

修士論文

オンライン社会ネットワークの  
ユーザダイナミクスに現れる  
低周波スペクトルの研究

18860614 長谷 航一

指導教員 會田 雅樹 教授

2020 年 2 月

首都大学東京大学院 システムデザイン研究科 情報科学域



# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
第 2 章	ネット炎上の工学的モデル	3
2.1	Laplacian 行列	3
2.2	対称化可能グラフ上の振動モデル	5
2.3	一般の有向グラフ上の振動モデル	8
第 3 章	ネット炎上の対策技術	11
3.1	ネットワーク上の減衰振動	11
3.2	ネットワークモデルおよびネット炎上のシミュレーション	12
3.3	減衰係数の調整	15
第 4 章	ネット炎上の予兆検出	19
4.1	低周波のうなり出現のメカニズム	19
4.2	低周波のうなりの振幅増大のメカニズム	21
第 5 章	SNS の実データのスペクトル分析	23
5.1	2ch におけるスペクトル分析	23
5.2	Google Trends におけるスペクトル分析	30
第 6 章	結論	40
	謝辞	41
	参考文献	42

# 目次

2.1	有向グラフにおける Laplacian 行列, 隣接行列, 次数行列の例 . . . . .	4
2.2	対称化可能グラフの対称化の例 . . . . .	5
3.1	作成した行列 $M^{-1}$ , 無向グラフ, 対称化可能グラフ . . . . .	13
3.2	作成した対称化可能グラフ, 一方向リンクグラフ, 一般の有向グラフ . . . . .	13
3.3	異なる $\epsilon$ において作成したグラフにおけるノード 1 の状態量の経時変化 . . . . .	15
3.4	固有値に複素数が含まれる ( $\epsilon = 1.66$ として作成した) グラフにおいて, $\gamma = 0.01$ として振動を起こしたときのノード 1 の状態量の経時変化 . . . . .	16
3.5	固有値に複素数が含まれる ( $\epsilon = 1.66$ として作成した) グラフにおいて, $\gamma = 0.02$ として振動を起こしたときのノード 1 の状態量の経時変化 . . . . .	17
3.6	固有値に複素数が含まれる ( $\epsilon = 1.66$ として作成した) グラフにおいて, $\gamma = 0.03$ として振動を起こしたときのノード 1 の状態量の経時変化 . . . . .	17
3.7	固有値に複素数が含まれる ( $\epsilon = 1.66$ として作成した) グラフにおいて, $\gamma = 0.04$ として振動を起こしたときのノード 1 の状態量の経時変化 . . . . .	18
4.1	$\epsilon$ の増加に伴う固有方程式の解の変化 . . . . .	20
4.2	$\mathbf{y}(0)$ を異なる座標軸で展開した時の目盛りの値の変化 . . . . .	21
4.3	$\epsilon$ と $a_\mu(0)$ の関係 . . . . .	22
5.1	韓国の経済動向に関するスレッドにおける 1 日ごとの投稿数 . . . . .	24
5.2	韓国の経済動向に関するスレッドについて, 投稿数が多い区間 (左) と少ない区間 (右) における, それぞれの 16 分ごとの投稿数 . . . . .	25
5.3	韓国の経済動向に関するスレッドにおける 2 つの区間の FFT の結果 . . . . .	25
5.4	韓国の経済動向に関するスレッドにおけるスペクトル分布の幅 10 の移動平均 . . . . .	26
5.5	日本の株市場に関するスレッドにおける 1 日ごとの投稿数 . . . . .	27
5.6	日本の株市場に関するスレッドについて, 投稿数が多い区間 (左) と少ない区間 (右) における, それぞれの 16 分ごとの投稿数 . . . . .	27

5.7	日本の株市場に関するスレッドにおけるスペクトル分布の幅 10 の移動平均 .	28
5.8	広島東洋カープに関するスレッドにおける 1 日ごとの投稿数 . . . . .	29
5.9	広島東洋カープに関するスレッドについて, 投稿数が多い区間 (左) と少ない 区間 (右) における, それぞれの 16 分ごとの投稿数 . . . . .	29
5.10	広島東洋カープに関するスレッドにおけるスペクトル分布の幅 10 の移動平均	30
5.11	甲子園に関する関心の度合いの推移 . . . . .	32
5.12	甲子園に関する関心の度合いのスペクトル分布の幅 50 の移動平均 . . . . .	32
5.13	7pay に関する関心の度合いの推移 . . . . .	33
5.14	7pay に関する関心の度合いのスペクトル分布の幅 30 の移動平均 . . . . .	33
5.15	福岡ソフトバンクホークスに関する関心の度合いの推移 . . . . .	34
5.16	福岡ソフトバンクホークスに関する関心の度合いのスペクトル分布の幅 50 の 移動平均 . . . . .	34
5.17	Huawei に関する関心の度合いの推移 . . . . .	35
5.18	Huawei に関する関心の度合いのスペクトル分布の幅 30 の移動平均 . . . . .	35
5.19	夏に対する関心の度合いの推移 (左) と振動モードの幅 50 の移動平均 (右) .	36
5.20	大谷翔平に関する関心の度合いの推移 . . . . .	37
5.21	大谷翔平に関する関心の度合いのスペクトル分布の幅 50 の移動平均 . . . . .	37
5.22	横浜 DeNA ベイスターズに関する関心の度合いの推移 . . . . .	38
5.23	横浜 DeNA ベイスターズに関する関心の度合いのスペクトル分布の幅 30 の 移動平均 . . . . .	38
5.24	One Direction に関する関心の度合いの推移 . . . . .	39
5.25	One Direction に関する関心の度合いのスペクトル分布の幅 30 の移動平均 .	39

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究背景

近年，オンライン社会ネットワークの発展により，現実世界における社会活動の利便性が向上し，個人のコミュニケーションが活性化された．また，オンライン社会ネットワーク上のサービスとして，Facebook や Twitter に代表される Social Networking Service (SNS) が急速に普及し，SNS における活動と実社会での出来事の関係に関する研究が行われている．例えば，Facebook 上で選挙に関する情報を流布することによる投票率の変化に関する研究 [1] や，Twitter でのユーザーの投稿を集めることによる映画の興行収入の予測 [2] により，SNS 上での活動が実社会での活動に影響を与えることが示されている．また，SNS の中で広がりやすい投稿の分析 [3] や，どのような人間が影響力を持つのか調べる研究 [4] が行われており，マーケティングなどへの応用が期待されている [5, 6]．このように，オンライン社会ネットワーク上での活動は実世界に様々な影響を与えるので，SNS におけるユーザーの行動特性に関する研究も行われている [7, 8]．

しかし，オンライン社会ネットワーク上での活動が現実世界に与える影響が必ずしも良いものであるとは限らない．例えば，ネット炎上のような爆発的なユーザーダイナミクスはオンラインコミュニティだけでなく，現実世界の社会活動にも悪影響を及ぼす [9]–[13]．したがって，オンライン社会ネットワーク上で爆発的なダイナミクスが発生する原因を理解し，対策技術を考案することが必要である．

ネットワークの定量的な分析方法として，ネットワーク構造を行列で表現するスペクトルグラフ理論が知られている [14]–[16]．さらに近年，ネットワーク上のダイナミクスを工学的に分析する振動モデル [17]–[19] が考案されており，これに基づけば，ネット炎上のような爆発的なダイナミクスが発生する原因を理解することができる．振動モデルに基づく既存のネット炎上の対策技術として，ネットワーク内の有向リンクの構造を変更することによりネットワークの Laplacian 行列の固有値を全て実数にする方法が考案されている [20, 21]．既存の対策技術

を施すためにはネットワークのリンク構造を正確に分析する必要がある。そこで、ネットワークの構造を推定するために、ネットワーク構造を表す行列の固有値、固有ベクトルを推定する方法としてネットワーク共鳴法 [22]–[24] や圧縮センシング [25, 26] の利用が図られてきたが、必ずしも全ての固有値と固有ベクトルが正確に推定できるとは限らない、従って、ネットワークの構造を正確に知ることは容易ではなく、既存の対策技術を運用することは難しい。そこで、ネットワークの構造を完全に把握できていない状況でも、炎上の発生を未然に防ぐことが可能な新しいネット炎上対策技術が必要であると考えられる。

## 1.2 研究目的

振動モデルには、減衰係数という値が取り入れられている。この値はネットワークの構造によって決定するものではなく、単に振動の抵抗力として与えられた定数であり、オンライン社会ネットワークにおいては、なんらかの話題に関してユーザーが興味を失う際の減衰率に相当する。もし、減衰係数を利用して炎上を抑制できることが示せれば、ネットワークの構造が把握できない状況でも適応なネット炎上の対策技術として利用することができる。

また、ネット炎上の発生を未然に防ぐためには、炎上の予兆を観測し、事前に対策技術を講じることが望ましい。振動モデルによると、ネット炎上が発生する原因はネットワークの Laplacian 行列の固有値に複素数が現れることである。ネット炎上が発生していないネットワークを通常状態のネットワークであるとすると、なんらかの作用によりユーザーの活動が活性化するにつれてネットワークのリンク構造が変化し、ネットワークの Laplacian 行列の固有値に複素数が現れるところで炎上が発生することになる。この通常状態のネットワークから、構造が変化していく段階で、振動の中に「低周波のうなり」が観測される。これが普遍的に見られる現象であることが説明できれば、ネット炎上の予兆として利用することができる。以上のことから、本研究では、減衰係数によってネット炎上を防止する方法と、炎上の予兆として低周波のうなりが観測されることを示すことを目的とする。

本論文の構成は以下の通りである。第2章では、文献 [17, 19] に基づき、オンライン社会ネットワーク上のユーザダイナミクスを記述する振動モデルについて解説する。第3章では、ネットワークモデルを導入し、減衰係数の値を変化させることによりネット炎上を防止できることを示す。第4章では、振動モデルに基づき、ネット炎上の予兆として振動の中に低周波のうなりと振幅の増大が観測されることを理論的に解説する。第5章では、振動モデルによる理論的説明の妥当性を検証するために、実際にオンライン社会ネットワーク上の時系列データに対して周波数解析を行う。第6章では、結論とまとめを述べる。

## 第2章

# ネット炎上の工学的モデル

本章では，文献 [14]–[16] に基づき，ネットワークを Laplacian 行列を用いてグラフ化する方法について述べる．さらに，文献 [17, 19] に基づき，Laplacian 行列を分解する方法について述べたのちにネットワーク上の人々のアクティビティについて記述する振動モデルについて解説し，ネット炎上の定義を述べる．

### 2.1 Laplacian 行列

$n$  個のノードから成る有向グラフ  $G = G(V, E)$  を考える．ここで， $V$  はノードの集合であり， $E$  はリンクの集合である．また，リンクに向きがあるグラフを有向グラフ，向きが無いグラフ無向グラフという．無向グラフの場合，ノード  $i, j$  間にリンクがあるとき，ノード  $j$  はノード  $i$  の隣接ノードであるという．有向グラフの場合， $i \rightarrow j$  にリンクが張られているとき，ノード  $j$  はノード  $i$  の隣接ノードであるという．ノード  $i$  からノード  $j$  に繋がるリンク  $(i \rightarrow j) \in E$  の重みを  $w_{ij}$  とし，グラフ  $G(V, E)$  の  $n \times n$  の隣接行列  $\mathbf{A} := [A_{ij}]$  を以下のように定義する．

$$A_{ij} := \begin{cases} w_{ij}, & (i \rightarrow j) \in E \\ 0, & (i \rightarrow j) \notin E \end{cases} \quad (2.1)$$

次に，ノード  $i$  から出るリンクの本数を次数と呼び，グラフ  $G = (V, E)$  の  $n \times n$  の次数行列  $\mathbf{D} := [D_{ij}]$  を以下のように定義する．

$$D_{ij} := \begin{cases} d_i, & \text{if } i = j \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.2)$$

ここで， $d_i$  は以下のように定義される．

$$d_i := \sum_{j \in \partial i} w_{ij} \quad (2.3)$$



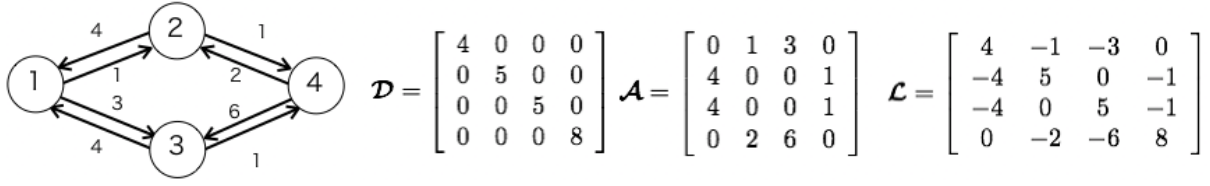


図 2.1. 有向グラフにおける Laplacian 行列, 隣接行列, 次数行列の例

ここで,  $\partial_i$  はノード  $i$  に隣接するノードの集合のことである. このとき, グラフ  $G = (V, E)$  の  $n \times n$  の Laplacian 行列  $\mathcal{L}$  を以下のように定義する.

$$\mathcal{L} := \mathcal{D} - \mathcal{A} \quad (2.4)$$

有向グラフにおける  $\mathcal{L}$ ,  $\mathcal{D}$ ,  $\mathcal{A}$  の例を図 2.1 に挙げる.

有向グラフの Laplacian 行列は一般に非対称行列であるが, 数学的に分析が容易なのは対象行列である. しかし, 特別な条件を持つ Laplacian 行列は, それ自体が対称行列でなくても対称行列を用いて分析することができる. 一般の有向グラフの Laplacian 行列  $\mathcal{L}$  が必ず固有値 0 を持つことは, 全ての行においてその行和が 0 になることから明らかである. ここで,  $\mathcal{L}$  の固有値 0 に対応する左固有ベクトルを  ${}^t\mathbf{m} = (m_1, \dots, m_n)$  とする. グラフの全てのノードが隣接ノード  $i-j$  間において,

$$m_i w_{ij} = m_j w_{ji} \quad (2.5)$$

を満たしているならば, リンクの重みを  $k_{ij} := m_i w_{ij}$  に書き換えることにより  $k_{ij} = k_{ji}$  が成立する. すなわち, リンクを対称化することができる. 以降, この条件を満たすグラフのことを対称化可能グラフと呼び, その Laplacian 行列は,  $\mathcal{L}_0$  と表記する. 対称化可能グラフのリンクの重みを,  $k_{ij} = m_i w_{ij}$  に書き換えてできた無向グラフの Laplacian 行列を  $\mathbf{L}$  とし, 行列  $\mathbf{M} := \text{diag}(m_1, \dots, m_n)$  とすると,

$$\mathcal{L}_0 = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{L} \quad (2.6)$$

となる. 対称化可能グラフを対称化 (無向グラフに変換) した例を図 2.2 に示す.

次に, Scaled Laplacian 行列  $\mathbf{S}_0$  を以下のように定義する.

$$\mathbf{S}_0 := \mathbf{M}^{+1/2} \mathcal{L}_0 \mathbf{M}^{-1/2} \quad (2.7)$$

式 (2.7) に式 (2.6) を代入すると,

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_0 &= \mathbf{M}^{+1/2} \mathbf{M}^{-1} \mathbf{L} \mathbf{M}^{-1/2} \\ &= \mathbf{M}^{-1/2} \mathbf{L} \mathbf{M}^{-1/2} \end{aligned} \quad (2.8)$$

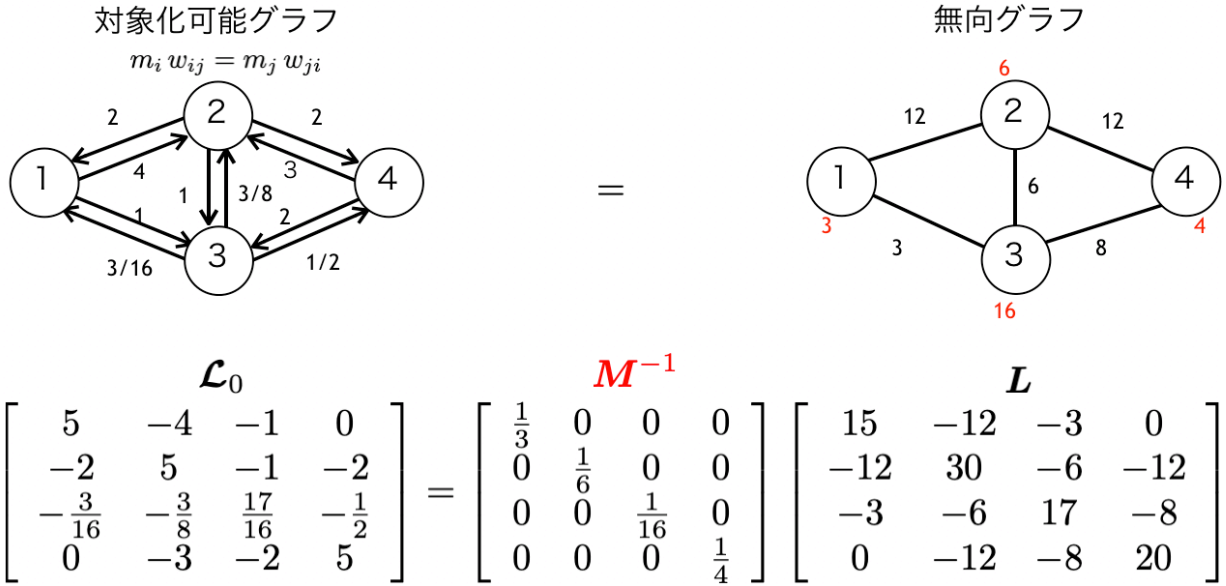


図 2.2. 対象化可能グラフの対称化の例

となる．ここで，行列  $\mathcal{L}_0$  の固有方程式  $\mathcal{L}_0 \mathbf{x} = \lambda \mathbf{x}$  に  $M^{+1/2}$  を左からかけると，

$$\begin{aligned}
 M^{+1/2} \mathcal{L}_0 \mathbf{x} &= M^{+1/2} \lambda \mathbf{x} \\
 M^{+1/2} \mathcal{L}_0 M^{-1/2} M^{+1/2} \mathbf{x} &= \lambda M^{+1/2} \mathbf{x} \\
 S_0(M^{+1/2} \mathbf{x}) &= \lambda(M^{+1/2} \mathbf{x})
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

