

令和元年度高性能汎用計算機高度利用事業  
「ヘテロジニアス・メニーコア計算機による大規模計算科学」  
成果報告書

令和元年 5 月 29 日  
国立研究開発法人理化学研究所  
姫野龍太郎

## 補助事業の名称

「ヘテロジニアス・メニーコア計算機による大規模計算科学」

### 1. 補助事業の目的

粒子系・構造格子系のソフトウェア開発フレームワークと線形代数演算サブルーチンパッケージ BLAS のヘテロジニアス・メニーコアプロセッサへの移植、および、これらを活用して分子、宇宙、素粒子、プラズマ、神経系、津波・地震防災、およびゲノム解析等、様々なアプリケーションの実装と性能評価を行う。本研究開発では、まず高いメモリバンド幅をもつヘテロジニアス・メニーコアプロセッサに対する新しいプログラミングモデルを確立し、多様なアプリケーションやアルゴリズムに対しての有用性を実証する。その中には、実用性は高いが、従来は超メニーコアシステムやアクセラレータシステムでは困難とされてきたものも含まれる。また、ゲノム解析を出発点にデータ科学への適用も積極的に展開する。さらに、プログラミングモデルとノウハウを共有するユーザ・コミュニティを形成して、パワーユーザを育成し、PEZY-SC2 プロセッサを始めとする次世代のヘテロジニアス・メニーコアプロセッサの性能を十二分に引き出した大規模計算を行って各分野の最先端研究を加速する。

### 2. 令和元年度（報告年度）の実施内容

#### 2-1. 当該年度（令和元年度）の事業実施計画

本年度は、理研和光戎崎研にある皐月（256 プロセッサ）理研神戸の牧野研の紫陽花（128 プロセッサ）、KEK にある睡蓮（384 プロセッサ）を用いて、中規模（数百プロセッサ）並列アプリケーションプログラムを整備する。その一部はソースコードを公開し、テスト計算を行う環境を整備する。詳細は、以下に述べる。また、国際ワークショップを開催するとともに、各種の国際学会に積極的に参加し、成果の普及に努める。

- (1) 研究統括、広報、流体・磁気流体、および大脳シミュレーション：姫野龍太郎（理化学研究所）  
サーバーを用意し、マニュアルなどを整備したアプリケーションプログラムのソースコードを公開する。その一部に関しては、テスト計算を行う環境を整備する。公開予定プログラムは光線追跡、BLAS、FFT などである。国産の新規開発プロセッサである MN-Core プロセッサをテストし、このプロジェクトで開発した高速化手法が有効か検証を行う。また、SC2019 等の国際会議に参加して、成果の普及に努める。
- (2) ミドルウェア、BLAS の開発および第一種粒子法シミュレーション：牧野淳一郎（神戸大学）  
昨年度までに開発した、粒子系シミュレータ開発フレームワーク FDPS、規則格子フレームワーク Formura をベースに高性能な PEZY-SC2 上での粒子コード、流体コードの開発成果を汎用フレームワークにバックポートし、粒子系シミュレータ開発フレームワーク FDPS、規則格子フレームワーク Formura の PEZY-SC2（または 3）での実装を行い、ソースコードとドキュメントを公開する。また、国産の新規開発プロセッサである MN-Core プロセッサをテストし、このプロジェクトで開発したフレームワークが有効か検証を行う。
- (3) SPH 法および DEM 法による防災シミュレーション：古市幹人（海洋研究開発機構）

PEZY-SC 向けの Discrete Element Method (DEM) モデルの性能検証と、混合精度演算による粒子法の高速度化技術の開発を行う。昨年 FDPS を用いて DEM コードを実装したが、DEM は特に接線方向の接触力計算が複雑であるため、コードの精度検証を十分に行う必要がある。そこで、他のコードと結果比較を行うなどし、実装の信頼性を保証する。また、並列化性能の改善にも取り組み、スケーリングデータなどを整理する。これらにより、PEZY-SC における実用的かつ高性能な DEM コードを公開する。また、近年のメニーコアにおいて性能向上が著しい低精度演算器を活用した、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) シミュレーションの高速化に取り組む。ここでは、目的の流体計算精度に対する、演算性能と粒子数のトレードオフ関係を洗い出すことで、PEZY-SC にとって最適な実装方法を検討する。

(4) 神経系シミュレーション：山崎匡（電気通信大学）

小脳強化学習の理論に従って強化学習を行えるように、小脳神経回路モデルを改訂する。具体的には分子層介在ニューロンのシナプス可塑性の数理モデルを、既に PEZY-SC2 上に移植済みの小脳モデルに組み込み、計算の最適化を施して実時間シミュレーションの実現を試みる。さらに、水迷路課題やリーチング課題等の代表的な強化学習課題を通してベンチマークを行う。1 PEZY-SC2 チップで 1 学習モジュールを実装する。ただし、並列強化学習は常に視野に入れておくものとする。開発したソースコードを公開する。

(5) 格子 QCD シミュレーション、素粒子摂動計算：石川正（高エネルギー加速器研究機構）

格子 QCD コードについては、中規模並列レベルのメニーコア・アクセラレータシステムを使うためのプログラムのチューニング方法、典型的な処理に対するコード移植の効率化などについてまとめる。超新星爆発シミュレーションのプログラムについても開発と高速化を行う。

