

戦略的創造研究推進事業
(社会技術研究開発)
研究開発実施終了報告書

「人と情報のエコシステム」研究開発領域
「寡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-」

研究開発期間 平成 29 年 10 月～令和 3 年 3 月

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. プロジェクトの達成目標	3
1-1. プロジェクトの背景	3
1-2. プロジェクトの達成目標	3
2. 研究開発の実施内容	4
2-1. 実施項目およびその全体像	4
2-2. 実施内容.....	5
3. 研究開発成果	12
3-1. 目標の達成状況.....	12
3-2. 研究開発成果 & 3-3. 今後の成果の活用・展開に向けた状況.....	15
4. 領域目標達成への貢献	17
5. 研究開発の実施体制	18
5-1. 研究開発実施体制の構成図	18
5-2. 研究開発実施者.....	19
5-3. 研究開発の協力者	19
6. 研究開発成果の発表・発信状況、アウトリーチ活動など	20
6-1. 社会に向けた情報発信状況、アウトリーチ活動など	20
6-2. 論文発表.....	24
6-3. 口頭発表（国際学会発表及び主要な国内学会発表）	26
6-4. 新聞報道・投稿、受賞など	28
6-5. 特許出願.....	28

1. プロジェクトの達成目標

1-1. プロジェクトの背景

AIがなぜ有効であるのかは、統計やアルゴリズムの分野において、数理的観点から説明が試みられている。しかし、これらは人間的な視点からの説明には必ずしもなっていないため、AIの深い理解にはつながりにくい。

生態系ならびに自然発生的な人間の系では当然成り立つ性質がある。その性質の一群として、幕則があり、特に近年の複雑系科学の探究において明らかにされつつある。そこで、AIが幕則をどこまで満たすのかを問うことにより、AIの有効性を考えるのが本研究の基礎にある。本研究では、以下の三つの問いを考えることができる。

- ・ 人の系には、どのような幕則があるのか。
- ・ AIが生成する擬似系はそれらをどの程度満たすのか。
- ・ AIが人となじめないのは具体的にどのような点においてか。

本プロジェクトでは、AI の人へのなじみ度を、人の系で成り立つ幕則を通して調べる。技術と社会の共通基盤としてのAIの限界を、「幕則」の観点から基礎的に分析する。それをふまえて、AIを社会に取り入れる際の未来予測フォーサイトを通し、社会実装を行う。

以上から、本提案には、AIに関する基礎研究と、社会実装の二つの側面があり、共進化を形成する。基礎研究では、社会で用いられる数理モデルとしてのAIの有効性の限界を明確にして、人とAIが互いに分をわきまえた共創を実現するための知見を提供する。一方、社会実装の観点からは、AIを導入した場合に必要な制度設計をフォーサイトにより考察し、社会実装に関する問題点を考える。

社会実装の具体的事例としては、日本の投資を取り上げる。投資における高速取引の評価は今や必須の政策課題であり、AIを利用したアルゴリズム取引が市場に参入してなお健全な市場を維持するための知見が必要となる。

この技術と社会の共進化を通して、本提案は、投資活動を対象として、技術と社会を橋渡しする研究のプラットフォームを形成する。このような試行によって、本提案による共進化プラットフォームは、他の分析対象、たとえば、AIの導入による自動運転や自動裁判などにも適用する可能性が生まれる。高度IT技術を利用するための法制度など社会的な枠組みを作るための知見が蓄積され、技術が人となじんだ状態を作り出すための社会技術の開発方法論が生まれる。

1-2. プロジェクトの達成目標

大域的な幕則は、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幕則は成立し、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、幕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. 複数知られる幕則の中でどれが成り立つのか。
2. 幕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. 幕則に基づくAIの評価方法の試案を策定する。

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

一方、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の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、途中で評価する可能性を探る。

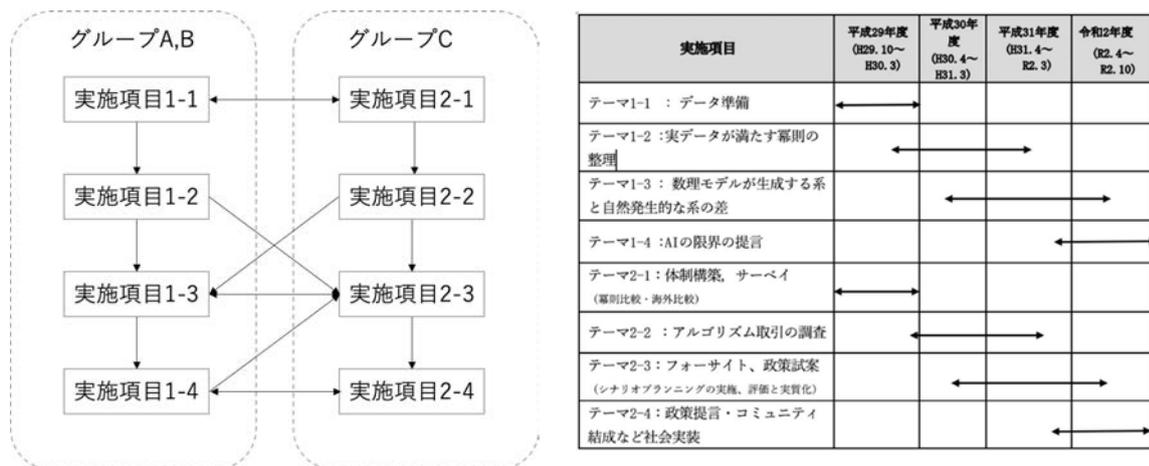


図1: 実施項目間の関係図(左) ならびにスケジュール(右)

2. 研究開発の実施内容

2-1. 実施項目およびその全体像

前述のプロジェクトの目標を達成するために、本研究は、以下の実施項目を行う。実施期間については、図1(右)に記載した。

実施項目 1-1 体制構築・データ準備

実施項目 1-2 実データが満たす幕則の整理(言語データ、株価データ)

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(時系列データ、エージェントモデル)

実施項目 1-4 AIの限界の提言

実施項目 2-1 体制構築・サーベイ(幕則比較・海外比較)

実施項目 2-2 アルゴリズム取引の調査

実施項目 2-3 フォーサイト、政策試案（シナリオプランニングの実施、評価と実質化）

実施項目 2-4 政策提言・コミュニティ結成など社会実装

実施項目間の関係図は、図 1(左)に示した。実施項目 1 は、グループ A, B が担い、実施項目 2 はグループ C が担う。いずれの実施項目も、1 から 4 へ順番に取り組む。その中で実施項目 1 と実施項目 2 は、互いに成果をフィードバックする。特に、各実施項目の後半では、実施項目 1 側から実施項目 2 へ、また、実施項目 2 のフィールドの知見を実施項目 1 にフィードバックする。

実施項目 1 では、言語・株価データを対象として研究する。初年度に体制を構築した後、2 年目以降に実データに知られる寡則を整理する(1-2)。それらを擬似データが満たすかを調査し、数理モデルと自然発生的な系の差を明確にし(1-3)、寡則の観点から AI の限界の提言を行う。

実施項目 2 では、実施項目 1 での探求の方向性に対する示唆を与えるべく AI と金融市場に関するフォーサイトの動向を継続的に調査し、その結果を随時実施項目 1 に提供するとともに、実施項目 1 で得られた成果からフォーサイトを行うための手法の確立を行った。また、実施項目 1 で知見が得られる毎に、その内容を基にしたフォーサイトを行い、その結果をステークホルダーとの討議によって評価・修正を行った。また、実施項目 1 で最終的に得られた知見からフォーサイトを行い、その成果の政策提言を行うとともに、フォーサイトのツールキットの整備と可視化を行い、プロジェクト終了後にも継続的にフォーサイトを行うことができる体制整備を行った。

