

令和元年度 文部科学省

ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関する
アプリケーション開発・研究開発（萌芽的課題）

「思考を実現する神経回路機構の解明と人工知能への応用」
（ボトムアップで始原的知能を理解する昆虫全脳シミュレー
ション） 成果報告書

令和2年5月29日

代表機関名 国立大学法人 東京大学

課題責任者名 神崎亮平

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、東京大学が実施した令和元年度「思考を実現する神経回路機構の解明と人工知能への応用」（ボトムアップで始原的知能を理解する昆虫全脳シミュレーション）の成果を取りまとめたものです。

目次

1. 委託業務の題目	1
2. 実施機関（代表機関）	1
3. 委託業務の目的	1
4. 令和元年度（報告年度）の実施内容	1
4-1. 実施計画	1
4-2. 実施内容（成果）	2
4-3. 活動（研究会等）	1 5
4-4. 実施体制	1 5

別添1 学会等発表実績

別添2 実施計画

1. 委託業務の題目

「思考を実現する神経回路機構の解明と人工知能への応用」（ボトムアップで始原的知能を理解する昆虫全脳シミュレーション）

2. 実施機関（代表機関）

代表 機 関	機関名		国立大学法人 東京大学			
	所在地		〒113-0033 東京都文京区本郷七丁目3番1号			
	課題 責任者	ふりがな 氏 名	かんざき りょうへい 神崎 亮平	生年 月 日	西暦 1957年 4月 4日 (63歳) ※2020年4月1日現在	
		所属部署名	先端科学技術研究センター		役職	教授
		連絡先	Tel. 03-5452-5195 Fax. 03-3469-2397 E-mail kanzaki@rcast.u-tokyo.ac.jp			
	事務 連絡 担当者	ふりがな 氏 名	こばやし こうたろう 小林 幸太郎			
		所属部署名	財務チーム外部資金担当			
		連絡先	Tel. 03-5452-5390 Fax. 03-5452-5398 E-mail gaishi@office.rcast.u-tokyo.ac.jp			

3. 委託業務の目的

昆虫脳は原始的ながらも、多種感覚統合、連合学習、顔認識、空間学習、探索行動など知能とよばれる様々な基本的な特性を網羅している。本課題では、昆虫脳の性質を調べてスーパーコンピュータ上にシミュレーションを実装することを通して昆虫脳の知能的な性質を理解し、移動ロボットや脳型コンピュータへの応用を目指す。

具体的にはカイコガの匂い源探索に関わる匂い=運動系の神経回路を基礎として定位行動に関わる視覚・機械感覚・嗅覚の情報処理から定位の行動決定までのほぼ全脳のシミュレーションを目指す。形態を用いた詳細モデルを用い去の我々のグループで収集した実験データもしくは本プロジェクト等で取得する新たな実験データ、そして公開されているデータベース等を用いポスト「京」上でデータ同化を行って全体の脳の再構成を行う。そしてその実際の昆虫のその知能的活動との対応を調べる。またポスト「京」の莫大な計算力により、複雑な神経系のパラメータ推定・データ同化をオンラインで行うことによって、現実世界の昆虫脳を効率的に理解しながら操作するシステムを構築する。これらを安心・安全社会に求められる無限定環境のロボット動作アルゴリズムに応用する。これらを通じて科学技術の振興に寄与する。

4. 令和元年度（報告年度）の実施内容

4-1. 実施計画

①ボトムアップで始原的知能を理解する昆虫全脳シミュレーション

a) シミュレータの開発

「京」もしくは代替機上で神経回路のパラメータ同定を実際の昆虫の神経回路モデルを用いて試行してその有用性を確認するとともに改良を行う。Post-K性能評価環境（ARM試作機）上でシミュレータのチューニングを進め数個以上のイオンチャネルモデルまたはstochasticなイオンチャネルモデルでの5%を十分上回る実行効率を目標にチューニングを行う。

いままでのシミュレータとともに開発してきたwrapper ツール群を様々な環境で透過的に使えるように整備を行う。

b) 昆虫脳神経回路シミュレーションの構築

感覚一次中枢である触角葉モデルを高度化しつつそこから高次中枢であるキノコ体までのモデルを構築して計算機上でCMA-ESによるデータ同化とSTDPによる学習実験の両方を行う。視葉での視覚系情報処理のシミュレーションを高度化し、高次領域に情報を送るための昆虫視覚系シミュレーションを構築する。

c) 昆虫脳神経シミュレーション構築のための実験とデータ収集

昆虫の探索行動に対する生理形態行動データを収集する。2光子顕微鏡によって触角葉などでのカルシウムイメージングを行う。複数種の昆虫の単一神経レベルの同一性と違いをカイコガ神経系を軸に評価する。学習を評価可能な実験系を構築する。その他、生理記録とシミュレーションを用いたデータ同化を実現させるための開発を行う。また、シミュレーションと通信可能な昆虫ロボットを製作する。

②プロジェクトの総合的推進

本計画で要求される計算科学・理論神経科学・実験神経科学・ソフトウェア工学などの多様な側面の統合を行う人員を集め、研究会を行って本プロジェクトに対するより深い研究開発計画を構築し、設備備品を整備して本格実施フェーズにむけての準備を行う。産業界と積極的に交流会を行い・産学連携を図る。NECとの共同研究プロジェクトと連携をとって探索行動アルゴリズムのロボットによる応用を模索する。

4-2. 実施内容（成果）

本年度においてはシミュレータの開発としては、Post-K性能評価環境（ARM試作機）上でシミュレータのチューニングを行ってコア部分の実効効率13%を達成した。またstochasticなイオンチャネルモデルでのシミュレーション高速化について同等シミュレーションを複数同時に実行する実際の要求を考慮し、ケーブル方程式計算部分をBrowdwell上で5%程度の実効効率を得た。NEURON K estimatorのため京でカイコガ触角葉神経回路のパラメータをシステムティックに調査した。バックアップ環境といままでのソースコード群の整理を行った。

また、昆虫脳神経回路シミュレーションの構築としては感覚一次中枢である触角葉モデルを高度化しつつSTDPによる学習実験パラメータを調査した。ショウジョウバエ視葉での視覚系情報処理のシミュレーションのスキームを拡張してショウジョウバエ全脳レベルのシミュレーションのためのモデル構築を行った。

昆虫脳神経シミュレーション構築のための実験とデータ収集として、昆虫の探索行動に対する生理形態行動データを収集した。2光子顕微鏡によって触角葉などでのイメージングを行った。複数種の昆虫の単一神経レベルの同一性と違いの文献調査を行った。ミツバチの二つの触角を用いた左右の選択を可能にするやや複雑な学習を評価可能な報酬実験系を構築した。その他、生理記録とシミュレーションを用いたデータ同化を実現させるための開発として2光子顕微鏡に高速ADコンバータとBeagleBoneを用いたインターフェースの開発を行った。シミュレーションと通信可能な昆虫ロボットカーのシステム

を選定するとともに、カイコガを用いた匂い源探索ロボットの開発を行った。

①ボトムアップで始原的知能を理解する昆虫全脳シミュレーション

a) シミュレータの開発

我々のシミュレータ NEURON K+は神経細胞シミュレータとして世界で最もよく使われていると考えられる NEURON を高並列化に向け、特に「京」コンピュータを対象にハイブリッド並列を用いてチューニングを行ったものである。ここでは主に細胞内の電気的な神経活動の時間発展を計算する。1つ

1つの神経細胞の形状を小さなシリンダーのコンパートメントの連なりとして考え、分岐のあるはしご型等価回路モデルを用い、準一次元のタイムドリブンなケーブル方程式(タイプとしては拡散反応方程式)の時間発展を計算する(図1 treeset.c, solve.c)。各コンパートメントの細胞膜には電位等の局所的な

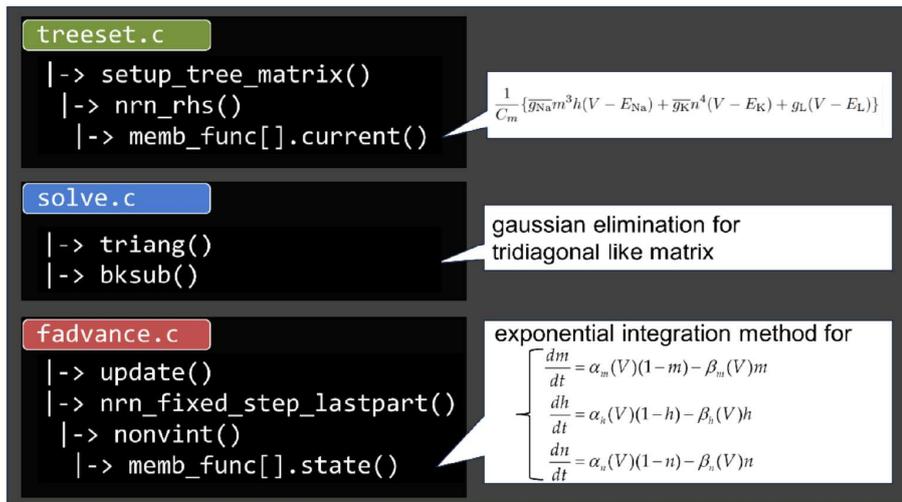


図1 シミュレータの細胞電位計算の構造

情報に依存して開閉確率を変化させるイオンチャネルがあるが、それをコンパートメント毎にまとめたコンダクタンスの期待値として扱う(図1、fadvance.c)。

神経間の情報伝達を行う化学シナプスにおいては、シナプス前末端で放出条件を判定して、後シナプスにおいてはイオンチャネルが予めモデルによって決められたタイムコースで開閉する。計算量を考えると各コンパートメントのイオンチャネルのダイナミクスを計算する fadvance.c がコア部分である。このコア部分の切り出しを作成して Post-K 性能評価環境

