



サロン

シミュレーションは“未来を見る望遠鏡”となりうるか

—プラズマ界の新たな挑戦—

Future-Viewing-Telescope –A Grand Challenge of Simulation Science in Plasma/Fusion Science Community–

佐藤 哲也

SATO Tetsuya

核融合科学研究所・総合研究大学院大学・兵庫県立大学 名誉教授

元地球シミュレータセンター長

(原稿受付：2024年11月20日)

最近、伊藤公孝氏と久しぶりにお会いする機会があり、二人でお茶を飲みながら、核融合科学談義を楽しむことができた。お互い現役から離れ、かなりの時間が経っているが、プラズマ・核融合科学の研究に携わっている若手・中堅研究者に将来性はあるのかという話題が中心であった。その後、伊藤早苗氏と伊藤公孝氏の共著「プラズマ乱流輸送の基礎」(岩波書店、2023年)を送っていただき、数式の導出は読み飛ばしたが、その展開が面白くて、序文から一気に突発現象まで読み終えた。現役の研究者たちに、プラズマ・核融合科学の持つ真の魅力を感じ取ってほしいという伊藤夫妻の息吹が強く私には伝わってきた。この息吹は従来のプラズマ科学の教科書からは感じ取れず、そこからは若手読者がプラズマ研究に特有の真の醍醐味(ダイナミズム)を見出すことは難しいであろう。伊藤夫妻の書は、その題名がプラズマ“乱流”の基礎ではなくプラズマ“乱流輸送”の基礎となっている。磁気籠に閉じ込められた電荷と質量の異なるプラズマ粒子は外部からのエネルギー注入を受けて強いミクロ「乱流」状態となり、それに伴って磁気籠内には対流や異常拡散というマクロな「輸送」が誘導される。この乱流というミクロプロセスと輸送というマクロプロセスを別次元の事象として切り離してはいけない。両者は一体の現象であり、それらが強く競合・協調する姿を同じ次元で捉えてこそその醍醐味がわかり、研究することが楽しくなる。

ちょうどその頃、マグネシウム学会という私のこれまでの研究生活とは無縁の学会の副理事長さんから学会誌への読者に刺激を与える寄稿の依頼があり、私のこれまでの60年のプラズマのシミュレーション研究から生まれてきた科学人生観とでもいえるべき寄稿文を書いた[1]。その原稿を伊藤公孝先生にお送りしたところ、プラズマ・核融合界の多くの若手中堅研究者が今安住している井戸の中から飛び出し、天空の楽しさを探す旅へと飛び出す良い刺激になると、プラズマ・核融合学会誌のサロンに書き直したも

のを投稿する勧めをいただいた。

1. 未来を見る望遠鏡は可能か

ふと、子どもの頃、“あの子の越し方を見ていると行く末が危ぶまれる”と話合っている光景を思い出した。かなり前から、西洋科学が宇宙の越し方、物質のはじまりを明らかにすることに注力し過ぎたのではないかという疑問を抱いていた。西洋科学に基づく近代文明は、宇宙の成り立ち、物質の成り立ちの法則を次から次へと解明し、その法則に則って人間の労力を省くため、ありとあらゆる道具を作り出し、人間の活動範囲を飛躍的に拡大し、自由と楽しさを勝ち取ってきたと認識している。しかし、現在の世界を見てみると、貧富の差が大きく拡大し、あちこちで残酷非道な戦争が起きており、飢餓や貧困に喘ぐ非人道的な現象が充満している。この人類の無責任さ、無秩序さを考えると、西洋科学が“過去”と“現在”のみを思考の対象として、“未来”を置き去りにしていたことが原因ではないかと考えている。宇宙の成り立ちの解明には、確かに、曖昧さは許されず、厳密性や実証性(再現性)に拘泥する必要があった。逆に言えば、そのために、厳密性や実証性が担保されない“未来”を置き去りにせざるを得なかった。

宇宙の始まりや物質の始まりを解明する方法論として要素還元論が17世紀にデカルトによって提唱され、ニュートンによって観測と数学が要素還元科学を推進する必須の研究の方法論として提唱された。ガリレオの天体望遠鏡による観測が天体の規則正しい運行を発見してきたように、望遠鏡は要素還元学の最強の研究手段であった。そして、その規則正しい振る舞いの普遍的記述には微分方程式が開発された。この要素還元の科学に基づいて、我々の地球上に現れる自然現象を支配する巨視的現象の法則体系(基本法則体系)は19世紀末までに悉く整備された。