となるので， $\mathcal{L}_0$  と  $S_0$  は同じ固有値を持ち，その固有ベクトルは  $M^{+1/2}$  の因子で変換できることがわかる．したがって，グラフが対称化可能であるという条件のもとでは，元の有向グラフを対称行列  $S_0$  で分析することができる．

## 2.2 対称化可能グラフ上の振動モデル

時刻  $t$  におけるノード  $i$  の状態を表す量を  $x_i(t)$  とする．ここで，隣接ノード  $i, j$  間には互いの状態量が等しくなるように復元力が働くものとする，ノード  $i$  に対して隣接ノード  $j$  から働く力の大きさは，ノードの状態量の差  $\Delta x = x_i(t) - x_j(t)$  の関数であるとする．このとき， $\Delta x = 0$  なら  $f(\Delta x) = 0$  であり， $f(\Delta x)$  は  $\Delta x$  の単調増加関数であると仮定する．このとき， $f(\Delta x)$  をテイラー展開すると，

$$\begin{aligned}
 f(\Delta x) &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(0)}{n!} (\Delta x)^n \\
 &= f'(0) \Delta x + O((\Delta x)^2) \\
 &= -w_{ij} \Delta x + O((\Delta x)^2)
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

となる．ここで， $w_{ij} > 0$  であり， $w_{ij} \neq w_{ji}$  であって良い．もしノード間の状態量が等しい場合，ノード間で影響がないと考えるのは自然である．もしノード間の状態量に差がある場合，その差が大きいほど安定状態に向かう方向に大きな復元力が働くことも自然である．状態量の比によって復元力が働くような場合であったとしても，対数を取ることで差として考えることができるようになる．復元力の大きさが状態量の差に関するいかなる関数型であっても，安定状態の回りでテイラー展開すれば，第一次の近似に「状態量の差」に比例した復元力が出現する．従って，ノード  $i$  に対してノード  $j$  から復元力

$$-w_{ij}(x_i(t) - x_j(t)) \quad (2.11)$$

が働くモデルは，多くのモデルが共通して含む特性を記述する基本的で自然なモデルであると言える [19]．

このモデルをもとに，対称化可能グラフにおけるユーザダイナミクスを考える．対称化可能グラフ上のユーザー  $i$  が，式 (2.11) で与えられる力を隣接ノードから受けるものとする．ユーザー  $i$  のすべての隣接ノードからの力を考慮すると， $x_i(t)$  の運動方程式は以下のようにかける．

$$\frac{d^2}{dt^2}x_i(t) = -\sum_{j \in \partial i} w_{ij}(x_i(t) - x_j(t)) \quad (2.12)$$

ここで，すべてのユーザーの状態量を縦に並べたベクトルを  $\mathbf{x}(t)$  として，すべてのノードの状態量について書き換えると，

$$\frac{d^2\mathbf{x}(t)}{dt^2} = -\mathcal{L}_0 \mathbf{x}(t) \quad (2.13)$$

となり，運動方程式は Laplacian 行列で表すことができる．

式 (2.13) の両辺に  $M^{+1/2}$  を左からかけると，

$$\begin{aligned} M^{\frac{1}{2}} \frac{d^2\mathbf{x}(t)}{dt^2} &= -M^{\frac{1}{2}} \mathcal{L}_0 \mathbf{x}(t) \\ &= -(M^{\frac{1}{2}} \mathcal{L}_0 M^{-\frac{1}{2}}) M^{\frac{1}{2}} \mathbf{x}(t) \\ &= -\mathbf{S}_0 M^{\frac{1}{2}} \mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (2.14)$$

となる．ここで，以下を定義する．

$$\mathbf{y}(t) := M^{\frac{1}{2}} \mathbf{x}(t) \quad (2.15)$$

すると，運動方程式 (2.14) は，

$$\frac{d^2\mathbf{y}(t)}{dt^2} = -\mathbf{S}_0 \mathbf{y}(t) \quad (2.16)$$

と書け, 対称行列  $\mathbf{S}_0$  で分析できるようになる. ここで,  $\mathbf{S}_0$  の固有値を  $\lambda_\mu$  ( $\mu = 0, 1, \dots, n-1$ ) とする.  $\lambda_\mu$  に属する固有ベクトル  $\mathbf{v}_\mu$  は, 固有基底を張るように選ぶことができる.  $\mathbf{y}(t)$  を固有基底で展開すると,

$$\mathbf{y}(t) = \sum_{\mu=0}^{n-1} a_\mu \mathbf{v}_\mu \quad (2.17)$$

となり, 式 (2.17) を式 (2.16) に代入すると,

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \mathbf{y}(t)}{dt^2} &= -\mathbf{S}_0 \sum_{\mu=0}^{n-1} a_\mu(t) \mathbf{v}_\mu \\ &= -\sum_{\mu=0}^{n-1} \mathbf{S}_0 \mathbf{v}_\mu a_\mu(t) \\ &= -\sum_{\mu=0}^{n-1} \lambda_\mu \mathbf{v}_\mu a_\mu(t) \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\Leftrightarrow \frac{d^2 \sum_{\mu=0}^{n-1} a_\mu(t) \mathbf{v}_\mu}{dt^2} = -\sum_{\mu=0}^{n-1} \lambda_\mu \mathbf{v}_\mu a_\mu(t) \quad (2.19)$$

と書ける.

式 (2.19) について  $\mathbf{v}_\nu$  との内積をとることにより, 展開係数 (振動モード) ごとの運動方程式を抜き出す.  $\mathbf{v}_\mu \cdot \mathbf{v}_\nu = \delta_{\mu\nu}$  より,

$$\frac{d^2 a_\mu(t)}{dt^2} = -\lambda_\mu a_\mu(t) \quad (2.20)$$

となる. ただし,

$$\delta_{\mu\nu} = \begin{cases} 1, & \text{if } \mu = \nu \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.21)$$

である.

次に, この振動モード毎の運動方程式の解を解く. 形式的な解は以下のように書くことができる.

$$a_\mu(t) = c_1 e^{c_2 t} \quad (2.22)$$

ここで,  $c_1 = a_\mu(0)$  である.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 a_\mu(t)}{dt^2} &= \frac{d}{dt} (c_1 c_2 e^{c_2 t}) \\ &= c_1 c_2^2 e^{c_2 t} \\ &= c_2^2 a_\mu(t) \end{aligned} \quad (2.23)$$

であり，式 (2.20) と式 (2.23) より，

$$\begin{aligned} c_2^2 a_\mu(t) &= -\lambda_\mu a_\mu(t) \\ (\lambda_\mu + c_2^2) a_\mu(t) &= 0 \\ (\lambda_\mu + c_2^2) c_1 e^{c_2 t} &= 0 \end{aligned} \quad (2.24)$$

が得られる．ここで，

$$\begin{aligned} (\lambda_\mu + c_2^2) &= 0 \\ \Leftrightarrow c_2 &= \pm i \sqrt{\lambda_\mu} \end{aligned} \quad (2.25)$$

とすれば，式 (2.22) はいかなる  $t, c_1$  においても式 (2.20) を満足する． $\omega_\mu = \sqrt{\lambda_\mu}$ ， $(\mu = 0, 1, \dots, n-1)$  とすると，

$$a_\mu(t) = a_\mu(0) e^{\pm i \omega_\mu t} \quad (2.26)$$

となる．一般解は， $c_\mu^+$ ， $c_\mu^-$  を振動モードごとに決まる定数として， $e^{+i \omega_\mu t}$  と  $e^{-i \omega_\mu t}$  の線型結合で以下のように書くことができる．

$$a_\mu(t) = c_\mu^+ e^{+i \omega_\mu t} + c_\mu^- e^{-i \omega_\mu t} \quad (2.27)$$

## 2.3 一般の有向グラフ上の振動モデル

前節では，対称化可能グラフ上での振動モデルについて考えた．本節では，対称化可能とは限らない一般の有向グラフに拡張した振動モデルについて考える．

一般の有向グラフ上のノードの状態ベクトルの運動方程式は，

$$\frac{d^2 \mathbf{x}(t)}{dt^2} = -\mathcal{L} \mathbf{x}(t) \quad (2.28)$$

と書ける．式 (2.28) に  $\mathbf{x}(t) = \mathbf{M}^{-1/2} \mathbf{y}(t)$  を代入すると，

$$\mathbf{M}^{-1/2} \frac{d^2 \mathbf{y}(t)}{dt^2} = -\mathcal{L} \mathbf{M}^{-1/2} \mathbf{y}(t) \quad (2.29)$$

となり，式 (2.29) に左から  $\mathbf{M}^{1/2}$  をかけると，

$$\frac{d^2 \mathbf{y}(t)}{dt^2} = -\mathbf{M}^{1/2} (\mathcal{L}_0 + \mathcal{L}_I) \mathbf{M}^{-1/2} \mathbf{y}(t) = -\mathbf{M}^{1/2} \mathcal{L} \mathbf{M}^{-1/2} \mathbf{y}(t) \quad (2.30)$$

となる．さらに，

$$\mathbf{M}^{1/2} \mathcal{L} \mathbf{M}^{-1/2} = \mathbf{S}$$

として、 $\mathbf{S}$  を式 (2.30) に代入すると、

$$\frac{d^2 \mathbf{y}(t)}{dt^2} = -(\mathbf{S}_0 + \mathbf{S}_I) \mathbf{y}(t) = -\mathbf{S} \mathbf{y}(t) \quad (2.31)$$

となる。

時刻  $t$  におけるノード  $i$  とノード  $j$  の加速度はそれぞれ

$$\frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} = -w_{ij}(x_i(t) - x_j(t)) \quad (2.32)$$

$$\frac{d^2 x_j(t)}{dt^2} = w_{ji}(x_j(t) - x_i(t)) \quad (2.33)$$

となり、式 (2.32) に  $m_i$  を、式 (2.33) に  $m_j$  をかけると、

$$m_i \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} = -m_i w_{ij}(x_i(t) - x_j(t)) \quad (2.34)$$

$$m_j \frac{d^2 x_j(t)}{dt^2} = m_j w_{ji}(x_j(t) - x_i(t)) \quad (2.35)$$

となる。式 (2.34) の右辺はノード  $i$  がノード  $j$  から受ける力を、式 (2.35) の右辺はノード  $i$  がノード  $j$  に与える力を表している。このとき、リンク対称化の条件式 (2.5) が満たされているならば、式 (2.34) および式 (2.35) はそれぞれ

$$m_i \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} = -k_{ij}(x_i(t) - x_j(t)) \quad (2.36)$$

$$m_j \frac{d^2 x_j(t)}{dt^2} = k_{ij}(x_j(t) - x_i(t)) \quad (2.37)$$

となるので、ノード  $i$  がノード  $j$  から受ける力とノード  $i$  がノード  $j$  に与える力が等しくなり、ニュートンの第三法則（作用・反作用の法則）を満たすことがわかる。しかし、 $\mathbf{S}$  に対応する  $\mathcal{L}$  は、この条件を満たしていないため、ニュートンの第三法則を適さない。したがって、バネのモデルでの表現はできず、現実世界の力学的な振動には対応しない、仮想的世界の振動を扱うことになる。

行列  $\mathbf{S}$  が実対称行列でないため、運動方程式 (2.31) を解く際に、常に対角化できるとは限らないこと、固有値が実数であるとは限らないこと、固有ベクトルが直交するとは限らないことに注意する必要がある。行列  $\mathbf{S}$  の固有値を  $\bar{\lambda}_\mu (\mu = 0, 1, \dots, n-1)$  とし、固有値  $\bar{\lambda}_\mu$  に属する大きさ 1 の固有ベクトルを  $\bar{\mathbf{v}}_\mu (\mu = 0, 1, \dots, n-1)$  とする。行列  $\mathbf{S}$  が対角化できない場合は、常に以下の固有方程式が重解を持つことになる。

$$\det(\mathbf{S} - \bar{\lambda} \mathbf{I}) = 0 \quad (2.38)$$

ここで、 $\mathbf{I}$  は単位行列である。

工学では、リンクの重みの数値は有効数字の誤差範囲である。つまり、厳密に重解となる固有値が現れるとは考えにくく、固有値の重複を回避することは容易である。したがって、固有値の重複はなく、 $\mathbf{S}$  は  $n$  個の線型独立な固有ベクトルをもち、常に対角化可能と考えて良いだろう [28].

固有ベクトルが線型独立であることから、運動方程式 (2.31) の解  $\mathbf{y}(t)$  を展開すると、

$$\mathbf{y}(t) = \sum_{\mu=0}^{n-1} \bar{a}_{\mu} \bar{\mathbf{v}}_{\mu} \quad (2.39)$$

となる。式 (2.39) を式 (2.31) に代入すると、

$$\frac{d^2}{dt^2} \bar{a}_{\mu}(t) = -\bar{\lambda}_{\mu} \bar{a}_{\mu}(t) \quad (2.40)$$

となり、 $\bar{\omega}_{\mu}^2 = \bar{\lambda}$  とすると、展開係数は

$$\bar{a}_{\mu}(t) = \bar{a}_{\mu}(0) e^{\pm i \bar{\omega}_{\mu} t} \quad (2.41)$$

となる。この式は式 (2.26) と形式的には似ているが、 $\bar{\omega}_{\mu}$  が実数とは限らない点で異なっており、固有値が複素数になった場合、展開係数の値が発散することになる [28]。振動エネルギーは  $\bar{a}_{\mu}(t)$  の 2 乗に比例するので、 $\bar{a}_{\mu}(t)$  が発散すると振動エネルギーも発散する [20]。このような状態を、ネット炎上が発生した状態と定義する。

## 第3章

# ネット炎上の対策技術

本章では，文献 [20] に基づき，振動モデルに抵抗力となる値である減衰係数を加えた減衰振動モデルについて考える．続いて，ネットワーク上で振動を起こし，ネット炎上が発生する条件を確認する．最後に，振動の中で減衰係数を少しずつ大きくて与え，ネット炎上の発生を防ぐことができることを示す [40, 41].

### 3.1 ネットワーク上の減衰振動

第2章で述べた振動モデルは，抵抗力を考えないものであった．抵抗力を受けないということは，ノードは振動し続けるということになる．しかし，実際のオンライン社会ネットワーク上でそのような現象が起きるとは考えにくい．なぜなら，現実世界では情報の新鮮さが薄れることによりユーザーが飽きることが考えられるからである．したがって，振動モデルにおいてユーザーの情報に対する「飽き」に対応する抵抗力を取り入れる必要がある．本節では，減衰係数を考慮した運動方程式とネット炎上が発生する条件について考える．

一般の有向グラフの運動方程式に，速度に比例する減衰係数  $\gamma$  を加えた運動方程式は，以下のように書くことができる．

$$\frac{d^2 \mathbf{x}(t)}{dt^2} + \gamma \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = -\mathcal{L} \mathbf{x}(t) \quad (3.1)$$

式 (3.1) を，2.3 節と同様に  $\mathbf{y}(t) = \mathbf{M}^{+1/2} \mathbf{x}(t)$  として行列  $\mathbf{S} := \mathbf{M}^{+1/2} \mathcal{L} \mathbf{M}^{-1/2}$  で記述すると以下のようにかける．

$$\frac{d^2 \mathbf{y}(t)}{dt^2} + \gamma \frac{d\mathbf{y}(t)}{dt} = -\mathbf{S} \mathbf{y}(t) \quad (3.2)$$

2.3 節と同様に，解を一次独立な固有ベクトルで展開することにより，式 (2.39) を得ることが



できるので、解を式 (2.39) によって展開して振動モード毎の運動方程式に書き直すと、

$$\frac{d^2}{dt^2}\bar{a}_\mu(t) + \gamma\frac{d}{dt}\bar{a}_\mu(t) = -\lambda_\mu\bar{a}_\mu(t) \quad (3.3)$$

となる。ここで、固有値が複素数になる可能性があることに注意し、以下の量を極表示する。

$$r_\mu e^{i\theta_\mu} := \bar{\lambda}_\mu - (\gamma/2)^2 \quad (3.4)$$

すると、 $\bar{a}_\mu(t)$  は

$$\bar{a}_\mu(t) = \bar{a}_\mu(0)e^{-\frac{\gamma}{2}t}e^{\pm i\sqrt{r_\mu}t}e^{\frac{i\theta_\mu}{2}t} \quad (3.5)$$

とかける。ここで、オイラーの公式より、

$$\begin{aligned} \sqrt{r_\mu}e^{\frac{i\theta_\mu}{2}t} &= \sqrt{r_\mu}\left(\cos\frac{\theta_\mu}{2} + i\sin\frac{\theta_\mu}{2}\right) \\ &= \sqrt{r_\mu}\cos\frac{\theta_\mu}{2} + i\sqrt{r_\mu}\sin\frac{\theta_\mu}{2} \end{aligned} \quad (3.6)$$