最終的な、アウトプットは、実施項目 1-4 の知見、ならびに、実施項目 2-4 となる。全グループとも、得られた成果を元にアウトリーチ、社会実装を行う。

2-2. 実施内容

2.2.1 2017 年度

初年度は研究体制を立ち上げ、基礎データを準備した。

実施項目 1-1: 研究体制立ち上げ

初年度は研究体制の立ち上げを行った。実施にあたっては、データを扱う専門家をリーダーとする必要があるため、グループ A, グループ B を構成した。

グループ A, B の内容を議論して調整し、グループ A は時系列(主として言語ならびに経済時系列)、グループ B はエージェントモデル(主として経済市場のモデル)の研究を担うものとした。研究を実施する上で必要な機器類をグループ A 内に共有し、その上で研究員(学生)も共有した。研究員は問題となる観点別に、言語、経済のデータに対して同じ考察を行い、グループ A, B 内で研究議論を行う。

本探求の背景には複雑系科学がある。このため、統計数理研究所の高頻度データの専門家 1 名、ならびにシドニー大学の複雑系科学を専門とする教員 1 名と、得られた知見に関する議論を行うための体制作りを行った。

また、テーマ2との連携の方策（スケジュール、頻度など）を策定した。テーマ2ではアルゴリズム取引を議論する会合を定期的に行っているが、その会合にテーマ1関係者が出席した。この他、テーマ1,2のグループリーダーが集まって話し合う機会を定期的に設けた。初年度は、高速取引に用いられるAIアルゴリズムの概要について、グループCからフィードバックを受け、そのエッセンスを数理モデルとして考えた。

実施項目 1-1: データの準備

グループA,Bが、さまざまなデータを用意した。まず、実データとして自然言語データ、株価データを準備したが、その際、データを格納するためのストレージが問題となった。このため、追加予算を配分いただき、必要な機器類を整え、その上で、ストレージ上に、以下のデータを整備した。

- ・ 自然言語のデータについては、H29年度終了のさきがけを通して集めたデータを基礎とすることができ、数多くの言語のデータが、すでに入手済みであり、本研究のための前処理を行った。
- ・ 経済データについては、1から入手を要した。ニューヨーク株式市場データをNYSEから入手した。入手後、研究員が前処理を行った。

また、以下の二つの擬似データを準備した。

- ・ 複雑系科学で提案されている Simon, BA モデルなどの擬似データを発生させるプログラムを作成した。(グループA)
- ・ 深層学習を利用して、実データを学習の上、擬似データを発生させるプログラムを作成した。このモデルでの擬似データの作成には、時間がかかるため、一度擬似データを作成し、実データ同様に前処理を行ってアーカイブする必要がある。深層学習のアーキテクチャとしては、多層 LSTM, CNN, SimpleRNN など考えられる。(グループA)
- ・ 株式市場のエージェントモデルを利用して、擬似データを作成した。本研究では Grand Canonical Minority Game ならびに Speculation Game の二つのモデルを用いた。(グループB)

実施項目 2-1: 体制構築・サーベイ

体制を構築し、国内外状況のサーベイ、データ準備などを行った。金融システムにおけるAI活用の状況および展望について調査を行った。H29年度は体制構築した。日本における主要関連機関との間で連携を構築し、情報共有（勉強会、研究会、講演会等）を行った。連携先候補(NISTEP、金融庁、日銀)と連携方法を調整した。各国の金融規制官庁(米国、英国、フランス等)、国際機関(OECD、EC、世界経済フォーラム)における類似テーマについての調査状況について文献調査およびヒアリング調査を行った。また、経営工学・政策科学の分野で知られる株式市場の寡則に関する論文サーベイを行った。

2.2.2 2018年度

実施項目 1-2: 実データが満たす寡則の整理(言語データ、株価データ)

実データで冪則として何があるのかを整理し、その上で、言語、株価の両データにおいて冪則が成立しているかどうかを調査した。

実データに対して知られている冪則は複数あるが、それらは数理的に関係しており、ある冪則から別の冪則が導出される場合がある。それらを整理すると、冪則には、系の要素(言語では単語など、経済では価格リターンなど)の冪則と、要素の関係として成り立つ冪則がある。複数の候補の中から、結果を代表する冪則を、実データにおいて多角的吟味の上、選んだ。

自然言語については、5つ程度の冪則が成立することが知られているが、そのうちのいくつかについては、未だ成立の是非が疑問であるものがある。冪則を実データで精査し、本研究で経験則として扱うものを策定した。Zipf 則ならびに、長相関、そして、ゆらぎ解析を選んだ。長相関解析、ゆらぎ解析は、いずれも長期記憶特性を解析するものである。言語に対する新しいゆらぎ解析手法を探究し、その冪指数が、ゆらぎの度合いを判別することを突き止めた。

株式データについては、10 を超える冪則があることが知られるが、こちらも言語同様に、要素の冪則と、時系列の冪則に分けられる。前者はリターンの分布が代表し、また後者は長相関が代表する。

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(時系列データ、エージェントモデル)

2017 年度末に Nvidia の TeslaV100 を搭載する計算機を配備し、2018 年度はいよいよ、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む。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。1-2 の途中結果をふまえ、実データを学習して得られた数理モデルが、実データと何が異なるのかを、時系列モデル、エージェントモデルの二つの観点から探求した。

時系列モデルについては、まず、自然言語について、冪則を満たす数理モデルとそうでないものを網羅的に調べた。また、株式データを学習した数理モデルが、さまざまな冪則を満たすかどうかの調査を行った。特に GAN (Generative Adversarial Network) が、冪則を満たす時系列を生成しうるかどうかを調査した。

エージェントモデルについては、以下の二つを行った。第一に、Speculation Game を用いた研究を行った。AI エージェントのモデル化を行い、金融市場の現実により近い Speculation Game に新たに AI エージェントモデルを定義し、冪則を調べた。また、AI 取引規制の有効性についてもマルチエージェントシミュレーションで検討した。

第二に、Grand Canonical Minority Game モデルを用いた研究を行った。Deep Learning のエージェントを、金融市場の抽象化モデルである GCMG に導入した。DL エージェントの人数、機能の変化により、価格リターンにおける基本的な Stylized Facts の変化を観測し、異なる種類のエージェント間の競争や、協力によってこれらの変化の仕組みを解明した。

実施項目 2-2: アルゴリズム取引の調査

昨年度に構築した関連諸機関と連携をしながら、アルゴリズム取引の現状について把握

した。アルゴリズム取引は、日本だけでなく海外金融機関や金融アルゴリズム専門企業が多数存在し、その全貌は学術的には、まだ把握されていない。本項目では、主要な事業者や研究者に対してインタビューを試み、アルゴリズム取引市場の状況、そこで活用されている科学技術、将来の展望について把握した。

実施項目 2-3：フォーサイトの実施と政策オプションの形成

テーマ1から得られた情報を活用し、アルゴリズム取引が社会に対して与える影響の評価（フォーサイト）を実施した。フォーサイトを行うにあたり、昨年度に実施した国際機関のヒアリングから得られた情報を整理し、既存の関連フォーサイトの結果のメタアナリシスを行うことで、フォーサイトを行う上で踏まえるべき論点の抽出を行った。

研究協力者を中心に、アルゴリズム取引とその社会影響に対して関心がある専門家を募り、フォーサイトワークショップを開催した。フォーサイトの結果は複数のシナリオとして取りまとめ、各々のシナリオがアルゴリズム取引にかかわるステークホルダーに対して与える影響と、その際に求められる施策について分析を行い、政策オプションの形式でまとめた。

2.2.3 2019 年度

2018 年度に得られた知見を深め、実施項目 1-4 ならびに 2-4 に向けてプロジェクトを進めた。

実施項目 1-2：実データが満たす幕則の整理(言語データ、株価データ)

	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				新 →
Zipf 則	○	○	○	○	○
Taylor 則	×	×	×	×	○ 今日言語モデルが幕則を初めて再現

図 2：さまざまな数理モデルと幕則

2018 年度の研究から、幕則は、系の要素(言語では単語など、経済では価格リターンなど)に関するものと、要素の関係に成り立つものあることが整理された。前者は系の稀少性を担い、レアイベントの出現度合いを数理的に記述する。一方、後者については、系の長期記憶があるために、幕が成立する。

