

小特集

異なった時空間スケールが関与する 多階層プラズマシミュレーション研究

- 現状からの展望 -

Multiple Time and Spatial Scale Plasma Simulation
- Prospect Based on Current Status -

(Received 14 April 2003)

1. まえがき

1.1 計算科学の新たな展開

2002 (平成14)年, 海洋科学技術センターで運用を開始した「地球シミュレータ」が, 米国ニューヨークタイムズ紙において“Computenik”の見出しで, 米国がかつて旧ソビエト連邦に人工衛星で遅れをとった“Sputnik”ショックに匹敵するイベントになぞらえて大きく報道されました。この地球シミュレータはベクトル型の超並列計算機であり, 理論性能値40.96 TFLOPSに対して, 世界標準の性能指標であるLinpackベンチマークテストで35.86 TFLOPSの実行性能を記録し, 2位以下を大きく引き離して1位に踊り出たことは記憶に新しい出来事です[1]。これは一つの象徴的な出来事ですが, このようなスーパーコンピュータが注目を集める背景には, 計算機性能や計算機技術の卓越性だけでなく, 昨今の先端的な科学技術分野における競争力に大きな質的変革をもたらされつつある, との強い認識によるものと考えられます。

この反応は, 折しも米国では, DOE(エネルギー省)の計算科学部門主導で, SciDAC (Scientific Discovery through advanced Computing)と呼ばれるスーパーコンピュータを基礎においた分野横断的な計算科学プロジェクトが国の重要施策の一つとして推進されていることもあったのかもしれませんが[2]。これは米国が, 計算科学を今後先進的な科学技術分野において長期間高い競争力を保ち, 主導権を確保するための必須条件と位置づけてい

ることを意味しています。このプロジェクトには, 本特集の話題でもある核融合プラズマ分野[3]や宇宙・天体分野[4], 気象分野に加えて, 応用数学や計算数学といったHPC(High Performance Computing)を支える鍵となる分野が含まれ, 分野横断的かつチーム指向型の研究体制を構築することにより, とすれば, これまで各専門分野の寄せ集め的な色彩が強かった“計算科学”の学術としての展開を図り, 新たな科学領域を開拓しようとするものです。これらは, これまでの要素還元的な手法で様々な課題が解決されてきた20世紀の科学技術に対して, 21世紀に直面する先端的科学技術の多くは, 因果関係が極めて複雑な物理系を深く理解・解明し, さらにそれらを制御する手段を獲得することによって達成される, との強い信念によるものではないかと考えられます。

1.2 物理現象における階層性

さて, 前置きが長くなりましたが, 今回「異なった時空間スケールが関与する多階層プラズマシミュレーション研究」というタイトルで小特集を組むこととなりました。「多階層」が今回のキーワードですが, これは先に言及した“計算科学”と強くリンクする概念といえます。私たちが自然現象をはじめ様々な物理現象を理解しようとするとき, 私たちはまず大学で学んだ科学的 (=要素還元的)アプローチに従って, その現象を時空間スケールで特徴づけられる“階層”に分割し, 取り組むべき対

KISHIMOTO Yasuaki, Naka Fusion Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute, Ibaraki 311-0193, Japan

kishimoy@fusion.naka.jaeri.go.jp

象をできるだけ狭い階層に限定します。対象とする階層以外のよりマイクロあるいはマクロな階層からの寄与は、それらを理論的あるいは経験的に繰り込んだモデルや境界条件として取り込もうとします。このアプローチはプラズマ研究においても広く採用されています。例えば核融合をめざした高温の磁場プラズマの揺らぎ現象を例に取れば、電子のダイナミクスによって支配されるマイクロな揺らぎから、イオンのダイナミクスによるセミマクロ（あるいはメソ）な揺らぎ、あるいは装置全体に及ぶマクロな MHD 的揺らぎ等、プラズマの不均一性由来する様々な揺らぎが発生し、それらは揺らぎの時定数や空間サイズに従ってある程度階層化することができます[5]。これらはしばしば乱流状態になり異常輸送現象をもたらしますが、各揺らぎの階層性が十分に保たれていれば、「電子系の輸送」、「イオン系の輸送」、あるいは「何々モードによる輸送」といった具合に、それぞれ独立に輸送特性を論じることができます。実際、「研究者の数だけモード（不安定性）があり、それに伴う輸送がある」と皮肉を込めていわれることがありますが、これはいい意味でとれば「研究者の数だけ階層がある」ということとなります。一方実験では、電子系とイオン系が独立に振る舞う場合もあれば連動する場合もあり、輸送現象は様々です[6]。したがって、単純には階層化ができない状況、すなわち“階層性の破れ”とか“階層間の干渉”といったことが重要な問題となるはずで

