。

この概念を借りて、1999年に野村総合研究所が提唱したユビキタス・ネットワークは、「センサ機器などを含めてコンピュータ同士が自律的に連携して動作することにより、人々の生活を支援する技術や環境」を表す。あらゆる情報端末やICチップなどが有線/無線の多様なネットワークで接続されて、いつでもどこからでもさまざまなサービスが利用できるようになるには、既存のインターネットのみならず、自律分散的なアドホック通信網をどのように構築するかが、その鍵を握るに違いない。

図-1のように、ユビキタス・コンピューティングやComputational Ecology, Webology, ユビキタス・ネットワークはそれぞれ、計算資源/機器、情報資源、通信資源/機器を、「いつでも どこでも」使える概念として共通性がある。また、ITの3世代進化 (<http://www.ipsj.or.jp/03somu/teigen/meti070521.html>)で指摘されているように、今後のユビキタス世代は**生態系(?)**の構造を持つと考えられているものの、その基盤技術は「いつでも どこでも」と表現されているだけで、センサ機器や無線アンテナなどの要素技術を除いたシステムレベルの具体的な技術確立はこれからであろう。たとえば、実測に基づいた大規模なネットワーク構造の解析や成長予測、動的な環境下における自律分散型の制御などが重要となる³⁾。もちろん、それらは技術的な側面だけでなく、人々のさまざまな社会活動を通じた具体的な利用状況にも依存する。

ユビキタス情報社会に向けて、ネットワークを科学することの意義は、まさにこの部分のブレークスルーに貢献することではなかろうか。中でも、経済活動や企業組織などを含めた社会のあり方を考えながら、それに適した人的あるいは物的なネットワークを安心して使える技術がますます重要となる。本稿に続く3つの解説記事は、それらの観点を含んでいる。

一方、ソーシャルネットワーキングサービス(SNS)やブログにおいても、人々はどのようにつながって、社会的にどんな影響力を持つのか実際のところよく分かっていない。人々が協調的あるいは競合的にネットワーキングすることが、グローバル経済から地域社会に至るさまざまな活動や災害時の対処なども含めて、大きな社会的意義を持つようになってきたことはもはや疑う余地もない。それゆえ、大規模なネットワークの技術的側面だけでなく社会的な影響力まで含めて定量的に分析し、科学的な扱いができる基盤となる理論や技術の確立が強く求められる。まさにそれこそ、ネットワーク科学が目指す

◆ ネットワーク科学が目指すもの

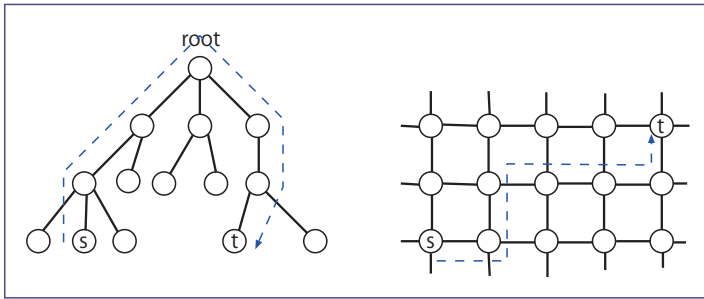


図-2 木や格子の例。点線で示された最短パスはどれも長く、現実のネットワークの性質と合わない。
(林著「噂の拡がり方」化学同人 2007 より転載)

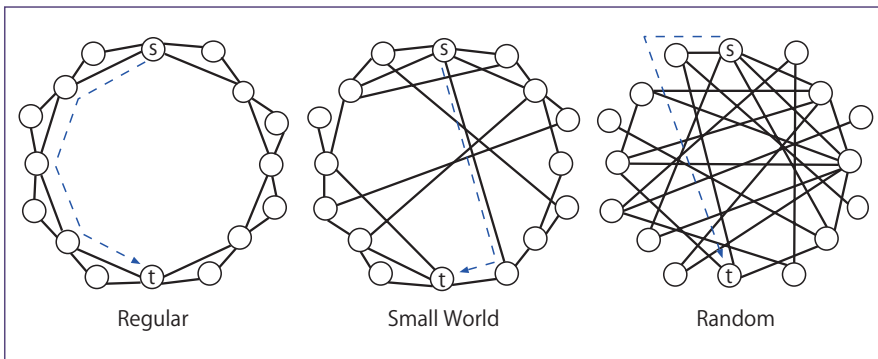


図-3 規則的な左とランダムな右の結合の中間的な Watts-Strogatz (WS) モデル。点線は最短パス。
(林著「噂の拡がり方」化学同人 2007 より転載)