自然言語については、この二つの観点からデータの実態を網羅的に調査した。実データにおいて、これらの幕則が成り立っていないものはない。また、2018 年度に新しい解析方法を考案したが、そこで開拓した手法を用い、長期記憶の観点から幕が成立している度合いを計測することを行った。以上の全容については、論文出版に続き、アウトリーチとして、学

術書籍の出版を準備した。

株式データについては、寡則は言語以上に既存研究が多い現状がある。自然言語データにおける寡則との対応の視点から再度整理し直し、言語同様に稀少性と、記憶の長さが株価データを特徴付けることを明らかにした。また、言語に対して生み出した新しいゆらぎ解析の手法を株価の解析にも適用した。また、この年より、本研究の重要なステークホルダーである東京証券取引所と共同研究を開始した。これにより、本成果のフィードバックの可能性が高まった。

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(時系列データ、エージェントモデル)

時系列の数理モデルの中で、寡則を満たすかどうかを、実データとの比較において、定性的に明確にした。主として長期記憶の度合いが、人と AI の差を明確にすることがわかった。寡則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する作業をすすめた。

得られた知見をまとめると、言語においては図 2 のようになる。縦に Zipf 則(稀少性)、Taylor 則(長期記憶) が示され、横軸に既存の代表的な言語モデルが示されている。深層学習以前のモデルは、後者を全く満たさないのに対して、深層学習の中でも最新のモデルだけが、後者を満たす。とはいえ、これらは条件付きであり、その限界について引き続き探究を進めた。また、株価においても同様であるかの探究を進めた。

以上の時系列における AI の振る舞いをふまえ、エージェントモデルを用いて、金融市場における寡則のロバスト性を調査した。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の作成を目指した。

第二に、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。

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、長期記憶の寡指数が、AI モデルのなじみ度を評価するのではという仮説を立てた。AI モデルが寡則を満たしてなお問題となることが何かについて、最終年度に向けて検証を続けた。

実施項目 2-3-1: シナリオプランニングの実施

2018 年度での調査実施中に、欧州を中心としてデータガバナンスに関する意識が高まり、ポスト GDPR 時代のパーソナルデータのプラットフォームによる利用の規制、あるいはポスト GDPR 時代の成長戦略に高い関心が集中した。この情勢を受け、本テーマではデータガバナンスの変化も変数に加えたシナリオの作製を行った。2019 年度は、2018 年度までに実

施した「幕則」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「長期記憶の幕則」と上述のデータガバナンスを考慮したフォーサイトを実施し、シナリオの作製とその評価、2018年度に得られた政策オプションの精密化を行った。この実施のため、ステークホルダーからのフォーサイトワークショップへの参加を募った。その結果、金融系の研究者、金融機関、投資ファンド、金融系監督機関、他の政府機関、その他の関連産業従事者からの参加者を得て、ワークショップの実施を繰り返した。このプロセスを経て、シナリオに対する意見の多様性、国際的な視点を加味し、シナリオの更新を行うことができた。

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。実際には、シナリオの作製と評価は並行して行われており、作製に関与した人物が評価も行っている。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(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)を行った。具体的には、カードゲームの形式でシナリオ分析が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)、カードゲームを通じたシナリオ分析の手法(フォーサイトゲーム)を開発し、それを用いたフォーサイトワークショップを開催した。

2.2.4 2020年度

1-2, 3 は前年度までに主たる研究を終了し、最終年度は、実施項目 1-4、2-4 に注力した。また、当初は予定には含まれなかったが、実施項目 1-3 において、言語と株価の幕則を俯瞰する研究を行った。

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

2020年度前半には、前年度の言語の数理モデルにおける知見を株価データにおいても同様であることを示した。すなわち、深層学習モデル以外の既存の代表的な株価の数理モデルは、二つの幕則を十全には満たさず、満たしたとしても条件付きであった。

オプションとして取り組む予定であった「成り立たない幕則は、AI をどのように改良すれば成り立つのか」について探究した。言語と株価には幕則の観点から似た性質があるため、両方を用いることで、互いを補強する可能性がある。実際にこのようなモデルを実装し、より高性能な株式のポートフォリオの予測ができることを実証した。そのモデル下では、(リターンの)幕則の傾きを抑え、リスクの少ない投資を行うことができる。つまり、両データを用いることで、幕則の観点からのモデルの欠陥を補うことができる。

実施項目 1-4: AI の限界の提言

グループ A, B からは、以下の三つの問いに答えることが課題となっていた。

1. 複数知られる幕則の中でどれが成り立つのか。
2. 幕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. 寡則に基づく AI の評価方法の試案を策定する。

寡則としては、要素の分布に関する寡則が稀少性を、系の特性に関する寡則が長期記憶を特徴付け、言語、株価の両方で成立する。一方で、数理モデルはこの実データと比較すると、稀少性、長期記憶の両方において限界がある。そして、AI の性能は、寡則を計測した際の長期記憶の指数と分布の態様として評価することができる。

得られた知見は、論文としての報告を行った。また、言語について、寡則の全容をまとめた書籍を 2020 年度に出版するべく準備を進めた。

実施項目 2-1: アルゴリズム取引に関するシナリオの他の社会課題への展開

本テーマではアルゴリズム取引に関するシナリオの製作とその社会実装を目的としてきた。だが、ステークホルダーとのワークショップを通じて得られたフィードバックから、作製されたシナリオ群はアルゴリズム取引以外の多くの社会の側面に対しても活用可能であるということが判明した。この状況を活用し、社会実装をより深化させることを目的として、シナリオ分析の多面的な活用を図った。具体的には、近年課題となっている社会課題（SDGs や、WEF の近年のレポートで対象としているような領域）に対して、既に作製したシナリオに基づく分析や、フォーサイトゲームを実施し、その成果をまとめ、アルゴリズム取引に対するフォーサイトの高度化に向けたフィードバックを行った。

2019 年度には常勤スタッフの新規獲得により、本プロジェクトでの人件費負担が軽減されたため、200 万円の予算繰越をしており、本実施項目の遂行は昨年度繰越を行った費用によって賄われた。

実施項目 2-2: アルゴリズム取引に関するフォーサイトの社会実装の実質化

本実施項目では、フォーサイトの成果の実質化に向け、ステークホルダーによるフォーサイト成果の活用を促進を行った。実質化の対象となるステークホルダーとしては、4 種（科学技術行政、金融行政、金融事業者、労働組合）を想定するがこれに限定しない。科学技術行政に対しては、来年度議論が本格化する第 6 期科学技術基本計画での議論に対して、本課題で得られた成果のインプットを行った。具体的には、内閣府が行う「エビデンスに基づく科学技術政策事業」において実施される科学技術基本計画へのインプットを目的とした会議体の中で、本事業の成果を活用した。金融行政に対しては、金融庁のフィンテック担当・日本銀行のフィンテック担当との間で意見交換を深め、金融行政における本プロジェクトの成果の実質化に向けた議論を行った。

金融事業者に対しては、これまでフォーサイトワークショップにおいて貢献のあった、いくつかの金融事業者に対して、フォーサイトゲームを利用してテーラーメイドのフォーサイトを提供し、その成果を中長期戦略策定での活用へに誘導した。既にフォーサイトに参加し、議論に貢献した労働組合に対して、フォーサイトゲームを通じたテーラーメイドのフォーサイトを提供し、その成果を組織戦略改革への活用へに誘導した。

以上の活動を通じて得られたネットワークを基に、継続的な議論を行うことが可能なプラットフォームへと昇華させていった。

3. 研究開発成果

3-1. 目標の達成状況

プロジェクトの目標は達成した。

プロジェクトでは、以下の三つの問いに答えることが課題となっていた。問いそれぞれに対する、本プロジェクトで得られた答えを示す。

1. 複数知られる寡則の中でどれが成り立つのか。

寡則には二種類のものがある。系の要素の分布に関する寡則と、系の特性に関する寡則である。いずれも、言語、株価の実データの両方で成立する。一方、AI が生成する擬似データに対しては、二つを十全に満たすものは、現在のところはない。歴史的にはAI は要素の分布の寡則は半ば満たすが、系の特性の寡則は満たさなかった。近年の高度な深層学習において、初めて両方を半ば満たし始めた。しかし、その満たし方も実データのように完全ではない。