摂動計算のファインマンループ積分に関しては、PEZY-SC2 用のコードを生成するコンパイラ (goose) を用い、中規模並列レベルでの物理計算を行うことができる。すでにコンパイラ等や物理計算については研究成果を発表している。物理計算を継続し計算手法と多倍長計算の評価を取りまとめる。国内外の会議、研究会で成果の発表を行うと同時に、参加者との打ち合わせを行う。

(6) ゲノム解析：黒川顕（国立遺伝学研究所）

アミノ酸配列検索用の PZLAST の精度をさらに向上させるとともに、公開されている膨大なショットガンメタゲノムデータから特定のアミノ酸配列を超高速に検索する事が可能な技術を開発する。また、ウェブ経由で一般ユーザが PZLAST を実行する事が可能な環境整備をする。

## 2-2. 実施内容（成果）

(1) 研究統括、広報、流体・磁気流体、および大脳シミュレーション：姫野龍太郎（理研）

アプリケーションプログラムのソースコードとマニュアルを整備してウェブにて公開した[1]。公開中のアプリケーションは、二次元FFTコード（pzFFT2D）、高精度演算ライブラリ QD を移植したコード（pzqd） [2]、光線追跡コード[3]である。その他の公開予定プログラムについては、ソースコードもしくはバイナリーコードとマニュアルの整備が出来次第公開する予定である。

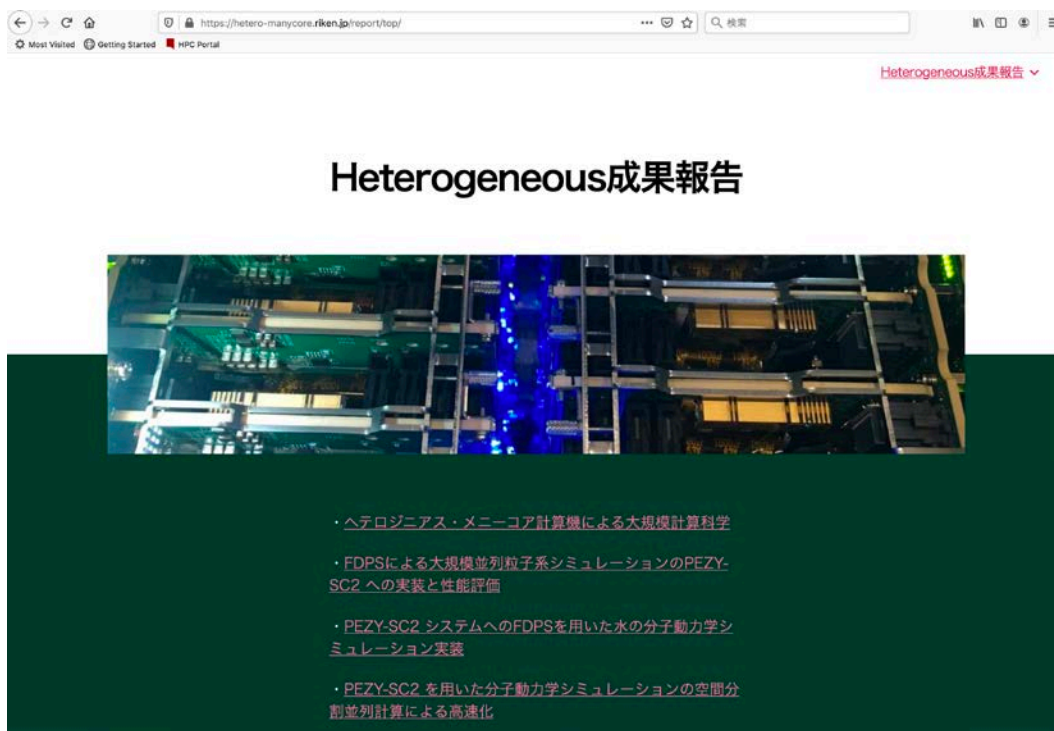


図1 成果報告ページのスクリーンキャプチャ

また、SC19に参加し、理研の研究展示ブースの一角でPRした。図2に示すようにブースにポスターを貼り、ビデオでも展示し、説明を行った。我々がこのプロジェクトで開発しているソフトウェアの中では、脳シミュレーションの関心が高く、中身の細かな質問を受けた。



図2 ヘテロプロジェクトのパネルおよびビデオ展示

さらに、大脳皮質シミュレーションについて、ヘテロジニアスメニーコアシステムの有効性を調べるため、SC2 プロセッサ搭載システム向けに神経回路シミュレータ MONET の移植を行い、性能評価を行った[4]。大脳皮質シミュレーションにおいて演算のボトルネックとなるシナプスコンダクタンスの状態更新の計算部分について、SC2 にオフロードした。PZCL 版 MONET を菖蒲システム B の 9~25 基の SC2 プロセッサを用いて実行し、最大で約 1300 万神経細胞からなる大脳皮質シミュレーションを実行した。性能評価の結果から、SC2 の演算性能とホスト計算機の大容量メモリが、大脳皮質シミュレーションの大規模化に有効であることが示された。

