



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

2022年度版

人・AI・ロボット・生物サイボーグの共進化に

よる新ひらめきの世界

森島 圭祐

大阪大学 大学院工学研究科



研究開発プロジェクト概要

超小型センサ、通信機器、行動制御ユニットが搭載された生物サイボーグ群から得られる行動情報と周辺環境情報を解析して得られる行動原理に基づいて、人々の行動を誘発したり、人々とロボット群との違和感のない連携を実現するAIによる自己組織化プラットフォームを構築します。それにより、2050年には、人々とロボットが協調して活躍する世界を目指します。

https://www.jst.go.jp/moonshot/program/goal3/3A_morishima.html

課題推進者一覧

| 課題推進者 | 所属 | 役職 |
|-------|---|-----------|
| 佐藤 裕崇 | Nanyang Technological University (南洋理工大学) シンガポール School of Mechanical & Aerospace Engineering | Professor |
| 若宮 直紀 | 大阪大学 大学院情報科学研究科 | 教授 |
| 森島 圭祐 | 大阪大学 大学院工学研究科 | 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

(1) 研究開発プロジェクトの概要

本プロジェクトでは、生物の感覚・知覚・行動に関する情報の取得と働きかけを可能とする生物サイボーグ群開発エンジンを構築し、生物サイボーグをツールとすることで、生物の生来的な振る舞いを活用しつつ、付加的な制御によって、所望の自己組織化を創発させる AI 技術である自己組織化プラットフォームを開発する。自己組織化プラットフォームにより、難環境で自在に振る舞う生物の行動ルールを見出し、これをもとに生物に自己組織的な振る舞いを行わせるための制御ルールを設計し、その有効性、有用性を生物サイボーグ群を用いた実験によって実証することにより、難環境でも協調タスクを行える生物サイボーグ群を実現する。さらに、動作やセンシング機構を改変し生物の行動ルールを組み込んだロボット、いわば生物化されたロボットに制御ルールを適用する。これにより難環境でも事前に環境情報を把握せずとも自己組織的な協調作業を可能とする群ロボットを実現する。

(2) 研究開発プロジェクトの実施状況

本プロジェクトは3つの研究開発項目からなる。研究開発項目1では、15mm×15mm という非常に小型なバックパックの設計を終え、制作段階に進むことができた。また、制御入力 $U(t)$ の精度を向上させるために従来の前進や回転に加え、後進や左右並進を誘引する刺激法の解明が着実に進むとともに、明・暗所・壁面・隅といった実験環境における生物の自由航行の行動データを取得した。さらに、精密な手作業が不可欠であり、時間的コストを要していた生物サイボーグの制作技術に関しては、慎重さや技術、経験が不要となるウェアラブルな電気刺激ユニットを設計し、3D プリンタによるプロトタイプ制作の段階にまで進んだ。研究開発項目2では、上記行動データを用いて生物の行動ルールのモデル化を行い、ゴキブリの軌跡を 80% の精度で再現することができた。また、これに加えて生物に所望の行動をさせるための付加的な制御ルールの設計に取り組み、自己組織化度 93% を達成した。さらに、シミュレーション環境を構築し、起伏の乗り越えや障害物の迂回に加え、物体の推進(運搬)のシミュレーションが行えるようにするとともに、ランダム移動するエージェントを用いて動作検証を行った。研究開発項目3では、光の明度、音の周波数や強度、室内温度、地表の温度などを調節する照明、音響、空調、加減温の設備を実験フィールドに導入することに加え、生物の筋電位や心拍数を計測するシステムを構築することで、生物の周囲の環境情報および生物の知覚・行動の情報の両方を同時に取得できる実験設備を確立した。

(3) プロジェクトマネジメントの実施状況

当該年度は数か月の短い期間であったが、以下のような取り組みを実施した。プロジェクト内のキックオフミーティングを開催した。また、PM 並びに課題推進者間では、電子メール・SLACK・オンライン会議に加え、適宜 PM と課題推進者が集まる会議を開催し、研究の進捗状況を共有した。さらに、代表機関における関連部局の支援に加え、本プロジェクトにかかる PM 補佐を配置し、PM 支援体制チームの充実を図った。研究成果の展開として、国際ワークショップ Bio-inspired, Bio-mimetic and Bio-hybrid (Cyborg) Systems を口