で性能を測定した。コア部分(イオンチャネル計算)の切り出しプログラムにおいてインテル上では単

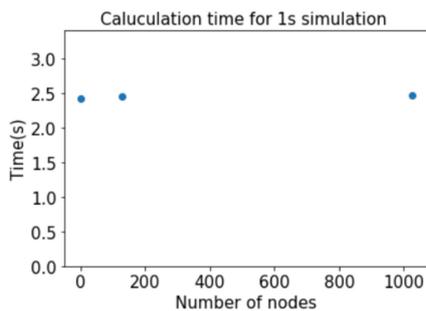


図2 NEURON K+のベンチマーク回路による Post-K 性能評価環境 (ARM 試作機) 環境下での弱スケーリング。ほぼ5%の実行効率であり、1ノードに3880コンパートメントの細胞が8つ割りつけられており、1ステップ(25μS)・コンパートメントにおいて360Flop強の計算量が必要である概算と一致する。

体性能は最大 40%弱の実効効率だが、FX100 においては 20%弱であった。また、Post-K 性能評価環境 (ARM 試作機) 上でシミュレータのチューニングを行ってコア部分の実効効率 13%を達成した。現状で NEURON K+は Post-K 性能評価環境 (ARM 試作機) 上で動作している (図 2)。コード全体では実効効率は 5 %程度を達成した。

また stochastic なイオンチャネルモデルでのシミュレーション高速化について同等シミュレーションを同時に実行する実際の要求を考慮したチューニングを行った。我々は以前より、スパコン上にチューニングされたマルチコンパートメントモデルシミュレータ NEURON K+を開発している。通常これは詳細で決定論的に神経の一つのコンパートメントごとにイオンチャネルの振る舞いを記述するマルチコンパートメント Hodgkin-Huxley モデルによって行われるが、我々は近年このイオンチャネルの振る舞いを記述する微分方程式に重みのついたガウス分布乱数を加えるランジュバン方程式様の記述によってこの確率的な振る舞いをも記述し、スパコン上で実行させることに成功した (2016 年度 HPCI 報告書 <https://www.hpci-office.jp/output/hp160269/outcome.pdf>)。このような記述を行えば、決定論的な振る舞いはずれた揺らぎを含んだ昆虫知能のシミュレーションが可能になると考えられる。しかしながら、この方程式から確率的な振る舞いを十分に知るためには状態変数と確率変数だけが異なる同じ大規模な連立微分方程式を繰り返し解く必要があり、それを前提とした解法のスパコン上でのチューニングを行う必要が生じた。すなわちマルチコンパートメント Hodgkin-Huxley モデルのケーブル方程式部分である

$$\begin{pmatrix} d_0 & -g_{1,0} & \dots & -g_{m-1,0} \\ -g_{0,1} & d_1 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & -g_{m-1,m-2} \\ -g_{0,m-1} & \dots & g_{m-2,m-1} & d_{m-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_0^{n+1} \\ V_1^{n+1} \\ \vdots \\ V_{m-1}^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_{m-1} \end{pmatrix}$$

を陰解法で解くことである。ここで d_n は各コンパートメントの状態依存のコンダクタンス成分など、 $g_{m,n}$ は二つのコンパートメント間の抵抗、 V_m^t はここで m 番目のコンパートメントの時刻 t での電位を意味する b_m も状態依存だが、このケーブル方程式を計算する時点では定数である。

これを

$$H^0 \zeta$$

$$H^1 \zeta$$

のように L 個まとめて解くストカスティックマルチコンパートメント Hodgkin-Huxley 特有のケーブル

表 2 ストカスティック計算チューニングに用いた計算機スペック

Processor name	Intel Xeon E5-2695v4 (Broadwell-EP)
Sockets(Processors)	2
Cores per socket	18
Threads per core	1
Frequency	2.1 GHz (Maximum 3.3 GHz when TBT)
Single / Double FLOPS	1209.6 / 604.8 GFlops
Memory Capacity	256 GB
Memory bandwidth	153.6 GB/sec
L1I per processor	576 KiB 18x32 KiB (per core, write-back)
L1D per processor	576 KiB 18x32 KiB (per core, write-back)
L2 per processor	4.5 MiB 18x256 KiB (per core, write-back)
L3 per processor	45 MiB 18x2.5 MiB (shared, per core, write-back)
NUMA node / distance	2 / [[10,21],[21,10]]
QPI Transfer speed	9.6GT/s
Number of QPI	2

方程式を効率化することが今回の問題である。その基本アルゴリズムは表 1 のように書かれる。ここで p_i^j は疎行列表現を行ったときのコンパートメントのグラフ表現のための引数 u_i^j は同じくコンパートメント間の抵抗である。これらは各計算において共通である。これを解くアルゴリズム・データ構造について検討するためにその組み合わせを試した。使用プロセッサは以下のとおりである (表 2)。

このプロセッサで OpenMP での 36 スレッド並列を用いて、アルゴリズムとデータ構造を変えた場合の効果調べた (図 3)。base アルゴリズムからのループ順序の入れ替えはむしろ速度の悪化を招いたが (Swap)、ブロック構造によるループの多重化 (Block(4/8); 数字はブロック内の変数の数) は効果があった。また二つのプロセッサへのスレッド分散 (N) は著しい効果があり、一次キャッシュの効率利用が鍵になっていることを窺わせる。データ構造についてはナイーブにデータを配列化した D1 に対して u,p を別配列にする D2-4 は一定の効果があったがその効果はそれほど顕著ではなかった、もっとも効果があったのは深さ優先 (D5) もしくは幅優先 (D6) でブロック毎にデータを配列することであった (データの後の () 内の数字がブロックの大きさを示す)。全体としてこの計算はメモリバンド幅が支配的であったが、工夫により概ね 5% 超の実効効率を達成することができた。

前年度に基本的な部分を構築した昆虫一次匂い中枢であるカイコガ触角葉において CMA-ES を用いた NEURON K+_estimator での収束が芳しくないため、このシミュレーションの系統的なパラメータ探索を行った。この結果、一般匂いに対する応答では応答強度自体があまり変化せず、これが収束を悪くしていた原因だと考えられる。この詳細は b) において述べる。

また「京」と研究室所有クラスターのシミュレーションコードと残されていた結果の全データを単一ストレージに集約し、NEURON K+、NEURON K+ estimator、触角葉シミュレーション、Ginie(イオンチャネル計算自動オブティマイザー) シミュレーション可視化ツールなどが GITHUB 上にアップロードし、共有可能とした。

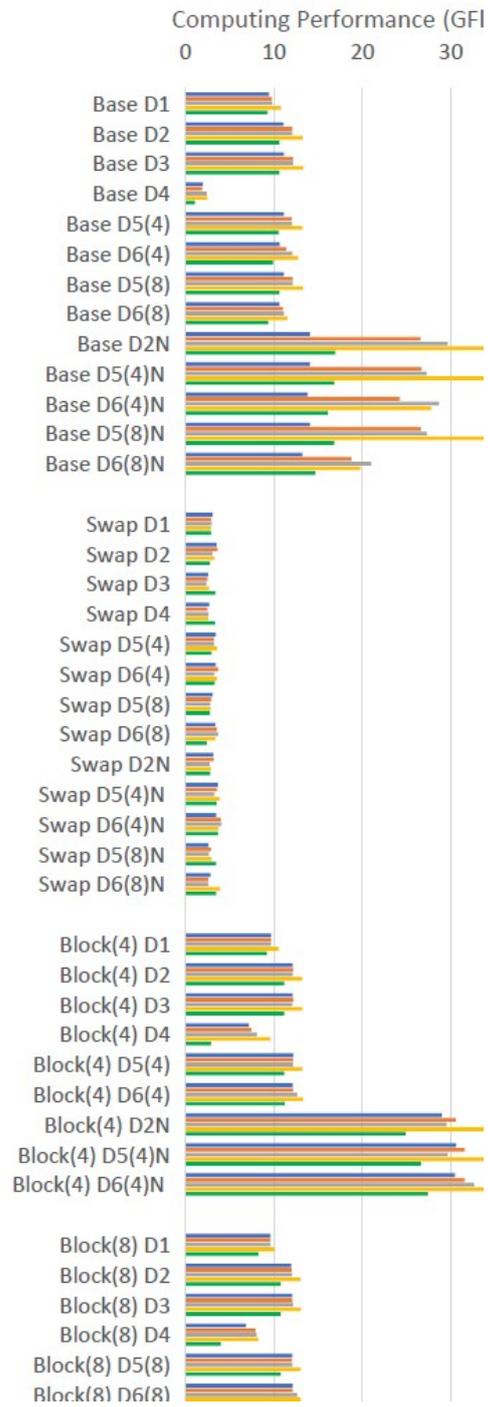


図 3 ストカスティックシミュレーションのケーブル方程式部分に対するアルゴリズムの比較

b) 昆虫脳神経回路シミュレーションの構築

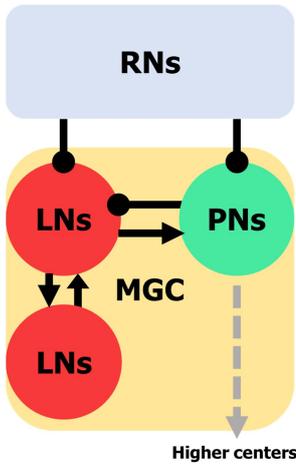


図4 カイコガ触角葉神経回路の概念図

前年度構築した匂い刺激に対する触角葉学習シミュレーションについて京上で系統的なパラメータ探索を行った（表 3）。このシミュレーションモデルは基本的には前年度と同一であり（図 4）、触角葉出力神経（PN）は匂い受容細胞（RN）から匂い情報を受取り局所介在神経（LN）から抑制を受ける。実際のカイコガの匂い受容細胞は非匂い刺激時でも弱い発火を行っていることが我々の測定ではわかっており、それを反映して局所介在神経と出力神経は匂い入力と同時に定常入力としてガウシアンホワイトな雑音を持つ入力を常に受け取っている。また局所介在神経は局所介在神経同士でも相互抑制を行う。シナプスは触角葉全体にほぼ均等に分布しており、ふたつの匂い信号は部分的に重なる触角用の一部分の糸球体に入る。匂い刺激は1秒ごとに行われている。昨年度の結果においては、重なりあうが異なる領域に入力する二つの匂い信号を交互に刺激する状態でその二つの匂い経路のシナプス強度はそれぞれ強まるが、その重複部分ではむしろ弱まるという結果を見出したが、それは応答強度としてはあまり反映されていなかった。そこで今年度においては生理応答に近づけるために CMA-ES を用いてパラメータ最適化を試みたが、収束が芳しくなかったため、システムティックなパラメータサーチを行った（表 3）。

