

萌芽的課題2-1 多層マルチ時空間スケール社会・経済シミュレーション技術の研究・開発
サブ課題A: マクロ経済シミュレーション

目標

大規模な経済ネットワークの実データを基にして、経済ストレス伝播や景気変動のモデルの構築・実装・高度化を進め、経済危機や大規模災害発生時などの経済システムへの影響についての評価システムを構築する。

成果内容と科学的・社会的意義

緑: 科学的成果 青: 実用的成果

- 成果(1): 経済ストレス伝播モデルを開発し、大規模災害発生時の経済活動への定量的なストレス評価手法を確立した。
- 成果(2): 景気変動のメカニズムに関する経済変動の同期的な運動やその伝播を数理的にモデル化した。
- 成果(3): 異質的エージェントのシミュレーション基盤のために、京コンピュータ上にスクリプト言語の実行環境を整備した。

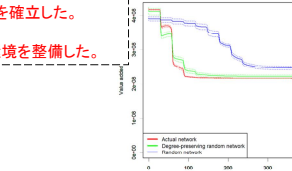
(1)の成果により、経済ネットワーク上でのストレスや供給・需要のショックの伝播に関するモデルを京上に構築し、百万社以上の企業とそれらの間の取引関係からなる生産ネットワークの実データに基づき、ネットワーク上でのダイナミクスを計算するアルゴリズムを実装してシミュレーションを行った。その結果、災害が発生したときに供給が停止する影響が生産の上流から下流へどのように波及するかの計算を可能にした東日本大震災、および今後起こるであろうと予測されている南海トラフ地震において、その被害の波及をシミュレートすることを行った。その結果、

- 東日本大震災後の影響を再現して間接的な被害は2週間程度の短い間に全国に広がること
- サプライチェーンネットワークには密な巨大連結成分があり企業のダメージは連動し振動すること
- 南海トラフ地震の際の直接被害の規模と累積の間接被害を定量的に予測すること

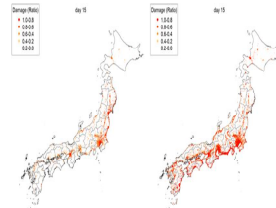
を発見ならびに成功した。

(2)の成果により、複素ヒルベルト主成分分析、ランダム回転シミュレーション、ホッジ・ヘルムホルツ分解をネットワークに応用した同期ネットワーク構築の方法を開発した。その結果、従来の方法では扱うことができないような、多数のマクロ経済変数の限られた長さの時系列情報から、景気変動を記述するにあたって主要な変数を見出す実用的な方法を構築することができた。

(3)の成果により、異質的なエージェント(経済主体)からなるシステムをシミュレーションするために、京コンピュータ上にスクリプト言語系の実行環境を整備した。具体的には、Python2.7本体およびPythonの科学技術計算パッケージNumPy, SciPyの環境を構築した。NumPyについては、富士通が提供する数学ライブラリJiapaackを利用することで、従来のFortranやCなどの行列積と同等の実効性能が得られることを確認した。また、PythonからMPIを利用するためのパッケージmpi4pyについても環境を構築し、マルチプロセス型のジョブにも対応できるようにした。



災害発生時のサプライチェーンの供給停止による生産ネットワークへの影響(横:計算ステップ、縦:GDP)(赤:実データ、青:ランダム)



災害後15日目の様子。左が東日本大震災、右が南海トラフ地震である。15日という極めて短い間に地理的に離れた企業に生産力の低下が伝播している様子

萌芽的課題2-1 多層マルチ時空間スケール社会・経済シミュレーション技術の研究・開発
サブ課題B: 企業ネットワークシミュレーション

目標

国内約100万社の企業ネットワークの基本モデルの構築、人口減少の経済活動への影響シミュレーションモデルの構築、災害などのゆらぎに対するストレステストとレジリエンスシミュレーションモデルの構築、世界貿易・金融市場との相互作用モデルの構築を完了する。

成果内容と科学的・社会的意義

緑: 科学的成果 青: 実用的成果

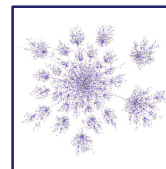
- 成果(1): 国内約100万社の企業ネットワークの基本モデルを開発し人口の増減に対応したシミュレーションを行った。
- 成果(2): 企業ネットワークにおける地域間結合を詳細に解析し、モデル化を進めた。

(1) 最終成果物である統合的な企業ネットワークシミュレータは、ネットワーク生成モデルであるMTTモデルをベースとした企業ネットワークモデルと、通貨のフローを推定するモデルである重力相互作用モデル(GIMT)が連立可能な形で実装される。前者は様々な状況下におけるネットワークの時間発展をテストすることが可能で、後者はネットワーク上を流れる通貨の流れを任意の場所において推定し、したがって企業活動の総体を計算することが可能である。ベンチマークテストによれば、国内約100万社の企業活動のシミュレーションにかかる時間は1サンプルにつきおよそ1ノード時間程度であり、例えば京コンピュータ1日分の計算で、約200万通りの政策・災害のパターンについてシミュレーションが行える見込みである。

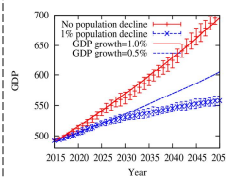
また、MTTモデルにより生成された仮想的な企業ネットワーク上において輸送方程式の解を与え、安定性解析を行うことで、集中度パラメータを変化させた際の通貨の流れの大局的な相転移現象が解明された。これは複雑ネットワーク上における輸送方程式の振る舞いを明らかにすることで、本質的に不均質であり、輸送に指向性のある空間における輸送の研究に貢献した。また実社会における企業活動や世界貿易について集中度パラメータの時間変化を推定する事により、その観点から生じる経済のシステム的な不安定化を予測できると期待されている。

さらに、企業ネットワークの文脈に人口減少の影響を取り入れることが可能となった。これは複雑ネットワークの非定常な時間発展ダイナミクス、特にノードを間引いていく場合のダイナミクスに相当し、それを現実の例において適用することで、複雑ネットワークの研究に貢献した。実用的には、例えば単純に年率1%の割合で一様に労働人口が減少すると仮定すると、見積られたGDPは2060年ごろ減少に転じると予測された(右上図)。この条件をより現実合うようにし、つまり今後あり得る人口のゆらぎや、政策による増減の結果を取り入れた系のシミュレーションが可能となっている。

(2) 今回の成果により、企業のネットワーク上の特性を与える上で非常に重要な要素である、企業の業種・地域などの属性情報をモデルに取り入れることが可能となった。さらに、日本企業の都道府県間の結合ダイナミクスの詳細な解析を行い、企業が他の地域の企業と取引を行うモチベーションにあたる量が、47都道府県間全ての組み合わせにおいて見積もられた(参考: 右下表)。これはまず複雑ネットワークの既存モデルを拡張し、新しい知見を得たという意味で複雑ネットワークの研究に貢献した。また同時に、現在の地域間のパラメータを変化させた場合のシミュレーションにより、例えば災害における地域間の寸断や、交通網の整備による地域間の取引活性化の影響を取り入れたシミュレーションを行うことが期待されている。



生成された企業ネットワーク



人口減少のGDPIに与える影響

萌芽的課題2-1 多層マルチ時空間スケール社会・経済シミュレーション技術の研究・開発
 サブ課題C: 金融シミュレーション

目標

株式市場モデルと銀行間ネットワークモデルの統合、システミックリスク予防のための施策決定支援

成果内容と科学的・社会的意義

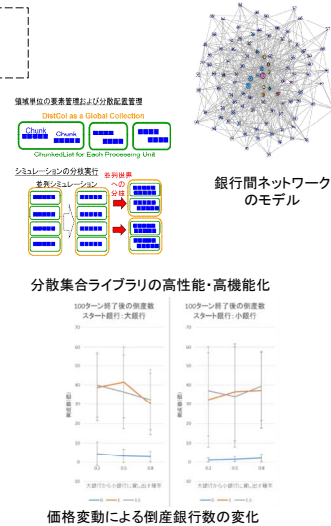
緑: 科学的成果 青: 実用的成果

成果(1): 金融取引・銀行間ネットワークと企業ネットワークの統合モデルの開発 (サブ課題Bとの連携)
 成果(2): 人工市場エージェントシミュレータへの動的負荷分散の実装
 成果(3): システミックリスク予防のための施策決定支援手法の開発

