

### 3.1.2 宇宙科学、地球科学の連携による惑星科学

#### (1) 課題概要

「此处は何处で、我々は何者なのか?」、古くからの人類共通の問いであるこの問題に迫ることが、本学問領域が担う知の探求の究極の目標である。惑星科学は、宇宙科学と地球科学の間にあって、惑星をはじめとする宇宙空間のさまざまな天体の性質を明らかにし、星間物質から惑星が形成され生命を有する地球に至るまでの道を探り、そのような性質や進化の普遍性や特殊性を考察する。惑星科学の特色は、宇宙科学ならびに地球科学双方の知見や手法を活用、融合、発展させなければならないところにあり、両分野との連携は欠かせない。数値シミュレーション研究はその特色が最も際立って現れる研究領域にあたる。

近年の太陽系探査ならびに太陽系外惑星系観測の進展により、哲学的な色彩の濃い冒頭の問いも科学が対象とする具体的な研究課題として認知されるようになってきた。また、地球への小天体の衝突や太陽活動の変動が私たちの地球環境に大きな影響を与えることが社会に広く実感されるようになり、太陽系内小天体群の運動や太陽活動度の変動とそれともなう地球表層環境への影響をより正確かつ詳細に理解することが大きな社会的要請となってきた。現代の惑星科学はこうした課題にも取り組んではいるが、実際に社会が必要とする精度で答えを出すことはいまだ困難であり、残念ながら今後も当面この状況は続くものと思われる。そのような状況下において私たちが目指すべきものは、宇宙における一般惑星系に関する包括的・哲学的理解を進め、そうした理解のうえに太陽系内の個々の事象を位置づけ、不確定性に関する留意点をも含めて、そのようにして得られた現象の理解の仕方を社会に提供していくことであろう。

本課題では大規模数値シミュレーションにより惑星科学の研究を進展させることを目指す。具体的な研究課題群は、物理的な構造とそれに対応した理論的ならびに計算手法的違いにより大きく次の4つに分類することができるだろう。

#### (i) 惑星系の起源と進化

惑星系はどのように誕生、進化し、どのような構成に至るのかを探究する研究課題である。星間雲の収縮による原始惑星系円盤ガスの形成（原始惑星系円盤＝中心星の周囲に存在する円盤状構造、ガスとダスト微粒子からなり、惑星系が形成される母体となる）、円盤ガス中でのダストの凝集、ダストから微惑星・惑星等の惑星系天体の形成に至る過程、形成される惑星系天体個々のタイプ（質量・組成）、タイプの多様性（地球型惑星、木星型惑星等あるいはそれらにとどまらない新たなタイプの存在）、惑星系天体の自転公転パラメタなどの軌道要素、それらの分布と進化などを考察し、太陽系の起源と進化をその中に位置づける。

#### (ii) 個々の惑星等の個性

惑星系天体の集積による誕生から始まる天体内部および表層の構造分化とその進化を探究する研究課題である。地球型惑星、木星型惑星等、惑星あるいは衛星タイプごとに、個々の天体の形成進化、その構造とダイナミクス（対流運動や磁場を生み出すダイナモ作用、地球上の

地形変形や地震等を生じさせるプレートテクトニクスなどの発現)を考察し、太陽系惑星の個々をその中に位置づける。

### (iii) 惑星の表層環境

惑星・衛星等の表層環境とそのダイナミクスを探究する研究課題である。惑星・衛星等の質量や組成、軌道要素、中心恒星の活動度に対する、惑星気象・気候の多様性を考察し、太陽系惑星個々の表層環境をその中に位置づける。

### (iv) 生命の起源

惑星や衛星等で見られるであろうさまざまな表層環境における有機物化学を探究し生命の起源に迫る研究課題である。中心星の表面温度や活動度の違いがもたらす惑星表層への入射放射エネルギーの質の違い等も有機物の循環に大きな影響を与えるであろう。そのような考察の中に太陽～地球系での生命の発生を位置づける。

