



ムーンショット目標3

2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現

実施状況報告書

2021年度版

2021年4月～2022年3月

人とAIロボットの創造的共進化による

サイエンス開拓

原田 香奈子

東京大学 大学院医学系研究科 / 大学院工学系研究科



研究開発プロジェクト概要

科学者と対等に議論しながら、人では困難な環境（危険な環境、微細な環境、等）におけるサイエンス実験を行う AI ロボットを開発します。科学者と AI ロボットの関わり合い方を自在に変え、共に試行錯誤することで未経験の対象物や環境にも対処します。それにより 2050 年には、サイエンス分野において AI ロボットによる科学原理・解法の発見を実現します。

https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal3/33_harada.html

課題推進者一覧

課題推進者	所属	役職
谷村省吾	名古屋大学 大学院情報学研究科	教授
丸山善宏	オーストラリア国立大学 計算機科学科	講師
谷口忠大	立命館大学 情報理工学部	教授
竹内一郎	名古屋工業大学 大学院工学研究科	教授
森健策	名古屋大学 大学院情報学研究科	教授
岡田慧	東京大学 大学院情報理工学系研究科	教授
新井史人	東京大学 大学院工学系研究科	教授
原田香奈子	東京大学 大学院医学系研究科	准教授
魚住信之	東北大学 大学院工学研究科	教授
佐藤良勝	名古屋大学 トランスフォーマティブ生命分子研究所	特任准教授
武部貴則	東京医科歯科大学 統合研究機構	教授

1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

研究開発項目1:融合 AI理論

概要: 最先端の融合 AI 理論を次世代 AI ロボットの研究開発に実装し、また、次世代 AI ロボットの研究開発での知見を理論化する。ここでの融合理論とは、統計的 AI と記号的 AI の融合であり、特に確率的プログラミングをキーワードとして、膨大なデータの中にある構造を発見するための融合 AI 理論を構築する。具体的には、高度サイエンス探求、そのための融合 AI 数理モデル、そして、AI ロボットのための融合 AI モデルについて研究した。本年度は、融合 AI モデルの基礎となる数理理論の研究に取り組んだ。また、ロボットがマルチモーダル情報を用いて、適切に状態を切り分けることのできる潜在構造を発見できることを示した。

研究開発項目2:次世代 AI ロボット

概要: 将来的な汎用性や人との共進化を視野にいれつつ、研究開発項目3:サイエンス探求で挙げられるサイエンス実験を実現する次世代 AI ロボットを開発する。具体的には、難環境 AI ロボットシステム・ツール、その実験結果の観察と解釈の AI、その結果に基づくロボットタスク戦略、そして、その結果を元に実験計画を設計する能動的データ探索 AI について研究する。当該年度は、具体的なタスクを対象としたプロトタイプの開発に取り組んだ。研究開発項目3から提供された実際の研究データ(画像、文献、計測データ等)を対象として、有望な材料の絞り込みのための AI、画像を解釈するための AI を開発した。また、AI ロボットプラットフォームのプロトタイプを開発し、また、それによって収集された実験操作データを用いて、タスク戦略を提案する AI の施策を行った。

研究開発項目3:サイエンス探求

概要: サイエンス AI ロボットの可能性を示すことを目的として、具体的なサイエンス探求の研究を実施する。具体的には、難環境において、これまで人だけでは実現できていない植物・動物実験を実現する。当該年度は、次世代AIロボットによるサイエンス実験を視野にいれて、研究データ等の収集と提供を行った。これまで AI やロボットなしでは実施できなかった研究を実施するために、新たなデータを収集し、疾患モデルを新規に開発した。また、研究開発項目2で開発された AI やロボットのプロトタイプについて科学者の視点でのフィードバックを行った。

2. 当該年度の研究開発プロジェクトの実施内容

(1) 研究開発項目1:融合 AI 理論

研究開発課題1:サイエンスする知能の数理理論

当該年度実施内容:

令和3年度の計画書では、「概念間の関係抽出」という科学的思考の最も基本となる方法論を探究すると述べていた。実世界から収集されたデータは数値・文字・画像などある程度記号化されていることは前提として、対象データの相似性・同値関係分類・相関関係・順序関係・位相関係・因果関係などを抽出するための数学的方法を探究するという計画に基づき研究を実施した。サイエンス AI ロボットを開発するという本プロジェクトのミッシ

