

領域略称名：散乱透視学
領域番号：20A207

令和5年度
科学研究費助成事業「学術変革領域研究（A）」
に係る中間評価報告書

「散乱・揺らぎ場の包括的理解と透視の科学」

領域設定期間

令和2年度～令和6年度

令和5年6月

領域代表者 神戸大学・次世代光散乱イメージング科学研究センター・教授・的場 修

目 次

研究組織

1	総括班・総括班以外の計画研究	2
2	総括班・総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者	2
3	公募研究	6

研究領域全体に係る事項

4	研究領域の目的及び概要	8
5	審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	10
6	研究の進展状況及び主な成果	12
7	研究発表の状況	28
8	研究組織の連携体制	33
9	若手研究者の育成に係る取組状況	34
10	アウトリーチ活動に係る取組状況	35
11	研究費の使用状況・計画	36
12	今後の研究領域の推進方策	37
13	総括班評価者による評価	39

研究組織

(令和5年6月末現在。ただし完了又は廃止した研究課題は完了・廃止時現在。)

1 総括班及び総括班以外の計画研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数[2]
X00 総	20H05885 散乱・揺らぎ場の包括的理解と透視の科学	的場 修	神戸大学・次世代光散乱イメージング科学研究センター・教授	11
A01-1 計	20H05886 時空間光波シンセシスによる散乱透視基盤の構築	的場 修	神戸大学・次世代光散乱イメージング科学研究センター・教授	4
A01-2 計	20H05887 散乱・揺らぎ場における光の伝搬の可視化	栗辻 安浩	京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授	2
A01-3 計	20H05888 大規模光データベースによる散乱・揺らぎ場モデリング	渡邊 恵理子	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授	3
A02-4 計	20H05889 散乱理論・散乱イメージング理論の構築	木村 建次郎	神戸大学・数理データサイエンスセンター/大学院理学研究科・教授	1
A02-5 計	20H05890 インテリジェント散乱・揺らぎイメージング	谷田 純	大阪大学・大学院情報科学研究科・教授	3
A03-6 計	20H05891 生きた細胞や組織における散乱・揺らぎ計測と制御	玉田 洋介	宇都宮大学・工学部・准教授	4
A03-7 計	20H05892 空間光伝搬通信における散乱・揺らぎ計測と制御	高山 佳久	東海大学・情報通信学部・情報通信学科・教授	3
A03-8 計	20H05893 光波の時空間における計測・変調・制御を駆使した地球型惑星検出に迫るイメージング	早野 裕	自然科学研究機構国立天文台・ハワイ観測所・教授	3
総括班及び総括班以外の計画研究 計 9 件(廃止を含む)				

[1] 総:総括班、計:総括班以外の計画研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数(辞退又は削除した者を除く。)

2 総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目 : X00

研究課題名 : 散乱・揺らぎ場の包括的理解と透視の科学

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	的場 修	神戸大学・次世代光散乱イメージング科学研究センター・教授	総括、領域融合推進班リーダー、共同研究拠点運営
分担	玉田 洋介	宇都宮大学・工学部・准教授	領域融合推進班：計画研究・公募研究間の調整
分担	早野 裕	国立天文台・ハワイ観測所・教授	共同研究拠点運営及び研究支援活動班：国際派遣・受入担当
分担	木村 建次郎	神戸大学・数理・データサイエンスセンター・教授	研究支援活動班：公募研究
分担	栗辻 安浩	京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授	研究支援活動班：動向分析
分担	谷田 純	大阪大学・大学院情報科学研究科・教授	企画広報班：国際シンポジウム
分担	高山 佳久	東海大学・情報通信学部・教授	企画広報班：国内シンポジウム、ニュースレター担当
分担	渡邊 恵理子	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授	企画広報班：ホームページ
分担	松田 厚志	情報通信研究機構・未来ICT 研究所神戸フロンティア研究センター・主任研究員	企画広報班：広報
分担	亀井 保博	基礎生物学研究所・超階層生物学センター・RMC 教授	生物学共同研究拠点としての活動、領域内ワークショップ開催、生物系と光学系の分野融合
分担	平野 泰弘	大阪大学・大学院生命機能研究科・特任講師（常勤）	融合研究推進のための細胞生物学ワークショップ開催と若手人材育成、異分野融合の促進
合計 11 名			

研究項目：A01-1

研究課題名：時空間光波シンセシスによる散乱透視基盤の構築

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	的場 修	神戸大学・次世代光散乱イメージング科学研究センター・教授	研究統括及び生細胞でのマルチモーダル散乱光計測システムの確立
分担	上野原 努	大阪大学・大学院工学研究科・助教	擾乱の多い環境下でのシングルピクセルイメージングシステムの構築
分担	小倉 裕介	大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授	計算機合成ホログラムによる強度・位相・偏光の分布を操作する照明手法の開発

分担	亀井 保博	基礎生物学研究所・超階層生物学センター・RMC 教授	マイクロメートルからミリメートルのマルチスケールの生物試料の作製
合計 4 名			

研究項目:A01-2

研究課題名:散乱・揺らぎ場における光の伝搬の可視化

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	栗辻 安浩	京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授	研究総括、散乱体中の光伝播の超高速動画像記録の検討と実験
分担	角江 崇	千葉大学・大学院工学研究院・准教授	散乱体中の光伝播の超高速超高精度定量動画像記録方法の検討と実験
合計 2 名			

研究項目:A01-3

研究課題名:大規模光データベースによる散乱・揺らぎ場モデリング

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	渡邊 恵理子	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授	研究総括、大規模光データベースの基盤技術開発とそれを用いた散乱・揺らぎ場モデリング
分担	宮本 洋子	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授	散乱・揺らぎ場の電磁場としての特徴理論解析と実験
分担	池田 佳奈美	大阪公立大学・大学院工学研究科・准教授	近赤外波長帯に向けた散乱・揺らぎ場の解析と計測
合計 3 名			

研究項目:A02-4

研究課題名:散乱理論・散乱イメージング理論の構築

代表／分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	木村 建次郎	神戸大学 数理データサイエンスセンター/大学院理学研究科・教授	研究総括、新規散乱場理論、散乱イメージング理論の構築
合計 1 名			

研究項目:A02-5

研究課題名:インテリジェント散乱・揺らぎイメージング

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	谷田 純	大阪大学・大学院情報科学研究科・教授	研究総括、スペックル相関イメージングの拡張
分担	中村 友哉	大阪大学・産業科学研究所・准教授	時間分解スペックル計測による散乱場解析
分担	西崎 陽平	地方独立行政法人大阪産業技術研究所・森之宮センター・主任研究員	深層学習モデルによる散乱イメージングの高性能化
合計 3 名			

研究項目 : A03-6

研究課題名 : 生きた細胞や組織における散乱・揺らぎ計測と制御

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	玉田 洋介	宇都宮大学・工学部・准教授	研究総括、生細胞・組織における散乱・揺らぎ計測とその制御
分担	松田 厚志	情報通信研究機構・未来ICT研究所・主任研究員	繊毛のある微生物における散乱・揺らぎ計測と制御
分担	坂本 丞	自然科学研究機構・生命創成探究センター・特任研究員	動物における散乱・揺らぎ計測と制御
分担	平野 泰弘	大阪大学・大学院生命機能研究科・特任講師	繊毛のない微生物における散乱・揺らぎ計測と制御
合計 4 名			

研究項目 : A03-7

研究課題名 : 空間光伝搬通信における散乱・揺らぎ計測と制御

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	高山 佳久	東海大学・情報通信学部・情報通信学科・教授	研究総括、波面操作による光伝送の安定化
分担	玉川 一郎	岐阜大学・流域圏科学研究センター・教授	精密気象観測による大気光学特性の推定
分担	小林 智尚	岐阜大学・工学部・教授	気象モデルによる大気揺らぎの短時間予測
合計 3 名			

研究項目:A03-8

研究課題名:光波の時空間における計測・変調・制御を駆使した地球型惑星検出に迫るイメージング

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	早野 裕	自然科学研究機構国立天文台・ハワイ観測所・教授	研究総括、実証実験準備及び遂行
分担	入部 正継	大阪電気通信大学・工学部・教授	制御系設計・実装・実験
分担	西川 淳	自然科学研究機構国立天文台・TMT プロジェクト・助教	実証実験遂行、データ解析、数値シミュレーション
合計 3 名			

3 公募研究

研究 項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	21H05577 コロイド溶液における光散乱・揺らぎ・物質拡散のマルチフィジックスモデリング	令和3年度 ～ 令和4年度	藤井 宏之	北海道大学・大学院工学研究院・助教	1
A01 公	21H05584 ホログラフィック励起構造化光源を用いた散乱光波イメージング	令和3年度 ～ 令和4年度	熊谷 幸汰	宇都宮大学・オプティクス教育研究センター・助教	1
A01 公	21H05585 2光子プロトコルによる擾乱透明化イメージングの試み	令和3年度 ～ 令和4年度	深津 晋	東京大学・大学院総合文化研究科・教授	1
A01 公	21H05594 散乱体透過条件下での時間分解過渡吸収分光法の開発	令和3年度 ～ 令和4年度	太田 薫	神戸大学・分子フォトサイエンス研究センター・研究員	1
A01 公	21H05599 量子・古典対応を用いた散乱光センシングの解析	令和3年度 ～ 令和4年度	鹿野 豊	群馬大学・理工学府・准教授	1
A01 公	21H05604 白色顕微動的散乱法による不均一物質の揺らぎの可視化	令和3年度 ～ 令和4年度	廣井 卓思	物質・材料研究機構・若手国際研究センター・ICYS 研究員	1
A01 公	21H05605 蛍光イメージングにおける細胞内光学特性の再構築と動態解析	令和3年度 ～ 令和4年度	渡部 匡己	生命創生探究センター・細胞シミュレーション研究グループ・特任准教授	1
A03 公	21H05579 極限波面揺らぎ補正とその応用に関する研究	令和3年度 ～ 令和4年度	村上 尚史	北海道大学・大学院工学研究院・講師	1

A03 公	21H05583 すばる望遠鏡での大気揺らぎ高度分布の統計的測定とその振る舞いの解明	令和3年度 ～ 令和4年度	秋山 正幸	東北大学・大学院理学研究科・教授	1
A03 公	21H05587 脳領域間の神経細胞活動から発せられる揺らぎによる高次脳機能の透視	令和3年度 ～ 令和4年度	加藤 大輔	名古屋大学・大学院医学系研究科・講師	1
A03 公	21H05588 高機能光源を用いた散乱制御による光断層計測/顕微鏡の高侵達・高解像化	令和3年度 ～ 令和4年度	西澤 典彦	名古屋大学・大学院工学研究科・教授	1
A03 公	21H05589 生体深部にある移植再生細胞の情報取得可能な量子ナノ透視イメージング診断技術の構築	令和3年度 ～ 令和4年度	湯川 博	名古屋大学・未来社会創造機構 ナノライフシステム研究所 特任教授	1
A03 公	21H05590 組織内全細胞観察を目的とした三次元ライブイメージング法の開発	令和3年度 ～ 令和4年度	市村 垂生	大阪大学・先導的学際研究機構・特任准教授	1
A03 公	21H05592 蛍光コントラストを用いた内視鏡下3D腫瘍イメージング	令和3年度 ～ 令和4年度	西村 隆宏	大阪大学・大学院工学研究科・助教	1
A03 公	21H05596 Deep Priorを用いた教師無し深層学習による脳内電流源推定	令和3年度 ～ 令和4年度	滝口 哲也	神戸大学・都市安全研究センター・教授	1
A03 公	21H05597 静的光散乱とライトフィールド顕微鏡の複合化による非蛍光・非侵襲・三次元分子量計測	令和3年度 ～ 令和4年度	執行 航希	三菱電機・情報技術総合研究所・研究員	1
公募研究 計 16 件(廃止を含む)					

[1] 公:公募研究

[2] 公募研究は研究代表者が1名で実施

研究領域全体に係る事項

4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させる」ものであるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

研究の学術的背景

すりガラスや濃霧などによって引き起こされる散乱や地球大気の揺らぎは古くから映像を扱う人々にとって邪魔者として扱われてきた。カメラなどのレンズでは如何にして散乱を抑えるかということに尽力し、ナノレベルに達する表面研磨技術が進展してきている。これらは見る対象が何であるかを問うことなく、像を忠実に写す、もしくは小さく点に結ぶ道具として発展してきた。そこでは、光が通過する媒体や観察対象が一様で、光が直進する理想的な状態が想定されてきた。しかし、**現実のイメージングでは、ほぼすべての対象に複雑かつ時間的に揺らぐ散乱媒質が存在しており、そこを通過した光は複雑に散乱する。**この3次元媒質に存在する光の散乱は、**光学において解かれていない最終課題の一つ**である。また、散乱が光学による自然科学研究の革新の本質的な障害であることがわかってきた。例えば、生命科学、医学では観察対象である生きた細胞や組織内部における散乱・揺らぎによって観察像が著しく劣化する。そのため、精細に観察できるのは細胞や組織の表面のみであり、生きた組織の深部で起こる細胞核動態や胚発生、がん幹細胞の形成と維持、脳内の記憶機構などを高解像度で観察することは容易ではない。情報通信工学においても風の流れや空気中の水滴などにより、光は直進性を失い、エネルギーを遠くまで運べない。可視光の周波数は数百テラヘルツと非常に高く、**beyond 5G** で要求される大容量通信を実現するためには散乱・揺らぎの克服が必須である。天文学でも同様の問題として、地上からの天体観測では、地球大気の揺らぎの影響で、得られる天体像の解像度が理論限界に比べて1桁以上劣化する。大気における散乱の影響は未だ克服できておらず、第2の地球の直接撮像などの観測天文学における命題を達成するためには動的な散乱を克服する必要がある。

本研究領域の研究目的

本研究領域では、実世界の散乱・揺らぎ媒質と光学系、データ処理までを一体化してとらえ、光学的可視化技術と数理モデリング手法を融合させることで、散乱・揺らぎ場のマルチスケールイメージングに革新をもたらす「**散乱透視学**」という**新しい研究領域を創成することを目的とする**。具体的には、現実世界のマルチスケール散乱・揺らぎ媒質である生細胞・組織、地表層空気、大気を伝搬する光が受ける影響やそこに含まれる散乱体の特徴・光学特性を詳細に計測する技術を確立するとともに、それらを数理的に解析・モデル化する数理モデリングを行うことで、**細胞から天文までのマルチスケールにおける散乱・揺らぎを包括的に理解することを目的とする**。

全体構想

散乱透視学の創成には、統計的ではなくマルチスケールの散乱・揺らぎ場の統合的・包括的理解が必要不可欠であり、本領域を3つのサブ融合学術領域（研究項目）に分割し、研究項目内及び研究項目間連携により革新的学術領域を切り拓く。3つの研究項目の主な役割と相互連携を以下に記述する。①複雑かつ多様な散乱・揺らぎ場の性質を包括的に解明するとともに、それを補償して透視を達成するためのイメージング手法や光学システムに関する物理的基盤研究を担う**研究項目 A01：物理基礎に基づく散乱透視学**、②散乱・揺らぎ場の本質的理解のための数理モデリングと数理的アプローチに関する数理的基盤研究を担う**研究項目 A02：数理基礎に基づく散乱透視学**、③実世界における散乱・揺らぎ場の計測と、散乱体とその性質の解明、及び透視手法の有効性を検証する**研究項目 A03：実問題における散乱透視学**である。具体的には以下のコア技術を開発し、散乱・揺らぎ現象を突破し、生細胞・組織、地表層空気、大気において光を散乱する構造体とその光学特性を決定し、その共通性・多様性について解明する。

散乱場を見る：散乱媒質のマルチモーダルイメージング、透視による高解像イメージング

散乱場を撮る：3次元散乱媒質中の光伝搬の超高速可視化

散乱場を録す：散乱イメージングデータベースによる散乱媒質のモデリング
 散乱場を紐解く：散乱逆問題の数理解析
 散乱場を突破する：機械学習・深層学習による散乱イメージング

どのような点が「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させる」ものであるか

散乱や揺らぎ場に対して統計的描写に基づく散乱理論は存在する。しかし、この散乱理論では 3 次元の散乱・揺らぎ媒質を伝搬する光の情報を統計的に扱うため、屈折率分布等の光学特性が異なる散乱媒質でも散乱係数などの統計的指標が同じである場合に、個別の対象に応じた現象の理解と透視のための補正には至らない。本領域で創出する「散乱透視学」は、マルチスケールの散乱体を直接計測、可視化して、それを元に数理科学的アプローチで散乱体そのものを特定し（デジタルツイン）、補正するという、CPS（サイバーフィジカルシステム）を活用した散乱・揺らぎを突破する世界で初めての取り組みである。電磁気学における波動方程式のように一つの式でマルチスケール、時間での光波伝搬を記述はできないが、計測とモデリングの相互協調により、手前から奥へと照明とイメージングを繰り返すことで、深部に到達し、人類が未到達の散乱体内部での情報可視化を実現する。これにより、散乱体を詳細に理解し、かつ透視できる点でこれまででない情報が得られるという革新性がある。また、マルチスケールに共通する散乱現象と特異的な散乱現象を切り分けて包括的に理解できる点で独創的であり、これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させるものである。

領域設定期間終了後に期待される成果

図 4-1 に示すように複数の学術領域の融合として「散乱透視学」が形成されるが、散乱透視学が変革する学術領域は本申請で取り組む生命科学、情報通信工学、天文学に留まらない。本領域での最終目標として、生命科学ではサブマイクロメートルから天文学のキロメートルスケールまでの散乱透視を実現する理論及び方法論が構築される。そのため、本領域でのスケール内及びスケールの外側にある散乱・揺らぎ現象に適用し、様々な学術領域の変革に取り組むことが期待できる。例えば、図 4-1 中の右側に記載しているように、ナノメートルスケールの領域では 3 次元ナノ材料開発などの物理工学、異常細胞検出や非接触体調管理などの医科学、効率的な植物の育成を実現する植物工場、濃霧や豪雨下において視界が悪い状況でも人や自動車などを可視化し、運転支援を行う自動車工学、崩壊した建物のがれきの下側にいる人を発見するための可視化技術、トンネルや橋梁などのインフラ設備の内部欠陥検査などの保全工学など多岐にわたる学術分野に展開できる。このとき、コンクリート内部は光が侵入しないため、音波や他の電磁波を用いる必要がある。また、公募研究によって拡張された学術領域として、量子もつれ光を用いた新しい散乱透視イメージングや光遺伝学による脳神経回路網の機能解明、光線力学療法による非破壊治療への展開も期待できる。