(1)の成果により、本サブ課題で構築した金融取引・銀行間ネットワークモデルとサブ課題Bで構築した企業ネットワークモデルを統合したシミュレーションプログラムを構築した。具体的には、100行の大規模銀行から1000社の企業へ貸し出しを行い、各企業が銀行からの借入れと他企業との取引で成長するモデルとした。統合モデルにより企業の成長状況と各銀行の貸出リスクとの相関を分析した。

(2)の成果により、エージェント群の管理をおこなう X10 上の分散コレクションライブラリの効率化および並列世界シミュレーションのための高機能化を進めた。これにより、人工市場Plham のシミュレーションに対するスナップショット取得および分枝実行を可能とした。加えて、Java8 版 Plham の大規模分散環境上での動作実現に向けて、Java8 + APGASライブラリ上での動的負荷分散ライブラリ GLB の実現及びメネコア向けハイブリッド負荷分散アルゴリズムの開発を進めている。

(3)の成果により、TOPIX100構成銘柄等の大型銘柄の金融シミュレーションと百行の銀行の銀行間ネットワークの統合シミュレーションを実行した結果、銀行間ネットワークと金融市場の相互作用、特に大銀行と小銀行の間の貸借リンクの存在確率および倒産を開始する銀行の規模がシステミックリスクに与える影響の存在を確認した。最初に倒産した銀行の規模が大きい場合は、金融市場の価格変動が大きくなるにつれて、倒産数は単調減少した。これは、価格変動の増加により、倒産した大銀行が借入している小銀行が少なく連鎖倒産が起きにくくなった。一方、最初に倒産した銀行が小規模の場合は市場変動が大きくなるにつれて、倒産数は単調増加した。これらの「銀行間の貸借関係の非対称性」と「銀行の保有する市場性資産の価格変化」に関する要素のシステミックリスク評価における重要性を明らかにした。



萌芽的課題2-1 多層マルチ時空間スケール社会・経済シミュレーション技術の研究・開発
サブ課題D: 交通・人流シミュレーション

目標

人流と交通の多層連成シミュレーションのための網羅実行を行い、そのためのデータ同化技術の開発および網羅実行の効率化を実現し、実データでのデータ同化技術を検証する。

成果内容と科学的・社会的意義

緑: 科学的成果 青: 実用的成果

成果(1) 人流のミクロ・マクロ連成シミュレーションを実現。また、人流・交通間の連成シミュレーションの仕組みづくり開始。
成果(2) 人流・交通シミュレーションについて、OACIS等による大規模並列による社会システム評価を実施、実応用を展開。

成果(1)により、複数レベルの人流シミュレーション(CrowdWalk, MASH)を遺伝的アルゴリズムを用いた境界条件適合せを実現、地域単位から屋内レベルまでのマルチレベルのシミュレーションを実現、エージェントの思考についてもシミュレーションレベルに応じて多様に記述可能となった。これにより、バシフィコ横浜屋内から市内の避難所までの避難シミュレーションをシームレスに実現。交通・人流連成(CrowdWalk, MATES)においては、イベント(国体)における駐車場からの人流と交通の相互作用および信号連用の評価などを連成シミュレーションにより可能とした。

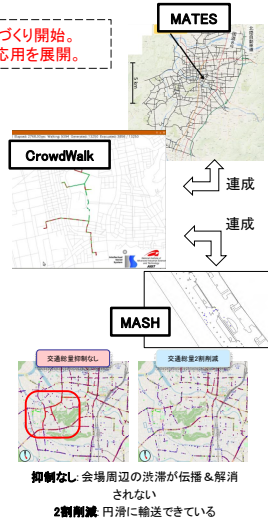
成果(2)では、津波避難の方策について、多様な誘導策および条件設定・実行を本課題で開発したOACISの管理で実現、徳島県など具体的な現場への政策立案への助言等を行う予定。また、国体については、愛媛国体・福井国体について、総量規制会議などへの助言を、OACISなどによる網羅シミュレーション等を行った。この実績を買われ、三重国体などこれからの国体にも助言を求められている。さらには、相乗りタクシーサービスの評価などにおいても、OACISを活用し、実サービスにつながる分析を実施中。

科学技術上の革新性

- 人流・交通という異なるモデル、および異なる抽象化レベルのシミュレーションの連成について、シミュレータごとの利点・自由度を活用しつつ、大規模・複数評価指標のシミュレーション評価を実現。
- 多様な条件での評価を容易に行えることにより、多面的な評価を効率よく実現。従来にない評価項目での分析を可能とした。

社会的インパクト

- 交通・人流を細かい挙動モデルまで含めて連成シミュレーションで同時に行えるため、国体など実際のアプリケーションに直接適用できる技術になっている。
- 自治体(例: 徳島県など)等での防災政策や国体などイベントにおける交通・人流制御など、具体的な応用を展開、社会還元を進めている。



萌芽的課題2-1 多層マルチ時空間スケール社会・経済シミュレーション技術の研究・開発
サブ課題E: 社会・経済シミュレーションモデルの評価手法の開発

目標

社会・経済シミュレーションのモデルを、近似ベイズ計算と機械学習手法を用いて評価する手法を開発する。さらに実行を管理するシステムを開発し、評価手法を実装する。大規模なシミュレーションモデルにおいて試行・実践する。

成果内容と科学的・社会的意義

緑: 科学的成果 青: 実用的成果

成果(1): ダイナミック・プログラミングを用いた経済モデルの並列化計算、拡張版MCMCの手法の開発、及び評価指標の作成
成果(2): Boidシミュレーションの高速化および大規模ウェブデータの分析
成果(3): シミュレーション実行・管理フレームワーク OACIS・CARAVANの開発・応用
成果(4): ゲーム論のナッシュ均衡解へのスーパーコンピュータの応用

(1)の成果により、有限期間ダイナミック・プログラミング問題の解を、並列計算を用いてエラー・フリーで求められるようになった。さらに、従来のMCMCでは現実的なタイムフレームでは計算の収束が期待できないような複雑な状態空間モデルに対して、並列計算を駆使したアルゴリズムを用い、比較的短時間で計算が収束するようになった(右図)。

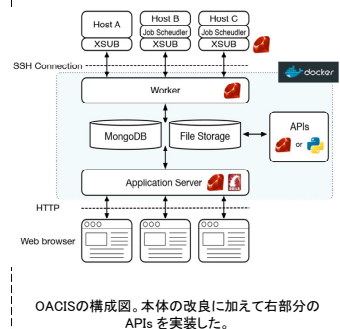
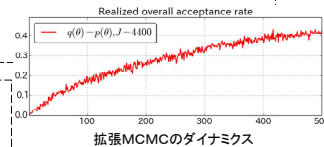
社会科学・経済学の観点から拡張版MCMCの定量的優位性を示すために、サンプル採択率に基づく指標を考案し、並列化の規模とともに優位性が増すことを示した。

(2)京コンピュータで大規模な群れのシミュレーション(Boids Model / 3D空間でのMulti Agents Model)の高速化を行い、計算時間の大幅な削減に成功し、最大1200万個体(12x12x12ノード使用)の大規模シミュレーションを行い、解析した。また複数の大規模なソーシャルメディアに対して文化遺伝子としてのハッシュタグの分析を行った。特にタグの組み合わせが持つ進化特性に着目し、タグ単体の分析からは得られない、組み合わせが持つ新規性の生成や拡散を明らかにした。さらにタグが時間的に変化するセマンティックなクラスター構造を持つ現象を観測した。