表 3 触角葉シミュレーションのパラメータと探索結果サマリー

説明	既定シナプス強度	シナプス数	探索範囲	
RN→PN間シナプス強度	0.02	300/PN	0.02-2	PNの発火に大きく影響、閾値で発火の有無が変化
RN→LN間シナプス強度	0.06	200/LN	0.006-0.6	ほとんど変化なし
LNへのホワイトノイズ強さ	0.003	100/LN	0-30	0.3以上にするとLNのスパイクが一定値に（位置依存あり）
LN→PN間GABA _A シナプス強度	0.75	20/PN	調査中	
LN→LN間GABA _A シナプス強度	0.001	310/LN	調査中	
LN→PN間GABA _B シナプス強度	0.001	20/PN	調査中	
LN→LN間GABA _B シナプス強度	0	20/PN	調査中	
STDP時の変化倍率	1	0 - 1	0 - 1	PN発火頻度もPNへのシナプス強度も収束があるがその依存性は異なる

結果は以下のとおりである。まず、A) 受容体からの入力の強さははっきりとした閾値があり、それ以上でないと大きな応答を起こさない（図 5）。さらに B) 受容体からの局所介在神経・出力神経に対しての入力は自発応答としても匂い刺激としても入力が強い場合、神経の応答の強さとあまり相関性はなく 10Hz 程度の定常的な活動に落ち着いていく（表 1、図 6）ことが分かった。回路推定の現在の実装はスパイク頻度の 200ms ごとの平均値を用いた時系列を目標値とするため、このことが回路応答からの最適化がなかなかうまくいかなかった一因だと思われるが、一方でこれは触角葉そのものに一定の周期で活動を起こさせるような内在振動モードがあることを示唆している。

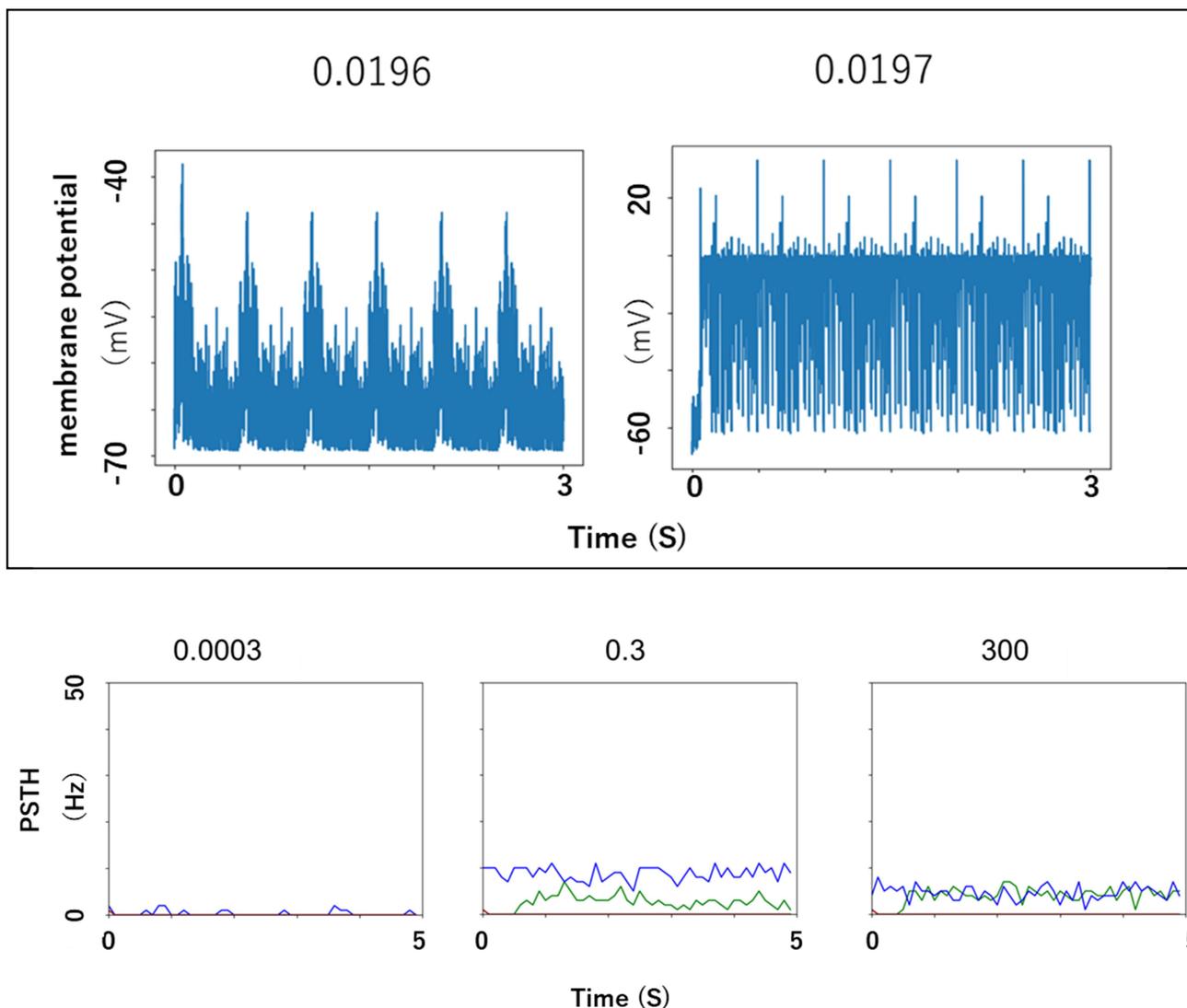


図6 RN→LN間 定常雑音入力強度を変えたときのLN応答例（青と緑は同一神経・異なる場所の記録）

実際、実験的にも昆虫匂い触角葉における振動的な神経細胞の活動はいくつか報告されており、我々のラボでも20Hz程度の振動をマルハナバチ (Okada et.al 2001)、カイコガ (未発表) で電気刺激に対する応答として観察している。この現象は哺乳類の嗅球でも同様な現象が存在するとされており、匂い識別に関してもなんらかの寄与があると薬理的な実験より示唆されているが、その理論的な解明は進んでいない。今回の我々の結果は触角葉神経回路に内在している振動モードの影響であり、今後実験的な振動現象とより精密にパラメータをあわせた後にその匂い識別機能の関係を調べる事が可能になったといえる。

また、その上でSTDPによるシナプス可塑性の強度を系統的に変化させることを試みた (図7)。結果としてはC) シナプス強度は可塑性の強度変化に従って素直に変化するが、D) PNの応答はRN>PNのシナプス強度とは明らかに相関が薄く、E) RN>PNのシナプス強度が強くなっても前述の10Hz程度の応答頻度に収束することがわかった。

前年度に行ったショウジョウバエ視葉での視覚系情報処理のシミュレーションのスキームを拡張してショウジョウバエ全脳レベルのシミュレーションのためのモデル構築を行った。我々の行ったショウ

ジョウバエ視葉モデルのシミュレーションは電頭ベースのコネクトームを利用してシナプス数をシナプス強度として読み替えることでかなり現実に近い結果を得ることができた。そこで標準脳座標系にマッ

