

戦略的創造研究推進事業
(社会技術研究開発)
令和元年度研究開発実施報告書

「人と情報のエコシステム」研究開発領域

「冪則からみる実社会の共進化研究
-AIは非平衡な複雑系を擬態しうるか-

田中(石井) 久美子
(東京大学先端科学技術研究センター 教授)

目次

1. 研究開発プロジェクト名	2
2. 研究開発実施の具体的内容	2
2-1. 研究開発目標	2
2-2. 実施内容・結果	2
2-3. 会議等の活動	7
3. 研究開発成果の活用・展開に向けた状況	8
4. 研究開発実施体制	8
5. 研究開発実施者	9
6. 研究開発成果の発表・発信状況、アウトリーチ活動など	10
6-1. シンポジウム等	10
6-2. 社会に向けた情報発信状況、アウトリーチ活動など	10
6-3. 論文発表	11
6-4. 口頭発表（国際学会発表及び主要な国内学会発表）	11
6-5. 新聞／TV報道・投稿、受賞等	12
6-6. 知財出願	12

1. 研究開発プロジェクト名

冪則からみる実社会の共進化研究-AIは非平衡な複雑系を擬態しうるか

2. 研究開発実施の具体的内容

2-1. 研究開発目標

大域的な冪則は、非平衡環境下にあるステークホルダーが、次々と意思決定を行った帰結として、複雑系において成立する。昨今のAIが逐次に生成する系でも冪則は成立し、その有効性の一つのカギとなっている。それでは、AIが生成する擬複雑系と実際の複雑系では何が異なるのか。複雑系が非平衡環境を前提とすることを手がかりとして、両者の乖離を見極める。AIの限界を明らかにし、AIを利用する大規模システムを持続可能とするために必要となる概念を、技術の観点から提案する。本プロジェクトは以上を基礎的に研究するテーマ1とその社会実装を行うテーマ2があり、両者は共進化の関係にある。

テーマ1では、AIが生成する擬似時系列と実データとの乖離を、冪則を指針として解明する。経済データ、言語データを例とし、以下の三つの事柄を定性的に探求する。

1. 複数知られる冪則の中でどれが成り立つのか。
2. 冪則が成り立っていて、なお差異がある部分はどの部分か。
3. 冪則に基づくAIの評価方法の試案を策定する。

また、可能な範囲で「成り立たない冪則は、AIをどのように改良すれば成り立つのか」も考える。

テーマ2ではテーマ1の社会実装を行い、特に日本における投資活動を事例とする。現在、投資界ではITによる意思決定支援が当然視されており、市場に期待される本来的機能を安定的に維持するための方策が模索されている。本プロジェクトでは、

1. アルゴリズム取引に関する調査・議論を深化させる。
2. シナリオ分析:国際的に知られるシナリオ分析を日本に適応し、具体化する。
3. 2をふまえて金融商品取引法を再検討する。2019年5月の改正は、事後的ログの解析による規制が主であるが、取引に関わるAIを事前、事中で評価する可能性を探る。

全体計画書からの変更はない。

2-2. 実施内容・結果

(1) スケジュール

実施項目	平成29年度 (H29. 10～ H30. 3)	平成30年度 (H30. 4～ H31. 3)	平成31年度 (H31. 4～ R2. 3)	令和2年度 (R2. 4～ R2. 10)
テーマ1-1 : データ準備	←→			
テーマ1-2 : 数理モデルが生成する系がどの冪則を満たすかの調査		←→		

テーマ1-3：数理モデルが生成する系と自然発生的な系の差			←————→	
テーマ1-4：AIの限界の提言				←————→
テーマ2-1：体制構築，サーベイ (冪則比較・海外比較)	←————→			
テーマ2-2：アルゴリズム取引の調査		←————→		
テーマ2-3：フォアサイト、政策試案 (シナリオプランニングの実施、評価と実質化)			←————→	
テーマ2-4：政策提言・コミュニティ結成など社会実装				←————→