さらに、20年ほど前にPeter Gacsによって提案された、どんなノイズに対しても頑強に振る舞うセルオートマトンモデルを、その一部ではあるが、世界で初めてシミュレーションすることに成功した。本成果は、ネットワークの個々のノードにコンピュータを配備し、それがお互いに情報をやり取りする社会モデルの全く新しい数理モデルとして期待できるため、その科学的意義は大きい。

(3)の成果により、大並列計算機を使って数百万以上のシミュレーションを有機的に実行・管理するフレームワーク CARAVANを開発し、応用を進めた。これは、百万程度を実行・管理するOACISを、さらに大きな並列度の計算機用にしたものである。

(4)の成果により、スーパーコンピュータ規模の数え上げがゲーム論および人類の協力・平和戦略への応用が拓かれた。



萌芽的課題2-2

堅牢な輸送システムモデルの構築と社会システムにおける最適化の実現 (複数の社会経済現象の相互作用のモデル構築とその応用研究)

複雑かつ急速に変化する現代社会で生じる様々な問題に政策・施策が俊敏に対応するために、交通や経済等、社会活動の個々の要素が互いに影響し合う効果を取り入れて把握・分析・予測するシステムを研究開発する。

本課題の主な成果

1. (確認した限り)世界ではじめて、国レベルの広い領域を対象とした航空交通流のセルオートマトンモデルを開発、フライト状況を評価する分散化シミュレーションを実施した。
2. 同シミュレーションを利用した多目的最適化により、(例えば)出発時間を数分ずらすだけで大幅な到着遅延減少を実現できることを示した。
3. WSだと350日以上かかる管制方式に関する大規模シナリオのモンテカルロシミュレーションを京コンピュータによって3日以内に短縮した。研究成果は国際民間航空機関(ICAO)による国際基準に反映された。スーパーコンピュータに無縁であった航空管制研究者による成果。
4. 空港内の地上オペレーション(タキシング、スポットアサイン)についても新たなセルオートマトンモデルを開発し、分散化によるシミュレーションを実施した。これも過去に例のない解析である。

萌芽的課題2-2 堅牢な輸送システムモデルの構築と社会システムにおける最適化の実現

目標

・最終目標:航空交通流の安全性と効率性を両立する全体最適な「究極の時刻表」を議論するプラットフォームとしてシミュレーションツールが一定の検証も含めて完成する。この手法に堅牢性を加味した多目的最適化ツールを適用することで航空交通流管理に関する具体的な提案を提示する。

緑:科学的成果 青:実用的成果

成果内容と科学的・社会的意義

成果(1) 航空交通流を記述する現象ベースモデルを構築、シミュレーションに活用。
成果(2) 多目的最適化により、出発時間の小変更により大幅な到着遅延減少を提示。
成果(3) 数学モデルシミュレーションに京を活用し、航空機運航手法の検討を容易に。

(1)の成果により一定レベルの国内航空交通流のシミュレーションツールが完成した。多目的最適化により、容易に大幅に遅延が解消できる可能性があることを示した。燃料消費と全遅延時間に複雑な関係も明らかになっている。地上航空機移動が遅延に影響することから、新たに空港オペレーションのモデルとシミュレーションツールを開発した。空域内の航空交通流と連携へと発展させる。世界初の試みであり、学術的にもモデルと現象に関係した応用数学面の成果が複数出はじめている。

本成果は、(2)の結果など現状運航施策の検討のみならず、将来の航空交通流管理議論のプラットフォームとなりえる。航空管制の現場での利用の可能性も含めて、国土交通省や欧州の航空管制研究機関Eurocontrolなどとの議論を予定している。

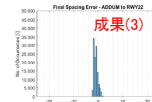
(3)の成果により、3日間を要していた1シナリオの数学モデルシミュレーションを20分程度で実施、350日以上かかる大規模なシナリオも数日以内で評価できた。国が検討する航空管制自動化支援システムの有効性検証など、管制官の負担軽減や安全性向上への手法検討と検証を容易にするもので、スーパーコンピュータと縁の無かった応用へと利用を広げるものとなっている。なお、ここでの成果は実際にICAO(国際民間航空機関)の公式文書であるFIM国際基準案に反映されている。



左は現状を模擬したオリジナル解(緑)、右は最適化による遅延減少解(赤)の飛行状況を示している。



福岡空港における地上オペレーション



国が検討する施策の1つであるFIMを適用、約68%が間隔目標値の±5秒以内に制御可能

萌芽的課題3

太陽系外惑星(第二の地球)の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明

宇宙、地球・惑星、気象、分子科学分野の計算科学と宇宙観測・実験が連携する学際的な取組により、観測・実験と直接比較可能な大規模計算を実現し、地球型惑星の起源、太陽系環境、星間分子科学を探索する。

本課題の主な成果

- 以下の惑星科学・地球科学・宇宙化学・宇宙生物学分野における研究課題について、「京」、ポスト「京」による大規模数値シミュレーションを可能にする計算アルゴリズムおよび計算コードを開発した。(Ishigaki+2019; Iwasawa+2019; 他)
- 高精度大域的な流体・重力N体シミュレーションを行い、原始惑星系円盤形成過程、構造形成のモデルおよび惑星集積過程の新たなモデルを提案した。(Brasser+2018; Ida+2018; Iwasaki+2019; Kunitomo+2018; Nakajima+2019; Takasao+2018; Ono+2018; Woo+2018; 他)
- 月・地球のマントル対流の3次元シミュレーションを行った。金星探査機「あかつき」が捉えた下層雲の巨大筋状構造をシミュレーションで再現し形成メカニズムを解明した。(Ishioaka+2018; Kashimura+2019; Miyagoshi+2017, 2018; Ogawa 2016, 2017, 2018; 他)
- 太陽の表面から対流層の底までの一貫した計算による黒点の拡散・形成の再現、太陽面爆発現象の再現、および地球磁気圏と衛星環境を再現した。(Bamba+2017a,b; Darian+2017; Hotta 2017, 2018; Hotta+2019; Iijima+2017; Inoue+2018; Ishiguro & Kusano 2017; Katoh+2018; Kawabata+2017; Muhamad+2017, 2018; Vekstein & Kusano 2017; 他)
- 第一原理分子動力学計算によって星間有機分子の生成機構を解明した。ダストの衝突付着成長シミュレーションによって原始惑星系円盤乱流中の微惑星形成過程を明らかにした。(Ishihara+2018; Kayanuma+2017a,b, 2018, 2019; Sakurai & Ishihara 2018; Sato+2018; Shoji+2018; 他)

萌芽的課題3 太陽系外惑星(第二の地球)の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明

サブ課題A: 惑星の起源の解明(東京工業大学 井田 茂)

目標

原始惑星系円盤の構造と進化、微惑星集積、惑星へのガス集積、円盤との相互作用による軌道移動を融合した大規模計算を行い、一般的な惑星形成過程を明らかにし、「第二の地球」の存在確率や多様性の理論予測を行う。

成果内容と科学的・社会的意義

緑: 科学的成果 青: 実用的成果

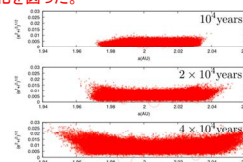
- 成果(1).....系外惑星系・太陽系の起源を統一的に理解するための惑星形成理論の課題を整理・明確化した。
成果(2).....大域的N体シミュレーションコードを開発し、惑星集積過程の大規模計算を行った。
成果(3).....非理想MHD効果をシミュレーションコードに実装し、高精度スキームへの対応やコードの最適化を図った。