ボットおよび医療バイオ工学でトップの国際会議である IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) および IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS) において企画した。また、Science Partner Journal の1つである Cyborg and Bionic Systems 誌に生物サイボーグの平均探索率や移動距離を向上させ、停止時間を短縮させた成果を報告した。広報、アウトリーチとして、JST のムーンショット事業特設ホームページを通じた情報発信のため、本プロジェクトの概要を作成した。データマネジメントに関する取り組みとして、実験データやソースコードは各課題申請者がそれぞれプライベートリポジトリを用意して管理した。

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: 生物サイボーグ群開発エンジン

研究開発課題1: 生物サイボーグ用バックパックの小型化・機能化

当該年度実施内容: 本研究開発課題では、バックパックが障害物に衝突する・生物が転倒した際にバックパックのために起き上がれないなど、生物本来の行動を阻害する要因をなくすために、小型にしたバックパックを設計する。現状のバックパックには各種センサーが搭載されており、神経信号や動きの取得など生物自身の情報、映像や温度や音などの生物の周りの環境の情報を取得することが可能である。しかしながら、これらすべての機能を搭載するとバックパックのサイズが大きくなり、バックパックが生物の本来の行動を阻害してしまう。これを避けるため、バックパックの小型化が必要となり、研究段階に応じて必要な機能を取捨選択し、統合が可能なセンサーや部品は IC 化、パッケージ化するなどして小型化を進める。

当該年度においては、2023 年度に実現を目指す自己組織的な協調行動を可能とするバックパックの設計を行った。制御入力を行うための神経電極、データ転送のための無線通信が最低限必要であり、まずはこれらを実装したバックパックを設計した。その結果、非常に小型の 15 mm x 15 mm のバックパックの設計を終えて、製作を進めている。なお、統合できる MPU・センサーはチップ化・パッケージ化して実装部品数を少なくする必要もあり、これについても部品・機能・仕様の選定と設計を当該年度に始めることができた。このように当年度の目標は達成し、次年度に向けて進めている。

課題推進者: 佐藤裕崇(南洋理工大学)

研究開発課題2: 制御入力 $U(t)$ の精度向上・環境刺激法の探索

当該年度実施内容: 本研究開発課題では、制御入力 $U(t)$ としての電気刺激により誘引する行動パターンを増やし、また個々のパターンの精度を向上する。さらに、音・光・熱などの環境変化により行動を誘引する方法を見出す。 $U(t)$ を適切に求めるには、様々な状況での生物の行動ルール $I(t)$ を見出すことが求められる。

これまでは、生物(本プロジェクトではマダガスカルゴキブリをまず対象としている)のサイボーグ化にあたって、前進や回転の行動を誘引することを可能としている。自己組織化プラットフォームにより行動ルールが設計されるが、これを成功させるには前進や回転の精度の向上が必要になる可能性がある。つまり、障害物に挟まれたり、軟弱な地盤に行動を妨げられたりするような状況においても自己組織的な振る舞いをさせるには、前進と回転の他に、後進や左右並進など他の行動を誘引可能な制御入力を見出す必要がある。これら

の行動誘因を実現するために、生物の自然な行動を観察して刺激箇所を選定し、体節の感覚器に電極を埋め込んで刺激強度を段階変えて、刺激に対する応答をモニターした。後進については左右両方の触覚刺激することで誘引できることが判明し、体節の端部に埋め込んだ電極による電気刺激で左右並進が誘引することも可能とした。また、明・暗所・壁面・隅といった実験環境を用意して、生物の自由航行の行動データを取得し、研究開発課題 2-1「生物の行動を学習し生物の行動ルールを抽出する AI の開発」(若宮 PI)へ提供している。その結果、平地での自由航行のデータから、機械学習の時系列予測モデル(自己回帰モデル及び LSTM)を用いて離散時間写像が得られた。具体的には、直近の経路情報から直後の位置を予測するモデルである。これにより自由航行の予測が可能となり、ランダムウォークと比較して予測誤差を 80%削減することができた。このように生物の行動データから行動ルール $I(t)$ を抽出することに成功しており、さらに研究開発課題 2-2「生物サイボーグに所望の自己組織的な振る舞いを創発させる制御ルールを設計する AI の開発」において、このモデルを解釈し生物を制御するルール $E(t)$ を設計している。このように当年度の目標は達成している。

