

令和 4 年 5 月 14 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03661

研究課題名(和文)粘着系・摩擦系における動的転移の連続性と前駆現象

研究課題名(英文)Continuity and Precursor Phenomena of Dynamic Transitions in Adhesion and Friction Systems

研究代表者

山崎 義弘 (Yamazaki, Yoshihiro)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：10349227

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：(1)粘着テープの剥離で観られる時空パターンについて、時間差を考慮した大域的かつ非対称局所的相互作用をもつ確率セルオートマトンモデルを構築し、解析を行った。
(2)粘着テープの剥離で見られるスティックスリップ(自励振動)はリミットサイクル振動として理解され、一般に連続変数に基づく常微分方程式系で議論される。我々は、リミットサイクル振動を有する連続力学系に対してトロピカル差分を行って得られた離散力学系に着目した研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粘着テープ剥離で観られる動的転移とその前駆現象は、実用的に重要でテーマである。また、より一般に、これらの現象は分岐現象・時空パターン形成現象として捉えることができ、非線形動力学、非平衡統計力学の観点からも興味深い現象であるといえる。特に、時空パターン形成現象については、連続系、および、離散系のモデルが構築されているが、両者の間にどのような数理的関係があるかという問題は、ウルフラム第9問題としても広く知られている重要な問題である。

研究成果の概要(英文)：(1) A stochastic cellular automaton model with global and asymmetric local interactions was constructed and analyzed for the space-time pattern observed in the peeling of adhesive tape, taking into account the effect of time difference.
(2) Stick-slip vibration observed in the peeling of adhesive tape is understood as limit-cycle, which is generally discussed by an ordinary differential equations. From the dynamical systems with this limit-cycle oscillation, we derived a discrete dynamical systems by tropical discretization.

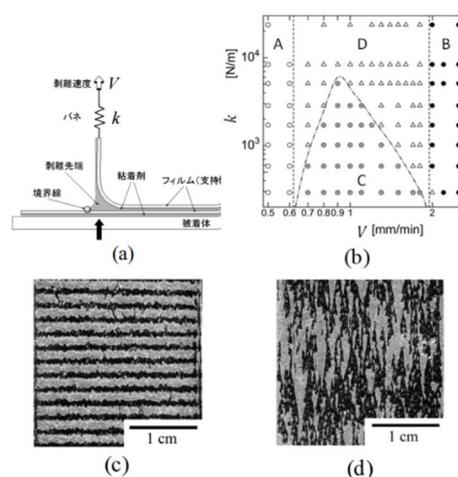
研究分野：非線形動力学、非平衡系の物理学

キーワード：非線形動力学 超離散 数理モデリング 粘着 統計物理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

粘着テープの剥離において、定常状態からスティック・スリップ振動状態へと転移する際に、条件によって振幅が連続的に変化する場合と不連続な場合が存在する。この転移の連続性は摩擦系の実験および粘着系の数理モデルでそれぞれ独立に報告されている。しかしながら、これら2つの系で報告されている結果の共通点・相違点に対する議論は不十分であった。我々は、本研究の開始までに、剥離パターン形成・動力学特性・統計的性質に関する研究を行っていた。特に、実験結果を包括的に統一して表現することのできる力学系モデルを提案していた。このモデルは、剥離が定常状態からスティック・スリップに転移する振る舞いを再現することができる。さらに、このモデルを用いて、転移の際に前駆現象として振幅の変化が連続的に起こる場合と不連続な場合があることを発見していた。そしてこの発見が、摩擦系のすべりで報告されている実験結果 (T. Baumberger, et al., Nature, 367 (1994) 544.) と類似していることに着目し、図(a)のように粘着テープを平板に貼り、剥離速度 V とバネ定数 k をコントロールパラメータにしてテープの剥離実験を行っていた。その結果、図(b)に示した横軸 V 、縦軸 k とした動的相図を得た。領域 A, B, D が定常剥離、領域 C がスティック・スリップ剥離の領域を表している。図(c)と図(d)はそれぞれ領域 C と D で得られた剥離パターンを示している。領域 C と D で観られる時空パターン形成が本研究の対象である。



参考文献：Y. Yamazaki, A. Toda, Pattern formation and spatiotemporal behavior of adhesive in peeling, Physica D: Nonlinear Phenomena, 214 (2006) 120.