ョンに合わせて、科学的な概念獲得と概念編集のための数学原理を開発するため、当該年度は、AIに組み込みそうな概念関係構築システムとして Attention という AI モデルに注目した。Attention は、与えられた入力データ(Query)に対して鍵データ(Key)をあてがい、非線形写像を通して出力値(Value)を返す数学的関数だが、Attention 自体がまた数値データ群で表されるので、Attention から Attention への写像として「高次の Attention」を構成することができる。このアイデアにもとづき、圏論で知られている群表現の自然変換の一種である intertwining operator を「高次の Attention」として用いる方法の開発に取り組んだ。

課題推進者: 谷村 省吾(名古屋大学)

研究開発課題2: 次世代融合 AI ロボティクスとサイエンスの圏論的基礎論

当該年度実施内容:

本研究開発課題「次世代融合 AI ロボティクスとサイエンスの圏論的基礎論」は、本プロジェクトの数学的基盤に当たる部分であり、次世代 AI ロボティクスの融合パラダイムの創出とそのサイエンス応用を目的として、融合 AI ロボティクスの圏論的基礎論とそのサイエンス応用の開拓に向けた研究を行った。具体的には、本年度は、以下の研究を実施した。

① サイエンス AI ロボティクスにおける記号処理のための圏論的基礎理論の整備

圏論的量子力学・圏論的量子計算・圏論的自然言語処理などで用いられてきたストリングダイアグラムシステムの手法を応用して、ニューラルネットワークのためのニューラルストリングダイアグラムの理論を構築した。コンボリューショナルニューラルネットワークやトランスフォーマーなどの主要ニューラルネットワークについて(場当たりの手法ではなく)統一的枠組みの中でそれらの圏論的形式化に成功した。圏論的量子力学・圏論的量子計算・圏論的自然言語処理におけるモノイダル圏の理論を実装するシステムとして DisCoPy があり、ロボティクスなどのための確率モデリングの言語として Pyro があるが、DisCoPy と Pyro を融合した DisCoPyro の研究を進めた。

② 一階の確率的ファジィ構造の圏論的定式化とその基本定理の証明

研究を進め、成果を IEEE FUZZ (International Conference on Fuzzy Systems) において出版した。

③ 個別のサイエンス領域に内在する圏論的論理構造のケーススタディーズ

サイエンス AI への融合 AI アプローチに関する研究を実施しその研究成果は Artificial General Intelligence に受理され出版された。

④ 次世代融合 AI の ELSI に関する個別の論点を纏めたケーススタディーズ

汎用人工知能を目指した融合 AI における ELSI に関する研究を実施しその研究成果は Artificial General Intelligence に受理され出版された。

課題推進者: 丸山 善宏(The Australian National University)

研究開発課題3: 記号論理により加速・拡大する確率的プログラミング

当該年度は実施していない。

研究開発課題4:潜在構造発見の自律ロボットに向けた融合 AI

当該年度実施内容:

本研究開発課題では①潜在構造を発見し活用する融合 AI マニピュレーション技術、②潜在構造を活用した能動的探索手法の研究開発に取り組んだ。また、理化学実験に関わる具体的な対象物に対して本手法を適用する実証実験を行いその有効性を検証した。

その中で本年度においては下記の内容を実施した。

- ① 潜在構造を発見し活用する融合 AI マニピュレーション技術:本研究では 特にドリルを持ったロボットが画像と音の情報を統合し、状態行動空間を構成し、切削タスクを行うというシナリオの上で研究を進め、具体的には RSSM (Recurrent State Space Model) と呼ばれる世界モデルの一種を、マルチモーダル情報を扱える Multimodal RSSM へと拡張し、マウスのクラニアルウインドウ作成の円状のドリリングタスクを対象として、そのタスクを模擬した実環境から得られた情報を用い、ロボットがマルチモーダル情報を用いて、適切に状態を切り分けることのできる潜在構造を発見できることを示した。また関節角情報の想起により円状のドリリングタスクを実行するためのアルゴリズムを開発し、これをオープンソースとして公開した。
- ② 潜在構造を活用した能動的探索手法:次年度以降の研究開発の準備として関連技術調査及びコンセプト構築を行った。

課題推進者:谷口 忠大(立命館大学)