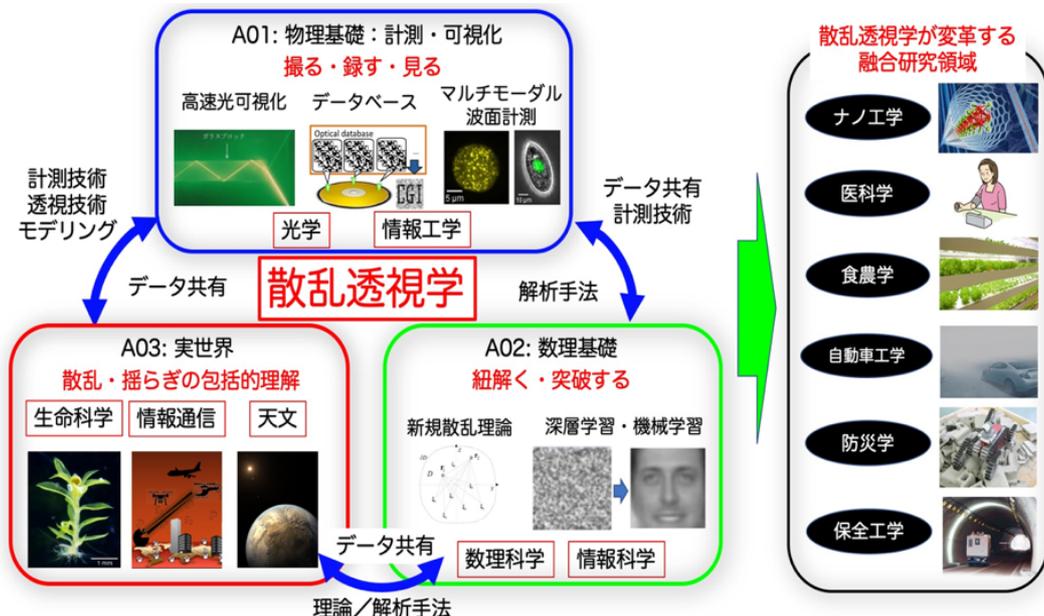


図 4-1：本領域で構築する散乱透視学とそれによって変革される融合学術領域

5 審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

(審査結果の所見)

本研究領域は、散乱・揺らぎ現象を計測し、可視化する手法と数理科学的手法を有機的に融合することで、散乱・揺らぎ現象を包括的に理解するとともに、透視するところまで発展させることによって、散乱透視学を創成し、光学及び自然科学の学術への変革が期待される。

特に、この学理を基軸として、天文学、情報通信、生体科学というマルチスケールな領域への展開を進めることで、現状の限界の打破と幅広い分野の応用において、ブレークスルーの実現が期待される。一方、学理の体系化において、新たな数理モデルの構築は、本研究領域の中核を担っており、更なる強化が必要である。

対応状況

新たな数理モデルの構築と強化を目指して第1期公募研究及び第2期公募研究の公募要領にて、以下の項目を優先事項として掲げて募集した。

- ①光波の散乱・揺らぎに関する新しい理論の研究
- ②光波の散乱・揺らぎの新しい計測法・解析法・モデリングの研究
- ③散乱・揺らぎイメージングに関する画像・信号処理、機械学習・深層学習に関する研究

その結果、細胞内光散乱構造モデルの構築に関して A01-公 渡部、微粒子凝集体光散乱モデルの構築に関して、A03-公 廣井・A03-公 藤井、天文学における高コントラストイメージングのための新たな位相マスクの開発に関して A03-公 秋山、神経細胞活動の揺らぎモデルの構築に関して A03-公 加藤・A03-公 滝口を公募研究として採用できた。具体的には以下の共同研究を実施し、生命科学、情報通信工学、天文学において新しい数理モデルの構築を進めることに成功した。

公募班により強化されたもの

- (1) 細胞内光散乱構造モデルの構築 (A01-公 渡部—A01-1 的場—A03-6 玉田の共同研究)
- (2) 微粒子凝集体光散乱モデルの構築 (A03-公 廣井—A03-公 藤井—A03-6 玉田の共同研究)
- (3) 天文学における高コントラストイメージングのための新たな位相マスクの開発 (A03-公 村上一A03-8 早野の共同研究)
- (4) 神経細胞活動の揺らぎモデルの構築 (A03-公 加藤—A03-公 滝口—A01-1 的場の共同研究)

計画班間による連携で強化されたもの

- (5) 大気揺らぎモデルの情報通信工学への適用 (A03-8 早野—A01-3 渡邊—A03-7 高山の共同研究)

また、第2期公募研究において、短パルス光源を用いて輻射輸送方程式や光拡散方程式に基づく散乱モデリング手法で実績のある北海道大学 西村氏を採用できた。さらに微粒子凝集体での特異的な振る舞いを解明する大阪大学 桂木氏を採用できた。これら第2期公募研究及び第1期公募研究で第2期公募研究に採択されなかった研究者を引き続き領域に取り込み、多角的なアプローチによる数理モデリング手法を集める。広範な学問分野の有機的な融合という観点から、総括班評価者より、異なる分野でも定量的比較が可能な標準散乱試料を創成してはどうかとの意見を頂いた。これを本領域で開発し、この試料を用いてそれぞれが開発した手法を評価することで、領域一体となった散乱理論の創出を目指す。

(参考意見)

情報通信への応用については、多様な学問領域との連携が必要であり、公募研究によって、更に充実させていくことが望まれる。

対応状況

散乱・揺らぎを克服する散乱透視理論の情報通信への応用研究を強化するために、第1期公募研究及

び第2期公募研究の公募要領にて、以下の項目を優先事項として掲げて募集した。

(第1期公募研究)

⑥ 地表層空気揺らぎの計測とそれに強い次世代情報通信に関する研究

さらに、第2期公募要領では

④ 光波の散乱・揺らぎを介した空間情報通信に関する研究

と優先順位を上げて募集した。その結果、情報通信研究機構の山下氏を公募研究として採用できた。また、これまでの3年半の研究期間で、A03-7 高山と A01-3 渡邊グループを中心に空間光情報通信技術の大気揺らぎを克服するための共同研究を推進し、6次渦位相分布からなる大気揺らぎモデルの実験室レベルでの実装に成功し、これを元に大気揺らぎモデルの標準化を進めている。これらの情報を年2回の領域会議、総括班会議で参加メンバーに共有するとともに、シンポジウム開催などで他の研究者への情報発信と情報交換を積極的に行っている。

6 研究の進展状況及び主な成果

(1) 及び(2)について、計画研究及びそれと連携している公募研究ごとに、具体的かつ簡潔に記述すること。(一つの計画研究及び連携する公募研究で2頁以内)

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか

(2) 各計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果について、(計画研究・連携する公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。)

A01-1: 的場 修 (神戸大) 時空間光波シンセシスによる散乱透視基盤の構築

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにするか

本計画研究では、100 nm~1 µm サイズの生体構造や 10 µm サイズの細胞が複雑な形状かつ配置で構成される細胞塊などのマイクロな強散乱媒質から、風や気圧変化などの時空間で揺らぎをもつ大気までの 10 桁に渡るスケールの散乱体に対して、その内部にある情報または散乱体の向こう側にある情報を回折限界で高解像イメージングを実現するために、散乱光波の情報を多角的かつ多次元的に取得する、「時空間光波シンセシスによる散乱透視基盤技術」を開拓することを領域設定期間内の目的とする。この目的を達成するために2つの基盤技術を構築する。中間評価までに5桁のマルチスケール計測を実現する。

(I) 散乱光波を多次元的にセンシングするマルチモーダル散乱光センシング技術

(II) 散乱光波により劣化した画像を高解像度に復元するデジタル光学補正技術

(I)では、蛍光と位相を同時計測するマルチモーダルイメージング技術として強度輸送方程式光計算イメージング及びデジタルホログラフィー、ライトフィールドイメージングを融合させたイメージングシステムの開発に成功した。特に、強度輸送方程式を用いた3次元蛍光イメージングは、神戸大学での生命科学・バイオ共同研究拠点及び領域融合推進班によるハンズオン講習を通じて、A03-6 玉田、A03-公 渡部、加藤、市村らとの生命科学、バイオ共同研究へと発展しており、36報の学術論文(内Top10%論文1報)として成果を生み出している。マルチスケールとしてはサブµm から10 mmの5桁をカバーしており、計画通りに研究を進められている。(II)では、強度輸送方程式に基づく散乱光波計測と共役光伝搬計算再生及び位相回復を用いた散乱透視イメージングを考案し、奥行き情報を含めた散乱劣化画像の復元法を植物細胞の動画計測に適用することに成功した。また、強い散乱体に対して非負値行列因子分解法による高解像度復元イメージング技術の開発に成功した。今後2年間で、A03-6 玉田及び生命科学系の公募研究との共同研究を進め、散乱透視イメージング技術の高度化を図る。また、シングルピクセルイメージングによるモジュール化で1 kmまでのスケールをカバーし、10桁に渡るマルチスケール散乱体に応用可能な散乱透視イメージング技術を確立する。以上の研究成果から当初の期待を上回る成果を得た。また、神戸大学にて散乱透視研究を推進する全学センターとして「次世代光散乱イメージング科学研究センター」を2022年度に発足させた。大学での組織化により国内外の研究機関と連携して、散乱透視学研究を推進する。

(2) 各計画研究で得られた成果&本研究領域内の共同研究等による成果

(I) 散乱光波を多次元的にセンシングするマルチモーダル散乱光センシング技術 (A03-6 玉田、A01-2 栗辻、A01-公 渡部、A03-公 加藤、A03-公 滝口との共同研究)

強度輸送方程式は、光波の伝搬方向に沿って複数の強度画像の測定から位相と振幅分布情報を取得し、計算機で光波伝搬計算を用いることで断層画像として3次元光波分布を再生する方法である。的場と栗辻、玉田の共同研究として、低コヒーレンス光である蛍光画像にも強度輸送方程式を適用する方法を考案し、植物細胞を対象としてその有効性を実証した (IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. **27**, 6801809, 2021)。強度輸送方程式を用いた3次元蛍光イメージング装置 (図6-1) は、領域融合推進班における活動として、神戸大学共同研究拠点において、A03-6 玉田、A03-8 早野、A03-公 渡部、加藤、滝口、太田らと異分野共同研究の実現に役立っている (Phys. Rev. Research **5**, L022043, 2023)。散乱透視イメージング技術と深部へ光を届ける照明技術の研究を進め、より深部での生命活動を可視化する装置へと進化させて生命科学及びバイオ分野での共同研究を加速



図 6-1 強度輸送方程式による3次元蛍光イメージングシステム

させる。この他に、デジタルホログラフィーによるマルチモーダル定量位相・蛍光イメージングを A01-2 粟辻との共同研究として実施している。赤血球を用いた実験により、位相揺らぎが 4.7 mrad と 2 光波干渉に比べて 42 倍程安定性が向上したシステム構築を行い、赤血球の大きさ、厚さ、体積などの構造情報を得ることに成功した(Opt. Lasers Eng. **151**, 106887, 2022)。

(II) 散乱光波により劣化した画像を高解像度に復元するデジタル光学補正技術

A. 強度輸送方程式と位相回復法による散乱透視イメージング (A03-6 玉田、A01-2 粟辻との共同研究)

低コヒーレンス光である蛍光の位相計測を実現する強度輸送方程式を用いた 3 次元蛍光イメージング法を、散乱した蛍光の散乱透視イメージングに適用し、位相共役再生による散乱体近傍までの光波再生と位相回復法を適用することで散乱劣化画像の回復に成功している (非公開図 6-2)。特に提案手法は奥行き情報を再生可能であり、異なる奥行きにピントを事後で合わせられる世界初の成果である。

B. デジタル位相共役による散乱体越しの光コヒーレンス顕微鏡高分解能イメージング

光コヒーレンス顕微鏡は干渉性の有無を利用して、断層構造を計測する手法として知られている。散乱体越しに数 μm 程度の面内分解能で測定する手法として、散乱による影響をデジタル位相共役鏡で補正した光コヒーレンス顕微鏡システムを構築した。プローブ光で散乱体による波面歪みを測定し、低コヒーレンス光源波長で合わせた位相変調を施すことで散乱体越しの光波の波面を制御する。システムの動作周波数 1 Hz で位相歪みを測定し、2 μm 程度の集光スポットで断層イメージング可能なことを実証した(Opt. Continuum **2**, 155, 2023)。この論文は **Editor's pick** に選出されている。

C. 広域取得可能な散乱体にロバストなシングルピクセルイメージング (A01-公 深津との共同研究)

複数パターン照明とエネルギー検出を組み合わせる物体像を再構成するシングルピクセルイメージングを用いて、散乱による劣化耐性を高めたイメージング技術を開発した (Appl. Opt. **61**, 6714, 2022, Opt. Lett. **48**, 632, 2023)。散乱によるロバスト性の解析は A01-公 深津との連携による成果である。

D. 深層学習を用いた高分解能画像復元

ライトフィールド顕微鏡とフルフィールド蛍光顕微鏡を合体させた新しい光学顕微鏡を構成し、ライトフィールド顕微鏡で得られる低分解能 3 次元イメージング像をフルフィールド蛍光顕微鏡で得られる高分解能イメージング像に変換する深層学習モデルを構築した(Opt. Continuum **2**, 727, 2023)。実験系で教師データを取得できるため、散乱体越しの劣化画像に適用することを進めている。

A01-2: 粟辻 安浩 (京都工芸繊維大) 散乱・揺らぎ場における光の伝搬の可視化

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにするか

- (I) 散乱媒質中を伝搬する光の動画像記録技術を開発し、その実施形態を明らかにする。また、その実施形態に基づき、散乱媒質中を伝搬する光の動画像記録可能性を試験し、その能力を明らかにする。
- (II) 光伝搬動画像記録における光散乱ならびに揺らぎ特性の解析と散乱の補償方法を検討し、その実施形態を明らかにする。
- (III) この技術と顕微鏡技術とを融合し生物試料中を伝搬する光の様子を動画像記録と観察方法を検討し、その実施形態に基づき、生物試料中を伝搬する光の様子を動画像記録能力を明らかにする。
- (IV) この顕微鏡技術を生細胞に応用するための実施方法、実施形態を明らかにする。また、その実施方法、実施形態の生細胞に応用した場合の能力を明らかにする。
- (V) 散乱体の散乱特性を解析し、その影響を補償するために散乱光の波長依存性を明らかにする。

中間評価実施時までには、以下のことまで計画通り順調に進展している。

- (I) 散乱媒質中を伝搬する光の動画像記録技術の実施形態に基づき、散乱媒質中を伝搬する光の動画像記録能力を明らかにする。
- (II) 伝搬動画像記録における光散乱ならびに揺らぎ特性の解析と散乱の補償方法を検討し、その実施形態を検討する。
- (III) この技術と顕微鏡技術とを融合し生物試料中を伝搬する光の様子を動画像記録と観察方法を検討し、その実施形態を明らかにする。また、その実施形態に基づき、生物試料中を伝搬する光の様子を動画像記録と観察の可能性を試験し、その能力を明らかにする。

(2) 各計画研究で得られた成果&本研究領域内の共同研究等による成果

(I) 散乱媒質中を伝搬する光の動画像記録技術方法を考案し実証に成功 (A01-1 的場との共同研究)

散乱体中を光が伝播する様子の動画像記録に成功した。ゼラチンゼリーを透明容器に入れたものを散乱体として設定し、この散乱体中を伝播する超短光パルスを記録した。時間幅 178 fs の光を発するレーザーを記録光源として用いた。得られた動画から抜き出した 6 コマを図 6-4 に示す。各コマの間隔は 10 ps である。時間とともに、超短光パルスが伝播している様子がわかる。記録された動画の時間は 59 ps であった。(Sci. Rep. 11, 21890, 2021)

(IIA) 光伝搬動画像記録で得られる像の計算機シミュレーション法の創生

計算高速化のための散乱体中を伝播する光の動画像記録技術では、再生像に時空間歪みが生じることが主要な問題の 1 つであり、この歪みを解析し補償する手法が必要であった。時空間歪みの解析及び補償には、散乱体中を伝播する光の動画像記録技術においてホログラムがどのように記録されるかの再現が重要であるが、計算に膨大な時間を要しており、従来は実用的な時間内に結果が得られていなかった。そこで、再生像の時空間歪みを補正するアルゴリズムを開発した。また、中間評価実施時までには、再生像の計算機シミュレーションを実用的な時間内で完了できるモデルを創生した。これにより計算量は $O(N^2)$ から $O(N \log N)$ へと削減可能になる。図 6-5 に計算時間の比較結果を示す。一辺の画素数が 4096 画素の場合において、約 55 万倍の高速化に成功できた。本手法は計算時間だけでなく、光パルスの振る舞いも正しく表現できることを確認し本手法の有効性を明らかにした。(J. Opt. Soc. Am. A 39, A7, 2022)

(IIB) 再生に用いるホログラムのサイズと再生される像の特性との関係の解析と実証

動画像再生に用いるサブホログラム内に含まれる照明範囲と再生像の関係性について考察した。得られた再生像のうち、本検証で使用したホログラムから光パルスの像を再生するにあたり、 128×1024 以上の画素数で再生像を計算する必要があることを明らかにした。また、ホログラムのサイズを変更させ、異なる時刻における光伝播の像が複数同時に再生しているにもかかわらず、再生像の解像度が変化するのみで観察範囲は変化しないことがわかる。このことから、照明