(2) 各実施内容

○テーマ1

2017, 2018年度に、研究の体制が構築され、基礎的検証が進んだ。具体的には人的な連携体制を整え、大規模ストレージならびに世界最速のGPUであるTeslaV100を搭載する計算機を配備した。これを受けて、自然言語ならびに株式データでさまざまなAIモデルを構築した。モデルには最新の深層学習モデルも含み、AIならびに実データが生成する系が冪則においてどのように異なるのかの探求を進めた。

冪則には分布とゆらぎの2種類の観点からのものがある。そのうち、非平衡性を表現する冪則であるゆらぎの計測方法として新手法を2018年度に考案し、これにより、ゆらぎの観点から冪が成立しているのかが明確にわかるようになった。これをAIモデルに網羅的に適用し、言語モデルにおいて以下が明らかとなった。

- 深層学習以前のモデルは、ゆらぎの冪則は全く満たさない。
- 深層学習の中でも最新のモデルだけが、ゆらぎの冪則を満たす。

以上をふまえて、2019年度は、引き続き探求を続けた。

2-2のスケジュールに示す実施項目の1-2, 3, 4について、以下の研究項目を実施した。

○実施項目1-2: 数理モデルが生成する系がどの冪則を満たすかの調査

2019年度は、実データ、擬似データなど諸データで、冪則が成立しているかどうかの綿密な調査を継続した。

● 自然言語

自然言語については、2018年度に実データ、AIデータのどれで何が成り立つのかがだいたい明らかとなった。前述のように、冪則は、Zipf則とゆらぎの冪則の二種類のものがある。既存の代表的な言語モデルを網羅し、それぞれにおいてZipf則とゆらぎの冪則が再現されるかを調査した。

● 株式データ

株式データについては、2018年度後半から本格的に取り組みを進め、2019年度も検証を進めた。2018年度からさまざまな既存の取引アルゴリズムを試しているが、自然言語分野とは状況がまったく異なり、既存のどのモデルも性能が低すぎ、冪則をほとんど満たさな

い状況であった。このため、新しい予測モデルを工夫した上で、霧則が成り立つかどうかを確認し続けた。株式データのモデルは、自然言語のデータよりも巨大であるため、よりよい予測を行うためには、よい深層学習機が必要であったため、2018年度末に最新型の深層学習機を配備し、2019年度はこれを用いて大規模な深層学習モデルを考案し予測を行った。結果として得られた予測モデルが、どの霧則を満たすのかを確認した。

合わせて、東証との共同研究を開始した。株価データについての研究成果が上がりつつあるだけでなく、東証に知見のフィードバックをすることより社会実装を行う機会が得られている。

未発表の事前の結果ではあるが、上の言語モデルの表に類する結果が得られており、この点を2020年度に確認する。

○実施項目1-3: 数理モデルが生成する系と自然発生的な系の差

言語モデル、株式モデルにおいて、数理モデルと自然発生的な系の差を、時系列とエージェントモデルの観点から検証した。

● 時系列のモデル

霧則を満たす数理モデルとそうでないものをふまえ、実データと数理モデルの差異を定性的に明確にした。2018年度は、言語モデルを通してゆらぎが、人とAIの差を生み出すことがわかった。2019年度は、その背景にあるポイントは何か、つまりゆらぎが霧を満たす条件を考え、霧を満たす数理モデルが、実データとなお異なる点は何かを明確にした。

● エージェントモデル

エージェントモデルを用いて、以下の二つの研究に取り組んだ。

第一に、金融市場取引におけるAI技術のモデリングの研究を行った。実際の取引で使用されているAI技術のレビュー、及び将来的なAIエージェントの能力の予測に基づいたAIエージェントモデルの精緻化を行い、今後の金融市場のエージェントモデル研究においてAIエージェントを導入していく際の基礎モデルを作成した。

○テーマ2

○実施項目2-3-1: シナリオプランニングの実施

2019年度は、2018年度までに実施した「霧則」の有無に基づくフォーサイトを基に、テーマ1での成果である「ゆらぎの霧則」を考慮したフォーサイトを実施し、2018年度までに得られた政策オプションの精密化を目指した。この実施のため、ステークホルダー（銀行、クオンツ、市場運営者、市場参加者、監督者など）から代表者の参加を募り、立場