課題推進者:佐藤裕崇(南洋理工大学)

研究開発課題3: 生物サイボーグ製作技術の効率化

当該年度実施内容:本研究開発課題では、自己組織的な群制御を行うため 20 体以上の生物サイボーグが必要とされる。日々の実験をしっかりと行うには、これだけの数の生物サイボーグを効率的に製作しなければならない。本研究開発課題では、電気刺激に使う電極のデザインや製作方法、電極の固定方法、バックパックの生物への実装方法を改善し、生物サイボーグを製作する工程を効率化する。

当該年度においては、まず電極の固定法の改善を行った。電極としては現状では白金や銀などの金属の細線を用いている。これを埋め込むには、生物の所定の部位、例えば触覚を切開して、内部組織が露わになったところへ手作業で挿入している。これは慎重で繊細な作業であり、実験者の技能や経験に依存して作業効率が決まってしまう。手作業となる部分をなるべく排除すれば簡便に電気刺激を行うことができる。そこで、生物の体節の形状に適合するウェアラブルな構造体を用意し、それに金属細線を取り付け、金属の配線を形成し、ウェアラブルな電気刺激ユニットを設計し、3D プリンタによりプロトタイプを製作した。このユニットは生物の体節形状に合致しているため、セルフアライメント的に装着することが可能となり、慎重さや技能、経験は必要なくなり、作業効率を向上させることが可能となり、さらに埋め込んだ電極を固定する役割も備えている。このように当該年度の目標を達成した。

課題推進者:佐藤裕崇(南洋理工大学)

(2) 研究開発項目2: 自己組織化プラットフォームの研究開発

研究開発課題1: 生物の行動を学習し生物の行動ルールを抽出する AI の開発

当該年度実施内容:本研究開発課題では、研究開発項目 1「生物サイボーグ開発エンジン」(佐藤 PI)、研究開発項目 3「生物活性度計測」(森島 PI)で得られた生物の知覚、行動、

環境情報から生来的な生物の振る舞いを記述する数理モデルを抽出する「生物の行動を学習する AI」を開発する。

当該年度においては、生物の行動ルール $I(t)$ のモデル化・抽出に取り組んだ。崩れやすく起伏に富んだ軟弱な地盤に様々な障害物がある難環境で自律的に自由航行するゴキブリサイボーグ群の振る舞いのモデル化に向け、各要素を分離させるため、平地における自由航行の行動データをモデル化した。行動データは佐藤 PI の研究グループから提供を受けた。生物の行動は内部状態を持つと想定されるが、内部状態の推定にベイズ推定を用いるとモデルの複雑性が大きくなりすぎ、必要なデータ量が膨大になる。また生物の行動が常微分方程式で記述できることを仮定し、行動データをフィッティングしたが、行動のランダム性が高く決定論的なモデル化が困難であると判明した。そこで5ステップの時間遅れ系を採用し、汎用性の高い LSTM とベクトル自己回帰モデルを用いてモデル化を行った。再現度の指標としては、ゴキブリの軌跡の一致度(絶対誤差)を用いた。単純な統計量による予測の一致度を再現度ゼロ、軌跡の完全一致を再現度 1 とする正規化を行った。

これらの結果、提案手法によって、当該年度の目標を達成した。興味深いことに、固定長の時間遅れ系ではなく、可能な限り長い時系列を用いると、LSTM の再現度は低下する傾向にあった。これは前述の通り、モデルの複雑さが増え、過学習したためと考えられる。

課題推進者:若宮直紀(大阪大学)

研究開発課題2: 生物サイボーグに所望の自己組織的な振る舞いを創発させる制御ルールを設計する AI の開発

当該年度実施内容:本研究開発課題では、研究開発課題 2-1 で抽出される生物の行動ルール $I(t)$ 、研究開発項目 1「生物サイボーグ開発エンジン」(佐藤 PI)で実現される制御 $U(t)$ のもとで、所望の自己組織的な振る舞いを創発する制御ルール $E(t)$ を設計する「自己組織化制御ルールを設計する AI」を開発する。