ものと言えよう。しかも、要素還元論や入出力変換論的な属性主義ではなく、統計物理や社会学のアプローチも駆使して、**関係性に着目したシステム**として捉える構造主義的な分析法の転換にも特徴がある⁴⁾。つまり、個々のノードの機能や能力を超えて、強い味方が近くにおいて密接な関係にあるとか、ネットワークにおける中心的な位置に自身がいるとかが、情報の浸透や意見の集約などへの影響力にきわめて重要となる。Google や Amazon はビジネス界でのそうした成功例と言える。

複雑ネットワーク科学の誕生

ネットワーク科学という新分野の誕生とこれまでの主な研究^{5), 6)}を概説しよう。従来からグラフ理論を基礎として、数学、物理、工学などのさまざまな分野でネットワークは扱われてきた。たとえば、ウイルスなどの伝搬の解析には、縦横(あるいは三角形や六角形)が規則的に結合した格子や、ノード間を一様ランダムに結合したランダムグラフが用いられていた。それらは理論解析に適する以外に、近傍との結合や、あらゆるケースを包含するランダム結合という意味合いから、現実のモデル化として一見妥当そうにも思える。しかしながら、実際はコストなど何らかの指針に従ってネットワークが構築されるのみならず、個々のネットワークが一様ランダムには結合されていないことは明らかだし、図-2のような木や格子では単純化しすぎてしまう。一方、社会学の分野では、友人関係など小規模で個別の分析がなされてきたが、現実の複雑なネットワークに対する統一的な視点は

なかった。

見知らぬ同士でも知人を介して人々は比較的短い連鎖でつながる「小さな世界」をなしていることは、1967年の米国での手紙リレーによる社会実験を発端に、ずっと社会学における経験則でしかなかった。ところが、まったく別の物理学者らによって、その謎を解く糸口が1998年に発見された。カオスやフラクタルなど複雑系で有名なサンタフェ研究所に当時いた Watts と Strogatz は、電力網や映画共演者などの実測データが、

特徴 1:「友達の友達は自分自身の友達にもなる」

三角結合の頻度が高い：クラスタリング係数が高い

特徴 2:任意のノード間が数ステップでつながる

「小さな世界」をなす：平均距離が小さい

という2つの特徴を同時に持つことに着目した。さらに、それらの特徴が存在することを説明できる図-3のモデルを提示した。特徴1は図左の近傍と規則的に結合したグラフに、特徴2は図右のランダムグラフに、それぞれ確認できるがどちらも片方のみである。そこで、規則的な結合の一部をある確率分だけランダムに張り換えた図中央の WS モデルを考え、それが現実のネットワークと同じように**スモールワールド性**と呼ばれる上記の両特徴を持つことを示したのである。規則的な構造からほんの少しリンクを張り換えるだけで、「友達の友達は自分自身の友達にもなる」ことが多いと同時に、お互いが短い距離でつながった「小さな世界」も形成できる。