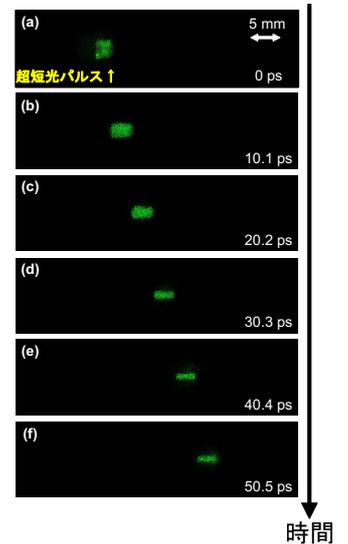


図 6-4 超短光パルスが散乱媒質内を伝播する動画像記録観察結果

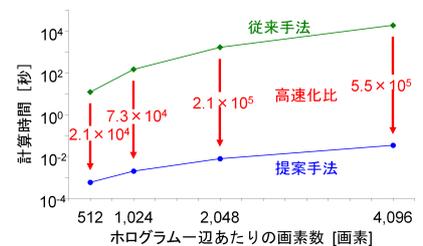


図 6-5 計算時間の比較結果

範囲が複数含まれるようにサブプログラムのサイズをクロップし再生像を得ると再生像の解像度のみが変化することも明らかにした。(Appl. Opt. 60, B59, 2021)

(II C) 像の歪みを予想するための再生像を計算するためのアルゴリズムの考案と計算による再生像予測の実現

光伝搬動画像記録技術と顕微鏡技術とを融合したシステムを設計し、問題点を明確化した。物体照明光パルスが物体を照明する速度と参照光パルスが物体を照明する速度に差が生じる。その結果、記録時間が短くなり、像が歪むことを明らかにした。

(III A) 光伝搬動画像記録時間の延長方法の考案と実証

顕微鏡の視野内で伝播する光を動画像記録する場合は、動画の記録可能時間が拡大率に応じて短くなり、その結果、対象とする現象を記録できなくなる場合が多い。そこで、光の伝播の動画像の記録可能時間の延長方法を考案し、考案方法を実現する光学系を実証し、記録可能時間の倍増に成功した。(Appl. Opt. 61, B206, 2022)

(III B) 複数の光伝搬動画像の1ショット記録技術の考案と実証

極短時間で生じる光の伝播の動画像を複数記録可能な方法として、角度分割多重方式、空間分割多重方式を考案し、それぞれの実証に成功した。ホログラム乾板を用いた場合について、図 6-6 に、1.8 ps の差で生じる2つの光の伝播の動画像を空間多重方式で1ショット記録した実験結果を示す。イメージセンサーを用いて記録する場合についても同様の結果を得た。**(極短時間差を有する複数の光が伝播する様子の複数動画像記録は世界初)** (Opt. Lett. 47, 3407, 2022, IEEE Photon. Technol. Lett. 34, 931, 2022, J. Opt. Soc. Am. A 40, 370, 2023)

(III C) 生物試料中を伝搬する光の様子の動画像記録と観察に成功

(A01-1 的場との共同研究)

生物試料中を伝播する光の動画像記録方法を考案し、その実証に成功した。図 6-7 に、10 μm の厚さのタマネギの薄皮を通して伝播する光の動画像記録・観察結果を示す。鶏肉、豚肉についても同様に結果を得た。**(生物試料中を光が伝播する様子の動画像観察は世界初)** (SI-Thru 2022, COSI 2022, OPJ2022)

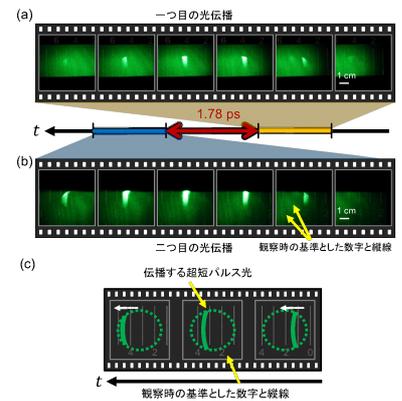


図 6-6 極短時間差で生じる 2 つの光の伝播の動画像を空間多重方式で 1 ショットした実験結果

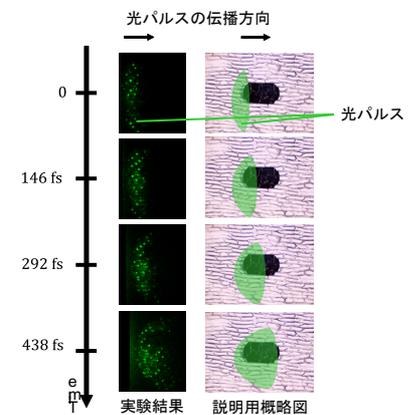


図 6-7 タマネギの薄皮を伝播する光の動画像記録・観察結果

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までをどこまで明らかにするか

本計画研究では、散乱・揺らぎ媒質に対する入力光と出力光とを関係づけ、散乱・揺らぎ特性を解析してモデリングを試みる。また、揺らぎ・散乱特性に応じた除去方法を考案し、散乱揺らぎ抑制イメージングシステムを構築し、構築した手法の実問題応用を目指す。具体的には下記の3項目に分けて、顕微鏡によるミクロな世界から、天文分野に至るまでマルチスケールな揺らぎ・散乱に対して適用可能な散乱透視イメージングの基盤技術を創成する。

(I)散乱・揺らぎ現象のモデリング

- A. 深層学習を組み込んだ光相関計算機イメージングにより、散乱・揺らぎ媒質に対する入力光と出力光とを関係づけ、散乱特性のデータベース化及びモデリングを試みる。
- B. 偏光状態と空間分布の不可分性等の電磁場の特徴量に着目し、これらを用いて散乱媒質を特徴づける新たな指標を特定する。また散乱媒質と検出系の組み合わせによって情報が失われる過程を解析し、検出系の設計指針を得る。

(II)新たな揺らぎ・散乱除去法の提案・構築

- A. 深層学習を組み込んだ光相関計算機イメージングによる散乱揺らぎ抑制イメージングシステムを構築する。
- B. 位相シフトデジタルホログラフィーを用いた散乱揺らぎ抑制イメージングシステムを構築する。

(III)実問題への応用

- A. 生体組織に対して散乱・揺らぎ場モデリングと新たな揺らぎ除去方法により、透視を実現する。
- B. 光空間通信に着目し、シミュレーションと実験によりホログラフィックデータベースの適用方法の提案及び適用効果の検証をする。また、ホログラフィックデータベースの近赤外波長帯域等を含む多波長での利用可能性・その有用性について指針を得る。

中間評価までに実施予定であった、I、II、IIIにおける基礎要素技術の開発及びイメージングシステムの開発に成功し、順調に進捗し、当初の期待を上回る成果を得ている。今後2年間で、散乱揺らぎに対するより具体的なモデルの構築と検証、散乱透視イメージング技術の高度化及び A03-6 玉田班、A03-7 高山班、A03-8 早野班及び公募研究と共同研究による実問題への適用を実施していく。

(2) 各計画研究で得られた成果&本研究領域内の共同研究等による成果

(I)散乱・揺らぎ現象のモデリング

A. 深層学習相関イメージングによる散乱特性のデータベース化及びモデリング

- ・ 深層学習を組み込んだ光相関計算機イメージングを提案・構築した。散乱・揺らぎの解析とモデリングに活かすために、深層ニューラルネットワークの層構造の寄与を解析し、モデリングの指針を見出した(図6-9)。
- ・ 空間位相変調器により大気揺らぎを付加した単一画素イメージング光学系を構築し、再構成時に深層学習により、散乱・揺らぎを除去可能な透視イメージングを基礎実証した(図6-10)。
- ・ 超高速に大量の複素符号化光パターンを安定生成できるシステムに向けて、ホログラフィック光記録・再生(光相関)システムの安定化・高速化を追求し、光相関システムの光学デバイスを改良した。本光相関システムにおいて、2022年12月に光相関デバイスインターフェイスが国際標準化 ECMA-420 Device interface information for high-speed collation using holographic optical correlation URL:ECMA-420 - Ecma International (ecma-

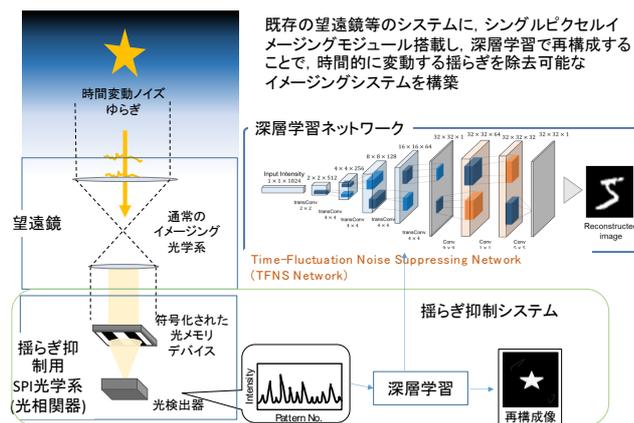


図6-9 深層学習を組み込んだ光相関計算機イメージングによる望遠鏡搭載の概念図とDNNの層構造

ゆらぎ無し	ゆらぎあり		
	SPI	従来DNN	提案DNN

図6-10 深層学習(DNN)による揺らぎ除去結果の比較

international.org)として承認された。ダウンロード件数は 200 近い標準化の中でトップ 10 位となり、ハードウェア系の標準化として注目された。(国際標準化 1 件、招待講演 1 件、国際会議 6 件、国内会議 10 件、特許 1 件、受賞 3 件、学術論文投稿準備中 2 件)

B. 偏光状態と空間分布の不可分性等の電磁場の特徴に合わせたモデリング

- ・ 散乱光の偏光状態分布を詳細に撮影する光学系の構築し、薄い散乱物体による散乱光の偏光状態分布の撮影と特徴量を評価した。また、散乱前後の空間分布と偏光状態の不可分性の変化を扱う理論的な枠組みを整備し、上記を用いた散乱前後の空間分布と偏光状態の不可分性の変化の実験的検証に着手した。
- ・ ストックスカメラにより、高い空間周波数を持つ偏光状態分布を生成する干渉計を用いて空間分解能を評価した。理論的枠組みについては先行研究で採用されたコンカレンスをまず検討した。コンカレンスは純粹状態についてはよい指標だが、混合状態にはより最近提案された内在的コンカレンスの方が適している可能性があり、簡単な 2 量子ビット系で基本的な性質を明らかにしつつある (基調講演 2 件、招待講演 7 件、国際会議 2 件、国内会議 1 件、学術論文投稿準備中 1 件)。

(II) 新たな揺らぎ・散乱除去法を提案・構築

A. 深層学習を組み込んだ光相関計算機イメージングを発展させ、揺らぎ・散乱除去法を実現

- ・ A03-8 早野班との共同研究によって、大気揺らぎのモデルを検討し定量化した(図 6-11)。深層学習を融合させた光相関計算機イメージングにおいて、深層学習による再構成精度の向上を確認した。

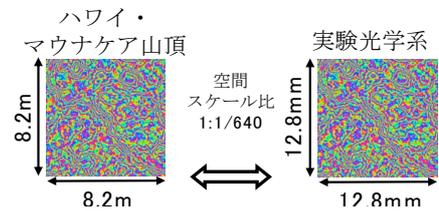


図 6-11 大気揺らぎモデルの例

B. 位相シフトデジタルホログラフィーを用いた新たな散乱揺らぎ抑制方法の実験実証

- ・ 共通光路デジタルホログラフィーと位相シフトデジタルホログラフィーを用いた新たな揺らぎ・散乱除去法を考察し実証した(Light: Advanced Manufacturing 3, 1, 2022, Opt. Lett. 47, 1170, 2022)。(図 6-12) また、新たな光導波路を設計して実装し(図 6-13)、揺らぎ除去が可能であることを実証した(Opt. Lett. 48, 3215, 2023)本論文は **Editor's Pick** として選出された)。
- ・ 複素振幅分布を高速に測定可能な波面センサーに向けて、ホログラフィック光相関システムと単一画素イメージングを融合させた光相関デジタルホログラフィーの有効性をシミュレーションにより確認し、実験系の構築と基礎実験評価を行った。散乱特性評価の一つである複素符号化光パターンとの相関特性取得に向けて、位相パターンを扱うことの可能な、基礎的なホログラフィック光記録・再生 (光相関) システムや単一画素イメージングの光学系を構築した。

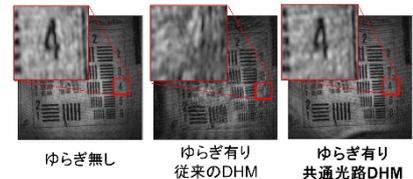


図 6-12 共通光路による揺らぎ除去の実験結果

(学術論文 3 件、国際会議 7 件、国内会議 4 件、特許 1 件、受賞 3 件、学術論文投稿準備中 3 件)

(III) 実問題への応用

A. 生体組織に対する散乱・揺らぎ場へのアプローチ

共通光路位相シフトデジタルホログラフィーを提案し、提案手法による異種複合媒質の背後に隠された物体の 3 次元イメージングを実証した。これにより生体内イメージングへの応用の可能性を見出した。A03-6 玉田班と連携し実問題への応用の可能性を追求した。

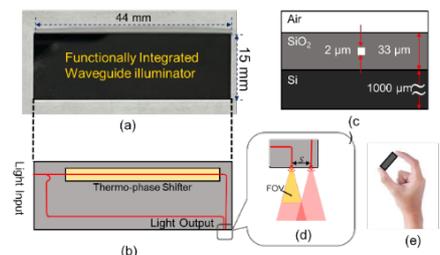


図 6-13 試作した新しい光導波路型デジタルホログラフィック顕微鏡のデバイス

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにするか

本計画研究では、これまで取り組んできた波動散乱逆問題を解析的に解く散乱場理論(RIMS Kokyuroku, No. 2186, 75-86, 2021, System/Control/Information, The Institute of Systems, Control and Information Engineers, 64, 87, 2020.)について、誘電分散問題や多重散乱問題を組み込み、様々な対象物に適合可能な映像化理論を構築、非破壊検査、非侵襲生体画像診断に応用することを目的とする。

(I)散乱場理論とこれを基にした映像化理論の研究

我々が導き出した波動散乱逆問題の解析解である散乱場理論に、複雑な伝搬経路を経て観測器に到達する多重散乱問題と、空間分解能低下の原因となる誘電分散問題を組み込んだ散乱場理論、映像化理論を世界で初めて構築する。

(II)新しい散乱場理論の実証研究

生体における電磁波の伝搬においては、生体中における水の誘電分散が、再構成時に大きな問題となる。本研究では、マイクロ波散乱場断層映像化法に、誘電分散問題を組み込んだ散乱場理論を適用し、高分解能化の実証研究を進める。

中間評価実施時において、以下の通り、計画以上に進展している。

(I)では、多重散乱現象を散乱場理論に組み込んだ新たな理論の確立に成功した。

(II)では、散乱イメージング法の空間分解能低下の原因となる誘電分散を組み込んだ散乱場理論を完成させ、最終的に得られる画像の数理的集束性の改善を確認する実証実験を行い、高分解能化を達成した。

(2) 各計画研究で得られた成果&本研究領域内の共同研究等による成果

(I) 多重散乱を組み込んだ散乱場理論の研究

本研究では、多重散乱現象を散乱場理論に組み込む、新たな理論の確立に取り組んだ。2次以上の多重反射を、先に述べた散乱場の偏微分方程式の4種類の基本解を組合わせて表現する(図6-15)。4つの基本解を合成して多重散乱を表現することから、多重散乱を考慮した逆解析を行うためには領域の境界全体での散乱波の観測結果が必要になることは明らかである。散乱場の基本解は4種類あるが、複素共役の関係にある解も含まれるので、独立に考えるべきは3種類である。これらの値を観測結果から決定するためには2つの後方散乱と前方散乱による計測が必須である。3次元領域での多重反射を考慮した逆散乱解析は、これまで数学的に困難とされる問題となっており、散乱場理論を用いて逆散乱問題の解を与える本研究が当該分野で最初のことである。

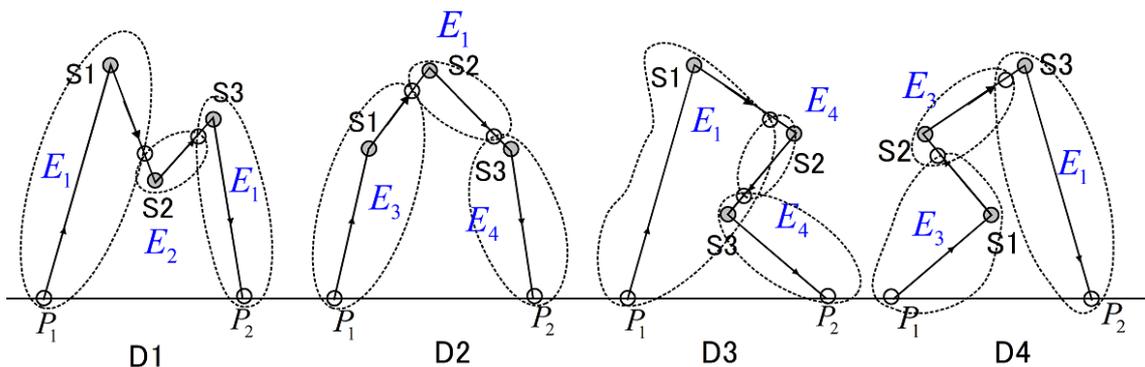


図 6-15 波動の減衰が少ない媒質において重要となる多重散乱の問題に関して、高次の散乱場関数を測定対象を取り囲み観測し得る手前側の、1次前方散乱、1次後方散乱、反対側の1次前方散乱、1次後方散乱の合成で表現される。

(II)誘電分散を組み込んだ散乱場理論の研究と実証(JSMI Report, 15(2), 17-24, 2022., 科学 岩波, 93(2), 163-166, 2023., springer NATURE, 1, 163-175, 2023., X-ray Imaging Optics, 55, 2023.)