余談になりますが、昔テキサス大学に留学した最初の頃「君の専門は何ですか？」とある研究者に聞かれたことがあります。「始めたばかりで専門ではありませんが、トカマクの異常輸送を研究しようと思っています」と答えると怪訝な表情をされ、「Which mode?」と聞かれました。今から考えれば「異常輸送」というのは階層があまりにも広すぎて答えになっておらず、きっと「私は、電子を断熱的に取り扱った、静電的なイオン温度勾配不安定性のグローバルな非線形シミュレーションを専門にしようと思います」とでも答えないとイケなかったのでしょう！トカマクの輸送研究の歴史の長さと、永遠にこの“階層”を出ることはできないのでは、との不安にかられた記憶が残っています。

1.3 階層性の破れと階層間の干渉

一方、近年のトカマクやヘリカルを中心とした磁場方式やレーザー方式による核融合プラズマ研究の進展は著しいものがあります。例えば、磁場プラズマを例にとると、研究の当初は装置サイズを大きくすることでプラズ

マの性能向上をめざしてきた経緯がありましたが、近年の高性能プラズマは、プラズマ表面や内部の狭い領域に熱絶縁状態を自発的に形成する輸送障壁をはじめ、プラズマ中に多彩な“構造”を創り出すことによって達成している点に大きな特徴があります[7]。本小特集に先立ち、同学会誌において「プラズマの非局所輸送現象と様々な構造形成」というタイトルで小特集を企画しました[8]。これは、核融合プラズマをはじめ宇宙・天体を含め幅広いプラズマの多彩な構造形成現象に焦点をあて、その背後にある物理過程を“非局所性”という観点から解きほぐそうとしたものです。本小特集も、このプラズマが本質的に関与した構造形成の起源をさらに掘り下げることが目的としています。

この“非局所性”と“階層性”の関係について簡単に考察しておきましょう。まず“非局所性”ですが、これは小特集[8](1章)で議論されたように、プラズマ中の異なった2点間において情報伝達を行う媒体(プラズマ粒子や揺らぎ等)の時定数や空間サイズが“対象とするプラズマの系の特性長”に対して無視できなくなり、このため通常の拡散近似や局所理論では記述できないダイナミクスや構造が形成されるというものでした。例えば、温度勾配を持つプラズマ中の電子熱伝導の問題では、温度勾配の特性長と熱輸送の媒体である電子運動とは異なった“階層”のダイナミクスに支配されていると仮定して、通常「Fickの法則」を適用します。しかし、磁場方式のダイバータプラズマやレーザー核融合ペレットの高密度プラズマ中での電子熱伝導は、温度勾配の急峻化に伴って電子の平均自由行程と温度勾配のスケール分離ができなくなり、階層構造が成立しなくなります。この“階層性の破れ”が起因となり、様々な構造が形成されることが文献[8](2章・3章)で紹介されました。このような情報を伝達する媒体の非局所性(階層性の破れ)に起因する場合や、また階層性が仮によく成立する系でも、それら各階層の物理過程が密接に連動したり干渉を起こしたりする場合に、通常の中性流体では見られない顕著なダイナミクスや構造が形成されるものと考えられます。実際、構造形成現象を理解し制御する困難さの多くは、このような単純な階層性が成り立たないことに起因していることが多いようです。

1.4 多階層・複合系プラズマと計算科学

近代の科学技術において数値シミュレーションは、実験・理論研究手法に続く第3の手法として重要な役割を担っていることはいうまでもありません。特に輸送現象

や電磁流体现象をはじめとした複雑過程によって支配される核融合プラズマ研究では、シミュレーション手法が研究の当初から中心的な役割を果たしてきたことは(米国の SciDAC の例をあげるまでもなく)特筆すべきことです。実際、シミュレーション研究は実験研究や理論研究を理解・検証する手法として積極的に貢献し、その結果、プラズマに対する考え方や理論的枠組みはこれまで相当整理されてきたと言えます。しかしこれは裏を返せば、シミュレーション研究は、これまで実験・理論に対する要素研究としての位置づけにとどまり、長時間のスケールで作り出される様々の構造形成現象を第一原理的に計算機上に再現し、実験を自在に予測するには必ずしも至っていないともいえます。