となるので、式 (3.5) に式 (3.6) を代入すると、

$$\begin{aligned} \bar{a}_\mu(t) &= \bar{a}_\mu(0)e^{-\frac{\gamma}{2}t}e^{\pm i\sqrt{r_\mu}\left(\cos\frac{\theta_\mu}{2} + i\sin\frac{\theta_\mu}{2}\right)t} \\ &= \bar{a}_\mu(0)e^{-\left(\frac{\gamma}{2} \pm \sqrt{r_\mu}\sin\frac{\theta_\mu}{2}\right)t}e^{\left(\pm i\sqrt{r_\mu}\cos\frac{\theta_\mu}{2}\right)t} \end{aligned} \quad (3.7)$$

となる。よって、ネットワークのラプラシアン行列が固有値に複素数であるものを含み、かつ以下の条件を満たすとき、振動エネルギーが発散し、ネット炎上が発生することになる。

$$\begin{aligned} -\left(\frac{\gamma}{2} \pm \sqrt{r_\mu}\sin\frac{\theta_\mu}{2}\right) &> 0 \\ \Leftrightarrow \sqrt{r_\mu}\left|\sin\frac{\theta_\mu}{2}\right| &> \frac{\gamma}{2} \end{aligned} \quad (3.8)$$

## 3.2 ネットワークモデルおよびネット炎上のシミュレーション

本節では最初に、実験に用いるネットワークモデルを紹介する。続いて振動を起こす手順を説明する。最後に、ネットワーク上で振動を起こしネット炎上が発生する条件を確認する。

本稿では、固有値が全て実数となる対称化可能グラフに、片々一方向しかリンクを持たない一方向リンクグラフを加えることにより作成されるグラフを使用する。このとき、一方向リンクグラフのリンクの重みとしてパラメータ  $\epsilon$  を与える。この  $\epsilon$  の値を変化させることにより、作成するグラフの固有値を変化させるという仕組みである。

対称化可能グラフは、式 (2.6) で示したように、対角行列  $\mathbf{M}$  および無向グラフの Laplacian 行列  $\mathbf{L}$  をかけ合わせることで作成することができる。まず、対称化可能グラフを用意する、対

角行列  $M$  および無向グラフ  $L$  をかけあわせ，対称化可能グラフを作成する様子を図 3.1 に示す．さらに，用意した対称化可能グラフに一方向リンクグラフを足し合わせ，有向グラフが作成される様子を図 3.2 に示す．

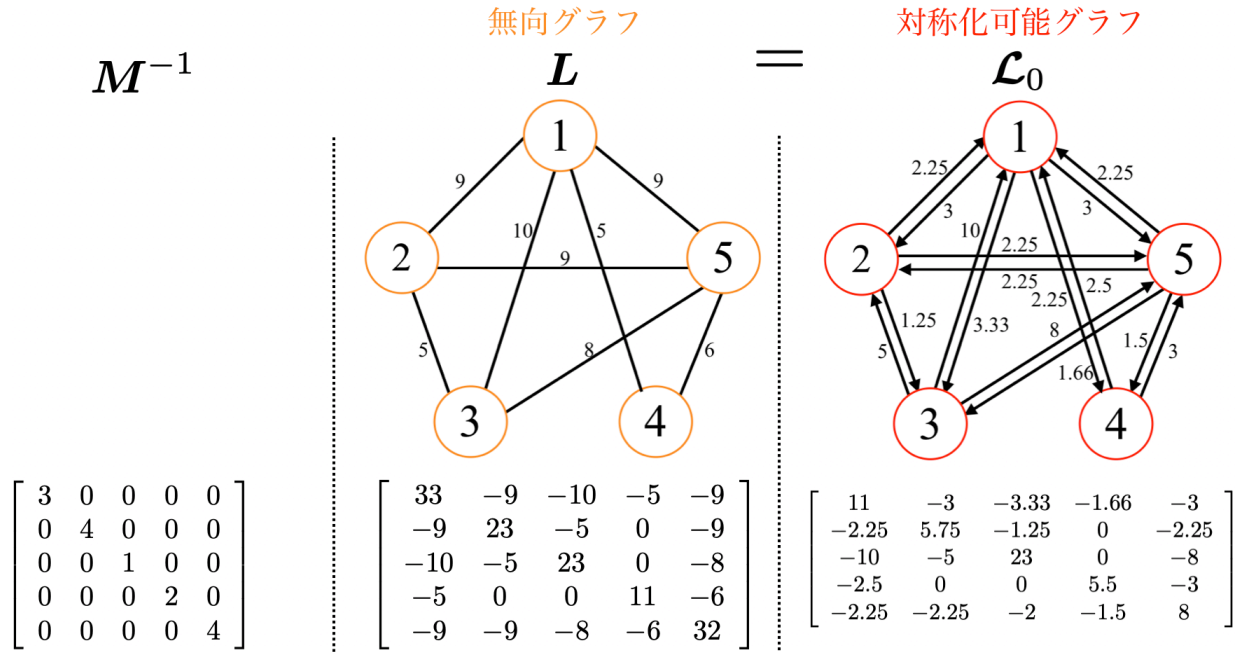


図 3.1. 作成した行列  $M^{-1}$ ，無向グラフ，対称化可能グラフ

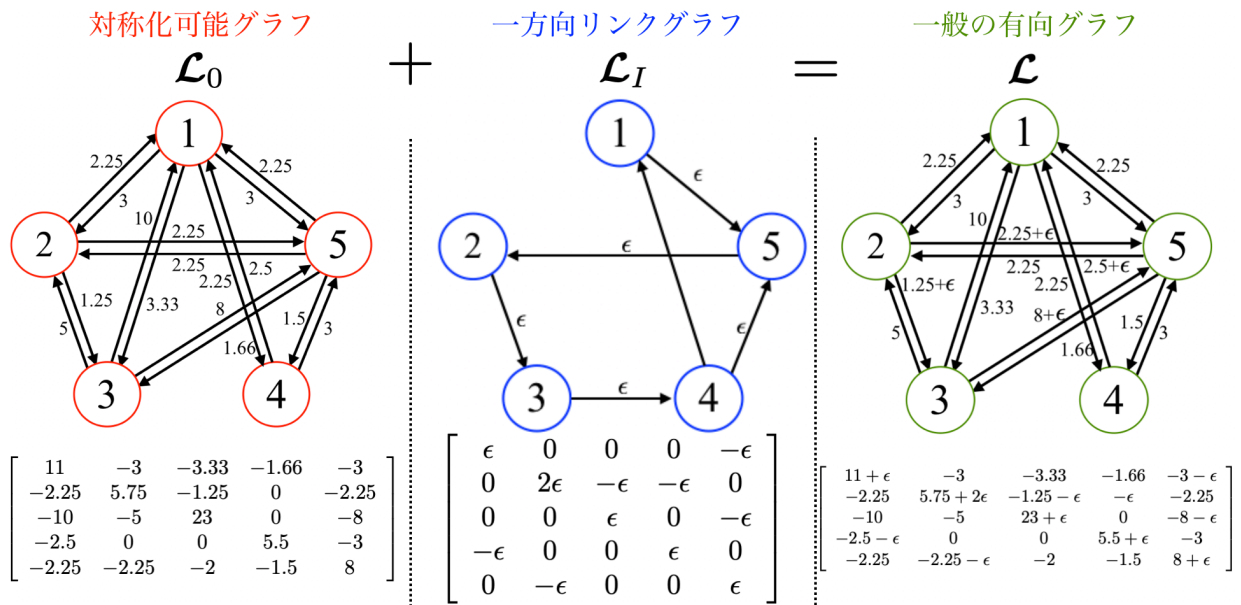


図 3.2. 作成した対称化可能グラフ，一方向リンクグラフ，一般の有向グラフ

表 3.1. パラメータ  $\epsilon$  と作成される有向グラフの固有値の関係

$\epsilon$	0	...	1.65	1.66	...
行列 $\mathcal{L}$ の 固有値	実数 のみ	実数 のみ	実数 のみ	複素数を 含む	複素数を 含む

表 3.1 に、図 3.2 において、パラメータ  $\epsilon$  の値を 0 から 0.01 ずつ大きくして与えて一般の有向グラフを作成したときの行列  $\mathcal{L}$  の固有値の関係を示す。  $\epsilon \leq 1.65$  までは固有値は全て実数であったが、  $\epsilon \geq 1.66$  において、固有値に複素数が現れた。

続いて、作成したネットワークにおいて振動を起こす方法を示す。減衰係数を導入した一般の有向グラフの運動方程式 (3.1) に基づいて、ノードの状態量を時間変化させる。式 (3.1) において、 $i$  行を取り出すと、

$$\frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} + \gamma \frac{d x_i(t)}{dt} + \{\mathcal{L} \mathbf{x}(t)\}_i = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} + \gamma \frac{d x_i(t)}{dt} + \sum_{j \in \partial i} w_{ij} \{x_i(t) - x_j(t)\} = 0 \quad (3.10)$$

となる。ただし、 $\partial i$  はノード  $i$  の隣接ノードの集合である。ここで、 $v_i(t)$  を時刻  $t$  におけるノード  $i$  の速度とし、

$$\frac{d v_i(t)}{dt} = \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} \quad (3.11)$$

として、式 (3.11) を式 (3.10) に代入すると、

$$\frac{d v_i(t)}{dt} = -\gamma \frac{d x_i(t)}{dt} - \sum_{j \in \partial i} w_{ij} \{x_i(t) - x_j(t)\} \quad (3.12)$$

となる。

$$\frac{d v_i(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v_i(t + \Delta t) - v_i(t)}{\Delta t} \quad (3.13)$$

であるから、式 (3.12) と式 (3.13) より、

$$v_i(t + \Delta t) = v_i(t) - \left( \gamma v_i(t) + \sum_{j \in \partial i} w_{ij} \{(x_i(t) - x_j(t))\} \right) \quad (3.14)$$

となり、ノードの速度を記述する式を得ることができる。  $x_i(t)$  についても同様に、

$$\frac{d x_i(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{x_i(t + \Delta t) - x_i(t)}{\Delta t} \quad (3.15)$$

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + v_i(t) \Delta t \quad (3.16)$$

とすることで、ノードの状態量を記述する式を得ることができる。グラフ上のノードに初期状態量を与え、 $\Delta t$  ごとに状態を変化させることで振動のダイナミクスを記述することができる。今後、ノードに  $x_i(0)$  及び  $v_i(0)$  を与え、 $\Delta t$  を十分小さい値に設定し、式 (3.14) 及び式 (3.16) を元にノードの状態量を変化させることにより、振動を起こす。

### 3.3 減衰係数の調整

本節ではまず、3.2 節で用意したネットワークモデルにおいて振動を起こし、固有値に複素数が含まれ、かつ減衰がない状態だとネット炎上が発生する様子を確認する。続いて、減衰係数を導入して振動を起こす。このとき、減衰係数の値を調整して振動を起こし、ネット炎上が発生しなくなる様子を示す。最後に、ネット炎上の対策技術を示す。

図 3.2 において、一方向リンクグラフのリンクの重み  $\epsilon$  の値を (0.00, 1.50, 1.65, 1.66) とし、それぞれ設定し、対称化可能グラフに足し合わせて 4 つのグラフを作成する。全てのグラフにおいて、ノードの初期状態量はノード 1 からそれぞれ (10, 2, 7, 5, 9) とし、ノードの初期速度は全て 0 として振動を起こす。それぞれのグラフにおけるノード 1 の状態量の経時変化を図 3.3 に示す。

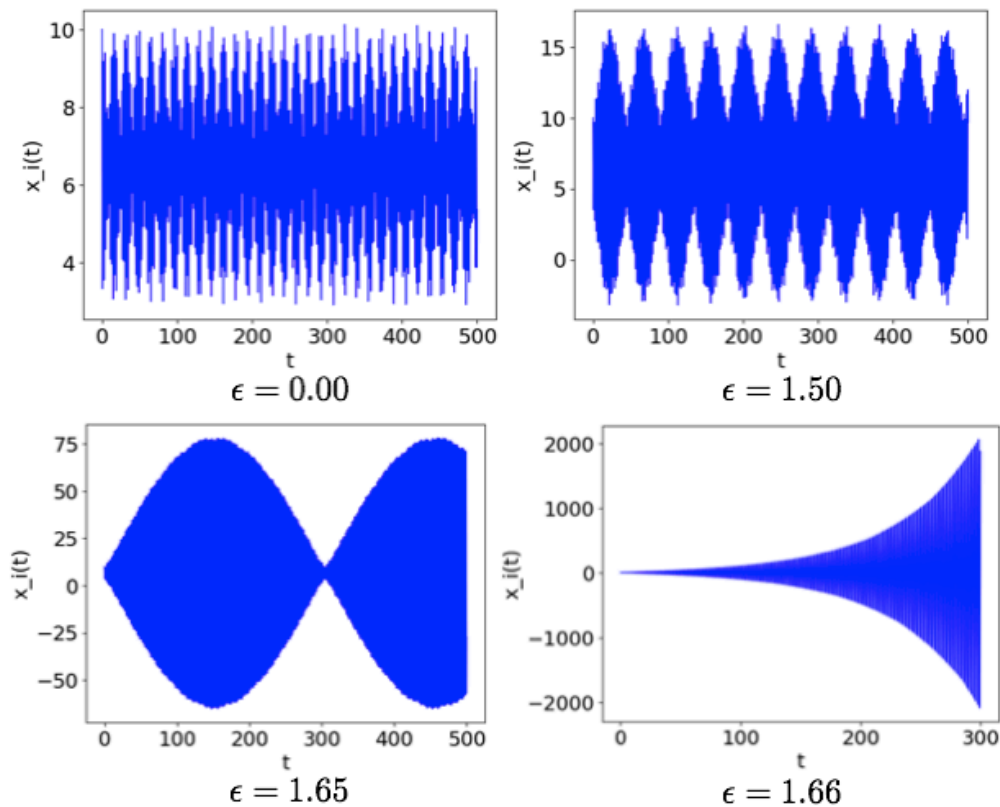


図 3.3. 異なる  $\epsilon$  において作成したグラフにおけるノード 1 の状態量の経時変化

表 3.1 で示したとおり,  $\epsilon \leq 1.65$  として作成したグラフは固有値が実数のみであり,  $\epsilon = 1.66$  として作成したグラフでは固有値に複素数が現れた. 図 3.3 の結果から,  $\epsilon = 1.66$  として作成したグラフにおいてはノードの状態量が発散し, ネット炎上が発生することが確認できる. すなわち, 固有値が実数のみであればネット炎上は発生しないが, 固有値に複素数が含まれ, かつ減衰がない状態では発生することが確認できる.

次に, 振動に減衰を取り入れる. 減衰係数を導入して式 (3.14) 及び式 (3.16) を拡張した, ノードの状態量および速度を記述する式は以下のように書ける.

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + v_i(t)\Delta t \quad (3.17)$$

$$v_i(t + \Delta t) = v_i(t) - \left( \gamma v_i(t) + \sum_{j \in \partial i} w_{ij} ((x_i(t) - x_j(t))) \right) \quad (3.18)$$

今後は, これらの式をもとにノードの状態量を変化させる.

固有値に複素数が含まれるグラフ (図 3.2 において  $\epsilon = 1.66$  として作成したグラフ) において減衰を与えて振動を起こす. 初期状態量, 初期速度は前回の実験と同じ値を与える. まず, 減衰係数  $\gamma = 0, 0.01, 0.02$  として振動を起こしたときのノード 1 の状態量の経時変化を図 3.4 および 3.5 に示す. この結果から,  $\gamma$  が大きくなるとノードの状態量の変化量が小さくなるが,  $\gamma = 0.01, 0.02$  ではノードの状態量は発散することが確認できる.

