

## コスモ・シミュレータの開発—宇宙の始まりから生命の誕生に至る宇宙全史の探究—

### ① 計画の概要

基礎物理分野（宇宙・素粒子・原子核）と計算機工学分野の連携により、宇宙の始まりから惑星上の生命の誕生に至る宇宙全史をシミュレートする専用の計算実験装置「コスモ・シミュレータ」を開発する。コスモ・シミュレータのシステム・アーキテクチャは、多数の演算コアを内蔵したチップによる演算加速機構と汎用プロセッサで構成された並列システムである（図1）。国産の技術を用いた新たな演算加速器の開発により、価格当たりの性能、電力当たりの性能を「汎用」システムの5-10倍に向上させ、次世代のスーパーコンピュータ技術開拓に資する。そして、コスモ・シミュレータを宇宙史の未踏問題に重点投入することで、宇宙の始まりから生命の誕生に至る宇宙全史解明のブレークスルーを目指す。対象とする計算は、(1) 超弦理論に基づく宇宙誕生過程、(2) QCD 宇宙相転移、(3) 膨張宇宙における天体形成史、(4) 惑星形成と生命起源、である。(1) では、超弦理論の非摂動的行列模型に基づき、9次元から3次元宇宙へのコンパクト化の計算を行う。(2) では、有限温度・有限密度の格子QCD計算により、相転移の次数を決定する。(3) では、星形成、超新星爆発、銀河形成、ブラックホール形成について、近似のない一般相対論化を含む輻射流体力学計算を行う。(4) では、乱流中のダスト凝縮、微惑星から惑星形成、惑星大気形成等の大規模N体・流体計算を行う。また、「宇宙生命計算科学連携拠点」の下で、生命科学分野と連携し、星間空間および宇宙ダスト上での有機分子生成過程について、密度汎関数理論に基づく量子力学計算を実施する。さらに、本システムは基礎物理学コミュニティに広く資源提供するものであり、効率的利用のための並列化支援やそのためのソフトウェア等の提供も行う。本計画は、基礎物理分野と計算機工学分野の融合研究である。

### ② 学術的な意義

宇宙の始まりと生命の起源は、人類が探究し続けてきた最も根源的な問いである。宇宙の始まりについては、超弦理論に基づく9次元から3次元宇宙へのコンパクト化の計算ができるようになってきている。コスモ・シミュレータによって、計算分解能を格段に向上させることで、3次元宇宙誕生の仕組みに迫ることができる。宇宙誕生から10<sup>-5</sup>秒で起こるとされているQCD相転移は、有限温度・有限密度の格子QCD計算によって、本格的な研究が始まりつつあり、相転移次数が決定されれば、原始天体の種形成が明らかとなる。膨張宇宙における天体形成史は、最初の星や銀河がどのように誕生したのか、巨大ブラックホールの起源は何か、超新星爆発のメカニズムはといった未解決問題が残っている。これらの問題を解き明かすためには、重力、物質、輻射を無矛盾に解く輻射流体力学の実行が必要であり、コスモ・シミュレータは、星スケールと銀河スケールをつなぐ輻射流体力学の実現を可能にする。近年報告された重力波の初の直接検出は、超弦理論のゲージ/重力対応の必要性を高め、ブラックホール成長について合体の重要性を再認識させている。また、1995年以降の太陽系外惑星の多様性の発見により、太陽系形成論のパラダイムシフトを迫られているが、これまででない大規模N体・流体計算により惑星系の多様性を解き明かすことができる。さらに、太陽系外惑星の発見により、生命を宿しうる惑星（ハビタブル・プラネット）の探究が現実的なものになっている。現在、すばる望遠鏡、ALMA望遠鏡、Kepler衛星による観測や、JAXAの“はやぶさ2”、たんぼぼ計画などの宇宙実験によって精力的な研究が行われている。IMTは、(1)宇宙で最初の星と銀河の誕生の解明、(2)太陽系外惑星の生命の発見、を2大目標として、計画が進行している。

### ③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

基礎物理学分野において、高性能計算機による数値シミュレーションは欠くべからざる研究手段となっている。我が国の数値シミュレーションは、各分野で世界第一級のレベルにあるが、保有する全スパコン資源の国別シェアで見ると、1位中国（45.4%）、2位アメリカ合衆国（21.8%）、3位日本（6.2%）（Top 500 Home Pageより）、となっており日本は大きく後塵を拝している。中国では、自国の技術によりスパコンを開発する計画も進んでいる。我が国では、各大学、研究所のスパコンに加え、ナショナル・フラグシップ・マシン（NFM）として「京」コンピュータがあり、さらにポスト「京」の開発が進んでいる。