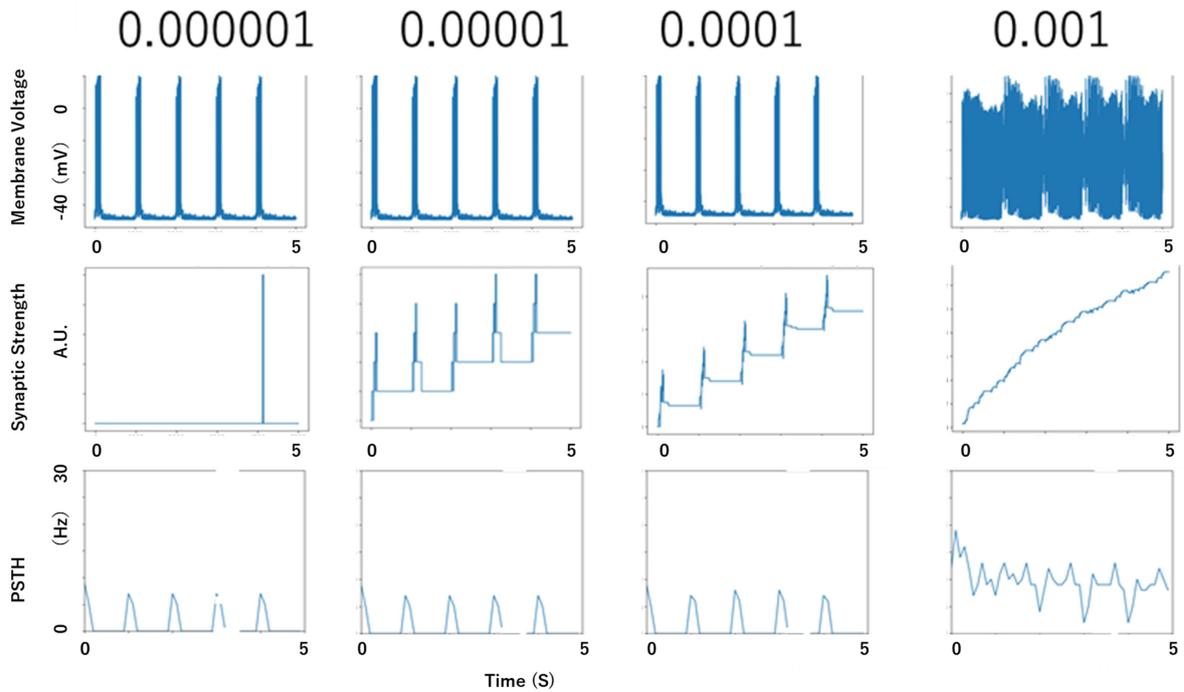


図 7 シナプス可塑性強度を変えたときの PN の応答と RN>PN のシナプス強度の変化

上段は膜電位変化 中段は RN>PN のシナプス強度変化 下段は PN の応答頻度の変化を示す。

プされたショウジョウバエ光学顕微鏡データを用いて、細胞間の距離に依存してシナプス結合確率を決める Peter 's Rule に基づき、シナプス結合の推定を試験的に行った。すなわち、入力、出力を示す細胞極性をその形態から推定して、その上でコンパートメント間距離をパラメータとしたガウス分布による接続可能性の確率分布モデルを適用することで確からしいシナプス結合を推定することができた (図 8)。これによって大量の光学顕微鏡データを用いて組織的に神経回路モデルを構築するソフトウェアパイプラインがほぼ完成したといえる。なお Flycircuit 内に存在する約 20000 神経のデータで結合推定が 2020 年夏までに終了する見込みである。

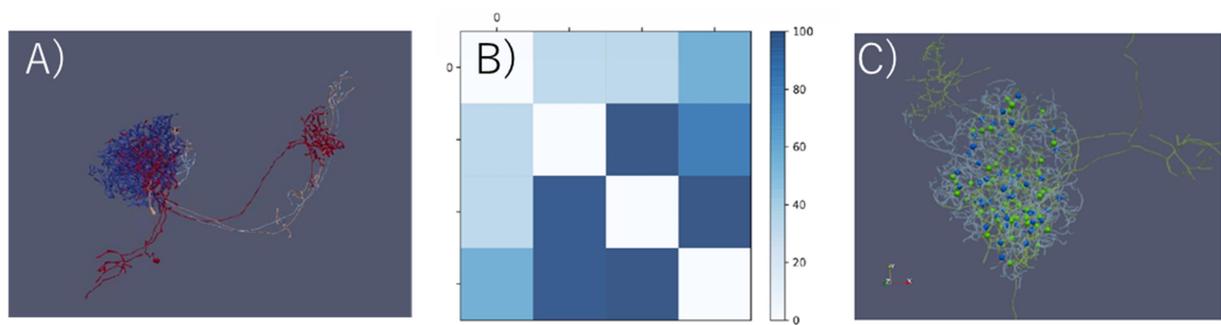
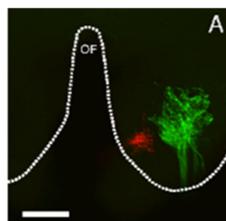
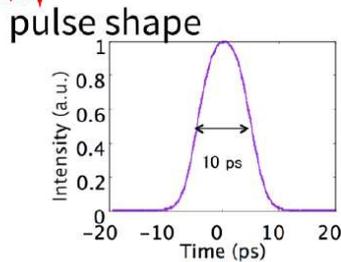
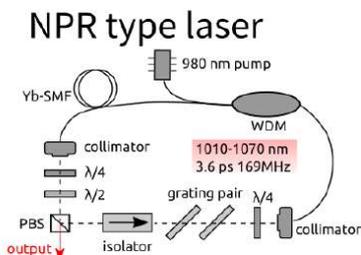
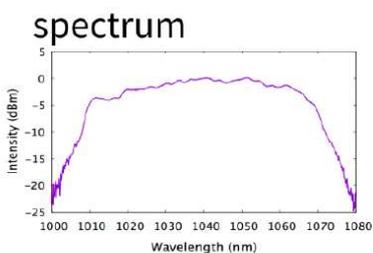


図 8 ショウジョウバエ神経の Peter's rule による結合推定 A) 標準脳マッピングされた 4ニューロン B) 4ニューロン全体としての結合確率行列推定結果 C) 単一ニューロンのシナプス位置の推定結果例

c) 昆虫脳神経シミュレーション構築のための実験とデータ収集

通常、昆虫の脳は数百マイクロメートル程度の深さであり、2光子励起を用いれば脳深部から観察が可能である。これをシミュレーションと結合させればデータ同化を含めて脳神経の様々な動態を多数の神経で取得することが可能となる。今年度においては 1010-1070nm のやや広帯域の 3ps の高速パル



tract tracing
honey bee receptor neurons
Red: TRITC dextran
Green: Alexa Fluor 488 (FITC derivate)

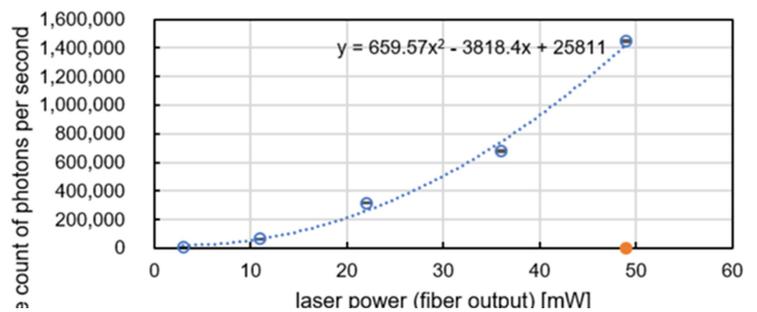
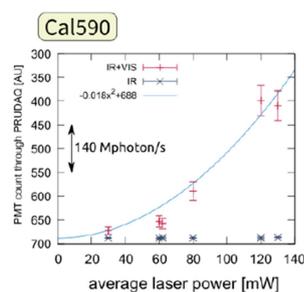
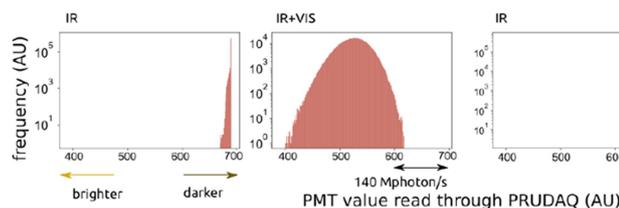


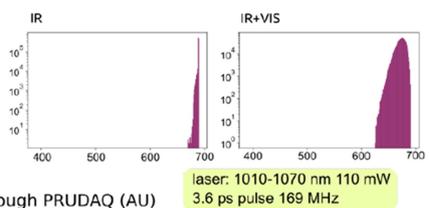
図 9 今年度開発したファイバーレーザー



Lucifer Yellow



FITC



secondary-proportional visual light
→two photon excitation

visual light
→two photon excitation

visual light
→two photon excitation

図 11 三種類の色素に対する 2 光子励起の確認

スレーザーを開発し (図 9)、また 1MHz 超の速度で AD コンバータからエッジデバイスの Beaglebone ヘーデータ取り込みを行い、ミツバチ触角葉内の TRITC-Dextran の 2 光子励起確認 (図 10) と in vitro で Plodium Ionid, Cal590, Lucifer Yellow, FITC での 2 光子励起を確認した (図 11)。この結果によって広帯域ファイバレーザーの pico 秒レベルのパルスによって脳内の蛍光色素が励起可能であり、励起波長の異なる多数の色素が 2 光子顕微鏡のための蛍光ラベリングに使用可能であることが示された。なお、Lucifer Yellow はその分子量の軽さから我々がよく細胞内記録による一細胞染色に用いている蛍光色素であり、FITC はカルシウムイメージングによくつかわれる OGB とほぼ同等のフルオレセイン系の色素である。また Cal590 は我々が以前より試験しているカルシウムイメージング用の色素である。

ミツバチは昆虫のなかでもっとも複雑な構造の脳をもつ種の一つであり、昆虫の知能行動を調べるための一つのモデル生物たりえる。報酬となる感覚刺激としてよく使われる sucrose 刺激と味覚刺激によって引き起こされる触角スキャンニング行動との対応を調べた。その結果、昆虫の Sucrose 感度はおおむね 1 mM 程度と言われていたにも関わらず、0.009mM 程度の Sucrose に対してミツバチはこの甘さを認識して反応することが判明した (図 12)。また、左右に別濃度の sucrose 刺激を与えることで高濃度側に反応することから、このスキームは二つの別の刺激の判別行動実験に使えることがわかった。