2. 寡則が成り立っていて、なお差異がある部分はどの部分か。

要素の分布に関する寡は、系の要素の稀少性を特徴付ける。系の特性に関する寡は、系の長期記憶を特徴付ける。この両方において、実データの機械処理は、実データとは質的な差がある。機械学習は統計に基づく以上、稀少性を処理できない。また、機械学習は理論的には無限の記憶を持つとはいえ、それは、無限のコーパスから学習した場合であって、実際のコーパスは有限である以上、その記憶の長さは現在は短い。

3. 寡則に基づく AI の評価方法の試案を策定する。

AI の性能は、寡分布の態様の差として評価することができる。

総じて、AI の限界とは、稀少性、記憶の長さの限界である、と述べることができる。

そして、この点をAI において解決することは、簡単ではない。「稀少性」は、現在のAI は実データの統計に基づく以上、切り捨てて処理されざるをえないものである。有り体に言えば、機械は決まったことしか言うことができない。稀少性の扱いそのものを再考しない限り、この問題は解決し得ない。そして、AI 技術の基礎となる深層学習において記憶の長さを伸ばすことは、技術的に困難な課題である。この意味で、本プロジェクトのオプションとして取り組んだ「成り立たない寡則は、AI をどのように改良すれば成り立つのか」については、技術の本質に関わる部分であることから、改良策は簡単ではない。本プロジェクトで得られた知見は、少なくともしばらくの間は深層学習の限界であり続けることが予想される。

以上の結論に対する、各グループの成果を以下に述べる。

グループ A の成果は、上に述べた成果の要であり、図 3 に示されている。グループ A は、寡則の前線を整理し、新しい解析方法を生み出した。その上で、AI と人の系の差異の「見える化」を行った。図では、左に実データ、右にAI による擬似データを示している。上の寡則の左右の比較から、AI の稀少性の限界が、また、下の寡則の比較から、AI の記憶の長

さの限界が見てとれる。図に示したものは、先端的な深層学習の結果の態様であるが、既存の数理モデルでは長期記憶に関する寡則がまったく満たされていない。以上は、言語に対する図であるが、株価データにおいても同様の結果が得られている。このように、近年の深層学習の性能が高い理由を、寡則の観点から「見える」形として説明した。

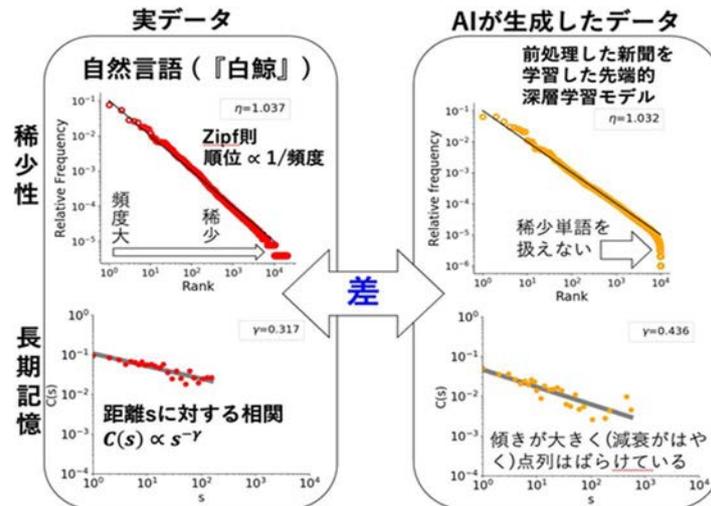


図3: グループ A の成果: 実データと AI の差 さまざまな数理モデル

グループ B は、エージェントモデルを用い、このような寡則が成立する市場に対するアルゴリズム投資の影響を調査した。まず、グループ C のサーベイの結果をふまえ、市場を適切にシミュレーションするエージェントモデルを策定した。その上で、アルゴリズム取引が行われる市場の動向を、グループ A の知見をふまえ、株価リターンの分布ならびに長相関により調査した。代表的な結果が図 4 に示されている。アルゴリズム取引(図中 MT)を増大させると、寡則が壊れてくることが示されている。このことは、多様な投資家から市場が形成されることこそが、寡則の根源であり、今後、アルゴリズム取引が増大することは、市場の崩壊そのものを招く危険性を示している。この他、様々な市場に起こりうるさまざまな要件下で、寡則がどのような変化をするかを調査した。

以上、基礎グループの研究は、日本学術振興会科学研究費挑戦的研究(開拓)「高度科学技術社会の新局面」の一貫の、「寡則の観点からの高度技術の評価方法に関する研究」に引き継がれる。また、本プロジェクトの一貫で東京証券取引所との共同研究を 2019 年度に開始したが、より本格的な共同研究へと発展させることが検討されている。

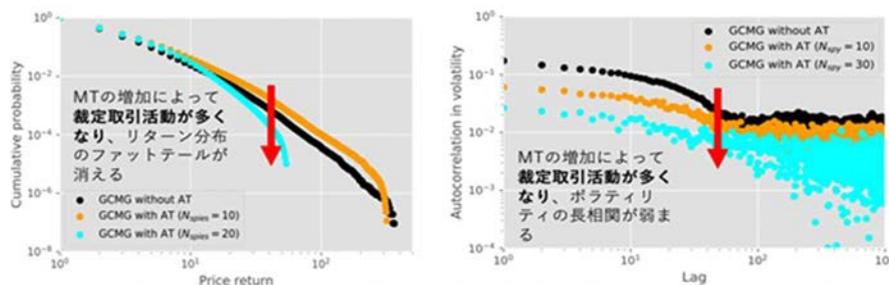


図4: グループ B の成果: 市場におけるアルゴリズム投資の数の影響

グループC は、以上基礎研究から得られた結果を基に、フォーサイトを通じて社会実装を実践した。この実施のため、フォーサイト方法論を改善するとともに、繰り返しフォーサイトを行うことで、研究分担者における習熟度の向上を行った。フォーサイトはグループA・B から新知見が得られる毎に行われたが、グループA・B で得られた最終的な知見に基づくフォーサイトは以下のように行われた。

まず、ドライビングフォースの抽出が行われた。ドライビングフォースとは対象となるテーマの趨勢に影響を及ぼす直接的・間接的な要因を意味する。ホライズンスキャンの結果、直接的な要因として、以下の5つが選ばれた。①財務の安定に関するリスクとレジリエンス、②新たなデータとその分析機能、③バリューチェーンの変化、④グローバルな金融と制度構造の変化、⑤国際的な金融規制、である。また、これら5つの要因に対して影響を与える要因（二次的要因）として、42のトレンドが抽出された。これらのドライビングフォースから変化の軸の1つとして、「プラットフォームによるデータ・計算資源の寡占の有無」が選ばれ、さらにグループA・B で得られた知見を考慮することで、もう1つの変化の軸として「AI エージェントが市場に占める割合に対する規制の有無」が選ばれた。2つの変化の軸に対して、各々2つの変化の相反する変化の方向性を考察し、それらを組み合わせることで4つの未来像が得られた。

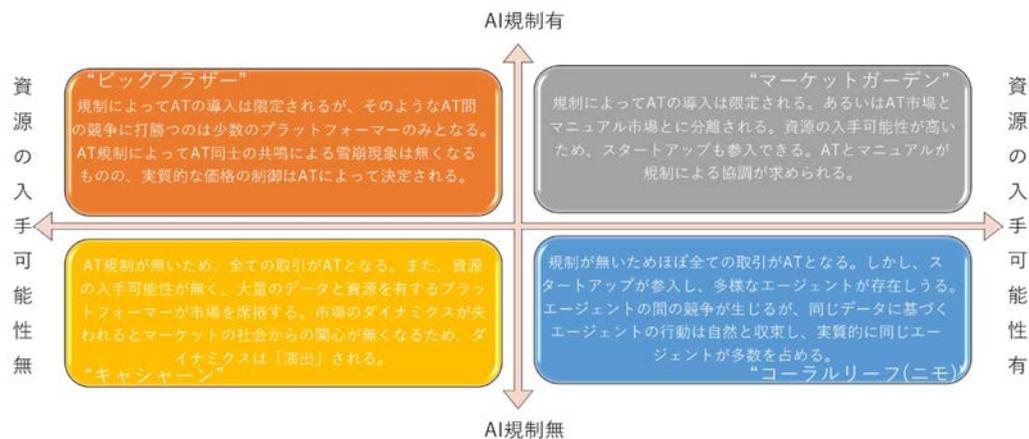


図5 グループC のにおけるシナリオの概要

得られたシナリオの概要が図5に示されている。この内容を土台としてステークホルダーが討議を行う（与えられた情報を基にシナリオを理解し、自らの意見を含めることでシナリオの改善を行う）ためのオンラインツールの開発を行った。