上述の主要研究対象は独立に存在するものではない。対象間の結合を考察し、連結した計算を可能にしていくことが今後(「京」コンピュータ後の計算惑星科学)の課題となる。惑星系の誕生は中心星の誕生と、個々の惑星の形成は惑星系の形成と、惑星表層の形成進化は惑星全体の形成進化と、そして、生命の存在進化と惑星表層環境の進化とは整合的に考察されるべきものであり、さまざまなレベルでそのような連結を可能とするソフトウェアの開発と数値シミュレーションの実現が試みられていくものと予想される。

これらのシミュレーション課題は近年の太陽系探査ならびに天文観測の展開によって現実的な課題となってきたものが少なくない。また、シミュレーションによる予測は、新たな探査計画や観測計画の立案を促すものである。そのような太陽系探査あるいは天文観測と数値シミュレーションの連携例としては次のようなものが挙げられる。

- 星・惑星系形成領域に関する観測の蓄積に対し、これを説明する惑星系形成シミュレーションを実現し、それによるモデルの検証を行う。特に、太陽系外惑星が多数発見され、そのタイプに太陽系で知られてきた惑星タイプ(地球型惑星、木星型惑星等)とは異なるタイプの惑星が存在すること、また、その軌道パラメタが太陽系の惑星とは大きく異なっていたことなどが発見されたことから、これらを説明するシミュレーションの進展と惑星系の起源と進化のシナリオの再構築が期待される。
- 太陽系探査の展開、特に、はやぶさ2等の今後の探査に対応し得る、太陽系の起源・進化シミュレーションの実施とそれを用いた太陽系の現状の推定。小惑星の起源を推測し、サイズや軌道分布、太陽系内の物質分布を明らかにする。
- 惑星等の太陽系天体の構造探査や表層探査を説明し、あるいは、これらをモデルの検証に用い、更には、将来の探査計画の設計に用いることのできるシミュレーションモデルの開発とそれによる太陽系惑星・衛星の内部構造あるいは表層環境の推定。これらのシミュレーションモデルは地球内部の構造推定や気象・気候予測に用いられてきた知見を惑星一般に適応することで構成され、逆に、惑星を対象とすることで地球において蓄積されてきた知見のテストがなされる。

これらのシミュレーションの実現が可能とする、社会的な必要に対する情報提供としては次のような例があるだろう。

- 惑星系天体の分布進化を理解し、太陽系内の小惑星の分布や軌道を明らかにすること、特に、直接観測の困難な小天体の存在確率を推測できるようになることは、地球への小惑星衝突の可能性を診断するうえでの基礎情報である。
- 太陽系外惑星の環境を推測し、太陽系の惑星表層環境の変遷を理解すること、それを記述するシミュレーション能力を持つことは、太陽活動の今後の変遷に対する地球気候の応答を予測するうえで大きな寄与となる。例えば、暗い太陽パドックス問題（太陽系初期の太陽活動度は現在の70%程度であったが、比較的古い時代から地球には海洋が存在し、あるいは、火星の古気候は温暖であった可能性がある）の考察に耐えられる惑星表層シミュレーションモデルの開発と検証はこのような問題への貢献につながるだろう。