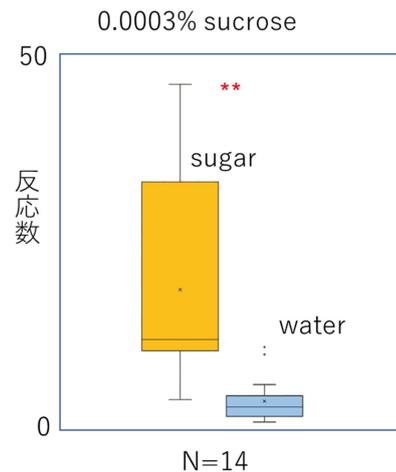


図 12 ミツバチの触角スキャンニングによる糖応答

カイコガの歩行行動検出による匂いセンシングをロボット上で行いこれを用いた匂い源探索ロボットを開発した (図 13)。カイコガをロボット上のトラックボール上に固定して、トラックボールの動きを通じて、行動検出を行い、これをソフトウェア的に処理して匂い検出として用いた。ここでは匂い探索運動はやや人工的なスパイラル行動として実装して、実際に室内での匂い源探索実験を行い、匂い源から 2.5 – 3.0 m の距離からの定位に成功した。さらに実測値から、匂いのプルームを捉えていることも確認できた。

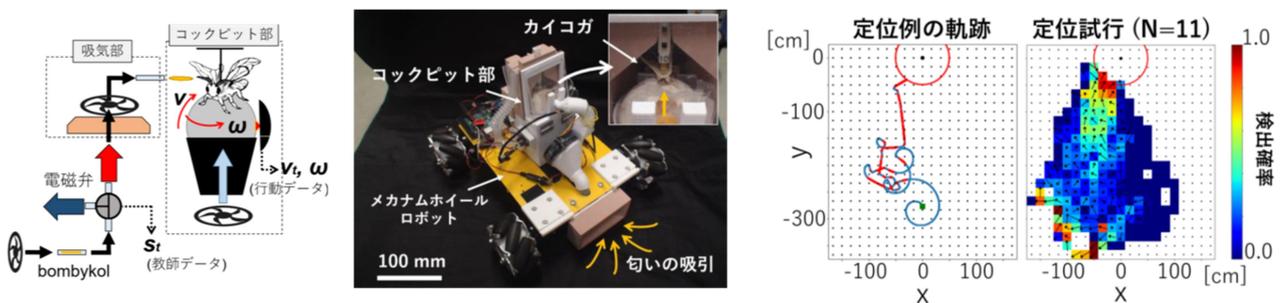


図 13 行動検出型匂い源探索ロボットの試作

我々が実験動物として過去から用いている匂い源探索行動のモデル動物であるカイコガ、近年コネク

トームの情報が特に集積されているショウジョウバエ、社会性昆虫としての代表的なモデル動物の一つである西洋ミツバチの三種の神経系の情報を匂い情報処理系を中心に比較した。カイコガにおいては受容体応答、出力神経、局所介在神経の形態と応答データを我々のグループは所持しているが、網羅性においては匂い情報処理系の 5000 個程度の神経のうち 1600 程度のデータを持っている。ショウジョウバエは光頭コネクトームにおいて全脳の数分の一程度の 2 万個の形態データ、また電頭コネクトームデータも近年公開されている。ただし、生理・行動実験はほとんど遺伝子操作を絡めたものに報告が偏っており、また個体レベルの学習は観察が難しいという問題がある。またミツバチにおいては高次神経機能をもつキノコ体まわり、また匂いの識別の学習実験には大きな研究の蓄積があるが、実のところ触角葉においては電気生理学による細かい応答の報告は少ない。(ただしカルシウム感受色素の AM 体を用いたカルシウムイメージングは多く行われている) それらの昆虫系を比較するとそれぞれその生活や性質による違いがあり、神経細胞数(表 4)をまとめると A) ショウジョウバエ神経系においては神経数は少ないが、触角葉出力神経でみる限り少数細胞を含めると多様な種類をもつ、B) カイコガ触角葉はガとしてフェロモン専用の系をもつのと同時に、C) 糸球体数の比以上の神経数をもっており、ミツバチにおいても特に局所介在神経の数をみるとそれ以上である。また、D) 全体として出力神経のうち糸球体から投

射する IACT 経由の神経が多く、局所介在神経もその大部分は全体に分枝していることは共通であった。これらが種間の匂い判別能力を反映しているかどうかは今後のシミュレーションの対象のひとつになる。

当研究で想定されるシミュレーションとロボット実験の結合にむけて、小型ロボットカーの実装とアルゴリズムについて検討を行った。NEC との共同研究で使われたロボットは https://www.vstone.co.jp/robotshop/index.php?main_page=product_info&cPath=156_923&products_id=5116

であり、簡単な駆動機構と機器の積載、また X86 上の ROS を介した制御を行っている。しかしながら我々の目的はより昆虫のサイズに近いところで感覚情報を介してシミュレーションとの結合、あるいは昆虫脳の測定とシミュレーションまで結合することを想定するので、より昆虫に近いサイズを調査することにした。ただし、I/O については、リアルタイムに近いセンサレベルのインターフェース、特にカメラインターフェースを考えることが問題になった。

センサとして想定される昆虫の能力を反映したものとして想定データ量を想定すると、カメラとして $2(\text{左右}) \times 200 \times 200(\text{image size}) \times 16(\text{bit}) \times 60(\text{Hz}) = 77 \times 10^6 (\text{bit/s})$: 10M byte/s

表 4 三つの昆虫脳嗅覚系神経数の比較

カイコガ		ショウジョウバエ		ミツバチ	
種類	数	サブタイプ	神経数	種類	数
嗅覚受容細胞	25000			嗅覚受容細胞	1300
		ボンピコール受容	10000		
		ボンピカル受容	10000		
		一般臭受容	5000		
糸球体	60			糸球体	43
局所介在神経	360			局所介在神経	110
		MGC-allGs	288	ユニラテラル	100
		MGC-oligoGs	36	バイラテラル	10
		oligoGs	36		
出力神経	740			出力神経	135
フェロモン出力神経	100			フェロモン出力神経	850
		トロイド出力神経	40		
		キユラス出力神経	25		
		ホースシュー出力神経	15		
		C+T出力神経	10		
一般臭出力神経	600			一般臭出力神経	135
		単一糸球体IACT出力神経	450	単一糸球体IACT出力神経	61
		単一糸球体OACT出力神経	6	単一糸球体mIALT	10
		複数糸球体IACT出力神経	30	単一糸球体OACT出力神経	2
		複数糸球体MACT出力神経	60	複数糸球体IACT出力神経	13
		複数糸球体MACT出力神経	30	複数糸球体MACT出力神経	26
		不明	24	複数糸球体tALT	11
				複数糸球体OACT出力神経	11
				バイラテラル	1
ケニヨン細胞	3000			ケニヨン細胞	344000

匂いセンサは

$2(\text{both side}) \times 16\text{bit} \times 100(\text{Hz}) = 3.2\text{k}(\text{bit/s})$

程度の通信バンド幅が見積もられ、特にカメラが問題になることがわかる。

過去の我々のロボットは E-PACK(<http://www.e-puck.org/> PIC 駆動)を用いている。現在でも同サイズのロボットカーキットの大部分は Arudino を前提としたものである。

Arudino では周辺機器は I2C や SPI(Serial Peripheral Interface)で通信をしており、I2C は 100K-500Kbps と低速、SPI は Arduino だと 1 Mbps 程度である。SPI は CPU クロック依存であるため、今回想定されるロボットコントローラの高速 I/O としては Raspberry Pi レベルの CPU を使用する方が適当である。また、Raspberry Pi は Linux が動作するため ROS も動作するのがメリットである。カメラ用の CSI2 というインターフェースの選択肢もあるが、こちらは現在のところ ARM の小型デバイスに対しては複数カメラに対応できていないようである。そのため Arduino に比べて一桁早いクロックスピードと I/O が sony の Spressense という選択肢も一時検討したがカメラ I/O が CSI2 しか整備されていないために断念した。また、USB においてはリアルタイム OS 上の同期性に問題を抱えていることがわかっている。ただし Raspberry Pi は、直接は I2C のアナログ出力などを備えておらず、そこが煩雑になることが懸念される。実際最近の研究用の小型ロボットで Raspberry Pi をつかっているものも存在するがその種のものには ARMM5 などのコントローラを USB で外付けして通信することでこの問題を補っている。新しい選択として 2019 年度に発売された Beaglebone AI はマルチコアでリアルタイム性に優れ、Raspberry Pi と同等の性能を持つうえにアナログ端子も備えてさらに 92 個の多数の GPIO を備えている。問題は小型ロボット実装の報告があまりないことだが、ROS は動作するとされるため、問題はないと考えここを選択した。現在は 2 光子の顕微鏡のインターフェースとして Beaglebone AI を使用してロボット用としての使用感を調べているところである。移動ロボット本体としては Raspberry Pi Mouse V3

<https://rt-net.jp/products/raspberrypimousev3/>

が 1)日英ドキュメントの充実、2)ソフトウェア的に同等な大型の筐体も存在からさしあたり適当であろうと考えられた。このようにシミュレーションと連携するための昆虫匂い源探索のロボット実験のための課題が抽出できた。

②プロジェクトの総合的推進

本計画で要求される計算科学・理論神経科学・実験神経科学・ソフトウェア工学などの多様な側面の統合を行う人員を集める研究会として J-node Hackathon 2020 Spring に協力・参加を行って開発を進め、データベースからシステムティックに神経データをダウンロードしてその解析を行うデータフローと、データ評価を行うためのオントロジー基盤の開発を行った。また標準脳マッピングにおける技術交流をも行った。また第 41 回比較生理生化学会東京大会において、種間の比較解剖学、進化論的な見方から改めて昆虫脳アーキテクチャーをとらえなおす主題でオーガナイズセッションを共催した。