国際ワークショップについては、3月10日-11日に理研で行う予定で、Prof. Jack Dongarra らを招聘し準備を進めていたが、新型コロナウイルス感染拡大防止のため中止とした。

## (2) ミドルウェア、BLAS の開発および第一種粒子法シミュレーション：牧野淳一郎（神戸大学）

昨年度までに開発した、粒子系シミュレータ開発フレームワーク FDPS[5]、規則格子フレームワーク Formura をベースに高性能な PEZY-SC2 上での粒子コード、流体コードの開発成果の汎用フレームワークへのバックポートをおこなった。結果として、粒子系フレームワークについて、PEZY-SC2 だけでなく GPGPU である NVIDIA Volta においても、理論ピーク性能の 30%程度と非常に高い実効性能を実現できた。PEZY-SC2 での実装では、SC2 とその汎用ホストとなる Xeon-D プロセッサの性能比が非常に大きかったため、tree reuse 等のアルゴリズムを導入する他、tree 構造の構築等も SC2 側で行うことが必須であったが、Volta を用いた多くのシステムでは CPU と GPU の性能差がそこまで大きくはなく、ツリー構築は CPU 側で十分な性能が得られた。このため、汎用の FDPS フレームワークでは、アクセラレータを使うものでもツリー構築は汎用プロセッサで行っている。規則格子フレームワーク Formura についても PEZY-SC2 での性能評価に基づいたバージョンを公開した。さらに、MN-Core プロセッサについて、粒子間相互作用計算の部分を実装し、十分な効率が得られることを確認した。

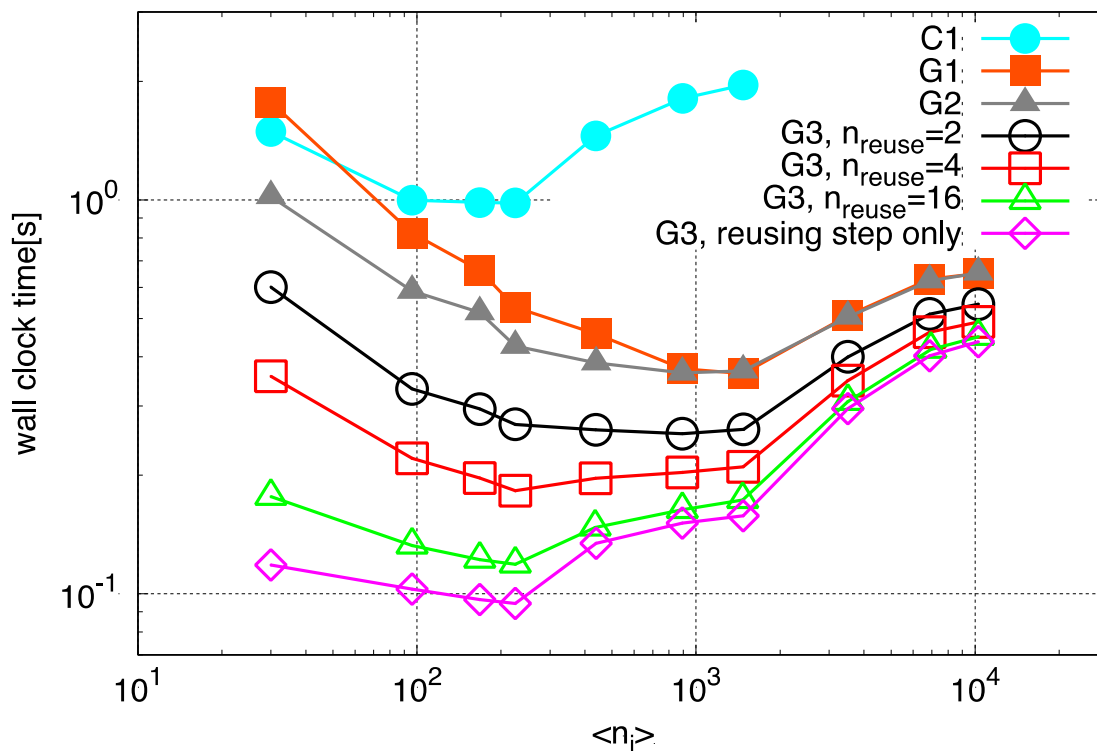


図3：NVIDIA Volta 向けの性能向上の効果。横軸は相互作用リストを共有する粒子数、縦軸は1ステップあたりの計算時間、粒子数400万の場合。水色丸が従来のアルゴリズム、緑の3角が改良した結果。ベストケースでほぼ10倍の性能になっていることがわかる[5]。

