

令和 3 年 5 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13777

研究課題名（和文）ネットワークにおける伝播の解析と制御：モチーフを活用した多項式時間アルゴリズム

研究課題名（英文）Polynomial-time Algorithms for Analysis and Control of Epidemic Spreading Processes

研究代表者

小蔵 正輝（Ogura, Masaki）

大阪大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：10800732

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：ネットワークにおける様々なダイナミクスの性質を解析し、さらにそれらを制御するための手法を確立した。感染症ダイナミクスに対しては、二次モーメントと呼ばれる統計量を用いた精度良い解析手法や、マルコフ性と呼ばれる特殊な性質を仮定しない解析手法、社会距離戦略を通じた制御手法などを得た。製品開発プロセスに対しては、最大限の開発結果を得るために限りある人的資源を有効に活用するための最適化手法を得た。これらの結果において重要な役割を果たす幾何計画と呼ばれる最適化手法を用いて、ネットワーク結合した非負システムの様々な指標を効率的に最適化することが可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多数のシステムが複雑に結合するネットワークダイナミクスは、感染症伝搬や情報伝播など様々な状況に現れる。ネットワークが大規模な場合、このようなダイナミクスの解析や制御に従来の手法をそのまま用いることは、数値的に効率が必ずしも良いとは限らない。そこで本研究ではこの困難を克服するために、様々な数理に性能が裏打ちされた、数値的に効率の良いネットワーク解析・制御手法を確立した。

研究成果の概要（英文）：We have established novel frameworks for the analysis and synthesis of various classes of networked dynamics. For the epidemic processes over networks, we have obtained analysis tools based on non-backtracking matrices and higher-order moments. For positive dynamical systems, we have constructed a synthesis theory based on geometric programming, which is then applied for the optimal design of product development processes.

研究分野：複雑ネットワーク

キーワード：複雑ネットワーク 制御理論 最適化 制御工学 非負システム 設計工学 確率過程

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ヒトの感染症流行の数理モデルは多い。代表的なのがネットワーク上の Susceptible-Infected-Susceptible モデル (SIS モデル) である。このモデルでは、ヒトと交友関係をそれぞれネットワークにおけるノードおよび枝とみなす。感染ノードは、つながっている健康なノードを感染させつつ回復にいたる。このモデルをつかって、簡易的ながらも流行の終息時期の目安をつけたり (予測)、あるいは医療支援や患者隔離といった感染症対策 (制御方策) の有効性を検証できる。

SIS モデルの難しさに組合せ爆発がある。ノードが  $n$  個あるとき、各ノードは 2 つの状態 (感染 / 回復) をとるため、ネットワーク全体の状態は  $2^n$  通りにもなる。これはノード数について指数的に増えてしまう。これへの伝統的対処法が平均場近似である。たくさんの状態の中で「重要な  $n$  個以外を忘れることで、誤差を含みつつも現実的な計算時間でモデルの予測と制御ができる。しかし近年の計算機の発達により、状態を  $n$  個にまで絞る必要性は薄れている。実際に、予備的な実験で研究代表者は、 $n^2$  個の状態を使いつつも、1 秒足らずの時間で、流行終息への速さをはるかに精度良く計算できている。

このように、ノード数について線形ではなく多項式の複雑さを許すことで解析精度を劇的に改善できるが、課題は残る。例えば SIS モデルはヒトの免疫獲得を表せない。また、感染症流行のほかにネットワークでおこる現象はある。例えば、電力網における故障連鎖、取引関係を通じた連鎖倒産、あるいはインターネットにおける情報拡散などがある。このような伝播現象、つまり個々のノードがとなりあうノードに影響され変化していく現象にたいしても、いまだに平均場近似が盛んに適用されている現状がある。

### 2. 研究の目的

本研究の当初の目的は、伝播モデルにたいする平均場近似より精度良い解析と制御の枠組みをつくることである。伝播がもつ指数関数的な組合せ爆発を避けつつも、近年の計算機環境の進化を鑑みノード数について多項式程度に複雑な処理は許すことを目指す。具体的には以下の目標を達成することを目指す。

