

情報と人をつなぐネットワーク



巴波 弘佳
Hiroyoshi Miwa

関西学院大学 理工学部
情報科学科 教授
[専門分野] 数理工学

鉄道網や通信ネットワークをはじめ、実世界の多くのネットワークは、物や人や情報をつなぐ重要な社会基盤となっています。そのため、常に機能を維持できる信頼性の高いネットワークを構築し運用する技術が必要不可欠です。

本稿では、劣通信環境における通信技術である蓄積搬送型通信のように時空間的に広がったネットワークの制御や、ノード・リンク保護という考え方に基づくネットワーク設計など、ネットワークの研究開発における近年の新たな展開の一端をご紹介します。

はじめに

実世界にはさまざまなネットワーク構造が見られます。鉄道網はもちろんのこと、インターネット、電力網、論文の引用関係、人間関係、企業間取引関係、生体内のたんぱく質相互作用など、情報科学・社会科学・経済学・生命科学など幅広い分野において、ネットワーク構造を見出すことができます。

ネットワーク構造は必ずしも空間的な広がりを持つものだけとは限りません。ノード(携帯端末を持つ人など)が情報を蓄積しながら移動し、ノード同士が近接した際に、近距離通信によって情報転送を繰り返す方法は蓄積搬送型通信と呼ばれ、時空間的な広がりを持つネットワークと考えることもできます。

多くのネットワークは単に相互につながっているだけではなく、その上での交通や物流、情報流通など、伝達・流通の機能も持っています。今やネットワークは重要な社会基盤であり、常にその機能を維持する信頼性の高い

ネットワークを構築し運用することが重要な課題です。

高信頼ネットワークの設計・制御は、特にグラフ理論や最適化理論などの研究とも密接につながっています。これらの理論が実世界のネットワークの設計・制御に役立つのみならず、逆に実世界のネットワークに関する研究開発が、理論に新たな分野を創出する一つの推進力になっているのです。

ネットワーク設計

通信ネットワークにおける故障や障害、鉄道網や道路網における事故や寸断などは、ネットワークの機能不全を引き起こします。そのため、ネットワークの一部が使用不可能になったとしても、ネットワーク全体は最低限の機能を維持できるように設計をしておくことが重要です。

通信ネットワークを例に挙げましょう。震災などの大規模災害によるノード故障やサイバー攻撃などによるノード停止は、ネットワーク全体に影響を

及ぼす可能性があります。インターネットをはじめ現実的なネットワークのなかには、スケールフリー性という、次数分布がべき乗則に従う性質(☞参照)を持つものも多いことが知られています。そのようなネットワークでは、全ノードのうちの5パーセント程度がランダムに破壊されたとしても、小さな連結成分に分断されることはなく、また全体の平均経路長はほとんど変化しません。一方、次数の高い上位5パーセントのノードが破壊されると、多数の小さな連結成分に分断される傾向にあり、平均経路長は約2倍に増大するという研究¹⁾が注目を集めました(☞1参照)。ネットワークが連結であることは通信するための最低限の条件であるため、このような事態を回避する対策が必要です。ノード故障などに対応するためには、耐震性強化・設備の多重化・監視強化などノードの「保護」を行わなければなりません。しかし、コストには限りがあるため、すべてのノードを一度に保護することは現