2. 研究の目的

粘着テープの剥離で生じる動的転移について、非線形動力学・統計物理学の観点から理解を深める。

3. 研究の方法

「2. 研究の目的」で説明したとおり、非線形動力学・統計物理学に基づいて構築したモデルに対して、数値解析、ならびに、超離散化することによって得られたセルオートマトンを解析する。

4. 研究成果

【2019年度】

(1) 粘着テープを平板に貼り、剥離速度 V とバネ定数 k をコントロールパラメータにしてテープの剥離実験を行った結果得られた、剥離の時空パターンについて、時間差を考慮した大域的かつ非対称局所的相互作用をもつ確率セルオートマトンモデルを構築し、モデルの妥当性について、考察を行った。特に、セルオートマトンモデルの導出においては、以前に提案していた微分方程式に対して超離散法を適用した。このとき、時間の離散化において、複数のモデルの可能性が生じたため、モデルから得られた時空パターンに対して、パーコレーションの解析を行うこと

によって、モデルの妥当性を議論した。この研究成果については、2019年9月に開催された日本物理学会・日本応用数理学会、ならびに、2020年3月に開催された日本物理学会（実地開催は中止・概要原稿提出による発表）で発表を行った。さらに、研究成果については、JPSJに出版された。

成果の内容は以下の通りである。異なる時間で作用する大域的かつ非対称局所的相互作用をもつ以下の確率セルオートマトン (CA) モデルを用いて議論を行った。

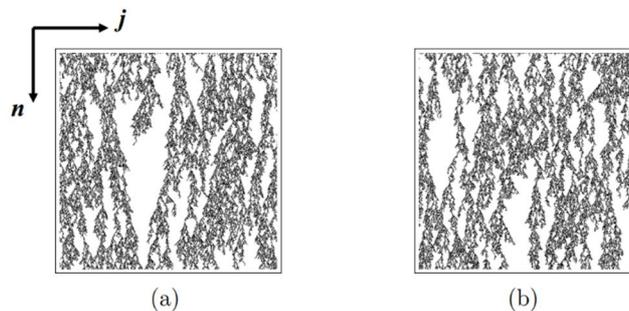
$$U_j^{n+1} = f_{254}(U_j^{n+1}, U_j^{n+1}, U_j^{n+1}) - \theta_j^{n'}(\bar{U}^{n''} - c)$$

ただし、 $U_j^n \in \{0,1\}$ は、離散時刻 n 、離散位置 $j (= 1, 2, \dots, N)$ における双安定性を表す状態変数であり、 $f_{254}(U_j^{n+1}, U_j^{n+1}, U_j^{n+1})$ はエレメンタリーセルオートマトン (ECA) rule 254 に従う非対称局所的な相互作用である。また、確率変数 $\theta_j^{n'}(\bar{U}^{n''} - c)$ は大域的相互作用を表す項であり、

$$\theta_j^n(x) = \begin{cases} U_j^n & \text{w.p. } x \\ 0 & \text{w.p. } 1-x \end{cases}$$

で定義される (\bar{U} は U_j^n の平均)。ここで、 n' は大域的相互作用が U_j^n に作用する時間を表す離散時刻であり、 n'' は n もしくは n' の値をとる (いま、それぞれを Type I、Type II と呼ぶ)。

我々は、両タイプのセルオートマトンモデルにおいて、ある統計量に違いが見られるにもかかわらず、得られる CA パターン (下図) が両モデル共に粘着テープ剥離実験において観られる時空パターン [3] を再現することを、パーコレーションの手法を用いて示した。



(a) Type I ($c = -0.18$) (b) Type II ($c = 0.037$)