産業界との交流として本プロジェクトとの関連プロジェクトとして NEC との共同研究契約「超高感度匂いセンサを搭載した移動体による匂い源探索の研究」のもとに進め、匂い源探索ロボットについてなどで情報交換を行った。当該プロジェクトとしては主に危険物探索としてしての応用を想定して、センサ昆虫の開発を行ったが、本プロジェクトとしては前項に述べたようにそれに対応したスケールの昆虫ロボットの開発準備を行い、ロボットプラットフォーム構築のための部品類を整えた。

4-3. 活動（研究会等）

2020 2/20-22 J-NODE HACKATHON 2020 SPRING

2019 11/30 第 41 回比較生理生化学会東京大会 オーガナイズドセッション 脳の理解にむけた比較生物学と進化論的アプローチ

4-4. 実施体制

業務項目	担当機関	担当責任者
① ボトムアップで始原的知能を理解する昆虫全脳シミュレーション	東京大学先端科学技術研究センター	
a) シミュレータの開発	東京大学先端科学技術研究センター	先端科学技術研究センター 特任研究員 加沢知毅
b) 昆虫脳神経回路シミュレーションの構築	東京大学先端科学技術研究センター	先端科学技術研究センター 特任研究員 加沢知毅
c) 昆虫脳神経シミュレーション構築のための実験とデータ収集	東京大学先端科学技術研究センター	先端科学技術研究センター 特任助教 Stephan Haupt 周一
② プロジェクトの総合的推進	東京大学先端科学技術研究センター	先端科学技術研究センター 教授 神崎亮平

「思考を実現する神経回路機構の解明と人工知能への応用」
(ボトムアップで始原的知能を理解する昆虫全脳シミュレーション)
実施計画

平成 31 年 2 月 24 日

代表機関名 東京大学

研究代表者名

神崎亮平

【改訂履歴】 改訂履歴はここに（表紙の裏側に）記載してください。

版	項目	ページ	主な改訂内容（概要）
1.0 (2016 11/30)			第一版
1.1 (2016 12/21)			第一版を微小な語句修正
1.2 (2017 5)			予算変更に伴い訂正版を提出
1.9			中間評価をうけて修正アルファ版
2.0 (2018/3/26)	—	—	中間評価指摘事項を受け、版数変更して対応。
	目次	—	「中間評価における指摘事項への対応状況」目次項目追加。
	1. (2)	1～2	研究開発内容更新（記述を明確化）
	1. (3)	3～4	研究開発目標の更新。
	1. (5)	5	京とポスト京の定量的な記述を追加
	1. (6)	5～7	年次計画の微小な修正。
	1. (8)	11	必要計算資源の訂正
	3.	9	中間評価における指摘事項への対応状況を追記。
	4.	10	修正履歴を追加
3.0 (2019/2/22)			評価指摘事項をうけて、版数変更して対応
	1. (3)	3	研究開発目標の更新。
	1. (6)	6～8	年次計画更新。
	1. (7)	9	研究実施体制図の変更
	1. (8)	32～33	必要計算資源の訂正
	3.	37	採択時の留意事項への対応状況についてサブ課題対応部分を追記。

目次

1. 実施概要	エラー! ブックマークが定義されていません。
(1) 目的・意義	1
(2) 研究開発内容.....	1
(3) 目標・期待される成果	2
(4) 周辺領域への波及効果、課題全体における計算科学やシミュレーションの位置づけ.....	3
(5) 「京」でできていること、ポスト「京」でなければならないこと.....	3
(6) 年次計画	5
(7) 実施体制.....	8
(8) 必要計算資源.....	9
2. 採択時の留意事項への対応状況.....	9

実施概要

昆虫脳は原始的ながらも、多種感覚統合、連合学習、顔認識、空間学習、探索行動など知能とよばれる様々な基本的な特性を網羅している。本課題では、昆虫脳の性質を調べてスーパーコンピュータ上にシミュレーションを実装することを通して昆虫脳の知能的な性質を理解し、移動ロボットや脳型コンピュータへの応用を目指す。

具体的にはカイコガの匂い源探索に関わる匂い=運動系の神経回路を基礎として定位行動に関わる視覚・機械感覚・嗅覚の情報処理から定位の行動決定までのほぼ全脳のシミュレーションを目指す。形態を用いた詳細モデルを用い過去の我々のグループで収集した実験データもしくは本プロジェクト等で取得する新たな実験データ、そして公開されているデータベース等を用いポスト京上でデータ同化をおこなって全体の脳の再構成を行う。そしてその実際の昆虫のその知能的活動との対応を調べる。またポスト「京」の莫大な計算力により、複雑な神経系のパラメータ推定・データ同化をオンラインで行うことによって、現実世界の昆虫脳を効率的に理解しながら操作するシステムを構築する。これらを安心・安全社会に求められる無限定環境のロボット動作アルゴリズムに応用する。

(1) 目的・意義

本課題は比較的シンプルである昆虫脳を詳細に入力から出力までをシミュレーションすることによって昆虫のおこなっている適応的・知能的な行動から神経系の知能を理解・再現しようとするものである。人間の脳の神経細胞は1000億個の神経細胞から成っているとされるが、それにくらべると昆虫脳の構成する神経数は10-100万程度であり非常に少ない。しかしながら、基本的な分子メカニズムは昆虫と哺乳類ではほぼ同等であり、昆虫脳は原始的ながらも、多種感覚統合、連合学習、顔認識、空間学習、探索行動など知能とよばれる様々な特性を網羅している。驚異的な識別率を誇る画像認識を可能にしたコンボリューショナルなディープラーニングネットワークは哺乳類脳の視覚系の構造を反映しているが、行動決定を担うためのリカレントなディープラーニングネットワークの設計にはこれまで決定的な指針が存在していない。無限定環境で動作させることを要求される小型ロボットに搭載される人工知能をすみやかに構築するには、比較的小さな複雑さで構成される脳を参考にすることが有用であると申請者らは考えている。その際、非線形で複雑な階層性をもつ神経系の働きを深く理解するには、過度に抽象化されたモデルでは十分ではなく、物理的な構造と現象を再現した詳細モデルから現れる性質をよく観察して、現実の脳での実験結果と比較することが必要である。計算性能上、ポスト「京」は詳細モデルにおいて昆虫全脳規模でのリアルタイムシミュレーションが可能であり、本提案においては、定位行動を念頭に昆虫脳の詳細な入力から出力までのリアルタイムシミュレーションとデータ同化を通して昆虫脳の物理的知能的な構造・機能を探る事を目指す。

(2) 研究開発内容

本課題では昆虫の脳で行われている情報処理のシミュレーションモデルを実験データをもとに構築して、ポスト京でシミュレーションを行うための開発を行う。主に、カイコガ(*Bombyx mori*)が行う匂い源探索行動を軸に他の昆虫での多種感覚統合や高次機能のデータ、特にショウジョウバエ(*Drosophila melanogaster*)の豊富な神経情報を用いる。カイコガでは、フェロモン認識から匂い源探索に関わる嗅覚-運動系の神経回路を対象とし、実験と連携したデータ同化・パラメータ推定技術の開

発を行う。ショウジョウバエでは、入手する大規模データを用いて全脳規模の神経回路再構成を目指す。

本格研究期間においては、触角葉から側副葉（LAL）までの神経回路モデルを結合させて、カイコガの嗅覚-運動系全体のシミュレーションを行う。さらにそれを実験データに調和させる神経回路モデル同化を行って、モデルの精細化を行う。神経系の内在的な雑音を再現して不確定な環境下における匂い源探索・連合学習・視覚系による中心複合体やキノコ体といった高次中枢における学習シミュレーションを行う。これらにショウジョウバエの情報を加えて、複数の行動を入力から出力まで統合可能な全脳規模のシミュレーションを行う。対象認識等の昆虫脳の知能的現象のシミュレーションを行い、入出力の存在するロボット実験等を試行する。

(3) 目標・期待される成果

アウトプット成果（平成29年度終了時）

- 京上におけるベンチマーク的な不均一な神経回路における 10,000 神経細胞の 99%以上のロードバランシングのとれたリアルタイムシミュレーション
- 電流注入によるシミュレーションによる神経細胞の性質の同定（5種類以上）とそれらの結果の部分的な実験的な裏付け
- ストカスティックな神経細胞シミュレーションの初期的な実装と評価
- 神経回路同定の初期的な実装と評価

アウトプット成果（本格実施フェーズ終了時）

- ポスト京の 10 万ノード実行時に京のフルノード実行時程度のスケール性が出ると仮定した上での、100 万ニューロンの神経回路のシミュレーションのポスト京上での 10 個程度のリアルタイムシミュレーションを担保する、Post-K 性能評価環境（ARM 試作機）もしくはメニーコアシステム上での 5%を超える単体ノード性能の達成
- 京上での数百ニューロンの神経回路に対する数十から数百パラメータの同定法の確立
- 触角葉・LAL を含む匂い源探索を行う入力から出力までの神経回路の単純な実装と同等（10,000 ニューロン程度）規模のリアルタイムシミュレーション
- キノコ体を含む・複数感覚統合・学習を行うシミュレーションの初期的実装とそれによる昆虫脳の知能の一部の理解
- シミュレーションと連携した定位行動の小型ロボット実験の試行
- 神経回路規模でのリアルタイムデータ同化を基礎づける 2 光子顕微鏡による昆虫脳からのシミュレーション関連データの取得と並列実行を利用した神経シミュレーションパラメータオンライン推定の試行

アウトプット成果（ポスト「京」運用開始5年後）

- ポスト京フルスケールにおける 100 万ニューロンの神経回路のストカスティックシミュレーションを 10 個同時実行でリアルタイム程度の神経回路シミュレーション。この条件で 5%程度の実行効率。