(2) 研究開発項目2:次世代 AI ロボット

研究開発課題1:潜在構造発見の能動的探索AI

当該年度実施内容:

本研究開発課題はAI・ロボットによるサイエンス探求を目指すとりくみのうち、仮説・設計の自動化を目標とするものであり、目標に向けて課題として「仮説・設計のシステム科学創出」と「実践研究における科学的発見」の2つの課題にとりくむ。前者においては、AIによる仮説の立案・評価・検証を行う枠組を定式化し、汎用的な方法の開発を行うことを目指した研究を実施する。後者においては、植物研究、動物研究を行うグループの具体的な科学研究課題に共同してとりくみ、AIを活用した仮説・設計の有効性を実証する研究にとりくむ。当該度は、具体的なとりくみとして下記の研究項目を実施した。

1つ目の研究実施項目は研究対象に関する潜在構造(仮説)を同定するための方法開発であり、今年度は、パターンマイニングと呼ばれる技術を活用し、影響の大きな複数の要因の組み合わせとして表現される潜在構造をデータから同定する数理情報技術を開発した。

2つ目の研究実施項目はAIや機械学習により同定された潜在構造(仮説)の信頼性を定量化するための方法開発であり、今年度は、標準的な教師あり学習アルゴリズムによって同定された仮説の信頼性を評価する数理情報技術を開発した。

3つ目の研究実施項目はAIや機械学習により同定された潜在構造(仮説)の検証を行うための実験計画を行うための方法開発であり、今年度はベイズ型実験計画の方法を生物学分野の実証実験に適用可能な形式へ拡張する数理情報技術を開発し、魚住グル

ープ、有澤グループと協力し、バイオスティムラントのイオンチャネル特性に関する実証実験に関する準備を実施した。

課題推進者:竹内 一郎 (名古屋工業大学)

研究開発課題2: 事前知識に基づく観察・解釈 AI

当該年度実施内容:

本研究開発課題では、事前知識に基づく解釈と理解の側面からサイエンス AI ロボットを支える技術の開発を行う。サイエンス AI ロボットにおける AI として必要とされるのは、

- ① 事前に何らかの形で獲得された知識情報を基に判断や動作を実現する技術
- ② 実際の動作の結果から知識を獲得し、それを事前知識と利用できる AI 技術
- ③ 人から与えられる事前知識を取り込むことのできる AI 技術
- ④ ロボット動作によって得られた知識や経験を人へフィードバックする技術の開発

である。特に、オルガノド研究など、マウスを利用する実験において必要とされる様々な処置を行うサイエンス AI ロボットをターゲットとして、これを実現する上で必要とされる AI 基盤技術の実現に取り組んだ。

事前知識情報を用いた単一の微細構造(動物血管、植物細胞など)の認識と計測手法の開発を目指し、動物解剖構造(オルガノイド解剖を含む)、植物解剖構造(気孔、根などの細胞)の認識と計測手法の開発を行い、クラニアルウインドウから観察される微細血管構造、植物共焦点顕微鏡画像から根の細胞構造、気孔領域の形状情報、主根と側根の長さを解析するソフトウェアの実現を達成した。

植物根の共焦点顕微鏡画像からの個々の細胞の抽出結果に基づいて、非常に初歩的な段階であるが、植物細胞に関する知識を取得する手法の開発を進めた。ここでは、抽出された細胞の形状情報や位置情報に関する知識を獲得する実験を行った。

自然言語処理を用いてサイエンス論文を解析する手法の開発を進めた。また、改変培地に関する文献の発見・培地条件を抽出する研究を進めた。

課題推進者:森 健策(名古屋大学)

研究開発課題3: 融合 AI によるマニピュレーションタスク戦略の獲得と生成

当該年度実施内容:

本研究開発課題では融合 AI に基づいたサイエンス開拓ロボットのマニピュレーションタスク戦略の獲得手法の研究開発を行った。自然科学領域における理化学実験では、未経験の対象物やタスクへの対応が必要不可欠である。そのために熟練者からの事前知識と教示に加えて、他のタスク経験やサイエンスドメイン知識から融合 AI をも活用した、操作スキルの観察と解釈を踏まえたマニピュレーションのタスク戦略そのものを獲得するロボティクス技術を開発し、それに基づいた認識行動を実現することで、人が事前に手順や操作を十分設計できない課題に対しても、人と AI ロボットの協働により、仮説や代替案を立案、実行、評価しつつ成長する創造的価値であるサイエンス探究を支援する AI ロボットシステムの実現を目指した。

