

平成21年6月4日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18500049

研究課題名（和文）アドホックなスケールフリーネットワークの構築法

研究課題名（英文）Construction Methods of Ad Hoc Scale-Free Networks

研究代表者

林 幸雄（HAYASHI YUKIO）

北陸先端科学技術大学院大学・知識科学研究科・准教授

研究者番号：70293397

研究成果の概要：無線やセンサシステム等におけるアドホック通信を含めた近未来のネットワークの基盤技術を探るため、1) 地理的空間上で成長するスケールフリーモデル、2) 連鎖的故障への防御法、3) 災害時の協調的な信頼情報の収集、4) 分析ツールの整備などに関して、自律分散処理やルーティングの効率化等のアルゴリズム的な観点から検討した。特に、故障や攻撃によるノード除去にも頑健でパケットの主要経路をなすショートカットの追加や応急処置的なリンク張り替えの効果が明らかとなった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000	0	1,100,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	510,000	3,310,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：結合耐性、自己組織化、ルーティング、地理的空間、無線通信網

1. 研究開始当初の背景

日々の経済活動や社会生活における物流や通信網、また自然界の生態系におけるさまざまな生物種の関係や生物内部の遺伝子やタンパク質の反応系等は、どれもみな複雑なネットワークを構成している。ところが、社会システムから生物系に至るまで、その膨大なネットワーク規模に比べて、構成要素間のお互

いの距離は驚くほど小さく、しかもクラスター係数（友達の友達はまた友達であるパイパス頻度）が高いとともに、結合次数分布がべき乗則に従うScale-Free(SF)構造を持つことが、世紀末前後に次々と発見された。しかも、いくつかのハブを持つSF構造は、経済的かつ効率的な通信（少ないリンク数で連結しつつ、ノード間の距離：ホップ数も小さい）に

適し、ランダムな故障には頑健であるなどの長所を持つことが分かってきた。

異なる対象に共通するこれらの性質は、従来のグラフ理論では説明できないばかりか、統計物理学者やWebサイエンスの研究者らを中心とした**自律分散的なネットワークの生成原理を探る新しい研究分野に発展**し、仲介機能を果たす人的資本の社会的活用から新薬開発などの広い範囲で新たなブレークスルーが期待されている。もちろん、情報通信への関わりは深く、WWWやインターネット自体がSF構造を持つことからそのトラフィックの特性解析、SF特有のハブを中継した迅速で広範囲な情報伝搬ダイナミクスの原理的解明や、耐故障性の高いネットワークを構築すること等は重要な課題である。この新分野では、**欧米の物理学者が社会分析や情報通信に関する課題にも参入**し、ネットワーク生成規則のみならずウィルス伝搬モデル等でもリードしているが、国内でも情報系の研究者らを中心に注目され出した。

一方、我々は比較的早い段階からSF構造に関連した上記のネットワーク科学の研究動向に着目し、Webリンク構造の分析から、その特徴的なべき乗次数分布や(ネット規模Nには速度 $\log N$ で蔓延する：小さな世界的な)情報伝搬特性等を明らかにしてきた。

2. 研究の目的

無線やセンサシステム等における**アドホック通信への応用を念頭に、情報通信の基盤技術**となり得る自律分散的なネットワークの設計原理を探った。特に本研究では、近未来における携帯電話や自動車等を含む通信端末の利用拡大を想定して、通信機器の現状技術の制約に縛られず広く可能性を探るため、原理的なネットワーク生成モデルにおける、次数分布やクラスター係数等のトポロジー特性、トラフィックや故障伝搬などの情報フロー、

ルーティングの効率性等に着目したアルゴリズム的な観点から検討を行った。その際、実際的な中程度の規模Nを想定した数百から数千ノードのネットワークを考え、理論解析や数値シミュレーションなどから解決策を見出すことを目指した。

3. 研究の方法

SFネットワークは経済的かつ効率的で、社会システムから生物系など随所に見られる共通構造である。これらの長所を保持する一方で、そのハブ攻撃への脆弱性を克服できるよう、状況に応じた配線替えやアクセスポイント(ノード：基地局)の増設を行うことで、耐故障性の高いネットワークを適応的に構築する方法を探った。特に、無線技術の進歩を見込んだアドホックネットワークを考え、以下の課題を中心に取り組んだ。