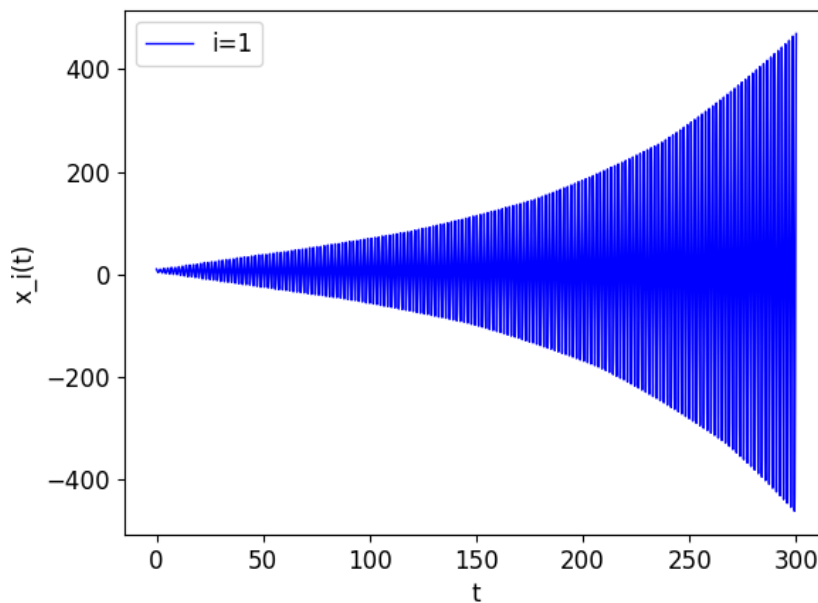


図 3.4. 固有値に複素数が含まれる ( $\epsilon = 1.66$  として作成した) グラフにおいて,  $\gamma = 0.01$  として振動を起こしたときのノード 1 の状態量の経時変化

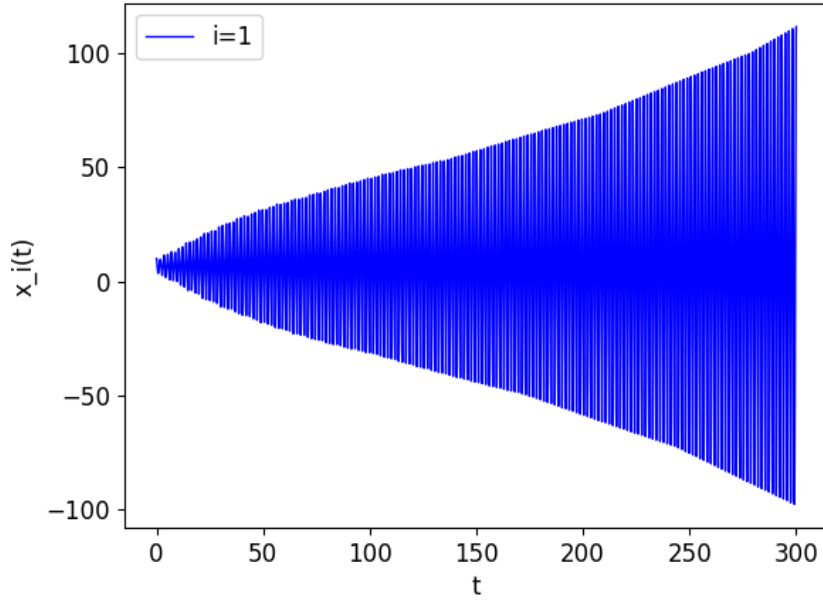


図 3.5. 固有値に複素数が含まれる ( $\epsilon = 1.66$  として作成した) グラフにおいて,  $\gamma = 0.02$  として振動を起こしたときのノード 1 の状態量の経時変化

続いて, 減衰係数  $\gamma = 0.03, 0.04$  として振動を起こしたときのノード 1 の状態量の経時変化を図 3.6 および図 3.7 に示す.

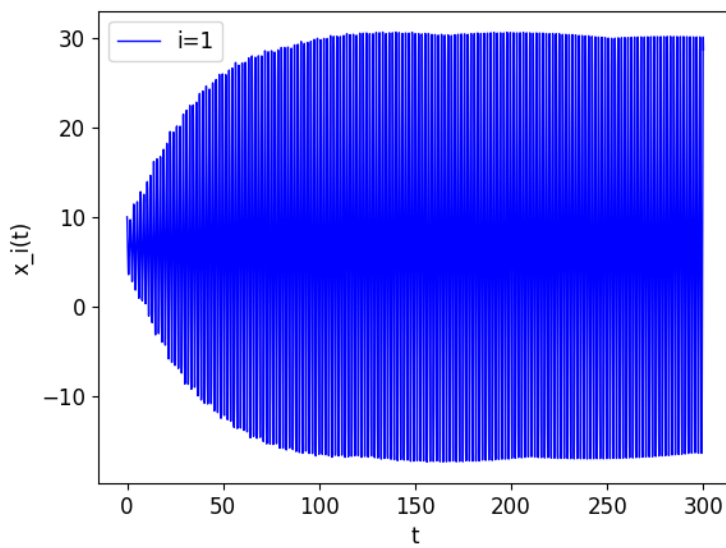


図 3.6. 固有値に複素数が含まれる ( $\epsilon = 1.66$  として作成した) グラフにおいて,  $\gamma = 0.03$  として振動を起こしたときのノード 1 の状態量の経時変化

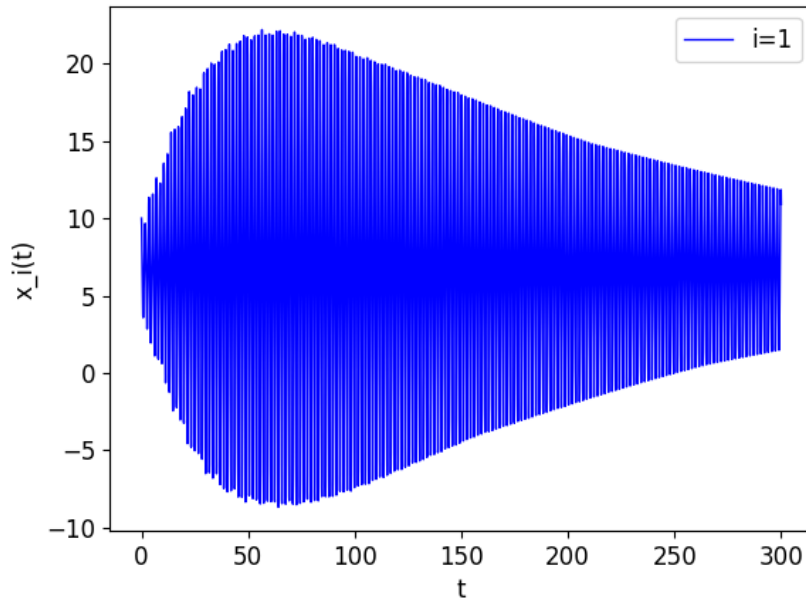


図 3.7. 固有値に複素数が含まれる ( $\epsilon = 1.66$  として作成した) グラフにおいて,  $\gamma = 0.04$  として振動を起こしたときのノード 1 の状態量の経時変化

この結果から,  $\gamma = 0.03, \gamma = 0.04$  とすると, ノードの状態量が発散しなくなることが確認できる. すなわち, ネット炎上が発生しなくなる.

今回の実験で, 減衰係数を少しずつ大きくするとノードの状態量の変化量が小さくなり, ある値を超えるとネット炎上が発生しなくなることを示した. ネット炎上を防止するためには, 式 (3.8) で示したネット炎上が発生する条件を回避するように減衰係数をとればよく, その値はネットワークの固有値さえわかれば求めることができる. しかし, 一般のオンライン社会ネットワークは大規模で複雑であるため, その固有値を正確に求めることは難しい. したがって, ネット炎上を防止するために必要な減衰係数を正確に求めることは難しい.

必要な減衰係数の正確な値が求められられないのであれば, 減衰係数は極めて大きな値として与えれば良い. しかし, 現実のオンライン社会ネットワークにおいて減衰係数を極めて大きくするという事は, すなわちユーザーが急にほぼ無関心になるような作用を講じるということである. このような, 特定の情報に対してユーザーが急に無関心になるような作用は考えにくく, 現実的であるとは言い難い.

以上のことから, 最小限必要な減衰係数を知ることは難しく, 極めて大きな値を与えることも現実的ではないので, 減衰係数を小さい値から少しずつ大きくすることをネット炎上の対策技術として提案する. 減衰係数を与えること具体例として, ユーザーが興味を失うような新しい情報の提供が挙げられる. 少しずつ減衰係数を大きくしていくことにより, ネット炎上を防止することが可能である.

## 第4章

# ネット炎上の予兆検出

3章で提案したネット炎上の対策技術を講じるタイミングは、ネット炎上が発生した後ではなく、発生する前であることが望ましい。通常、ネット炎上のような爆発的ダイナミクスが発生していないネットワークにおいては振動エネルギーは有限である。しかし、強い興味を引くような情報やイベントの出現などによりユーザーの活動が活性化した場合、いずれは振動エネルギーが発散、すなわちネット炎上が発生することがあると考えられる。そこで、ネット炎上が発生する前のユーザーの活動が活性化していく段階で、炎上の予兆が観測できれば、ネット炎上の対策技術を早期に適用することで炎上を防止することが期待できる。

ネット炎上が発生していない状態から、ユーザーの活動が活性化し、ネット炎上が発生する状態に変化するという状況を図3.2で示したネットワークモデルと対応させて考える。 $\epsilon = 0$ のときは有向グラフは対称化可能グラフとなるので、振動エネルギーの発散は起こらない。しかし、 $\epsilon$ の値が大きくなるにつれ固有値が変化し、 $\epsilon = 1.66$ になったとき、振動エネルギーが発散する。すなわち、 $\epsilon < 1.66$ の区間が、ユーザーの活動が活性化し、ネット炎上に近づいている部分であると考えることができる。

この区間について、図3.3で示したノードの経時変化を見てみると、 $0 \leq \epsilon \leq 1.65$ として作成したネットワークにおいて、 $\epsilon$ の値が大きくなるにつれて低周波の「うなり」が現れ、その振幅が大きくなっていることがわかる。これがネット炎上の発生の予兆として普遍的に現れるものであることが説明できれば、ネット炎上の対策技術の早期適用に利用することができる。本章では、ネット炎上の予兆として、低周波のうなりが出現することと、振幅が増大する理由を理論的に示す [42, 43]。

### 4.1 低周波のうなり出現のメカニズム

まず、低周波のうなりが出現する理由を説明する。一般の有向グラフのノードの状態ベクトルの運動方程式を変換した運動方程式 (2.32) の解  $\mathbf{y}(t)$  を考える。簡単のため、減衰係数



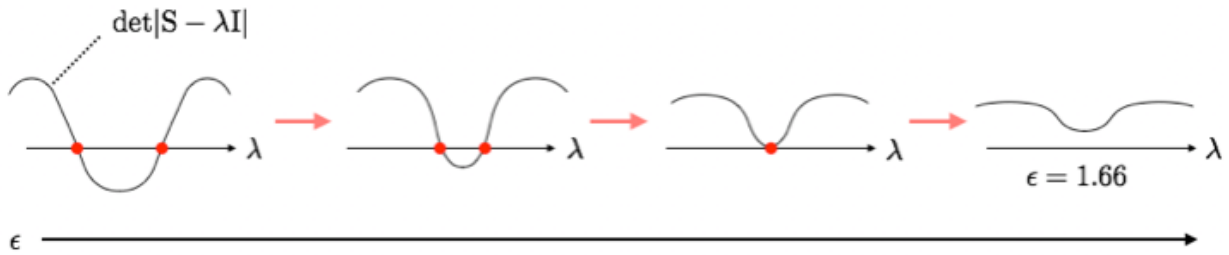


図 4.1.  $\epsilon$  の増加に伴う固有方程式の解の変化

$\gamma = 0$  とし,  $\mathbf{y}(t)$  を行列  $\mathbf{S}$  の固有ベクトル  $\mathbf{v}_\mu$  で展開すると,

$$\mathbf{y}(t) = \sum_{\mu=0}^{n-1} a_\mu(t) \mathbf{v}_\mu. \tag{4.1}$$

とかけ, 展開係数  $a_\mu(t)$  は以下のように書くことができる.

$$a_\mu(t) = a_\mu(0) \exp(\pm i \omega_\mu t). \tag{4.2}$$

ここで,  $\omega_\mu := \sqrt{\lambda_\mu}$  は, 固有値  $\lambda_\mu$  が実数であるときの固有振動数である.

次に, 固有方程式

$$\det(\mathbf{S} - \lambda \mathbf{I} = 0) \tag{4.3}$$

の解について考える. 有向グラフが対称化可能である場合は, 固有値は全て実数となる. しかし, 有向グラフの Laplacian 行列の固有値に複素数が現れる場合, そのときの固有値は複素共役の形で出現する. なぜならば, 固有方程式 (4.3) は実数係数の  $n$  次方程式だからである. 有向グラフが対称化可能な状態から, 固有値に複素数が現れる状態に至るまでに, ある二つの固有値が実軸状で接近する. 重解を持つところで固有値は重なり, その後は実軸から離れ, 複素共役の形となる. このように固有方程式の解が変化する流れを, 図 3.2 におけるネットワークモデルにおいて  $\epsilon = 1.66$  としたときに複素数となった 2 つの固有値の値の変化の様子を用いて図 4.1 に示す.

固有値が近くなるということは, 固有振動数が近くなるということである. ここで, 固有振動数が  $\omega_\mu$  及び  $\omega_\nu$  となる 2 つの振動が重ね合わさる状況を考える. 三角関数の和積の公式

$$\sin(\omega_\mu t) + \sin(\omega_\nu t) = 2 \sin \frac{(\omega_\mu + \omega_\nu) t}{2} \cos \frac{(\omega_\mu - \omega_\nu) t}{2}$$

からわかるように, 2 つの固有振動数が近い値だった場合,  $\omega_\mu - \omega_\nu$  の値が小さい値となるので, 右辺の  $\cos$  の部分から低周波の振動が現れる. したがって, 固有振動数の差に関連した低周波のうなりが発生するのである.

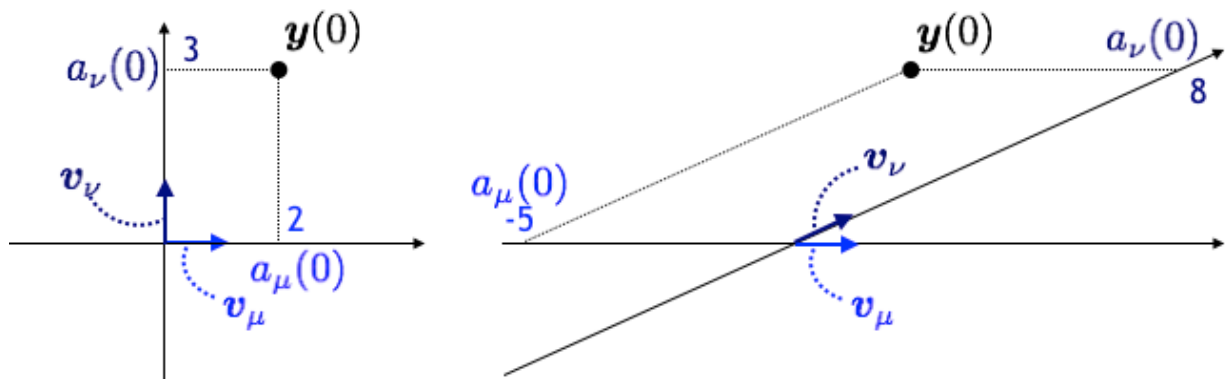


図 4.2.  $y(0)$  を異なる座標軸で展開した時の目盛りの値の変化

## 4.2 低周波のうなりの振幅増大のメカニズム

続いて、低周波のうなりの振幅が増大する理由を説明する。対称化可能グラフにおいては、 $S$  の固有ベクトル  $v_\mu$  は互いに直交している。しかし対称化可能グラフのリンクの重みが大きくなると、 $S$  が非対称行列となり、固有ベクトル  $v_\mu$  が直交しなくなる。この過程で、式  $y(t)$  における展開係数の値がどのように変化するかを考える。

図 4.2 は、原点に対して同じ位置にある  $y(0)$  に対して、異なる座標軸で展開した時の目盛りの値を表現したものである。左側の図は固有ベクトルが直交するときの座標系である。右側の図は固有ベクトルが平行に近づいたときの座標系である。固有ベクトルが平行に近づくと、同じ  $y(0)$  の展開であっても展開係数の値が大きくなることがわかる。式 (4.1), (4.2) からわかるように、 $a_\mu(0)$  が大きくなれば  $y(t)$  も大きくなる。つまり、振幅が大きくなるということになる。これが、振幅が増大する理由である。

図 4.3 は、図 3.2 に示されるネットワークモデルを用いた数値例であり、 $\epsilon$  の値に対応する  $a_\mu(0)$  の値を示したものである。この結果は、値が近くなる固有値のペアに対応する固有ベクトルについて、対応する展開係数の絶対値が大きくなることを示している。