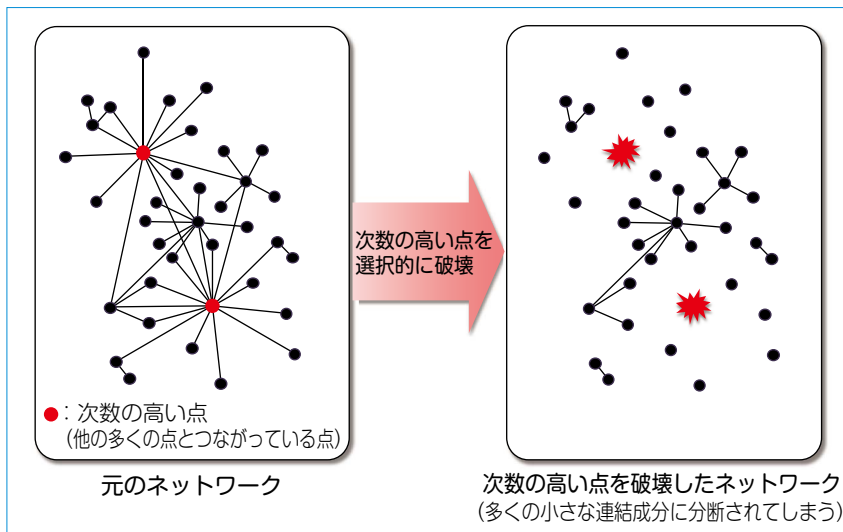


図1 選択的ノード破壊によるネットワーク分断被害の大きさ

実的ではありません。そのため、大幅な機能低下を引き起こす可能性のあるノードを優先的に保護する必要があります。つまり、コスト制約の下で限られた数のノードを保護し、それ以外のノードが故障・停止したとしても、ネットワーク全体への影響を可能な限り抑えるという方針で設計する必要があります。

しかしながら、これらの対策はそもそも鉄道網のようなスケールフリー性

を持たないネットワークには適用できません。そこで著者らは、これを最適化問題として扱いました。つまり、高々 k 個の任意の非保護ノードの故障に対して、残ったネットワークの最小連結成分のサイズが指定値以上となるように、最小数の保護ノードを決定することとして定式化しました。さらに数学的に解析することでさまざまな性質を解明し、少ない個数の保護ノード集合を効率良く見つける方法(アルゴリズム)

☞ スケールフリー性、次数

ネットワークにおいて、ある点 v につながっている他の点の個数のことを、点 v の次数といいます。ネットワークがスケールフリー性を持つとは、次数が k である点の割合 $p(k)$ が、 k が大きいとき $k^{-\gamma}$ (γ は正の実数) に比例するという性質を満たすことです。直観的には、小さな次数の点は多く、大きな次数の点は少ないという偏りがあるというものです。実世界のさまざまなネットワークにスケールフリー性が見出されたことから、大きな注目を集めました。

☞ NP 困難、多項式時間アルゴリズム

アルゴリズムの効率性を測る評価尺度として計算量というものがあります。計算量が、入力サイズを表す変数に関して多項式関数で表せるとき、多項式時間アルゴリズムといいます。通常、問題の規模が大きくなるにつれて計算時間も増加するものですが、その増加率が比較的緩やかであることを意味します。ある最適化問題を解く多項式時間アルゴリズムがあれば、現実的にもそれを用いて高速に解けます。一方、ある最適化問題が NP 困難という性質を持つならば、その問題を解く多項式時間アルゴリズムは存在しないだろうと考えられています〔P ≠ NP 予想〕という有名な未解決問題。直感的に言えば、NP 困難という性質は、効率良く解く手段がないということの意味です。そのため、NP 困難問題に対しては、近似アルゴリズムなど、最適解に近い値を求める手段の設計が目指されます。

ム)を設計しました。正確には、この問題がNP困難(☞参照)であることを証明し、 k 個のノードの同時故障に対して、最適解(最小個数の保護ノード集合)の高々 k 倍の個数の保護ノード集合を見つける多項式時間近似アルゴリズム(☞参照)を設計しました。数値実験では、最適解に近い解が得られる場合が多いことがわかっています。このアルゴリズムは、スケールフリー・ネットワークのみならず、一般的なネットワークに対しても、ノード破壊に耐える高信頼化設計法になっています。

ここではノード故障に関する話題を述べましたが、同様にリンク保護も考えることができます。また、制約条件のさまざまなバリエーションについても研究されています。

このノード保護・リンク保護の考え方は、通信ネットワーク以外にも広く適用することができます。例えば、鉄道網や道路網においては、区間の補強や重点監視するためのコストは通信ネットワークよりもはるかに大きいため、保護の重要性はさらに高まります。このような場合にも、上記の高信頼化設計法が使えるのです。