当該年度においては、研究開発課題 2-1 による生物の行動ルール $I(t)$ の抽出に先立ち、先行研究等で示されているゴキブリの行動モデルをもとに簡易的な行動ルール $I(t)$ を用い、これをベースとすることで、行動ルール $I(t)$ に従って振る舞う生物に所望の自己組織化を創発させるための付加的な制御である制御ルール $E(t)$ の設計に取り組んだ。具体的には、Jeanson ら[Jeanson et al., *Journal of Theoretical Biology*, 2013]が実験に基づき提案したゴキブリの行動モデルを簡易的な行動ルール $I(t)$ とし、これに従って振る舞う生物に編隊行動をさせるための制御ルール $E(t)$ を、鳥群に着想を得た群れの数理モデルである Boid モデル[Reynolds, *14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1987]に基づいて設計した。設計にあたっては、佐藤 PI の研究グループとの打ち合わせを通して確認した、生物に実施可能な制御 $U(t)$ の制約を実現し、かつゴキブリの行動の予測不確実性に起因する制御性能の劣化を低減するために、スライディングモード制御の手法を用いた。

これらによって、群れの凝集度および群れにおける速度の一致度の高い編隊移動が可能となり、当該年度の目標を達成した。

課題推進者:若宮直紀

研究開発課題3: 自己組織化プラットフォームの確立

当該年度実施内容:本研究開発課題では、研究開発課題 2-1、2-2 を遂行することにより、生物の生来的な振る舞いを活かしつつ付加的な制御によって所望の自己組織的な振る舞いを創発するための制御ルールを作り出す自己組織化プラットフォームを確立する。

当該年度においては、研究開発項目 1「生物サイボーグ開発エンジン」(佐藤 PI)ならびに研究開発項目 3「生物活性度計測」(森島 PI)における実験条件を模擬したコンピュータシミュレーションを行うため、汎用的な開発プラットフォームである unity を用いてシミュレーション環境を構築した。起伏の乗り越えや障害物の迂回に加え、物体の推進(運搬)のシミュレーションが行えるようにした。また、研究開発課題 2-1、2-2 の成果創出に先行するため、ランダム移動するエージェントに Boid モデル[Reynolds, 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1987]を組み込んで動作検証を行った。

研究開発課題 2-1、2-2 の結果の通り、行動ルール $I(t)$ ならびに制御ルール $E(t)$ において当該年度の目標を達成した。

課題推進者:若宮直紀

(3) 研究開発項目3: 生物活性度計測

研究開発課題1: 生物の活性度の計測実験手法の確立

当該年度実施内容:本研究開発課題では、生物の周囲の環境情報および生物の知覚・行動の情報の両方を同時に取得できる実験設備を用意し、その設備内で生物を自由に振舞わせる必要がある。

当該年度は、実験台となるトレッドミルにマダガスカルゴキブリを固定した状態で速度・加速度、角速度・角加速度を計測するシステムと自由航行テストできる環境、実験フィールドを構築した。具体的には、光の明度、音の周波数や強度、室内温度、地表の温度などを調節する照明、音響、空調、加減温の設備を実験フィールドに導入し、調整・設定した実験フィールド環境において、照度計、マイクロフォン、温度計の各種小型センサーにより環境データを計測できることを確認した。また、生物の神経・筋肉系に電極を挿入して、神経信号および筋電位、心拍数を計測するシステムを構築しゴキブリの生体情報を計測できるようにした。さらに、肢の屈折、振り上げ振り下ろし、また体節の屈折などの生物の細かな振る舞いは、外部カメラや 3D モーションキャプチャーシステムによりトラッキングし、必要に応じて時間微分して速度・加速度、角速度・角加速度を得た。そして、これらの生物の知覚・行動情報、周囲の環境情報を各種センサーからデータ収集するシステムを構築した。構築したインターフェースにより、計測される環境情報および生物の知覚・行動情報はすべて同期して、時系列データとしてタイムスタンプ付きで集計した。

これらの結果、生物の知覚・行動情報、周囲の環境情報を同時取得する実験設備、実験フィールド環境を確立できた。当該年度の目標を達成した。

課題推進者:森島圭祐

研究開発課題2: 生物の活性度を計測するデバイスの小型化

当該年度実施内容：該当なし(本課題 3-2 は 3-1 の成果を受けて、2023 年度より開始する)

課題推進者: 森島圭祐

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

プロジェクトメンバーに対して、プロジェクト全体の方針等を確認・浸透させるため、またコミュニケーションを円滑にするため、プロジェクト内のキックオフミーティングを開催した。