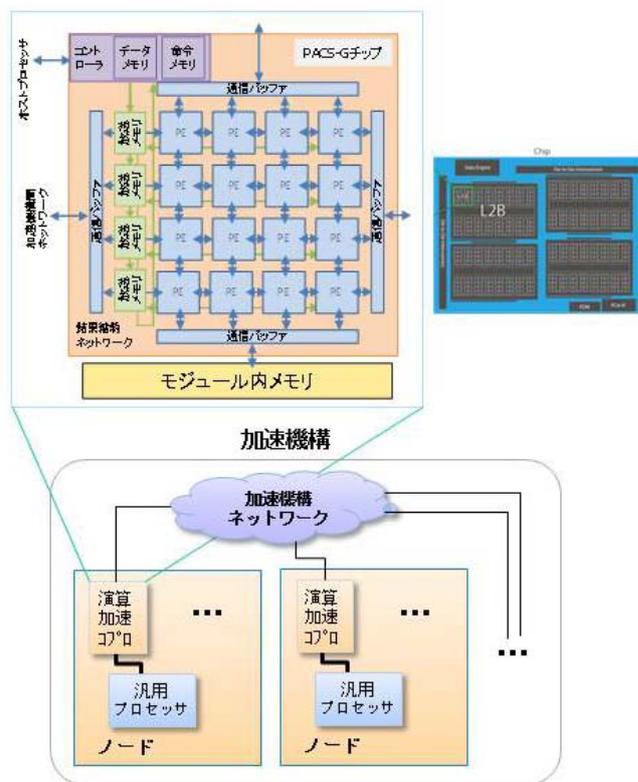


図1 コスモ・シミュレータのアーキテクチャ

しかし、NFM は特定の分野が占有できるものではなく、「京」コンピュータの場合、素粒子・原子核・宇宙の計算基礎科学分野への資源配分は 8%であった。ポスト「京」の先を見据えて、我が国の数値シミュレーションのレベルをさらに引き上げ、世界に伍していくために、本計画では、分野を特定し学術的出口を明確にし、観測・実験装置と同様な位置づけの“計算実験装置”を国産の技術を用いて低コストで開発する。

#### ④ 実施機関と実施体制

##### 【実施機関】

国立大学法人筑波大学 計算科学研究センター

国立大学法人神戸大学 惑星科学研究センター

宇宙生命計算科学連携拠点

##### 【実施体制】

筑波大学計算科学研究センターでは、前身である計算物理学研究センター（1992 年～2004 年）の時代から 20 余年に渡って、センターが開発・製作したスパコン（PACS シリーズ）を学際的な計算科学の最先端研究に提供してきた実績を持つ。さらに、素粒子・原子核・宇宙分野の研究連携については、「京」コンピュータを用いて推進してきた HPCI 戦略プログラム分野 5「物質と宇宙の起源と構造」（平成 22 年度～27 年度）、ならびに現在推進中のフラッグシップ 2020 プロジェクト（ポスト「京」の開発）の重点課題 9「宇宙の基本法則と進化の解明」（平成 27 年度～31 年度）の実施機関を計算科学研究センターが務めており、大規模なシミュレータを用いた宇宙・素粒子・原子核分野の研究連携の実績をもつ。また、「宇宙生命計算科学連携拠点」の代表機関を務めており、宇宙分野、惑星科学分野、生命分野を連携した組織作りと、共同研究を推進している。さらに、神戸大学惑星科学研究センターは、ポスト「京」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」において「生命を育む惑星の起源・進化と惑星環境変動の解明」（平成 28 年度～31 年度）の実施代表機関を務めている。本計画は、これらの実績を基にして、研究の推進と計算機の運用を一体化した実施体制をとる。

#### ⑤ 所要経費

##### 【第 1 期】：45 億円

システム 試作 5 億円、システムソフトウェア・ミドルウェア開発のための人件費 5000 万円／年× 5、外注費 5000 万円／年× 5、システム製造費 25 億円、運用費（電気代） 2 億× 5 年

##### 【第 2 期】：120 億円

プロセッサ LSI 設計・試作 25 億円、システム 試作 5 億円、システムソフトウェア・ミドルウェア開発のための人件費 5000 万円／年× 5、外注費 5000 万円／年× 5、システム製造費 60 億円、運用費（電気代） 5 億× 5 年

#### ⑥ 年次計画

2022 年度に開発を開始し、2023 年度に LSI 試作・評価を行ない、2025 年度に第 1 期大規模システムを組み上げる。第 1 期は、消費電力 3 メガワットで、ピーク性能 200 ペタフロップス強のシステムを製作する。第 2 期は、2028 年に消費電力 6 メガワット、2 エクサフロップス強のシステムを製作する。運用終了は、2032 年。

#### ⑦ 社会的価値

新たなアーキテクチャに基づき、国産の技術でかつ低コストで製作するコスモ・シミュレータは、ポスト京の次につながる革新的アーキテクチャを実証するものであり、我が国の今後のスパコン開発の方向性に大きな影響を与えるものである。

コスモ・シミュレータが行う宇宙の始まりと生命の起源の探究は、人類の自然観の根幹に関わる問題である。宇宙がどのようにして誕生し、その中で天体や元素が作られ、どのようにして生命の誕生に至ったかを探究することは、人類共通の知の創出につながる。

#### ⑧ 本計画に関する連絡先

梅村 雅之（国立大学法人筑波大学・計算科学研究センター）