平成30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）

平成３０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
成果報告書

令和元年 5 月 31 日
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平成30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.平成 30 年度（報告年度）の実施内容 2
　４－１.実施計画 2
　４－２.実施内容（成果） 2
　４－３.活動（研究会等） １４
　４－４.実施体制 １４

　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（62 歳） ※2019 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	財務企画チーム財務企画担当	役職	係長
		連絡先	Tel.　03-5452-5390	Fax.	03-5452-5398
			E-mail　zaimu@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呼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ー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.平成 30 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

イオンチャネルモデルでのチューニングの自動化を進め発表されている昆虫神経細胞モデルを含めて数個以上の神経回路シミュレーション用のチューニングを行う。ポスト京のARM環境を想定した開発を行い、その特性を評価する。昆虫神経回路シミュレーションにstochasticなイオンチャネルモデルを導入する。回路レベルのparameter同定の開発をさらに進めオンラインデータ同化を行うための試験的な開発も行う。

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マルチコンパートメントモデルシミュレーションにおいてはCMA-ESによるデータ同化をSTDPによる学習実験の両方を行い、これらの比較や統合を図る。視覚系情報処理のシミュレーションを構築する。キノコ体か中心複合体を含む高次機能神経回路シミュレーションを試行する。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光子顕微鏡の構築によって触角葉以外の脳深部のカルシウムイメージングが可能な系を確立する。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。イオンチャネル分布等を調べるための組織学もしくはイメージング実験を行う。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。

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。HFSP “Odor-background segregation and source localization using fast olfactory processing”と緊密な連携を図る。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）

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

本課題はポスト京環境で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行っている適応的・知能的な行動から神経系の知能を理解・再現するための研究開発である。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いわれるが、それに比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。また、単一シナプスあたりのシナプスボタンの数も人間では10000個オーダーだが、昆虫では10－100個程度であり、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、大規模生物物理学詳細シミュレーションの一般的なスキーム（膜電位変化に関わる物理現象を疑一次元的にコンパートメントごとに計算して、それよりゆっくりとしたシナプス伝達をMPI通信で行う）にのっとれば、計算量と通信量を考えたときに京の延長線上にあるようなアーキテクチャーにおいては人間脳に比べて昆虫脳では効率的に計算資源を生かしつつリアルタイムシミュレーショ

表１　三つの脳シミュレーションの計算規模（計算科学ロードマップ 2013）

項目	詳細なモデルを用いた人の全脳規模の神経回路シミ	単純なモデルを用いた人の全脳規模の神経回路シミ	カイコガ全脳の神経回路のリアルタイムシミュレーション
細胞数	10^{11}	10^{11}	10^{6}
コンパートメント数	5000	1	10000
シナプス数/細胞	10000	10000	500
リアルタイムシミュレーション必要 FLOPS			
細胞	３ x 10^{21}	5x10^{15}	7.2x10^{16}
シナプス	５ x 10^{19}	1.1x10^{16}	5x10^{13}
可塑性	6.5x10^{17}	6.5x10^{17}	6.5x10^{10}
データ量（byte）			
細胞	1.6x10^{17}	2.4x10^{12}	2x10^{12}
シナプス	4.8x10^{16}	2.4x10^{16}	2.4x10^{10}
可塑性	3.2x10^{16}	3.2x10^{16}	1.6x10^{10}
BAND 幅 (byte / step * CELL)			
双方向	1.28x10^{6}	349	1.02x10^{6}
ロード	8x10^{5}	32	9.6 x10^{5}
FLOP/STEP	3x10^{6}	666	3.6 x 10^{6}
B/F	1.1	1.1	0.83
キャッシュ活用時			
キャッシュ必要量(byte)/チップ	10^{6}		10^{6}
B/F（主記憶）	0.11	-	0.041
ネットワーク B/F (全系通信として評価)	5.3 x10^{-5} (5.3x10^{-9})	2.5x10^{-1} (2.5x10^{-5})	1.1 x 10^{-6} （2.2 x 10^{-9}）

ンを行うことができると考えられる（表1）。本研究の柱の一つはそのような想定のもとにポスト京を十分に活用できるようにシミュレーションアプリケーションを熟成させることである（開発項目a）。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呼ばれる様々な特性を網羅している（図1）。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考えられる。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。そのために、昆虫脳の神経ネットワークを実データを取り入れて再現して、感覚情報処理・行動決定・そして高次機能までを再現していくことが本プロジェクトの二つ目の柱である（開発項目ｂ）。三つ目としてはそれを可能にするように実験系での実験を行い、昆

虫全脳シミュレーションという視点から必要になる系を構築して、生物実験データを取得し、世界的なデータベースと連携し、さらにはシミュレーションと実験の深い連携を試行する。それが三つ目の柱である（開発項目c）。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。

図１　昆虫の様々な知能的行動

前年度までにaにおいては、1)データベースからショウジョウバエ全脳ベンチマーク回路を構築してロードバランシングの改善、2)イオンチャンネルモデルの幅を広げたチューニングの実行、3)mp-LM-CMA-ESを用いたソルバーの構築、4)stochaticシミュレーションの試験実装をも進めてきた。bにおいては5)触角葉神経回路の構築を進め、6)LAL＝VPCを想定した運動パターン生成の試験構築、7)視覚情報処理の一部の回路構築などを進めてきた。

またcにおいては8)形態的なカイコガ・ショウジョウバエミツバチの神経系の比較と解析を行いながら、9)行動実験と生理実験の同時計測系や10)２光子顕微鏡の構築。11)ミツバチの行動実験系の構築などを進めてきた。

本年度については**シミュレータの開発**部分としては主に単一細胞レベルの開発に注力し、2017年度に構築したイオンチャネルモデル計算自動チューニングシステムの評価と開発を進め、ポスト京環境を想定してKNL環境で開発を行いチューニングを行った。細胞モデルの縮約と分散計算スキームを整備した。stochasticモデルについても評価を進めた。

昆虫脳神経回路シミュレーションの構築としては触角葉においてSTDPによる学習実験を試行した。結果、予想どおりに異なる匂い情報の入力に対して情報処理経路の分離に伴う結合変化が一部観察できた。CMA-ESによる回路パラメータ同定を行ったが現状ではあまり解が収束しておらずさらなる開発を進める。視覚系についてはショウジョウバエのコネクトームの情報を主な基盤として動き検知系の一部の回路構築を行ったところ、ショウジョウバエ視覚受容野の性質をかなり再現できた。