- ポスト京における数百ニューロンの神経回路パラメータの詳細で効率的な同定法の確立
- 様々な行動選択ができるガ等を念頭においた視覚・嗅覚・風感覚をもつ昆虫定位行動のリアルタイムシミュレーション
- 昆虫の脳の働きとその知能的行動の対応の一般的な理解
- 他の昆虫を用いた昆虫全脳レベルのシミュレーション
- シミュレーションで得られたアルゴリズムを実装した小型定位ロボット
- 上記とカルシウムイメージングなどの多数同時記録とのデータ同化手法の確立

アウトカム成果（ポスト「京」運用開始5年後）

- 詳細シミュレーションと簡約シミュレーションの相互結合
- 神経回路レベルのデータ同化に対するスパコン利用の普及
- なんらかの脊椎動物の詳細大規模神経回路シミュレーション
- 効率的で柔軟性をもつ知能アルゴリズムの原理解明

アウトカム成果（ポスト「京」運用開始10年後）を記載。

- 人間の脳の全体もしくは一部のリアルタイムシミュレーションの試行
- 様々な脳の情報処理のシミュレーションの観点からの比較と統一的な理解

（4）周辺領域への波及効果、課題全体における計算科学やシミュレーションの位置づけ

小型ロボットのアルゴリズムにおいては本提案で探求するような設計指針が求められており、本提案はそのような野外で活動する「ロボットの知能」設計において、大きな足がかりになる。また、脳・神経科学領域では様々な種類のデータを統合・解釈する必要があり、シミュレーションこそがそれを可能にすると考えている。現在の計算論的神経科学の分野ではあまり多くの計算資源を用いるのは主流ではないが、増加する計算資源を活かして、本研究で行われるようなシミュレーションと進化的アルゴリズムをスパコン上で組み合わせる方向性は神経回路に対する理解を深めるための強力なツールとなり、一定の地位を占めると考えられる。

（5）「京」でできていること、ポスト「京」でなければできないこと

申請者らは「京」において、神経細胞・回路シミュレーションの単体性能・並列性能両面における大幅な高速化を行い、その結果、カイコガ脳における嗅覚-運動系神経回路に相当する約 10,000 神経細胞 (= 10^8 コンパートメント) のリアルタイムシミュレーションを実現しており、これは世界最速・最大規模である。今後京上の開発をさらにすすめて、不均一な 10,000 細胞のロードバランシングの実現・進化的アルゴリズムによる推定手法の並列度の改良と、確率的シミュレーションの導入をすすめる。

ポスト「京」においても、更なる性能向上を進めることで、昆虫全脳規模に相当する 10^6 神経細胞規模 (= 10^{10} コンパートメント) を 72PFLOPS 程度以上の実効性能で実行できればリアルタイムシミュレーションが可能となる（1 コンパートメントを 600FLOP/step、コンパートメント数を 5000/cell、ステップタイムを 0.1 秒の見積もりであり、詳細は計算科学ロードマップ 2014 年(平成 26 年) 3 月版 114-116 ページを参照）。これによって精密な神経回路シミュレーションの動作の実空間での検証やそこへの干渉などの道が開かれる。それだけでなく、実験を元にしたモデルパラメータの推定においても、これまでの

単一細胞単位から、千オーダの神経細胞による回路の推定まで拡張する事が可能となる。1 細胞の 10,000 コンパートメントモデル程度の規模においては、物理時間 1 秒程度のシミュレーション (7.2×10^{10} FLOP) の 1,000 遺伝子 \times 100 世代= 10^5 倍ほど計算資源があれば可能である。1,000 細胞の神経回路を対象にするとすれば、 10^6 遺伝子 \times 100 世代程度とすれば、 7.2×10^{21} FLOP 程度の計算実行がとりあえずの目安になる。この 10 倍程度の計算資源を用いれば実際の神経回路の動作についての有用な推定が行うことができると見込まれる。これにはポスト京の 1 チップの性能と大規模性を兼ね備えた性能が必要となる。

触角葉・LAL はともに 1,000 個程度の神経から構成されていると考えられており、ポスト京において局所神経回路の接続や性質を推定できることは飛躍的に神経回路の理解を進歩させられると考えられる。

(6) 年次計画

定量的及び定性的な目標と実施内容を簡潔に記載。

課題全体	中間目標 (平成29年度)	<ul style="list-style-type: none"> ● 京上の10,000個の不均一な神経回路のリアルタイムシミュレーションのロードバランシングの達成 ● CMA-ESを拡張した進化的アルゴリズムを用いた神経回路パラメータ同定プログラムの実装 ● 神経回路確率モデルシミュレーションの初期的な評価 ● 触角葉の構成神経が単一細胞レベルで実験と矛盾なくモデリングされて、フェロモン受容の時間的応答パターンを再現することができる。
	● 最終目標 (平成31年度)	<ul style="list-style-type: none"> ● ARM試作機もしくはインテルKNLにおけるノード単体で5%を超える実行効率 ● 数百ニューロンの神経回路に対する数十以上のパラメータ推定の確立 ● 触角葉・LALを含む匂い源探索を行う入力から出力までの神経回路の単純な実装と同等 (10,000ニューロン程度) 規模のリアルタイムシミュレーション ● キノコ体を含む・複数感覚統合・学習を行うシミュレーションの初期的実装とそれによる昆虫脳の知能の一部の理解 ● シミュレーションと連携した定位行動の小型ロボット実験の試行 ● 2光子顕微鏡による昆虫脳からのシミュレーション関連データの取得と並列実行を利用した神経シミュレーションパラメータオンライン推定の試行

サブ課題名 (分担機関・責任者)	調査研究・準備研究フェーズ		本格実施フェーズ	
	平成28年度	平成29年度	平成30年度	平成31年度
ボトムアップで始原的知能を理解する昆虫全脳シミュレーション (東京大学・神崎亮平)	<p>(目標)</p> <p>神経細胞レベルの確率シミュレーションを含めた計算プロファイルの評価</p> <p>触角葉のマルチコンパートメントモデルが試行される</p> <p>研究体制の発足</p>	<p>(目標)</p> <p>神経回路モデルシミュレーションの計算プロファイルの初期的な評価</p> <p>京上の10,000個の不均一な神経回路のリアルタイムシミュレーションのロードバランシングの達成</p> <p>実験的に正しい細胞モデルでフェロモン受容の時間的応答パターンを触角葉シミュレーションで再現。</p> <p>CMA-ESを拡張した進化的アルゴリズムを用いた神経回路パラメータ同定プログラムの実装</p>	<p>(目標)</p> <p>昆虫脳を対象とした可塑性をもつ高次機能モデルの初期的実装</p> <p>深化した触角葉とLALのシミュレーション</p> <p>京上における100ニューロン程度の神経回路パラメータ同定の確立</p>	<p>(目標)</p> <p>ARM試作機もしくはインテルKNLにおけるノード単体で5%を超える実行効率</p> <p>数百ニューロンの神経回路に対する数十以上のパラメータ推定の確立</p> <p>触角葉・LALを含む匂い源探索を行う入力から出力までの神経回路の単純な実装と同等 (10,000ニューロン程度) 規模のリアルタイムシミュレーション</p> <p>キノコ体を含む・複数感覚統合・学習を行うシミュレーションの初期的実装とそれによる昆虫脳の知能の一部の理解</p> <p>シミュレーションと連携した定位行動の小型ロボット実験の試行</p> <p>神経回路規模でのリアルタイムデータ同化を基礎づける2光子顕微鏡による昆虫脳からのシミュレーション関連データの取得と並列実行を利用した神経シミュレ</p>

	<p>(実施内容)</p> <p>シミュレータの開発</p> <p>昆虫脳神経回路シミュレーションの構築</p> <p>昆虫脳神経シミュレーション構築のための実験とデータ収集</p> <p>プロジェクトの総合的推進</p>	<p>(実施内容)</p> <p>シミュレータの開発</p> <p>昆虫脳神経回路シミュレーションの構築</p> <p>昆虫脳神経シミュレーション構築のための実験とデータ収集</p> <p>プロジェクトの総合的推進</p>	<p>(実施内容)</p> <p>シミュレータの開発</p> <p>昆虫脳神経回路シミュレーションの構築</p> <p>昆虫脳神経シミュレーション構築のための実験とデータ収集</p> <p>プロジェクトの総合的推進</p>	<p>ーシヨソパラメータオンライン推定の試行</p> <p>(実施内容)</p> <p>シミュレータの開発</p> <p>昆虫脳神経回路シミュレーションの構築</p> <p>昆虫脳神経シミュレーション構築のための実験とデータ収集</p> <p>プロジェクトの総合的推進</p>
--	---	---	---	--

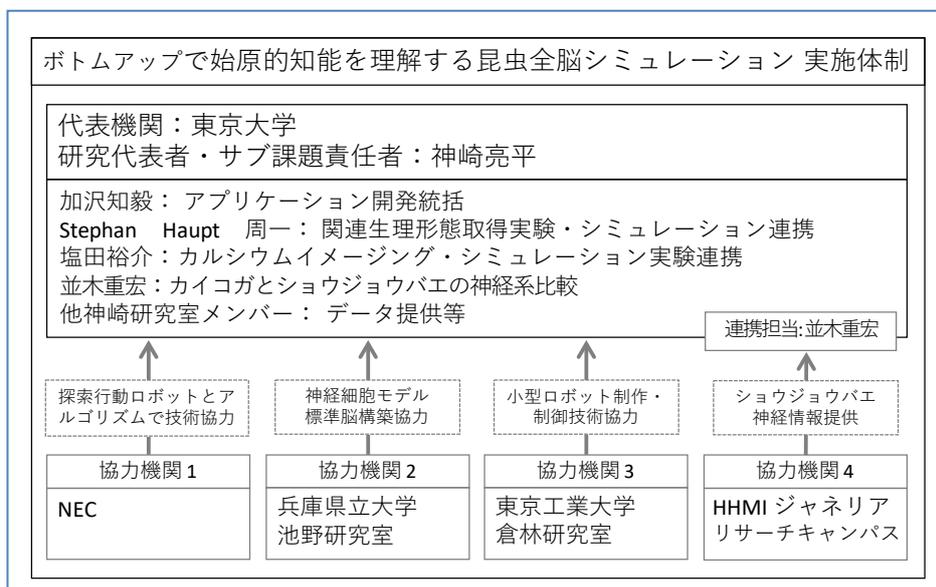
(7) 実施体制

本提案では東京大学先端科学技術研究センター神崎研究室という極度にインターディシプリナリーなグループをその代表機関、実施機関とし、複数の協力機関と技術協力を進めながら行う(右図)。神崎研究室ではカイコガに対してこれまでマルチスケールな様々な研究手法を行ってきており、行動実験・昆虫サイボーグ実験・

