

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04214

研究課題名(和文)時系列情報を用いたソーシャルネットワークの分析・生成・予測

研究課題名(英文)Analysis, generation and prediction of social networks using event sequences

研究代表者

岡 瑞起 (Oka, Mizuki)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：10512105

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,100,000円

研究成果の概要(和文)：鳥が群れを形成できるのは、一羽の鳥の動きが連鎖的につながり集団全体にまで伝搬する「臨界領域」で行動しているからだと言われている。本研究では、同じような臨界現象がインターネット上のコミュニケーションにおいても存在するかを分析した。分析の結果、オンラインのコミュニケーションにおいても、性質の異なるふたつの状態の臨界領域で観測される臨界現象が存在することが明らかとなった。また、集団が臨界状態であるとき、生物の生態系における「キーストーン」種的な振る舞いをするノードが出現することも明らかとなった。こうした機構が集団の新陳代謝を高め、オンラインコミュニケーションの持続性や適応性に繋がっていると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

過剰に安定したシステムは、それゆえに新しいものが生まれず、そのままでは多様性が損なわれしまい、変化が起きたときに適応できず、システムそのものが壊れてしまう危険性がある。本研究の結果から、適応的なシステムを作り出すためには、キーストーン種のような不安定性を自ら作り出し、自分自身をアップデートするような機構を内在していることが重要であることが明らかとなった。これは、組織運営やシステム設計にも活かすことのできる一般的な知見となり得ると考えている。

研究成果の概要(英文)：It is said that birds are able to form flocks because they act in a 'critical area', where the movements of a single bird are linked in a chain and propagated to the whole group. In this study, we analyzed whether a similar critical phenomenon exists in internet communication systems. The analysis revealed the existence of a critical phenomenon in online communication, which is observed in a critical region with two states of different nature. It was also found that when a group is in a critical state, nodes emerge that behave like 'keystone' species in biological ecosystems. These mechanisms are thought to enhance the metabolism of the group, leading to the sustainability and adaptability of online communication.

研究分野：ウェブサイエンス、人工生命、計算社会科学

キーワード：Multivariate Hawkes過程 ネットワーク分析 臨界状態 キーストーン種

### 1. 研究開始当初の背景

人間の時間的な振る舞いはランダムな過程(ポアソン過程)に従う、と長い間考えられてきた。しかし、2005年にアルバート・バラバシを中心とする研究グループが、人間の行動はひとつの行動が他の行動を誘発するような間欠的な振る舞い(バースト)がより顕著であると考え、バースト的な振る舞いの重要性を説いた。バースト現象の重要性はバラバシ以前より指摘されているが、それがWeb上のさまざまなオンラインシステムに関し、大量のデータで実証されるようになったことが研究を促進している。たとえば、研究代表者はこれまでにTwitterのデータ解析において、ある単語を含むツイートがいつバーストするか、その前駆現象としてのゆらぎの増大などをみてきたが、その詳細なメカニズムは明らかになっていない。そこでSNSの動的なダイナミクスをさらに明らかにすることを目的に、Hawkes過程やMultivariate Hawkes過程を用いたSNSなどのオンラインコミュニケーションにおけるバーストに注目した分析を行っている。

### 2. 研究の目的

Hawkes過程においては、1つのイベントの発生が他のイベント発生の生起をどの程度促すかを強度関数の励起率で表すが、この励起率がイベントの発生パターンの定常性を説明する上で、非常に重要であることが近年、解析的に明らかになってきている。Hawkes過程によってバーストをモデル化すると、励起率についてある値を境にバーストの生じない静的な定常状態から、バーストが頻繁に生じる非定常状態への「相転移」が、時間スケールの大きさをパラメータとすることで、臨界点が見えるという報告がある。シミュレーションによる実験でも、同様に相転移を示す結果が得られている。

しかし、相転移といったこれまで理論的に解明されている性質が、現実のデータにも見られるかという検証はこれまでに行われていない。そこで、本研究では、オンラインコミュニケーションデータを対象に、Multivariate Hawkes過程を適用し、実データにおいても相転移は起こるのか、どのような条件で起こるのかといった観点から分析を行うことを目的とする。

### 3. 研究の方法

コミュニティサイトが運営する掲示板でやりとりされるオンラインコミュニケーションデータを対象に、Multivariate Hawkes過程を用いてデータをフィッティングし分析に用いた。ユーザが掲示板を通してトピックが立てられ、コメント、いいね、返信、といったユーザの行動がイベントとして記録される。トピックごとのイベント時系列から、トピックをノードとしたネットワークを作成し(図1) Multivariate Hawkes過程でフィッティングしたパラメータの値から、ネットワークの臨界状態を測定する。