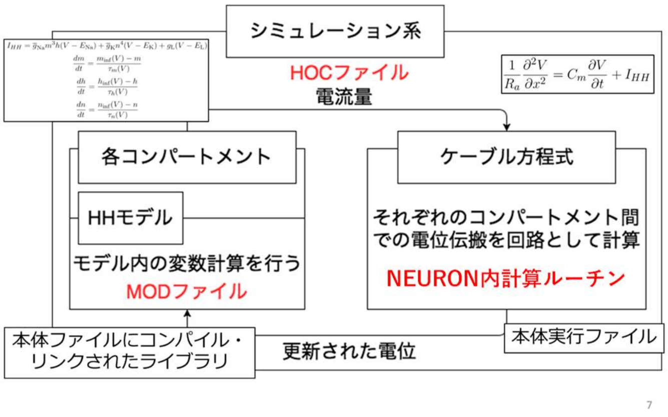


図２ NEURON シミュレータの構成

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は、２光子顕微鏡の光学系を再構築して対物レンズ下で1030-1060nmのファイバーパルスレーザーによる２光子励

起を引き起こすことに成功した。カイコガ匂い探索行動の能動的な面を調べるために匂いのサンプリングのタイミングを制御できるロボット上で匂い源探索行動を行う系を構築試行し、データ収集を開始した。ガ類、ハエ類、ハチなどいくつかの神経系の比較を行い、カイコガ脳においての対応を調べた。スパイク発生器などイオンチャネル分布によって起こる細胞内動態が観察できる触角葉局所介在神経の一部がラベルされるGAL4-UAS系統の作出に成功した。ミツバチの水を報酬としたオリエンテーションの学習系の初期的な構築を行った。

またJ-node hackathonのINCF日本ノードとの共催、日本神経科学会での脳シミュレーションオーガナイズドセッションへの参加、NECとの共同研究など積極的に発表・交流を行った。項目ごとの詳細は以下に記す。

a) シミュレータの開発

神経細胞・回路を表現する数理モデルの抽象度には様々なものがあり、対象とする現象

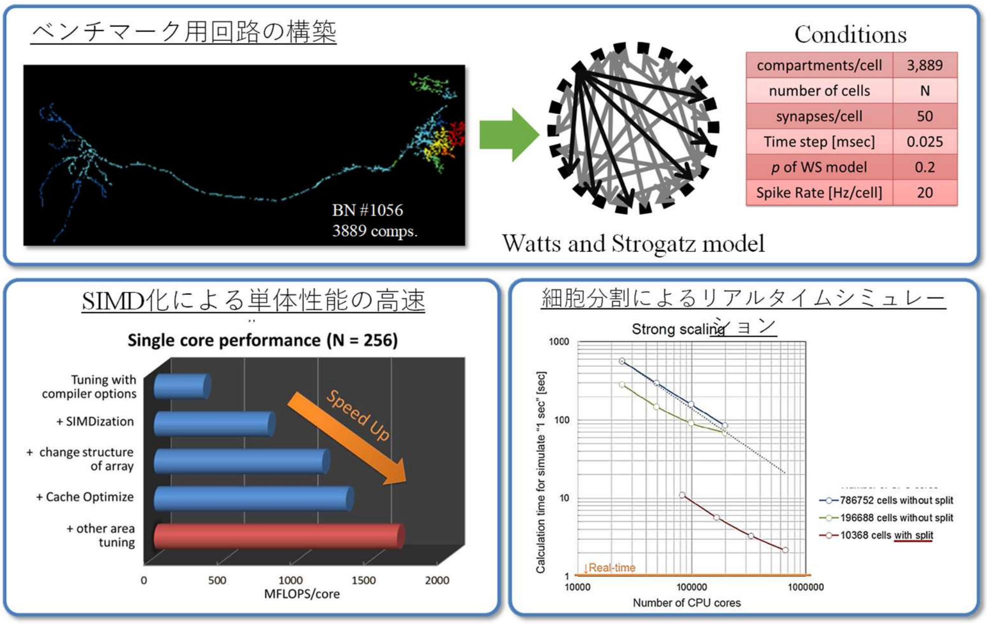


図３　NEURON　K+チューニングと京上のベンチマーク回路によるスケーリング

により多くの選択肢が存在している。一般に神経細胞の形態とその機能には多くの関係があるといわれているが、特に昆虫においては、哺乳類などに比べ神経細胞の数が少なく、それは逆に一つ一つの神経細胞の果たす役割が、より複雑で高度であるからだと考えられる。その根拠の一つとして、昆虫において一つ一つの神経細胞の役割が大きい identified neuron と呼ばれる個々に識別可能であり、多くの場合巨大で特有の形態をもつ神経が多く存在していることがあげられる。これには、ミツバチの匂い味連合学習の報酬細胞であると推定されているオクトパミン性細胞のVUMmx-1、コオロギで発見された風向きを脳に知らせるGiant Interneurons（GIs）などが知られている。同様にカイコガにおいては、匂い源探索行動と同期してステアリング信号を出すといわれるG1-G2下降性神経が存在している。このような状況から、我々は、細胞内の電位伝播による信号の遅れや樹状突起中の局所的な相互作用といったより詳細な情報処理に伴う物理現象を記述できる、細胞を疑一次元のツリー構造とみなし、コンパートメント毎に電位等に対応するイオンチャネルのダイナミクスを計算し、ツリー構造を電気的なケーブルとみなすことで統合して計算を行う、マルチコンパートメントHodgkin-Huxleyモデルを採用した。

神経科学分野では有名なNEURONシミュレータが分野ではよく使われている。NEUR

ONシミュレータは1990年ごろに電気回路シミュレータのCABLEに、化学反応モデル言語系MODLをイオンチャネル向けに追加拡張したものであるNMODLを組み合わせることによって、神経細胞内の電位変化を生物物理学的詳細モデルによって計算を行う（図2）単一ニューロン神経シミュレータとして構築された。しかし、その後多くの拡張がされ、特に2005年よりBlue Brain Projectが始まって以来いくつかの並列化実装が試みられて以来次第に並列向けになってきたNEURONは我々の目的に適していると考えた。

我々はこのNEURONを「京」コンピュータの大規模並列向けにチューニングし、OpenMPの各所に対する適用とコア部分のイオンチャネルダイナミクス計算部分にはメモリ構造やキャッシュを意識した各種チューニングを施している（NEURON K+;図3）また、我々は神経活動の非線形で複雑な活動の未知パラメータに対しての推定機としてCMA-ESを使った推定機をも実装している（図4）。本プロジェクトにおいてはこれまで、ショウジョウバエ全脳モデルシミュレーション（図5）とした対象にロードバランシングの改善やイオンチャネルモデル計算の自動チューニングシステムの開発、CMA-ESを使用した推定機を回路レベルに適用する研究開発、またより大きな計算力の活用として個々の分子機構のダイナミクスの個別性からくる揺らぎをも記述するstochasticモデルシミュレーションの開発をも行ってきた。