我々は、波動散乱の逆問題を解析的に解き、領域内部の構造を断層映像化する散乱場理論の確立に成功した。物体内部の断層映像化においては、観測結果を境界値として、最終的に導かれた散乱場関数を、時間と空間の極限操作を行うことで、映像化関数を導く。この映像関数では従来の画像計測法で可視化することが原理的に不可能な、散乱体の裏側に数学的に焦点を合わせることが可能となる。

本研究では、この散乱場理論を基に、波動の伝搬速度に直接的に影響する媒質が持つ誘電分散を組み込んだ散乱場理論を完成させ、最終的に得られる画像の数学的集束性の改善を確認する実証実験を行い、空間分解能の向上を確認した。図 6-16 に実験装置外観を、図 6-17 に 5 GHz において比誘電率 6.5、14 GHz において比誘電率 5.5 である周波数に依存して比誘電率が変化する誘電分散性がある物質が媒質である場合における再構成画像を示す。誘電分散を考慮すべきは、特に生体における水のように、波長に対して十分微視的なスケールで、媒質の中に均一に取り込まれている場合で、周波数に応じて波動の伝搬速度が異なり、結果として媒質深部における空間分解能劣化の原因となる。誘電分散を組み込んだ散乱場理論では、映像化関数を導く過程において、波動の振動数に応じた誘電率差に由来する光速補正を実施するため、媒質における誘電分散に関して適切な入力値が必要となるが、例えばデバイ理論に基づく誘電分散の理論式を組み込むことにより、再構成された画像上の散乱点における数学的集束性から媒質の平均的な誘電分散を理解することができる。本理論の実証実験では、主成分が脂肪組織であり、内部において水が一様に分散した状態を示す、乳房及び“散乱体として乳癌組織”を用いて、著しい空間分解能の向上、すなわち癌組織局在位置の高精度特定に成功した。水を媒質に含有する観測対象は無数に存在するため、本成果の重要性が大いに示されたと考える。

我々が導いたこれらの散乱場理論は、単に“理論上の美しさや新しさ”のみならず、実用上も画像再構成コンピュータソフトウェアの基礎として優れた数学的アルゴリズムを生み出すことに大いに役立った。観測結果から瞬時に正確な 3 次元再構成画像を計算可能で、画像計測分野への応用は計り知れない。本研究により、様々な透視技術が開発され、“領域内を多彩な物理量によって断層的に診る眼“により、物質科学、医学、地質学等において、構造と機能に関する理解が前進することが期待できる。A01-1 的場らと、可視光領域での多重反射現象を活かした見えない物体の可視化技術の開発を議論しており、今後の研究としては、これまでの研究成果を踏まえて、散乱場理論を基に、工学的見地において重要な映像化理論の確立を進めていく。具体的には、有限の広さをもつ波動送信領域、受信領域が設定され、これを観測器とした場合、観測器が観測対象空間内の、選択した領域に波動を照射し、その領域内での散乱逆問題を解く理論の構築を進める。さらに、波動の伝搬において減衰著しく、透視が困難な観測対象において、静的もしくは準静的な場を用いた映像化理論の研究を行い、工学的限界を組み込んだ普遍的な理論体系の確立を行う。

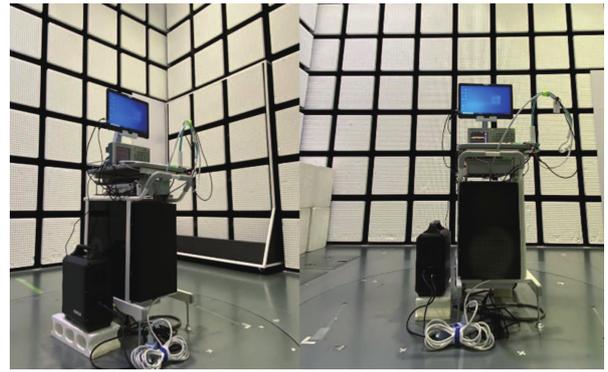


図 6-16 実験装置外観.

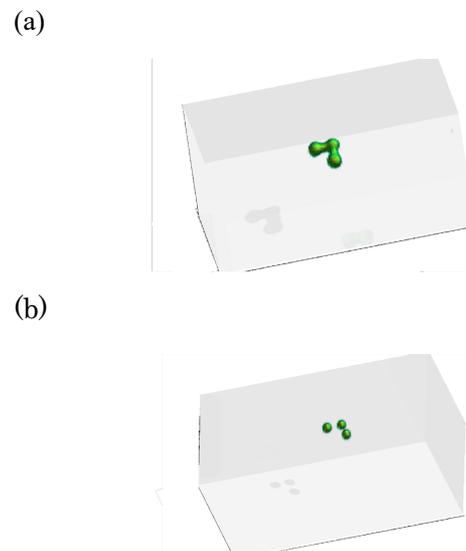


図 6-17 5 GHz において比誘電率 6.5, 14 GHz において比誘電率 5.5 という誘電分散性がある物質が媒質である場合の再構成画像. (a)従来の散乱場理論を用いた場合. (b) 誘電分散を組み入れた散乱場理論を用いた場合.

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにするか

本計画研究では、深層学習を含む機械学習やスペックル相関イメージングなど情報工学に基づく手法を活用した、簡素な光学系かつ低侵襲的な散乱イメージング技術の開発を目的とする。散乱媒質の性質に応じて機械学習に基づく手法とスペックル相関に基づく手法を使い分け、急峻な時間変化への対応や多次元信号への拡張を進める。また、機械学習とスペックル相関の融合を進め、デジタル透視技術の確立をめざす。具体的研究項目として、以下の四つの課題を設定し、研究を進めており、中間評価実施時までには、順調に進展している。

(I) 教師なし学習・半教師あり学習による散乱イメージング

これまで逆問題解析型アプローチの一種として機械学習を用いた散乱イメージングに関する先駆的研究に取り組んできた。波面計測に対して教師あり学習を融合することで、設計自由度を大幅に拡張した高速波面計測手法などでの有効性を確認してきた。しかし、教師あり学習では、学習データを生成する実験・時間コストや被計測対象に対する侵襲性が問題である。そこで、GAN等の教師なし学習や半教師あり学習を利用した新たな散乱イメージング手法の確立をめざす。中間評価時までには、提案手法について数値解析や光学実験による原理検証を実施する。その研究成果の応用・拡張及び派生技術に関して、領域設定期間を通じて探求し、さらなる散乱イメージングの高度化をめざす。

(II) スペックル相関イメージングの多次元化・広視野化

既存のスペックル相関イメージングに対して、波長次元への拡張を行い、さらなる多次元化を進める。また、スペックル相関イメージングへの機械学習の導入により、視野拡大に取り組む。スペックル相関イメージングは、光学メモリー効果と呼ばれる散乱光のシフト不変性を利用する散乱イメージング技術であり、緻密なキャリブレーションや特殊な光学素子が不要である。さらに、非侵襲イメージングの実現ができ、機械学習型アプローチで課題となる大量のデータセットを必要としない。しかし、従来法では、被計測対象は2次元対象に制限され、光学メモリー効果の範囲により適用範囲は小領域に限定されていた。これまでに3次元光学メモリー効果によるスペックル相関イメージングの3次元化に成功している。そこで、波長次元への拡張を行い、さらに、機械学習の活用により、視野拡大に取り組む。数値解析や光学実験による原理検証を中間評価までに行い、領域設定期間を通じて、本技術の拡張と実問題への適用に取り組み、非侵襲散乱イメージングとしての有用性を示す。

(III) 散乱補償に基づく動的散乱媒質イメージング

信号処理、特に散乱透過行列法による散乱補償技術を発展させ、動的に状態変化する散乱媒質に対しても適用可能な透視イメージング技術の開発を目標とする。本技術の実現には、動く対象に対して散乱透過行列の初期値を高速に計測する手法の開発と、得られた散乱透過行列の時間更新の数理モデルを確立することが必要である。そこで、中間評価までには、散乱透過行列の高速計測手法を設計し、その手法の効果を実際の散乱体を用いた光学実験により実証するところまでを実施する。

(IV) デジタルツインによる高精度デジタル透視技術

情報科学におけるサイバーフィジカルシステム概念を応用した新たなデジタル透視技術の開発をめざす。実世界での計測とそのデータに基づくデジタルツインの解析により、散乱媒質中の計測対象をサイバー空間上で再現し、観測系全体の透視を実現する。本手法の開発には、計測システムとデジタルシステムの相互連携が不可欠である。中間評価時までには、本手法の優位性を示しうる計測対象を選定し、具体的な計測サイクルを通して、デジタルツインを構築する枠組みを確立する。

(2) 各計画研究で得られた成果&本研究領域内の共同研究等による成果

(I) 教師なし学習・半教師あり学習による散乱イメージング

インコヒーレント光を光源とする符号化開口を利用したシングルショット散乱イメージングについて取り組んだ。瞳面に符号化開口を挿入し、点像分布関数推定における未知数削減により、物体再構成を実現した。概念実証として、レンズによる大きな収差関数を与えたスペックル強度画像から良好な再構成画像を得ることに成功した(図6-18)(Appl. Opt. 61, 6408, 2022, OPJ2022 優秀講演賞受賞)。散乱イメージングの3次元化や高速化に向けて、光波面制御技術に機械学習を導入し、設計速度の向上を図った。既開発の高速2次元光波面制御技術を3次元まで拡張した。実験実証では、2層から4層までの任意の再生像を表示するホログラムを瞬時生成することに成功した(Appl. Opt. 60, A323, 2021, 2022年度日本光学

会光学論文賞受賞)。散乱体を通した光制御技術の構築に向け、インコヒーレント光を用いた位相共役光による波面制御に取り組んだ。数値実験及び実証実験において、背景ノイズを抑制する手法を適用することにより、高品質な光制御を実現することに成功した (Appl. Opt. **61**, 5532, 2022)。シングルショット広視野位相イメージングに向け、シフト不変の散乱プロセスを利用したコヒーレント回折イメージングに取り組んだ。点像分布関数が事前測定された散乱体を瞳面に設置し、ランダム性を導入する。実験実証では、散乱強度画像から対象の複素振幅の推定に成功した (Opt. Rev. **29**, 504, 2022)。散乱イメージングにおける光源の小型化、低コスト化を目的に、インコヒーレント光による波面制御手法の原理構築にも取り組んだ。実験実証では、LEDを複数ランダム波面として扱うことにより、計算時間の圧縮に成功した (Opt. Lett. **47**, 613, 2022)。光線力学的治療のための蛍光三次元イメージング (A03-公 西村) における同手法の活用について、共同研究に向けた議論を進めている。

(II) スペックル相関イメージングの多次元化・広視野化

非侵襲散乱イメージング手法であるスペックル相関イメージングの高機能化に取り組んだ。波長次元に対する光学メモリー効果の利用により、波長軸への機能拡張を実証した。実験実証では、2波長のカラー点光源を対象として、散乱体を通したスペックル強度画像を取得し、シングルショットで波長ごとの再構成に成功した (Appl. Opt. **60**, 2388, 2021)。光学メモリー効果の範囲によって視野が制限されるスペックル相関イメージングの課題に対し、対象推定と同時に散乱特性を推定する手法を開発した。実験実証として、インコヒーレント光を用いて、散乱体に挟まれた物体の再構成を実施した。散乱特性の推定を行わない従来手法に比べ、提案手法により大幅に視野が拡張できることを実証した (図 6-19) (Intelligent Computing, 9787098, 2022)。

(III) 散乱補償に基づく動的散乱媒質イメージング

多重化計測により散乱透過行列計測の走査次元を削減し、全体の計測を高速化する手法を開発した。数値実験により定量的な効果を検証した上で、実際の散乱体と散乱イメージング系を用いた光学実験により現実環境下での原理実証を完了した。その結果、散乱透過行列の計測の実効的な高速化を確認した。これにより、透過行列法に基づく散乱イメージングがより静止時間の短い散乱体に対しても適用可能となることを示した [論文執筆中]。散乱透過行列を計測するうえで位相情報を計測・再構成する技術が基盤となるが、同技術を大視野イメージングの三次元化 (A02-公 市村) にも適用すべく、数値実験による原理実証を完了した。

(IV) デジタルツインによる高精度デジタル透視技術

サイバーフィジカル計測技術の概念構築のため、量子ドット分散系を対象としたデジタルツインの構築を試みた。励起光に対する蛍光応答信号より、レート方程式を規範として、量子ドットの3次元配置を推定した。モデルの構築、計測データによる推定、評価、モデルの修正、のPDCAサイクルを繰り返し、適切なデジタルツインを得ることができた。デジタルツインから得られる推定応答は計測データを再現しており、サイバーフィジカル計測技術の一事例として、提案手法の有効性を実証できた [論文執筆中]。マウス脳神経光刺激技術との組み合わせによる散乱体内部計測手法への適用について計画研究的場班と、生体深部イメージングへの適用について計画研究玉田班と、共同研究に向けて検討中である。

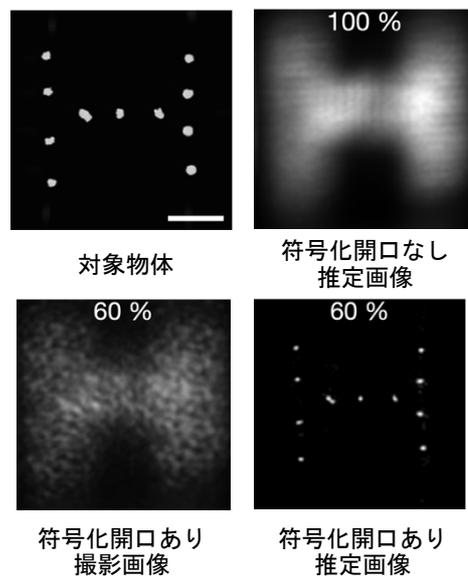


図 6-18 デフォーカス撮影画像に対する符号化開口ブラインドコンボリューション

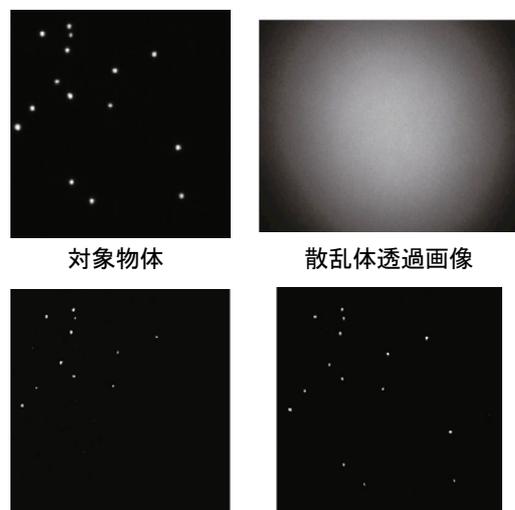


図 6-19 散乱特性推定に基づく広視野スペックル相関イメージング

A03-6：玉田 洋介（宇都宮大学）生きた細胞や組織における散乱・揺らぎ計測と制御

（1）領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにするか

生きた細胞や組織は特に強く複雑に光を散乱させる。こうした微細な細胞構造や複雑な組織などによる光の散乱に関して、領域の研究者と一体となった包括的な研究を進めることが領域設定期間内における本計画研究の目標である。具体的には、領域における光学・数理科学・情報科学・天文学の研究者と共同で、以下の研究を進める。

- （Ⅰ）生きた細胞や組織における光の散乱を詳細に計測する。
- （Ⅱ）散乱の根源となる生体構造を解明するとともに、生体における散乱をモデル化する。
- （Ⅲ）散乱を抑制する光波を合成して生組織深部に入射するとともに、補償光学を適用することで、生細胞・生組織深部を透視する。
- （Ⅳ）生体分子による微細かつ高速の散乱現象を計測し、その動態を解明する。
- （Ⅴ）散乱の少ない生物を遺伝子操作により作出し、生物学的に光学特性を向上させる。
- （Ⅵ）以上の研究により達成される生細胞・生組織深部の透視の標的として、細胞核における染色質動態を解明する。

以上の研究計画のうち、中間評価実施時までには、（Ⅰ）生体構造による光の散乱の詳細な計測、（Ⅲ）補償光学を用いた光の乱れの補正、（Ⅴ）散乱の少ない生物の遺伝子操作による作出まで進めようとし、

（2）に記載する成果が得られるなど研究は順調に進展している。また、（Ⅳ）、（Ⅵ）についても進展が得られたため、（2）に記載する。

（2）各計画研究で得られた成果&本研究領域内の共同研究等による成果

（Ⅰ）生体構造による光の散乱の詳細な計測（A01-1 的場、A01-2 粟辻、A01-公 渡部との共同研究）

生きた植物（ヒメツリガネゴケ）の細胞核に局在した蛍光タンパク質からの蛍光の位相・振幅情報を強度輸送方程式を用いて計測することに成功し、論文として発表した（IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. 27, 6801809, 2021）。生きた動物（野生型メダカ胚）についても、強度輸送方程式を用いて位相・振幅情報を計測した。強度輸送方程式を用いた位相・振幅情報の計測は、生きた細胞や組織における散乱・揺らぎ情報を計測する基盤となる。

また、どのような生体物質が細胞内の光の擾乱に寄与するかを解明することを目標として、強度輸送方程式について理論的な改変を行い論文として発表した（Phys. Rev. Research 5, L022043, 2023）（次頁にて連携した渡部公募研究の項で詳述）。

（Ⅲ）補償光学を用いた光の乱れの補正（A03-8 服部との共同研究）

服部 雅之博士（国立天文台）との共同研究のもと、高精度補償光学系をイメージングに適用する研究を進めた（非公開図 6-20）。また、服部博士、三浦 則明博士（北見工業大学）との共同研究によって、点光源がなくてもシャックハルトマン波面センサーのサブアパーチャー像同士の相関を計測することで光の乱れを捉える手法を、補償光学を用いた生細胞イメージングに適用する研究を行った。その結果、実際に生きた植物（ヒメツリガネゴケ）細胞による光の乱れを計測・補正し、像劣化の改善に成功した。さらに、画像相関による波面計測法を用いて生物の明視野像から光の乱れを計測する際に必要となる明瞭なコントラストを得るための適応的な光学系を構築し、生きたヒメツリガネゴケ細胞に適用した。