の相違に基づく意見の多様性を反映したシナリオを作製した。なお、HFTの要素技術（高速取引のためのデータ基盤、アルゴリズム）の影響範囲は株式市場にとどまらず、生活空間の諸課題（売電、C2C取引、さまざまなサービスの自動化）に及ぶことから、広く社会



一般（特に IoT や DLT による自動取引）に与える影響についても洞察を行った。2019 年度は、2018 年度までに実施した「冪則」の有無に基づくフォーサイトを基に、テーマ 1 での成果である「ゆらぎの冪則」を考慮したフォーサイトを実施し、2018 年度までに得られた政策オプションの精密化を目的としたフォーサイト活動を行った。

○実施項目2-3-2: シナリオプランニングの評価と実質化

実施項目2-3-1で作製されたシナリオおよび政策オプションに対して、ステークホルダーによる評価を実施した。この評価には、シナリオの内容に対する評価と、シナリオの社会的インパクトに対する評価の両者が含まれる。

(3) 成果

○実施項目1-2: 数理モデルが生成する系がどの冪則を満たすかの調査

- 自然言語

Zipf則だけ、ゆらぎの冪則だけでは、さまざまな言語モデルが満たすが、両方を同時に満たすのは記憶を長期化するなど工夫を凝らした深層学習だけであることがわかった。右表に一覧をまとめる。

言語モデル	マルコフモデル	文法的モデル(各文は独立)	Simon過程 PY過程	深層学習(単純) RNN	深層学習(先端) XXX-LSTM
	← 古い				新しい →
Zipf則 稀少性	○	○	○	○	○
Taylor則 塊現象	×	×	×	×	○ <small>今日 言語モデルが 冪乗則を初めて 再現</small>

得られた知見について学術論文化を進め、また、前年度まで得られた言語に関する成果については、アウトリーチとして、学術書籍の出版を準備した。

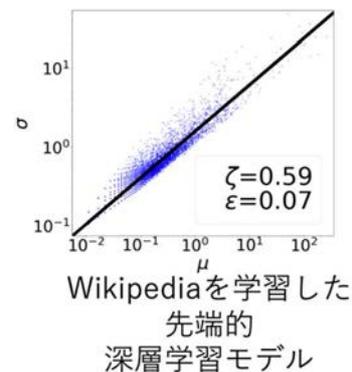
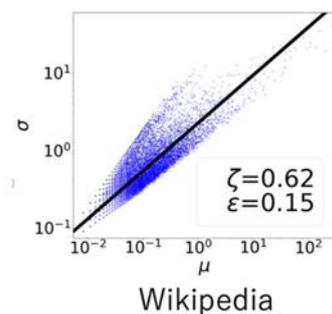
- 株価データ

未発表の事前的な結果ではあるが、上の言語モデルの表に類する結果が得られており、この点を2020年度に確認する。

○実施項目1-3: 数理モデルが生成する系と自然発生的な系の差

- 時系列のモデル

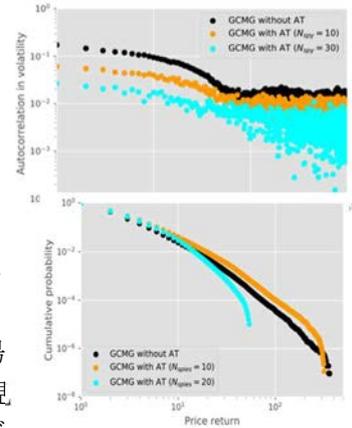
数理モデルが生成する系のゆらぎは、自然発生的な系のそれよりも、明らかに小さいことがわかる。このことは、冪指数を通してはっきり得られる。ゆらぎは Taylor 解析を通して解析することができる。独立同一分布に従う時系列の場合、0.50 となり、ゆらぎが大きいほど、指数は大きくなる。たとえば、右図は、Wikipedia に対する Taylor 解析結果を示している。一点は一単語を表し、指数が 0.62 であることが示されている。一方で、Wikipedia を学習した先端的な深層学習モデルは、0.59 である。傾きも自然言語のそれに満たない上に、点群の厚みも貧弱で、単語の出現の豊かさが自然言語と、数理モデルでは、まったく異なる。