- 課題1) 地理的空間上で成長するSFモデル
- 課題2) 連鎖的カスケード故障への防御法
- 課題3) 災害時の協調的な信頼情報の収集
- 課題4) ネットワーク分析ツールの整備

実際の情報通信機器を用いた実データ分析は多大な労力・経費が必要で耐故障性等に関するさまざまな状況を機能停止までさせてテストすることが極めて困難なことから、**PC クラスタ分散環境を活用**して効率的に大規模な計算を行い、種々のパラメータの組み合わせに対するモデル上で分析を行った。

4. 研究成果

近未来のアドホック通信網への応用を念頭とした基盤技術となり得る自律分散的なネットワークの設計法に関連する各課題に対して、既存の理論解析だけでは分からない以下の成果を得た。また、一般向けの科学啓蒙書1冊と専門書2冊、学会誌に研究動向等のサーベイを編著し、国内学会等での招待講演にて新分野の意義を伝える努力も行った。

課題 1) 人口分布に相当する、地理的空間上の疎密なノード配置で自己組織的に成長する SF ネットワークモデルを考え、地理的制約による結合耐性の脆弱化を（全く同じ次数分布の下でランダムにリンク張り替えして地理的制約をなくした場合との比較から）明らかにすると共に、この脆弱化が**ランダムなノード間のショートカットの少量追加で劇的に改善**できることを種々のネットワークで示した。さらに、そのトラフィック特性として、ショートカットが**多くのパケットを流す主要経路として寄与**することを定量的に分析した。これらの成果を学術雑誌論文や国際会議にて発表した。

課題 2) SF ネットワーク上の初期故障源からの迂回路で過負荷が次々と起こるカスケード故障の防御策として、従来の「いけにえ的なノード除去」よりも、初期故障源に結合していたノード間の**応急処置的なリンク張り替えが効果的**なことを明らかにした。但し、2 年目から研究分担者の協力が困難となり、結合相関を変えた場合など当初の計画が一部実現できず、下記にも影響を与えた。

課題 3) 物理学者が明らかにした最も頑健な 2 極構造に着目して、住民と自治体の役割を分け、災害発生時の情報収集を、住民から各地区の自治体への情報提供と、自治体間の伝達連携としてモデル化した。また、石川県加賀地区における庁舎や役場の位置、及び、地震災害のハザードマップに従った発生頻度を想定して、迅速かつ信頼性の高い収集ができる連携結合の仕方を比較分析して、国際会議や国内研究会にて発表した。

課題 4) 当初予定には含まれてなかったが、Java のバージョンアップに伴う GUI の変更によって、これまで作成したプログラムにかなりの修正が必要となったり、停電や HDD 故障、実験室の電源拡張工事等による時間的ロス

がかなり発生したが、**既存の分析ツールにはない頑健性やトラフィックのダイナミクス解析や JavaRMI 分散処理等の機能を充実**させることが出来、研究コミュニティを中心とした共同開発への発展が期待できる。また、過去に財団の研究助成や前科研費等で購入して陳腐化した PC クラスタ環境を徐々に改善しながら整備することも出来た。

総じて、多くのトラブルに見舞われながらも当初の期待以上の成果が得られたものと考えられ、ネットワーク科学という新しい切り口から近未来の自律分散的な情報通信網の基盤技術を探れるよう、本研究成果がいささかでも寄与できれば幸いである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

① Yukio Hayashi, Necessary Backbone of Super-highways for Transport on Geographical Complex Networks, *Advances in Complex Systems* Vol. 12, No. 1, pp. 73-86, 2009 査読有

② Yukio Hayashi, Evolutionary Construction of Geographical Networks with Nearly Optimal Robustness and Efficient Routing Properties, *Physica A* 388, pp. 991-998, 2009 査読有