これらの成果の社会実装として、政策提言と労働組織のキャパシティビルディングを行っている。まず、シナリオ分析によって得られた知見を基に「AI時代の金融市場運営に対する提言」として政策提言を行う準備を進めている。提言の骨子は次のとおり：

- 市場の意義は、一定のダイナミクスと公正な価格決定を通じた流動性の提供にある。特定事業者が利益を独占することない、公正な市場を実現するには、マーケットの情報開示を安価に行うことが必要である。（マーケット情報には、リアルタイム性を

伴うデータ（板情報等）が含まれ、その提供には一定のコストが伴うものの、それを低廉とすれば、マーケット参加者が増え、市場の活性化も見込まれる）

- また、自動取引の拡大に際し、その量が増えることによって、自動取引に起因する利益確定行動が増加することにより、リターン分布・ボラティリティ分布が影響を受けることが見込まれる。短期的には、マーケットの安定性が、自動取引エージェントの仕様によって決定されることから、その自由な利用からは不安定化を阻止できず、長期的に見れば、市場の自然さ（「寡則」で示される）の喪失につながることから、市場の健全な成長を阻害する可能性がある。この回避に向け、アルゴリズム取引に対する一定の規制が求められる。

AI の導入による変化は金融市場だけでなく、他の多くの市場でも生じ、その中でも特に社会的関心が高い領域に労働市場がある。そこでグループCの成果の社会実装として、開発したフォーサイト手法とシナリオ分析から得られる含意を労働市場に対して適用することで「働き方の未来」に関する知見を取りまとめ、国内の労働組合、アジア諸国の労働生産性組織（アジア生産性機構への加盟国の労働生産性組織）に対してフォーサイトワークショップを開催し、啓発・普及を行った。

以上、本プロジェクトではA, B, C 三グループが連携しつつ役割を果たし、計画に沿って順調にプロジェクトを進め、目標を達成することができたと考える。

3-2. 研究開発成果 & 3-3. 今後の成果の活用・展開に向けた状況

1. 成果：長期記憶解析の新しい手法

(1) 言語の Taylor 則の解析手法：Taylor 則は、1938 年にまったく別の対象に対して適用され、以来さまざまな複雑系に適用されてきたが、言語に対する適用は行われていなかった。本プロジェクトでは、Taylor 解析の方法を考案し、言語データならびに、擬似データに対する適用を行った。（手法、解析など論文数編をこれに関して発表）

図6に、言語の Taylor 解析の結果例を示す。左2つが、wikipedia を学習した AI が生成したもの、右が wikipedia である。各点は、単語を表す。右図は、左二図よりも傾きが大きく、点に厚みがある。この差から、左が機械であることを判定することができる。

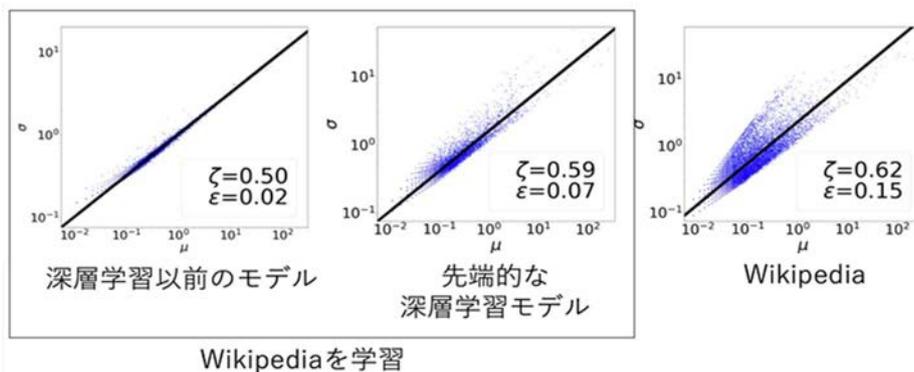


図6：擬似データならびに実データ(wikipedia)の Taylor 解析

(2) 活用・展開：本プロジェクトを推進する一つの基礎的手法となった。なお、長期記憶については、この Taylor 解析以外に、長相関解析を用いる既存手法もある。長相関解析は、寡則が成立するかどうかの判定が難しいことや、指数の意味合いが Taylor 解析より明確ではない。しかしながら、株価に対しては、長相関解析が一般的であることから、この終了報告書では、長相関解析を用いて一貫して説明を行った。

2. 成果：書籍 Statistical Universals of Language (Springer) (和訳『言語とフラクタル』(東大出版会)) 2021 年春出版

(1) 本プロジェクトで得られた知見の概要を言語についてわかりやすくまとめたものである。本内容の骨子は株価データにも一部適用することができる。

(2) 言語に関する寡則が網羅されているため、本プロジェクトの学術的な側面を公開する書籍である。

3. 成果：経済データと言語データを融合した株価ポートフォリオの構築(特許)

(1) 言語と株価データでは寡乗則が共に成り立つ。この性質を利用し、両データを利用して株価の予測をし、より性能の高いポートフォリオとして行う手法を考案した。本プロジェクトのオプションであった「成り立たない寡則は、AI をどのように改良すれば成り立つのか」に取り組んだ成果である。

(2) 活用・展開：現在、このプロジェクトは東京大学 Gap ファンドの支援を受け、発展の方向性を検証中である。

4. 成果：シナリオおよび政策提言

(1) グループ A・B の成果を考慮した金融市場の未来に関するフォーサイトを実施した。その成果はシナリオとしてまとめられワークショップ参加者およびヒアリング対象者に対して開示してきた。

(2) 活用・展開：作成されたシナリオはフォーサイトワークショップで活用している。また、政策提言は関係者(金融庁および財務省)に対して伝えるとともに、Policy Brief として政策研究大学院大学から公開する準備を進めている。

5. 成果：フォーサイトツールキット

(1) グループ A・B から随時提供される科学的知見を基に迅速にフォーサイトを行うために作成したフォーサイトを実施するためのツール群、およびその学習を行うための教材(ビデオおよび PDF) によって構成される。

(2) 活用・展開：フォーサイトツールキットとして、フォーサイトの歴史・手法・活用事例を学習するための教材を作成した。作成した教材は政策研究大学院大学が実施する「科学技術イノベーション政策・経営人材養成短期プログラム」における「政策立案演習」(2020 年 8 月実施)で活用され、中央官庁・研発法人・スタートアップなどの受講生に対して提供された。今後も、フォーサイトを講義内容に含む講義群(一橋大学、政策研究大学院大学、法政大学で実施)で活用するとともに、コンテンツを改善した上で一般公開を目指す。また、ポストコロナへの対応として非対面(オンライン)で実施可能なフォーサイトツールキット

を作成した。これは miro (オンラインホワイトボードツール) 上で構築されており、従来ホワイトボードやポストイットによって実施していたフォーサイトワークショップを完全にオンラインで実施することが可能である。miro 上でのマーケットプレイスである miroverse を通じて無償公開する予定である。

4. 領域目標達成への貢献

3 節の成果に示した具体的成果は、情報技術がもたらしうる変化 (正負両面) を把握・予見し、アジェンダ化することで、変化への対応方策を創出するものである。グループ A, B の成果は、「情報技術がもたらしうる変化 (正負両面) を把握・予見する」ものであり、グループ C の成果は、それを「アジェンダ化することで、変化への対応方策を創出する」ものである。