このように、指数、ならびに点群の形状の観点から、数理モデルと自然発生的な系では差がはっきり現れることがわかった。

- エージェントモデル

構築したエージェントモデルを用いて、金融市場における暴走エージェントの検出についての研究を行った。金融市場の抽象モデルである Grand Canonical Minority Game に暴走エージェントを導入したときのシステムの挙動の変化を、マクロな観点 (e.g. 長相関を示す寡則の指数の変化、関数系の変化、価格の予測可能性の変化、etc.) 及びミクロな観点 (e.g. エージェントの行動パターンの変化) から観察し、それぞれの観点から暴走エージェントが検出可能かについて検討した。AI トレーダーの人数・情報収集範囲を大きくしていった場合、市場のボラティリティの長相関は減衰するという結果が見られた。一方、価格リターンの分布に関しては、AI トレーダーの人数を増やしていった場合は分布の裾が短くなるのに対し、AI トレーダーの情報収集範囲を大きくしていった場合には価格リターンの分布の顕著な変化が見られなかった。



○実施項目1-4: AIの限界の提言

最終年度に向けて、実施項目1-3をふまえ、以下を考えた。

- AI モデルのなじみ度は寡則の何により明らかとなるか。現在の仮説では「ゆらぎ」の寡指数が、高い感度でAI のモデルのなじみ度を評価することがわかっており、ゆらぎの本質を明確に分節し、提言に向けて貢献を続けた。
- AI モデルがすべての寡則を満たし、なお問題となることは何か。この点について、最終年度にむけて検証を続けた。

○テーマ2

○実施項目2-3-1: シナリオプランニングの実施

フォーサイトを行うため、テーマ1からのインプット(「べき則」と「長相関」に関する洞察)を考慮したシナリオ作成を行った。シナリオ作成においては、主要なステークホルダー(金融機関、行政、研究者、市民)を巻き込んだフォーサイトワークショップを開催し、テーマ2メンバーが作成したベースシナリオを基に、各ステークホルダーの意見を導入していくという方法で実施した。シナリオとしては古典的な2x2マトリックスの形式をとり、軸1としては「資源(計算資源と投資資源)の集中度(Distribution of Resources)」、軸2として「データに関する規制の強度(Data Regulation)」を取った。各々の軸が+か-であるかにより、「大航海時代(The age of navigation)」(++)、

「テクニカルワールド(The technical world)」（-+）、「マーケット・サファリ(The market safari)」（--）、「エージェント・ガーデン(The agent garden)」（-+）という4つのシナリオとした。このシナリオを国立シンガポール大学公共政策大学院で行われたフォーサイトワークショップにおいて提示し、得た意見を反映させた。

○実施項目2-3-2: シナリオプランニングの評価と実質化

シナリオの社会的インパクトを高めるため、ステークホルダーが利用しやすい形での、シナリオのパッケージングを試みた。ここで

のパッケージングは、古典的な静的ドキュメントによるシナリオ記述だけでなく、映像やゲーミフィケーションを用いたマルチモーダルなシナリオ表現を意図し、文書以外のシナリオ表現には、映像（アニメ、インタラクティブWeb）、カードゲーム、寸劇（スキット）などが典型的な例として挙げられるが、得られたシナリオに対して適切な表現手法を選択し、その結果についてステークホルダーからの評価を得た。



(4) 当該年度の成果の総括・次年度に向けた課題

プロジェクトの目標に対する進捗であるが、当初の予定どおり2019年度に基礎的な知見は得られた。

最終年度の2020年度は、現在得られている知見を論文として発表したり、アウトリーチとしての書籍を出版したりなど、まとめの活動となる。また、得られた成果の社会実装を行う。社会実装としては、

- 東証へのフィードバック(JPX ペーパー、共同研究)
- 学術書籍の出版(英語版はSpringer, 日本語版は東大出版会より出版)
- シナリオプランニングを用いたフォーサイト
- 内閣府への日本の投資現象に関するフィードバック

が含まれる。

2-3. 会議等の活動

年月日	名称	場所	概要
毎週	研究ミーティング	東京大学駒場キャンパス	グループA内のHITEに関する研究ミーティング
隔週	研究ミーティング	東京大学柏キ	グループB内のHITEに関する研究