1. 状態の絞り込みと低次元モデルの構築
2. 伝播の予測 / 解析と制御器設計
3. 実データをつかった有効性の検証

研究の進展に伴い、本研究で開発する予定である解析・制御手法の適用範囲が上述のような伝播モデルに限定されないことが明らかとなった。そこで当初の研究目的に

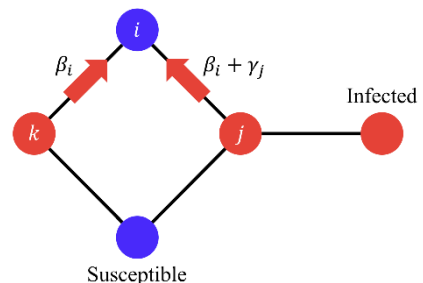
4. ネットワーク化した非負システムの最適制御を加えて研究を進めることとした。

### 3. 研究の方法

SIS モデルはマルコフ過程であるため制御理論のアプローチを直接的に適用することは難しい。そこでまず SIS モデルのダイナミクスを近似する線形モデルを導出する。この線形モデルに対して制御理論のアプローチを適用する。SIS モデルの有する非負性を保持した線形モデルを導出することで、近似モデルに対して非負システムの理論を適用できるようにする。特に Perron-Frobenius の理論を通じた安定解析により、SIS モデルの安定条件を代数的な不等式条件に帰着できる。このアプローチが本研究の方法の根幹を成す。

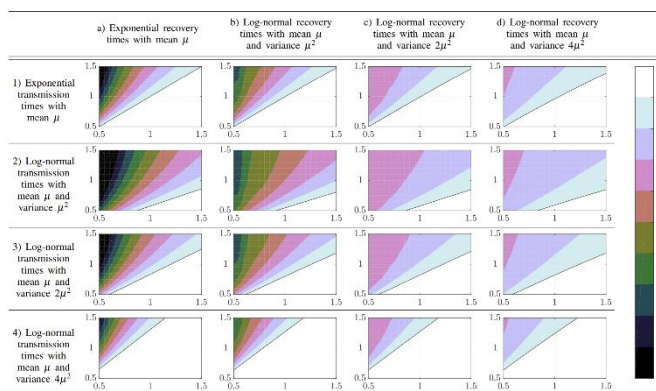
### 4. 研究成果

SIS モデルの解析と制御に関しては以下の成果を得た。論文 Second-order moment-closure for tighter epidemic thresholds では、二次モーメント分析を通じて、ノード数の自乗オーダーのサイズをもつ行列の固有値を用いた SIS モデルの解析手法を得た。この成果をさらに拡張する形で論文 Analysis of the susceptible-infected-susceptible epidemic dynamics in networks via the nonbacktracking matrix では、二次モーメント分析を通じて、non-backtracking matrix と呼ばれる行列の固有値を用いた SIS モデルの解析手法を導出した。これら論文における二次モーメントの解析技法は、論文 Synergistic Effects in Networked Epidemic Spreading Dynamics における相乗的な SIS モデル (右図) の解析の基礎技術を構成している。

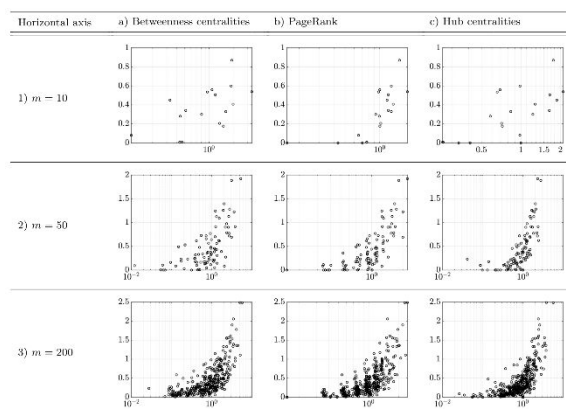


上述の SIS モデルには、感染過程と治癒過程の双方がマルコフ的であるという大きな制約がある。この制約は現実の感染症においては成り立たないことが多い。この制約を取り除くために論文 Stability of SIS Spreading Processes in Networks With Non-Markovian Transmission and Recovery では、感染過程と治癒過程の双方が非マルコフ的であるような一般化 SIS モデルを構築し、このモデルにおける伝播過程の終息条件を行列の固有値を用いて導出することに成

功した。この導出においては相型分布の理論が重要な役割を果たしている。また、感染過程と治癒過程の双方が非マルコフ的であるような伝播過程に対する数理的に厳密な終息条件の導出は他に例を見ない(出版当時)。この条件に基づき、非マルコフ性を適切に考慮することでより正確な終息条件が得られることをオンラインソーシャルネットワークの実データを用いて例示した(右図)。