また、蛍光顕微鏡の3次元画像から光学収差を測定する技術を確立して、超解像顕微鏡の画像を改善することに成功した。さらに、強度輸送方程式により測定した物体面の位相分布から瞳面の位相分布の導出を試み、導出した波面を用いて全視野顕微鏡における補償光学が実施可能かシミュレーションを行ったところ、光波面の乱れが補正され改善された画像が得られた。

（Ⅳ）生細胞における高速かつ微細な散乱現象の解明（A01-公 廣井との共同研究）

生きた植物（ヒメツリガネゴケ）の細胞に対し顕微鏡的光散乱法を適用し、散乱光強度の時間相関関数に緩和成分が表れることを明らかにした（下記に連携した廣井公募研究の項で詳述）。

（Ⅴ）散乱の少ない生物の作出

遺伝子操作によって散乱の少ない生物を作出する研究を行った。すでに、植物細胞における散乱・揺らぎの主な原因は、葉緑体にあることを明らかにしていた。葉緑体に含まれるクロロフィルなど油性の色素による高屈折率が光を乱す原因であると考えられた。そのため、遺伝子操作によって、これらの影響をなくす、もしくは小さくすることを試みた。具体的には、葉緑体における油性色素の量が低下した遺伝子組換え株、葉緑体の配置が変わる遺伝子組換え株（非公開図 6-21）などを作出した結果、一部の

株において実際に細胞における光の透過性の向上が観察された。このような現象が生物に共通なものか否かを確かめるため、分裂酵母において細胞核膜の脂質膜が異常発達する変異体を作成した。

また、生きたテトラヒメナには自家蛍光が強く、蛍光観察が困難であることが知られていたが、合成培地を用いることにより自家蛍光をほぼ完全に除去することに成功した。

(VI) 生組織深部の細胞核イメージング

ヒメツリガネゴケの植物体深部にて起きる精子形成過程における細胞核を観察し、3次元画像解析を行った。そうしたところ、野生株の精子形成過程においては、細胞核が同調的に収縮し、最終的に精子が泳ぐのに適したひも状の細胞核を形成することが分かった(図6-22左)。一方で、DNAのひずみをほどく酵素であるDNA Topoisomerase I (TOP1) をコードする遺伝子の欠失株では、細胞核の収縮が同調的に起こらないことが分かった。その結果、精子が放出される段階でもひも状に収縮した細胞核は稀であり(図6-22右)、それによって受精の効率が著しく低下することを明らかにした(New Phytol. 234, 137, 2022)。

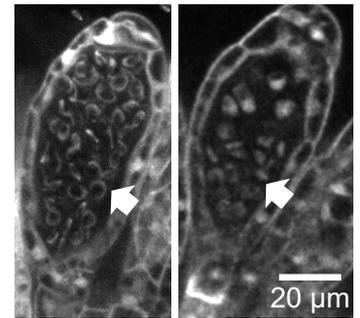


図 6-22 野生株(左)とTOP1欠失株(右)の精子細胞核(白矢印)

連携する公募研究において得られた成果

A01-公：渡部 匡己(理化学研究所) 蛍光イメージングにおける細胞内光学特性の再構築

光学系における波動関数の複素振幅は、「強度」と「位相」の2つの物理量から構成されている。これらの相関は、強度輸送方程式(TIE)によって数学的に表現できる。しかし、従来のTIEの形式化では、複素平面波が任意の位相空間を伝搬することを仮定しているため、光が細胞内の不均一構造を通ることで起こる光学的効果を計算することができない。本連携研究では、細胞内の屈折率乱流を表す光学フラクタルモデルを用いて、TIEの再定式化を行った(Phys. Rev. Research 5, L022043, 2023)。広範囲の波長領域においてTIEをシミュレーションすることで、強度分布がどのようにしてフラクタル構造と相互作用して分散・減衰するのかを明らかにした。また、細胞内の位相分布とWhittle-Matern光学相関を数学的に結び関数を導出することに成功し、蛍光画像から細胞内の屈折率揺らぎ・フラクタル次元・散乱係数などの光学的特性を再構築できるようになった。

A01-公：廣井 卓思(物質・材料研究機構) 白色顕微鏡的散乱法による不均一物質の揺らぎの可視化

高濃度コロイド分散液や生細胞中における溶質のダイナミクスは、ブラウン運動からずれており、このダイナミクスが物性や生体機能に重要であると予想されている。しかし、揺らぎの長さスケールはナノメートルオーダーであり、計測が困難であった。

そこで本公募研究においては、白色パルス光源を用いた顕微鏡的散乱法の開発によって、複雑なダイナミクス計測を実現した。開発した装置を用いて、高濃度(1~50 wt%)コロイド分散液の時間相関関数の緩和速度の波長依存性を測定した。ポリスチレン微粒子分散液については、ブラウン運動に特徴的な緩和速度の q^2 依存性(q :散乱ベクトルの大きさ)が明確に観測された。これに対し、ある種のコロイド粒子においては緩和速度が q^2 からずれており、ブラウン運動からのずれが示唆された。

さらに、生細胞に対する顕微鏡的散乱法の応用についても検証を行った。玉田計画研究が提供したヒメツリガネゴケの生細胞中の細胞質に対して顕微鏡的散乱計測を行ったところ、散乱光強度の時間相関関数に緩和成分が表れることを明らかにした。この実験結果は、動的散乱法による揺らぎ計測が生体機能の解析に有効であることを示唆している。

A03-7：高山 佳久（東海大学）空間光伝搬通信における散乱・揺らぎ計測と制御

（1）領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにするか

光の空間伝搬を用いる通信では、通信光が大気から被る影響による通信品質の劣化が問題である。その解決には光伝送の安定化が必須であるが、これまでに十分な研究成果は得られていない。本計画研究では領域設定期間内に、気象が伝送光へ与える影響の生成要因を解明し、大気揺らぎを介した場へ安定した光伝送を可能とする波面制御モデルを構築する。この目的を達成するため 3 つの基盤技術を構築する。

（I）精密気象計測による大気の光学特性の推定

（II）超高解像度数値気象モデルを用いた大気揺らぎの光学的影響の予測

（III）通信光の波面操作による照射の安定化

地表面近くには接地境界層と呼ばれる大気の層が存在し、地面摩擦と温度成層の影響を受け密度成層乱流が生成され、数百メートルからミリメートルオーダーまでの小さな渦が発生する。そこで（I）では、2021年度に超音波風速温度計を用いて屋外の乱流変動を計測し、その基礎的な解析を行った。2022年度には、レーザーを用いて大気揺らぎを計測するシンチロメーターを導入し、100 m 以上の距離での大気揺らぎ及び乱流を含む気象観測の連続観測を行い、大気揺らぎと大気乱流の関係を解析した。2023年度は中間評価実施時までにはシンチロメーター、超音波風速計及び風観測ライダーを併用した連続観測を中心に多くのデータを取得し、大気揺らぎと大気乱流の関係を詳しく解析する。（II）では（I）で得た計測データを数値気象モデルに取り込み、気象予報システムを高解像度に改良した計算によって、通常の気象予報より 1 桁細かい解像度での数値予報を可能とした。2021年度は、計算機環境上に超高解像度数値気象モデルの基本部分を構築した。2022年度はこれを発展させ、高解像度の気象場から大気の光学的揺らぎに関する流体力学的特性を解析した。その結果から、本解析手法と流体力学的なモデルとの組み合わせの必要性が示唆された。そこで2023年度は、中間評価実施時までにはこのモデルの組み合わせによる新たなモデルの開発を検討する。また（I）の結果を用いて予測精度を向上させる手法の改良を継続する。図 6-23 に大気の屈折率構造関数の鉛直分布を示す。同図は（II）で得た特性であるが、（I）の屋外計測でも同様の特性を確認している。大気揺らぎは昼夜で同程度であるが風向が反対であり、風向が変わる日没前後は大気揺らぎが非常に小さくなることから、揺らぎの生成に熱環境と風速が大きく影響することが確認できる。図 6-24 には、地表での風速が平均で 3 m/s 時の（II）による計算例を示す。本研究の推進によって精密気象計測で得たデータから、通信の実施領域を包含する範囲の風向風速を再現可能となった。（III）では、（I）及び（II）の成果を反映し、通信光の波面操作による照射の安定化を図る。大気揺らぎを被った光は、伝搬に伴いその強度分布に時間的空間的にランダムに変動する斑を生じ、受信装置による通信光の検出を不安定にする。その対策として、精密気象観測及び超高解像度数値気象モデルから得た空気の散乱・揺らぎのパワースペクトルを考慮した波面操作を行う。2021年度は、大気揺らぎを通過した光波伝搬のシミュレーションプログラムを完成し、波面を操作した複数光の同時伝送によって、受信面における通信光照射の安定化を確認した。2022年度は、図 6-25 に示す飛行場において伝搬距離 1 km のフィールド実験を行った。図 6-25(b)に大気中を伝搬した通信光の受信開口部における強度分布を示す。複数光の同時伝送を実施し、光の照射面における強度分布の時間的空間的変動が抑制されることの確認に成功した。2023年度は、中間評価実施時までには再度、伝搬距離 1 km のフィールド実験を実施する。同時伝送する複数の光それぞれに On-Off Keying による強度変調を行い、本手法によって大気揺らぎを被った通信光による通信品質が改善されることを実証する予定であり、中間評価時までの進捗は計画通りに進んでいる。

（2）各計画研究で得られた成果&本研究領域内の共同研究等による成果

（I）精密気象計測による大気の光学特性の推定

東海大学湘南キャンパス、岐阜大学柳戸キャンパス、多目的航空公園（北海道大樹町）、宮古島シギラ湾で、数日～数か月の、大気揺らぎ計測を含む、大気乱流の観測を行った。さらに、岐阜大学構内で長期連続観測に挑んでいる。その結果、大気の光学的揺らぎは主に大気乱流による気温変動から生じるが、それをもたらす風の乱流変動を含めて計測し、その乱流特性の解析を行い、既往の Monin-Obukhov 則に基づく実験式の適用可能性、また、地形や周囲の地物に応じたパラメーターを同定できた。これにより、km 程度の空間スケールに対応する 10 分程度の平均の大気揺らぎを気象場と関連付けできた。これらの成果を Optics & Photonics International Congress 2022 にて共著発表し、数値気象モデルや光通信へ

も利用するため、データの集積を図るとともに、より短時間の大気揺らぎの解析へと駒を進めている。

(II) 超高解像度数値気象モデルを用いた大気揺らぎの光学的影響の予測

数値気象モデルに LES のスキームを組み込むことにより、100 m 程度の空間解像度で地上付近の大気状態及び大気揺らぎに関する指標の再現を行った。その結果、大気揺らぎの大きい空気塊の物理的挙動特性を見出した。従来の数値気象モデルを改良した成果は、*Japanese Journal of Applied Physics* にて 2023/05/27 付けで採録決定されている。また新たな解析結果を中心に現在は共著による論文執筆を進めている。高解像度化について、これまで数値気象モデルに用いていた LES スキームでは不十分であることも見られた。現在は LES 気象モデルの開発・活用に着手しており、試験的な計算結果が得られる段階まで進んでいる。

(III) 通信光の波面操作による照射の安定化

波面を操作した複数の光の同時伝送によって、大気揺らぎを被る経路を伝搬した光による受信面の安定照射を可能とした。またシミュレーションにより通信品質の劣化が抑制されることを示し、その成果を *Optics & Photonics International Congress 2022* にて共著発表した。これらの成果に基づき、特許出願を行った。本手法は複数の機関から引き合いがあり、その採用について検討が進んでいる。また効果的な波面操作の手法を早野及び国外企業との連携で推進し、現在は共著による論文執筆を進めている。

なお、第2期公募において採択された「大気揺らぎの中を伝搬するレーザー通信光の TEM 波の特性に適した基底モードの解明」は本計画研究と密接な関係を有する研究である。中間評価実施時までに伝搬距離 1 km のフィールド実験を連携して実施する予定である。

A03-8：早野 裕（国立天文台）光波の時空間における計測・変調・制御を駆使した地球型惑星検出に迫るイメージング

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにするか

我々の計画研究では、領域期間内で太陽系外惑星の新しい検出手法である CDI-SAN (Coherent Differential Imaging on Speckle Area Nulling) 法の理論を確立し、計算機シミュレーションで理論の確認をし、実験室において実験系を構築し実証することである。この実現に向けては主星による散乱光の大幅な削減が必須であり、恒星の明るさに比べて 8~10 桁低い、惑星を如何に抽出するかが大きな課題となっている。

CDI-SAN 法では、測定光学系の瞳面で高速で 5 種類の空間光位相変調を能動的に与えて、5 種類それぞれの変調ごとに焦点面の強度分布の時系列画像を積算処理することでランダムノイズを低減化する。それらの積算化した画像から中心星の散乱スペckルノイズを推定・補正して、散乱スペckルノイズに埋もれていた暗い太陽系外惑星を検出できる。そのために、以下のことを順次明らかにしていく。

- (I) CDI-SAN 法のアルゴリズムを計算機数値シミュレーションで確認し、期待される性能を評価する。
- (II) 確認した数値シミュレーションの性能を実験的に実証する。そのため、適切な空間位相変調鏡、撮像装置、制御装置を含めた実証実験光学系を構築、実験的に検証を行う。
- (III) 実際の望遠鏡を用いた実証実験。すばる望遠鏡の極限補償光学系 (Subaru Coronagraph Extreme A0, SCEXA0) やせいめい望遠鏡の極限補償光学系 (Seimei Coronagraph Adaptive optics, SEICA) に応用して性能を評価する。

中間評価実施時までには、項目 (II) の実証実験が実施されているのが目標であった。項目 (2) で述べるように実証実験を実施し、性能評価までを行っており、計画通りに研究が進んでいる。

(2) 各計画研究で得られた成果&本研究領域内の共同研究等による成果

項目 (I) のアルゴリズムの計算機数値シミュレーションは完了し論文に発表した(Nishikawa, *Astrophysical Journal* **930**, id.163, 2022)。シミュレーションの結果、CDI-SAN 法の適用前では散乱スペckルに惑星光が埋もれていたが、CDI-SAN 法を適用することで惑星が検出できている (図 6-26)。

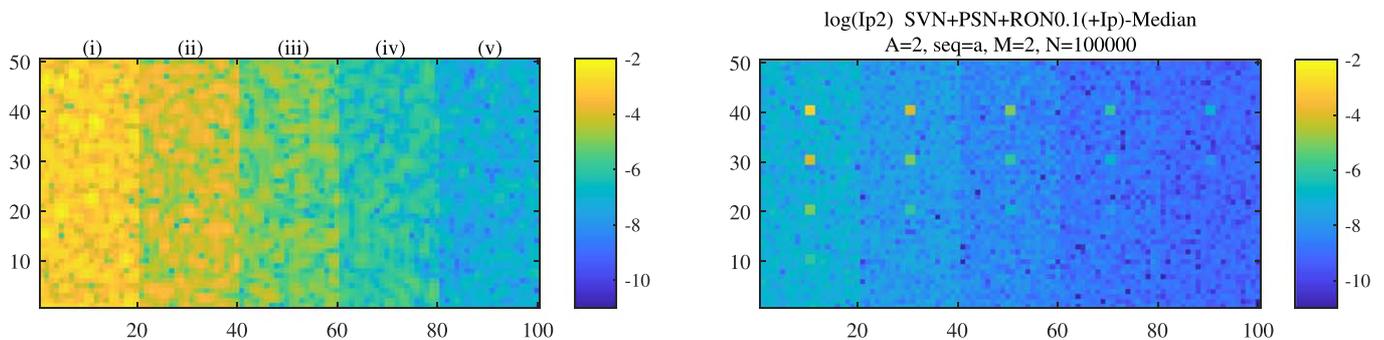


図 6-26 CDI-SAN 適用前 (左) と CDI-SAN 適用後 (右)。CDI-SAN 適用前の左の図では、中心星の明るさを 1 としたときに、散乱スペckルの平均的な明るさが、左から 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} 、 10^{-6} 、 10^{-7} の場合を横にならべて表示している。惑星は縦軸の 40、30、20、10 の位置に、散乱スペckルに対して 1、 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} という明るさにしている。従って、CDI-SAN 適用前の左図では、惑星と散乱スペckルが同じレベルかそれ以下なので、埋もれて見えない。一方で CDI-SAN 適用前の右図では CDI-SAN の効果で散乱スペckルが 1-2 桁低減されているため、主星に比べて 8 桁暗い惑星が明らかに検出できている。

項目 (II) では、図 6-27 (非公開部分) のような実験系を構築し、図 6-28 (非公開部分) に示したように、コロナグラフによる中心星の光の消去、Speckle Area Nulling (SAN) による Dark Hole 制御による焦点面の散乱スペckルの消去、CDI-SAN 法による散乱スペckルのさらなる低減が実現している。しかし、CDI-SAN 法による低減の比率は計算機数値シミュレーションとは異なり、半分程度となっている。この原因の追求を継続している。

連携した計画研究は以下の3件がある。

(IV) A01-3 渡邊計画研究：コロモゴロフ乱流理論による大気揺らぎを通過した空間位相分布と時間変動のモデル作成。作成方法を標準化し、利便性と汎用性に耐えうることを目指している。

(V) A03-7 高山計画研究：液晶位相変調器に与えたランダムパターンを基底として、任意の位相パターンを生成する方法とその精度についての研究を行った。従来の Zernike 多項式を基底とした場合に比べてランダムパターンを基底とした方がより精度が高い位相パターンを生成できる結果を得たので、論文化を進めている。