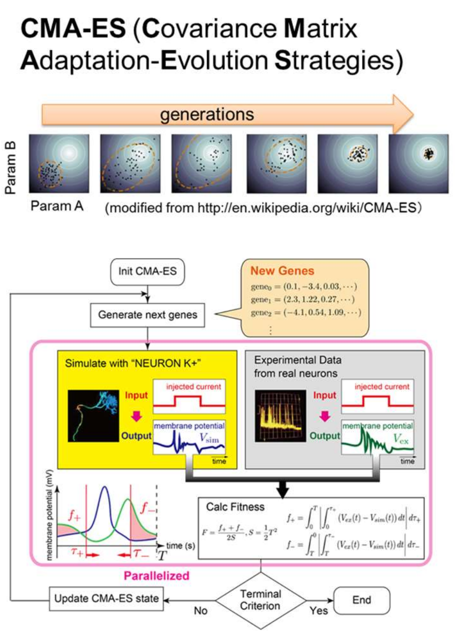


図 4　CMA−ES を使った推定機

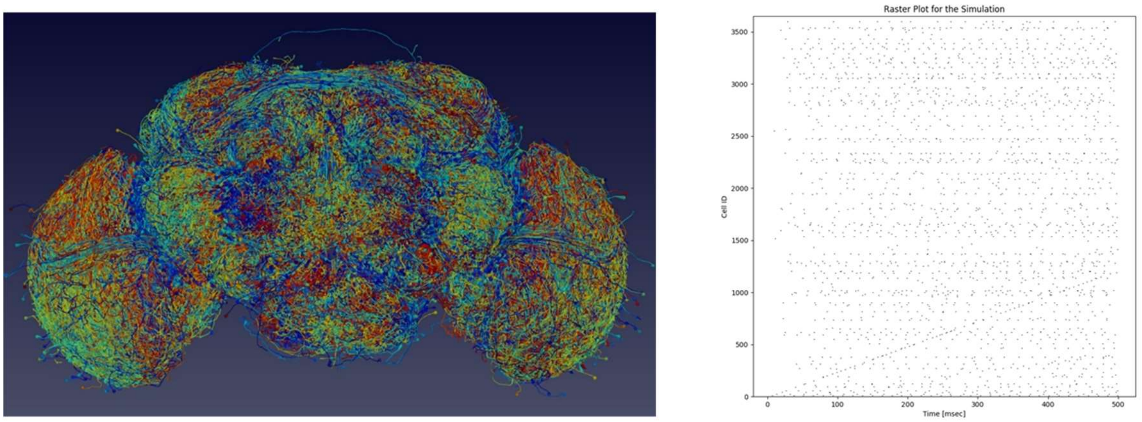


図 5　ショウジョウバエメス全種神経（12,393 ニューロン）からなるベンチマークモデルとその発火例

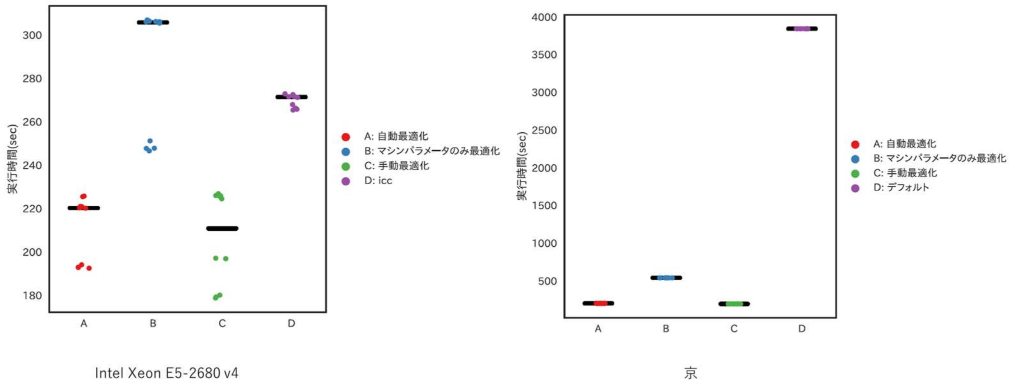


図 6　イオンチャネルモデル計算の自動チューニングシステムの評価

今年度において、構築したイオンチャネルモデル計算の自動チューニングシステムの評価と開発を進め、変数のメモリ配置、スレッド／プロセス数の組み合わせ、SIMD化ディレクティブの位置、などについてその組み合わせを全探索することでチューニングを行った。Hodgkin-Huxleyモデルではインテル上ではICCの自動コンパイルオプションによる結果より高速で過去の手動チューニングとそん色のない結果を確認した。京上でもコンパイルオプションのみの結果よりはるかに勝り、過去の手動チューニングにほぼかわらない結果を出した（図6）。また、ポスト京環境を想定してKNL環境で開発を行い均等神経ベンチマークモデル（図3）でのICC仕様環境下で512bitSIMD対応のベクトル化で数パーセントの性能向上、さらに膜電位等一部変数の単精度実数化によっても数パーセント程度の高速化を確認した。イオンチャネルのstochasticモデルを拡散近似（DA）として実装して決定論的モデルを同じパラメータでstochasticモデルに変換すると、細胞の電流―応答特性がなだらかになり、確率的に入力電流の表現の幅が広がることを確認した（図7）。このことは電流注入実験からイオンチャネルを再構成して回路としての働きを再現するときに差異をもたらす可能性があり、重要な発見である。ポスト京上で一万細胞以上のリアルタイムシミュレーションを想定したときに、複雑な一部の細胞構造の縮約（図8左）と細胞分割（Spilit）を行うことでボトルネック部分の計算量を削減し、ノード間のロードバランシングを向上の結果、ショウジョウバエメスの不均一細胞系による全脳規模シミュレーションにおいて10倍の高速化ができることを実証した（図8右）。