劣通信環境における通信技術

通常時には高速な通信ネットワーク環境を享受できたとしても、震災など大規模災害時には、それら通信インフラが損傷を受けて通信は断絶してしまいます。災害直後こそ情報流通が最も必要であるにも関わらず、人々は孤立した状態に置かれるのです。そのため、このような劣悪な通信環境(劣通信環境)における現実的な情報流通手段の確立が必要不可欠です。

劣通信環境は災害時だけのものではありません。鉄道においても、崖崩れなどの異常事態の検知やさまざまな機器の状態監視情報の収集などが必要不

可欠ですし、他にも地震観測・津波検知・気象観測など、センサーによる自然環境情報収集はたいへん重要です。ところが、現在のところ、センサーからの情報収集には有線ケーブルを用いざるを得ないため、コストが大きくなってしまい、大量のセンサーによる面的な情報収集は困難です。

通信の遅延 (Delay) や切断 (Disruption) が頻繁に発生するような劣通信環境において、一定の性能を確保する情報通信技術は、DTN (Delay-and Disruption-Tolerant Networking) と呼ばれ、近年世界的に研究開発が行われています。劣通信環境では、ノード間で常に通信できるとは限らないため、DTNを実現するためのさまざまな技術が研究開発されています。そのうちの重要な技術の一つとして、蓄積搬送型通信があります。これは、長距離の通信が困難であって至近距離のノード間でのみ通信が行われる状況において、移動ノードが相互に近づいた時、蓄積した情報の交換・共有を行うことによって情報を伝達する通信方式です (図2参照)。例えば、近距離通信としてすでに一般的なBluetooth通信やWiFiを利用することで、比較的容易に実用化できるというメリットがある反面、単純にこれを用いるだけでは、高い性能を得ることが困難という課題があります。もう一つの技術として、マルチパス通信があります。複数の異なる通信品質の通信路を組み合わせて適切に制御することで、効率良く通信を行うことを狙うものです。蓄積搬送型通信は、時空間的に広がったネットワーク上での情報流通、マルチパス通信は、確率的に時間的に変化するネットワーク上での情報流通を扱うものであり、いずれもこれらを対象とする理論はありませんでした。