(1) 観測的に見えてきた系外惑星系の力学構造の分布における太陽系の位置づけを考えることで、原始惑星系円盤と惑星との相互作用も微惑星形成のペブル集積過程も円盤の熱的・力学的構造および乱流状態で決まることから非理想MHDシミュレーションが必須であり、軌道移動・ガス惑星の影響を考慮するためにはグローバルなN体計算が必須であり、そして微惑星とペブルの混合系を扱うためには大粒子数のN体計算が必須であることを明確にした。

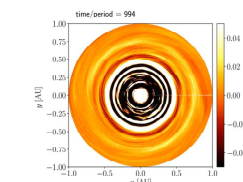
(2) 従来の100倍の粒子数に相当する1億体の大規模計算が可能になった。これに衝突合体・衝突破壊の効果も取り入れた惑星形成過程の暴走成長を、解像度の高いシミュレーションで追跡することができるようになった。特に微惑星が局所的に形成された場合(例えば水凝縮境界付近を想定)、暴走的に成長した微惑星はランダムで大きな動径方向の移動を伴うという、動径一様分布の微惑星からの集積という古典的描像とは大きな違いが出ることがわかった。

(3) 汎用磁気流体シミュレーションコードAthena++にオーム散逸や両極性拡散といった非理想MHD効果を実装し、高密度かつ低温の原始惑星系円盤を再現する大域的な非理想磁気流体シミュレーションが実現できるようになった。これによって、原始惑星系円盤の乱流は弱いこと、ALMA望遠鏡で観測されているような原始惑星系円盤の軸対称・非軸対称構造が自己組織的に形成されることが明らかとなった。さらに、分子雲から星・円盤形成過程の初期条件を可能な限り第一原理的に明らかにした。

並列計算コード開発においては、大規模並列粒子法シミュレーションコード開発フレームワークFDPS (Framework for Developing Particle Simulator)にP³T(particle-particle particle-tree)法を実装し、ポスト「京」のようなノード数が多くノード内のコア数も多いシステムにおいても高い実行効率が維持できるような最適化を行った。



微惑星が局所的に形成された場合の微惑星集積(少数の微惑星が暴走成長)



原始惑星系円盤の中心面における密度分布 (ALMA望遠鏡で観測されているような軸対称・非軸対称構造が自己組織的に形成)

萌芽の課題3 太陽系外惑星(第二の地球)の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明
サブ課題B: 惑星内部・表面のダイナミクスと進化(神戸大学 林 祥介)

目標

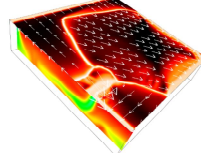
岩石惑星・衛星の火成活動・マンテル対流、ガス惑星表層と深部の循環、火星全球ダストストームについての高解像度数値計算を実現し、様々なサイズの惑星・衛星の内部・大気の力学的構造とその進化を探索する。

成果内容と科学的・社会的意義

緑: 科学的成果 青: 実用的成果

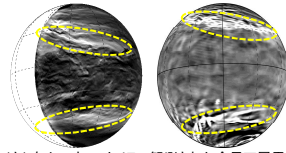
- 成果(1).....月のマグマの生成と重力分離、月内部の熱対流、地球プレートテクトニクスのそれぞれ3次元シミュレーションを行った。
 成果(2).....ガス惑星シミュレーションの高解像度長時間積分用スペクトル法ライブラリの改良、非弾性球殻対流モデルの開発を行った。
 成果(3).....非静力学全球火星大気モデルの開発、金星大気シミュレーションによる金星探査機「あかつき」の観測結果の再現を行った。

(1) 対流や火成活動による熱物質輸送や分化によって月のマンテルが45億年でどのように進化するか、その過程における放射性元素の発熱の寄与などの定量的な議論が可能となった。このような3次元形状の効果を取り入れたマンテル対流と火成活動を結合させたシミュレーションに基づいて、観測事実と調和的な月の熱的進化モデルの構築が可能となった。さらに、地球のプレートテクトニクスの3次元モデルの構築に成功し、地球表面に沿って剛体の板として運動するプレートが発達する様子が再現できた。プレート運動によるリソスフェアの変形はプレート境界域に集中し、この領域でのみ、過度の鉛直成分が大きな値をとるという現実の地球のプレートテクトニクスで見られる特徴を再現する事に世界で初めて成功した。



プレートテクトニクスの3次元モデル。地球表面(上面)における粘性率の分布とプレートの速度分布(矢印)を示す。手前の鉛直断面は、この面内の温度分布を示す。

(2) ガス惑星大気の大循環・東西平均流と相互作用する渦をシミュレートするための高精度高解像度用スペクトル法ライブラリのMPI並列化の実装を進め、長時間積分が可能になった。さらに深さ方向の密度成層を考慮した非弾性球殻対流モデルを開発した。これらをガス惑星大気モデルに導入することによって、微細対流と全球的構造を両立する大規模並列計算による超高解像度長時間計算の実現が可能となった。



(左) あかつきIR2カメラで観測された金星下層雲。(右) AFES-Venusのシミュレーションによる高度60 kmの鉛直流分布(白が下降流)。惑星規模筋状構造が再現されている。

(3) 正二十面体格子非静力学全球大気モデル(SCALE-GM)に火星大気放射・鉛直拡散・土壌温度変化・地表フラックスの過程を組み込み、火星大気3次元計算が実現した。試験計算の段階であるものの、火星ダストの巻き上げ・輸送に重要な過程の1つと考えられている鉛直対流の表現に成功した。また、金星探査機「あかつき」の赤外線カメラIR2が初めて捉えた「惑星規模筋状構造」を、静力学全球金星大気モデル(AFES-Venus)を用いた高解像度シミュレーションで再現することに成功し、その成因を解明した。

萌芽の課題3 太陽系外惑星(第二の地球)の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明
サブ課題C: 太陽活動による地球環境変動の解明(名古屋大学 草野 完也)

目標

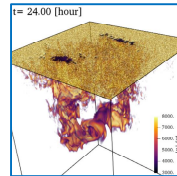
太陽対流層の第一原理的シミュレーションにより黒点、太陽活動の長期変動の起源を明らかにすると共に、さらに太陽磁場から太陽フレア、太陽風とコロナ質量放出が地球電磁気圏および人工衛星システムに与える影響を多階層シミュレーションにより統合的に明らかにする。

成果内容と科学的・社会的意義

緑: 科学的成果 青: 実用的成果

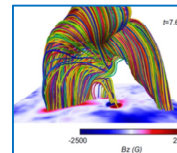
- 成果(1).....対流層深部から光球までの一貫した計算を実現し、対流層深部の磁場が太陽表面で黒点を形成するところを再現した。
 成果(2).....太陽フレアからコロナ質量放出までを再現するための多層格子電磁流体力学コードを開発しデータ駆動型シミュレーションを実現した。
 成果(3).....地球磁気圏と衛星環境を再現するMHDシミュレーションとプラズマ粒子シミュレーションの連成計算フレームワークの開発を進めた。

(1) 対流層深部の高解像度の長時間太陽全球計算を行い、効率的に磁場が生成される状況達成した。対流層の底から表面までを一貫した計算を世界で初めて実行し、太陽表面から太陽深部への影響を明らかにした。これらを用いて、対流層深部に存在する磁場が太陽表面で黒点を形成するところまでの計算が実現した。さまざまな初期磁場を試すことで、実際に太陽表面で観測されるような黒点を再現するために必要な太陽深部磁場を明らかにした。