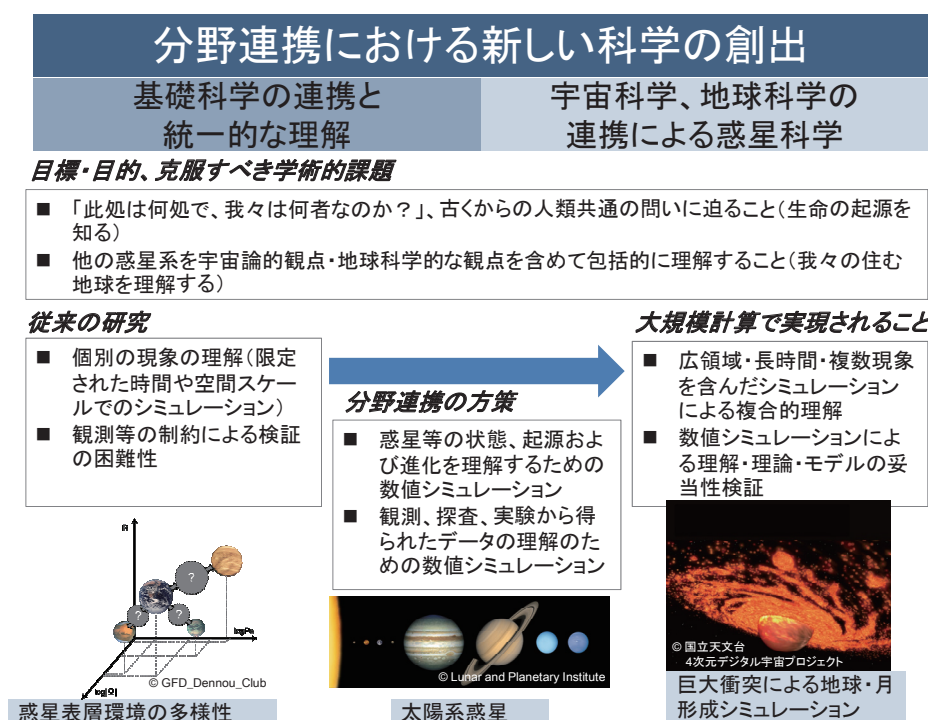


図 3.1.2-1 宇宙科学、地球科学の連携による惑星科学

## (2) サイエンスの質的変化と長期的目標

新たな展開として期待される1点目は、計算に対する量的な制約の緩和による理解の進展である。本領域での課題には次のような特徴が存在する。

- 多種類で多量の物質や粒子を含み、重力、流体現象、放射、相変化・化学変化などが複雑に関係し合う、多種多様な物理的・化学的素過程からなる。
- 長い時間や広い空間領域など、長短・大小の幅広い範囲を含む。
- 実験あるいは観測による検証が困難である素過程や現象を対象とすることが多い。

これらの数値シミュレーションは次のような計算側面において容易に大規模となる。

- 素過程計算：比較的単純な物理化学モデル、したがって、ソフトウェアとしても比較的単純であるが、大自由度で計算を実行する必要が生じる。
- システム計算・システム統合計算：惑星系、惑星、惑星表層環境は、本来、多種多様な素過程から構成される複雑な系であり、その時間発展を追跡するために必要とされる計算資源は必然的に大規模であるのみならず、ソフトウェア自体が複雑大規模になる。更に、惑星系の起源と進化、個々の惑星等の個性、惑星の表層環境、生命の起源といった対象相互の結合を考察するためには、複数のシステムソフトウェアを結合した統合システムモデルを設計・構築し、計算を実現していくことが必要となる。
- アンサンブル計算：素過程計算においても、システム計算においても、系の非線形性やパラメータ依存性を掌握するために、たくさんの数値実験を行う必要が生じる。

計算機で実施できる数値シミュレーションの規模には限界があり、また、有限の人員と利用できるソフトウェア環境で構築可能なソフトウェアの複雑度にも限界がある。これまでの数値シミュレーションでは、これらの困難を克服するため次のような方法がとられてきた。例えば、シミュレーションの対象とする現象を原始惑星系円盤・巨大衝突・惑星大気・固体惑星等の個別の事象に限定する、シミュレーションに含める物理的・化学的素過程を少数に限定する、含める物質の量や粒子の数を限定する、計算する時間や空間領域を限定するなどの方法である。こうした工夫を重ねて数値シミュレーションを実現することにより、各現象の理解は少しずつ進んできたが、前節に概説した課題の探求にはいまだ至っていない。