遺伝子操作・生理実験・データベース構築・神経細胞/回路シミュレーションなど様々な実験的・ソフトウェア的、理論的なアプローチが可能であり、実績がある。本提案では、神崎亮平が協力機関との協力を含め、そのようなマルチスケールな研究アプローチによる昆虫の始原的な知能の解明、応用、実装を統括する。そして、アプリケーション開発については、加沢知毅 (HPCI 一般利用 2012~2016 副代表) が中心研究者・副代表となって実施する。加沢はこれまでカイコガニューロンデータベースに長く関わりつつ、ISLiMやHPCI一般利用とカイコガの神経系を対象としたシミュレータの開発だけでなく文部科学省「計算科学ロードマップ(将来のHPCIシステムのあり方の調査研究)」の脳神経分野の主執筆者でもある。また、NEURON K+の中心開発者である宮本大輔(現JSPS特別研究員DC2)をグループに加える。実験に関してはシミュレーションと連携可能で生理実験、組織学双方に詳しいStephan Haupt 周一氏を中心として実施する。ショウジョウバエ等との比較神経科学的なモデリングを並木重宏氏が行う。

平成31年度の人件費は前述の加沢、Haupt、並木に加えて、実験に理解のある理論神経科学者もしくは神経理論に堪能な計算科学者を1名データ同化理論にも詳しい実験神経科学者の塩田を雇用する予定である。また、その他、データ提供・実験補助、プログラム開発補助などで非常勤メンバーを雇用する。

協力機関である理化学研究所BSIの山口陽子グループとはこれまでも神経情報のデータベース化に関する国際的な枠組み(INCF/NIJC等)や脳・神経情報処理についてのハッカソンの実施(<http://www.neuroinf.jp/hackathon2016>)で協力をおこなっているが、本プロジェクトではデータベースからのスムーズなデータ解析や、神経画像処理技術で協力する。また、兵庫県立大学池野英利グループとはISLiM時からの継続的な協力関係で



あり、標準脳技術等で協力する。ハワードヒューズ医学研究所ジェネリアリサーチキャンパスとは並木重宏（東大特任講師・HHMI ジェネリアコンサルタントを併任）を通してデータ入手をする。また、東京工業大学倉林大輔研究室とは小型ロボット制作・制御技術で協力をを行う。NECとは探索ロボットの実装とアルゴリズム開発について協力をを行う。

(8) 必要計算資源

「京」の計算資源量

(単位：ノード時間/年)

H28 年度	H29 年度	H30 年度	H31 年度
75万ノード時間	90万ノード時間	90万ノード時間	30万ノード時間

「京」以外の計算資源量

(単位：ノード時間/年)

H28 年度	H29 年度	H30 年度	H31 年度
0	0	0	3万5千ノード時間

2. 採択時の留意事項への対応状況

1) 観測・測定等の実験研究者との連携体制を明確にすること

そもそも、本課題は実験研究者を多く含み、連携というより融合を図ろうとする体制だが、研究室内の昆虫実験者を含む場で週1の研究室セミナーや月一の連携会議などをおこなって十分な連携を図っている。

2) 産学連携による波及効果についても検討を行うこと

2016年11月現在昆虫の脳内情報処理の応用に関連して企業から研究協力の打診があり、検討している。ロボットの応用関連では本格研究時に改めて検討を行う予定である。

3. 中間評価における指摘事項への対応状況

- (1) 課題全体として達成すべき成果を明確にするとともに、その成果実現に向けた定量的・定性的な目標（年間目標及び最終目標）を明確にすること。

本格期間やポスト京運用後の目標をより具体的な表現にした。

- (2) 計算科学技術分野における研究開発の論文数、学会発表数は、事業の成果を議論する上で1つの指標となりうるため、分野の特性、体制を考慮の上、論文、学会発表を通じて十分に成果を発信するような計画とすること。

計画立ち上げの体制づくりに労力を要しているが、より論文や学会発表を積極的に行えるように運営を行う。

- (3) 予備計算などを通じて、サイエンス、エンジニアリング的な目標を明確にすること。その目標に対して、ポスト「京」でいつまでに何をどこまで明らかにすることを目指すのかを明確にすること。その時点でポスト「京」で初めてできる画期的な利活用について具体的に説明すること。

「京」でできていること、ポスト「京」でなければできないことの部分に予備計算の概要を追加した。

4. 修正履歴

- 2016 11/30 第一版を作成
2016 12/21 第一版を微小に語句修正
2017 5 予算変更に伴い訂正版を提出
2017 12/26 中間評価にもとづき第二版を作成
2018 1/22 17/06 版と 17/12 版との履歴を付加。
2019 2/7 2018 年度報告会を元に変更
2019 2/25 文科との協議のもとに再変更
2019 3/6 文科との協議のもとに再変更

様式第21

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「思考を実現する神経回路機構の解明と人工知能への応用」（ボトムアップで始原的知能を理解する昆虫全脳シミュレーション）

機関名 東京大学国立大学法人 東京大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Adapting CMA-ES for the Massively Parallelized Simulation of Neurons and Neural Circuits ポスター	<u>Kazawa T.</u> , Fukuda T, Goto A, Miyamoto D, Haupt SS, and Kanzaki R.	Phuket (International Conference on Advances in Intelligent Systems, Computing and Internet of Things)	2019年9月 22-23日	国外
Insect Behavior as High-Sensitive Olfactory Sensor for Robotic Odor Tracking ポスター	Junji Horibe, Noriyasu Ando, Ryohei Kanzaki	奈良 (Living Machines 2019)	2019年6月9- 12日	国内
Multi-photon fluorescence detection of organic dyes with different excitation spectra using a fixed wavelength fiber laser. ポスター	遠藤 功司, 横川 翔子, Haupt Stephan 周一, 加沢 知毅, 金 磊, Set Sze Y, 山下 真司, 神 崎 亮平	東京 (第19回東京大学生命科学シンポジウム)	(2019年4月20日 東京大学	国内

Direction-selective motion detection simulation of the optic lobe using Drosophila Connectome ポスター	Hayashi M, Tsunoda H, <u>Kazawa T</u> and Kanzaki R	東京（日本比較生理科学会第41回東京大会）	2019年11月30日-12月1日	国内
Fixed wavelength fiber laser multi-photon excitation of organic dyes. ポスター	Endo K, Yokokawa S, Haupt SS, Lei Jin L, <u>Kazawa T</u> , S Set SY, Yamashita S, Kanzaki R.	東京（日本比較生理科学会第41回東京大会）	2019年11月30日-12月1日	国内
Realistic neuronal models for the olfactory neural network of Bombyx mori. ポスター	Lee H, Haupt SS, <u>Kazawa T</u> , Kanzaki R.	東京（日本比較生理科学会第41回東京大会）	2019年11月30日-12月1日	国内
The simulation of insect olfactory system using the biophysically detailed model with Spike-timing-dependent plasticity. ポスター	Sakai B, Arase K, <u>Kazawa T</u> , Kanzaki R.	東京（日本比較生理科学会第41回東京大会）	2019年11月30日-12月1日	国内
A paradigm for taste discrimination in the honeybee. ポスター	Xing Q, <u>Kazawa T</u> , Kanzaki R, Haupt SS	東京（日本比較生理科学会第41回東京大会）	2019年11月30日-12月1日 東京大学	国内
昆虫脳神経形態を基盤としたデータベースの構築 口頭	加沢知毅	東京(令和2年電気学会全国大会)	2020年3月11日～13日	国内

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Adapting CMA-ES for the Massively Parallelized Simulation of Neurons and Neural Circuits	Kazawa T , Fukuda T, Goto A, Miyamoto D, Haupt SS, and Kanzaki R.	DEStech Transactions on Engineering and Technology Research, 2019, amsms, pp. 104-114	2019/11	国外
新技術がつくりだす昆虫脳匂い情報処理研究.	加沢知毅	アロマリサーチ 20(04), 16-23	2019/12	国内
Morphology and physiology of olfactory neurons in the lateral protocerebrum of the silkworm Bombyx mori.	Shigehiro Namiki, Ryohei Kanzaki.	Scientific reports 9(1) 16604 - 16604	2019/11	国外
Insect Behavior as High-Sensitive Olfactory Sensor for Robotic Odor Tracking	Horibe J, Ando N and Kanzaki R.	Biomimetic and Biohybrid Systems. Living Machines 2019. Lecture Notes in Computer Science, vol 11556. Springer, Cham	2019/7	国内

(別紙1) 実施機関一覧

	実施機関	備考
	東京大学	代表機関(課題責任者)
	理化学研究所	協力機関
	兵庫県立大学	協力機関
	東京工業大学	協力機関
	ハワードヒューズ医学研究所(HHMI)ジェネリアリサーチキャンパス	協力機関