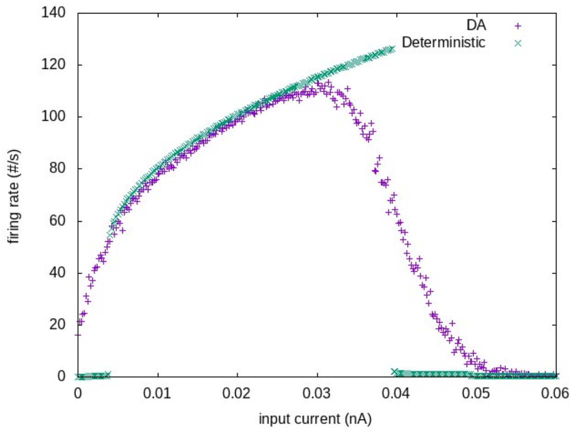


図 7　Stochastic モデルと決定論的モデルの細胞の電流応答モデルの比較

またイオンチャネルのパラメータ同定を触角葉出力神経・局所介在神経、キノコ体kenyon cellなどいくつかのイオンチャネルモデルで行い、これらの挙動の大部分は２種類のKチャネル・１種類のNaチャネルの速度モデルモデルを適用することで説明できた。これらは神経細胞のオンラインデータ同化の最

初のスキームを組む場合の基礎となる。

b）昆虫脳神経回路シミュレーションの構築

本項目は様々なデータを用いて昆虫脳全体・もしくはその一部を対象としてのシミュレーション構築とそのためのソフトウェア的な開発を行うものである。

我々はこれまで形態・生理データを用いたシミュレーションのための神経形態抽出や、三次元的な形態分類・標準脳マッピングなどを開発し、標準脳座標系にカイコガ神経データベース（BoND；図 9）に登録された神経形態をマッピングす

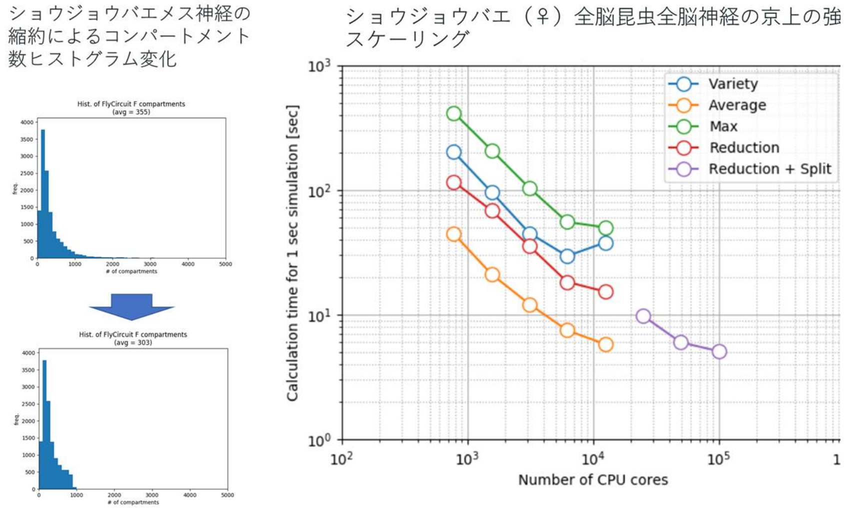


図８　細胞縮約によるショウジョウバエ全脳規模シミュレーションの高速化　左：複雑な細胞を形態縮約したときのコンパートメント数分布の変化　右；細胞のコンパートメント数を変えたときの強スケーリング　Variety:本来の細胞形態データを用いた結果
Average:平均のコンパートメント数の単一細胞形態を用いた結果
Max:最大のコンパートメント数の単一細胞形態を用いた結果
Reduction：左図の細胞縮約を行ったときの結果 Reduction+split:さらに 1 細胞の計算をノード間に負荷分散したときの結果

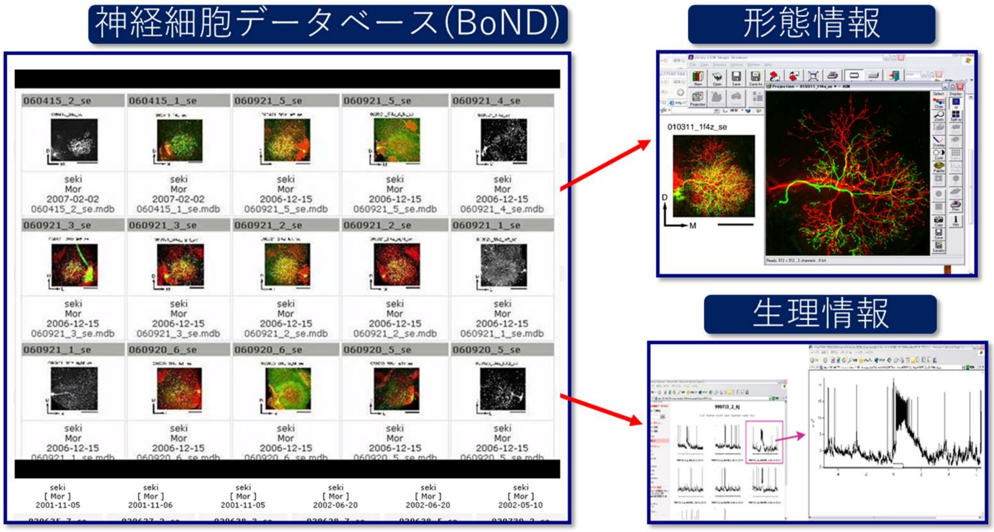


図 9　神経細胞データベース BoND　約 1600 の神経生理・形態データが格納されており、一部はCNS－PF(https://cns.neuroinf.jp/)から公開

ることが可能になっている（図 10)。また CMA-ES を用いた推定機やその他フィッティング手法によってカイコガ単一神経のイオンチャネルダイナミクスを含む様々なパラメータ推定を行っていた。本プロジェクトにおいては触角葉においては実験・論文データをよく使ってボトムアップでシミュレー

ションを構築し、また行動パターン生成回路であると思われる LAL-VPC に対して CMA-ES を用いた推定機を使ってその匂いに対して左右交代的な運動指令を生成する回路を構築試行してきた。