また、本プロジェクト自体が、問題の抽出、多様なステークホルダーによる規範や価値の検討、それに基づく提示や提言までをサイクルを形成し、研究開発を行ったのであった。このサイクルは、社会と技術の望ましい共進化を促す場や仕組みを共創的するプラットフォームを形成する。

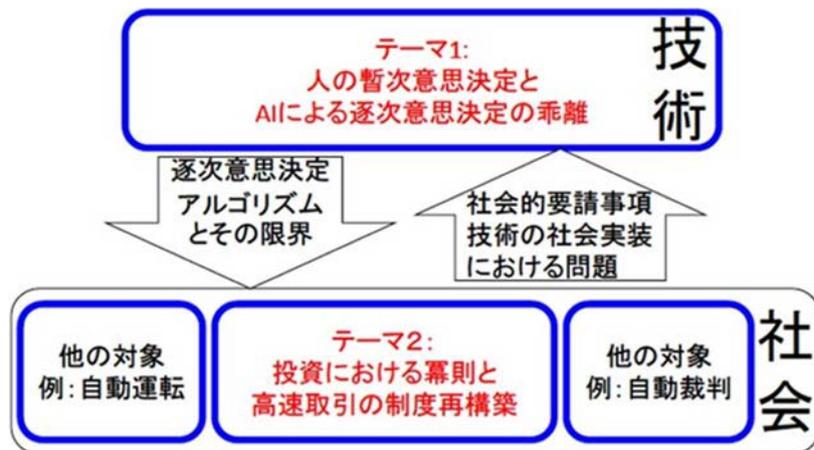


図 7: 本研究が目指した共進化プラットフォーム

上図 7 にその概念図を示している。1 が AI の逐次アルゴリズムとその現実からの乖離を 2 に提示し、2 は 1 に対して技術を社会実装する上で必要な制約事項や社会実装における問題をフィードバックする。このように、テーマ 1 とテーマ 2 は技術と社会の共進化プラットフォームの一例となっている。2 としては、今回の提案では投資活動を例にとっているが、他の対象 (たとえば自動運転など) も考えられ、そこでは本提案と同一の進め方で共進化プラットフォームが構築されることが予想される。

このような共進化プラットフォームの一例としての本研究では、技術は社会実装を前提としたために、有意義な研究を行うことができ、また工学研究の成果は社会実装することが可能となった。また、社会実装側は、理論に基礎付けられた実装を行うことができた。そして、構築されたプラットフォームは、次の体勢に引き継がれ、今後のさらなる成果の基盤と

なった。

以上のように、3 節に説明した個別成果を挙げただけではなく、本プロジェクトは、領域が掲げた目標を達成する枠組みを体現することでも、領域に貢献していると考える。

5. 研究開発の実施体制

5-1. 研究開発実施体制の構成図

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 教授

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

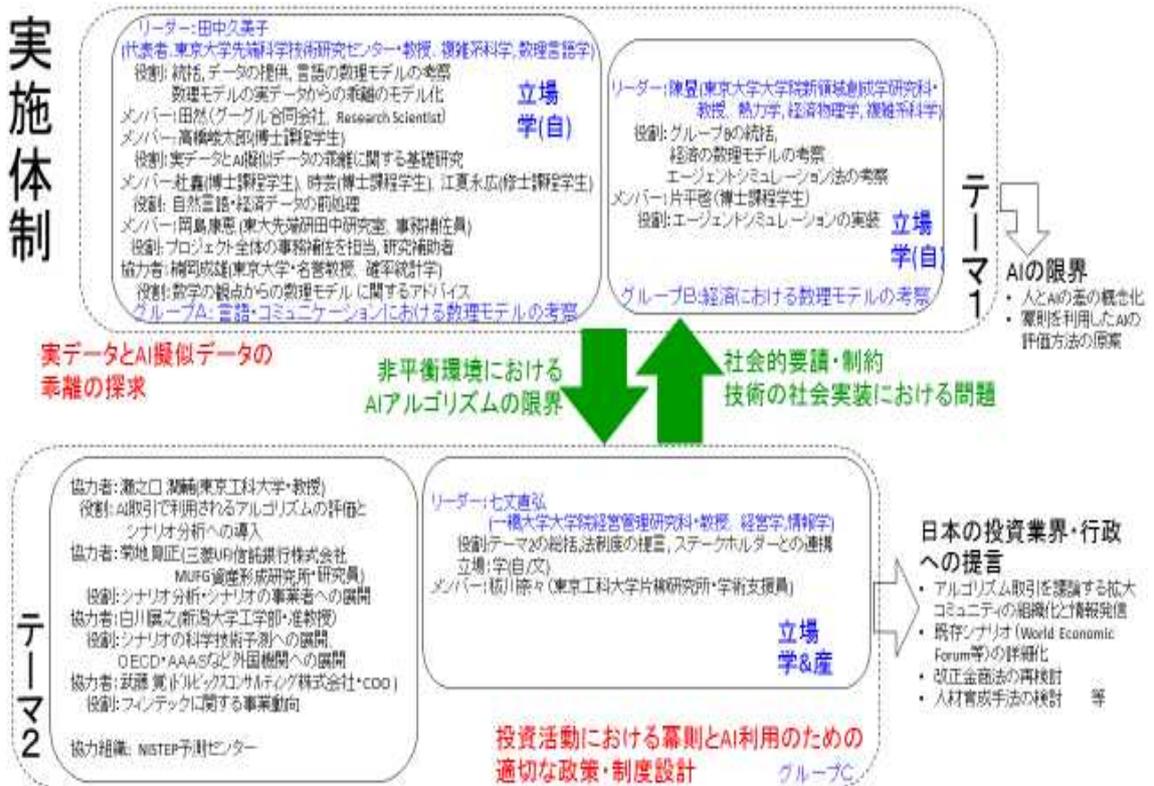
東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授

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

一橋大学大学院経営管理研究科 教授

実施項目 2-1 に記載したテーマ 2 の内容を実施する。



5-2. 研究開発実施者

(1) グループ A(テーマ 1) (リーダー氏名：田中久美子)

役割：テーマ 1 を実施

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
田 然	デン セン	グーグル合同会社		Research Scientist
高橋 峻太郎	タカハシ シュンタロウ	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	大学院工学系研究科 先端学際工学専攻	博士課程学生
時 芸	シー イ	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
江夏 永広	エナツ ナガヒロ	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	事務補佐員

(2) グループ B(テーマ 1) (リーダー氏名：陳 昱)

役割：テーマ 1 を実施

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

(3) グループ C(テーマ 2) (リーダー氏名：七丈直弘)

役割：テーマ 2 を実施

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	一橋大学	大学院経営管理研究科	教授
萩川 奈々	ハライワリ ナナ	東京工科大学	片柳研究所	学術支援員

5-3. 研究開発の協力者

氏名	フリガナ	所属	役職 (身分)	協力内容
楠岡 成雄	クスオカ シゲオ	東京大学	名誉教授	数学の観点からの数理モデ

				デルに関するアドバイス
瀬之口 潤輔	セノクチ ジュンスケ	東京工科大学 コンピュータ工学部	教授	AI 取引で利用されるアル ゴリズムの評価とシリオ分 析への導入
菊地 剛正	キクチ タケマサ	三菱 UFJ 信託銀行株式会社 MUFG 資産形成研究所	研究員	シリオ分析・シリオの事業者 への展開
白川 展之	シラカワ ノブユキ	新潟大学工学部	准教授	シリオの科学技術予測へ の展開、OECD・AAAS など外国機関への展開
武藤 覚	ムトウ サトル	トルビックスコンサルティング(株)	COO	フィンテックに関する事業動向

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. 社会に向けた情報発信状況、アウトリーチ活動など

6-1-1. プロジェクトで主催したイベント（シンポジウム・ワークショップなど）

年月日	名称	場所	概要・反響など	参加人数
2018.4.24	Future Value of Data	文部科学省科学 技術・学術政策 研究所 会議室	英国を拠点とするシン クタンク「future agenda」と共同で開催 したワークショップで あり、データの価値が 将来どのように変化し ていくかをテーマにし た洞察をワークショッ プ形式で行った。議論 は3時間に及び、前半 においてメガトレンド (あらかじめ選択され た30個)の優先順位 付けが行われ、後半で は、優先度が高いと評 価されたメガトレンド についてシナリオの作 成とそのデータの価値	35名