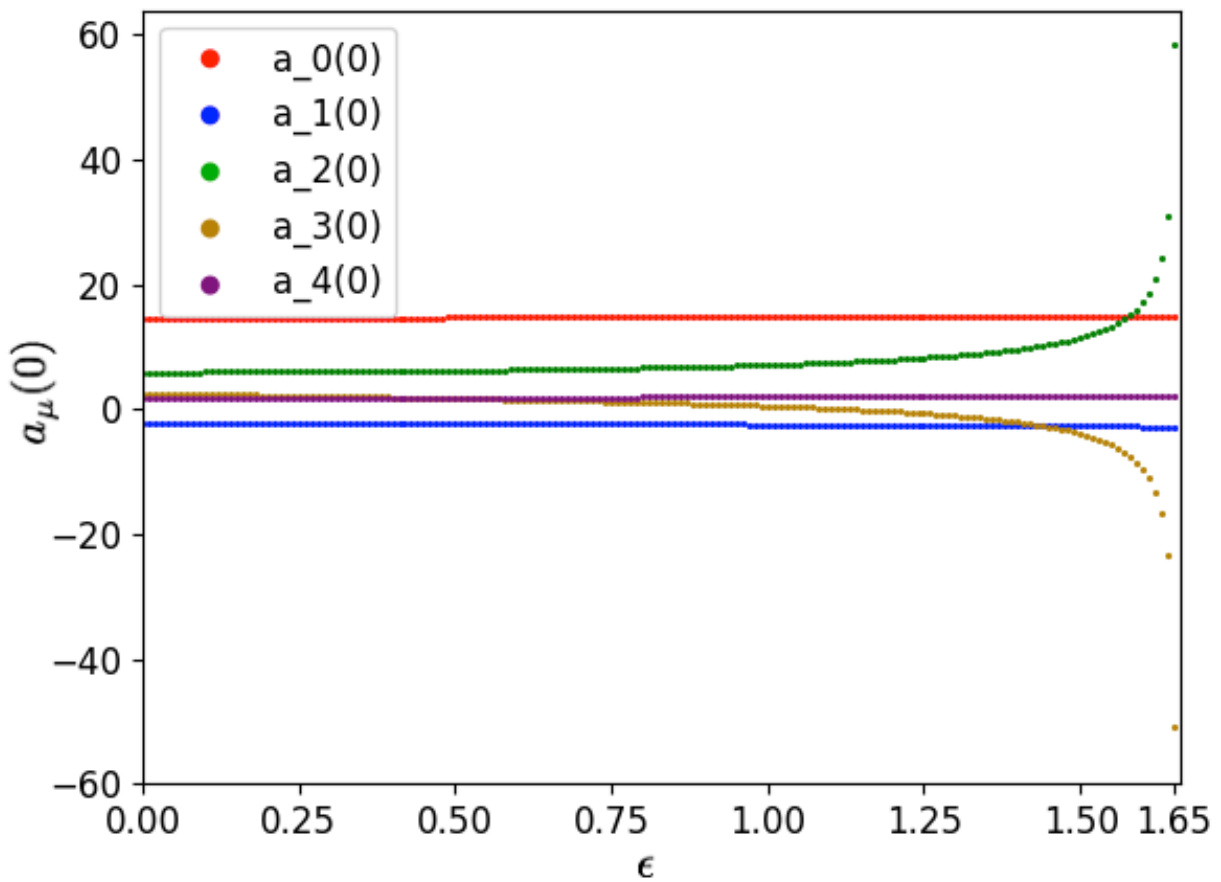


図 4.3.  $\epsilon$  と  $a_\mu(0)$  の関係

以上の内容をまとめると以下のようなになる。対称化可能グラフに対して、一方向リンクグラフを加えることにより固有値が変化して固有値に複素数が含まれるグラフに変化するまでの状況を，図 3.2 のネットワークモデルの例を使用して考えた。すなわち，ネットワークが，ネット炎上が発生しない状態から発生する状態に近づく状況を考えた。ネットワークのリンク構造が変化すると，ある 2 つの固有値が接近し，複素共役の形で出現する。このときが，ネット炎上が発生する状態である。この過程で，いずれ複素共役になる 2 つの固有値の値は接近し，それらの差に関連する低周波のうなりが出現する。また，固有値に対応する固有ベクトルは平行に近くなる。すると固有ベクトルに対応する展開係数の値が大きくなり，振幅が大きくなる。したがって，低周波で振幅の大きなうなりが出現するということになる。

## 第 5 章

# SNS の実データのスペクトル分析

本章では，4 章で述べた低周波のうなりが，現実のオンライン社会ネットワーク上のデータで出現することを検証する．対象として，日本の掲示板サイト「2ch」の投稿ログと，Web サイト Google Trends により提供される，単語がある地域である期間に検索された割合を示す指標の時系列データを扱う [38, 39]．各対象データの中でユーザーの活動が活性化していると考えられる区間とそうでない区間を抽出し，それぞれ周波数解析を行い，振動モデルに矛盾しない結果が得られることを示す [42]–[45]．

### 5.1 2ch におけるスペクトル分析

本節では，日本の電子掲示板サイト「2ch」 [38] における投稿ログを対象データとし，投稿が多い期間と少ない期間における投稿数について FFT をかけ，スペクトル分布を調べて比較する．振動モデルに基づく理論的予測に従うと，投稿数が多い区間，すなわちユーザーが活性化している区間は，投稿数が少ない区間よりも低周波モードが強く分布することになる．2ch におけるスレッドは投稿数が 1,000 に到達すると，それ以上の更新ができなくなり，続けて投稿するためには新しいスレッドを立て直す必要がある．分析に必要な十分のデータ数を確保するために，本稿では「広島東洋カープ part4492 – 広島東洋カープ part4592」のように，複数のスレッドにまたがって議論されているトピックを扱い，投稿ログをまとめて取得した．本節では，3つのスレッドを対象に分析を行う．1つ目のスレッドは韓国の経済動向関連のスレッド，2つ目のスレッドは日本の株市場関連のスレッド，3つ目のスレッドは日本のプロ野球チーム「広島東洋カープ」関連のスレッドである．

韓国の経済動向に関するスレッド 図 5.1 に，韓国の経済動向に関するスレッドにおける，2017 年 11 月 15 日から 2018 年 3 月 12 日までの 1 日ごとの投稿数を示す．図 5.1 において，黒の点線で示された区間は投稿数が少ない期間を示し，赤い点線で示された区間は投稿数が多

い区間を示している。以降、他の 2 つのスレッドについても同様の色を使用するものとする。

次に、図 5.1 で示された投稿数の多い区間（左）と投稿数の少ない期間（右）について、それぞれの 16 分ごとの投稿数を図 5.2 に示す。さらに、図 5.3 に、両区間の FFT の結果を示す。このとき、FFT の特性から、最高周波数は水平線の中心にあり両端が最低周波数に対応するので、両方の区間において周波数が半分未満のモードのみ抽出した。

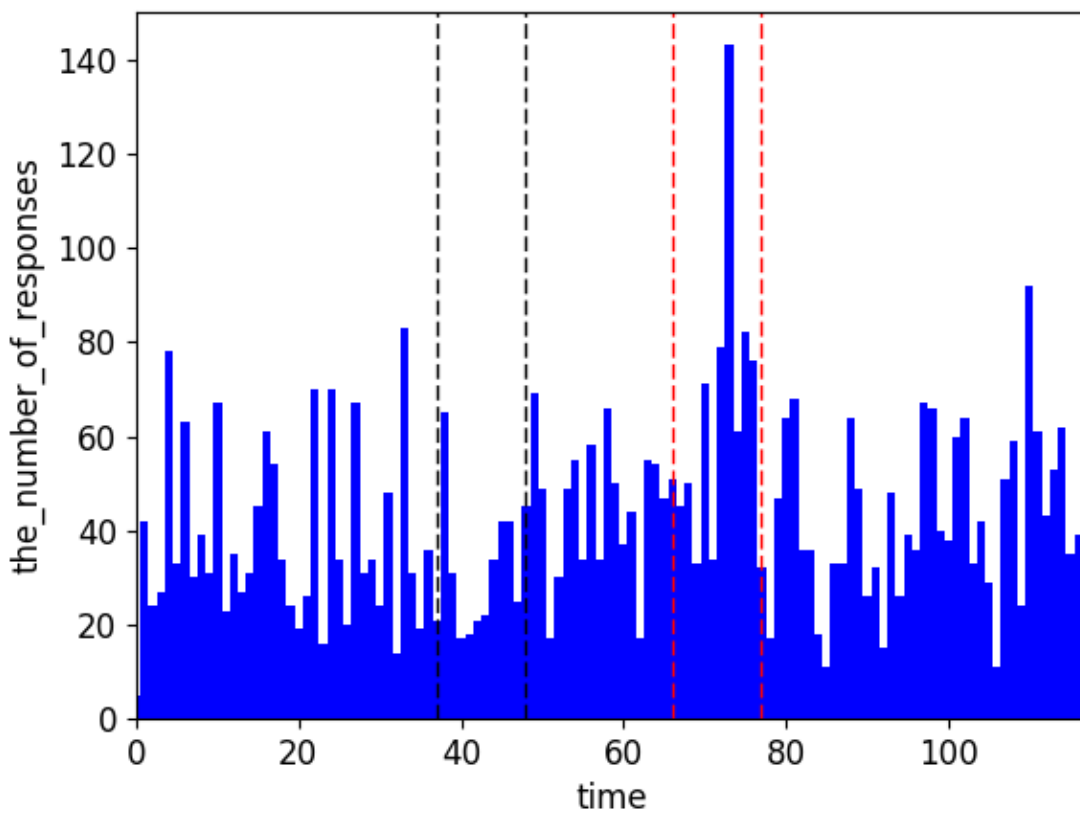


図 5.1. 韓国の経済動向に関するスレッドにおける 1 日ごとの投稿数

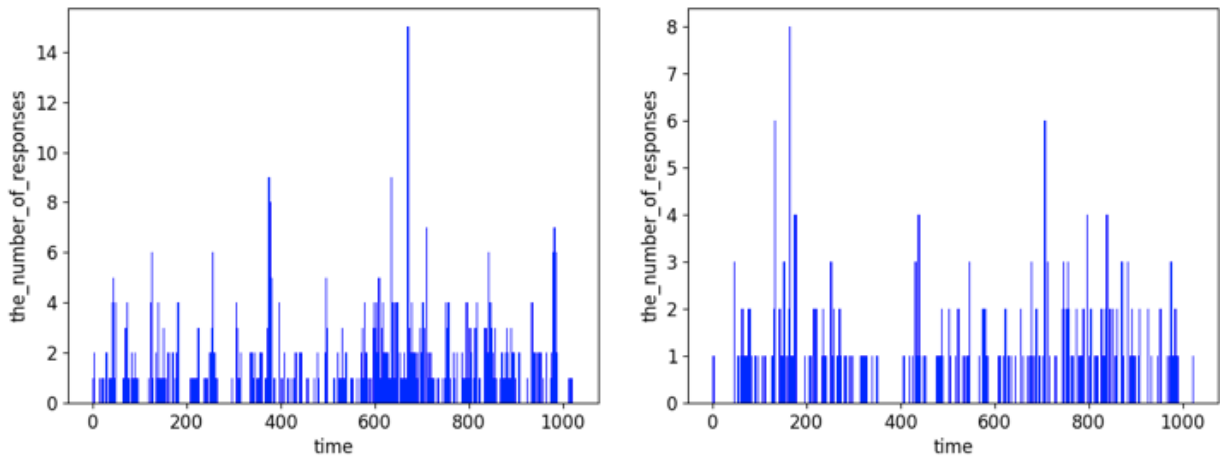


図 5.2. 韓国の経済動向に関するスレッドについて、投稿数が多い区間（左）と少ない区間（右）における、それぞれの 16 分ごとの投稿数

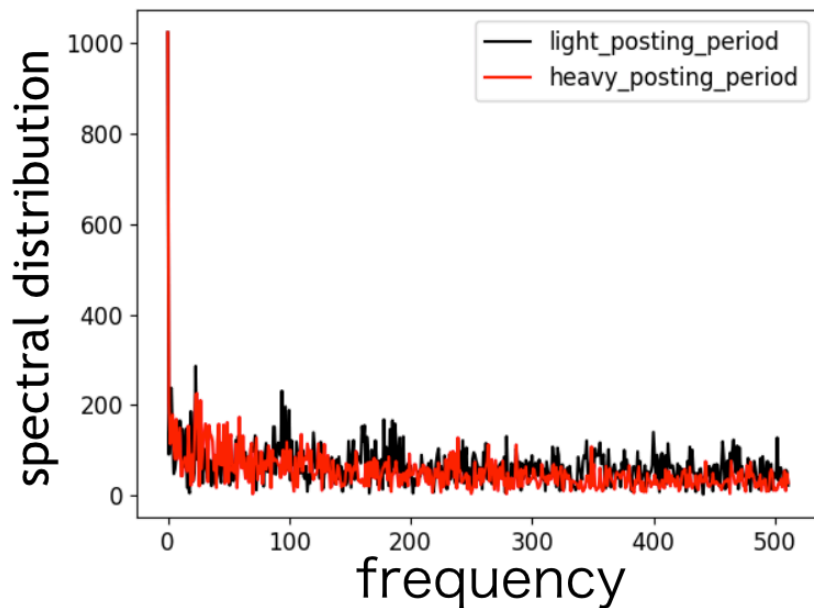


図 5.3. 韓国の経済動向に関するスレッドにおける 2 つの区間の FFT の結果

最後に、両区間の FFT の結果を比較して、どのような特徴が見られるかを検証する。まず、振動数 0 のモードを削除し、振動部分のみを抽出する。続いて、各周波数成分の比率の分布を比較するために、全ての成分の合計が 1 になるようにデータを正規化する。また、傾向をわかりやすくするために、成分の幅 10 の移動平均を取る。以降、FFT で得られる結果に対しては同様の処理を行うものとする。図 5.4 に、韓国の経済動向に関するスレッドにおけるスペクトル分布の幅 10 の移動平均を示す。

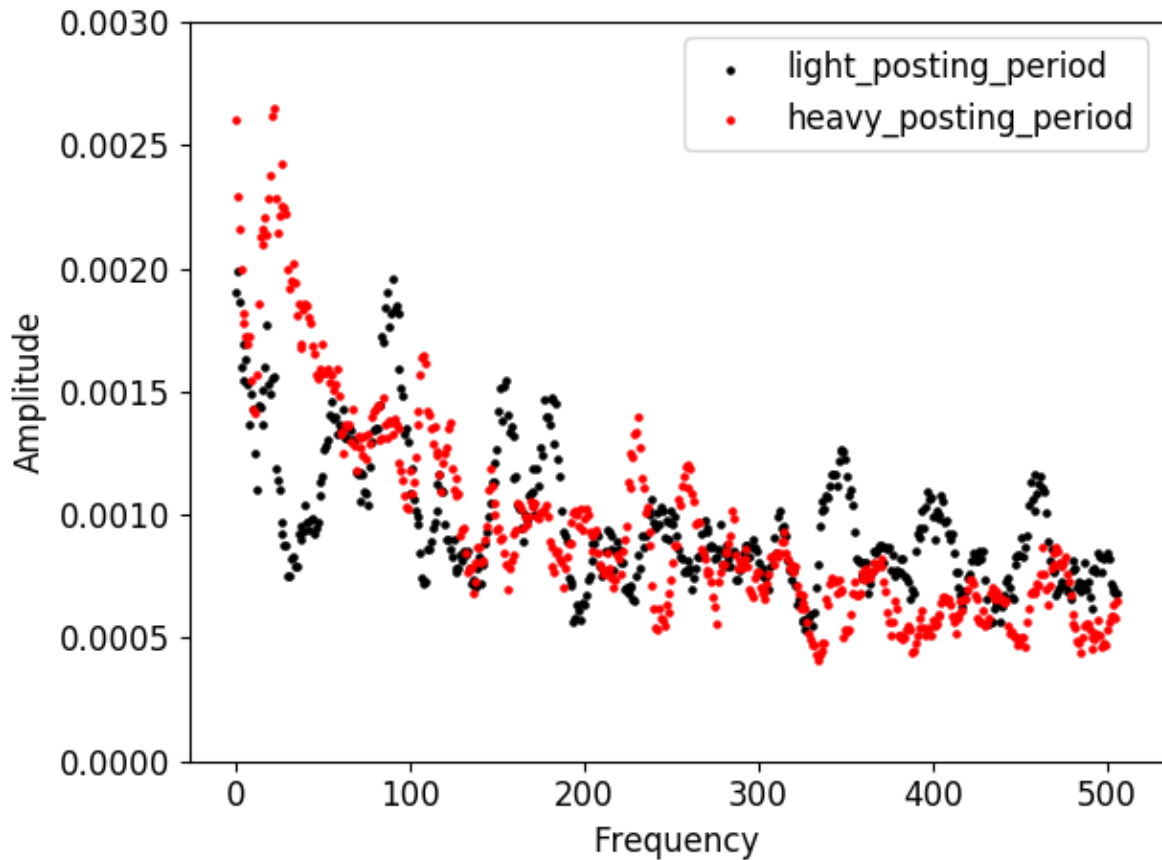


図 5.4. 韓国の経済動向に関するスレッドにおけるスペクトル分布の幅 10 の移動平均

この結果から、投稿数が多い区間は、投稿数の少ない区間と比較すると、高周波モードが強く、低周波モードが弱く分布していることがわかる。すなわち、振動モデルの予測に矛盾しない観測結果が得られた。

日本の株市場に関するスレッド 続いて、日本の株市場に関するスレッドについてスペクトル分布の比較を行う。図 5.5 に、日本の株市場に関するスレッドにおける、2017 年 11 月 15 日から 2018 年 3 月 12 日までの 1 日ごとの投稿数を示す。次に、図 5.1 で示された投稿数の多い区間（左）と投稿数の少ない期間（右）について、それぞれの 16 分ごとの投稿数を図 5.6 に示す。

