

## 特集「脳神経系シミュレーション」にあたって

小林 亮太

(国立情報学研究所情報学プリンシプル研究系,  
総合研究大学院大学複合科学研究科情報学専攻)

山川 宏

(株式会社ドワンゴ)

神経科学の発展に伴い多様な実験データが蓄積し、神経細胞を構成する要素（イオンチャネル、シナプスなど）の働きについては多くのことが明らかになってきているが、それらの集合である神経回路レベル（メソスコピック）での情報処理機構についての理解は限定的である。多くの神経科学的知見を統合して脳の理解を深めるためには、脳やその一部を忠実にコンピュータ内に再構成し、脳内の電気活動を計算する「脳神経系シミュレーション」の研究が有効である。

脳神経系シミュレーションにおける多くの場合の目的は、神経細胞やその間のシナプスといった生体組織のハードウェア特性に立脚した数理モデル（電気回路）で構成される人工脳をつくり、その動作原理を理解することにある。これは必ずしも人工知能を構築することの前提知識にはならないが、知能を実装したシステムの一つとして脳を理解することは、知能を理解し、構築するための一つの手掛かりとなる可能性があるだろう。またこれと並走して、並列情報処理を行える人工ニューラルネットワークモデルのアクセラレータ技術の開発も進んでいるが、これはむしろ知的な情報処理を実装するための手段ともいえるだろう。

そこで本特集では、脳神経系シミュレーションはどのように行われるのか、これまでの脳神経系シミュレーションにより何がわかってきたか、などを紹介したい。

一つ目の、北野勝則氏による「脳のシミュレーションを始めるために」では、本特集の導入的な位置付けとして、脳のシミュレーションの狙いや、その基礎となる神経細胞の説明から始まり、代表的な神経細胞モデルやシナプスのモデルの説明や、シミュレーション環境などを解説している。

二つ目の、石井 信氏による「スーパーコンピュータによる脳神経系シミュレーション」では、世界の研究動向も踏まえつつ、理化学研究所が中核機関として実施された「次世代生命体統合シミュレーションソフトウェアの研究開発 (ISLiM)」における脳神経系研究開発チームにより行われた複数の成果をまとめて紹介している。

三つ目の、五十嵐潤氏、モレン ジャン氏、吉本潤一

郎氏、銅谷賢治氏による「運動情報処理とその疾患の機構解明を目指す視床-皮質神経回路モデルの開発」では、パーキンソンの運動症状の解明に向けた取り組みや、京コンピュータによる神経回路の大規模計算について紹介している。

四つ目の、宮本大輔氏、加沢知毅氏、神崎亮平氏による「昆虫嗅覚系全脳シミュレーションに向けて—スーパーコンピュータによる大規模脳シミュレーションの現在とその展望—」では、二つ目に解説された ISLiM におけるカイコガの嗅覚-運動系シミュレーション研究の現状と今後の見通しについて解説している。

五つ目の、山崎 匡氏による「小脳の計算機シミュレーション」では、大脳皮質の運動野との双方向性の結合をもちながら、精緻な運動制御やその学習において重要な役割を担っていると考えられる主に小脳神経回路のシミュレーションを GPU による実装レベルから紹介している。

六つ目の、小林亮太による「大規模脳シミュレーションについての研究動向」では米国における二つの研究事例、脳全体のシミュレーションを行った研究、人工脳を搭載したロボットを開発して動物が新しい環境に適用する様子をシミュレーションした研究、について紹介している。

七つ目の、我妻広明氏による「海馬が担う高次機能とシミュレーション手法の展望」では、エピソード記憶など顕在性記憶の形成に不可欠な働きを担う海馬に注目し、情報の種別、時間性、ハードウェア特性の三方向から、その特性を議論し、海馬が担う高次機能と可能なシミュレーション手法の展望について整理している。

八つ目の泰地真弘氏による「人工神経回路網のためのアクセラレータ」では、非ノイマン型の並列情報処理モデルの実現を目的とした工学的なニューラルネットワークのアクセラレータが取り上げられる。これは生体神経回路網の模倣を目的とした他の7編の解説とは一線を画している。積分発火モデルについては TrueNorth, SpiNNaker, HICANN が紹介され、発火率モデルについては、計算精度、FPGA での実装、専用 LSI での実装などについて解説されている。