この困難性は、シミュレーションの立場からは、各々限定された階層の物理現象を自己無撞着に解く努力のみならず、それら階層間の相互作用や干渉効果を高い精度で再現しないといけないことや、ミクロスケールとマクロスケールが混在した幅広いダイナミックレンジの現象を“統一的(unification)”に取り扱かないといけないことにあります。それらを実現するには極めて大きな計算資源を必要とするばかりでなく、同時に計算手法やモデル化に対する深い知見が必要になります。さらに、そのような階層性の観点だけでなく、質的に異なった様々な物理要素やそれらを支配する異なった方程式系を“統合的(integration)”に取り扱う必要もあります。しかし、地球シミュレータに象徴的に見るように、昨今の著しい計算機性能の進展によって、テラフロップスレベルはもとより、今後数年たてば数十~数百テラフロップスの計算機もスコープに入ってくる状況です。これらは、構造形成に準拠するプラズマの高性能化に対する強い要請と、計算科学および計算機環境がマッチした千載一遇の時期にさしかかろうとしている状況ともいえます。

このような構造形成に係わる物理的背景と計算科学の進展が強い動機となり、本小特集を企画する運びとなりました。企画にあたって、前回の“非局所輸送”と同様、様々な基礎分野を対象にしたプラズマや、磁場・レーザー核融合プラズマ、天体・宇宙プラズマの幅広い分野に焦点をあて、各々の分野における“階層性”に関する考え方をはじめ、それに基づくシミュレーション手法や計算科学との関連、さらに将来目指すべき方向と展望を自由に議論していただくことを目的に、以下の目次と執筆者で構成しました。

1. まえがき(岸本)
2. プラズマの自己組織化現象解明に向けた多階層シ

ミュレーションの展望(林・堀内・佐藤)

3. 磁場核融合プラズマにおける多階層シミュレーション研究の展望
 - 3.1 輸送・MHD モデルに基づく階層間相互作用のシミュレーション(矢木)
 - 3.2 乱流と層流が混在した“多階層・複合系プラズマ”研究の展開(岸本・井戸村・Li)
4. レーザー核融合プラズマにおける多階層シミュレーション研究の展望(三間・長友・坂上)
5. 天体プラズマ現象における多階層シミュレーション研究の展望
 - 5.1 太陽磁気リコネクション現象の多階層性とシミュレーション(草野)
 - 5.2 宇宙全史解明へのチャレンジ 数値天文台プロジェクト(高部)

いずれの章も分野を代表される研究者の“多階層シミュレーション”に関する考え方と展望がストレートに議論されており、興味深い内容です。

第2章は、様々な自己組織化現象において、多階層概念を導入する必要性と今後の展開が広い視点にわたって分野横断的に議論されています。ここでは、“多階層”を、同一方程式系における広帯域相互作用と、異なる方程式系あるいは質的に異なるダイナミクス間の相互作用の2つの観点から分類・整理しています。本章の関係でいえば、前者が“統一的シミュレーション”、後者が“統合的シミュレーション”に位置づけられると考えられます。特に、磁気再結合現象を対象としたシミュレーションにおいて、境界条件を含めたマクロな構造(全体)と空間的に局在したミクロな構造(部分)の相互作用を多階層ダイナミクスととらえるユニークな視点を提示しており、(ハイゼンベルグ著書のような)「部分と全体」の観点から研究展望が議論されています。これは、5.1章において提示されている“アップサイジング”と“ダウンサイジング”の見方と強い類似性が感じられます。

第3章は、磁場閉じ込めプラズマにおける多階層概念とそれをめざしたシミュレーション研究の展望が議論されています。3.1章では、通常、輸送過程、微視的乱流過程、MHD 過程は異なった階層ととらえるのに対して、輸送とMHD は階層化できないとの視点を提示しており、これら2つの過程を一体(同一階層)としてとらえる統一的なシミュレーションの重要性を指摘しています。実際、階層性を導入したこれまでの輸送モデルでは再現することができない、非均質な熱波伝播現象や特異

な層流生成が再現され、今後のシミュレーションのあり方を問いかけています。3 2章では、特に最近注目を集めている乱流から非線形過程を通じて生成される層流（帯状流）にかかわるプラズマのダイナミクスが議論されています。層流を含めた揺らぎの階層間相互作用や干渉が、広い波数・周波数空間において新たな情報伝達経路を作り、これによって輸送現象の多様性が格段に向上するとの指摘がなされています。特に、乱流的な揺らぎと層流的な揺らぎの分配等、揺らぎの存在形態を変えることにより輸送制御を行う可能性が議論されています。これらに基づいて、「多階層・複合系プラズマ研究」のパラダイムが議論されています。