太陽深部から太陽表面までの一貫したシミュレーションによって黒点が形成される様子。太陽表面で黒点が形成される様子を再現した計算結果。

(2) 磁気フラックスロープからコロナ質量放出に至る非線形過程やフレアやコロナ質量放出に伴う磁気リコネクションのダイナミクスを再現した。さらに、太陽対流層計算で得られた光球面磁場を境界条件としたフレアのMHD計算コードの開発を進めた。磁場擾乱が平衡コロナ磁場と相互作用した結果、螺旋状にねじれた磁力線群である「磁気フラックスロープ」が形成され、上空へと放出されていく様子が再現された。これらによって、フレアやコロナ質量放出といった太陽面爆発の発生機構と予測に関するシミュレーションが実現できるようになった。



データ駆動型シミュレーションで再現された太陽フレア爆発における磁気フラックスロープ。

(3) 地球磁気圏シミュレーションによる衛星周辺環境を再現するためのモデル計算の開発が進化した。電磁流体・粒子混成シミュレーションを実行し、コース放射発生時の磁気圏高エネルギー電子環境を明らかにした。人工衛星帯電環境の粒子シミュレーションを実行し、プラズマ波動存在下の衛星帯電現象に関して、波動周期と衛星帯電時定数の比に対する衛星電位変動量の依存性を明らかにした。これらによって、地球電磁気環境変動の詳細な物理描像と、人工衛星システムという社会インフラとの関わりを、経験則によらず物理法則に基づいて評価することが可能となる。

萌芽の課題3 太陽系外惑星(第二の地球)の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明
サブ課題D: 原始太陽系における物質進化と生命起源の探求(筑波大学 梅村 雅之)

目標

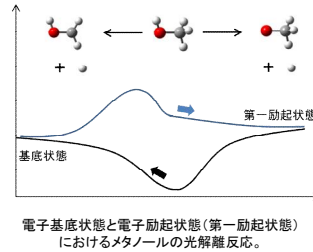
原始惑星系円盤の物質進化のシミュレーション、惑星間ダスト上の有機分子生成の量子化学計算を実施し、原始太陽系における物質進化を解き明かし、地球上の生命起源を探究する。

成果内容と科学的・社会的意義

緑:科学的成果 青:実用的成果

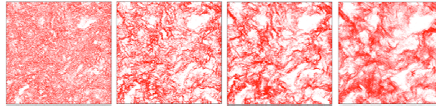
- 成果(1).....星間空間における有機分子の生成・分解機構に関する第一原理計算を行った。
成果(2).....原始惑星系円盤乱流中のダスト成長について、乱流のナビエ・ストークス方程式の直接数値計算を行った。

(1) 星間空間のような低温環境下での複雑有機分子の生成に重要なラジカルの生成メカニズムを明らかにするため、電子状態間遷移を考慮した量子化学計算を用いて解析し、グリシンが生成する2種類の反応経路を解明した。大規模で複雑な構造を持つ分子では、多くの安定構造(コンフォメーション)が存在するが、これらを解析することは、分子構造の解析や化学反応経路の解析において重要である。そこで、分子のコンフォメーション探索を効率的に行うアルゴリズムを開発し、グリシン等の小規模有機分子において、性能を評価した。ラジカル生成に關与する光解離の機構をメタノールについて解析し、電子基底状態と励起状態で、解離しやすい水素原子が異なることを解明した。また、ダスト表面のモデルとして、グラフェン表面でのラジカル反応を第一原理分子動力学計算で解析し、生成物の解離が起こりやすい状況を解明した。



(2) 原始惑星系円盤乱流中の微惑星形成過程を明らかにするため、原始惑星系円盤乱流中のダストの衝突付着成長シミュレーションコードの開発を行った。これによって、非線形性の強い原始惑星系円盤乱流の性質および乱流中の粒子の運動についての理解が大きく進展した。また、現実的な強乱流場中でもダストの付着確率が大きく下がることはなく、付着成長してきた粒子の付着率が高くなる「暴走的成長」が起こりえることを明らかにした。さらに、ダスト粒子の付着成長シミュレーションを行った結果、強乱流場中において一旦大きくなった粒子が寡占的成長を起こすことを明らかにした。

乱流の直接数値計算によって得られた慣性粒子のクラスタリングの様子(左からストークス数=0.01, 0.06, 0.12, 0.24)



萌芽的課題4-1

脳のビッグデータ解析、全脳シミュレーションと脳型人工知能アーキテクチャ (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)

革新技術による脳科学の大量のデータを融合した大規模多階層モデルを構築し、ポスト「京」で大規模シミュレーションにより思考を実現する脳の大規模神経回路を再現し、人工知能への応用を図る。

本課題の主な成果

1. 拡散MRIデータに基づく全脳高解像度結合行列を作成し、全脳神経回路モデル構築に活用した(サブ課題ABD)
2. 大脳皮質-基底核-小脳統合モデルを汎用神経回路シミュレータNESTで実装し、「京」での全脳シミュレーションを実現した(サブ課題BCD)
3. 高度並列神経回路シミュレータMONETを開発し、史上最大規模の脳シミュレーション(小脳ではヒト規模の680億ニューロン)を「京」で実現した(サブ課題BC)
4. 言語からの動画像生成と動画像追跡のモデルを開発し、それらを並列実行するためのプラットフォームBriCA2を「京」に実装した(サブ課題DEF)

萌芽的課題4-1 脳のビッグデータ解析、全脳シミュレーションと脳型人工知能アーキテクチャ サブ課題A: 脳の構造と活動の大規模データ解析(京都大学・大羽成征)

目標

哺乳類の脳を構成する神経回路の構造同定を全脳レベルで行う高度化アルゴリズムを開発し、構造同定の結果を他のサブ課題が実施するネットワークシミュレーションに提供する。

成果内容と科学的・社会的意義

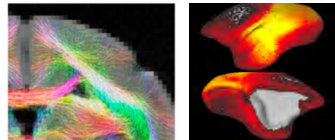
成果(1).....哺乳類脳の拡散MRIコネクティクス同定における複数脳間平均を算出した
成果(2).....2ステップ・モンテ・カルロ法の実装を行った

(1)の成果により、哺乳類脳において高い解像度と信頼性を持つ全脳規模神経結合が得られ、最終目標においてサブ課題Dで実施される全脳シミュレーションに提供された。哺乳類脳標本の拡散MRI画像から脳白質における軸索走行方向の手がかりが得られる。これを統合した脳領域間の結合強度行列が、全脳シミュレーションのために必要である。本成果は、個体間相違や追跡アルゴリズムの確率的ゆらぎのもとで**安定して高い解像度を持つ結果を得た点に意義がある。**

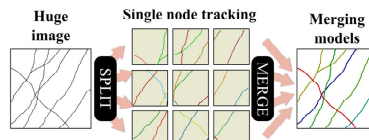
(2)の成果により、蛍光トレーサー顕微鏡画像による全脳規模3次元コネクティクス同定計算を並列化できる。2ステップ法の第1ステップで解析対象となる3次元画像領域をモザイク状に分けて計算ノードを割り当て、モンテ・カルロ法による神経配線構造同定を行う。第2ステップでは、再びモンテ・カルロ法を適用してこれらを結合する。ノード間境界をまたぐ配線の切れ目を第2ステップのモンテ・カルロ法で繋ぐ点に工夫があり、これによって矛盾のない大域的ネットワークを得ることができる。

本成果は、脳における神経配線構造同定におけるモンテ・カルロ法の適用範囲を大きく広げた点に意義がある。一般にモンテ・カルロ法は実行するたびに結果が確率的に揺らぐため、領域分割の悪影響が大きいと考えられていた。2ステップ・モンテ・カルロ法でこの点が解決されたことで、**モンテ・カルロによる大型計算全般の潜在的な応用範囲を広げる意義がある。**

緑: 科学的成果 青: 実用的成果



哺乳類脳の拡散MRI画像から、白質線維追跡シミュレーションを行い(左図)これをまとめて、2万ボクセル間の接続強度行列を求める。個体間のばらつき補正の平均処理により信頼性の高い標準構造を推定した(左図)。