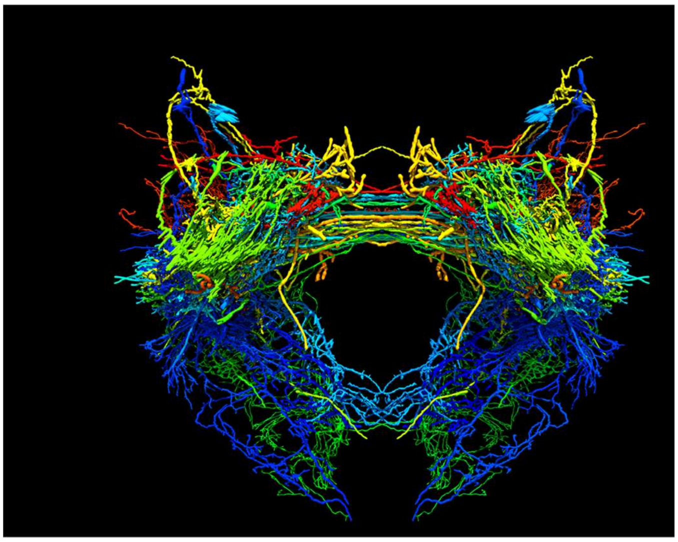


図 10 標準脳マッピングされたカイコガ LAL-VPC 構成細胞

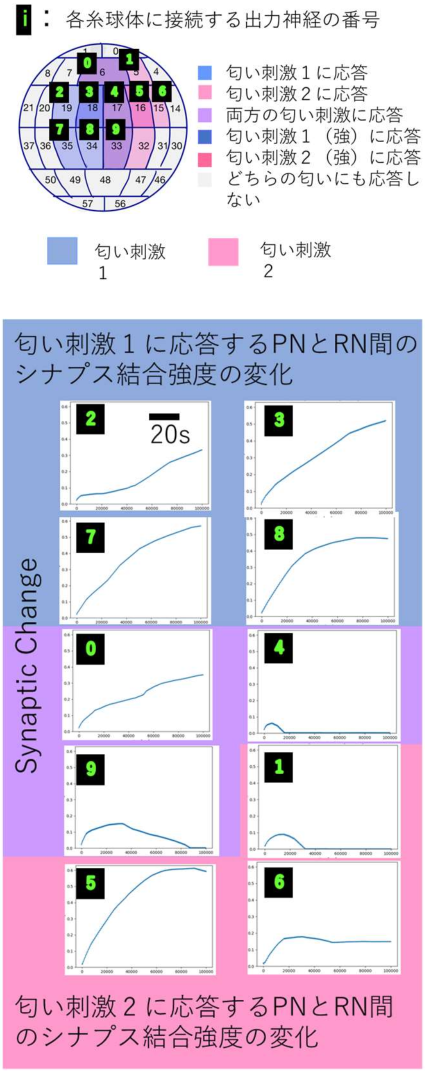


図 11　２種類の匂いの交互刺激シミュレーションによる RN-PN シナプス強度の変化

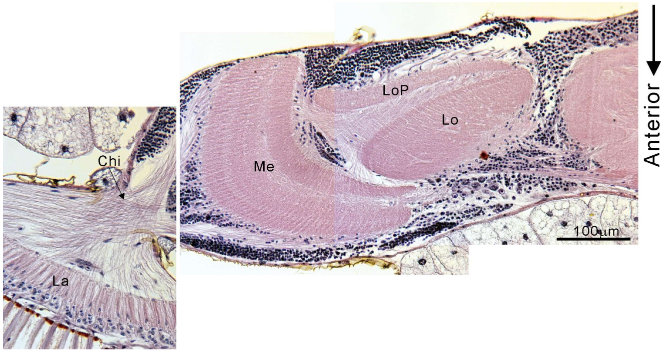


図　12　ルリキンバエ成虫の視葉の水平切片（ヘマトキシリン・エオシン染色像）。視葉はラミナ（Lamina: La）、メダラ（Medulla: Me）、ロビュラ（Lobula: Lo）、ロビュラプレート（Loubula plate: LoP）から構成される。　IVB-PF より引用

本年度においては触角葉シミュレーションにおいては受容体細胞（RN）と出力神経（PN）の間に STDP（Spike−Timing−Dependent Plasticity:スパイクタイミング依存可塑性）による可塑性を準備的に設定して、２種類の一般臭で交互に繰り返して匂い刺激を行った場合のネットワークの変化を調べた。結果、匂いの選別性の高い糸球体では RN-PN の結合が強化されるが両方の匂いに対して入力をうける糸球体ではむしろ結合が弱化される傾向があることが示唆された（図 11)。すなわち教師なしの可塑性によって匂い情報処理経路の分離が起こっている様子が観察できた。なお、この触角葉シミュレーションにおいて CMA-ES による回路パラメータ同定を行っているが、現状ではあまり解が収束しておらずさらなる開発を進める。キノコ体を含む高次機能神経回路シミュレ

ーションについては、試験実装として、リカレントな神経回路の一部と感覚入力を報酬と STDP によって関連づけて、感覚入力パターンを特定の部位の神経活動に変換する回路のシミュレーションはすでに動作しているが、さらにより詳細な生物物理学詳細モデルとして構築を行っており、キノコ体への入力細胞までの詳細モデルの構築まで実装した。その先のキノコ体 kenyon 細胞については詳細化を現在行っているところである。

また、視覚系情報処理のシミュレーションとして入力から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した。具体的にはハエの情報をもとに視葉（図12）の再構成としてLaminaからLobula plateへの出力までの明中心物体の移動検出回路のシミュレーションモデルを構築した。

細胞種ごとに10×10の100個(物体刺激では20×20の400個)の神経細胞が存在するとし、その隣接関係は複眼の構造に対応しているとして六角座標系のようになっている。

細胞のシナプス結合には、電子顕微鏡写真に基づくシナプス結合数の算定値のデータを用いた。各細胞間のシナプス結合は以下の数式に基づく。

$$\mathbf{i(t)} = \boldsymbol{g(t-\tau)(V_{post}(t) - V_{pre})} \times \boldsymbol{N_{syn}} \quad (1)$$

$$\mathbf{g(t)} = \{\mathbf{max}\ (\boldsymbol{g_{sat}k(V_{pre}(t) - V_{th})n}\ (\boldsymbol{if}\ \boldsymbol{V_{pre}(t) > V_{th}}),\ \mathbf{0}\ (\boldsymbol{otherwise})\} \quad (2)$$

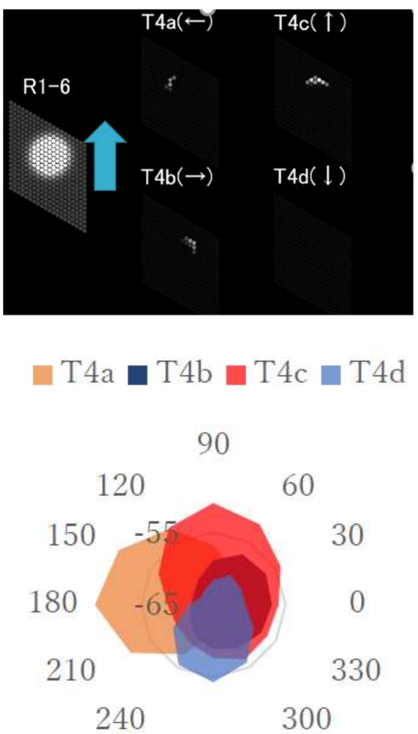


図 13　シミュレーションで得られた方向視覚刺激に対する４つの方向先端性細胞に対する応答　上図は上方向移動物体に対する各応答細胞の応答　下図は４種類の方向選択細胞の方向選択性