ちょうど同じころ、物理学者 Barabási らは現実の多

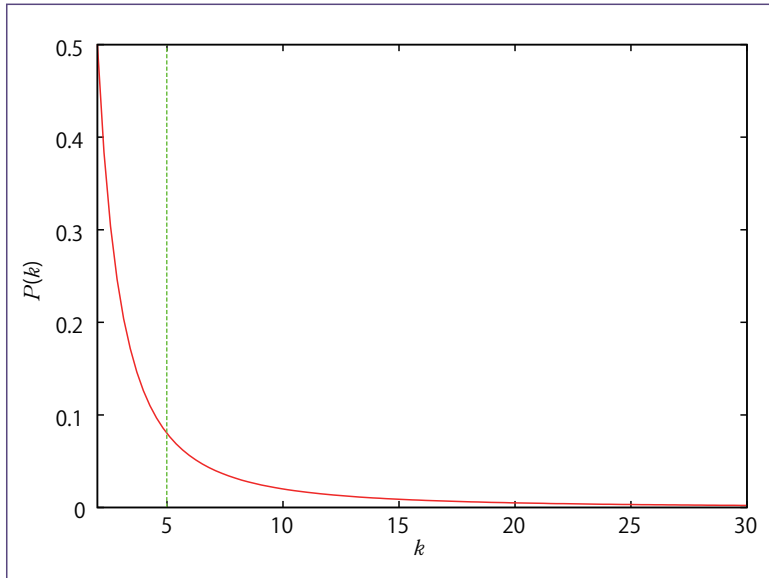


図-4 べき乗分布：次数 k を持つノードの頻度 $P(k)$

社会関係	知人, 企業間取引, 映画の共演, 論文引用, 性的関係, 言語
インフラ技術	インターネット (ルータおよび AS), WWW, 航空路線, 電力網, 電子メール送受信, P2P, 電子回路
生物系	遺伝子やエネルギー代謝反応, 神経回路網, 食物連鎖

表-1 さまざまな対象で観測されたスケールフリー性

くのネットワークに共通する別の特徴：スケールフリー性に着目した。その特徴は、図-4のように(ノードの結合リンク数を表す)次数 k の頻度分布が、べき乗則 $P(k) \sim k^{-\gamma}$, $2 < \gamma < 3$ に従うことで、表-1に示すさまざまな対象で確認された。べき乗則は、実測データが両対数の直線上に分布しているかどうかで確かめられるが、普通のスケールでみれば、大多数のノードは小さな次数だが極端に大きな次数(ハブ)も少数だけ存在する裾野が長い分布となる。次数 k を売り上げ順位に頻度 $P(k)$ をその金額に対応づければ、ロングテールの法則そのものとなる。あるいは、「20%の有能社員が全利益の80%を創出する」などで知られる、経済学におけるパレートの法則をも表す。現実の多くのネットワークではノードは平等に結合されず、多くのリングがごく少数のハブに集中することに対応づけられる。べき乗則自体は、地震の規模や河川の支流の長さの頻度分布などにおいて、フラクタルの分野で以前から知られていたが、ネットワークにも存在するとは誰も考えなかった。

さらに、Barabási と Albert は統計物理の平均場近似から、べき乗次数分布に従うスケールフリーネットワークの基本的な生成原理を明らかにした (BA モデルと呼ばれる)。全体の設計者がいなくても、社会関係、技術インフラ、生物に共通した、極端に大きなハブを持つ構造がなぜできるのかを見つけたのである。その鍵となるのは優先的選択と呼ばれ、各ノードがその次数に比例した確率でリンクを獲得することから (ノードを人に、リンクを金に対応づけて)、「金持ちはより金持ちになる」法則とも表現されている。しかも、先の WS モデルでは各ノードが同程度の次数となり、べき乗次数分布に従わないが、BA モデルではハブを経由するパスの存在で

ノード間の平均距離も小さくなり、より現実のネットワークに近い。

新たに得られた知見

現実の多くのネットワークに共通するスモールワールド性とスケールフリー性の発見と、それらを統一的に扱う解析手法の進展によって、欧米の物理学者や Web 科学の研究者 (先の Huberman らを含む) がいっせいに参入し、ネットワーク科学という新しい分野が誕生した。その際、SNS やブログの急速な普及に加えて、人々の信頼に基づく絆に (新たなビジネスチャンスや公共財を生み出す) 資本的価値があるとする社会関係資本への関心の高まりなどが、社会学や情報科学の研究者も魅了して、この分野をより活性化させていると考えられる。以下、これまでに明らかになった主な研究成果を時間順に列挙する。