2ステップ・モンテ・カルロ法により、蛍光トレーサー顕微鏡による全脳規模構造画像に基づくコネクティクス同定計算を、複数計算ノードで計算したのちにマージすることで効率化。

萌芽的課題4-1 脳のビッグデータ解析、全脳シミュレーションと脳型人工知能アーキテクチャ
サブ課題B: 大脳皮質神経回路のデータ駆動型モデル構築 (理化学研究所・五十嵐潤)

目標

哺乳類の大脳皮質-視床-大脳基底核-小脳神経回路モデルによる情報処理機構の解明

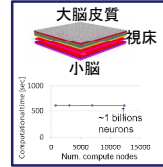
成果内容と科学的・社会的意義

緑: 科学的成果 青: 実用的成果

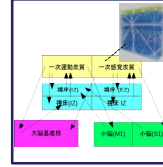
- 成果(1).....ポスト京で全脳シミュレーションを可能にする神経回路シミュレータの開発
- 成果(2).....運動-感覚皮質モデルと大脳皮質-視床-小脳-大脳基底核神経回路モデルの開発

(1) 哺乳類の脳の90%以上の神経細胞は大脳皮質、小脳、大脳基底核に含まれており、これらの領域は密接な相互作用を行いながら情報処理を行っている。しかし、大脳皮質は膨大な数の結合を持ち、小脳は膨大な数の神経細胞を持つため、それらの相互作用を全脳規模のシミュレーションで調べるのはこれまで難しかった。我々は、大脳皮質と小脳の層状シート型回路構造に着目し、タイル分割による並列計算を行う独自開発のシミュレータMONETを開発し、全脳規模のシミュレーションについて、実現可能性を調べた。その結果、サブ課題BとCで共同し、京で10億個の神経細胞からなる大脳皮質-視床-小脳回路のシミュレーションを実現し、計算性能とメモリ消費に関して高いスケール性能が実現できることを示した。さらに、ポスト京での規模拡大による、全脳規模のシミュレーション実現の可能性を示唆した。計算のホットスポットのプログラムに変更を加え、ポスト京CPU用コンパイラによるSVEのSIMD命令の翻訳が行われることを確認した。

さらに、2014年に京で世界最大規模の大脳皮質シミュレーションを行ったNESTシミュレータについて、ユーリッヒ研究所、スウェーデン王立工科大学、理研の共同研究グループで、AlltoAll通信と新規データ構造を導入し、計算性能とメモリ消費を改善した。京やJUQUEEN上での試験で、ポスト京世代スパコンでの全脳シミュレーションの可能性を示唆する結果を得た。これらの成果は、脳全体で協調して行う情報処理機構や、複数脳領域が相互に影響して発生するてんかんやパーキンソン病などの脳疾患の病態について、ポスト京上で脳を丸ごとシミュレーションして調べるための第一歩となる。



3次元モデル構造と弱スケール性能



NESTで構築した全脳モデル構成図

(2) 上述のNESTシミュレータ上で実行する詳細な全脳のモデル開発に向け、層状シート型の一次体性感覚皮質、一次、二次運動皮質の神経回路開発を行った。さらに、サブ課題B、C、Dで連携し、一次運動皮質、一次運動皮質、視床、小脳、大脳基底核からなる最小版の全脳モデルを構築し、京上での動作させた。広く利用されるNESTシミュレータ上で全脳モデルを開発することで、他研究者によるモデルの利用を可能とする。今後、脳の主要な領域間の協調について調べることが可能になり、ポスト京による全脳モデルの実行に向けた一歩となる。

萌芽的課題4-1 脳のビッグデータ解析、全脳シミュレーションと脳型人工知能アーキテクチャ
サブ課題C: ヒト全小脳モデル構築と大脳小脳連関シミュレーション (電気通信大学・山崎匡)

目標

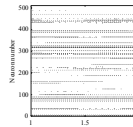
運動制御および認知機能に関係する全脳レベルの神経回路シミュレーションを実施するために、「京」ならびにポスト「京」上で動作するヒト全小脳神経回路モデルを構築し、他のサブ課題で構築する大脳皮質、大脳基底核の神経回路モデルと接続する。

成果内容と科学的・社会的意義

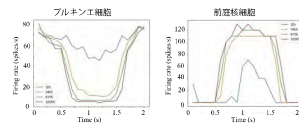
緑: 科学的成果 青: 実用的成果

- 成果(1). 開発した神経回路シミュレータを用い、「京」上で、ヒトスケールの小脳神経回路シミュレーションを実施した。
- 成果(2). 開発および既存の神経回路シミュレータにより構築した小脳神経回路モデルを、サブ課題Bの大脳皮質神経回路モデルと接続した。

(1)の成果により、「京」ならびにポスト「京」上で動作するヒト全小脳神経回路モデルを構築するという目標に対して、「京」の全ノードを使用することにより、ヒト全小脳神経回路モデルの構築を達成した。弱スケール性能を計測し、1024ノードから全ノードまで、良好なスケール性能を得た。構築した小脳神経回路モデルの細胞の応答は、動物実験と定性的に一致した。本成果は、「京」による世界最大規模の神経回路モデルのシミュレーションの実行である。さらに、開発した神経回路シミュレータは、良好な弱スケール性能を得られているので、ポスト「京」でも性能を引き出すことが可能になると期待される。



開発した神経回路シミュレータにより構築した小脳神経回路モデルにおける顆粒細胞の活動。横軸は時間(秒)、縦軸は細胞の番号を示す。点は、スパイクを表す。



神経回路シミュレータNESTにより構築した小脳神経回路モデルの視覚性眼球運動ゲイン適応のシミュレーション結果。

(2)の成果により、他のサブ課題で構築する大脳皮質、大脳基底核の神経回路モデルと接続するという目標に対して、大脳皮質神経回路モデルとの接続を行い、大脳小脳連関ループのシミュレーションの実行を達成した。開発した神経回路シミュレータにより構築した小脳神経回路モデルと大脳皮質神経回路モデルを、「京」上で接続した。加えて、神経回路シミュレータNESTにより構築した小脳神経回路モデルと大脳皮質神経回路モデルを、接続した。本成果は、電気生理学および解剖学データに基づく大規模な神経回路モデルどうしを接続するという世界的に報告されていないものである。最近実験的にも注目されている脳の複合領域間の相互作用による運動および高次脳機能のメカニズムの解明に貢献できると期待される。開発した神経回路シミュレータは良好な弱スケール性能を得られているため、ポスト「京」において、大脳基底核神経回路モデルも含めた全脳レベルのシミュレーションでも性能を引き出すことが可能になると期待される。

萌芽の課題4-1 脳のビッグデータ解析、全脳シミュレーションと脳型人工知能アーキテクチャ
 サブ課題D: 大脳皮質・基底核・小脳モデル統合による全脳シミュレーション (沖縄科学技術大学院大学・銅谷賢治)

目標

大脳基底核の最新の解剖学・生理学データにもとづいたスパイクング神経回路モデルを構築する。
 大脳皮質・小脳モデルとの統合による全脳シミュレーションを実現し、思考の機構を明らかにする。

成果内容と科学的・社会的意義

緑: 科学的成果 青: 実用的成果

成果(1)・・・大脳基底核のスパイクング神経回路モデルで、行動選択と強化学習を実現した。
 成果(2)・・・大脳皮質、大脳基底核、小脳の統合シミュレーションを実現した。

(1) マカクサルの大脳基底核の神経回路の構造と活動を1/20,000のスケールで忠実に再現したスパイクング神経回路モデルで、大脳皮質からの入力強度に応じた大脳基底核出力の選択パターンを解析、強化学習の基本要素である確率的な行動選択が脳でいかに起こり得るかを明らかにした。

