

戦略的創造研究推進事業 AIP 加速課題  
研究課題「革新的画像解析技術を用いた広域宇宙  
撮像データ分析」

研究終了報告書

研究期間 2020年 4月～2023年 3月

研究代表者: 吉田 直紀  
(東京大学 国際高等研究所 カブリ数物連携  
宇宙研究機構、特任教授)

## § 1 研究実施の概要

### (1) 実施概要

本 AIP 加速研究では、以下の3つの目標を掲げた。

- ① 東京大学木曾観測所の新型 CMOS センサ Tomo-e Gozen を用いた宇宙観測から得られる動画データを解析し、秒単位分単位という極めて短い時間で明るさを変える天体や地球接近天体を発見する。
- ② すばる望遠鏡 Hyper-Suprime-Cam (HSC)を用いた広域サーベイ観測のデータを解析し、多数の超新星や時間変動天体を検出し、天体の種別を画像から自動分類する。また、観測データに含まれる膨大な数の銀河画像を解析し、その形状の微小な歪み(重力レンズ現象)を統計的に解析して宇宙の物質分布を再構築する。
- ③ 科学的成果を生み出すとともに、次世代のビッグデータ分析へ向けて画像解析技術や巨大データの統計解析手法を開発する。

これまでに以下のように研究を実施し、それぞれ顕著な成果をあげた。

田中グループ(東北大)と上田グループ(NTT)は Tomo-e Gozen を用いた広域サーベイ観測データから時間変動天体を抽出するためのアルゴリズムを開発した。半教師なし学習により、時間変動候補物体のラベル誤りにも対応し、誤検出の数を従来の 100 分の1以下に減らすことができた。両グループは Single Shot Multibox Detector を用いて動画中の連続する3フレームを処理することで、即時に突発天体を同定する手法を開発した。突発天体に対して 80 パーセントの再現率を達成し、1秒だけ現れるフラッシュ現象を新たに 123 個発見した。

吉田グループ(東京大)と池田グループ(統計数理研)は協働し、深層学習を用いた重力レンズ現象の解析により宇宙の大域的な物質分布を再現する手法を提案した。敵対的生成アルゴリズムを応用した新たな手法は、重力レンズ現象に特有の銀河個数揺らぎに起因するノイズの特徴を学習し、シグナル/ノイズ比を高めることで銀河団などの天体を精度よく同定できる。

市来グループ(名古屋大)はすばる HSC サーベイの一年目のデータを用いて重力レンズ画像分析を行い、西道グループ(京都大)が開発した「エミュレータ」による統計解析によって主要な宇宙論パラメータを高精度で測定した。天空上の 140 平方度の広さの領域についての解析であり、米国や欧州がすすめる大型観測プロジェクトの結果に比する精度を達成している。さらに、重力レンズ現象の統計解析に銀河画像の重なり合い(ブレンド)がおよぼす影響を明らかにするため、すばる望遠鏡とハッブル宇宙望遠鏡の画像データを用いた教師データの作成を進めるとともに、ブレンド度合いや発生頻度などの基礎データを収集した。

西道グループ(京都大)は宇宙の物質分布の統計解析のための高速計算プログラム「エミュレータ」を大幅に更新し、全体をニューラルネットワークで再構築するとともに、多次元パラメータを入力すれば宇宙の物質分布の基本統計量を直接出力できる仕様に改良した。これを現存する最大の銀河分光観測データであるスローンデジタルスカイサーベイの銀河分布の統計解析に応用し、宇宙の物質密度の揺らぎの振幅を 5%の精度で決定した。

## (2) 顕著な成果

### <優れた基礎研究としての成果>

#### 1. 巨大動画データ解析による短時間発光現象の検出

概要:木曾観測所 Tomo-e Gozen により得られる毎秒 1 フレームの動画データの分析技術を開発した。Single Shot Multibox Detector を用いて動画中の連続する3フレームを同時処理することで、フレーム毎に通常の天体検出や時系列カタログの作成・処理を行う必要がなくなり、即時に突発天体を同定することができる。突発天体に対して 80 パーセントの再現率を達成し、1 秒だけ現れるフラッシュ現象を新たに 123 個発見した。

#### 2. 重力レンズ現象データ分析による宇宙論パラメータ推定

概要:すばる HSC サーベイの観測データに含まれる 400 万個の銀河の画像を解析し、天空上の 140 平方度におよぶ広い範囲で重力レンズシグナルを抽出した。本研究で開発したエミュレータを用いて物質密度揺らぎの短波長成分の情報を取り込んだ非線形統計解析を行い、宇宙の物質密度やその揺らぎの振幅といった、宇宙の成り立ちを表す基本物理量を 5 パーセントの精度で決定した。

#### 3. エミュレータを核とする統計解析技術開発

概要:宇宙の大規模構造基本統計量を高速に予言する統計モデル「エミュレータ」の拡張を行った。エミュレータは物理モデルに基づいて高速かつ正確に計算可能な中間的な物理量の宇宙論パラメータへの依存性を学習し、物質密度分布のパワースペクトルのテストデータに対して残差 1%という高精度を達成した。エミュレータは国内外の観測プロジェクトでも使用され、観測的宇宙論の研究に資する成果となった。

### <科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

#### 1. エミュレーション技術の開発

概要:大規模数値実験の統計解析結果を高速で計算するエミュレーション技術は自然科学・社会科学におけるあらゆる研究分野への応用可能性がある。本研究開発を通じ、モデル探査・予言に関する汎用技術を構築・共有し、気象学をはじめとする多様な分野への応用に取り組んだ。開発したエミュレーションプログラムを宇宙観測の実データ分析に適用し、宇宙物理で重要な物理量を高精度で測定することに成功した。