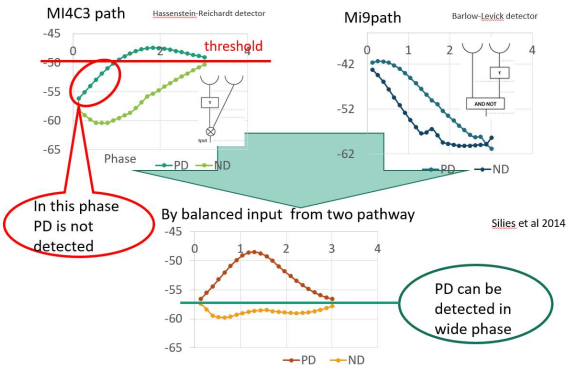


図 14　二つの動き感知経路の統合による効果

各細胞間結合のN_{syn}は、Takemuraら.の2013、2015、2017 の文献に基づく。またV_{pre}はDavis et al. 2018を参考に結合の興奮性抑制性を加味して定め、時間遅れτはTschopp et al. 2018を参考に定めた。それ以外のパラメータは基本的にはシミュレーションにおいてネットワークが飽和しないように決めた。Medullaにおける経路を統合するためにkを調節したが、これについては後に述べる。

動き刺激を与えた際、動く方向のエッジが検出され、Lobula Plateの４種類のT4細胞が選択的に強く応答する方向と、あまり応答しない方向が存在する。それぞれPreferred Direction(PD)とNull Direction(ND)と呼ばれ、先行研究からT4a、b、c、dのPDはそれぞれ180度、0度、90度、270度であり、NDはその逆方向となる。最大電位差指標はPDとNDでの刺激時最大電位値の差で算出され、先行研究で判明している方向へ

の方向選択性を評価ための指標として用いた。シミュレーション結果はこの実験結果を定性的に再現した（図13)。

Medulla の抑制経路は大別して Mi9 経路と Mi4、C3 経路の二つの経路が存在する。この二つには別の時間的特性があり、この二つを k の値を調節して上手く組み合わせることで一定の閾値をもつことに設定した T4 細胞が広い時間域に応答特性を広げることが分かった（図 14)。2 種の抑制経路の重み付けのバランスが良い場合には、様々な一定の速度下で様々な空間周波数の刺激に対して ND 刺激を誤伝達せず、PD 刺激をして伝達することができることを意味すると考えられる。

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

本項目は昆虫脳神経シミュレーションの構築・検証のためのデータ収集、またシミュレーションと実験を連携させるための実験よりのシステム開発を行うものである。研究代表者グループはこれまでに、一貫してモデル生物であるカイコガ（Bombyx mori）のオスを対象とし、メスの性フェロモン受容から匂い源探索行動発現に至る神経・行動メカニズムを、分子遺伝学、神経生理学、組織学、光生理学、行動学、そしてロボット工学などの分野横断的な分析・統合手法を用いて行ってきた（図15)。フェロモン受容から匂い源探索運動の行動指令までの神経回路をほぼ同定し（図16)、匂い刺激と単一細胞記録による大量の神経細胞の三次元形態や生理情報のデータベース化を行い（図 9)、1600 個程度の匂い応答細胞の形態・生理を登録・保管している。触角葉では局所ローカルエレクトロポレーションによって数十個の細胞を生きたまま染色する技術を開発しており、複数細胞の応答の同時記録が可能になっている。また、GAL4 系統を開発しつつ、いくつかの UAS 系統を導入しており、現在でもレセプター部位でのカルシウム受容タンパクの GCaMP6 導入や光によって神活動を誘発できる ChR2 タンパクの導入などが可能である。

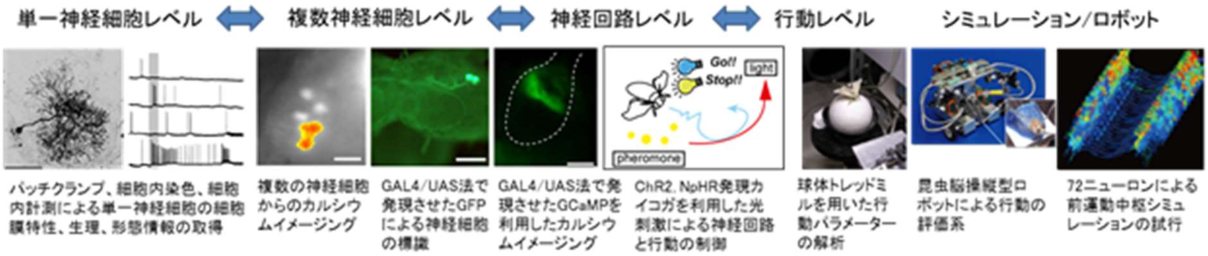


図 15　分野横断的な分析・統合手法による研究

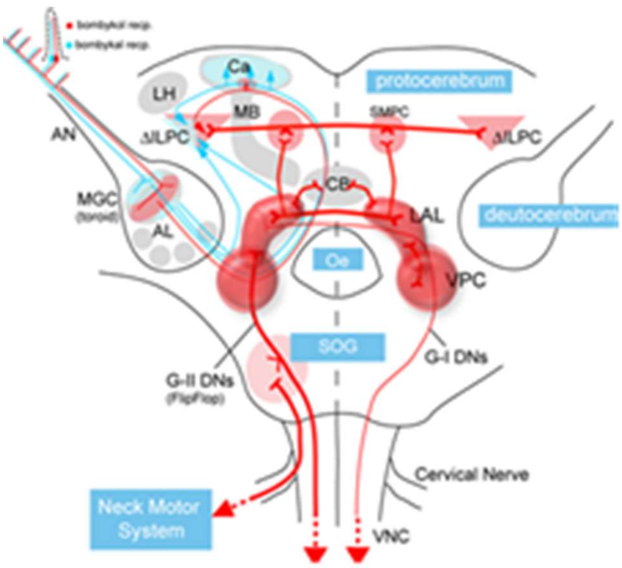
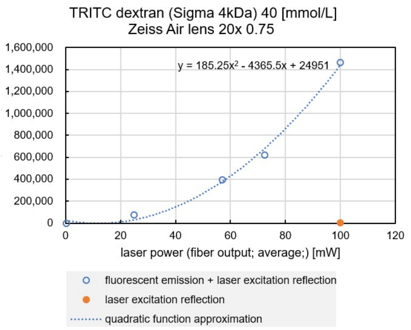