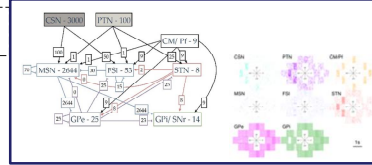
さらに、大脳皮質から大脳基底核の入力部である線条体へのシナプス結合に、報酬信号に応じた可塑性(ドーパミン依存性シナプス可塑性)を導入することにより、報酬フィードバックによる強化学習が実現できることを確認した。

本成果は、大脳基底核の神経回路の動作原理の解明に貢献するだけでなく、大脳基底核の病変の原因の解明とその治療戦略の探索に有用なツールを提供する。

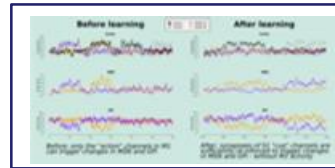
(2) サブ課題Bの大脳皮質-視床モデル、サブ課題Cの小脳モデル、サブ課題Dの大脳基底核モデルを統合するため、大脳皮質の1mm²を単位とした整合性のある空間構造の策定を行った。

それをもとにNESTにより実装した各モデルを結合し、「京」の600ノードを使い大脳皮質で50mm²スケールの全脳モデルのシミュレーションを実現した。

これにより大脳基底核と小脳から視床の異なる部位を経た入力信号の大脳皮質回路における統合機構をシミュレーションにより探索することが可能になる。



大脳基底核のスパイクング神経回路モデルによる行動選択



入力-出力と報酬の連合による強化学習

萌芽の課題4-1 脳のビッグデータ解析、全脳シミュレーションと脳型人工知能アーキテクチャ
 サブ課題E: 脳型人工知能アーキテクチャの開発 (京都大学・石井信)

目標

脳型人工知能のアーキテクチャとして、内部状態を持つ力学系を多数連結して並列動作させる機構を開発し、不完全観測、動的、少サンプルの課題で適切な推定と制御と学習を行う。

成果内容と科学的・社会的意義

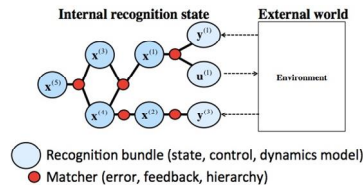
緑: 科学的成果 青: 実用的成果

成果・・・・・・予測符号化を分散型計算で行うアーキテクチャを実装し応用例を示した

この成果は、脳型人工知能の基本アーキテクチャとして我々が提案しているものである。提案型アーキテクチャは内外環境を表現する複数の状態空間モデル(単位モデル)を階層的な接続関係のもとで協働させる仕組みになっている。学習済みの単位モデルを組み合わせて、最小限の追加学習によって複数タスクに適応する汎用性の発揮が期待される。実装において、課題Fで開発されているフレームワーク BriCA の最新版を用いることで並列化をこれまで以上に、48CPUノードにおける同期的プロセス並列実行で複数力学系の同時同定ができること、GPUの援用によって各単位モデルに深層神経網による画像処理を行わせることができることを示した。今後非同期動作、スレッド間通信、ノード間通信を実装するとともに、単位モデルの個数を増やした実験を行うべく。

AI技術の応用範囲を広げる意義、ヒトや脳を理解する意義に加え、ヒトの挙動を理解することによるヒト-AI協調を進めてゆく意義がある。

提案型アーキテクチャの応用例として、モーションキャプチャと物理シミュレーションモデルの統合によるアニメーション生成を行った。仮想現実空間で生じる全ての場を事前にキャプチャしておくことは現実的でなく、リアルタイムで自然な物理シミュレーションを行うには計算量のみならず事前モデリングのコストが大きい。データとモデルの統合に提案型アーキテクチャを用いることにより、関節単位の局所的制約と全身統合の大域的制約を同時に与えることができる。



○ Recognition bundle (state, control, dynamics model)
 ● Matcher (error, feedback, hierarchy)

複数モジュールを用いた予測符号化に基づく脳型人工知能アーキテクチャは、ダイナミクスを認識する"bundle"と、これらが相互予測する誤差の評価を行う"matcher"からなる。



姿勢のモーションキャプチャ(赤)から、関節トルクを含む仮想力学系(黒)の挙動を復元することで、自然なアニメーションを生成することができる。擾乱への反応も自然である(右図)

萌芽の課題4-1 脳のビッグデータ解析、全脳シミュレーションと脳型人工知能アーキテクチャ
サブ課題F: 脳型人工知能大規模高性能計算プラットフォームの開発 (理化学研究所・高橋恒一)

目標

全脳に匹敵する規模での非同期並列計算に耐えうる脳型人工知能高性能計算基盤ソフトウェアを開発する

成果内容と科学的・社会的意義

緑: 科学的成果 青: 実用的成果

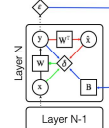
- 成果(1) 非同期並列基盤ソフトウェアBriCAを開発した。課題内連携のほかに課題外でも利用実績を積んだ。
- 成果(2) 新規の非同期学習手法を提案し、「京」を用いて世界で初めて1000並列規模のモデル並列学習に成功した。

(1)の成果により、非同期分散型の脳型認知アーキテクチャを高並列で実行する基盤が整備された。今日広く使われているTensorFlowなどの人工知能エンジンは、GPUでの同期的処理に最適化され、モデル並列実行時の並列性能は著しく制限されている。BriCAの開発により、人工神経回路の数千コアから数万コア規模でのモデル並列学習実行が可能になった。

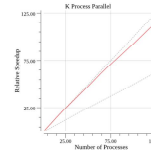
BriCAを用いて、サブ課題Eで開発するMatcherNetをARMサーバー上で96コア環境で並列実行することに成功した。また新学術領域「脳情報動態」でも大脳新皮質の6層構造を真似たマスターアルゴリズムフレームワーク(MAF)の研究に用いられている。さらに、当課題のほか多数の研究機関・企業が協賛する全脳アーキテクチャ・ハッカソンでも採用され、新皮質＝大脳基底核ループや海馬モデルに基づいた脳型人工知能の研究・開発・さらに教育にも展開されている。この成果は今後サブ課題ABCDの脳神経回路モデルを脳型人工知能に応用する際の基盤ともなる。

(2)の成果では、分散メモリ環境において人工神経回路のモデル並列計算を高効率で実行可能なことを示した。現在主流の誤差逆伝播に基づくend-to-end学習では、ネットワーク全体の同期処理が発生するため分散並列実行に根本的な足枷がある。本研究では、いくつかの生物学的に忠実な(biologically plausible)学習手法を提案あるいは拡張し、高並列実行に適したアルゴリズムを開発・実装し、性能の検証を行っている。

特に、Direct Feedback Alignment法(DFA)をベースに新規開発したAsynchronous DFA(ADFA)では「京」を用いて128ノード1024コアで良好なスケールリングを示したが、この規模の性能は文献等で調査する限り世界初である(論文投稿中)。このほかに、Decoupled Neural Interface(DNI)の高並列拡張などにも取り組んでいる。この成果は、今後より大規模な人工神経回路を複合した自律性の高い人工知能アーキテクチャの実現の基礎となる。



Asynchronous Direct Feedback Alignment (ADFA) の一層



ADFAは京128ノード1024コアまでの良好なスケールリングを確認

萌芽の課題4-1 脳のビッグデータ解析、全脳シミュレーションと脳型人工知能アーキテクチャ
サブ課題G: 脳型人工知能の大規模実問題への応用 (東京大学・原田達也)