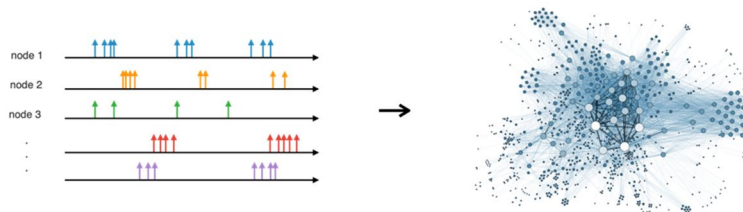


図1 イベント時系列間から推定される影響度から作成するネットワーク

ネットワークの状態は、cascading condition と呼ばれる値(C)で定義し(図2)コミュニティの時間変化を分析する。Cascading conditionの値が2であるとき(C=2)ネットワークは臨界状態であることが解析的に求められている。また、cascading conditionが2より小さい時(C<2)はランダムな状態を示し、2より大きい時(C>2)は、乱流状態にあるとみなすことができる。

Cascading condition C derived from MHP

$$\lambda_i(t) = \mu_i + \sum_{j=1}^D \left( \alpha_{ij} \sum_{t' < t} \beta_j e^{-\beta(t-t')} \right), \quad C \equiv \frac{\sum_{i,j} (LAL^T)_{ij}}{\sum_i \langle \lambda_i \rangle}$$

- C < 2 stationary
- C = 2 critical state
- C > 2 non-stationary (bursting)

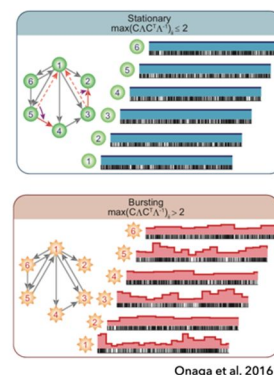


図2 Multivariate Hawkes過程と Cascading Condition

イベント時系列をウィンドウ幅に区切り、各ウィンドウの cascading condition の値を計算することで、ネットワークの臨界状態がどのように変化しているかを分析することが可能となる。

さらに、フィッティングしたパラメータを用いシミュレーションしネットワークがどのように変化するかをみる。たとえば、ネットワークのノードやエッジの追加や削除を行うことで、因果ネットワークに与える影響度(活性度)を cascading condition の値の変化から分析することができる。

#### 4. 研究成果

コミュニティサイトのデータを用いたシミュレーションと分析の結果、まず、ネットワークは臨界状態になったり、それ以外の状態を取ったりと、時間によって変動していることが明らかとなった。さらに、ネットワークからひとつひとつノードを取り除く実験を行ったところ、臨界状態にあるネットワーク ( $C=2$ ) から、取り除くとネットワーク全体に与える影響度が非常に大きいノードが存在することが分かった。該当のノードを取り除くと、ネットワークのアクティビティ量が大幅に落ち込むのである(図3・図4)。

このようなノードは、生物の生態系にみられる「キーストーン種」のようなノードと捉えることができる。キーストーン種は、生物の生態系における「数は少ないけれど、それを取り除くと生態系全体のバランスが崩れるなど大きな影響を与える」種のことを指す。たとえば、海岸の生物では、ラッコやヒトデなどがキーストーン種であることが報告されている。