これら伝播過程に対する成果を拡張して、製品開発プロセスの最適化に関する成果を得た。まず論文 Resource optimization of product development projects with time-varying dependency structure では、製品開発過程を非負システムの結合系とみなすモデルを採用し、この結合系に対する人的資源の投入を通じて製品開発を加速する問題を定式化した。ある仮定のもとで最適化問題が幾何計画と呼ばれる最適化問題に帰着することを示した。さまざまな結合アーキテクチャを用いた網羅的な検討により、結合アーキテクチャから定まる頂点の中心性指標が、投入資源と正の相関を持つことを示した。右図に、アーキテクチャが Erdos-Renyi グラフと呼ばれる構造を保つ場合の例を示す(横軸: 中心性指標, 縦軸: 投入資源量)。この成果は投入資源の時間変化を許す場合へも拡張されている(論文 Optimal resource allocation for dynamic product development process via convex optimization)。



また上述の手法を一般化し、パラメータ操作により非負システムの結合系の様々な指標を最適化するための一般的な枠組みを確立した(論文 Geometric Programming for Optimal Positive Linear Systems)。この枠組で扱うことのできる指標は H2 ノルム, H 無限大ノルム, 構造的な不確かさの下での安定性指標, Hankel ノルム,  $p$ -Schatten ノルムなど数多い。パラメータ操作も、従来手法のようにシステム行列の対角成分に限定されることはない。この結果はシステム制御理論のトップジャーナルである IEEE Transactions on Automatic Control 誌に Full Paper として掲載されており、関連する招待講演を海外にて複数件実施している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ogura Masaki, Kishida Masako, Lam James	4. 巻 65
2. 論文標題 Geometric Programming for Optimal Positive Linear Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 4648 ~ 4663
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAC.2019.2960697	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Masuda Naoki, Preciado Victor M, Ogura Masaki	4. 巻 85
2. 論文標題 Analysis of the susceptible-infected-susceptible epidemic dynamics in networks via the non-backtracking matrix	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IMA Journal of Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 214 ~ 230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/imamat/hxaa003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ogura Masaki, Preciado Victor M.	4. 巻 7
2. 論文標題 Stability of SIS Spreading Processes in Networks With Non-Markovian Transmission and Recovery	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Control of Network Systems	6. 最初と最後の頁 349 ~ 359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCNS.2019.2905131	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 ABE Yuma, OGURA Masaki, TSUJI Hiroyuki, MIURA Amane, ADACHI Shuichi	4. 巻 E103.A
2. 論文標題 Resource and Network Management Framework for a Large-Scale Satellite Communications System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 492 ~ 501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2019EAP1088	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ogura Masaki, Harada Junichi, Kishida Masako, Yassine Ali	4. 巻 30
2. 論文標題 Resource optimization of product development projects with time-varying dependency structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Research in Engineering Design	6. 最初と最後の頁 435 ~ 452
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00163-019-00316-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 OGURA Masaki	4. 巻 12
2. 論文標題 Optimal Resource Allocation over Complex Networks: An Approach via Geometric Programming	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE ESS Fundamentals Review	6. 最初と最後の頁 191 ~ 200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/essfr.12.3_191	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ogura Masaki, Mei Wenjie, Sugimoto Kenji	4. 巻 67
2. 論文標題 Synergistic Effects in Networked Epidemic Spreading Dynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs	6. 最初と最後の頁 496 ~ 500
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCSII.2019.2912794	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Zhao Chengyan, Ogura Masaki, Kishida Masako, Yassine Ali	4. 巻 32
2. 論文標題 Optimal resource allocation for dynamic product development process via convex optimization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Research in Engineering Design	6. 最初と最後の頁 71 ~ 90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00163-020-00346-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Chen Ximing, Ogura Masaki, Preciado Victor M.	4. 巻 7
2. 論文標題 SDP-Based Moment Closure for Epidemic Processes on Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Network Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 2850 ~ 2865
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNSE.2020.2998491	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 八木 聖太、小蔵 正輝、岸田 昌子、木村 達明、林 和則	4. 巻 J103-B
2. 論文標題 Geometric programによる送信電力制御アルゴリズムのロバスト安定化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B 通信	6. 最初と最後の頁 644 ~ 651
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2020JBP3023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chen Ximing, Ogura Masaki, Preciado Victor M.	4. 巻 41
2. 論文標題 Bounds on the Spectral Radius of Digraphs from Subgraph Counts	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications	6. 最初と最後の頁 525 ~ 553
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1137/19M1256312	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ogura Masaki, Preciado Victor M., Masuda Naoki	4. 巻 79
2. 論文標題 Optimal Containment of Epidemics over Temporal Activity-Driven Networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SIAM Journal on Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 986 ~ 1006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1137/18M1172740	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ogura Masaki, Preciado Victor M.	4. 巻 113
2. 論文標題 Second-order moment-closure for tighter epidemic thresholds	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Systems & Control Letters	6. 最初と最後の頁 59 ~ 64
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sysconle.2018.01.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------