### (3) SPH法およびDEM法による防災シミュレーション：古市 幹人（海洋研究開発機構）

R1年度の成果として、前年度までに取り組んだ相互作用リストの共有化によるSPHコードの最適化について、PEZY-SCにおける理論限界との比較を行った。性能測定は理研が所有する皐月において行った。理論限界性能における実行時間  $t$  は以下において与えられる。

$$t = C/F + M/B + K/I \quad (1)$$

ここで、分母 ( $F, B, I$ ) は各理論限界性能であり、 $F$  は理論演算性能で 2.9 TF、 $B$  はメモリバンド幅であり Stream テストの実測から 60 GB/s とした、 $I$  はプロセッサの I/O バンド幅であり MPI 通信から理論値 1.5 GB/s とした。分子 ( $C, M, K$ ) は SPH カーネルから与えられるものであり、 $C$  は一粒子あたりの演算数であり 70、 $M$  はアクセスするデータ量であり影響カーネル半径と共有相互作用リストに含まれる粒子数 (# of  $i$ -particle) に依存、 $K$  は MPI 通信バッファサイズから求めた (シングルデバイス実行時は 0)。図4において、3次元で格子状に配置した SPH 粒子群に対して、 $c$  を採用して計算した性能測定結果を示す。シングルデバイスで実行した際には、図4(左)で示すように # of  $i$ -particle  $\sim 1$  では理論限界時間の2倍程度となるが、# of  $i$ -particle  $\sim 2^4$  において1.5倍程度まで圧縮することが出来た。これは、本プロジェクトで提案した相互作用リストの共有化は、キャッシュの活用を促すことで性能向上が達成するため[6,7]、理論限界に対するメモリアクセスコストを相対的

に下げたことに起因すると考えられる。また、32 デバイスを用いた結果、(図 4 (右)) においても理論限界時間の 1.5 倍程度の計算時間短縮が達成できた事を示している。

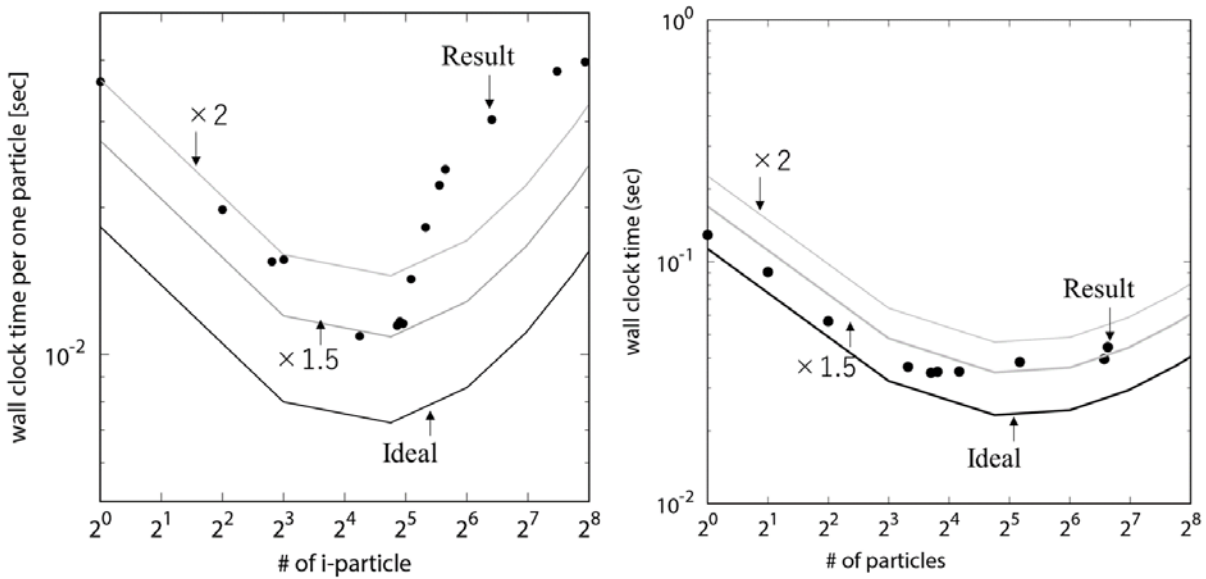


図 4: カーネル半径  $H = 2.1$  の計算における理論限界性能と実測値の比較。各図は (左) シングルデバイス (右) 32 デバイス使用時を示す。デバイス当たりの粒子数は 100 万粒子に固定した、

また前年度に開発した FDPS を用いて PEZY-SC に実装した DEM コードの検証を実施した [8]。DEM は地滑りなどの防災シミュレーションに用いられる手法である。検証には Dam break 問題を用いた (図 5 (左))。箱の角に格子状に充填された粒子が転げ落ち、安息角において停止する。この状態を計算するためには、計算過程が複雑な接触摩擦項が正しく実装されなくてはならない。図 5 (右) において、各方向の運動量成分の時間発展を示した。粒子が開始から 0.2 秒程度の間に崩落して、その後、摩擦・粘性項により減衰することで、1 秒後にはほぼ静止状態となっている。これらの挙動は、モデル方程式から想定されるものと一致していることから、PEZY-SC に実装した DEM が正しく動作していることが検証できた。