課題推進者:岡田 慧(東京大学)

研究開発課題4:サイエンス探求マイクロロボットツール

当該年度実施内容:

- ① サイエンス探求マイクロロボットツールの共通技術として、(i)機能性マイクロロボットツールと関連した機構設計、ならびに、各種評価実験のプラットフォームとして、理化学実験における微細作業が可能な双腕型微細作業ロボットを設計、構築し、動作確認を行った。(ii)形状記憶合金、形状記憶ポリマからなる熱駆動式剛性可変アクチュエータの作製、特性評価を行った。(iii)高感度、高剛性、高可測帯域の水晶振動式力センサの基盤技術改良、ロボットへの実装を行った。(iv)超高解像度マルチスケール光造形の基盤技術確立によるマイクロツールの作製と機能性評価を行った。
- ② Lab-on-Oocytes システム技術として、(i)光造形式マイクロツールを用いたVC 実験の実証実験。(ii)ロボットマニピュレータを用いたマイクロツール刺入などの VC 実験ロボットの動作の実証評価、(iii)水晶振動式力センサの統合による、マイクロツールの接触、牙突などのロボットシステムで発生する物理的相互作用の評価を行った。
- ③ 植物の好適培地の評価、および1細胞遺伝子アトラス開拓技術として、(i)植物標本を固定し、所望量の酵素反応を亢進、細胞遊離を実現するマイクロ流体デバイスの開発、(ii)超微量吸引吐出機構を有する圧電マイクロポンプ機構の実証評価を行った。
- ④ In toto bio-simulator 技術として、(i)細胞分取に有効性が高いと考えられる内径可変細胞吸引機構の実証評価を行った。

課題推進者:新井 史人(東京大学)

研究開発課題5:サイエンス探求 AI ロボットシステム

当該年度実施内容:

当該年度は、前年度に行った関連技術調査とコンセプト構築に基づき、遠隔操作ロボットのプロトタイプ的设计と開発を行った。具体的には、ロボットアームと遠隔操作ユーザーインターフェースからなるロボットシステムを開発し、安楽死したマウスに対して、ドリルを用いてクラニアルウインドウ作成と同じ直径約 8 mm の開頭操作を実現した。続いて、難環境 AI ロボットシステム・プラットフォームのための難環境を模擬した環境を設計し開発を行った。対象物の周囲を2種類の計4台のロボットアームが囲み、ロボットアーム同士やロボットアームと対象物の距離を変えることができる。遠隔操作の場合はロボットアームの配置が操作者の手の配置と対応する必要があるが、自律度が高まると、ロボットがロボットにとってやりやすい配置を発見できるはずであり、同じプラットフォームで遠隔操作から自律的な操作までを実装、評価できるプラットフォームとして設計している。ツールは、現時点では、剪刀、ピンセット、綿棒、ドリルであり、剪刀とピンセットは軸回りの回転の自由度と開閉の機構を持つように設計した。ハードウェアとしてのプラットフォームが設置され、システム構築を次年度にかけて実施する予定である。

課題推進者:原田 香奈子(東京大学)

(3) 研究開発項目3:サイエンス探求

研究開発課題1:Lab-on-Oocytes によるバイオスティミュラント開発

当該年度実施内容:

AI およびロボットを用いた候補化合物の測定系の確立をめざして、AI 評価項目の検証と人による実験の結果を検討した。本研究室で検討している K 輸送体を標的とするリード化合物の類縁体の阻害評価および化合物ライブラリーを網羅的に実験測定で検討した。さらに、KAT1 を阻害する天然化合物の緑茶の成分について検討した。上記の結果は、多数の候補化合物から効果的な有機化合物を最適予測するために、化合物の官能基の特性、チャンネル阻害度を評価して、AI の教師データとして用いた。

課題推進者:魚住 信之(東北大学)

研究開発課題2:植物1細胞遺伝子発現アトラスの構築

当該年度実施内容:

本研究開発課題では、人と AI ロボットの協働によりはじめて創造的価値を生み出す難環境の理化学実験として、1細胞からの再生技術としての好適培地の開発と、細胞位置情報とリンクした植物1細胞遺伝子発現アトラスの構築を目標に研究を行っている。当該年度では、自然言語処理による論文検索および AI 技術による深層学習を通じて好適な培地条件の探索の効率化、植物1細胞遺伝子発現アトラス構築にむけたマイクロロボットツールの設計を進めた。これまでの組織培養データを収集し自然言語処理に供するため、①論文集合を決定、②分類基準を策定、③アノテーションデータの作成、④自動分類モデルの作成を行った。また、AI 研究者に植物の画像を提供し、主根の長さや側根の数などの自動判別ツールの開発に貢献した。

課題推進者:佐藤 良勝(名古屋大学)

研究開発課題3:In toto bio-simulator

当該年度実施内容:

AI ロボット技術を活用することによって初めて実現される、難環境における理化学実験タスクを同定するとともに、自律的に仮説生成、実行、評価を実現するための AI 構築に向けた熟練者による学習データの生成を進めた。

これまでに、血栓性微小血管症(thrombotic microangiopathy、TMA)などのヒトでの発症機序が不明かつ臨床的に重要な血管障害関連疾患の解析モデル系を構築し、発症機序の検討を進めてきた。その結果、さまざまな臓器原基をマウスのクラニアルウインドウ内に移植し、菌体成分の静脈内投与によって血管・血流障害を誘導する敗血症様モデルを作製することに成功した。また、血管構造の画像について、実体顕微鏡と共焦点顕微鏡でそれぞれ約 200 枚(約 2GB)、約 150 枚(約 5GB)、血小板等の血流タイムラプスイメージングの動画データ約 20 本(約 3GB)を AI 画像検証チームに提供し、また解析結果について科学的な知見を与えた。遠隔ロボットについても、熟練者として実際にロボットを操作してマウスの開頭操作を行い、その結果についてフィードバックを行った。

課題推進者:武部 貴則(東京医科歯科大学)

研究開発課題4:AI 技術を活用したバイオスティミュラント候補物質の開発

当該年度実施内容:

本研究開発課題では、①植物イオン輸送体を標的とするバイオスティミュラント候補物質の開発を目的として、②AI 分子設計による分子構造・生物活性の最適化構造予測を活用した高機能バイオスティミュラント候補化合物の開発を行った。植物イオン輸送体阻害剤・活性化剤の候補化合物の AI 分子設計と類縁候補化合物の有機合成を行った。
課題推進者:有澤 美枝子(九州大学)

3. 当該年度のプロジェクトマネジメント実施内容

(1) 研究開発プロジェクトのガバナンス

進捗状況の把握

代表機関のPM支援チームとして、新たにPM補佐(研究開発担当)を配置した。重要事項の伝達を迅速に行うため、各大学の課題推進者及び参加者との連絡は Slack を用いた。

課題推進者全体が参加する全体会議は半年に1回(第1回6月16日、第2回10月16日実施)の頻度で、各プロジェクトの会議は1~3カ月に1回の頻度で実施した。課題推進者同士の連携は、Slack を通じて行い、技術のグループである AI、robot、応用のグループである plants、animals の4つグループのミーティングを1、2か月に1回の頻度で開催した。必要に応じて、適宜 Web 会議や対面での会議を行った。