図 16　カイコガのフェロモン情報経路　触角で受容された匂い情報は一次中枢である触角葉（AL）から、記憶学習領域（MB)、前大脳（ΔILPC）を介して、前運動中枢（LAL/VPC）を介して胸部神経節の運動指令系に伝達される

本プロジェクトにおいてはショウジョウバ

エとカイコガ、ミツバチとカイコガでほぼ同様の identified neuron があることを見出し、それらの多感覚に対する情報処理系を調べながら、神経回路シミュレーションの結果を実験とより直接的につなぐための、２光子顕微鏡による計測系の開発や行動実験と生理計測の同時測定系の開発、高次機能についてのよい実験系をつくるためのミツバチの行動実験系の構築などを進めてきた。以下本年度の進展について述べる。



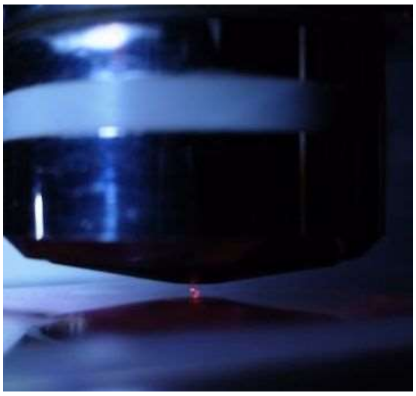


図 17　２光子励起の確認
上図：照射光量に対する非線形的な蛍光　下図：照射光の収束による蛍光

シミュレーションと協調してデータ同化を行う２光子顕微鏡を用いた観察系を構築しているが、試作した光学系を再構築して対物レンズ下で 1030-1060nm のファイバーパルスレーザーによって可視光で励起される蛍光色素の蛍光を確認し、励起光出力に協同的に蛍光が増加することにより２光子励起を引き起こしていることを確認した（図 17）。我々はすでに、この波長で励起可能なカルシウム感受性蛍光色素である Cal590 のカイコガ神経系への染色に成功しており、これでカイコガ脳深部のカルシウムイメージングが可能になったといえる。カイコガ匂い探索行動の能動的な面を調べるために匂いのサンプリングのタイミングを制御できるロボット上で匂い源探索行動を行う系を構築試行し、データ収集を開始した。生理計測と制御・シミュレーションとの仲立ちをリアルタイムデータ同化をみすえて行うために Beagleborn を用いたシステム構築を試行した。Beagleborn は Raspberry Pi や Arduino などと対比される小型マイコンだが、Linux 上での複数コア上での並行プロセスの実行と、PRU（Programmable Real-Time Unit）による I/O に対する高速なリアルタイム処理が可能な特徴をもっている。現在までは主に出力系のソフトウェアスタックを実装しており、5MHz 程度でアクチュエータのドライブ信号を出力できることを確認している。昆虫イオンチャネル分布を調べる組織学実験としてスパイク発生器などイオンチャネル分布によって起こる細胞内動態が観察できる触角葉局所介在神経の一部がラベルされる GAL4-UAS 系統の作出に成功した（図 18 左)。またガ類、ハエ類、ハチなどいくつかの神経系の比較を行った。行動指令の下降性神経のカイコガに対応するものがショウジョウバエにも存在することなどを見出した。ミツバチで報酬ニューロンだと推定されている VUM ニューロンのカイコガの対応神経を発見した（図 18 右)。昆虫探索行動に対する形態データとして、微小電極法を用い、カイコガにおいて、感覚系から前運動中枢へ至る視覚情報経路の分析を行った。Medulla からの投射神経は脳後方の後傾斜（Posterior slope）へ終末していた。一方 Lobula からの投射神経は後傾斜に加えて LAL への直接投射をもつことが分かった。風感覚を介在すると思われる AMMC と触角葉をつなぐニューロンを標識した（図 18 中央)。学習を評価可能な実験系としてミツバチの水を報酬としたオリエンテーションの学習系の初期的な構築を行い、ミツバチの一部が水によって吻伸展反射を引き起こし、採餌（採水）行動において水場を状況によって変化させている様を確認した。これらのことから定性的ではあるが、ミツバチが水のみによって学習する系は構築できた。

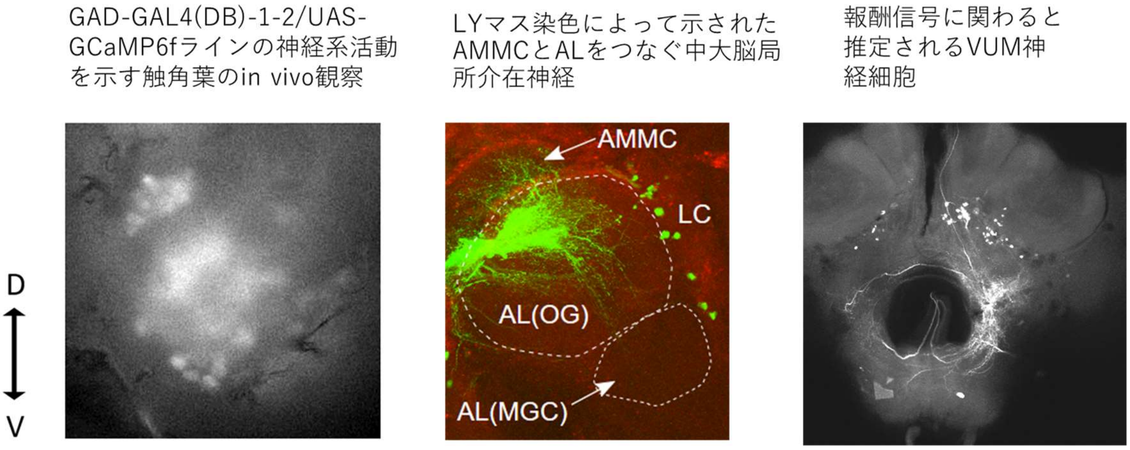


図 18　カイコガ神経系のラベリング

②　プロジェクトの総合的推進

J-node hackathon の INCF 日本ノードとの共催、日本神経科学会での脳シミュレーションオーガナイズドセッションへの参加など積極的に発表・交流を行った。産業界との交流として本プロジェクトとの連関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査の研究」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。また、HFSP“Odor-background segregation and source localization using fast olfactory processing”との連携として上記プロジェクトから BmOR1-CHR2 等のトランスジェニックカイコガの作出維持の支援をうけたうえで多くの情報交換を適時行った。