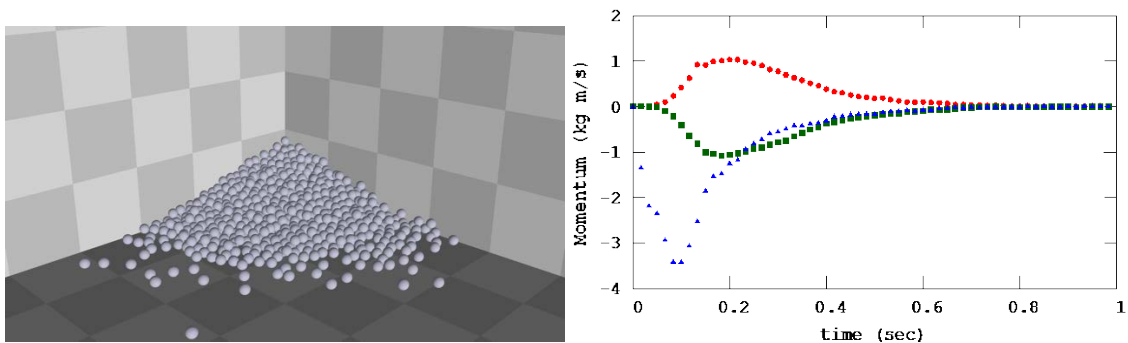


図 5: PEZY-SC を用いて計算した Dam break 問題の (左) 終状態でのスナップショット (右) 運動量の時間発展。赤い丸は x 軸方向、緑の四角は y 軸方向、青い三角は z 軸方向の運動量。

#### (4) 神経系シミュレーション：山崎匡（電通大）

昨年度は小脳の神経回路で強化学習ができることを見いだしたため、今年度はその能力を機械学習へ応用することを目指して、スパイクニューロンによる実装を試みた[9]。これまでに開発してきたスパイクネットワークモデルに分子層介在ニューロンのシナプス可塑性を実装することで、actor-critic 型の強化学習アルゴリズムを実現した。動作確認として、瞬目反射条件付けの数値シミュレーションを行い、プルキンエ細胞の発火が途上線維刺激提示の直前で停止することを確認した（図 6A）。具体的には学習が進むにつれて発火を停止するタイミングが前倒しになった。これは実際の動物の小脳で観察される現象であり、再現に成功したと言える。また、この強化学習アルゴリズムを将来的に機械学習のベンチマーク環境でテストするために、代表的な環境である OpenAI Gym と接続するためのインタフェースを開発した。OpenAI Gym は Python のインタフェースを提供しているが、そのラッパーを C 言語で作成し、C 言語で作成したプログラムから OpenAI Gym にアクセスできるようにした（図 6B）。これらの成果により、小脳型強化学習アルゴリズムを機械学習に応用する準備を整えている。一連の研究は、現在注目を集めているニューロモルフィックコンピューティングと呼ばれる研究分野の流れをくんだものである。

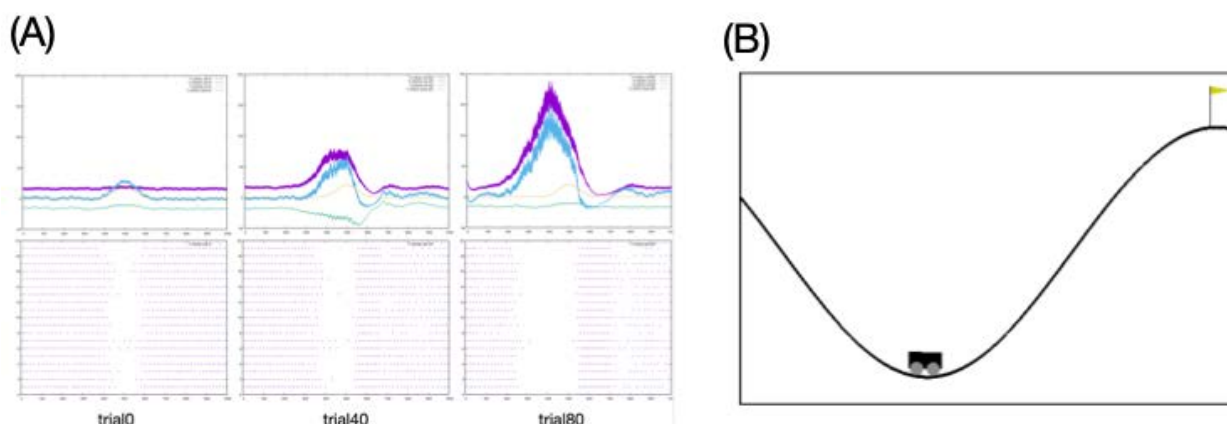


図 6: 今年度成果の概要。A: 小脳スパイクネットワークモデルによる強化学習アルゴリズムの瞬目反射条件付けによる検討。上段は緑の線が計算された TD 誤差、残りは分子層介在ニューロンへの入力電流を表す。横軸は時間、縦軸は誤差の値。Trial 0 では TD 誤差はほぼ平坦であるが、学習によって誤差が評価され、trial 40 では値が大きくなる。学習が完了した trial 100 では誤差は再び 0 に戻る。下段はプルキンエ細胞の発火のラスタプロット。発火が停止するタイミングが学習が進むにつれて前倒しになる。B: OpenAI Gym の Mountain Car を動作させている模様。