### <代表的な論文>

1. I. Takahashi, R. Hamasaki, N. Ueda, M. Tanaka, N. Tominaga, S. Sako, R. Ohsawa, N. Yoshida, “Deep-learning real/bogus classification for the Tomo-e Gozen transient survey”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 74, Issue 4 (2022), pp.946-960

概要: Tomo-e Gozen による宇宙の突発天体探査画像で、本物の天体画像と偽物の検出を自動判定する技術を開発した。仮想敵対的学習による反教師あり学習を採用した新手法により、本物の天体を 90 パーセント検出しながら、偽陽性が 0.07 パーセントに抑えるなど極めて高い性能を実現することができた。異なる望遠鏡による画像の比較で高精度に突発天体を判定する本手法は世界的にも需要が高く、本技術のソースコードとデータを GitHub にて公開した。

2. H. Miyatake, et al. including T. Nishimichi, N. Yoshida, “Cosmological inference from the emulator based halo model II: Joint analysis of galaxy-galaxy weak lensing and galaxy clustering from HSC-Y1 and SDSS”, 2022, Physical Review D, 106 (2022) 3520

概要:すばる HSC サーベイの観測データに含まれる400万個の銀河の画像を解析し、天空上の 140 平方度におよぶ広い範囲で重力レンズシグナルを抽出した。本研究で開発したエミュ

レータを用いた統計解析を行い、宇宙の物質密度やその揺らぎの振幅といった、宇宙の成り立ちを表す基本物理量を5パーセントの精度で決定した。

3. M. Shirasaki, K. Moriwaki, T. Oogi, N. Yoshida, S. Ikeda, T. Nishimichi,  
“Noise reduction for weak lensing mass mapping: an application of generative adversarial networks to Subaru Hyper Suprime-Cam first-year data”, MNRAS, 504 (2021) 1825

概要: 重力レンズ現象観測データの解析から再構築する物質密度場に混入するノイズを除去するための深層学習器を開発した。敵対的生成アルゴリズムを用いて重力レンズ現象に特有のノイズパターンを学び、物質分布マップの実効的シグナル/ノイズ比を向上し、追観測等のための天体同定の精度を検証した。これまでに詳しく調べるのが難しかった物質密度の低い領域でも精度を保った物質分布マップの作成に成功した。

## § 2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 吉田グループ

研究代表者: 吉田 直紀 (東京大学 国際高等研究所 カブリ数物連携宇宙研究機構 特任教授)

研究題目: 革新的画像解析技術を用いた広域宇宙撮像データ分析

研究項目

- ・理論テンプレート作成
- ・宇宙論パラメータ推定

#### ② 上田グループ

主たる共同研究者: 上田 修功 (理化学研究所革新知能統合研究センター 副センター長 / 日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所 客員フェロー)

研究題目: 深層学習を用いた時間変動天体の検出と分類

研究項目

動画画像解析手法の開発

#### ③ 田中グループ

主たる共同研究者: 田中 雅臣 (東北大学 大学院理学研究科 准教授)

研究題目: 時間変動天体の検出と分類

研究項目: 超新星検出と分類

#### ④ 池田グループ

主たる共同研究者: 池田 思朗 (情報・システム研究機構 統計数理研究所 教授)

研究題目: 統計学的手法による宇宙画像解析

研究項目

- ・動画画像解析手法の開発
- ・宇宙論パラメータ推定

#### ⑤ 市来グループ

主たる共同研究者: 市来 淨與 (名古屋大学 素粒子宇宙起源研究所 准教授)

研究題目: 重力レンズ現象の観測データ解析

研究項目

- ・画像ディブレンディング技術開発
- ・パラメータ推定コード開発

#### ⑥ 西道グループ

主たる共同研究者: 西道 啓博 (京都大学 基礎物理学研究所 特定准教授)

研究題目: 統計量高速計算器の開発

研究項目

エミュレータ開発

## (2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

### ・ JST さきがけとの協働

本研究は構想当初より、「ビッグデータ」さきがけのプロジェクト「タイムドメイン宇宙観測用動画データの高速逐次処理法の開発」(研究代表者 酒向重行)との協働を想定しており、超広視野可視光カメラ Tomo-e Gozen の新たなデータ処理法に関する共同研究を行ってきた。大量の動画解析技術を開発し、実観測データ解析をすすめ、数十個の短時間発光現象を検出するにいった。これにより得られたフラッシュ現象頻度に対する推定と制限は、可視光観測によるものとしては世界で最も感度の高いものである。

### ・ 国際観測プロジェクト LSST との協働

米国が主導する大型観測計画 LSST(2024-)に関して、本研究ですすめてきた銀河画像解析技術開発が日本の LSST 参加のための貢献パッケージのうちの一つとして認められており、日本の LSST 参加は時間の問題と見通している。本研究で用いた HSC の画像データはデータ品質の面で LSST に非常に近く、これまでの研究で培った技術が大きく評価されている。先行的な技術や成果は国際パートナーにも提供し、2030 年代の大型観測プロジェクトで我が国の研究チームが主導的な役割を果たすための第一歩としたい。

また、米国 NASA が主導する Roman 衛星による宇宙サーベイでは LSST サーベイの一部の領域をさらに詳細に観測する予定である。LSST と本研究ですすめてきた銀河画像解析技術の応用先として最適の画像データが得られる。Roman サーベイの宇宙論グループと協働し、LSST と組み合わせた解析を検討している。