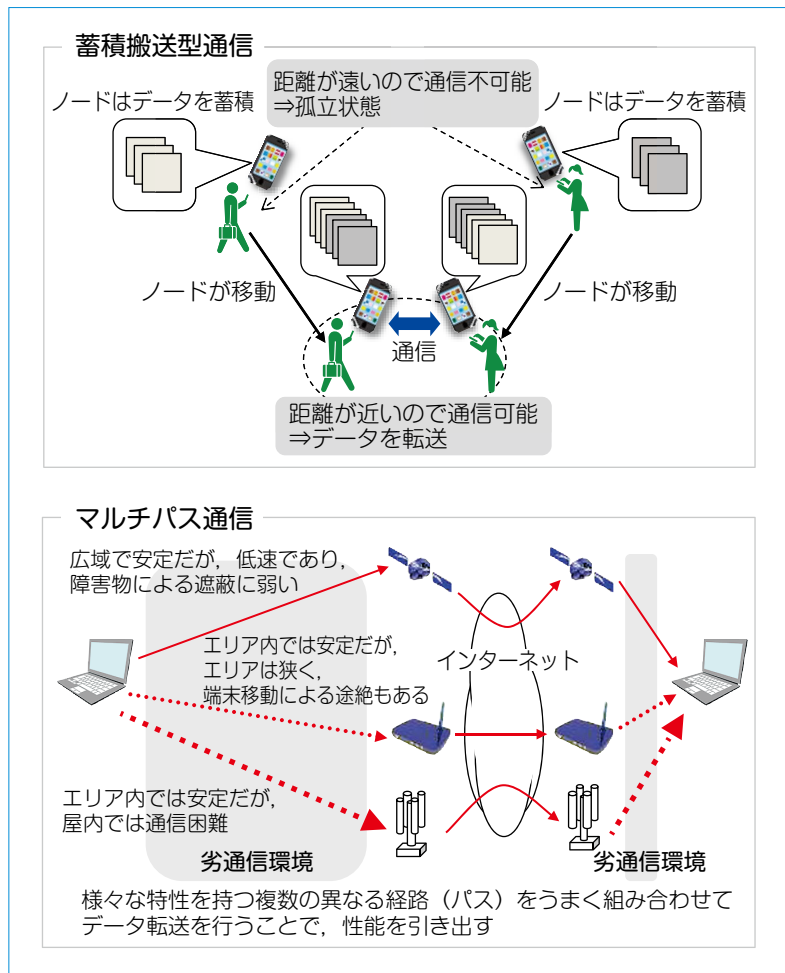


図2 劣通信環境における通信技術

ヒューマンモビリティ特性 利用による蓄積搬送型通信の 効率化

現実的なノードの移動はランダムウォーク (RW) ではなく、多くの場合、周期的に同じ経路を通るといった特性や、特定の場所に集まりやすいといった特性があります。それを利用すれば、蓄積搬送型中継転送の効率化が期待できます。では、どのような特性があるのでしょうか？

これまで、人間をはじめさまざまな生物の移動パターンはLevy Walk (LW) に従うということ知られていました。これは、次の目的地までに直線的に移動する距離が L である確率が L に関するべき乗則に従うことを意味します。簡単に言えば、多くの場合は一

回の移動距離は短く、時々長距離移動を行うというものであり、直感的な感覚と合っています。

著者らは、人間同士のすれ違いに着目しました。一生に一度しか会わない人はどれくらいの割合なのか、つまり一期一会となる人はどれくらいいるのか、逆に、頻繁に会う人との遭遇頻度にはどのような性質があるのか調べてみました。すると、すれ違い頻度分布がべき乗則に従うことがわかりました (図3参照)。

ところが、RWやLWのすれ違い頻度分布を調べてみると、いずれもべき乗則には従わないのです。これは、LWであっても実際の移動・遭遇特性を反映しておらず、モデルとして不十分であることを意味しています。