(2) 研究開発プロジェクトの展開

研究開発項目3:サイエンス探求の研究開発課題4:AI 技術を活用したバイオステイミュラント候補物質の開発について、課題推進者を決定した。

(3) 研究成果の展開

AIロボットプラットフォームのプロトタイプの構成について特許を申請した。

(4) 広報、アウトリーチ

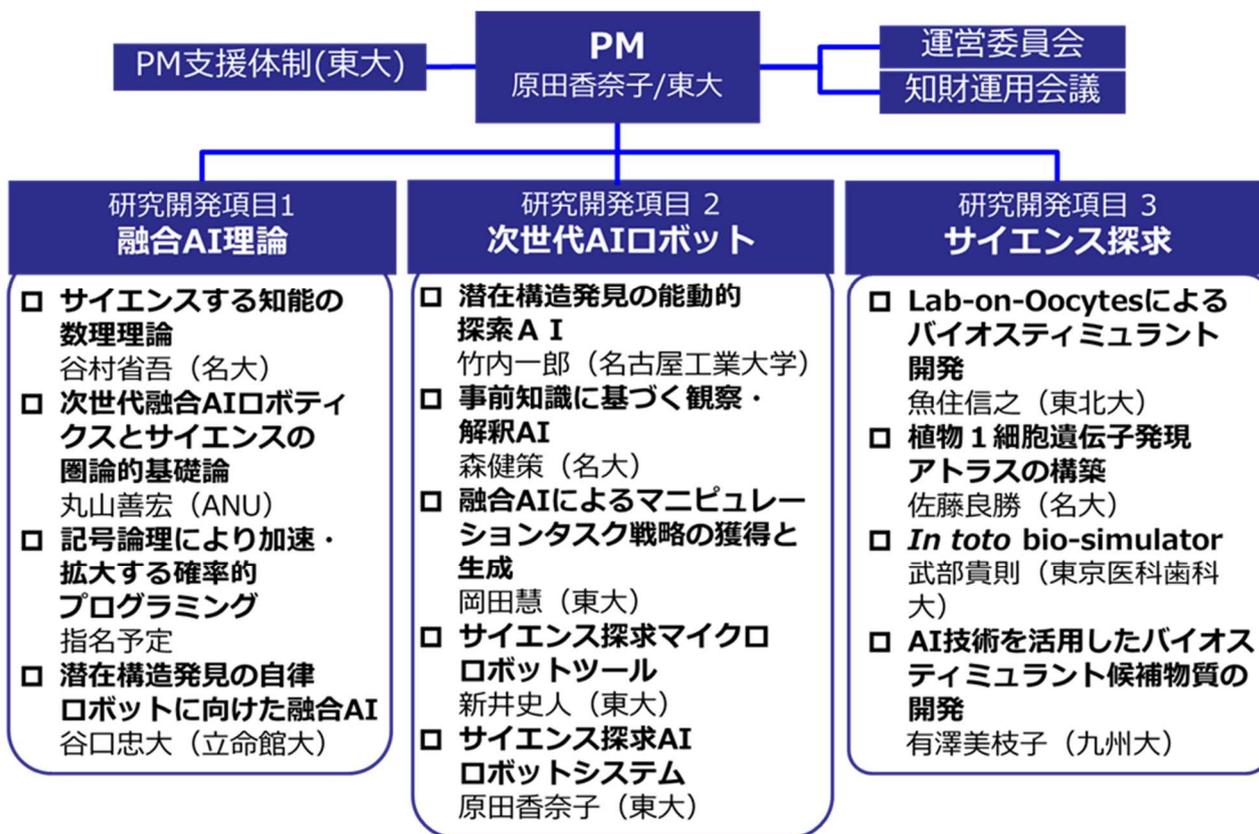
- ・第39回日本ロボット学会学術講演会オープンフォーラム(9月11日実施)
目標3の4PM 合同で企画した日本ロボット学会学術講演会のオープンフォーラムにてムーンショットプロジェクトの概要を紹介した。
- ・第2回MS目標3 数理科学課題のためのワークショップ(10月30日実施)
ムーンショットプロジェクトの概要を紹介した。
- ・人とアバター/ロボットの共生・共創・共進化をめぐる課題(11月8日実施)
ELSI 合同イベントにおいて、目標1と目標3の中に参加するPMとELSI分野の研究者が参加し、それぞれの研究開発プロジェクトにおける倫理的・哲学的・社会的な影響を紹介した。

次年度は、エキスポへの出展、PRビデオの作成などを計画している。

(4) データマネジメントに関する取り組み

基本的にソフトウェアは一般公開しているが、今後、要素技術の製品化に関わる部分については、現時点では非公開としている。今後の扱いについては、TLO とも相談の上、進める。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



5. 当該年度の成果データ集計

知的財産権件数				
	特許		その他産業財産権	
	国内	国際(PCT含む)	国内	国際
未登録件数	1	0	0	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願件数)	1	0	0	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	20	12	32
口頭発表	5	1	6
ポスター発表	2	1	3
合計	27	14	41

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	0	12	12
(うち、査読有)	0	12	12

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	0	1	1
書籍	0	0	0
その他	0	0	0
合計	0	1	1

受賞件数		
国内	国際	総数
3	1	4

プレスリリース件数
0

報道件数
3

ワークショップ等、アウトリーチ件数
5