新たな展開として期待される2点目は、数値シミュレーションモデルの検証可能性が高まることである。直接的な実験あるいは観測が困難な素過程や現象に対して数値シミュレーションは強力な考察手段となってきた。しかし同時に、計算の検証をどう行うかという問題に不可避免的に悩まされてきた。こうした問題は、大規模数値シミュレーション技術の発展により、軽減されることが期待される。例えば近年、天文学的観測（さまざまな波長を用いた望遠鏡による観測）の進展により、太陽系外の惑星が多数発見され、特に、太陽系とは大きく異なる姿をした惑星系も多数存在していることがわかってきた。惑星系の一般論を展開するための背景が整えられたと言える。一方、地球科学においては、地震学や地球内部物理学、地球物質科学、気象海洋学・気候学など、地球の構造やそのダイナミクスと進化を解明する研究が大きく進んでおり、惑星科学は、これを惑星一般に適応するべく一般化する任を担っている。この作業は、地球科学で得られた知見を惑星という場を使って検証することである。そこでは、不可避免的に地球科学諸分野との連携が必要とされる。地球科学での知見が導入されると同時に、その妥当性は、地球以外の世界に適応する際に生じるであろう不具合によって検証されることが期待される。

新たな展開として期待される3点目は、複雑な現象に対する知見の集積である。近年の地球科学においては、複雑な対象を扱うシステム計算型の数値シミュレーションモデルは、科学の推進やその活用において、より積極的・戦略的な役割を担うようになってきている。シミュレーションモデルは科学的成果の集大成であり、研究活動の次なる展開はこの集大成を基として企画される。現象に対する個々の知見はシミュレーションモデルに組み込まれ数値実験がなさ



れることによって、現象の理解の体系の中に位置づけられ、意義づけられる。シミュレーションの不具合は新たな理解を必要とする問題や、観測や実験がなされるべき問題を提起する。モデルが複雑大規模になればなるほど、容易には追従できなくなるために、その戦略的重要性は高くなる。地球科学の知見の一般化としての惑星科学は、地球科学で展開されたシミュレーションモデルのこのような今日的役割を認識し、惑星科学的見地からの知見集積と研究展開を行っていくためのシステム再構築を必要としている。また、惑星科学固有の対象においても、地球科学で進んできたような知見の集積物としてのシミュレーションモデルのシステム化を推進していく必要がある。こうしたシステム化されたソフトウェアの構築とそれによる数値計算とによって、私たちの理解を更に進めていくことが可能となるだろう。

### (3) コミュニティからの意見

複雑な対象をシステムとして扱い大規模なプログラムを構成し、これを実行することは地球科学の、特に、気象・気候シミュレーションで先行してきたが、今後、それと類似の手法が、惑星科学の領域にも広がっていくことは必然である。また、惑星探査においてはいわゆる観測シミュレーションの導入が観測企画において当然のこととなり、観測データの処理にもシミュレーションモデルを用いたデータ同化（観測データとシミュレーションを融合する高度なデータ解析手法の1つ）が広範に用いられるようになると予想される。これらに耐えられる数値シミュレーション体制を構築することは急務である。

今後の大規模計算の展開においては、計算機のハードウェア的な大規模性のみならず、ソフトウェア的な大規模性という観点に注目する必要がある、これに対処する投資が行われるべきである。共通基盤的なソフトウェア開発とその提供維持に関しては、わが国は、メインフレーム時代のライブラリ開発を除けば、1990年代のUnixとインターネットの展開に逆行してあまり積極的な投資がなされてこなかったのではないかと危惧される。開発や利用を容易にするツールセットライブラリから、知見の集積装置としてのシステムモデルまで、研究活動や研究成果の提供・利用を支える基盤材としてのソフトウェアのライブラリ化と提供に、改めて投資がなされるべきであろう。計算科学の応用領域としての惑星科学の進展はそのようなソフトウェアの蓄積に大きく依存するものと予想される。

これらは日本惑星科学会を中心とする、惑星科学に関連する数値計算に携わる研究者コミュニティの意見である。これまで、日本惑星科学会やCPS（Center for Planetary Science：神戸大学惑星科学研究センター）を中心として、当該分野の研究者を集めた研究集会を開催してきた。例えば、日本惑星科学会の2013年度秋季講演会（2013年11月）に際しては、「計算惑星科学シンポジウム」を開催し、惑星科学における今後の計算科学の展開を議論した。今後も、コミュニティからの意見を更に集め、議論を深め、認識を共有するため、同種の研究集会を開催していく予定である。