#### (5) 格子 QCD シミュレーション、素粒子摂動計算：石川正（高エネルギー加速器研究機構）

格子 QCD は強い相互作用を記述する量子色力学 (QCD) の非摂動論的な定式化であり、数値的な手法を用いた解析を可能にする。精密な理論計算のためには大規模数値シミュレーションが必要であり、そのための高速な計算のプラットフォームとして PEZY-SC/SC2 メニーコアプロセッサの応用を行なった。特に計算時間の大きな割合を占めるフェルミオン演算子の線形方程式の問題に適用し、



単一のプロセッサ向けコードおよび複数プロセッサによる並列化のコードの実装と性能評価を行なった[10]。

素粒子摂動計算においては、中里が開発した Goose コンパイラにより、メニーコアのアクセラレータを利用できる openCL カーネルを生成し、それを PEZY-SC2 クラスタに実装してファインマンループ積分の数値計算を実施した。PEZY システムを用いてセルフエネルギー型の 3 ファインマンループ積分（7次元）の数値計算シミュレーションを実施しているところである。また openCL カーネルを NVIDIA GV100 用に出力するようコンパイラの拡張を行なった。またこれまでの研究のまとめを行った[11]。

超新星爆発シミュレーションのプログラム開発を本格化した。重力崩壊型超新星爆発は観測データとの比較など定量的な計算の重要性が高まっているが、爆発のメカニズムを含め謎が多く、大規模数値計算によってのみ解明が可能である。計算の核となるのは、高密度物質の流体力学と結合したニュートリノに対するボルツマン方程式の解法である。安定性のために陰解法を採用すると、線形方程式の解法がボトルネックとなる点で格子 QCD と類似性があるが、それ以外にもコストがかかる箇所がいくつかある。特にニュートリノと物質の相互作用項の計算は、反応過程毎の積分計算となる。有効なアルゴリズムの探索を含め、球対称近似の下で、これらのボトルネック部分を演算加速器にオフロードするコードを実装し、アルゴリズムの高速化を行った[12, 13]。

#### （6） ゲノム解析：黒川顕（国立遺伝学研究所）

アミノ酸配列検索用の PZLAST の精度をさらに向上させるとともに、公開されている膨大なショットガンメタゲノムデータから特定のアミノ酸配列を超高速に検索する事が可能な技術を開発した[14]。

PZLAST の配列相同性検索アルゴリズムは、塩基配列用の高速相同性検索 GPGPU ソフトウェア CLAST を基盤としているが、(1) 塩基配列ではなくアミノ酸配列を用いる事で検出感度を向上させた、(2) クエリ配列と参照配列を入れ替えることで検索速度を向上させた、(3) MIMD マルチコアプロセッサ PEZY-SC2 を使用し、配列相同性検索時に大量のスレッドを使用することで高速な検索を実現した、の大きく 3 つの特徴を有する。この PZLAST による超高速相同性検索技術を広く一般に提供する事を目的として、ウェブ経由でユーザが PZLAST を実行する事が可能な環境も整備をした。ウェブサービス版の PZLAST では、微生物統合 DB「MicrobeDB.jp」収録の 4,339 ショットガンメタゲノムデータから予測した遺伝子を参照 DB とした配列検索を実現した。参照 DB の容量は 2020 年 3 月時点で 2.5TB であるため、既存のソフトウェアによる配列検索は極めて困難であるが、PZLAST では約 350aa の遺伝子配列をクエリとした場合、約 10 分で結果を出力する事ができる。また、膨大な出力結果を、参照データに付随する環境情報を利用することで、相同配列が存在する環境（ヒト BodyMap、ワールドマップ、ワードクラウド等）を視覚的に提供している。ユーザーは、解析あたり最大 10,000 個の遺伝子の相同性を一度に検索することができる（図 7A）。入力したすべての遺伝子に対する検索を完了すると、遺伝子ごとの上位 10,000 ヒットをリストで返すと同時に、膨大な出力結果を、参照データに付随する環境情報を利用することで、相同配列が存在する環境を視覚的に提供している。具体的には、相同遺伝子の環境分布を示す Metagenome and Microbes Environmental Ontology (MEO) クラス（図 7B）、人体における相同遺伝子の分布を示す Foundational Model of Anatomy ontology (FMA)