また、PM 並びに課題推進者間のコミュニケーションに関しては、電子メール・SLACK・オンライン会議を通じて密に連絡をとっており、プロジェクト開始後も引き続きこの通信手段を継続した。また、PM と課題推進者が集まる会議を開催し、研究の進捗状況を共有した。課題推進者は各々が独立した研究室を運営しており、その中で学生・研究スタッフが実験・データ解析を行っており、課題推進者の裁量で各研究開発課題を解決していくが、適宜 PM へ進捗を報告するようにした。課題間で開発デバイスの提供、サンプル交換やデータの受け渡しを行う際は、それを記録し、定例会議で内容を再確認した。

また、代表機関における関連部局の支援に加え、本プロジェクトにかかる PM 補佐を配置し、PM 支援体制チームの充実を図った。

研究開発プロジェクトの展開

当該年度は数か月の短い期間であるため、計画した研究開発項目の推進に注力することとした。研究開発プロジェクトの全体の再検討、国際連携、ELSI/数理科学等に関する取組みほかの研究開発プロジェクトの展開に関する取組は、計画した研究開発項目の進捗状況を踏まえ、次年度以降に検討・実施していくこととした。

(2) 研究成果の展開

ロボットおよび医療バイオ工学でトップレベルの国際会議の一つである IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) において、国際ワークショップ Bio-inspired, Bio-mimetic and Bio-hybrid (Cyborg) Systems を企画した。また、Science Partner Journal の一つである Cyborg and Bionic Systems 誌に生物サイボーグの平均探索率や移動距離を向上させ、停止時間を短縮させた成果を報告した。その他、本プロジェクト採択以降に実施した PM の講演等の機会において、本プロジェクトの概要等について紹介した。

当該年度は数か月の短い期間であるため、計画した研究開発項目を推進して研究成果を創出することに注力した。研究成果の展開は、計画した研究開発項目の進捗状況を踏まえ、次年度以降に検討・実施していくこととした。

(3) 広報、アウトリーチ

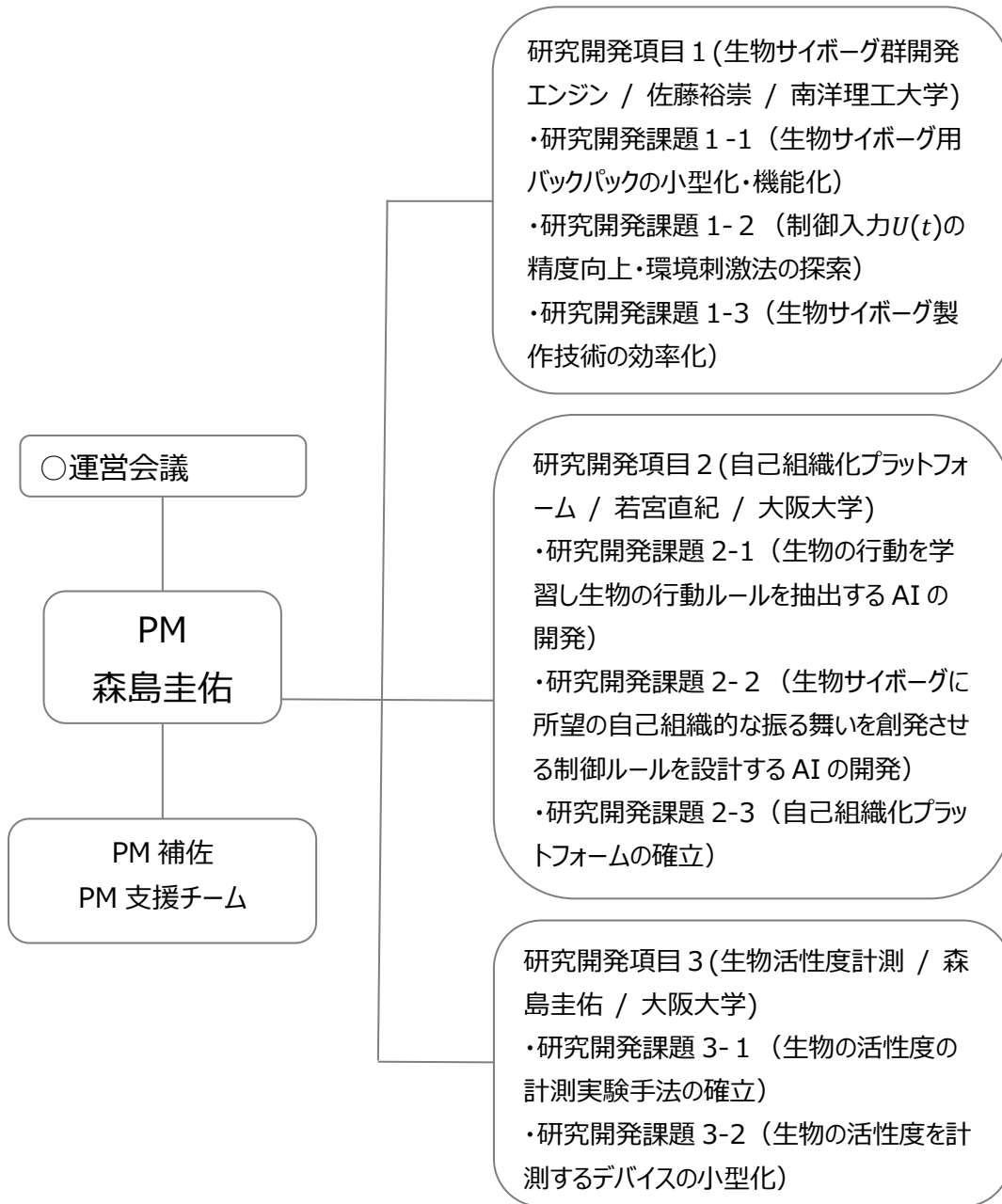
JST のムーンショット事業特設ホームページを通じた情報発信のため、本プロジェクトの概要を作成した。早期にホームページを公開すべく、内容の企画等を進めた。仮設版のホ