４－３.活動（研究会等）

2018 6/2 昆虫ミーティング（研究室内）

2018 8/2 昆虫ミーティング（研究室内）

2018 9/4 J-Node Hackathon 2018 September (Ideathon)

2018 9/14 昆虫ミーティング（研究室内）

2018 9/21-23 J-Node Hackathon 2018 September (hackathon)

2018 10/26 昆虫ミーティング（研究室内）

2019 2/28 NEC 共同研究ミーティング

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	端科学技術研究センター　教授　神崎亮平

別添１

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 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
Data-driven construction of insect brain simulations using HPC 口頭	加沢知毅	第41回神経科学大会	2018年7月26日	
Dynamics of gustatory responses in the honeybee. ポスター	Haupt SS, Kazawa T, Kanzaki R	第40回日本比較生理生化学会	2018年11月23－25日	国内
Modeling olfactory neural processing in the insect using HPC. ポスター	Kazawa T, Arase K, Sakai B, Fukuda T, Park H, Miyamoto D, Kanzaki R	第40回日本比較生理生化学会	2018年11月23－25日	国内
A comparative study of the morphology of the projection neurons in Bombycoidea. ポスター	Nirazawa T, Namiki S, Kazawa T, Kanzaki R	第40回日本比較生理生化学会	2018年11月23－25日	国内
Creating real scale simulation model of optic lobe based on Drosophila’s neural information　ポスター	Tsunoda H, Kazawa T, Kanzaki R	AINI2018	2018年12月21－22日	国内

The Conductance-based model for neurons in the olfactory circuit of Bombyx mori ポスター	Lee H, Kazawa T, Haupt SS Kanzaki R	AINI2018	2018年12月21－22日	国内
Constructing bottom up simulation of insect brain for understanding elementary intelligence on the massively parallel environment ポスター	Kazawa T, Miyamoto D, Park H, Sakai B, Tsunoda H, Fukuda T, Kanzak R	The first R-CCS international symposium	2019年2月18-19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
Morphology of visual projection neurons supplying premotor area in the brain of the silkmoth *Bombyx mori*.	Namiki S*, Kanzaki R	Cell Tissue Research	2019/3	国外
The functional organization of descending sensory-motor pathways in Drosophila	Namiki S, Dickinson MH, Wong A, Korff W, Card GM	eLife	2018/7	国外
Descending neurons from the lateral accessory lobe and posterior slope in the brain of the silkmoth *Bombyx mori*.	Namiki S*, Wada S, Kanzaki R	Scientific Reports	2018/8	国外

（別添）

「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

単独サブ課題

平成 31 年 2 月 23 日

代表機関名　東京大学
研究代表者名
神崎亮平

目次

１．実施概要 2
（１）目的・意義 2
（２）研究開発内容 2
（３）目標・期待される成果 3
（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 5
（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 5
（６）年次計画 6
（７）実施体制 9
（８）必要計算資源 10
２．採択時の留意事項への対応状況 10

１．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いわれるが、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。

  →

  ポスト京のネットワークスケーリングが京と同等であ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リアルタイムが可能を担保する 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%を十分超える単体ノード性能の達成

  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効率的な同定法の確立

  →

  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リアルタイムシミュレーションの実装

  →

  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

- 中心複合体やキノコ体を含む・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

→

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 光子励起顕微鏡による実験環境の整備が十分に可能であったなら)神経回路規模でのリアルタイムデータ同化の試行

  →

  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×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×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

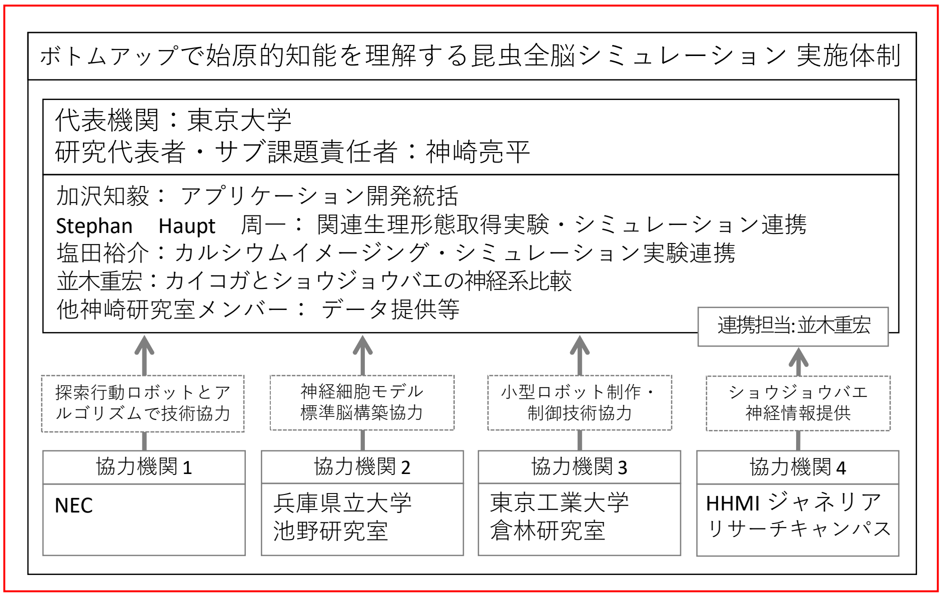
定量的及び定性的な目標と実施内容を簡潔に記載。

課題全体	中間目標（平成29年度）	● 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）	● 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 ● 中心複合体やキノコ体を含む・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の解釈による昆虫知能の理解 →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）	(目標) 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 触角葉のマルチコンパートメントモデルが試行される 研究体制の発足	(目標) 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 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 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。 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	(目標) 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 深化した触角葉とLALのシミュレーション 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	(目標) 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 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

	(実施内容) シミュレータの開発 昆虫脳神経回路シミュレーションの構築 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 プロジェクトの総合的推進	(実施内容) シミュレータの開発 昆虫脳神経回路シミュレーションの構築 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 プロジェクトの総合的推進	(実施内容) シミュレータの開発 昆虫脳神経回路シミュレーションの構築 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 プロジェクトの総合的推進	ーションパラメータオンライン推定の試行 (実施内容) シミュレータの開発 昆虫脳神経回路シミュレーションの構築 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 プロジェクトの総合的推進

（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研究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ャ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 ジャ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