(VI) A01-1 的場計画研究：強度輸送方程式で生じる背景揺らぎパターンと、コロモゴロフ乱流理論による大気揺らぎを通過した空間位相分布との関係性について、議論を進めている。

連携した公募研究は以下の1件である。

(VII) A03-公 村上公募研究と高コントラストイメージングのための新しい位相マスクの開発と液晶位相変調器を用いた CDI-SAN 法の実証を進めた。

7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、主催シンポジウム等の状況。令和5年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に*印を付すこと。

A01: 物理基礎に基づく散乱透視学

A01 計画研究班

【雑誌論文】70件中、主なもの10件

- 1, *Ogino Y., Ansai S., Watanabe E., Yasugi M., Katayama Y., Sakamoto H., K. Okamoto, K. Okubo, Y. Yamamoto, Hara I., Yamazaki T., Kato A., Kamei Y., Naruse K., Ohta K., Ogino H., Sakamoto T., Miyagawa S., Sato T., Yamada G., Baker M.E., Iguchi T., “Evolutionary differentiation of androgen receptor is responsible for sexual characteristic development in a teleost fish,” *Nature Communications* **14**, 1428 (2023).
- 2, *Kosugi M., Kawasaki M., Shibata Y., Hara K., Takaichi S., Moriya T., Adachi N., Kamei Y., Kashino Y., Kudoh S., Koike H., Senda T., “Uphill energy transfer mechanism for photosynthesis in an Antarctic alga,” *Nature Communications* **14** 730 (2023).
- 3, Tomoi T., Tameshige T., Betsuyaku E., Hamada S., Sakamoto J., Uchida N., Torii K.U., Shimizu K.K., Tamada Y., Urawa H., Okada K., Fukuda H., Tatematsu K., *Kamei Y., *Betsuyaku S., “Targeted single-cell gene induction by optimizing the dually regulated CRE/loxP system by a newly defined heat-shock promoter and the steroid hormone in Arabidopsis thaliana,” *Frontiers in Plant Science* (in press)
- 4, Nakatani N., Takeuchi S., Harukaze K., Quan X., *Matoba O., “Imaging through a weakly scattering medium by spectral-domain optical coherence microscopy with a digital phase conjugation,” *Optics Continuum* **2**, 155 (2023). **Editor’s pick**
- 5, *Xia P., Ri S., Inoue T., Awatsuji Y., Matoba O., “Three-dimensional dynamic measurement of unstable temperature fields by multi-view single-shot phase-shifting digital holography,” *Optics Express* **30**, 37760 (2022).
- 6, *Kumar M., Matoba O., Quan X., Rajput S.K., Morita M., Awatsuji Y., “Quantitative dynamic evolution of physiological parameters of RBC by highly stable digital holographic microscopy,” *Optics and Lasers in Engineering* **151**, 106887 (2022).
- 7, Kataoka S., *Mizutani Y., Uenohara T., Takaya Y., Matoba O., “Noise-robust deep learning ghost imaging using a non-overlapping pattern for defect position mapping,” *Applied Optics* **61**, 10126 (2022).
- 8, *Hashimoto S., Takase Y., Inoue T., Nishio K., Xia P., Rajput S.K., Matoba O., Awatsuji Y., “Simultaneous imaging of sound propagations and spatial distribution of acoustic frequencies,” *Applied Optics* **61**, B246 (2022).
- 9, Inoue T., Yuasa J., Itoh S., Okuda T., Funahashi A., Takimoto T., Kakue T., Nishio K., Matoba O., *Awatsuji Y., “Spatiotemporal observation of light propagation in a three-dimensional scattering medium,” *Scientific Reports* **11**, 21890 (2021).
- 10, Rajput S.K., Matoba O., Kumar M., Quan X., Awatsuji Y., Tamada Y., Tajahuerce E., Multi-physical parameter cross-sectional imaging of quantitative phase and fluorescence by integrated multimodal microscopy, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **27**, 6801809 (2021).

【学会発表】133件(招待講演35件)中、主なもの5件

基調講演・招待講演

- 1, Miyamoto Y., “Holographic technologies for classical and quantum optics,” International Conference on Optics and Photonics Technology (ICOPT-23) (online) (2023.2)
- 2, Awatsuji Y., Inoue T., Kakue T., Matoba O., “High-speed/ultrafast holographic imaging using an image sensor,” Technical Report of 5th International Workshop on Image Sensors and Imaging Systems (IWISS2022), pp.69-72, Hamamatsu, 2022.12.13. (invited)
- 3, Matoba O., Kumar M., Rajput S.K., Quan X., “Two-photon holographic multi-spot generation and 3D TIE-based fluorescence imaging for neuroscience and biology,” 11th Japan-Korea Workshop on Digital Holography

and Information Photonics (DHIP2021), Online, Dec. 22, 2021, Plenary

- 4, Mizutani Y., Kataoka S., Uenohara T., Takaya Y., “High-speed and High-resolution Ghost Imaging with Deep Learning,” International Conference on Technology, Informatics, and Engineering (ICon-TINE), オンライン, 2021.7.28
- 5, 渡邊恵理子, “ホログラフィーを用いた散乱や揺らぎ層背後の 3D イメージング,” Optics & Photonics Japan 2022 (2022)

【書籍】1件

- 1, 加藤輝, 小山宏史 (編著), 野中茂紀, 亀井保博, 坂本丞, 谷口篤史, 村田隆 (著). 実験医学別冊 達人に訊くバイオ画像取得と定量解析 Q&A 顕微鏡の設定から ImageJ による解析・自動化まで, 羊土社, 2021/03/26,

【産業財産権】2件

- 1, 特願 2023-020867, 渡邊恵理子, 仲間一貴, 岡本勝就, 飯田公平, 林健太, 「小型光学装置」, 2023/2/14
- 2, 特願 2021-135095, 渡邊恵理子, 新垣駿太郎, 中尾海都, 星沢拓, 「物体形状計測装置及び、物体形状計測方法」出願 2021/8/20

【主催シンポジウム】10件中, 主なものの4件

- 1, 谷田貝豊彦, 的場修, 栗辻安浩, 相津佳永, Y. Luo, SPIE Biomedical Imaging and Sensing Conference (BISC2023), Co-chairs, 2023.4.19-21、参加者 76名 (国内 45名、海外 31名)
- 2, 的場修, S. Gigan, 栗辻安浩, E. Tajahuerce, 玉田洋介, 亀井保博, 木村建次郎, 渡邊恵理子, 高山佳久, 早野裕, Frist International Conference on Sensing and Imaging through Scattering and Fluctuating Field in Biology, Telecommunication, and Astronomy (SI-Thru 2022), Co-chairs, 2022.4.20-21、参加者 64名 (国内 55名、海外 9名)
- 3, Matoba O., Awatsuji Y., Tamada Y., International Symposium on Comprehensive Understanding of Scattering and Fluctuated Fields and Science of Clairvoyance 2022, 2022.4.22, 参加者 99名
- 4, 亀井保博ら、基礎生物学研究所 超階層生物学センター Opening Workshop 「超階層生物学は何を目指しているのか？」 (オンライン)、2022.11.1、参加者 102名

A01 公募研究

【雑誌論文】26件中, 主なものの6件

- 1, *Watabe M., Hirano Y., Iwane A., Matoba O., Takahashi K., “Optical dispersion through intracellular inhomogeneities,” *Physical Review Research* **5**, L022043 (2023).
- 2, O-oka Y., Keyaki R., Fujisawa S., Fukatsu S., “One-time readout temporal single pixel imaging,” *Optics Letters* **48**, 3307 (2023).
- 3, Kamiyama Y., Tamate R., Hiroi T., Samitsu S., Fujii K., Ueki T., “Highly stretchable and self-healable polymer gels from physical entanglements of ultrahigh-molecular weight polymers,” *Science Advances* **8**, eadd0226 (2022)
- 4, *Kumagai K., Huang H., Hatanaka K., and Hayasaki Y., Computational broadband imaging with laser-driven sequential light source arrays on water film. *Optics Express* **31**, 9554 (2023)
- 5, Sakai Y., Itoh Y., Jung P., Kokeyama K., Kozakai C., Nakahira K.T., Oshino S., Shikano Y., *Takahashi H., Uchiyama T., Ueshima G., Washimi T., Yamamoto T., Yokozawa T., “Unsupervised learning architecture for classifying the transient noise of interferometric gravitational-wave detectors,” *Scientific Reports* **12**, 9935 (2022).
- 6, *Ohta K., “Time-reversal focusing of ultrashort pulses through thin scattering media,” *Optics Express* **30**, 5486 (2022).

【学会発表】78件(招待講演 19件)中, 主なものの5件

基調講演・招待講演

- 1, 鹿野豊, Quantum sensor meets model biology, Caenorhabditis elegans, 自然科学研究機構 サイトビジット 基調講演
- 2, Shikano Y., Quantum Computer Health Check via Quantum Random Number Generation, Frontiers of Quantum and Mesoscopic Thermodynamics (FQMT22), Prague, Czech Republic, 2022.8.5

- 3, Kumagai K., "Aerial volumetric display with femtosecond laser excitations," The 2nd International Workshop on Optics, Biology, and Related Technologies (IWOB2022), Oral (4.March.2022).
- 4, Ohta K., Suzuki M, Yamada H, Tominaga K., Probing Charge Carrier Dynamics in Porphyrin-Based Bulk Heterojunction Thin Films with Time-Resolved Terahertz Spectroscopy, 241st ECS Meeting, Vancouver, Canada, 2022.5.29-6.2
- 5, 藤井宏之, 小林一道, 渡部正夫, 西村吾朗. 高濃度溶液における光散乱を伴い発生する光音響波モデリング, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2022 シンポジウム「光の散乱・揺らぎ現象を克服・活用する新規イメージング研究」, 宇都宮, 2022.11.15

【書籍】 1 件

- 1, 深津晋「第 3 編 各物質・構造における量子相互作用—第 1 章 バルク半導体」 in 『光と物質の量子相互作用ハンドブックハンドブック』 荒川泰彦他編, ISBN: 978-4-86043-826-5 C3050/ 978-4-86043-827-2 エヌ・ティー・エス 2023 年 3 月.

A02: 数理基礎に基づく散乱透視学

A02 計画研究班

【雑誌論文】 16 件中, 主なもの 5 件

- 1, *Horisaki R., Ehira K., Nishizaki Y., Naruse M., Tanida J., "Incoherent optical phase conjugation," *Applied Optics* **61**, 5532-5537 (2022).
- 2, *Horisaki R., Aoki T., Nishizaki Y., André R., Nicolas C., Tanida J., Naruse M., "Compressive propagation with coherence," *Optics Letters* **47**, 613-616 (2022)
- 3, Kimura K., Hirai A., Inagaki A., Nakashima Y., Yumii T., Kimura N., "Development of multistatic scattering field theory and actualization of microwave mammography," *JSMI Report* **15**, 17-24 (2022).
- 4, Tanida J., Tsuchida K., Watanabe R., "Digital-optical computational imaging capable of end-point logic operations," *Optics Express* **30**, 210-221 (2022).
- 5, *Horisaki R., Nishizaki Y., Kitaguchi K., Saito M., Tanida J., "Three-dimensional deeply generated holography [Invited]," *Applied Optics* **60**, A323-A328 (2021). (招待論文)

【学会発表】 60 件 (招待講演 25 件) 中, 主なもの 6 件

基調講演・招待講演

- 1, Nakamura T., "Computational lensless imaging using coded optics," 5th International Workshop on Image Sensors and Imaging Systems (IWISS2022), (Hamamatsu, 2022.12). (招待講演)
- 2, 谷田純. "情報フォトリクスとコンピュータショナル科学," 第 31 回計測自動制御学会中国支部 学術講演会、2022.11.26 (特別講演)
- 3, Tanida J., "Modern roles of optical computing in information technologies," 25th Congress of the International Commission for Optics (ICO) and the Conference of International Society on Optics Within Life Sciences (OWLS) (Technische Universität Dresden, Dresden, Germany, 2022.9) (招待講演)
- 4, 稲垣明里, 平井綾華, 木村建次郎, 谷野裕一, 高尾信太郎, 山神和彦, 岡本交二, 國久智成, 美馬勇輝, 中島義晴, 弓井孝佳, 木村憲明, 乳房脂肪組織の誘電特性評価とマイクロ波マンモグラフィにおける乳房標準試料の開発, 第 30 回日本乳癌学会学術総会, 2022 年 7 月 1 日, OS5-2(招待講演)
- 5, 木村建次郎, 平井綾華, 稲垣明里, 中島義晴, 弓井孝佳, 木村憲明, 波動散乱の逆問題とマイクロ波マンモグラフィ, 第 121 回日本皮膚科学会総会, 国立京都国際会館, 2022 年 6 月 4 日 (招待講演)
- 6, 木村建次郎, 稲垣明里, 中島義晴, 弓井孝佳, 木村憲明, 多重経路散乱場理論の基礎と応用, 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会, オンライン, 2021.9.10 (招待講演)

【書籍】 1 件

- 1, Kimura K., Hirai A., Yabumoto K., Inagaki A., Nakashima Y., Yumii T., Kimura N., Konishi Y., Okamoto K., Kunihiisa T., Kim S.J., Yamagami K., Takao S., Tanino H., "Inverse Scattering Problem and Microwave Mammography," Screening and Risk Reduction Strategies for Breast Cancer, Masakazu T, Springer Singapore, 2023.

A03: 実問題における散乱透視学

A03 計画研究班

【雑誌論文】 54 件中, 主なもの 5 件

- 1, Ishikawa M., Fujiwara A., Kosetsu K., Horiuchi Y., Kamamoto N., Umakawa N., Tamada Y., Zhang L., Matsushita K., Palfalvi G., Nishiyama T., Kitasaki S., Masuda Y., Shiroza Y., Kitagawa M., Nakamura T., Cui H., Hiwatashi Y., Kabeya Y., Shigenobu S., Aoyama T., Kato K., Murata T., Fujimoto K., *Benfey P.N., Hasebe M., *Kofuji R. GRAS transcription factors regulate cell division planes in moss overriding the default rule. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **120**, e2210632120 (2023)
- 2, *Currie T., Brandt G.M., Brandt T.D., Lacy B., Burrows A., Guyon O., Tamura M., Liu R.Y., Sagynbayeva, S., Tobin T., Chilcote J., Groff T., Marois C., Thompson W., Murphy S.J., Kuzuhara M., Lawson K., Lozi J., Deo V., Vievard S., Skaf N., Uyama T., Jovanovic N., Martinache F., Kasdin N.J., Kudo T., McElwain M., Janson M., Wisniewski J., Hodapp K., Nishikawa J., Helminiak K., Kwon J., Hayashi M. Direct imaging and astrometric detection of a gas giant planet orbiting an accelerating star. *Science* **380**, 198-203 (2023) .
- 3, Lu K., Wazawa T., Sakamoto J., Quang Vu C., Nakano M., Kamei Y., *Nagai T. "Intracellular Heat Transfer and Thermal Property Revealed by Kilohertz Temperature Imaging with a Genetically Encoded Nanothermometer," *Nano Letters* **22**, 5698-5707 (2022).
- 4, Martin Caballero L., Capella M., Barrales R.R., Dobrev N., van Emden T., Hirano Y., Suma Sreechakram V.N., Fischer-Burkart S., Kinugasa Y., Nevers A., Rougemaile M., Sinnig I., Fischer T., Hiraoka Y., *Braun S., "The inner nuclear membrane protein Lem2 coordinates RNA degradation at the nuclear periphery," *Nature Structural & Molecular Biology* **29**, 910-921 (2022).
- 5, *Yoneta K., Murakami N., Ichien H, Sudoh S, Nishikawa J., "Half-tone wave front control: numerical simulation and laboratory demonstration," *The Astronomical Journal* **163**, 112 (2022).

【学会発表】 123 件(招待講演 24 件)中, 主なもの 5 件

基調講演・招待講演

- 1, Hayashi-Takanaka Y., Hirano Y., Haraguchi T., Hiraoka Y., MCM loading on Chromatin with transition to di-/tri-methylation of histone H4K20 is required for S phase entry、第 74 回日本細胞生物学会大会、東京（タワーホール船堀）、2022.6.28
- 2, Takenaka H., Inada M., Ishii S., Takayama Y., Study on intensity fluctuation prediction using machine learning in the free-space optical propagation path between buildings, Optics & Photonics International Congress 2022, Si-Thru2-01, 2022.4.21
- 3, Tamada Y., DNA damage-triggered stem cell formation proven by bioimaging, IWOB 2021, online, 2021.2.26
- 4, 村上尚史, 米田謙太, 西川淳, 太陽系外惑星探査を目指した波面揺らぎ補正技術の開発, レーザー学会 学術講演会 第 42 回年次大会, オンライン, 2022.1.12-14
- 5, 早野裕, 天文学のための補償光学とその応用, 第 58 回日本眼光学学会総会, 旭川市大雪クリスタルホール, 2022.9.3-4. (国立天文台ハワイ観測所山頂施設からリモート講演)

【書籍】 4 件中, 主なもの 2 件

- 1, Asakawa H., Hirano Y., *Haraguchi T. "Organelles: Structure and function – Nuclear Organization (Nuclear Structure and Dynamics)" Reference Module in Life Sciences (Encyclopedia of Cell Biology, 2nd Edition (2022)
- 2, Tamagawa I. (2022). Evaporation in Arid Regions. In: Li F., Awaya Y., Kageyama K., Wei Y. (eds) River Basin Environment: Evaluation, Management and Conservation. Springer, Singapore.