ームページについて、令和5年4月の公開に向けて準備を進めた。当該年度は数か月の短い期間であるため、計画した研究開発項目の推進に注力し、その他の広報・アウトリーチ施策は次年度以降に検討・実施していくこととした。

(4) データマネジメントに関する取り組み

実験データやソースコードは各課題申請者がそれぞれプライベートリポジトリを用意して管理した。次年度以降、オープンサイエンスの観点から、学会発表や知財戦略に配慮しつつ、公開できるものは公開していく。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



<知財運用会議>

構成機関：大阪大学、南洋理工大学

実施内容：PM マニュアルに基づき、以下の内容とする。

- ・ 持ち分比率の合意が得られない場合に協議。
- ・ MS プロジェクト知財を受託研究開発機関が承継しない場合の取り扱いについて協議。
- ・ MS プロジェクト知財について、通常実施権の許諾を希望された場合に、知財運用会議にて許諾の可否に関して協議。
- ・ 本研究開発プロジェクト終了後の MS プロジェクト知財の運用について協議。
- ・ その他 PM が必要と認めた協議事項

<運営会議>

実施内容：PM マニュアルに基づき、以下の内容とする。

- ・ PM が新たな課題推進者/研究開発機関を参加させるとき。
- ※運営会議での決議の後も、研究計画の変更として PD の承認が必要
- ・ 参加機関等が参加機関等以外の機関を本研究開発プロジェクトに関与させようとするとき。
- ・ 実施規約を改正する場合。

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 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 登録件数 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 合計(出願件数) | 0 | 0 | 0 | 0 |

| 会議発表数 | | | |
|--------|----|----|----|
| | 国内 | 国際 | 総数 |
| 招待講演 | 0 | 0 | 0 |
| 口頭発表 | 0 | 0 | 0 |
| ポスター発表 | 0 | 0 | 0 |
| 合計 | 0 | 0 | 0 |

| 原著論文数(※proceedingsを含む) | | | |
|------------------------|----|----|----|
| | 国内 | 国際 | 総数 |
| 件数 | 0 | 1 | 0 |
| (うち、査読有) | 0 | 1 | 1 |

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

| 受賞件数 | | |
|------|----|----|
| 国内 | 国際 | 総数 |
| 0 | 0 | 0 |

| |
|-----------|
| プレスリリース件数 |
| 0 |

| |
|------|
| 報道件数 |
| 0 |

| |
|-------------------|
| ワークショップ等、アウトリーチ件数 |
| 0 |