目標

大規模動画データ認識と予測を行う人工知能のアルゴリズム開発による脳型人工知能アーキテクチャの有効性の実証

成果内容と科学的・社会的意義

緑: 科学的成果 青: 実用的成果

成果(1).....自然言語記述から動画画像を生成するモデルの構築

近年、ニューラルネットワークを基盤とした生成モデルを利用した画像生成ならびに動画画像生成に関する研究が広く行われている。一般的な画像生成モデルでは、ガウス分布等からサンプリングされた潜在変数を入力として、学習したデータセットに含まれるデータに近い画像を出力するが、近年では画像に関する自然言語で記述された説明文を入力として目的の画像を出力するようなモデルについても研究が行われている。しかしながら、動画画像生成は、単に画像生成の手法を時系列方向に拡張するだけではなく、フレーム間の連続性なども考慮する必要があるため、問題として画像生成よりかなり困難なため、自然言語で記述された説明文からの生成はほとんど研究されていない。また、画像と比較して動画はデータセットの収集や説明文付与のアノテーションのコストが高く、適切なデータセットが存在しないという点も、文章からの動画生成というタスクの難しさの一因となっている。

そこで本研究では、生成したい動画画像を自然言語記述で与えることで目的の動画画像が生成されるような、動画画像生成システムの構築を行った。その際、動画画像が動き情報(フロー)と見た目情報(アピランス)から構成されることに着目し、一段階目でオプティカルフローを生成し、二段階目でそのオプティカルフローに対してアピランスを付与するような、二段階の生成モデルを提案した(図1)。さらに、自然言語記述の説明文から動画画像生成モデルを学習するにあたり、新たに説明文付きの動画データセットを作成し、ベースラインとの比較実験を通して提案手法の有用性を確認した(図2)。

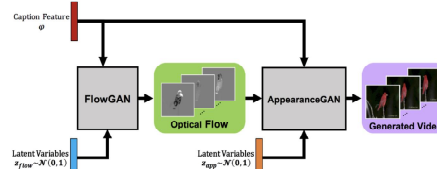


図1: 動画画像生成モデルの概要



“a man with a white shirt, white pants is hitting a ball with a bat at a tennis field”

図2: 自然言語記述から生成された動画例例: 提案手法(上), 比較手法(下)

萌芽的課題4-2

ポ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

(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)

革新技術による脳科学の大量のデータを融合した大規模多階層モデルを構築し、ポスト「京」で大規模シミュレーションにより思考を実現する脳の大規模神経回路を再現し、人工知能への応用を図る。

本課題の主な成果

1. ショウジョウバエ全脳ニューロンの非均等ベンチマーク回路の1/4リアルタイム実行とカイコガ10000均等ニューロンベンチマーク回路のリアルタイム実行に成功
2. mp-LM-CMA-ESを実装しMPI並列神経回路シミュレーションを進化的アルゴリズムでの最適化に成功
3. カイコガ規範触角葉マルチコンパートメント神経回路シミュレーションをおこないa)局所介在神経の応答分化b)個々の匂い情報処理経路の分離を観察
4. ショウジョウバエ規範視葉神経回路シミュレーションによる on edge 動き検出回路の生理データの再現

萌芽的課題4-2 ポ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

目標

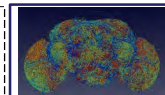
富岳に近い環境上での単体性能5%/ 数百ニューロン神経回路のパラメータ同定/ 一万神経規模のリアルタイムシミュレーション/ 学習を行うシミュレーションの初期実装とそれによる昆虫脳の知能の一部の理解/ 2光子顕微鏡によるシミュレーション用データ取得/ オンライン推定実行/

成果内容と科学的・社会的意義

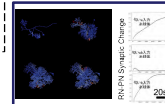
緑: 科学的成果 青: 実用的成果

- 成果(1) 京・FX100・TegraX1, Pezy, Xeon Phi等のアーキテクチャーでメモリバンド幅制限に近い性能を達成した。
- 成果(2) mp-LM-CMA-ESを京上で構築実装し副葉の左右交代的な運動指令パターン生成を達成した。
- 成果(3) 均一細胞1万神経細胞でリアルタイム実行・非均一ショウジョウバエ全脳12000細胞で1/4リアルタイムを達成した
- 成果(4) 拡散近似による神経細胞のStochastic simulationを実装試験し、deterministicモデルとのI-F特性の差を確認した。
- 成果(5) カイコガ規範で機械感覚と匂いを含んだ触角葉のシミュレーションを行い、局所介在神経の反応の分化を観測した
- 成果(6) 一般臭に対する可塑性を含んだシミュレーションを行い、2つの匂いの情報処理の分離に伴う可塑性を観測した。
- 成果(7) ショウジョウバエコネクタム規範の視葉オンエッジ動き検出回路のシミュレーションで方向選択性を再現した。
- 成果(8) オンラインデータ取得にむけての2光子顕微鏡の構築をおこなった。
- 成果(9) カイコガショウジョウバエミツバチの間の神経細胞レベルの類似性を示した。

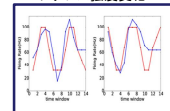
- (1)の成果により、メモリバンド幅程度の性能がでている富士通アーキテクチャーに比肩する実行効率も他でも可能であることがわかった。京でのコア部分では15%弱の実行効率を達成しており、本成果により富岳でも想定される昆虫全脳リアルタイム超に十分な単体性能が期待できる。
- (2)は神経回路のみならずMPIシミュレーションに対してのパラメータ推定が可能になったことを意味する。なお、ほとんどの系ですべての構成神経のすべての活動・計測は知られている系は希少であり、本成果は複雑な出力パターンを生成する神経回路網が推定できるこの方法は神経回路の理解に近づく強力なツールである。
- (3)の成果は富岳上の全脳リアルタイムシミュレーションにむけての重要なマイルストーンであり、この成果のみならず全脳リアルタイムシミュレーションをつかった生理実験とくみあわせた神経回路オンライン推定やロボットをつかった現実世界への応用への足掛かりになる。またこれにより世界最高FLOPSの神経回路シミュレーションが可能となる。
- (4)の成果はまだ初期的であるが知能の根拠にある神経細胞のゆらぎを含めた高解像度のシミュレーションの初めてのスパコン上の実装になる。本成果によって決定論的なモデルではとらえきれない高解像度の認識や意思のゆらぎのシミュレーションの道が開かれたといえる。
- (5)の成果により精密なマルチコンパートメントモデルによって匂い感覚一次中枢がはじめて再構成できた。また、本成果はしくみが未解明であった局所介在神経の応答分化に説明の一つを与えるものである。
- (6)の成果は(5)により全体の回路の概観ができていた触角葉モデルにSTDPで神経可塑性をあて、交互に匂いを与えた場合の匂い認識の精緻化をもたらし個々の匂い情報処理経路の独立化を観測したもので、本成果は昆虫脳内回路に即したマルチコンパートメントモデルで初めてシナプス可塑性による学習効果を示したものである。
- (7)の成果ではショウジョウバエ電顕コネクタムデータをシナプス強度としてシミュレーションに入れ込み、生理実験の受容野をほぼ再現した。本成果は、おそらく詳細なコネクタムを動き検出という機能再現神経シミュレーションに交換できた世界初の成功例であり、その意味で大きなマイルストーンである。
- (8)の成果では昆虫生理測定を念頭においた2光子顕微鏡システムを構築できた。本成果はシミュレーション結果を検証するツールとして使用することが期待できると同時に、さらに進んだオンラインデータ同定の基盤として開発中である。
- (9)の成果では行動指令を司る下降性神経、報酬などを司るとされるひとつのオクトハミン神経など単一神経レベルで種間の類似性を発見した。本成果は複数種の神経細胞の情報をシミュレーションに入れ込める可能性を下支える。



ショウジョウバエ全脳12,393ニューロンシミュレーション



触角葉シミュレーション: 構成神経応答例と交代の匂い刺激による受容体-出力細胞のシナプス強度変化



左右交代的な出力応答を目的関数にmp-LM-CMA-ESで生成した32細胞全結合モデルの出力応答