【産業財産権】 2 件

- 1, 特願 2022-132546 : 発明者 : 松田厚志・根本知己・大友康平・高橋泰伽「顕微鏡画像補正方法及び顕微鏡画像補正プログラム」権利者 : 情報通信研究機構・自然科学研究機構、令和 4 年 8 月 23 日出願
- 2, 特願 2022-007207 高山佳久「光送信器、および、空間光通信送信装置」東海大学、出願 2021 年 1 月 20 日

【主催シンポジウム】 21 件

- 1, 平野泰弘、第 14 回光塾、2023 年 1 月 18-19 日、大阪大学、参加者 50 名 (国内 50 名、海外 0 名)
- 2, レーザー学会年次大会シンポジウム「揺らぎを伝搬する光を用いた伝送、計測、観測、補償」、2022 年 1 月 12 日、参加者 50 名

- 3, 高山佳久、散乱・揺らぎ場における空間光伝送と光計測シンポジウム、2022年8月8日、参加者53名

A03 公募研究

【雑誌論文】52件中、主なもの5件

- 1, Yamada S., *Yukawa H., Yoshizumi Y., Kitamura K., Mizumaki T., Oohara T., Nanizawa E., Hirano F., Sato K., Ishikawa T., Baba Y. In vivo real-time fluorescence imaging using quantum dots reveals the dynamics of transplanted stem cells in different inflammatory states of acute liver failure mice. *Cell Transplantation*, in press(2023)
- 2, *Yoneta K., Murakami N., Ichien H., Sudoh S., Nishikawa J. Halftone wave front control: numerical simulation and laboratory demonstration. *The Astronomical Journal* **163**, 112 (2022).
- 3, Quan X., Kato D., Daria V., Matoba O., *Wake H., “Holographic microscope and its biological application,” *Neuroscience Research* **179**, 57-64 (2022),
- 4, *Haruki T., Yonezawa S., *Koizumi K., Yoshida Y., Watanabe T.M., Fujita H., Oshima Y., Oku M., Taketani A., Yamazaki M., Ichimura T., Kadowaki M., Kitajima I., Saito S., “Application of the Dynamical Network Biomarker Theory to Raman Spectra,” *Biomolecules* **12**, 1730 (2022).
- 5, Okada T., Kato D., Nomura Y., Obata N., Quan X., Morinaga A., Yano H., Guo Z., Aoyama Y., Tachibana Y., Moorhouse A.J., Matoba O., Takiguchi T., Mizobuchi S., *Wake H., “Pain induces stable, active microcircuits in the somatosensory cortex that provide a therapeutic target,” *Science Advances* **7**, eabd8261 (2021).

【学会発表】127件(招待講演47件)中、主なもの5件

基調講演・招待講演

- 1, Nishizawa N. and Yamanaka M., "Ultrashort Pulse Fiber Lasers for Deep Tissue Imaging," CLEO2023 Laser Science to Photonic Applications, San Jose, California, USA, 7–12 May 2023, S&I 11: Fiber Photonics: Novel Phenomena, Lasers, Systems and Fabrication
- 2, 湯川博、ナノ多孔質ガラスデバイスの開発と超早期がん診断への応用と期待、第83回応用物理学会秋季学術講演会、東北大学川内北キャンパス、ハイブリッド開催、2022年9月20~23日
- 3, Akiyama M., Minowa Y., Ono Y., Terao K., Ongane H., Akasawa T., Oya S., “High Resolution Astronomy with Laser Tomography Adaptive Optics,” Sensing and Imaging through Scattering and Fluctuating Field in Biology, Telecommunication, and Astronomy, 横浜, 2022.4.21
- 4, Ichimura T. “Seeing dynamics of over-million cells for exploring rare special cells,” The 13th International Meeting of the Asian Network of Research Resource Centers (ANRRC2022), online, 2022.11.8
- 5, 湯川博、量子ナノ光学に基づく最先端イメージング診断技術の再生医療応用、第21回日本再生医療学会総会 シンポジウム13「再生医療を切り開くイメージング」(Web)、2022年3月17~19日

【書籍】5件中、主なもの2件

- 1, 湯川博 「第3章プローブ 第1節分子プローブ 第4項量子ドット」 in 『先端の分析法 新版第2版』, 株式会社エヌ・ティー・エス (2022).
- 2, Nishizawa N., Yamanaka M., “OCT : Ultrahigh Resolution Optical Coherence Tomography at Visible to Near-Infrared Wavelength Region,” *Multidisciplinary Computational Anatomy Toward Integration of Artificial Intelligence with MCA-based Medicine*, pp.305-314, Springer, 2022.

【産業財産権】5件中、主なもの3件

- 1, 執行航希, 出願日 2023/3/14 粒子解析装置、粒子解析システム、及び、粒子解析方法出願番号 PCT/JP2023/009737 国際出願 (日本、アメリカ、イギリス、中国、韓国)
- 2, 各国受付番号 C20220010WO#P01: 湯川博、馬場嘉信、鳥本司、亀山達也、都澤諒 「温度計測装置、および温度計測方法」東海国立大学機構名古屋大学、出願 2022年
- 3, 湯川博、吉田道弘、田中靖人 「胆道がんの検出キット、胆道がんの予後予測キットおよびその利用」東海国立大学機構名古屋大学、公立大学法人名古屋市立大学、出願 2022年

【主催シンポジウム】3件中、主なもの2件

- 1, 西澤典彦、和氣弘明、他、量子制御生命研究会、2023年1月、参加者50名
- 2, 西村隆宏、小倉裕介、第69回応用物理学会春季学術講演会シンポジウム「蛍光体エネルギー移動エンジニアリング」2022年3月22日、参加者50名

8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

領域全体の連携体制の取り組み

本領域は、光学、数理科学、情報科学、生命科学、情報通信工学、天文学という全く異なる分野の研究者が集まり散乱透視学という新しい学術領域を創成するものである。この実現のために、連携体制の構築が必須であり、以下に示す2項目を運営方針と定め、領域メンバーに周知している。

1. 全構成員に領域が目指す方向について共通理解を徹底する
2. 共同研究拠点を構築して若手研究者を中心とした領域融合研究を推進する

項目1のためには、同一の事物に対して各分野で異なって使用されている用語を整理し、共通用語を決定することで共通理解を促進する。毎年2回の領域会議、2回の総括班会議、2回の領域融合推進会議、2回以上のシンポジウム・公開研究会を通じて、領域の達成目標を実現するために領域全メンバーで推進する。項目2については、本領域独自の取り組みとして共同研究拠点と領域融合推進班を設置し、領域内の若手研究者が一堂に会して共同研究を進める環境を整えることで領域融合を具体化しつつ、若手研究者の育成を図る。

散乱透視学の創成には、統計的ではなく個々の散乱体に適用可能なマルチスケールの散乱・揺らぎ場の統一的・包括的理解が必要不可欠であり、本領域において3つの研究項目を設定し、研究項目内及び研究項目間連携により革新的学術領域を切り拓く。

研究項目 A01：物理基礎に基づく散乱透視学、研究項目 A02：数理基礎に基づく散乱透視学、研究項目 A03：実問題における散乱透視学

研究項目間の連携体制

本領域の目的を達成するためには、異なる背景を持つ研究者同士の有機的な連携による共同研究をさらに促進することがカギである。そのために、本領域では特に「領域融合推進班」と「共同研究拠点」を設ける(図8-1)。共同研究拠点として、生命科学・バイオ基礎の顕微イメージング及び生体組織の扱い方を習得する基礎生物学研究拠点、生命科学・バイオにおける散乱透視イメージングを推進する神戸大学拠点、高速な揺らぎを補償し、天文学及び情報通信に取り組む国立天文台拠点の3拠点を既に構築している。この共同研究拠点を最大限に活用し、若手研究者を中心に訪問・滞在させて、散乱・揺らぎの計測、透視の実応用研究及び散乱透視イメージング手法・技術の更なる革新を融合共創研究で実施する。

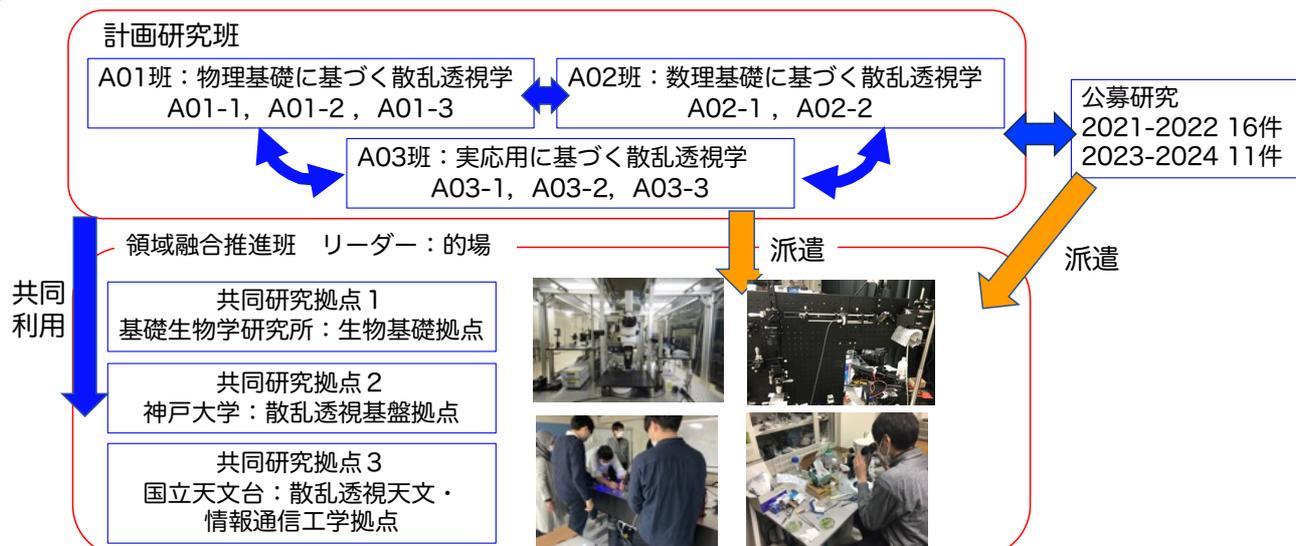


図8-1 研究領域間の有機的連携体制

計画研究及び公募研究間の連携体制

各計画研究班及び第1期公募研究班が保有する技術と装置の情報を共有するためのシーズ・ニーズ集を作成した。領域会議を通じて互いの研究を理解し、共同研究を生み出す機会として、全研究者の発表を実施した。また、領域融合推進班の活動を通じて共同研究を推進させる。

9 若手研究者の育成に係る取組状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、本研究領域が育成に取り組んだ「若手研究者」の定義を始めに示すこと。

学術変革領域「散乱透視学」に所属する計画研究班の代表者、研究分担者、研究協力者、公募研究の代表者及び研究協力者の中で40歳以下を若手研究者と定義する。ただし、大学院博士課程の学生も含む。

若手研究者の育成に関して、以下の3項目を推進した。また、推進による成果として項目(4)に示すように博士課程への進学、若手研究者の就職及び昇進に繋がっている。

(1) 異分野融合研究会への参加促進と研究奨励

領域会議、国際会議 SI-Thru、物性科学領域横断研究会で若手の研究発表や交流を促し、ポスター賞などで研究モチベーションを高めた。これまでに領域会議を5回開催し、各回において異分野との連携を促進することを目的として若手研究者を中心にポスター発表により研究成果の発表と議論を行う機会を設けた。その中で優秀な発表に対して研究奨励を目的にポスター賞を授与した。2022年4月に散乱透視に関する国際会議 SI-Thru を世界に先駆けて開催し、散乱及び揺らぎの透視に関する研究成果の発表と海外の研究者との情報交換をする機会を設けた。さらに、優秀な発表に対して研究奨励を目的に賞を授与した。約10の新学術領域及び学術変革領域研究(A)が一堂に会して分野横断的に融合する物性科学領域横断研究会を合同開催し、異分野交流のために若手に研究発表と聴講の機会を設けた。その中で優秀な発表に対して研究奨励を目的に賞を授与した。

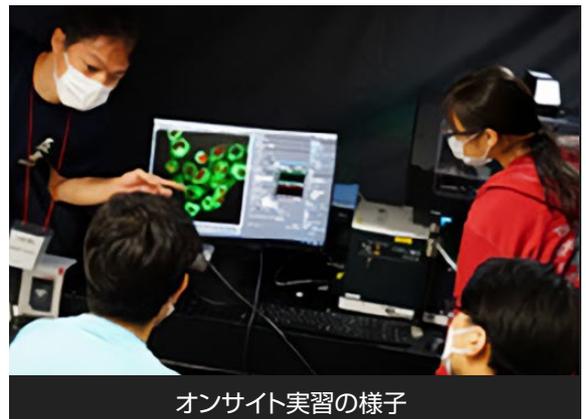


図 9-1 細胞生物学ワークショップでの実習の様子

(2) 領域融合推進班（ワークショップも含む）

異分野共同研究に必要な現場を知る機会、例えば数物系研究者が生物系の研究の実際を知る機会を設けるために、領域融合推進班ではこれまでにワークショップを4回開催してきた。第一回は神戸大学（光学・生物学共同研究拠点）で「強度輸送方程式による3次元蛍光イメージングワークショップ」（担当：的場・玉田）、第二回は基礎生物学研究所（生物学拠点）で「数物系研究者向け生物学研究の現場を知るワークショップ」（担当：亀井・玉田・坂本）、第三回はオンラインで「AIプログラミングワークショップ」（担当：渡邊）、第四回は宇都宮大学で「補償光学ワークショップ」（担当：玉田・服部）である。領域融合のために別の学術変革領域とのジョイントワークショップなども若手が企画・開催し、両領域内の研究者に異分野融合研究のきっかけ作りの場を提供した（ジオラマ行動力学との合同ワークショップ：2023.3.22-23、基礎生物学研究所、参加者10名+オンライン、担当：坂本）。光学・顕微鏡・画像解析の知識を領域内の若手研究者にその機会を広く提供するため、当領域に属するメンバーが幾つかのトレーニングコースを開催している（図9-1）。細胞生物学ワークショップ（5日間：1回/年、定員約40名）担当：松田・平野、顕微鏡基礎実習（DIY/OPT）（3日間：2回/年、定員12名）担当：亀井・坂本、生物画像データ解析トレーニングコース（3日間：1回/年、定員20名）担当：亀井・坂本。また若手研究者の交流を目的とした「光塾」（2日間：1回/年、参加者約30名：担当：平野）を共催し、本領域で得られた成果の波及に努めた。

(3) 海外渡航支援

半年に1回募集し、数週間から数ヶ月にわたる海外研究室滞在にかかる渡航費・滞在費を支援した。これまでに博士課程学生1名（ハワイ）、特命助教（スペイン）の2名を研究機関に派遣し、共同研究を実施した。領域会議で派遣報告を実施した。

(4) 博士課程学生の進学、就職、昇進

本領域の推進により、これまでに博士課程進学者6名、博士課程修了者の就職12名、若手研究者の昇進4名（角江（千葉大、助教から准教授）、池田（大阪公立大、助教から准教授）、下村（大阪大、特任助教から助教）、西崎（大阪産業技術研究所、研究員から主任研究員））に繋がった。

10 アウトリーチ活動に係る取組状況

研究領域全体を通じ、一般向けのアウトリーチ活動に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

領域研究で得られた成果を広く周知するために、メディア報道、広報誌ニュースレターの発刊、セミナー・イベントの実施、中学生・高校生・大学生向け出前授業の実施、雑誌等での紹介、産業界・政界における講演、国内シンポジウム・国際ワークショップを開催した。

メディア報道

メディアにおける報道として、プレスリリース、新聞・雑誌・テレビでの紹介を含めて、合計46件ある。特に、木村によるNHKサイエンスZERO、特別編【未知の世界をひらく！科学者たちの情熱SP】(2021.3)など3件のTV放送がある。プレスリリースを22件行った。また、亀井らによる「南極の藻類が赤外線でも光合成する仕組みを解明。地球外生命の新たな鍵？」(日経産業新聞 2023.3.1)、西村らによる「血管内観察+レーザー治療 同時に…大阪大学チーム開発」(読売新聞夕刊 2023.3.6)など5件が新聞報道として取り上げられた。また、木村による成果がAI特集「みえない世界を視覚化する理論」(Nature 588, 2020.12月号)で紹介された。

広報誌(ニュースレター)

領域活動を一般市民を対象に紹介する機関誌として、年に3回、合計7回広報誌としてホームページで公開した(図10-1)。

セミナー・イベント

秋山らによるNHKカルチャー仙台「天文学入門」講座(2023.4,5,6月)、亀井らによるニコニコ超会議「海のソーラーパワーウミウシの「光合成」を観察する200時間研究」(ドワンゴ, 視聴数35万人, 2023.4)、平野らによる「染色体研究のこれから」(大阪市中央公会堂, 参加者180名, 2023.1)、玉田らによる「バイオイメージング・光細胞操作による植物の高い幹細胞化・再生能力の解明」(第17回東和新生会ビジネス交流会, 参加者約1000名, 2022.11)など、合計29件を実施した。

中学生・高校生・大学生向け出前授業

木村による灘高土曜講座「応用数学史上未解決問題の解決と社会実装」(2021.6)、早野によるKaumana Elementary School「Journey through the universe」、秋山による秋田北高校模擬授業など28件実施した。

雑誌等

栗辻らによる「光を使って超音波の可視化に成功」(子供の科学、2021.1号)や西崎による「深層学習を利用した高速な光波面計測システム」(科学と工業、30、247-253, 2022)など3編の出版に至った。

産業界、政界における講演

木村による「基礎数理の研究成果に基づくイノベーション・社会実装について」～医療、国土強靱化、安全保障への応用、国家戦略への展開～、自由民主党 科学技術・イノベーション戦略調査会・新国際秩序創造戦略本部講演, 東京, 2021.6.10(招待講演)、自民党文部科学部会講演会「有識者から聴き取り、若手研究者の力で科学技術立国へ 国民の幸福増進」, 東京, 2021.5.19(招待講演)などを行った。

国内シンポジウム

亀井らによるイベリアトゲイモリゲノム解読記念シンポジウム&第3回イベリアトゲイモリ研究会, 2022.9.25, 参加者80名(国内70名、海外10名)や、的場と栗辻が企画したOptics and Photonics Japan 2022シンポジウム「コンピューショナル散乱透視イメージングの基礎から新技術まで」、2022.11.16、参加者80名など28件のシンポジウムを開催し、多様な分野の参加者に向けて、「散乱透視学」での成果を発信した。