コミュニティサイトにおけるキーストーン種とは、それを取り除くとコミュニティ全体のアク

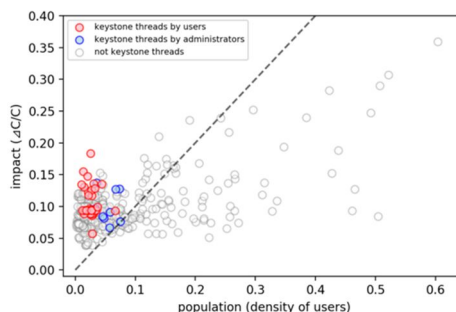


図3 ノードを取り除いたときの影響度

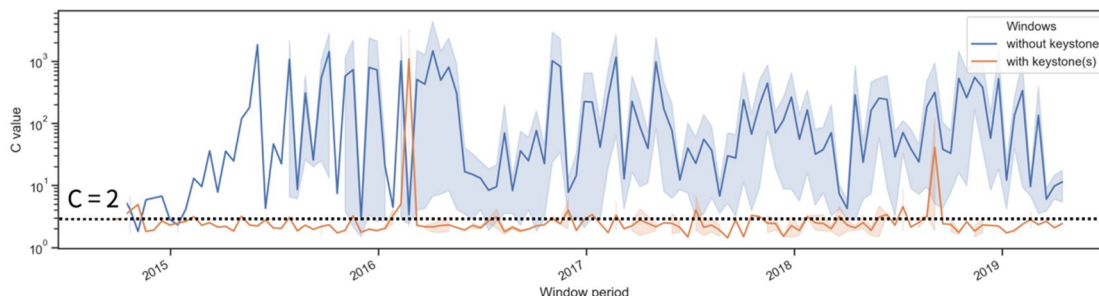


図4 青線：C値の時間変化、赤線：キーストーン種を含むネットワークのC値

ティビティを大きく沈静化するトピックを指す。コミュニティの活性度とキーストーン種の間を分析すると、キーストーン種が存在するコミュニティほど、新しいトピックをコミュニティの中に取り入れ、古いトピックほどアクセスされなくなるような機構が働いており、コミュニティの「新陳代謝」がよい傾向があることが分かった(図5)。

生物界になぜキーストーン種が出現するのか、その理由は明らかになっていない。しかし、本

研究の結果から、キーストーン種が不安定性を増す装置として働くことで、自分自身をアップデートすることができる機能を獲得しているという可能性が示唆される。過剰に安定したシステムは、それゆえに新しいものが生まれず、そのままでは多様性が損なわれてしまうため、大きな変化が起きたときに生態系そのものが壊れる危険性が高い。キーストーン種のような自分自身をアップデートするよ

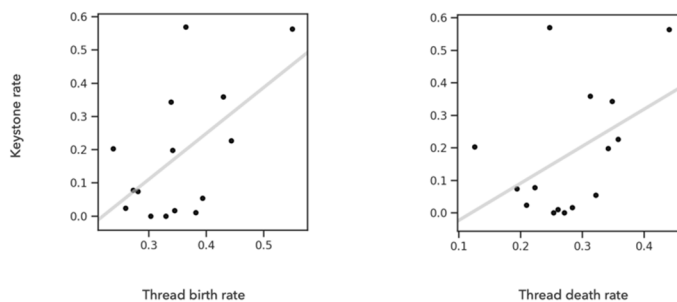


図5 キーストーン率とトピック生成率&死亡率の関係

うな機構を内在していることは、システムの適応性を高める可能性を示している。

本研究では、オンラインのコミュニケーションにおいても臨界状態が存在することが明らかとなった。また、ネットワークの臨界状態にあるときは、キーストーン種的な振る舞いをするノードが出現することが明らかとなった。今後は、システムの安定的な成長とネットワークの状態およびキーストーン種との関係に着目した分析を試みる予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sato, K., Oka, M., Barrat, A. et al	4. 巻 10
2. 論文標題 Predicting partially observed processes on temporal networks by Dynamics-Aware Node Embeddings (DyANE)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 EPJ Data Sci.	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1140/epjds/s13688-021-00277-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Nishikawa Yoshimasa, Oka Mizuki, Hashimoto Yasuhiro, Ikegami Takashi	4. 巻 34
2. 論文標題 Analysis and Modeling of Social Tagging Using Yule-Simon Process	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 C~IC3_1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1527/tjsai.C-IC3	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 Ikegami Takashi, Hashimoto Yasuhiro, Oka Mizuki	4. 巻 25
2. 論文標題 Open-Ended Evolution and a Mechanism of Novelties in Web Services	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Artificial Life	6. 最初と最後の頁 168~177
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1162/artl_a_00287	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Palin Choviwatana, Shota Ejima, Mizuki Oka, Takashi Ikegami
2. 発表標題 Web as an Evolutionary Ecosystem: Emergence of Keystone Species
3. 学会等名 The 2020 Conference on Artificial Life（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shota Ejima, Mizuki Oka, Takashi Ikegami
2. 発表標題 Concept of Keystone Species in Web Systems: Identifying Small Yet Influential Online Bulletin Board Threads
3. 学会等名 Proc. of the 11th ACM Conference on Web Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mizuki Oka
2. 発表標題 Exploring online social ecosystems through bio-inspired perspectives
3. 学会等名 AROB/ISBC/SWARM2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 岡瑞起	4. 発行年 2022年
2. 出版社 ビー・エヌ・エヌ	5. 総ページ数 240
3. 書名 ALIFE   人工生命 より生命的なAIへ	

〔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
研究 分担者	池上 高志  (Ikegami Takashi)  (10211715)	東京大学・大学院総合文化研究科・教授   (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	橋本 康弘  (Hashimoto Yasuhiro)  (10376494)	会津大学・コンピュータ理工学部・上級准教授    (21602)	
研究 分 担 者	C H E N D O M I N I Q U E  (Dominique Chen)  (50801784)	早稲田大学・文学学院・准教授    (32689)	

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