#### (4) 必要な計算機資源

##### (i) 惑星系の形成シミュレーション

太陽系のように恒星を中心としてその周囲を回る複数の惑星からなるシステムの形成過程を明らかにする。従来は狭い円環領域における少数個の惑星の形成についての計算がなされている。しかし、本質的には、複数の惑星と惑星前段階の微惑星が広い時空間領域にわたって相互作用しながら成長する様子を調べる必要がある。そうした計算には、次のような規模の計算が必要となるだろう。

従来：重力多体系計算、10 万粒子、10 万年分の進化、100 ケース

展望：重力多体系計算、1 億粒子、1 億年分の進化、100 ケース

$10^{10}$  ステップ、1 ケース当たり  $1.5 \times 10^{22}$  回演算

##### (ii) 地球・惑星の形成シミュレーション

地球をはじめ、太陽系内外の多様な惑星の形成過程を明らかにする。例えば、地球・月系の形成は巨大衝突によると考えられているが、巨大衝突現象と地球内部構造形成は表裏一体の現象であるにもかかわらず、従来は計算機能力の限界により別個の現象として調べられている。しかも、それらの計算での解像度は十分とは言えない。これら 2 つを同時にかつ高精度でシミュレーションすることが必要である。

従来：巨大衝突、SPH 計算 (Smoothed Particle Hydrodynamics: 流体粒子を用いた流体計算法)、1 万粒子、1 月分の進化、100 ケース

展望：巨大衝突+内部構造形成、SPH 計算、10 億粒子、数ヶ月分の進化、100 ケース

$10^8$  ステップ、1 ケース当たり  $4.5 \times 10^{22}$  回演算

##### (iii) 惑星表層環境の形成と進化シミュレーション

地球の表層環境に対する理解を発展させ、多様なパラメータを持つ多様な惑星表層環境のシミュレーションを行う。

従来：流体計算+輻射計算、 $1,920 \times 960 \times 96$  格子、1 ケース

展望：流体計算+輻射計算、 $3,840 \times 1920 \times 192$  格子、100 ケース/惑星、10 惑星

$3 \times 10^7$  ステップ、1 ケース当たり  $2 \times 10^{21}$  回演算

これは基本的には地球科学で用いられてきたシミュレーションモデルの惑星科学的見地からの一般化として展開されるが、惑星の進化を統合的に扱えるような、システム結合型（気象・海洋・氷床は言うまでもなくマントルや中心核の形成など）のモデルを発展をさせることが期待される。

課題	要求性能 (PFLOPS)	要求メモリ バンド幅 (PB/s)	メモリ量/ ケース (PB)	ストレージ量/ ケース (PB)	計算時間/ ケース (hour)	ケース数	総演算量 (EFLOP)	概要と計算手法	問題規模	備考
惑星系形成のシミュレーション	4	0.02	0.00001	0.05	1000	100	1500000N	N-体 シミュレーション	粒子数: 1億体 積分時間: 1億年 (ステップ数: 10G)	論文で報告されているアルゴリズムとGRAPE における計測結果から算出。1ステップ1粒子あたり1万5千演算、グループ内粒子数128。メモリアクセスは6000 演算あたり32 バイト
地球・惑星の形成シミュレーション	520	29.0	0.001	1	24	100	4500000	SPH 計算	粒子数: 10億体 積分時間: 数ヶ月 (ステップ数: 100M), 演算量 $N \log N$	演算量、メモリ転送量、メモリ使用量は、TSUBAMEでのプロファイルを元に外挿
惑星表層環境の形成と進化シミュレーション	6	25	0.01	4	100	1000	2000000	流体計算 + 輻射計算 (スペクトル法+差分法)	格子数: 3840x1920x192, 100 ケース x 10 惑星, 積分時間: 10年 (ステップ数: 30M), 1ステップ1格子あたりの演算量: 50K	演算量、メモリ使用量は、TSUBAMEでのプロファイルを元に外挿