第4章では、レーザー核融合プラズマにおける多階層概念とそれらを記述するモデルの詳細が、超高強度レーザーと密度が7桁にわたって変化する爆縮ペレットとの相互作用を中心に議論が展開されています。レーザー核融合プラズマでは、密度領域に対応して物理過程が大きく異なることから、それぞれの階層に応じて適切な数値モデルを導入し、それらの結合を図る統合化コードの開発を進めています。また階層間の結合のみならず、各階層における物理過程も複雑であり、5 2章で議論される超新星爆発等の物理複合型のモデル化とも強い関連を持っています。現象の時定数が短い利点を生かし、第一原理に近い統一的な手法と様々な物理過程を取り入れた統合的な手法の両方を考慮した先進的なシミュレーション研究が展開されています。

第5章では、宇宙・天体プラズマにおける2つの話題に関して多階層概念と展望が議論されています。5 1章では、突発的な非線形特性を示す太陽の磁気フレア現象に焦点をあて、そこでの階層性が議論されています。これは2章の議論と強く関連しており、磁気再結合を起こす空間的に局在したマイクロな過程と太陽コロナの全体のグローバルな構造との相互作用が突発現象創出に重要な役割を果たしている背景が解き明かされています。特に、マイクロからマクロを探る“アップサイジング”とマクロからマイクロの役割を明らかにする“ダウンサイジング”のユニークな考え方が提示されています。特にマイクロな構造を取り巻くグローバルな環境の重要性が強く指摘され、これらを観測データから決める新しいシミュレーション手法が議論されています。近年、トカマクにおいてもこの“ダウンサイジング”としての考え方が重要な役割を果たしている突発的な現象が見出されてお

り、分野横断的な色彩を一層濃くしています[9]。5 2章では、ビッグバンから様々な元素合成の時代を経て星・銀河形成や宇宙構造が形成される宇宙全史の数値シミュレーションの実現をめざした数値天文台プロジェクトの概要が解説されています。宇宙の進化の過程は、ミクロとマクロが結合した“高階層性”と方程式系を異にする物理過程が混在した“物理複合性”が混在した特性を強く有しており、これらを統合したシミュレーションの実現に向けた取り組みが議論されています。この課題は、第2章から4章、および5 1章のすべての要素を含んでいることとなります。

階層性に対する考え方や視点、解明に向けたアプローチや展望は様々ですが、いずれも構造形成にかかわる根源的な物理の解明に向けて大海に乗り出すのに等しい意気込みを感じる論文です。米国のSciDACプロジェクトが、分野横断的かつチーム指向型の研究体制の構築をめざしていることに言及しました。核融合研究の視点でいえば、核融合エネルギーという開発研究が、“形（構造）を創る”という、これまで必ずしも科学基盤が確立していない学術的要素を強く内包していることから、今後、ますますこういった姿勢が求められるものと思われま。実際、今回の特集内容も極めて分野横断的な色彩が強いのがわかります。“チーム指向型”というのは本来日本のお家芸のはずです。これを機会に、今後研究者間の横の連携がますます深まり、本小特集がこの分野の発展の一助になれば幸いです。

（日本原子力研究所・那珂研究所 岸本泰明）

参考文献

- [1] 佐藤哲也：日本物理学会誌 58, 79-85 (2003); <http://www.es.jamstec.go.jp/esc/jp/outline.html>
- [2] <http://www.osti.gov/scidac/>
- [3] <http://www.isoifs.info/>
- [4] <http://www.supersci.org/> (5 2章参照の事)
- [5] 岸本泰明：プラズマ・核融合学会誌 76, 1280 (2000).
- [6] Y. Koide, M. Mori, T. Fujita *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion 40, 641 (1998).
- [7] K. Itoh, S.-I. Itoh and A. Fukuyama, *Transport and Structural Formation in Plasmas* (IOP, England, 1999).
- [8] 岸本泰明編：小特集「プラズマの非局所輸送現象と様々な構造形成」, プラズマ・核融合学会誌 78, 857 (2002).
- [9] Y. Ishii, M. Azumi and Y. Kishimoto, Phys. Rev. Lett. 89, 205002 (2002).