クラス（図 7C）、および地理的分布（図 7D）により結果を可視化している。

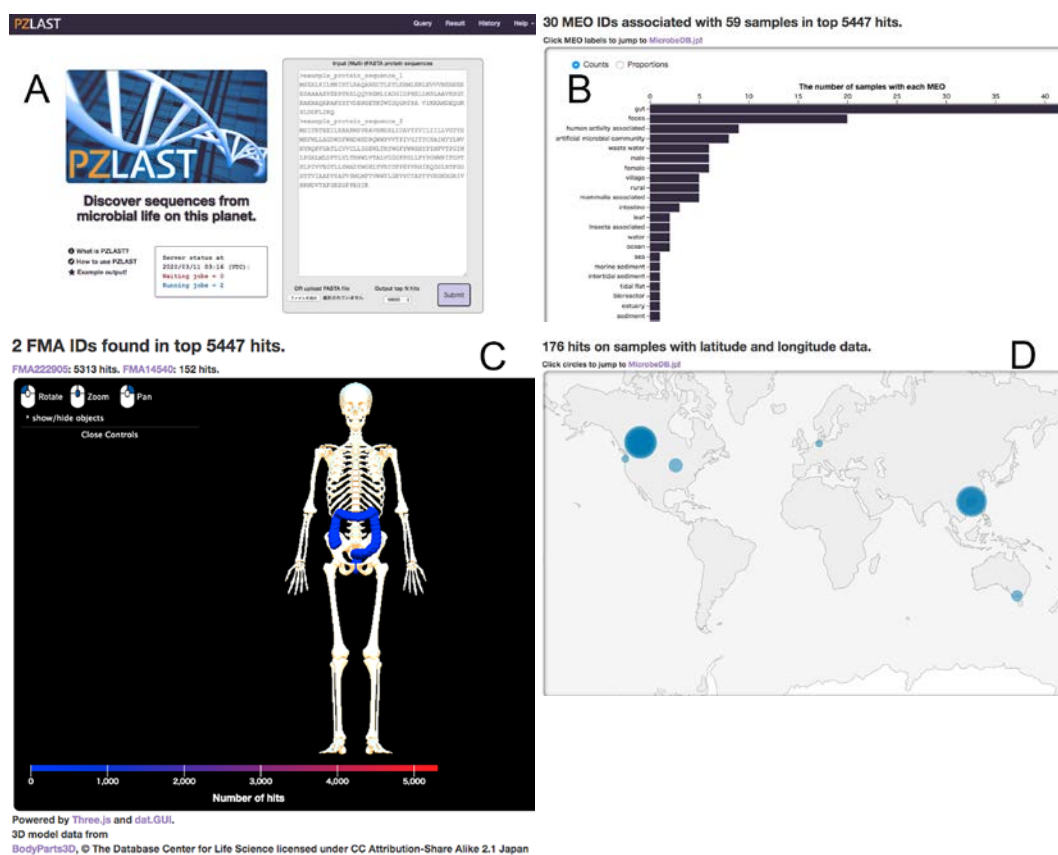


図 7. ウェブサービス版 PZLAST の概要。A) PZLAST ウェブインタフェース。B) MEO クラスを用いた PZLAST 結果の概要。C) BodyParts3D モデルを用いた FMA クラスによる PZLAST 結果の概要。この図では、ヒト大腸のみが強調表示されており、入力遺伝子配列の相同遺伝子がヒト腸内で多数見つかったことを示している。D) 地理的分布に基づく PZLAST 結果の概要。青丸は相同遺伝子を有するサンプルの採取場所（もしくは研究施設の所在地）を示している [14]。

### 2-3. 活動（研究会の活動等）

- 第11回研究連絡会議・ワークショップ（参加人数17名）  
2019年10月25日：神戸大学 先端融合研究環 3F 惑星科学研究センター
- 第12回研究連絡会議・ワークショップ（参加人数16名）  
2020年1月21日：国立遺伝学研究所・生命情報研究センター4階会議室（静岡県三島市）

### 2-4. 実施体制

業務項目	担当機関	担当責任者
(1) 研究統括、広報、流体・磁気流体、および大脳シミュレーション	国立研究開発法人理化学研究所	姫野龍太郎
(2) ミドルウェア、BLASの開発および第一種粒子法シミュレーション	国立大学法人神戸大学	牧野淳一郎
(3) SPH法およびDEM法による防災シミュレーション	国立研究開発法人海洋研究開発機構	古市幹人
(4) 神経系シミュレーション	国立大学法人電気通信大学	山崎 匡
(5) 格子QCDシミュレーション、素粒子摂動計算	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構	石川 正
(6) ゲノム解析	国立遺伝学研究所	黒川 顕