③ 林 幸雄 編著, 情報処理学会誌 小特集「複雑ネットワーク科学の拡がり」, Vol. 49, No. 3, pp. 275-320, 2008 査読有

④ 林 幸雄, 情報通信ネットワークが持つべき特性, 数理科学, リレー連載「ネットワーク科学最前線 -世界の''つながり''を知る科学と思考-」, 第 45 卷 11 号, No. 533, pp. 77-83, 2007 査読有

⑤ Shinji Tomita, and Yukio Hayashi, A Controllable Model of Random Multiplicative Process for Entire Distribution of Population, *Physica A* 387, 1345-1351, 2007 査読有

⑥ Yukio Hayashi, and Jun Matsukubo, Improvement of the robustness on geographical networks by adding shortcuts, *Physica A*, 380, 552-562, 2007 査読有

⑦ 林 幸雄, 身近なネットワークは複雑?, アイ・サイ問答教室, システム/制御/情報,

Vol. 51, No. 2, pp.111-112, 2007 査読有

⑧ Yukio Hayashi and Jun Matsukubo, Geographical construction of scale-free networks with both short path lengths and hops, Lecture Notes in Computer Science 3993, pp.1106-1113, 2006 査読有

⑨ Yukio Hayashi and Jun Matsukubo, Geographical effects on the path length and the robustness in complex networks, Physical Review E 73, 066113, 2006 査読有

[学会発表] (計 23 件)

①奥村 浩徳, 林 幸雄, 地理空間上のネットワークモデルのいくつかの特性, 第5回ネットワーク生態学シンポジウム, CD 予稿集, pp.195-198, 3/9-10, 2009, 沖縄国際大学

②佐藤 恵介, 林 幸雄, 小野 泰正, 大規模なネットワーク解析ツールをオープンソースとして開発・利用するプラットフォームの開発と参加者募集, 第5回ネットワーク生態学シンポジウム, CD 予稿集, pp.228-233, 3/9-10, 2009, 沖縄国際大学

③小野 泰正, 林 幸雄, 大規模複雑なネットワーク分析に適した分散環境, 情報処理学会研究報告 2008-MPS-72(24), pp.93-96, 12/17-18, 2008, 大阪大学

④ Yukio Hayashi, and Yasumasa Ono, Trade-off between detoured hopping and congested waiting in the routings depend on degrees and queue lengths at nodes on scale-free networks, Proc. of the 3rd International Workshop and Conference on Networks Science, pp.208, June 25-26, 2008, Nowrich UK

⑤ Yukio Hayashi, Robust Design of Geographical Networks based on a population against Failures and Attacks, CD: Proc. of the 4th Workshop on Spatial Stochastic Models for Wireless Networks, Apr.4, ISBN: 978-963-9799-18-9, 2008, Berlin Germany

⑥Keisuke Sato, and Yukio Hayashi, A phase transition of multi-peak of information spreading on communities' structure, Proc. of the 3rd International Nonlinear Science Conference, pp.28-29, Mar.13, 2008, Tokyo

⑦小野 泰正, 林 幸雄, 複雑ネットワーク上でのダイナミクス研究ツール, 第4回ネットワーク生態学シンポジウム, CD 予稿集, pp.55-57, 3/10, 2008, 京都産業大学

⑧松久保 潤, 林 幸雄, リンクの重みを考慮した Web コミュニティ探索法, 第4回ネットワーク生態学シンポジウム, CD 予稿集, pp.86-87, 3/10, 2008, 京都産業大学

⑨ Shinji Tomita, and Yukio Hayashi, Controllable Stochastic Models for Entire

Distribution of Population, Proc. of IES2007, pp.57-62, Nov.30, 2007, Tokyo

⑩ Yukio Hayashi, Necessary backbone of superhighways for transport on geographical complex networks, European Conference on Complex Systems, Oct/1-5, 2007, Dresden Germany

⑪ Yasumasa Ono, and Yukio Hayashi, Emergent Communication Networks for Uncertain Information at the Beginning of a Disaster, 19th International Conference on Noise and Fluctuations, AIP Conference Proceeding, Vol.922, pp.607-610, Sept. 13, 2007, Tokyo