(2) 本研究に関連して、粘着の物理についてのレビュー記事を執筆した。具体的には、以下のような内容について、執筆を行った。まず、分子スケールから日常生活のスケールまで、広範囲に渡る空間スケールで生じる現象が粘着・剥離に関わっていることに着目した。従って、粘着・剥離のメカニズムを理解するには、現象を観る空間スケールに応じた階層的な見方が有効であることを強調した。そして、粘着テープの剥離を例にして、標準的な見方である「バルクと表面」に加え、「形と動き」という見方の可能性について、いくつかの事例を挙げて紹介した。

【2020年度】

(1) 粘着・皮膜剥離解析装置を用いて、粘着テープ剥離時の剥離先端の観察を行った結果、剥離先端に観られる周期的な糸引き構造に生じた欠陥が伝播していく様子を確認した。実際、剥離先端において、周期的な糸引き構造には安定な間隔が存在する一方で、何らかの不均一性により、安定な間隔で剥離が進展することが阻まれる。このような不均一性によって周期的な糸引き構造に欠陥の生じ、その欠陥が剥離先端内で一方向に伝播することを確認した。

(2) 我々の先行研究では、粘着テープの剥離系を力学系として観て数理モデルを構築した際、超離散法によって、その数理モデルからセルオートマトンを導出した。この先行研究の流れを発展して、超離散力学系の構築を試みた。実際には1次元系で観られる分岐現象として、トランスクリティカル、ピッチフォーク、サドルノードに着目し、それぞれの連続系における標準型に対して、超離散極限公式を適用することによって、対応する max-plus 方程式が導出された。重要な点は、この導出した max-plus 方程式が、もとの標準型で観られる分岐現象に関するダイナミクスの一部を保持している点である。例えば、ピッチフォーク分岐であれば、分岐点前後で、一つの安定解を持つ状態から、二つの安定解と一つの不安定解を持つ状態に変化するが、対応する max-plus 方程式においても、分岐パラメータが存在し、同様の状態変化を示すことがわかった。この研究は、本研究課題を発端として派生の研究テーマともいえるが、超離散力学系、または、max-plus 力学系ともいふべき新しい研究テーマを開くものとして期待される。なお、本研究は当初予期していない研究成果であることを特記しておく。

成果の内容は次の通りである。一次元の非線形ダイナミクスにおける代表的な分岐を示す三つの標準型の方程式に着目した。

$$\frac{du}{dt} = r + u^2 \quad (\text{サドルノード})$$

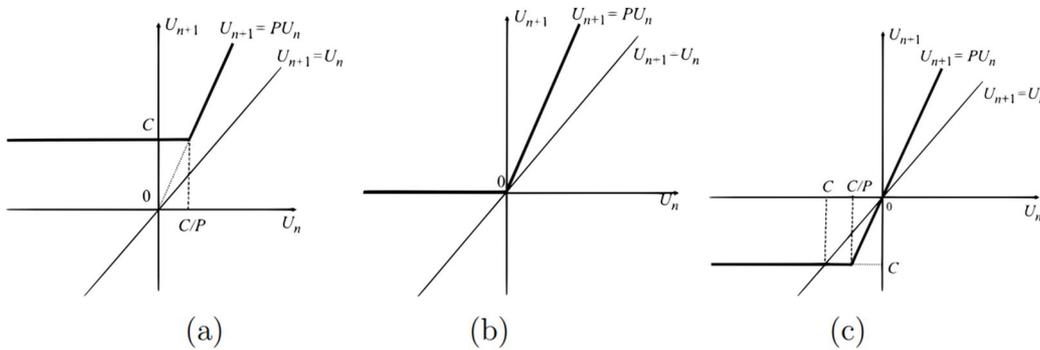
$$\frac{du}{dt} = ru - u^2 \quad (\text{トランスクリティカル})$$

$$\frac{du}{dt} = ru - u^3 \quad (\text{超臨界ピッチフォーク})$$

これらの標準型各々に対し、 u の平行移動及びトロピカル差分化を適用し超離散化を行うことで、対応する超離散方程式を導出した。例えば、サドルノード標準型の非線形方程式に対する超離散方程式は以下の max-plus 方程式で与えられる。