			に対する含意について議論された。	
2018.10.8-9	OECD Government Foresight Network, HITE Foresight Workshop	OECD 本部	OECD では年に 1 回、世界各国の政府や国際機関で未来洞察を行う実務家を集めたワークショップを開催している。ワークショップは 2 日間で構成され、自らが用いている手法の紹介、最近の未来洞察結果の紹介、OECD が行う未来洞察へのコメント、によって構成されている。研究分担者である七丈と白川は HITE 田中プロジェクトで実施中の内容（テーマと手法）について紹介した。	30 名
2018.11.13-14	Talpiot Program Workshop	文部科学省科学技術・学術政策研究所 会議室、および j-feel 会議室	イスラエルにおけるエリートプログラムとして知られる Talpiot(イスラエル防衛軍が運営するエリート養成プログラム)において副指令官として教育プログラムの設計を行っていた Tomer Shussman 氏を招き、同プログラムの紹介、イスラエルのハイテク産業における AI 等先進技術の展望について話題提供を受けた。また、Shussman 氏	60 名

			からの話題提供に対する日本での含意について、グループディスカッションを行った。	
--	--	--	---	--

6-1-2. 書籍、DVD など論文以外に発行したもの

- (1) Kumiko Tanaka-Ishii. “Machine vs. structure of language via statistical universals” In Interdisciplinary Perspective on Math Cognition, chapter 4, Springer, 2019年9月
- (2) Geng Ren, Shuntaro Takahashi, and Kumiko Tanaka-Ishii. Entropy rate estimation for English via a large cognitive experiment using Mechanical Turk. In Information Theory and Language, chapter 9, pages 137-151. MDPI, December 2020.
- (3) Kumiko Tanaka-Ishii. Statistical Universals of Language: Between Mathematical Chance and Human Choice. Springer, 2021. to appear.
- (4) 田中久美子. 言語とフラクタル. 東京大学出版会, 2021. to appear.
- (5) Kumiko Tanaka-Ishii. A Global Structure of Sign Systems: Not A Metaphor. Hartman, 2021. to appear.

6-1-3. ウェブメディア開設・運営

6-1-4. 学会以外のシンポジウムなどでの招へい講演 など

- (1) Naohiro Shichijo, “Recent Progress of Japanese Science and Technology Foresight”, STPI Science Policy Seminar, National Applied Research Laboratories, Taiwan, Nov 17, 2017
- (2) 七丈直弘「海外における未来洞察の政策・戦略立案における活用状況」第50回横幹技術フォーラム, 横断型基幹科学技術推進協議会主催, 日本大学経済学部7号館講堂, 2017年11月24日
- (3) 田中久美子. 「Mathematical Properties of Language」. ミュンヘン大学東京大学訪問先端研講義. 東京. 2018年9月10日
- (4) 田中久美子. 「言語に内在する数理的普遍: 複雑系科学の観点から」. 東京大学メディアコンテンツ特別講義 II. 東京. 2018年12月20日
- (5) 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。
- (6) 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。

- (7) Naohiro Shichijo, "Understanding strategic foresight and its usage in the policy-making process"
- (8) Naohiro Shichijo, "Horizon Scanning: establishing skills for sense-making for anticipating future trends"
- (9) Naohiro Shichijo, "Scenario-building: Establishing skills for visioning future consequences of disruptive technologies"
- (10) at Workshop on Advanced Strategic Management for Enhancing Productivity, Organized by Asian Productivity Organization, Tanoa International Hotel, Fiji, Aug 12-16, 2019
- (11) 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
- (12) 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
- (13) 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
- (14) 田中久美子. 第 2 回 AI クロスオーバーラウンジ「AI は学際研究の対象か手法か目的か、それとも……」東京大学. オンライン討論. 東京大学 AI センター主宰. 東京. 2020年11月25日
- (15) 七丈 直弘「大手企業の開放特許はイノベーションを誘発するタネとなりうるか？」(パネリスト)超異分野学会, 2020年4月23日
- (16) 七丈 直弘「COVID-19 による現在と科学技術イノベーションのあるべき姿」(実行委員長およびパネリスト)研究・イノベーション学会 第 35 回シンポジウム (Web 開催), 2020年8月4日
- (17) 七丈 直弘「金融市場の未来」(講演)SBS ホールディングス主催ワークショップ, 2020年9月25日
- (18) 七丈 直弘「ヘルスケアの未来」(講演)ライオン株式会社主催ワークショップ, 2020年9月29日
- (19) 七丈 直弘「重要科学技術領域の特定に向けた見える化の試みについて」(話題提供)内閣府総合科学技術イノベーション会議有識者会議 2020年11月26日
- (20) 七丈 直弘「働き方の未来とその可能性」(講演)パナソニック LS 労働組合主催セミナー, 2020年11月27日
- (21) 七丈 直弘「フォーサイトデザインワークショップ」(ディスカッサント)政策研究大学院大学 SciREX センター・大阪大学 ELSI センター主催, 2020年11月25日・12月4日
- (22) 七丈 直弘「社会的課題解決のためのミッション志向型科学技術イノベーション政策推進における課題」(ディスカッサント)JST-CRDS 主催科学技術未来戦略ワークショップ, 2020年12月17日

6-2. 論文発表

6-2-1. 査読付き (23 件)

●国内誌 (2 件)

- (1)七丈直弘「ドイツ連邦政府における予測活動“Social Cange 2030”にみられる社会トレンドと社会課題」STI Horizon, 文部科学省 科学技術・学術政策研究所, 3(4), pp. 17-22, <http://doi.org/10.15108/stih.00103> (2017) (査読あり)
- (2)七丈直弘・白川展之「Society5.0を具現化する上で世界的な課題となるデータとその価値に関するイマージング・イシューの抽出の試み」STI Horizon, Vol.4, No.3, pp.16-21, 2018年9月

●国際誌 (21 件)

- (1)Shuntaro Takahashi and Kumiko Tanaka-Ishii. Do neural nets learn statistical laws behind natural language? PLoS One, 2017. <https://arxiv.org/abs/1707.04848>.
- (2)Tatsuru Kobayashi, Kumiko Tanaka-Ishii. Taylor Law of Human Linguistic Sequences ACL (long paper), 2018, to appear, in press. (2月に投稿, 4月に採択, 自然言語処理の最難関の国際会議)
- (3)Ye Sun and Yu Chen. "On the mechanism of phase transitions in a minimal agent-based macroeconomic model," Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018.
- (4)Kei Katahira, Yu Chen, Gaku Hashimoto and Hiroshi Okuda. "Development of an agent-based speculation game for higher reproducibility of financial stylized facts," Physica A:Statistical Mechanics and its Applications,2017
- (5)Kumiko Tanaka-Ishii and Tatsuru Kobayashi. Taylor' s law for linguistic sequences and random walk models. Journal of Physics Communications, 2(11), November 2018.
- (6)Shuntaro Takahashi and Kumiko Tanaka-Ishii. Cross entropy of neural language models at infinity—a new bound of the entropy rate. Entropy, 20(11), November 2018. Online Journal <https://www.mdpi.com/1099-4300/20/11/839/htm>.
- (7)Kumiko Tanaka-Ishii. Long-range correlation underlying childhood language and generative models. Frontiers Psychology, September 2018. Section Quantitative Psychology and Measurement.
- (8)Daiki Hirano, Kumiko Tanaka-Ishii, and Andrew Finch. Extraction of templates from phrases using sequence binary decision diagrams. Natural Language Engineering, 24:1-33, July 2018.
- (9)Naohiro Shichijo, Shin-ichi Akaike, Japan 's Policy Making Process and Science & Technology Foresight, pp.25-28, ITB infoservice13. Schwerpunktausgabe 12/18,