⑫富田 真治, 林 幸雄, 確率モデル制御による人口分布の再現, ネットワーク生態学シンポジウム 第3回サマースクール, Sept. 4, 2007, 富士教育研修所

⑬ Yasumasa Ono, and Yukio Hayashi, An efficient connection structure between cooperative governments for gathering disaster information, Proc. of the 2007 International Conference on Modeling, Simulation and Visualization Methods, pp.178-187, June 27, 2007, LA USA

⑭ 林 幸雄, ネットワーク科学とその数理 - 現実のネットワークに潜む共通性 -, 明治大学大学院 第4回 理工学研究科総合講義C 現象数理科学の新展開, 5/24, 2007

⑮ 林 幸雄, 複雑ネットワークにおける頑健性、カスケード故障、地理的制約に対するトポロジー制御, (独) 情報通信機構 未来 ICT 研究センター 第 82 回 KARC コロキウム, 4/19, 2007

⑯佐藤 恵介, 林 幸雄, ネットワーク解析および可視化ツール Pajek について, 第3回ネットワーク生態学シンポジウム, CD 予稿集, pp.133-137, 3/16, 2007, 中央大学

⑰松久保 潤, 林 幸雄, 無線アドホックネットワーク上のカスケード故障シミュレーション, 第3回ネットワーク生態学シンポジウム, CD 予稿集, pp.142-143, 3/16, 2007, 中央大学

⑱小野 泰正, 林 幸雄, 頑健かつ効率的な機関連携を考慮した災害情報通信ネットワーク, 情報処理学会研究報告 2007-MPS-63, pp.29-32, 3/3, 2007, 宮城県松島

⑲ 林 幸雄, 複雑ネットワークにおける頑健性、カスケード故障、地理的制約に対するトポロジー制御, 信学 IN (情報ネットワーク) 研究会 招待講演, 信学技報 IN2006-120, pp.37-42, 12/14, 2006, 大阪大学

⑳ 林 幸雄, 近接結合を持つネットワークの頑健性、-母関数アプローチによるパーコレーション解析-, 電子情報通信学会 IBIS2006 オーガナイズドセッション: 複雑ネットワークのサイエンス, 予稿集 pp.200-207,

11/2, 2006, 大阪大学中之島センター

① 浅沼 雅行, 林 幸雄, 災害発生時における移動基地局の配置問題, ネットワーク生態学研究会 第2回サマースクール, 9/1, 2006, 山形県青年の家

② 西田 正延, 林 幸雄, ネットワーク・コミュニティにおけるコネクタの重みづけに関する研究, ネットワーク生態学研究会 第2回サマースクール, 9/1, 2006, 山形県青年の家

③ Yukio Hayashi and Jun Matsukubo, Geographical construction of scale-free networks with both short path lengths and hops, Proc. of International Conference on Computational Science, Organized Workshop on Networks: Structure and Dynamics, Part. III, 5/29, 2006, Reading UK

[図書] (計 3 件)

① 青山秀明・相馬亘・藤原義久 共編著 (分担執筆: 林 幸雄), ネットワーク科学への招待, V. 情報 情報通信ネットワークが持つべき特性, pp. 136-142, 臨時別冊・数理科学 SGC ライブラリ 65, サイエンス社, 2008

② 林 幸雄 編著, ネットワーク科学の道具箱, 近代科学社, 212, 2007,

③ 林 幸雄 著, 噂の拡がり方 - ネットワーク科学で世界を読み解く -, 知のナビゲータ DOJIN 選書 009, 化学同人, 192, 2007

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 幸雄 (HAYASHI YUKIO)

北陸先端科学技術大学院大学・知識科学研究科・准教授

研究者番号: 70293397

(2) 研究分担者(2006~2007)

松久保 潤 (MATSUKUBO JUN)

北九州工業高等専門学校・電子制御工学科・助教

研究者番号: 90413872

(3) 連携研究者 (2008)

松久保 潤 (MATSUKUBO JUN)

北九州工業高等専門学校・電子制御工学科・助教

研究者番号: 90413872