	グ	キャンパス	ミーティング
2019.4.23	グループ長ミーティング	政策研究大学院大学会議室	グループ長2名(田中, 七丈)で進捗状況、今後の方針などを相談した
2019.5.14	グループ長ミーティング	東京大学駒場キャンパス	グループ長2名(田中, 陳)で進捗状況、今後の方針などを相談した
2020.2.18 AM	グループ長ミーティング	グループ長ミーティング	グループ長2名(田中, 陳)で進捗状況、今後の方針などを相談した
2020.2.18 PM	グループ長ミーティング	グループ長ミーティング	グループ長2名(田中, 七丈)で進捗状況、今後の方針などを相談した

3. 研究開発成果の活用・展開に向けた状況

4. 研究開発実施体制

グループA(テーマ1) グループリーダー 田中久美子

東京大学先端科学技術研究センター
実施項目

2-1に記載したテーマ1の内容の中で、エージェントモデル以外の部分を担当する。

グループB(テーマ1) グループリーダー 陳 昱

東京大学大学院新領域創成科学研究科
実施項目

2-1に記載したテーマ1の内容の中で、エージェントモデルに関する部分を担当する。擬データの生成、霧則に関する事前研究が含まれる。

グループC(テーマ2) グループリーダー 七丈直弘

東京工科大学
実施項目

2-1に記載したテーマ2の内容を実施する。

5. 研究開発実施者

研究グループ名：A

氏名	フリガナ	所属機関	所属部署	役職 (身分)
田中 久美子	タナカ クミ コ	東京大学	先端科学技術 研究センター	教授
高橋 峻太郎	タカハシ シ ユンタロウ	東京大学	大学院工学系 研究科先端学 際工学専攻	博士課程学 生
杜 鑫	ト キン	東京大学	大学院情報理 工学系研究科	修士課程学 生
岡島 康恵	オカジマ ヤ スエ	東京大学	先端科学技術 研究センター 田中久美子研 究室	事務補佐員

研究グループ名：B

氏名	フリガナ	所属機関	所属部署	役職 (身分)
陳 昱	チン ユ	東京大学	大学院新領域 創成科学研究 科	教授
片平 啓	カタヒラ ケ イ	東京大学	大学院新領域 創成科学研究 科人間環境学 専攻	博士課程学 生

研究グループ名：C

氏名	フリガナ	所属機関	所属部署	役職 (身分)
七丈 直弘	シチジョウ ナオヒロ	東京工科大学	コンピュータ サイエンス学 部	教授
馬場 靖憲	ババ ヤスノ リ	麗澤大学	経済学部	特任教授
白川 展之	シラカワ ノ ブユキ	文部科学省	科学技術・学 術政策研究所	主任研究官

6. 研究開発成果の発表・発信状況、アウトリーチ活動など

6-1. シンポジウム等

6-2. 社会に向けた情報発信状況、アウトリーチ活動など

(1) 書籍・冊子等出版物、DVD等

- ・ Kumiko Tanaka-Ishii. “Machine vs. structure of language via statistical universals” In Interdisciplinary Perspective on Math Cognition, chapter Chapter, Springer, 2019年9月

(2) ウェブメディアの開設・運営

(3) 学会（6-4.参照）以外のシンポジウム等への招聘講演実施等

- ・ 田中久美子「自然言語の数理的普遍」
日本学術会議第9回 計算力学シンポジウム
場所：日本学術会議1F講堂、2019年12月11日
- ・ 田中久美子「自然言語の中にひそむ数理的普遍性」
数学パーが世界を変える2020(JST主催)
場所：秋葉原コンベンションホール、2020年2月2日
- ・ アジア生産性機構(APO)主催「生産性向上に向けた戦略的未来洞察上級ワークショップ」に講師として参加。アジア諸国のNPO(National Productivity Organization, 多くの場合経済系の省庁が代表する)の担当者20名を集めた、フォーサイトの手法を紹介するためのワークショップ(計5日間)であり、前半(2.5days)を担当し講演とワークショップを開催した。
Naohiro Shichijo, “Understanding strategic foresight and its usage in the policy-making process”
Naohiro Shichijo, “Horizon Scanning: establishing skills for sense-making for anticipating future trends”
Naohiro Shichijo, “Scenario-building: Establishing skills for visioning future consequences of disruptive technologies”
at Workshop on Advanced Strategic Management for Enhancing Productivity, Organized by Asian Productivity Organization, Tanoa International Hotel, Fiji, Aug 12-16, 2019
- ・ フォーサイトに関する国際標準化会議 Technical Working Group Meeting on Strategic Foresight Specialists Certification Scheme 11-13 November 2019 Odakyu Hotel Century Southern Tower, Tokyo, Japan (11-13 November 2019)に七丈直弘が委員として参加。
- ・ フォーサイトに関する一般向け講演