2018年12月

- (10) Kei Katahira, Yu Chen, Gaku Hashimoto and Hiroshi Okuda. "Development of an agent-based speculation game for higher reproducibility of financial stylized facts," *Physica A*, 524, pp 503-518, 2019.
- (11) Shuntaro Takahashi, Yu Chen, Kumiko Tanaka-Ishii. "Modeling financial time-series with generative adversarial networks," *Physica A*, 527, 121261, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121261>
- (12) Kei Katahira and Yu Chen. "Heterogeneous wealth distribution, round-trip trading and the emergence of volatility clustering in Speculation Game," submitted to PNAS.
- (13) Yushi Yoshimura and Yu Chen. "A mathematical formulation of order cancellation for the agent-based modeling of financial markets," submitted to *Physica A*.
- (14) 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
- (15) Shuntaro Takahashi, Yu Chen, and Kumiko Tanaka-Ishii. "Modeling financial time-series with generative adversarial networks" *Physica A*, 527(121261) 2019年8月 DOI:10.1016/j.physa.2019.121261
- (16) Shuntaro Takahashi and Kumiko Tanaka-Ishii. "Evaluating computational language models with scaling properties of natural language" *Computational Linguistics*, 45(3):1-33, 2019年10月 DOI : 10.1162/coli_a_00355
- (17) Geng Ren, Shuntaro Takahashi, and Kumiko Tanaka-Ishii. Entropy rate estimation for English via a large cognitive experiment using Mechanical Turk. *Entropy*, 21(12):1201, December 2019. Online Journal <https://www.mdpi.com/1099-4300/21/12/1201>.
- (18) 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
- (19) 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 (special issue in *New Mathematics and Natural Computation*)
- (20) Kumiko Tanaka-Ishii and Shuntaro Takahashi. A comparison of two fluctuation analyses for natural language clustering phenomena: Taylor vs. Ebeling & Neiman methods. *Fractals*, 2, 2021. in press.
- (21) Xin Du and Kumiko Tanaka-Ishii. Portfolio selection balancing variance and tail risk via stock vector representation acquired from price data and texts.

Knowledge-Based Systems, 2021. under review.

6-2-2. 査読なし (4 件)

- (1) 七丈直弘, 鷺田祐一「アジア大洋州における未来洞察の政策・戦略立案における活用状況」研究・イノベーション学会 2017 年<第 32 回>年次大会予稿集, pp. 7-9,
<http://hdl.handle.net/10119/14913> (2017)
- (2) 松尾淳、高野飛鳥、堀添浩司、後藤制司、七丈直弘「三菱重工における戦略策定に向けた社会の未来洞察の取り組み」研究・イノベーション学会 2017 年<第 32 回>年次大会予稿集, pp. 10-13, <http://hdl.handle.net/10119/15034> (2017)
- (3) 片平啓、鈔宇通、陳昱「投機ゲームにおける価格変動パターン」第 22 回人工知能学会金融情報学研究会 (SIG-FIN) 予稿集 2019.
- (4) 吉村勇志、陳昱「遺伝的プログラミングによる市場価格変動の時系列モデルの構築」第 22 回 人工知能学会 金融情報学研究会 (SIG-FIN) 予稿集 2019

6-3. 口頭発表 (国際学会発表及び主要な国内学会発表)

6-3-1. 招待講演 (国内会議 5 件、国際会議 5 件)

●国内会議 (5 件)

- (1) 田中久美子. 応用数学会. ものづくり研究会招待講演. 「「ことば」はどのようにフラクタルか」. 東京. 2018年2月5日
- (2) 田中久美子. “Towards a Philosophical grounding of Universal Statistical Properties Underlying Human Language: Mirroring Nature and Rule-Following”. 科学基礎論学会講演. 千葉. 2018 年 6 月 17 日
- (3) 田中久美子. 「言語に内在する Taylor 則」. 最先端自然言語処勉強会. 東京. 2018 年 8 月 3 日
- (4) 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
- (5) 田中久美子「自然言語の中にひそむ数理的普遍性」. 数学パワーが世界を変える 2020 (JST 主催) シンポジウム招待講演. 場所: 秋葉原コンベンションホール、2020 年 2 月 2 日

●国際会議 (5 件)

- (1) Naohiro Shichijo “The future of Asia” The 9th Annual Conference on Development Studies and International Conference on Foresight: Asia 2050, Tamkang University, Taiwan, Nov 18, 2017
- (2) Naohiro Shichijo, “Shaping S&T Policy in Turbulent Environment”, The 4th Asian Innovation Forum, Korea Institute of S&T Evaluation and Planning (KISTEP), The Grand Hotel, Taipei, Taiwan, 2018/7/10.
- (3) Shin-ichi Akaike, and Naohiro Shichijo, “Foresight for Visioning Science, Technology and Innovation Policy”, Merck Curious 2018, Darmstadt, Germany, 2018/7/16.

- (4)Naohiro Shichijo, “Society 5.0: Human-centered Cyber-physical Society”, The 1st Baodi Forum Medical Innovations in Health and Disease, China Overseas-Educated Scholars Development Foundation (COSOF), Jingjin New City Hyatt Regency, Baodi, Tianjing, China 2018/10/26
- (5)Naohiro Shichijo, “What is Disruptive Technology? Possible Consequences of Automation and Machine learning. An Overview”, Forum on Disruptive Technologies and Technology-driven Productivity, Asian Productivity Organization (APO), Gran Melia Jakarta, Jakarta, Indonesia, 2019/3/26.

6-3-2. 口頭発表 (国内会議 1 件、国際会議 8 件)

●国内会議 (1 件)

- (1)吉村勇志, 陳昱 (東京大学大学院新領域創成科学研究科). 能動的キャンセルを含む人工市場によるキャンセル寿命の寡分布の再現, 第 19 回金融情報学研究会, 2017 年 10 月

●国際会議 (8 件)

- (1)Yu Chen. “A new gauge for age: Microscopic simulation and cell experiments on time-delayed wound healing assay,” The Second Workshop on System Design for Human & Environment: Microscopic Simulation and Cell Experiments for Biological Systems. Kashiwa Campus, The University of Tokyo, 2018/02/23.
- (2)Tatsuru Kobayashi and Kumiko Tanaka-Ishii. Taylor’ s law of human linguistic sequences. Annual Conference of Association for Computational Linguistics, pages 1138-1148, 2018.
- (3)Kei Katahira, Yu Chen (The University of Tokyo, Graduate School of Frontier Sciences) . An extended Speculation Game for the recovery of Hurst exponent of financial time series. Asia-Pacific Econophysics Conference 2018, Taipei, Taiwan, August 2018.
- (4)Yushi Yoshimura and Yu Chen (The University of Tokyo, Graduate School of Frontier Sciences) . An Agent-based Model for Stock Markets Including Order Cancellation. Asia-Pacific Econophysics Conference 2018, Taipei, Taiwan, August 2018.
- (5)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.
- (6)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

(7) 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.

(8) Xin Du and Kumiko Tanaka-Ishii. Stock embeddings acquired from news articles and price history, and an application to portfolio optimization. Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, pages 3353-3363, 2020.

6-3-3. ポスター発表 (国内会議 1 件、国際会議 1 件)

●国内会議 (1 件)

(1) 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

6-4. 新聞報道・投稿、受賞など

6-4-1. 新聞報道・投稿

6-4-2. 受賞

(1) 高橋峻太郎が修士研究の成果で東大新領域創成科学研究科人間環境学専攻長賞を受賞 (修士研究は田中との協同研究による対外発表論文発表 4 編を元に構成されている)

6-4-3. その他

(1) 秋山ゆかり「2030 年のデータ価値、美容業界は何を考えるべきか。Future Agenda の問いかけ」 BeautyTech. jp <https://beautytech.jp/n/n5b9bca2d6e59>

6-5. 特許出願

6-5-1. 国内出願 (1 件)

(1) 杜キン and 田中久美子. 株式会社などに関連するテキストと価格の埋め込みベクトルの生成装置・方法ならびにプログラム, 2020. 特願 2020-62808, 東京大学, 2020 年 3 月 31 日

6-5-2. 海外出願 (0 件)