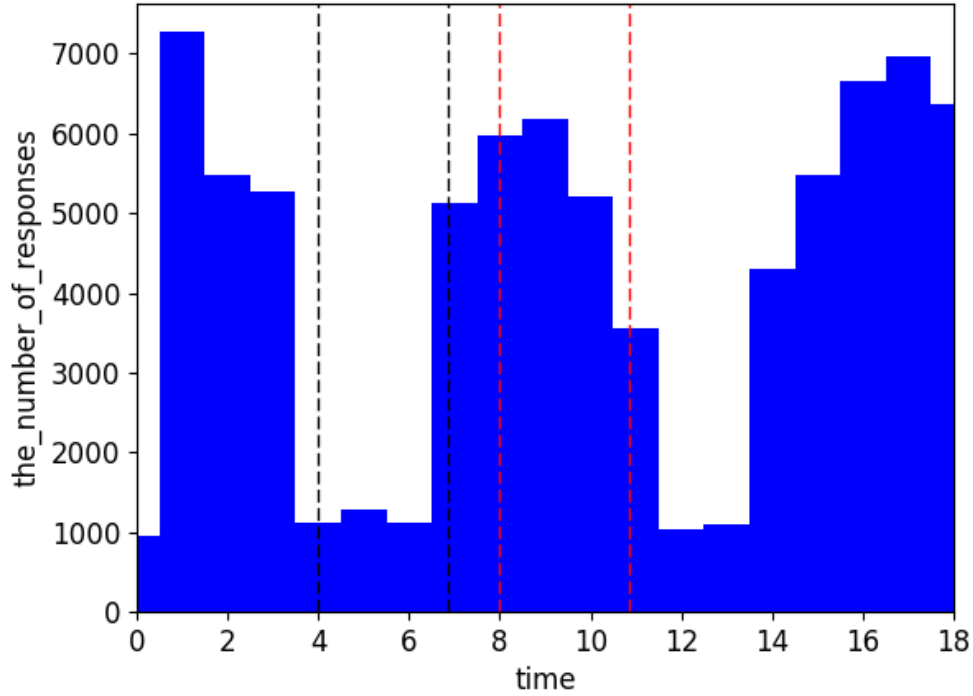


図 5.5. 日本の株市場に関するスレッドにおける 1 日ごとの投稿数

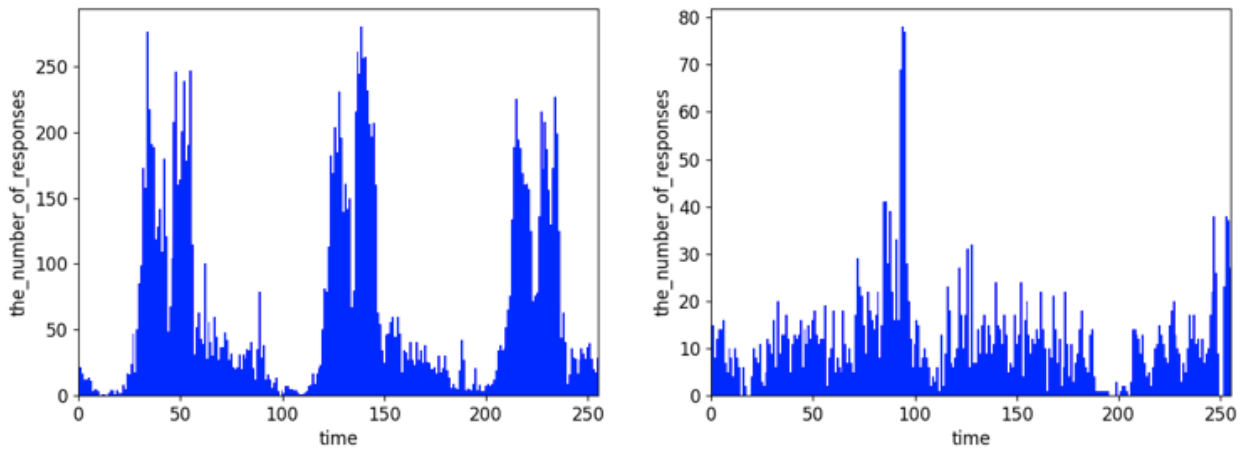


図 5.6. 日本の株市場に関するスレッドについて，投稿数が多い区間（左）と少ない区間（右）における，それぞれの 16 分ごとの投稿数



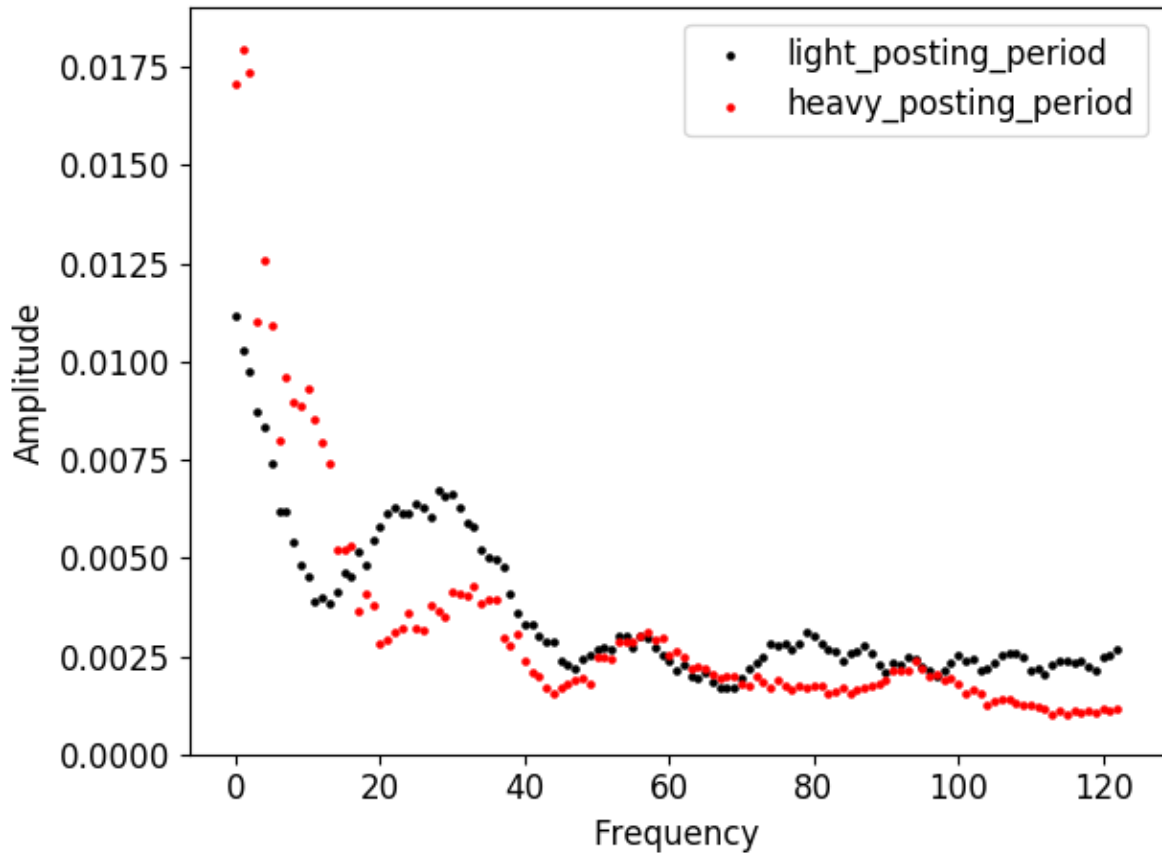


図 5.7. 日本の株市場に関するスレッドにおけるスペクトル分布の幅 10 の移動平均

最後に、日本の株市場に関するスレッドにおけるスペクトル分布の幅 10 の移動平均を図 5.7 に示す。図 5.7 の結果から、投稿数が多い区間は、投稿数の少ない区間と比較すると、高周波モードが強く、低周波モードが弱く分布していることがわかる。すなわち、振動モデルの予測に矛盾しない観測結果が得られた。

プロ野球チーム「広島東洋カープ」に関するスレッド 最後に、プロ野球チーム「広島東洋カープ」に関するスレッドについてスペクトル分布の比較を行う。図 5.8 に、広島東洋カープに関するスレッドにおける、2018 年 10 月 27 日から 2018 年 12 月 3 日までの 1 日ごとの投稿数を示す。次に、図 5.8 で示された投稿数の多い区間（左）と投稿数の少ない期間（右）について、それぞれの 16 分ごとの投稿数を図 5.6 に示す。

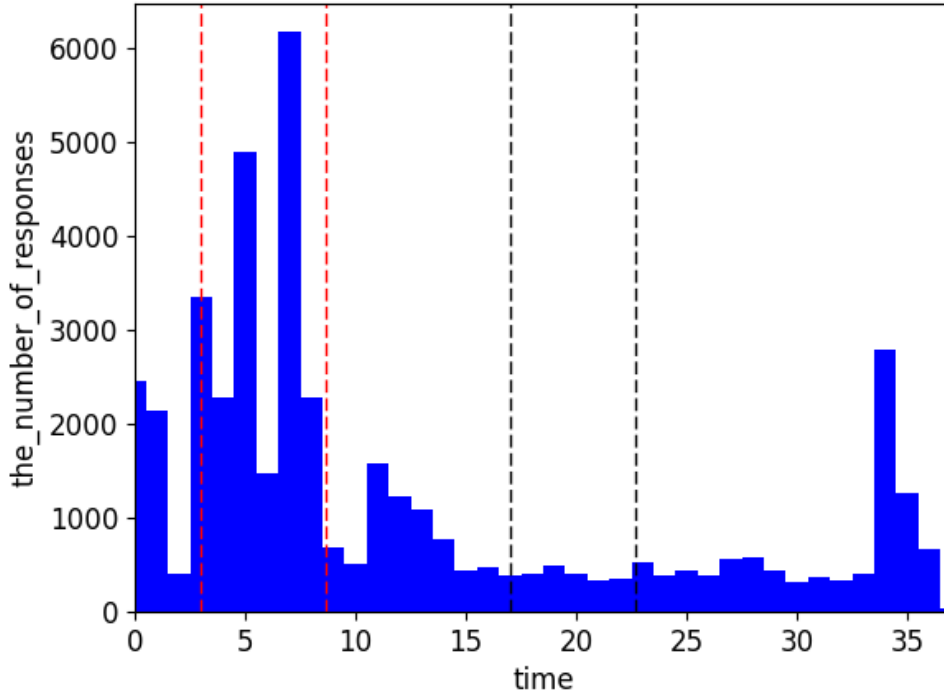


図 5.8. 広島東洋カープに関するスレッドにおける 1 日ごとの投稿数

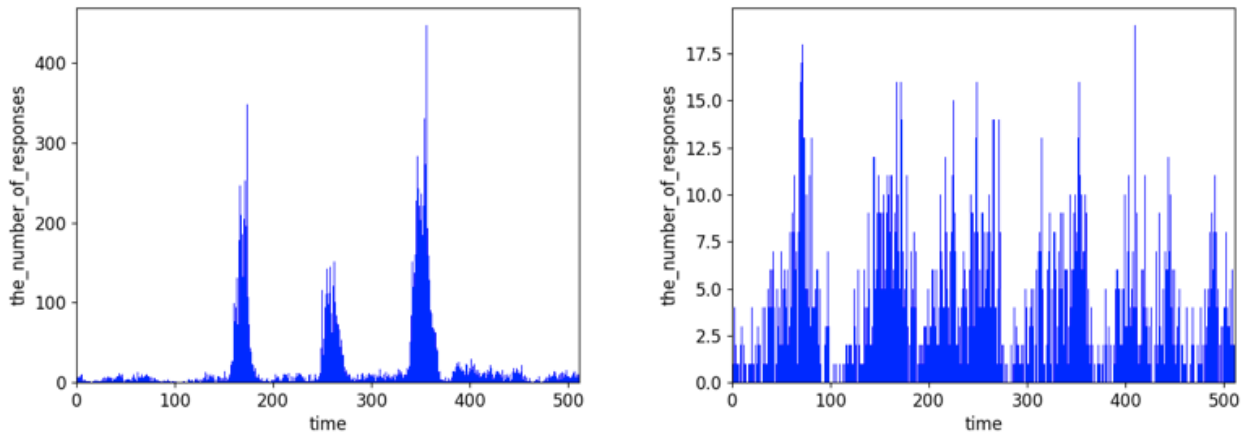


図 5.9. 広島東洋カープに関するスレッドについて、投稿数が多い区間（左）と少ない区間（右）における、それぞれの 16 分ごとの投稿数

両区間において FFT をかけ、振動数 0 のモードを削除し、正規化したあとの幅 10 の移動平均を図 5.7 に示す。最後に、広島東洋カープに関するスレッドにおけるスペクトル分布の幅 10 の移動平均を図 5.7 に示す。図 5.10 の結果から、投稿数が多い区間は、投稿数の少ない区

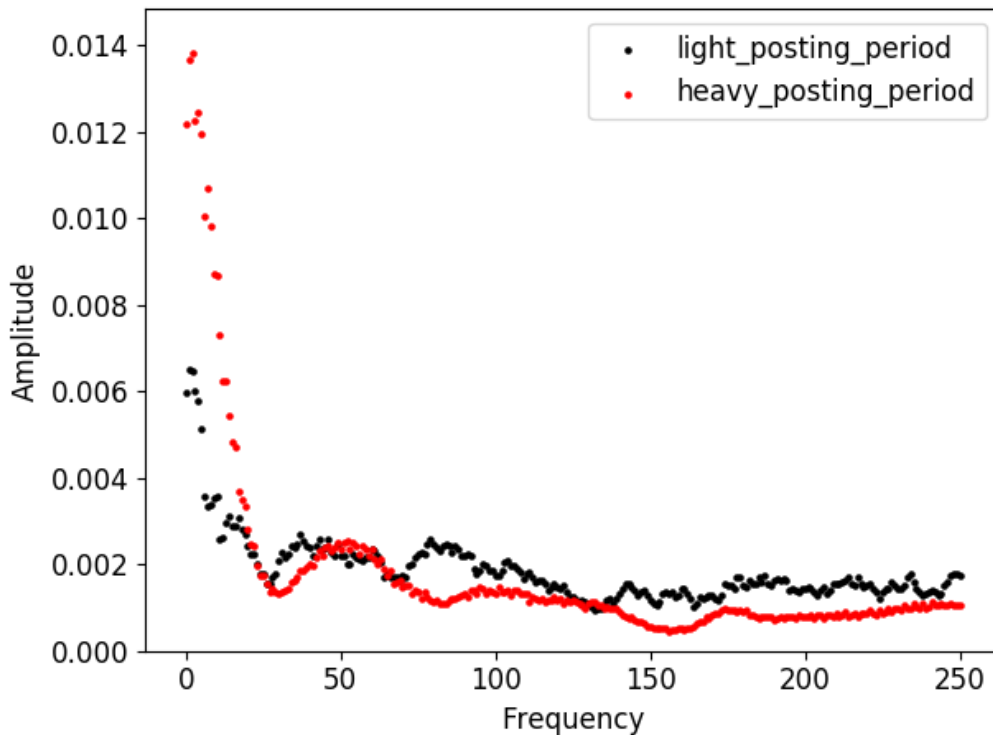


図 5.10. 広島東洋カープに関するスレッドにおけるスペクトル分布の幅 10 の移動平均

間と比較すると、高周波モードが強く、低周波モードが弱く分布していることがわかる。すなわち、振動モデルの予測に矛盾しない観測結果が得られた。

## 5.2 Google Trends におけるスペクトル分析

続いて、Google trends において算出される単語の人気度の度合いを示すデータを用いて分析を行う。Google Trends とは、ある単語がある期間内に Google でどれだけ検索されているかを地域別に表示する Web サービスである [39]。この Web サービスを使用し、一般企業名やアスリート選手など様々な単語について、人気度の度数が高い期間と低い期間をそれぞれ抽出し、前節と同様の分析を行う。

Google Trends で取得できる単語の人気度の度合いのデータは search interest と呼ばれる。search interest とは、Google の中である単語がある期間にどの程度検索されたかを示す指標である。データポイントは、相対的な人気度を比較するために、指定した地域と期間における全検索回数で除算される。データは最小の単位で 1 時間ごとに取得することができるが、その場合期間は 1 週間以内に指定しなければならない。また、数値は検索期間の中で最も相対度数が高い数値が 100 になるように正規化されている。

本章では、単語の人気度の 1 時間単位のデータを 1 週間の期間で複数取り、それらのデータを結合することにより長い期間のデータを取得した。例えば、1 月 1 日から 1 月 7 日までの期間で取ったデータと 1 月 7 日から 1 月 13 日までの期間で取ったデータを結合とする。ここで、前者のデータにおける 1 月 7 日 0 時の数値が 80、後者のデータにおける 1 月 7 日 0 時の数値が 40 であった場合、前者の全てのデータの数値を 0.5 倍する。このとき、後者ではなく前者の値を調整した理由は、全体で最も大きい数値が 100 になるようにするためである。その後、前者のデータの 1 月 7 日のデータを削除して結合する。また、調査対象とする地域（国）は日本とした。

### 5.2.1 2 区間でのスペクトル分布の比較

まず、4 つの単語について search interes の時系列データを取得し、その中で数値が比較的高い区間と低い区間の 2 つの区間に対して FFT をかけ、成分の分布を比較する。振動モデルの理論に従えば、数値が高い、すなわちユーザーの関心が強い区間の方がより多くの低周波モードを持つことになる。

「甲子園」 図 5.11 は、2019 年 7 月 7 日から 9 月 1 日までの、甲子園に対する関心の度合いの 1 時間ごとの時系列データを示している。ここで、赤の点線と黒の点線で囲まれた区間はそれぞれ比較的高い関心が高い区間と低い関心を示している。以降、関心の強さの時系列データについて高い区間と低い区間の 2 区間で比較する場合、同様の色で範囲を示すものとする。続いて、図 5.11 で示した 2 つの区間においてそれぞれスペクトル分布を取得し、比較する。まず、各区間において FFT によりスペクトル分布を取得する。本節でも、FFT で得られる結果に関しては 5.1 節と同様の作業を行う。図 5.12 は、各区間のデータのスペクトル分布の幅 50 の移動平均を示している。この結果は、比較的高い関心が高い区間には低いより区間よりも強く低周波モードが分布しており、高周波モードは弱く分布していることがわかる。すなわち、振動モデルの予測に矛盾しない観測結果が得られた。