国際ワークショップ

2022年4月にパシフィコ横浜にて「International Symposium on Comprehensive understanding of scattering and fluctuated fields and science of clairvoyance」の国際ワークショップを開催した(図10-2)。フランス、スペイン、日本から8名の招待講演を実施した。ハイブリッド形式で実施し、参加者は99名であった。



図10-1 ニュースレター



図10-2 国際ワークショップ

11 研究費の使用状況・計画

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や今後の使用計画、研究費の効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

研究費の使用状況

総括班及び計画研究、公募研究において、当初の計画通りに研究費を使用した。

総括班での研究費の使用状況と今後の使用計画

総括班では、領域会議・総括班会議の開催、若手研究者の海外渡航支援、共同研究拠点を軸にした領域融合推進班活動（図 11-1）、国内・国際ワークショップの開催、ニュースレター・ホームページによる広報活動に主に使用した。今後もこれらの活動の継続に使用する予定である。

領域の運営を円滑に行うために、緊密な情報交換及び議論を行う代表者会議を毎月開催した。DX を活用し、経費を効果的に使用した。



図 11-1 領域融合推進班の活動の様子

研究費の効果的使用の工夫、設備等の活用状況について

シーズや機器情報の共有

各計画研究班及び第1期公募研究班が保有する技術と装置の情報を共有するためのシーズ・ニーズ集を作成した。これにより領域内で所有する同一の装置を重複して購入する無駄を避け、相互に装置を利用できるようにした。

共同研究拠点の活用

神戸大学に設置したバイオ・生命科学共同研究拠点では、図 11-2 に示すように4つのマルチモーダルイメージングシステムを構築し、領域における共同研究に活用している。特に、市販の光学顕微鏡に導入が容易な強度輸送方程式による3次元蛍光イメージングシステムを構築した。このシステムの構成と像再生プログラムを領域内メンバーに公開・共有した。制御ソフトウェアや解析ツールの共同利用を推進し、研究準備期間の短縮やノウハウを共有することが可能になった。領域融合推進班での2回の活動を通じて、強度輸送方程式による3次元蛍光イメージングシステムのトレーニングを若手研究者を中心に実施し、A01-2 粟辻、A03-6 玉田、A03-8 早野、A01- 公太田、A01- 公渡部、A03-公市村などでこのシステムを活用した応用研究を推進している。

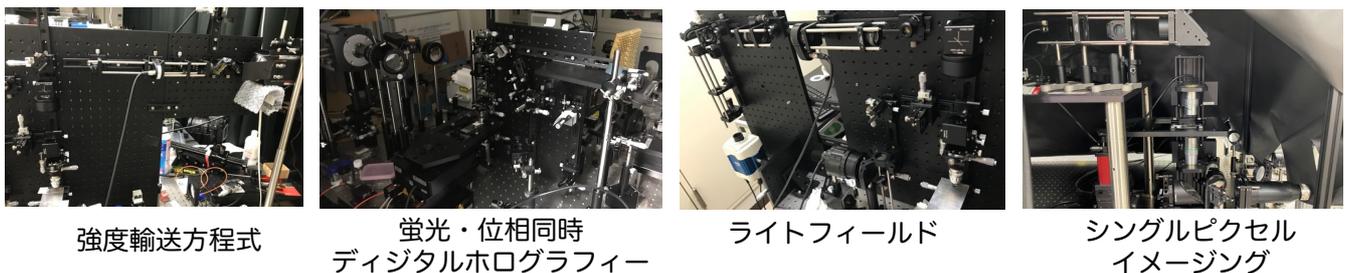


図 11-2 神戸大学拠点で利用可能なマルチモーダルイメージングシステム

12 今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させることを先導する」観点から、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、今後実施する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

今後の全体方針

本領域は、「8 研究組織の連携体制」で述べたように、光学、数理科学、情報科学、生命科学、情報通信工学、天文学という全く異なる分野の研究者が集まり、個別の散乱体に適用可能、かつマルチスケールに適用可能な「散乱透視学」という新しい学術領域を創成するものである。この実現のために、最初の3年間は、互いを知ることに重点をおき、シーズ・ニーズ集の発行による用語理解や共同研究拠点を活用した相互技術の理解と活用に努めてきた。残りの2年間では新しい融合研究を創出するための活動に移行するため、領域代表を中心に領域内融合研究のマッチングを行い、融合研究を創出・加速させる。新型コロナウイルス感染症の影響で活動が制限された状況でも効率的に活動するために実施してきた方策を継続・発展させつつ、融合研究を加速させるための方策を実施する。

これまでに構築した融合研究を推進するための方策と今後の方策について

(1) シーズ・ニーズ集の発刊

各計画研究班及び第1期公募研究班が保有する技術と装置の情報を共有するためのシーズ・ニーズ集を作成した(図12-1)。これにより各分野で異なる言語を整理し、共通言語を決定することで共通理解を促進し、融合研究を推進してきた。さらに第2期公募研究班にも同様の方策を実施し、融合研究により学術体系の変革・転換を推進する。

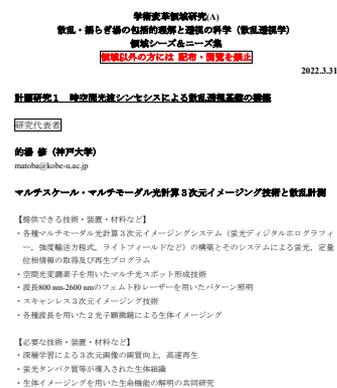


図12-1 シーズ・ニーズ集

(2) 領域会議と総括班会議による融合研究推進のリーダーシップ

毎年2回ずつ領域会議と総括班会議を開催し、これまでに5回開催している。過去5回の領域会議では、計画研究代表者及び分担者、公募研究全員が発表し、研究内容の紹介に加えて、共同研究を積極的に行うための方策として、各自が保有する技術や装置と共同研究で期待する欲しい技術を紹介することを課している。これにより、これまでに51件の計画研究間及び計画研究-公募研究間の共同研究と44編の論文が生み出されている。今後も引き続き、領域会議での研究交流を強力に推進する。2023年5月に神戸大学で開催した第5回領域会議では新型コロナウイルス感染症の状況も大幅に改善されたため、オープンテラスで意見交換会を開催した。現地参加者の87%が意見交換会に参加し、熱心な交流が行われた。また、若手研究者及び学生のポスター発表を開催し、若手研究者のモチベーションを向上させるとともに、優れた成果を挙げている若手研究者に優秀ポスター賞を授与し、奨励した。今後も継承し、発展させる。さらに領域代表を中心としてシーズ・ニーズ集の俯瞰、サイトビジットの実施などをもとに、総括班及びアドバイザーの意見も取り込み、領域内融合研究のマッチングを行い、融合研究を創出・加速させる。

(3) 共同研究拠点を活用した領域融合推進班活動の推進

融合研究を推進する共同研究拠点として、各種光学顕微鏡及び生物を扱う基礎技術を学ぶ基礎生物学研究所、散乱透視イメージングの生物応用を推進する神戸大学、補償光学により大気揺らぎ補正を行い、天文学及び情報通信工学に取り組む国立天文台の3拠点を既に立ち上げている。基礎生物学研究所及び神戸大学では若手研究者を中心とした異分野融合研究を推進する領域融合推進班の活動を既に3回実施している。新型コロナウイルス感染症対策を施し、現地で10名程度の参加者を毎回集め、ハンズオン講習で散乱透視イメージング技術を習得し、各自の研究室に持ち帰り、融合研究を推進する成果を挙げている。特に、領域代表の的場が推進する強度輸送方程式に基づく3次元蛍光イメージング技術は、宇都宮大学、大阪大学、京都工芸繊維大学、理研、基礎生物学研究所で実際に活用されており、生物学応用研究が強力に推進されている。2023年度からは現地での開催が可能となり、共同研究拠点を活用し領域融合推進班の活動を積極的に推進する。

(4) 標準試料の確立とそれを活用した散乱透視学の推進

総括班会議でアドバイザーからの提案で、生物、情報通信、天文学において開発した散乱透視イメージング技術を定量的に評価し、比較するために標準試料の確立を進めている。既に大気揺らぎに関する標準試料に関しては、天文学の西川、情報通信の高山、光学の渡邊らが連携して、6次渦位相分布を決定し、研究室の実験室で大気揺らぎ現象を再現する検証を進めている。大気揺らぎモデルと良い一致が得られれば領域メンバー間で共有する。生物の標準試料としては、玉田が中心となり、ヒメツリガネゴケやタバコ培養細胞等の生きた植物細胞の提供を既に実施している。また、的場が保有する微小空孔からなる人工散乱体作製技術などを検討する。A01の散乱透視イメージング技術に関しては、神戸大学にて強度輸送方程式やデジタルホログラフィー、シングルピクセルイメージングなどの各種手法が確立されている。神戸大学共同研究拠点を中心に生物応用研究を推進する。A02の数理モデリングにおいては、木村のもつ散乱特性方程式による散乱透視イメージング手法を複数回散乱及び生体など誘電分散をもつ媒体に拡張することに成功している。また、谷田、渡邊、的場の計画研究ではGANなどの深層学習モデルを用いて、少ない学習データで良好な学習結果を得ることに成功している。これらの物理基礎と数理基礎に基づく散乱透視技術と、生物、情報通信、天文学への応用を強力に推進する。天文学でのデジタル補償光学を進化させるとともに、大気揺らぎモデルの空間光情報通信への展開を図る。また、計画研究内の共同研究（縦串）に加えて、計画研究間及び公募研究間での融合研究（横串）を推進する。

(5) 若手研究者育成

3つの共同研究拠点を活用し、領域融合推進班の活動を通じて複数の若手研究者を結集させて、光学、情報科学、生物学、情報通信工学、天文学の異分野研究の相互理解を促進し、共同研究について討論する。領域海外渡航支援活動によって、若手研究者を国際連携する海外研究機関に数ヶ月程度派遣することで国際共同研究を体験させ、国際研究人材として育成する。

今後実施する公募研究の役割

2023年4月に第2期公募研究として11課題の研究が決定している。審査結果の所見で指摘のあった「学理の体系化において、新たな数理モデルの構築は、本研究領域の中核を担っており、更なる強化が必要である。」及び（参考意見）「情報通信への応用については、多様な学問領域との連携が必要であり、公募研究によって、更に充実させていくことが望まれる。」に関して、第1期及び第2期公募研究で当該分野の公募研究が採択され強化が可能となっている。第1期公募研究で終了した研究者も研究協力者または分担者として引き続き領域活動に参画してもらい、数理モデル及び情報通信研究を強化する。国内研究者でカバーしきれないときは海外研究者との共同研究を実施する。

また、当初の計画で想定していなかった研究分野として、量子もつれ光を用いた散乱透視イメージング研究が挙げられる。公募研究の深津を中心として、的場と上野原が連携して研究を進めている。量子光散乱透視論への拡張など先進的な研究を進める。

国際的なネットワークの構築の取組

散乱透視イメージングに特化した世界初の国際会議「Sensing and Imaging through Scattering and Fluctuating Field in Biology, Telecommunication, and Astronomy」を2022年4月にパシフィコ横浜にて開催した。この会議の議長として、領域代表の的場と、散乱透視イメージングで世界をリードしているフランス Sorbonne Univ.の S. Gigan 教授の2人が就任した。世界中の散乱透視イメージングに関わる研究者を結集させて、本領域で研究成果を挙げた研究者及び学生から散乱透視イメージング技術に関する情報発信をするとともに、散乱透視イメージングで顕著な成果を挙げている海外招待講演者との情報交換を行った。新型コロナウイルス感染症の影響がまだ残っていたが、講演件数38件（招待講演9件）、64名の参加者があった。2024年に第2回国際会議を開催する。国際シンポジウムも開催しており、情報発信を努める。また、これまでに16件の国際共同研究を実施しており、今後も強力に推進する。今後はこれら海外研究機関と連携を推進し、マルチスケール&マルチモーダル散乱透視イメージングの進化と、実問題応用に取り組む。

13 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

石川 正俊（東京理科大学 学長）

古くから現象として明確に存在しながらも、その影響を抑えることを目的として研究開発が行われてきたが、本研究領域は、基本に立ち返り、物理と数理に基づく散乱の理論的な理解と先端技術を用いた計測・解析、並びに画像処理・機械学習等を用いたイメージング、さらにはその広範な応用展開までをカバーし、体系的な学術分野として「散乱透視学」という新領域を形成することを目指したものである。

計画研究は、理論的な理解、基本技術の開発、並びに応用展開と、体系的に設計されており、なおかつ相互の連携も企図されていて、目的に対して適切な設定となっている。また、公募研究も計画研究を補う形で本領域の網羅性の向上に大きく寄与している。

各研究の成果は優れており、多くの興味深い成果が得られている。それだけでなく、領域内の共同研究の推進にも努めており、その成果が成果に反映している点は、評価に値する。共同研究を推進する「領域融合推進班」を設定していること、並びに「共同研究拠点」を設置していることは、共同研究の推進大きな役割を果たしている。

また、各種若手支援、シンポジウムや国際ワークショップ等の開催、各種アウトリーチ活動、シーズ・ニーズ集の発刊、標準試料の確立等に大きな成果が認められる。

このような体系的な研究領域の整備では、もう少し応用分野の具体的な成果があるとなおよいと思われる。研究領域の進化の過程であるとも考えられるが、将来像として、更なる展開が期待でき、その展開への道筋が今後示されることを期待する。別の言い方をすれば、この研究領域での成果は、さらに広範な応用分野を生み出す可能性を秘めており、それらを能動的に探索する努力を継続することが肝要かと思われる。また、近年、研究成果のオープン化も進んでいるので、ここで開発された技術を研究領域の共有資産として整備することも継続してほしいと考えている。例えば、開発したソフトウェアや標準試料等は、関連分野の発展に大きく寄与するものと思われるので、是が非とも継続してほしいと考えている。

谷田貝 豊彦（筑波大学、宇都宮大学 名誉教授）

本研究領域では、光散乱や揺らぎのイメージングに与える効果を計測し、物理的数理的モデルを構築さらに、これを応用した散乱・揺らぎの補正技術の確立を目指すものである。研究計画によれば、散乱・揺らぎ場の特性の包括的理解を目指す研究項目、数理モデリングと数理的なアプローチの研究項目、実世界における散乱・揺らぎ場の計測と透視技術に関する研究項目から成る。この3つの研究項目の密接な連携のもと、研究計画は着実な進展を見せている。

異なる領域における散乱・揺らぎ現象の計測・モデル化に関しても新奇な手法が試みられている。特に、従来はこの分野で共通的に取られていた、統計的な指標に代わる新たな特性評価量の導入が検討された。マルチスケールな個別的な現象の理解には必須の事項と評価される。

各研究計画の中で共通的に利用されている手法として強度輸送方程式を応用する手法が取られている。この手法は、従来からよく利用されていた光波の振幅と位相をコヒーレント光を使って測定する方法にかわり、強度情報のみから光波伝搬特性を推測する手法で、散乱・揺らぎ補正イメージングに適した手法といえる。各研究グループが各領域で共通の手法として応用を目指している。この点は、本研究プロジェクトの特徴的なアプローチといえる。強度輸送方程式の手法は、測定精度や系の安定性など未知の課題も多いが、今後の進展に期待したい。

本研究計画の中でも、もっとも基礎的な散乱理論・散乱イメージング理論の構築に進展があった。この成果が、他の研究班の研究にも展開されることを期待する。特に、共通する研究ツール（共用ソフトウェアなど）などの開発・公開を望みたい。

以上述べた事項以外にも、着実に研究成果が得られている。従って、本研究プロジェクトの研究計画で示された事項はおおむね達成されたといえる。また、研究グループ間の共同研究も進展しており、いくつかの項目で顕著な進展があった。研究領域の設定目的に照らして、期待どおりの成果があった。

平岡 泰（大阪大学大学院生命機能研究科 招へい教授・名誉教授）

本領域は、天文学・情報通信・生物学の広い範囲をカバーしており、この広い領域をまとめていくのは、大変、挑戦的なことと思います。波動方程式を通して世界を見ている人達と細胞を通して世界を見ている人達がアイデアを共有するには、言葉さえすれ違っているという現実もあり、すり合わせていくために、議論と交流の時間が十分に必要です。当初は自分がここに居ることが場違いに思った人も居たかもしれません。領域における自分の役割を明確にし、解くべき問題を明確にし、何を指すのか、問題を共有することが重要です。この領域は大きな可能性を秘めており、領域に参加するすべての人に場違い感が無くなれば、この領域は成功と言えると思います。これまでの活動をとおして、特に領域会議やワークショップ等の交流を重ねることにより、異分野の溝を埋めてきました。これまで領域会議に参加してきた総合的な評価としては、研究領域の設定目的に照らして、期待どおりの成果があったと思います。

武田 光夫（宇都宮大学オプティクス教育研究センター（名誉フェロー）、電気通信大学（名誉教授））

- （1） 審査時の所見に対応した的確な公募研究の採用により、研究領域全体のバランスがとれ、計画研究の骨組みを補強・補完する研究体制を整えることができたことは評価できる。
- （2） 当初あった異分野の研究者間の「分野方言」によるコミュニケーションの壁も取り除かれてきており、分野横断の共同研究を通じた新しい研究成果が出始めていて、今後の発展が期待できる。
- （3） 当初の研究計画で予見しなかった方向への新たな研究の進展と展開の可能性が見いだされた場合には、当初の研究計画にあまり強く縛られずに、果敢に挑戦して領域の前線を切り拓いてみてもよいのではないかと個人的には考える。
- （4） これまでに個々の研究や共同研究で得られた多くの成果や知見をどのように整理・分析・統合して新領域「散乱透視学」の学問的な体系を構築するかが、今後の課題と思われる。

以上を要するに、本領域の研究計画は順調に進展していると認められ、今後の発展が期待できる。