表 1

プロジェクト名	プロジェクトの主要関係者	主要な出資者(投資額)	生物種	器官	計算対象となる神経細胞数	Neuron モデル(計算単位)	計算ユニット数	学習の方法	シミュレータ名	計算資源	リアルタイム性	研究実施期間	現在までの成果	今後の発展性(長期目標)
ISLiM (神経細胞 1)	石井 信 (京都大学)	文部科学省	哺乳類	神経細胞	1	単一ニューロンのマルチコンパートメントモデル	120 万本 (アクチン線) + 4 万個 (2 次元コンパートメント) + 100 個 (細胞膜)	形態可塑性	NeuroMorpho Kit	京 (8 192 コア)	生物時間 1 秒を 4.8 秒で計算	2008 年 10 月 ~ 2013 年 3 月	神経細胞による遊走, 神経細胞における形態変化 (フィロポディア生成など) の再現に成功	文部科学省「多次元定量イメージングに基づく数理モデルを用いた動的な生命システムの革新的研究体系の開発・教育拠点」に一部継承
ISLiM (神経細胞 2)	市川一寿 (東京大学医科学研究所)	文部科学省	哺乳類	神経細胞	1	上記+ニューロンの電気的活動	40 万コンパートメント	該当なし	A-Cell + NeuroMorpho Kit	京, 理研 (RICC)		2008 年 10 月 ~ 2013 年 3 月	神経細胞上の, 核内の転写因子振動パターンに関するパラメータを特定	
ISLiM (神経回路)	深井朋樹 (理化学研究所), Markus Diesmann (理化学研究所)	文部科学省	哺乳類	視覚野, など (大脳新皮質)	17 億 3 000 万個の神経細胞, 10 兆 4 000 億個のシナプス	積分発火モデルおよび Hodgkin-Huxley モデル	17 億 3 000 万個 (ニューロン数)	スパイクタイミング依存可塑性	NEST-K	京 (663 552 コア)	生体時間 1 秒を 40 分で計算	2008 年 10 月 ~ 2013 年 3 月	小型霊長類の全脳レベルの回路シミュレーションに成功. また, 視覚的注意が視覚情報処理に果たす役割を予見	HPCI 戦略プログラム「予測する生命科学・医療および創薬基盤」に継承, また欧州 HBP (Human Brain Project) に継承
ISLiM (哺乳類視覚系)	黒田真也 (東京大学), 白井支朗 (理化学研究所), 銅谷賢治 (沖縄科学技術大学院大学)	文部科学省	哺乳類	視覚系(眼球運動系, 眼光学系, 網膜)	数千万個	コンダクタンス型スパイクモデルおよび Hodgkin-Huxley モデル, 分子 STDP モデル	3 600 万個の視細胞からなる Cone Mosaic	簡素化された分子ネットワーク (スパイクタイミング依存可塑性)	PLATO を用いて, 眼球運動モデル, 眼光学モデル, 網膜視細胞モデル (Cone Mosaic) ならびに双極細胞層・神経節細胞層モデルを統合	京 (1 024 コア)	生体時間 1 秒を約 30 分で計算	2008 年 10 月 ~ 2013 年 3 月	一般画像に対する網膜応答, 錯視刺激に対する初期視覚系応答, 眼球運動を発生する神経回路の活動を精度良く再現	HPCI 戦略プログラム「予測する生命科学・医療および創薬基盤」に一部継承
ISLiM (無脊椎動物嗅覚系)	神崎亮平 (東京大学)	文部科学省	無脊椎動物 (カイコガ)	昆虫脳神経系全体	10 ~ 100 万個 (786 752)	マルチコンパートメントモデル	31 億コンパートメント	対応可能	NEURON-K +	京 (196 688 コア)	1/85.5 リアルタイム	2008 年 10 月 ~ 2013 年 3 月	触角葉出力神経に電流を注入した際の単一細胞の膜特性, 匂い刺激に反応する前運動中枢活動の再現に成功	「京」の一般利用課題として平成 27 年まで継続