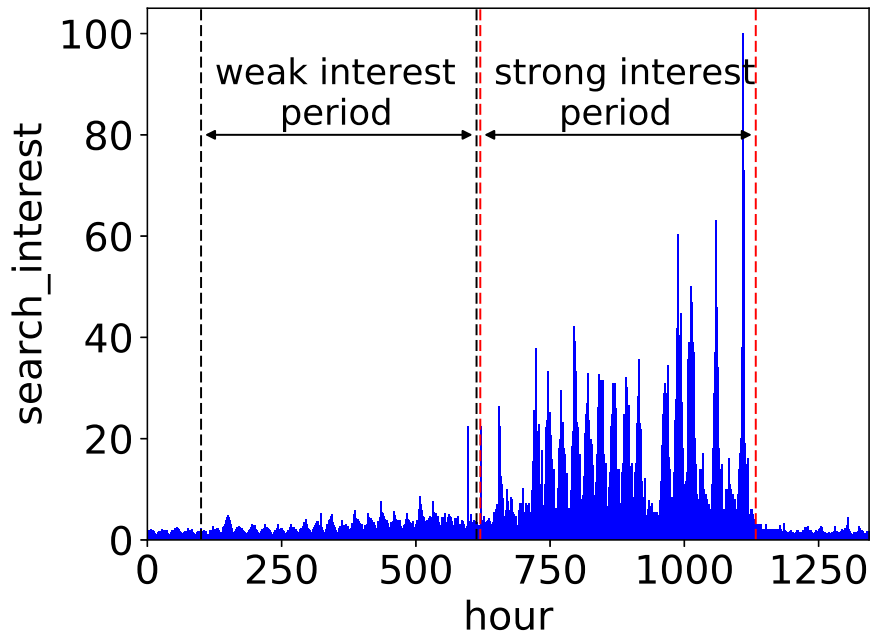


図 5.11. 甲子園に関する関心の度合いの推移

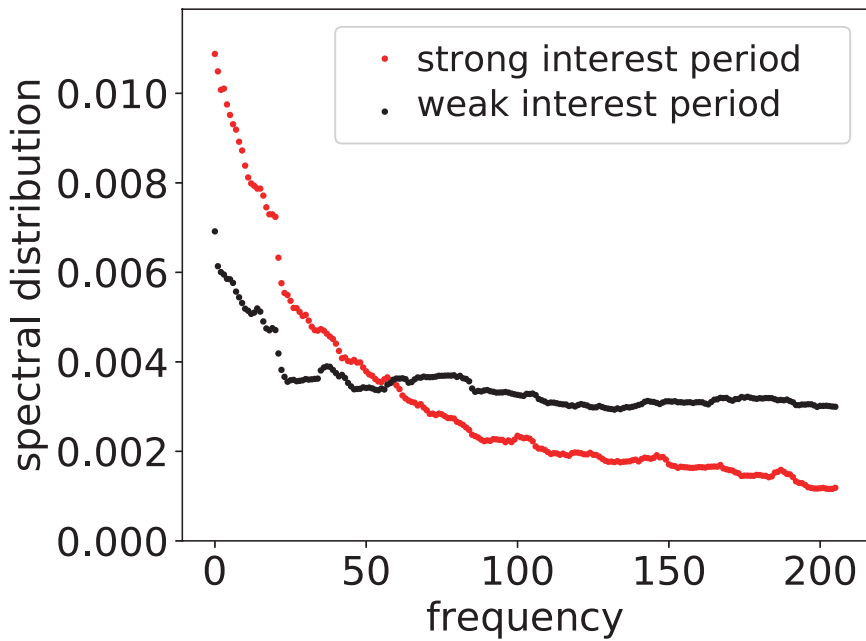


図 5.12. 甲子園に関する関心の度合いのスペクトル分布の幅 50 の移動平均

スマートフォン決済サービス「7pay」 図 5.13 は、2019 年 5 月 17 日から 7 月 26 日までの、7pay に対する関心の度合いの 1 時間ごとの時系列データを示している。図 5.14 は、図 5.13 で示されたデータの中で比較的关注が強い区間と弱い区間のそれぞれのデータのスペクトル分布の幅 30 の移動平均を示している。この結果は、比較的关注が強い区間には低い周波数よりも強く低周波モードが分布しており、高周波モードは弱く分布していることがわかる。すなわち、振動モデルの予測に矛盾しない観測結果が得られた。

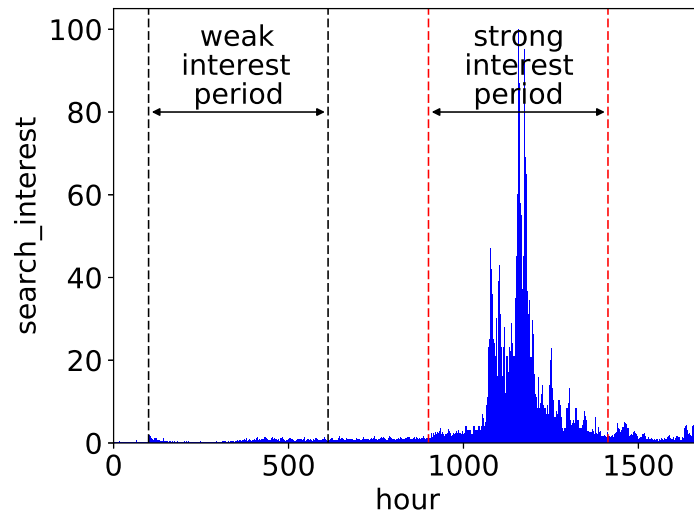


図 5.13. 7pay に関する関心の度合いの推移

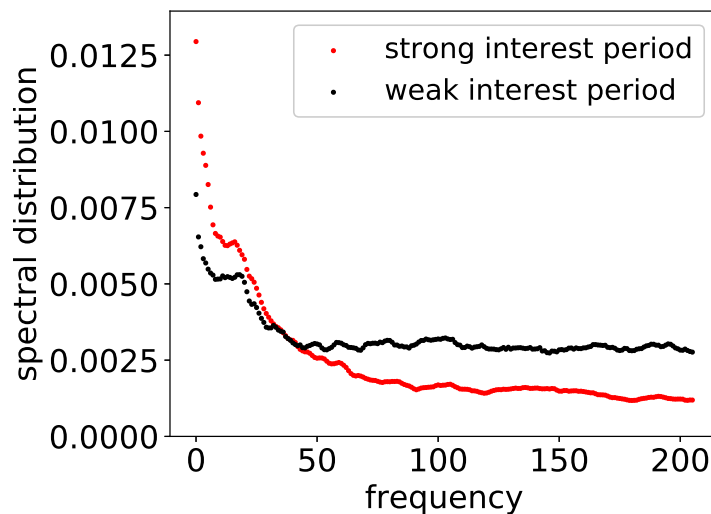


図 5.14. 7pay に関する関心の度合いのスペクトル分布の幅 30 の移動平均

プロ野球チーム「福岡ソフトバンクホークス」 図 5.15 は、2019 年 1 月 1 日から 5 月 21 日までの、福岡ソフトバンクホークスに対する関心の度合いの 1 時間ごとの時系列データを示している。図 5.16 は、図 5.15 で示されたデータの中で比較的関心が強い区間と弱い区間のそれぞれのデータのスペクトル分布の幅 50 の移動平均を示している。この結果は、比較的関心が強い区間には低いより区間よりも強く低周波モードが分布しており、高周波モードは弱く分布していることがわかる。すなわち、振動モデルの予測に矛盾しない観測結果が得られた。

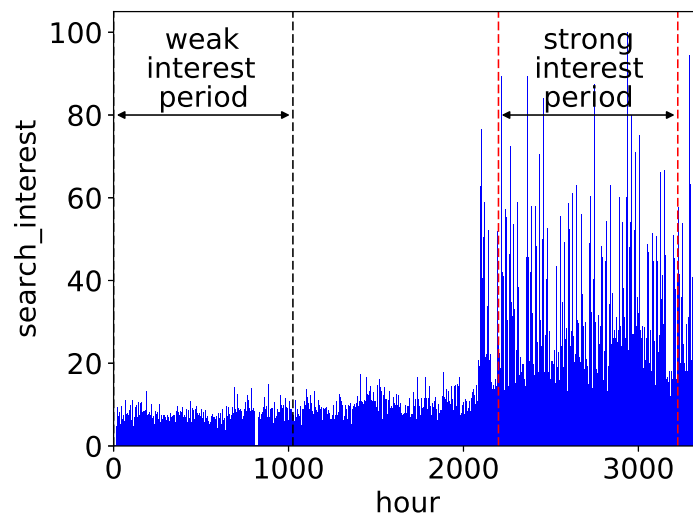


図 5.15. 福岡ソフトバンクホークスに関する関心の度合いの推移

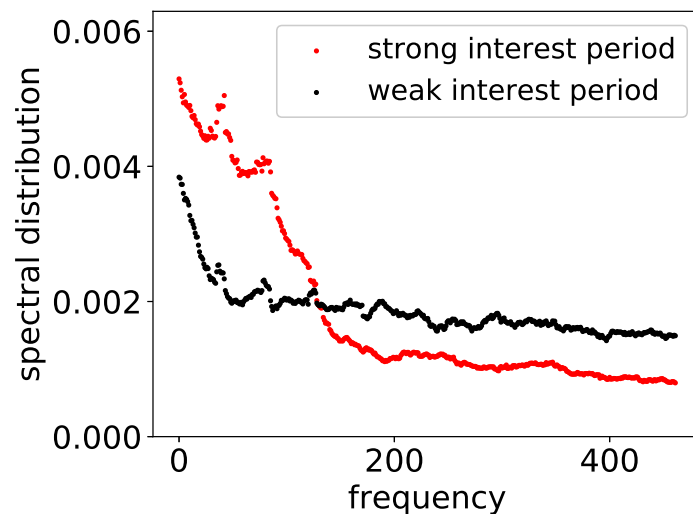


図 5.16. 福岡ソフトバンクホークスに関する関心の度合いのスペクトル分布の幅 50 の移動平均

中国の企業「Huawei」 図 5.17 は、2019 年 5 月 3 日から 6 月 28 日までの、Huawei に対する関心の度合いの 1 時間ごとの時系列データを示している。図 5.18 は、図 5.17 で示されたデータの中で比較的関心が強い区間と弱い区間のそれぞれのデータのスペクトル分布の幅 30 の移動平均を示している。この結果は、比較的関心が強い区間には低いより区間よりも強く低周波モードが分布しており、高周波モードは弱く分布していることがわかる。すなわち、振動モデルの予測に矛盾しない観測結果が得られた。

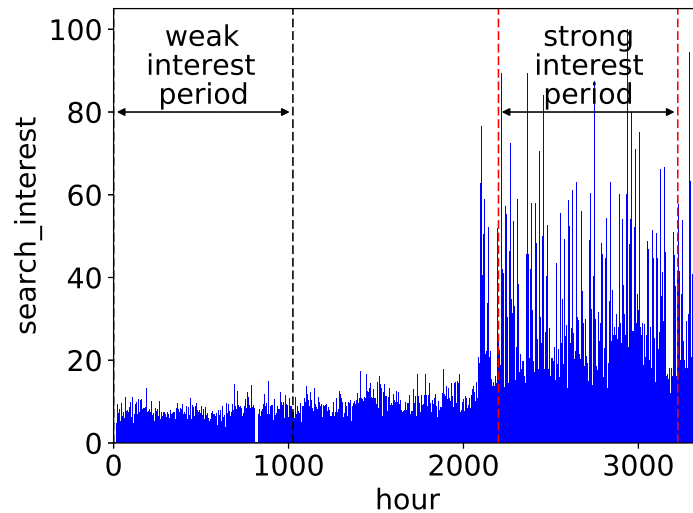


図 5.17. Huawei に関する関心の度合いの推移

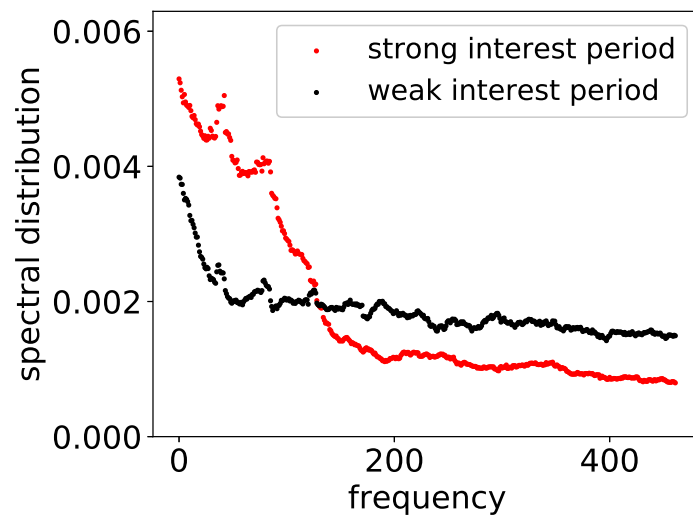


図 5.18. Huawei に関する関心の度合いのスペクトル分布の幅 30 の移動平均



### 5.2.2 3 区間でのスペクトル分布の比較

続いて、2 区間で比較したときに用いた単語とは異なる 4 つの単語の search interes の時系列データを取得し、その中で数値が比較的高い区間、中くらいの区間、低い区間の 3 つの区間に対して FFT をかけ、成分の分布を比較する。

「夏」 図 5.19 (左) は、2019 年 5 月 7 日から 8 月 13 日までの、夏に対する関心の度合いの 1 時間ごとの時系列データを示している。ここで、赤、黒、灰色の点線で囲まれた区間はそれぞれ比較的関心が強い区間、中くらいの区間、弱い区間を示している。以降、関心の強さの時系列データについて 3 区間で分類して比較する場合、同様の色で関心の度合いと調べる区間を示すものとする。図 5.19 (右) は、図 5.19 で示されたデータの中で比較的関心が強い区間、中くらいの区間、弱い区間のそれぞれのデータのスペクトル分布の幅 50 の移動平均を示している。この結果から、関心が強い区間と中くらいの区間は関心が弱い区間より強く低周波モードが分布していることがわかる。すなわち、振動モデルの予測に矛盾しない観測結果が得られた。

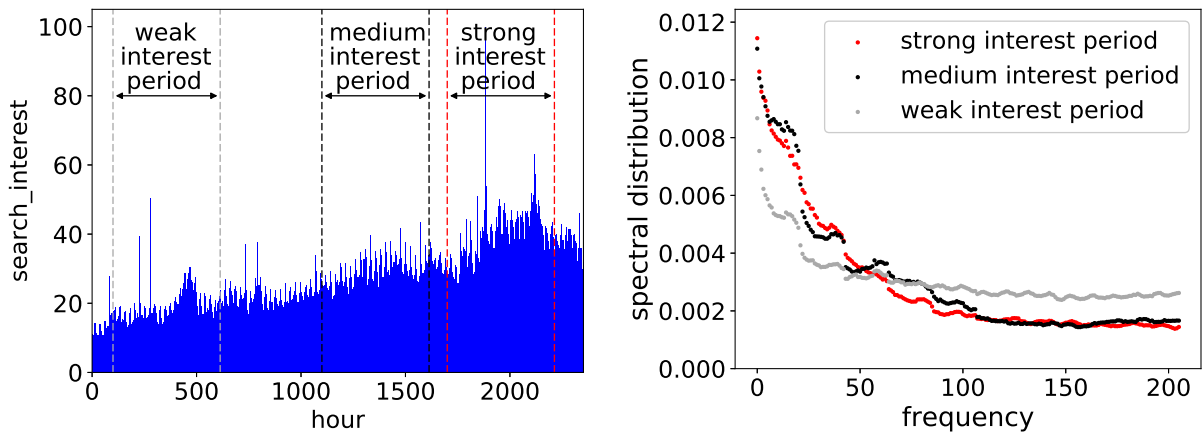


図 5.19. 夏に対する関心の度合いの推移 (左) と振動モードの幅 50 の移動平均 (右)

プロ野球選手「大谷翔平」 図 5.20 は、2019 年 3 月 23 日から 9 月 7 日までの、大谷翔平に対する関心の度合いの 1 時間ごとの時系列データを示している。図 5.21 は、図 5.20 で示されたデータの中で比較的関心が強い区間、中くらいの区間、弱い区間のそれぞれのデータのスペクトル分布の幅 50 の移動平均を示している。この結果から、関心が強い区間と中くらいの区間は関心が弱い区間より強く低周波モードが分布していることがわかる。すなわち、振動モデルの予測に矛盾しない観測結果が得られた。

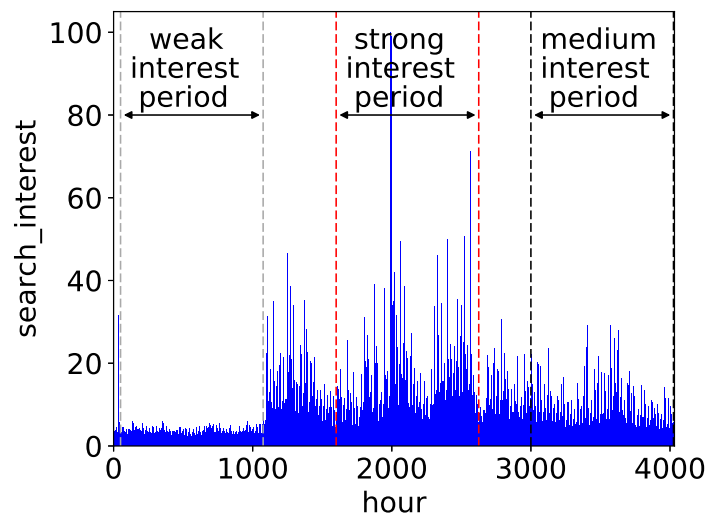


図 5.20. 大谷翔平に関する関心の度合いの推移

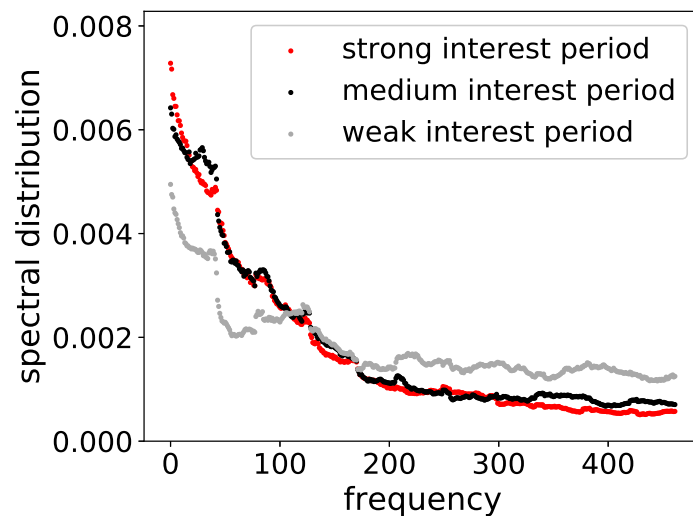


図 5.21. 大谷翔平に関する関心の度合いのスペクトル分布の幅 50 の移動平均

プロ野球チーム「横浜 DeNA ベイスターズ」 図 5.22 は、2019 年 2 月 23 日から 6 月 8 日までの、横浜 DeNA ベイスターズに対する関心の度合いの 1 時間ごとの時系列データを示している。図 5.23 は、図 5.22 で示されたデータの中で比較的関心が強い区間、中くらいの区間、弱い区間のそれぞれのデータのスペクトル分布の幅 30 の移動平均を示している。この結果から、関心が強い区間と中くらいの区間は関心が弱い区間より強く低周波モードが分布していることがわかる。すなわち、振動モデルの予測に矛盾しない観測結果が得られた。