- 大規模な実測に基づいた、さまざまな対象に潜む共通構造：スモールワールド性とスケールフリー性
- ネットワーク生成の基本原則：成長と優先的選択
- スケールフリーネットワークのランダム故障に対する頑健性と、ハブ攻撃に対する極端な脆弱性
- 経済的かつ効率的なスケールフリー構造
- 高速コミュニティ抽出アルゴリズムの開発：論文共著関係やソーシャルネット (mixi) 等の分析
- トラフィック特性：許容量に対する過負荷連鎖の防御策、局所分散ルーティング法
- 到着順でなく優先順による返信間隔のべき乗則

特に注目すべき点は、ハブを持つスケールフリー構造に起因する連結成分の頑健性や脆弱性など、これまで誰も予想すらしなかったが、実際問題として大きなインパクトを与える結果が明らかになったことである。情報通信にとって連結成分の頑健性は都合が良いが、ウイルス伝搬にとっては都合が悪く、さらに、感染力が弱ければ蔓延しないという従来の疫学理論をも覆してしまった。AIDSにおける性的接触数やコンピュータウイルスを媒介させる電子メールの送受信数は、べき乗則に従うので、かつての風土病が世界的流行にまで拡大していることの理論的裏付けを与えたことになる。一方、ハブ攻撃に対する脆弱性はテロへの脅威をより深刻にするもので、もはや経済活動や社会生活に欠かせない電力網や通信網が私たちの想像以上に脆く、その防御策の検討が急務であることを改めて認識させる。たとえば、研究機関やプロバイダなど Autonomous System (AS) と呼ばれる接続拠点レベルでインターネットを考えると、わずか数%のハブ攻撃で完全に機能不全となる。

もっとも、スモールワールド性とスケールフリー性だけでなくすべてが解明されたわけではなく、現在もさまざまな分析指標やネットワーク生成モデルが考えられ、最近の研究では、大規模な社会分析や高速アルゴリズムの開発、ランダムウォークなどに基づく自律分散型のトラフィック制御も検討されている。

複雑ネットワーク科学と呼ばれる分野が誕生してからまだ10年にもならないが、そこで発見された現実の多くのネットワークに潜む共通のつながり構造：スモールワールド性やスケールフリー性と、それらの性質から導

かれるネットワークの頑健性や脆弱性による長短所などは、ネットワークを科学できるレベルにまで成熟させたと言っても過言でないだろう。欧米を中心に、最近では韓国や中国においても、世界的な注目を集めて活発な研究が行われている。社会的な要因や状況を含めて現実のネットワークを理解し、より良い運用法や設計法を確立するには、まだまだ課題が山積みであり、今後の進展が楽しみである。

参考文献

- 1) 松岡正剛：情報生態学ネットワークの形態論，電腦交響主義，NIFTY ネットワークコミュニティ研究会 他編，NTT 出版，pp.349-353 (1997).
- 2) Huberman, B. A. (Ed.) : The Ecology of Computation, Elsevier Science Publishers B. V. North-Holland (1988).
- 3) 阪田史朗：Webの新潮流 — Web2.0とネットワーク関連技術動向—，通信ソサエティマガジン，No.1 夏号，電子情報通信学会，pp.50-66 (2007).
- 4) 上林憲行：ネットワークからネットワーキングへ—ネットワーク科学の社会的・学術的な意義について—，[社会に浸透するネットワーク技術の動向特集号] 解説，システム/制御/情報，Vol.51, No.8, pp.10-15 (2007).
- 5) Barabási, A. -L. (青木 訳)：新ネットワーク思考 —世界のしくみを読み解く—，NHK 出版 (2002).
- 6) Buchanan, M. (阪本 訳)：複雑な世界，単純な法則 —ネットワーク科学の最前線—，草思社 (2005).

(平成 19 年 12 月 12 日受付)

////////////////////////////////////

林 幸雄(正会員)
yhayashi@jaist.ac.jp

1987年豊橋技術大修了，富士ゼロックス(株)，(株)国際電気通信基礎技術研究所出身。1997年より北陸先端大知識科学研究科准教授。博士(工学)。自律分散的な通信網の構築と頑健性など，ネットワーク科学に関する研究に従事。本会 MPS 研究会論文誌編集委員，ネットワーク生態学研究グループ幹事等。

////////////////////////////////////