## 別添 1 学会等発表実績

### 論文

- 1) 姫野龍太郎、戎崎俊一、牧野淳一郎、阪口秀、古市幹人、山崎 匡、石川 正、黒川頭、2020、ヘテロジニアス・メニーコア計算機による大規模計算科学 (代表: 姫野龍太郎) 論文集、1-6
- 2) 菱沼利彰・中田真秀, PEZY-SC2 上における倍々精度行列-行列積 Rgemm の高速化と性能評価, ヘテロジニアス・メニーコア計算機による大規模計算科学 (代表: 姫野龍太郎) 論文集、75-84
- 3) 滝澤慶之・戎崎俊一・小池邦昭, 阜月用光学設計システムの開発, ヘテロジニアス・メニーコア計算機による大規模計算科学 (代表: 姫野龍太郎) 論文集、91-96
- 4) 五十嵐潤, 2020, 菖蒲システム B を用いた MONET シミュレータによる大脳皮質シミュレーション, ヘテロジニアス・メニーコア計算機による大規模計算科学 (代表: 姫野龍太郎) 論文集、41-40
- 5) 岩澤全規、行方大輔、野村昂太郎、牧野淳一郎, 2020, FDPS による大規模並列粒子系シミュレーションの PEZY-SC2 への実装と性能評価, 2020, ヘテロジニアス・メニーコア計算機による大規模計算科学 (代表: 姫野龍太郎) 論文集、7-13
- 6) N. Hosono, M. Furuichi, The Performance Prediction and Improvement of SPH with the Interaction-List-Sharing Method on PEZY-SCs, Computational Science - ICCS 2019, 19th International Conference, Faro, Portugal, June 12-14, 2019, Proceedings, Part V pp.476-482 (2019), DOI:10.1007/978-3-030-22750-0\_40
- 7) 古市幹人、細野七月 PEZY-SC における SPH の実装と相互作用リスト共有化による最適化検証、ヘテロジニアス・メニーコア計算機による大規模計算科学 (代表: 姫野龍太郎) 論文集、25-30
- 8) 細野七月、古市幹人 Discrete Element Method の FDPS を用いた実装の検証、2020, ヘテロジニアス・メニーコア計算機による大規模計算科学 (代表: 姫野龍太郎) 論文集、31-34
- 9) 山崎 匡・古荘航, ヘテロジニアス・メニーコアプロセッサへの人工小脳の構築, ヘテロジニアス・メニーコア計算機による大規模計算科学 (代表: 姫野龍太郎) 論文集、35-40
- 10) 青山龍美、石川健一、石川正、松古栄夫, 格子 QCD シミュレーションへの PEZY-SC/SC2 プロセッサの応用, 2020, ヘテロジニアス・メニーコア計算機による大規模計算科学 (代表: 姫野龍太郎) 論文集、69-74
- 11) 石川正、湯浅富久子、台坂博、中里直人、Elise De Doncker, 素粒子物理学におけるファインマン・ループ積分, ヘテロジニアス・メニーコア計算機による大規模計算科学 (代表: 姫野龍太郎) 論文集、57-60
- 12) H. Matsufuru, K. Sumiyoshi, and H. Okada, 2020, Simulations of Core Collapse Supernova Explosion on PEZY-SC Processors and GPUs, Computational and Experimental Engineering and Sciences. ICCES 2019, Mechanisms and Machine Science, vol 75, Springer, Cham.
- 13) 松古栄夫・住吉光介, 超新星爆発シミュレーションの Pezy-SC プロセッサにおける高速化, ヘテロジニアス・メニーコア計算機による大規模計算科学 (代表: 姫野龍太郎) 論文集、61-68
- 14) 森宙史、東光一、石川仁、村上紀光、酒井智史、加藤成晃、黒川頭, 2020, 超高速相同性検索ソフトウェア「PZLAST」, ヘテロジニアス・メニーコア計算機による大規模計算科学 (代表: 姫野龍太郎) 論文集、45-49

- 15) 古石貴裕, 2020, PEZY-SC2 を用いた分子動力学シミュレーションの空間分割並列計算による高速化 ヘテロジニアス・メニーコア計算機による大規模計算科学 (代表: 姫野龍太郎) 論文集、20-24
- 16) 野村昂太郎、沼田龍介、八柳祐一、行方大輔、岩澤全規、牧野淳一郎, 2020, 超並列粒子法シミュレーションプログラム自動生成ツールの紹介～並列プログラミングが初心者にもできる!～, プラズマ核融合学会誌, 96 (2020) 57-63.
- 17) 野村昂太郎・岩澤全規・行方大輔・牧野淳一郎, PEZY-SC2 システムへの FDPS を用いた水の分子動力学シミュレーション実装, ヘテロジニアス・メニーコア計算機による大規模計算科学 (代表: 姫野龍太郎) 論文集、14-19
- 18) 八柳祐一, PEZY-SC 向け倍精度 Biot-Savart 積分カーネルの開発, ヘテロジニアス・メニーコア計算機による大規模計算科学 (代表: 姫野龍太郎) 論文集、85-90

### 学会発表等

- 1) Y. Kato, T. Ebisuzaki, T. Tajima, Wakefield Acceleration in the M87 jet, 61st Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 2019.10, Florida, USA
- 2) J. Makino, Current status of FDPS and Future plans, The 2nd R-CCS International Symposium Feb 17-18 16, 2020, Kobe, Japan
- 3) J. Makino, Applications of MN-Core Deep-Learning processor to large-scale astronomical simulations, CHALLENGES AND INNOVATIONS IN COMPUTATIONAL ASTROPHYSICS Sept 16, 2019, St. Petersburg, Russia
- 4) M. Furuichi and D. Nishiura 2.4 billion particles DEM simulation of accretionary prism formation using an iterative dynamic load balances, DEM8, University of Twente, 21 - 26 July 2019, Netherland
- 5) M. Furucich, J. Chen, N. Hosono, and D. Nishiura, Massively Parallel DEM Simulation and Stress Chain Characterization with over Billion Particles, SIAM PP20, 12 - 15 February 2020, Seattle, USA
- 6) T. Yamazaki and J. Igarashi. Introduction to High-Performance Neurocomputing. Tutorial T-1. Computational Neuroscience (CNS\*2019), July 13-17, 2019, Barcelona, Spain.
- 7) 山崎匡, 小脳型機械学習の研究開発 (招待講演), 異分野融合ワークショップ: 脳型情報処理によるロボットラーニングの技術革新, 2020年1月6日, 奈良先端科学技術大学院大学, 奈良.