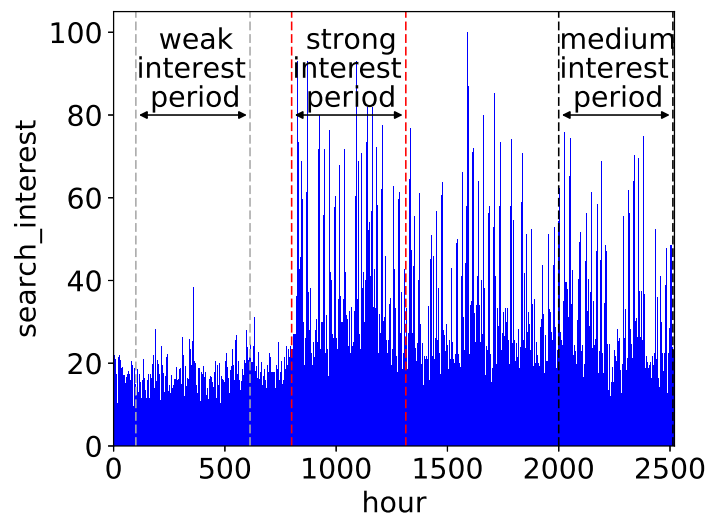


図 5.22. 横浜 DeNA ベイスターズに関する関心の度合いの推移

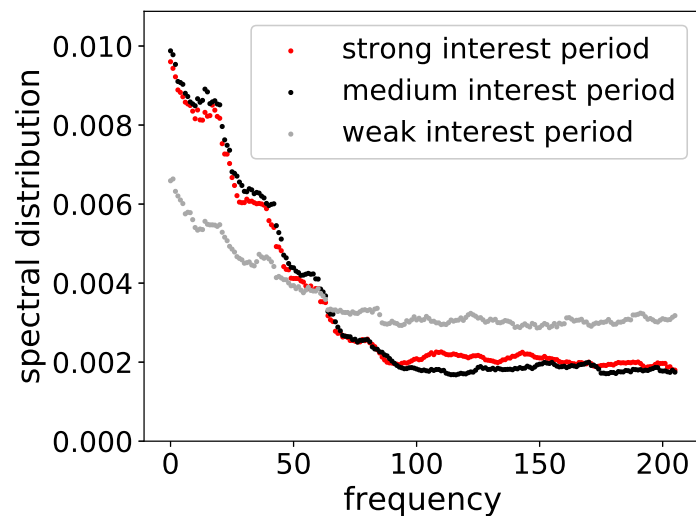


図 5.23. 横浜 DeNA ベイスターズに関する関心の度合いのスペクトル分布の幅 30 の移動平均

Pop バンドグループ「One Direction」 図 5.24 は、2019 年 5 月 20 日から 9 月 9 日までの、One Direction に対する関心の度合いの 1 時間ごとの時系列データを示している。図 5.25 は、図 5.24 で示されたデータの中で比較的関心が強い区間、中くらいの区間、弱い区間のそれぞれのデータのスペクトル分布の幅 30 の移動平均を示している。この結果から、関心が強い区間と中くらいの区間は関心が弱い区間より強く低周波モードが分布していることがわかる。すなわち、振動モデルの予測に矛盾しない観測結果が得られた。

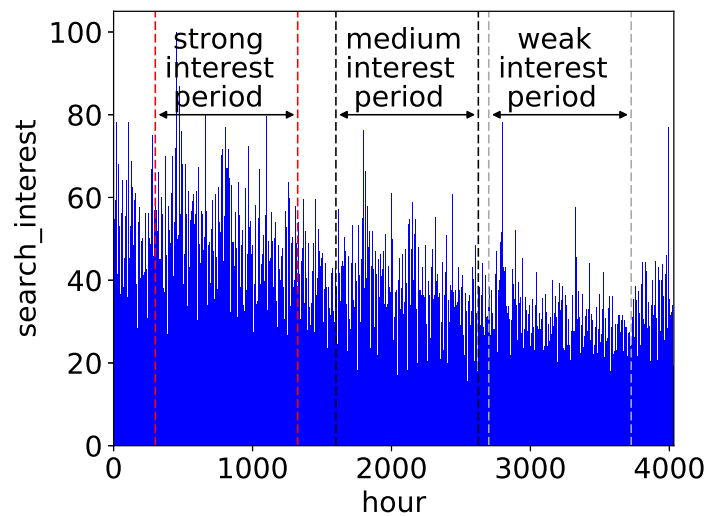


図 5.24. One Direction に関する関心の度合いの推移

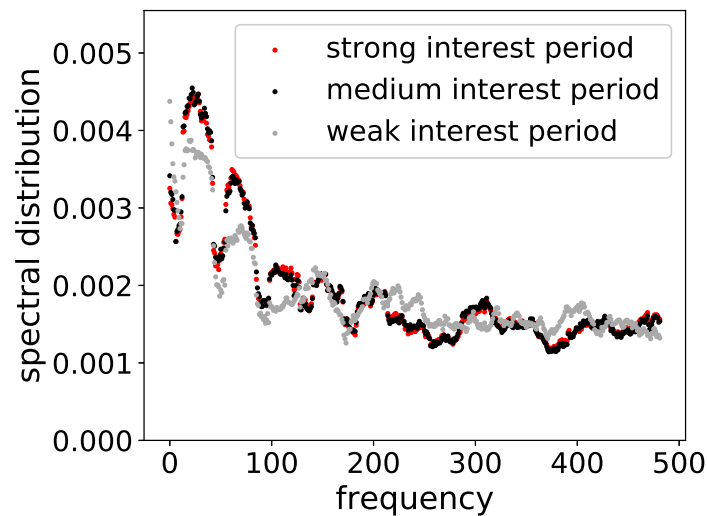


図 5.25. One Direction に関する関心の度合いのスペクトル分布の幅 30 の移動平均

## 第 6 章

# 結論

本稿では、振動モデルでネット炎上の対策方法と炎上の予兆について説明できることを示した。また、社会ネットワーク上の実データにおいて周波数解析を行い、理論の妥当性を検証した。

まず最初に、社会ネットワーク上のユーザーアクティビティを記述する振動モデルについて解説した。そこで、ネット炎上のような爆発的なダイナミクスが起きる原因が、ネットワークの Laplacian 行列に固有値が出現することであることを説明した。続いて、固有値に複素数が含まれるネットワークにおいて減衰係数の値を調整してそれぞれどのような振動がみられるかを調べ、結果、減衰係数が小さい値のときは複素固有値の影響により発散するが、減衰係数を大きくすると発散が起きなくなることを示し、ネット炎上の対策技術として利用できることを示した。次に、振動モデルに基づき、ネット炎上の予兆として振動の中に低周波のうなりと振幅の増大が観測されることを理論的に説明した。最後に、実際にオンライン社会ネットワーク上の時系列データに対して周波数解析を行い、振動モデルの理論の妥当性を検証した。電子掲示板サイト 2ch におけるの 3 つのスレッド内の投稿ログと、Google Trends による単語がある期間に検索された割合を示す指標の時系列データを 8 つ用いて周波数解析を行った。その結果、ユーザーの活性度が高い区間はそうでない区間に比べて低周波モードが強く分布していることが示された。すなわち、振動モデルの予測に矛盾しない結果が得られた。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を頂いた指導教員の會田雅樹教授に感謝致します。また、日常の議論を通じてシミュレーションの指導や研究についての知識、示唆を頂いた作元雄輔先生、川島幸之助先生、塚常健太先生に感謝致します。また、會田研究室のメンバーにはプログラミングや研究の進め方に関するアドバイスを頂きました。感謝致します。

## 参考文献

- [1] R. Bond, C. Fariss, J. Jones, A. Kramer, C. Marlow, J. Settle and J. Fowler, “A 61-million-person experiment in social influence and political mobilization,” *Nature*, vol. 489, no. 7415, pp. 295, 2012.
- [2] S. Asur and B. Huberman, “Predicting the future with social media,” *Proceedings of the 2010 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology-Volume 01*, pp. 492–499, 2010. *First Monday 14*, 2009.
- [3] E. Ferrara and Z. Yang, “Quantifying the effect of sentiment on information diffusion in social media,” *PeerJ Computer Science*, vol. 1, pp. 26, 2015.
- [4] L. Zhang, J. Zhao and K. Xu, “Who creates trends in online social media: The crowd or opinion leaders?,” *Journal of Computer-Mediated Communication*, vol. 21, no. 1, pp. 1–16, 2015.
- [5] 栗木 契, 水越 康介, 宮本 次郎, “日本企業に見るウェブサイトのマーケティング利用,” *マーケティングジャーナル*, vol. 29, no. 1, 2019.
- [6] 神田 晴彦, 鳥山 正博, 清水 聡, “購入に影響を及ぼす情報源と情報発信の変化 ～39 商品カテゴリの横断分析～,” *マーケティングジャーナル*, vol. 32, no. 4, 2013.
- [7] B. Huberman, D. Romero and F. Wu, “Social networks that matter: Twitter under the microscope,” *First Monday*, vol.14, 2009.
- [8] 山口 竜一, 鳥海不二夫, 石井健一郎, “SNS のユーザ行動分析,” *研究報告知能と複雑系 (ICS)*, vol.2009, no.16, pp.69–74, 2009.
- [9] Y. Adachi and F. Takeda, “The impact of online flaming on firm value: The evidence from Japan,” *IPRC Discussion Paper Series no. 14*, 2014.
- [10] P. J. Moor, A. Heuvelman and R. Verleur, “Flaming on youtube,” *Computers in Human Behavior*, vol. 26, pp. 1536–1546, 2010.
- [11] 吉野 ヒロ子, “国内における「炎上」現象の展開と現状 一意識調査を中心に一,” *日本広報学会誌*, vol. 20, Mar. 2016.
- [12] 山口 真一, “ネット炎上の実態と政策的対応の考察 一実証分析から見る社会的影響と名誉

- 毀損罪・制限的本人確認制度・インターネットリテラシー教育の在り方一,” 情報通信学会誌, vol.53, no.8, 2015.
- [13] 山口 真一, “実証分析による炎上の実態と炎上加担者属性の検証,” *Information and Communications Policy Review*, no. 11, Nov. 2015.
- [14] D. Spielman, “Spectral Graph Theory,” Chapter 18 of *Combinatorial Scientific Computing*, Chapman and Hall/CRC, pp. 495–524, 2012.
- [15] F. Chung, *Spectral Graph Theory*, American Mathematical Society, 1997.
- [16] F. Chung, “Lectures on spectral graph theory,” *CBMS Lecture Notes*, AMS Publications, Providence, 1995.
- [17] M. Aida, C. Takano and M. Murata, “Oscillation model for describing network dynamics caused by asymmetric node interaction,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E101-B, no. 1, pp. 123–136, Jan. 2018.
- [18] M. Aida, C. Takano and M. Murata, “Oscillation model for network dynamics caused by asymmetric node interaction based on the symmetric scaled Laplacian matrix,” *The 12th International Conference on Foundations of Computer Science (FCS 2016)*, July. 2016.
- [19] 会田 雅樹, “来るべき超ネットワーク化社会を支える新たなネットワーク基礎理論の胎動,” 電子情報通信学会誌, vol. 100, no. 12, pp. 1379–1384, 2017.
- [20] M. Aida, C. Takano and M. Murata, “Dynamical model of flaming phenomena in on-line social networks,” *IEEE/ACM ASONAM 2017*, pp. 1164–1171, 2017.
- [21] 会田 雅樹, “ネット炎上を含むネットワーク上の爆発的なユーザダイナミクスのモデル化と対策,” 電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会, Jan. 2018.
- [22] S. Furutani, C. Takano and M. Aida, “Network resonance method: Estimating network structure from the resonance of oscillation dynamics,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E102-B, no. 4, pp. 799–809, Apr. 2019.
- [23] S. Furutani, C. Takano and M. Aida, “Proposal of the network resonance method for estimating eigenvalues of the scaled Laplacian matrix,” *The 8th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS 2016) Workshop (WIND 2016)*, 2016.
- [24] S. Furutani, C. Takano and M. Aida, “Method for estimating the eigenvectors of a scaled Laplacian matrix using the resonance of oscillation dynamics on networks,” *IEEE/ACM ASONAM 2017*, pp. 615–618, Aug. 2017.
- [25] S. Sugimoto and M. Aida, “Reconstructing the Laplacian matrix to estimate social network structure by using compressed sensing,” *Nonlinear Theory and its Applications, IEICE (NOLTA)*, vol. 10, no. 4, pp. 496–506, Oct. 2019.



- [26] S. Sugimoto and M. Aida, “Estimating the structure of social networks from incomplete set of observed information by using compressed sensing,” *IEEE LATINCOM 2017*, Nov. 2017.
- [27] C. Takano and M. Aida, “Proposal of new index for describing node centralities based on oscillation dynamics on networks,” *IEEE GLOBECOM 2016*, Dec. 2016.
- [28] C. Takano and M. Aida, “Revealing of the underlying mechanism of different node centralities based on oscillation dynamics on networks,” *IEICE Trans. Commun.*, vol. E101-B, no. 8, pp. 1820–1832, Aug. 2018.
- [29] A・P・フレンチ, 振動・波動, 培風館, 2000.
- [30] D. Derks, A. H. Fischer and A. E. R. Bos, “The role of emotion in computer-mediated communication: A review,” *Computers in Human Behavior*, vol. 24, pp. 766–785, 2008.
- [31] 会田 雅樹, 情報ネットワークの分散制御と階層構造, 情報ネットワーク科学シリーズ第3巻, コロナ社, 2015.
- [32] D. J. Watts and S.H. Strogatz, “Collective dynamics of ‘small world’ networks,” *Nature* 393, pp. 440–442, 1998.
- [33] B. Bollobás, *Modern graph theory*, Springer-Verlag, New York, 1998.
- [34] A.-L. Barabási and R. Albert, “Emergence of scaling in random networks,” *Science*, vol. 286, pp. 509–512, 1999.
- [35] M. Uchida and S. Shirayama, “Analysis of network structure and model estimation for SNS,” *Transactions of Information Processing Society of Japan*, vol. 47, no. 9, pp. 2840–2849, 2006.
- [36] K. Yuta, N. Ono and Y. Fujiwara, “Structural analysis of human network in social networking services,” *Transactions of Information Processing Society of Japan*, vol. 47, no. 3, pp. 865–874, 2005.
- [37] Cyrille Rossant, 菊池 彰訳, IPython データサイエンスクックブック ー対話型コンピューティングと可視化のためのレシピ集, オライリージャパン, 2015.
- [38] *2ch*, <https://www.2ch.sc/> .
- [39] *Google Trends*, <https://trends.google.co.jp/trends/?geo=JP> .
- [40] 長谷 航一, 会田 雅樹, “ネットワーク上の減衰振動モデルに基づくネット炎上対策技術,” 電子情報通信学会 コミュニケーションクオリティ研究会, 信学技報 CQ2017-112, vol. 117, no. 486, pp. 51-56, Mar. 2018.
- [41] K. Nagatani and M. Aida, “Flaming countermeasure technology for online social networks based on the damped oscillation model,” *The 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2018)*, pp. 176-179, Sep. 2018.

- [42] 長谷 航一, 高野 知佐, 会田 雅樹, “ネット炎上発生の予兆検出のための理論的枠組,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会, BS-6-6, Sep. 2018.
- [43] K. Nagatani, C. Takano and M. Aida, “Experimental verification for detecting omen of flaming phenomena in online social networks,” *The 7th Japan-Korea Joint Workshop on Complex Communication Sciences 2019 (JKCCS 2019)*, Jan. 2019.
- [44] K. Nagatani, C. Takano and M. Aida, “Experimental study on detecting the omen of flaming phenomena in online social networks: Theory testing of the oscillation model for online user dynamics,” *IEEE INFOCOM 2019 Workshop on the Communications and Networking Aspects of Online Social Networks (CAOS'19)*, Apr. 2019.
- [45] K. Nagatani, C. Takano and M. Aida, “Spectral analysis of user interests for experimental verification of the oscillation model for OSNs,” *IEEE BigData 2019*, pp. 6160-6162, Dec. 2019.