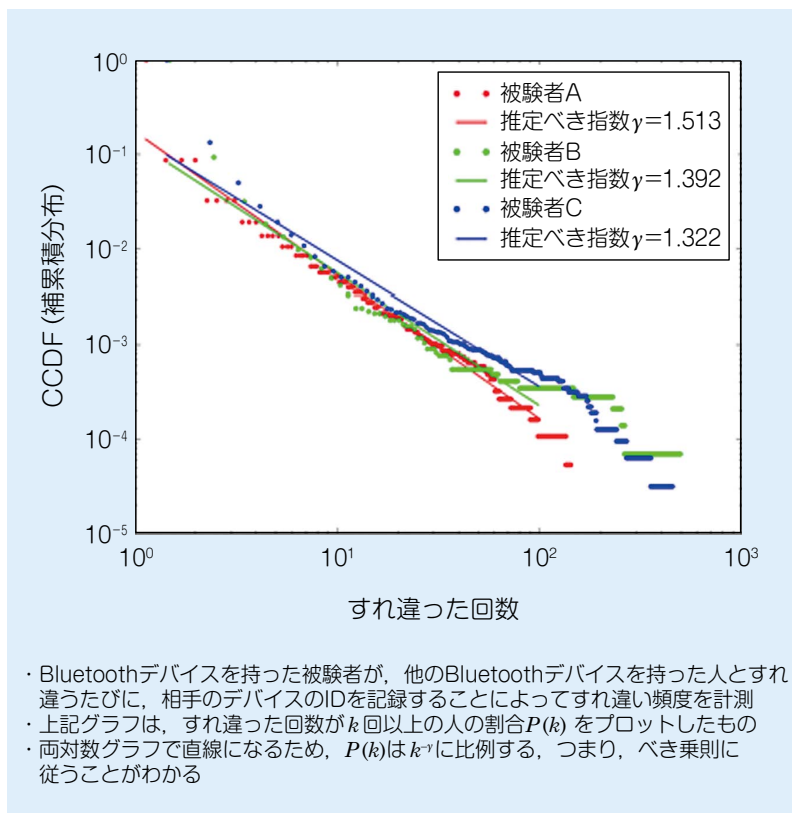


図3 べき乗則に従うすれ違い頻度分布

そこで著者らは、LWにおいて一定確率で「拠点」に帰還するHomesick Levy Walk (HLW) モデルを提案しました²⁾。これは、人間を含めて移動する多くの生物は、「家」や「巣」などの活動拠点を中心に移動することが多いという知見を反映したものであり、直感的な感覚にも合っています。これを理論的・実験的に調べることにより、HLWのすれ違い頻度分布は、漸近的にべき乗則に従うことがわかりました。拠点への回帰（ホームシック性）とスケールフリー性の両方の要因があってはじめて、すれ違い頻度分布のべき乗則が現れるのです。

すれ違い頻度がべき乗則に従うことは、大多数は一期一会、つまりほとんどのすれ違いは一回限りである一方、何度も遭遇するノードの組も少なからず存在することを意味します。そのため、このような組を抽出して利用すれば、目的のノードへ情報が中継される

可能性が高くなると考えられます。つまり、そのようなノードと出会ったときにのみ情報を転送することができれば蓄積搬送型通信の効率性の向上が可能になります。実際、過去の移動履歴から推定される目的ノードへの中継転送の可能性に応じて、転送するか否かの判断を最適停止理論に基づくアルゴリズムで行うという方法により、高い性能を実現できることを示しました³⁾。

さらに、このような高性能蓄積搬送型通信技術と組み合わせることで、大規模災害時に、被災状況や混雑状況に関する情報共有を図りつつ、適切な避難場所への避難誘導を行うスマートフォンアプリを実現することができます。平日昼間の都心部で大震災が発生すると、通常の携帯通信が利用できなくなり、群衆が避難場所もわからない状況に置かれることになるため、パニック発生の危険性も高まります。これに対して、DTN技術に基づく避難

誘導アプリがあれば、適切な避難誘導が期待できます。また平常時でも、駅中や地下街などでの歩行者ナビとして、また花火大会のような群衆が密集する場合における誘導ツールとして、有効でしょう。現在、著者らによって、そのようなシステムの研究開発が進められています。

おわりに

実世界におけるネットワークの多くは重要な社会基盤でもあり、その機能を維持するための設計・制御技術が必要不可欠です。通信ネットワークや鉄道網のような「昔からある」ネットワークでさえも、新技術の導入など状況の変化ともなって新しい問題が次々に現れてきています。また、劣通信環境における蓄積搬送型通信のように、新たな理論が必要になることもあります。さらに、これまでとはオーダーの異なる超巨大サイズのネットワークを扱うためには、既存のネットワークアルゴリズムだけでは不十分であり、新たなアプローチも必要になってきています。現在は、このような新たなネットワークの研究領域が次々に立ち上がってくる、挑戦的な時代であると言えるでしょう。【RRR】

文献

- 1) R.Albert, H.Jeong, A.L.Barabasi: Error and attack tolerance of complex networks, Nature, Vol.406, pp.378-382, 2000.
- 2) A.Fujihara, H.Miwa: Homesick Levy Walk: A Mobility Model having Ichi-go Ichi-e and Scale-Free Properties of Human Encounters, IEEE 38th COMPSAC, 2014.
- 3) A.Fujihara, H.Miwa: Homesick Levy Walk and Optimal Forwarding Criterion of Utility-based Routing under Sequential Encounters, Studies in Computational Intelligence, Vol.460, pp.207-231, 2012.