$$U_{n+1} = \max(2U_n, C)$$

ここで、 C は r に対応する分岐パラメータである。この得られた超離散方程式を区分的線形な離散力学系とみなし、元の標準型との間で、固定点の安定性及び分岐について比較を行った。さらに、各超離散方程式に対応するグラフ解析を行い、超離散方程式の動力学の性質を考察した。例えば、上記の超離散方程式において、 $C > 0$ 、 $C = 0$ 、 $C < 0$ に対するグラフを図示したものが下図 (a)-(c) である。この図を用いる事で、固定点への収束、発散のダイナミクス、及び分岐の特徴を視覚的につかむことができた。



【2021年度】

粘着テープの剥離で見られるスティックスリップ(自励振動)はリミットサイクル振動として理解され、一般に連続変数に基づく常微分方程式系で議論される。我々は、リミットサイクル振動を有する連続力学系に対してトロピカル差分を行って得られた離散力学系に着目した研究を行った。具体的な実施事項は以下の通りである。

(1) リミットサイクルを有するモデルとして Selkov モデルに着目し、トロピカル差分化した離散力学系が Neimark-Sacker 分岐を示すことを確認した。トロピカル差分化されることによって、時間刻みに相当するパラメータが導入されるが、その値に依存せずリミットサイクル振動が出現するパラメータ領域の存在することを明らかにした。

(2) このトロピカル差分化された Selkov モデルに対して、超離散極限公式を用いて得られた max-plus 方程式(超離散 Selkov モデル)もリミットサイクル振動することを確認した。また、超離散リミットサイクルには、安定なリミットサイクル(アトラクター)だけでなく、不安定なリミットサイクル(リペラー)が存在することを確認した。

(3) 超離散 Selkov モデルを一般化したモデルを考案し、そのモデルを解析することによって、超離散化されたリミットサイクルの挙動を解析した。特に、解の挙動に着目することによって、超離散リミットサイクルに含まれる点の数がどのように決定されるかを明らかにした。

(4) トロピカル差分化された Selkov モデルに含まれるパラメータ依存性を議論した。実際、リミットサイクルの位相に着目し、リミットサイクル内に含まれる位相の密度をその関数として描画した。そして、描画した図に基づいて、超離散 Selkov モデルがトロピカル差分化された Selkov モデルにおいて、 α を $+$ にした場合に対応していることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shousuke Ohmori, Yoshihiro Yamazaki	4. 巻 61
2. 論文標題 Ultradiscrete Bifurcations for One Dimensional Dynamical Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Mathematical Physics	6. 最初と最後の頁 122702(12pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0012772	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 Shousuke Ohmori, Yoshihiro Yamazaki	4. 巻 88
2. 論文標題 Comments on Statistical Properties for Cellular Automaton Models with Probabilistic Global and Asymmetric Local Rules	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 105001 (2pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.105001	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 山崎義弘	4. 巻 12
2. 論文標題 粘着・剥離のメカニズム:階層的な理解へ	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 月刊ファインケミカル	6. 最初と最後の頁 14-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大森祥輔・山崎義弘
2. 発表標題 一次元力学系における超離散方程式について
3. 学会等名 日本応用数理学会2020年度年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山崎義弘
2. 発表標題 粘着・剥離の物理
3. 学会等名 日本接着学会講座「基本を深く学ぶ接着基礎講座」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大森祥輔、山崎義弘
2. 発表標題 時間差を考慮した大域的かつ非対称局所的相互作用をもつ確率セルオートマトンモデルの考察
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大森祥輔、山崎義弘
2. 発表標題 大域的かつ非対称局所的に相互作用した双安定素子集団の超離散方程式に基づく考察
3. 学会等名 日本応用数理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大森祥輔、山崎義弘
2. 発表標題 大域的かつ非対称局所的に相互作用した双安定素子集団のダイナミクスに対する確率超離散モデルについて
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

〔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
---------	---------