「京」の一般利用課題 (無脊椎動物嗅覚系)	神崎亮平 (東京大学)		無脊椎動物 (カイコガ)	昆虫脳神経系・行動系	10 000 個程度 (10 368)	マルチコンパートメントモデル	4 100 万コンパートメント	対応可能	NEURON-K +	京 (663 552 コア)	約 1/2 リアルタイム	2013 年 4 月 ~ 2016 年 3 月	触角葉出力神経に電流を注入した際の単一細胞の膜特性, 匂い刺激に反応する前運動中枢活動の再現に成功	平成 27 年まで実施中
HPCI 戦略プログラム	銅谷賢治, 高木周, 木寺詔紀	文科省 HPCI 戦略プログラム	哺乳類	運動皮質, 視床, 大脳基底核, 扁桃核, 脊髄, 肋骨	数十万 ~ 10 億	シングルコンパートメントの積分発火型かコンダクタンスベース		現在, 学習なし	NEST	京	生物学的 1 秒を数十分	2011 年 4 月 ~ 2016 年 3 月	京による 10 の 9 乗個の神経細胞のシミュレーション (Julich research centre, RIKEN, OIST) の共同研究	京の後継で人全脳規模のシミュレーションや運動系, 感覚系の複数領域のシミュレーション
Izhikevich プロジェクト	Izhikevich		ヒト	大脳新皮質, 視床	100 万	マルチコンパートメントモデル	1 000 万 (10 コンパートメント, 100 万細胞)	シナプス可塑性 (ドーパミン依存 STDP)	C 言語, 並列化には MPI を使用	60 processors (3 GHz)	1 秒のシミュレーションに 1 分		会社 (Brain Corporation) を設立	
Brain Based Device	Krichmar J. L., Edelman		げっ歯類 (ラット, マウス など)	海馬, 大脳基底核, 報酬系	9 万	発火率モデル	9 万		Darwin X	12 computers (1.4 GHz Pentium IV)	リアルタイム			
エクサフロップススケール計算機		文部科学省	ヒト	すべて (大脳新皮質, 小脳, 海馬, 大脳基底核, 扁桃核, 視床ほか)	859 億個	積分発火モデル or Hodgkin-Huxley モデル?	859 億個		NEST	10 <sup>18</sup> FLOPS	生物時間 1 秒を数時間			
Blue Brain Project	Henry Markram				1 万個	形のある神経細胞				Blue Gene/L		~ 2007 年		
C2				大脳新皮質	10 億個					BlueGeneP を 14 万並列		2009 年にゴードン・ベル受賞		
Human Brain Project	Henry Markram	欧州 24 か国 112 研究機関	ヒト	すべて (大脳新皮質, 小脳, 海馬, 大脳基底核, 扁桃核, 視床ほか)	859 億個									
全脳アーキテクチャ	山川 宏, 松尾 豊, 一杉裕志, 高橋 恒一	NPO WBAI の賛助会員	ヒト, げっ歯類 など	すべて (大脳新皮質, 小脳, 海馬, 大脳基底核, 扁桃核, 視床ほか)	860 億個	脳器官やその部分的な領域の機械学習装置	10 ~ 100 程度	個別の機械学習ことを行う	BriCA (統合プラットフォーム)	—	リアルタイム	2014 ~ 30 年以降	初期的な検討・試作 (機械学習を結合するプラットフォーム初期開発など)	汎用性をもつ人工知能の工学的実現

本特集では、スーパーコンピュータ京を用いた大規模神経回路について述べてきたが、ここでは小型サル程度の規模の脳モデルの可能性が示されている。今後さらにポスト京と呼ばれる次世代のエクサフロップスレベルのスーパーコンピュータにより、人間の脳規模のシミュレーションへと展開し、脳の知的な情報処理の理解や、病気の機構解明などに役立つようになると期待できる。そう

した中で、蓄積されたシミュレーション経験やソフトウェア資産の発展につながると期待される。

最後に本特集で関係する、対象となる生物種や脳部位を限定したシミュレーションについての一覧(表 1)を主に石井先生らの協力により作成したので、参考にしていただければ幸いです。