七丈直弘「未来洞察ワークショップ」ロレアル東京アカデミー主催, 2019年11月16日
七丈直弘「働き方の未来とその可能性」j.union株式会社主催, 2019年11月23日
七丈直弘「未来洞察からみたICTの今後」株式会社JECC主催, 2019年12月16日

6-3. 論文発表

(1) 査読付き (6 件)

●国内誌 (0 件)

●国際誌 (6 件)

- Kumiko Tanaka-Ishii and Tatsuru Kobahashi. “Addendum: Another Explanation About the Bounds of the Taylor Exponent” Journal of Physics Communications, volume3, number8 2019年8月 DOI:10.1088/2399-6528/ab3616
- Shuntaro Takahashi, Yu Chen, and Kumiko Tanaka-Ishii. “Modeling financial time-series with generative adversarial networks” PhysicaA, 527(121261) 2019年8月 DOI:10.1016/j.physa.2019.121261
- Shuntaro Takahashi and Kumiko Tanaka-Ishii. “Evaluating computational language models with scaling properties of natural language” Computational Linguistics, 45(3) 2019年10月 DOI: 10.1162/coli_a_00355
- Geng Ren, Shuntaro Takahashi, Kumiko Tanaka-Ishii. “Entropy Rate Estimation for English via a Large Cognitive Experiment Using Mechanical Turk” Entropy, 21(12) 2019年12月 DOI: 10.3390/e21121201
- Yushi Yoshimura, Hiroshi Okuda and Yu Chen. “A mathematical formulation of order cancellation for the agent-based modelling of financial markets” Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Vol. 538, 122507, 2020
- Kei Katahira and Yu Chen. “An extended speculation game for the recovery of Hurst exponent of financial time series” arXiv preprint arXiv:1909.02899, 2019 (accepted and will be published as this year’s special issue in New Mathematics and Natural Computation)

(2) 査読なし (0 件)

6-4. 口頭発表 (国際学会発表及び主要な国内学会発表)

(1) 招待講演 (国内会議 0 件、国際会議 0 件)

(2) 口頭発表 (国内会議 0 件、国際会議 3 件)

- Kei Katahira, Yutong Chao, Yu Chen. “The remain of speculative patterns in price changes” The 24th Annual Workshop on Economic Science with Heterogeneous Interacting Agents (WEHIA), London, UK, June 2019.
- Naohiro Shichijo, Kumiko Ishii-Tanaka, “Impact of AI&A on Financial Transactions and its effect on Market Structure”, NUS Foresight Unconference, Lee Kuan Yew School of Public Policy, National University of Singapore, Singapore, July 25, 2019
- Toru Fujino, Yu Chen. “Do Stylized Facts in Financial Markets Collapse Due to the Artificial Intelligence Analysis of Other Traders Behavior” Conference on Complex Systems, Singapore, October 2019.

(3) ポスター発表 (国内会議 1 件、国際会議 0 件)

- 福地成彦, 田中久美子、「教師あり文章埋め込みに対する敵対的正則化の効果」、言語処理学会第26回年次大会(オンライン開催)、2020年3月17日

6-5. 新聞／TV報道・投稿、受賞等

- (1) 新聞報道・投稿 (0 件)
- (2) 受賞 (0 件)
- (3) その他 (0 件)

6-6. 知財出願

- (1) 国内出願 (0 件)
-
- (2) 海外出願 (0 件)
-