一方、自然界に現れる我々が見聞きする現象は、その基本方程式体系からは想像もつかない不思議な姿を度々露わ

author's e-mail: tetsusa0954@gmail.com

にする。基本方程式体系はさまざまな変数が絡み合う連立非線形偏微分方程式であり、数学はその陽の解を教えてくれない。そのために、現実の不思議な姿が本当に要素還元科学の解き明かしてくれた法則体系（変数間の因果関係）の結果として現れるのかどうかを実証することは不可能であった。ところが、第2次世界大戦後間もない1947年、要素還元科学の最大の成果とも言える量子力学が半導体物質を創り出すことに成功した。この半導体は、18世紀の蒸気機関の発明に匹敵、あるいは、それ以上に人類の発展を大きく変える発明であった。その発明の最初の成果は電子コンピュータの誕生である。

デカルトは、彼の著「方法序説」の中で、現象を分解し、その要素の法則をきちんと明晰に突き止めなさい。その突き止めた要素間の因果関係（法則）を正しく積み上げていけば、必ず元の現象がそのまま再現されると記述している。しかしながら、現実には、自然界に現れる現象は一般には非常に複雑怪奇であり、それを構成していると考えられる要素（基本法則）を正しく積分する数学的手段は開発されないまま放置されていた。

1976年に至って初めて、ベクトル型コンピュータCRAY-1なるものを米国のシーモア・クレイが世に出現させた。これは、複雑な因果の法則（基本方程式）を陽に解き明かしてくれる優れものであった。この発明により、複雑な物理現象を解き明かすシミュレーション研究が本格的に始まった。クレイはこのベクトルプロセッサをスーパーコンピュータと呼んだ。このスーパーコンピュータの誕生以降、様々な不思議な自然現象や実験室で起きている異常現象の因果関係が次々と明らかにされていった。その研究のピークは21世紀に入って間もなく日本に現れた地球シミュレータが活躍していた2002年から2008年頃であった。地球シミュレータは、地球を丸ごとの大気や海流のシミュレーションを可能とするとともに、さまざまな3次元空間で複雑に展開する現象が基本方程式体系を時間積分することによって解き明かされ、デカルトの要素還元論の正しさを次々と実証していった[2]。しかし、それで十分かと問うこともまた、人類が直視すべき課題として残る。

世の盛衰は人間社会特有のものではなく、残念ながら、科学の世界においても然りである。デカルト要素還元論の基本原則（自然は要素の集まりである）を具体的な様々な複雑現象に対して地球シミュレータが証明してくれることが解るや否や、西洋科学の先導者を自認する米国はシミュレータ（ベクトルコンピュータ）の開発を完全に停止し、大量のデータ処理を効率的に処理する所謂マルチスカラコアプロセッサへと突然方向転換した。その結果、シミュレーションサイエンスは衰退の一途を辿り、現在では、データサイエンスの時代へと移り変わっていった。

マルチコアプロセッサは、関係性（因果関係）の有無に関わらず様々なデータの中に隠れた関係性を抽出する能力において抜群の威力を発揮する。そのために一般の社会活動における利活用度が大きく、商業製品としての価値が非常に高い。事実、このマルチコア半導体素子の開発は、情報ネットワーク網の拡大・充実に伴って、世界中のあらゆる

種類のデータへの迅速なアクセスが可能となり、半導体素子の性能向上がますます要求され、半導体開発の新しい次元に突入した。現在ではAI技術の向上は激しく、社会活動のあり方から人間の在り方までも大転換を余儀なくさせている。その浸透は、今や人間と機械はどう違うのかという究極的哲学論が飛び出すまでに至っている。この傾向は恐らく今後止むことはないであろう。

さて、マルチコアプロセッサの話はこれくらいにして、本論に戻ろう。自然界や実験装置内で観測された現象が基本方程式系を適切な初期条件・境界条件の下で時間積分（シミュレーション）することによって蓋然性を持って再現できることは既によく知られている。この事実、現在の状態を初期・境界条件として、自己無撞着な基本方程式系を時間軸上で積分していけば、現象の再現にとどまらず、未来に発生する現象を科学的な確かさとともに予測できることをも意味している。このことを皆さんに知っていただくことがこの書の最大の目的である。即ち、

“シミュレーションは“未来を見る望遠鏡”となりうることを示唆している。この未来を見る望遠鏡の開発がプラズマ核融合科学の将来にとって大きな意味を持っている”。

物事（宇宙）の始まりや越え方を解き明かす西洋近代科学は、この500年をかけほぼ全ての宇宙を構成している要素（原理）を明らかにすることに成功した。その原理を応用し、地球上の全ての人間の生活を豊かにするための必要十分な技術はすでに手に入っているはずではないか。にもかかわらず、現状の地球上の人間は動物よりもはるかに醜い戦で大量殺人をあちこちで繰り返して平気で過ごしている。一体どこに原因があるのだろうか。

自分自身の科学者としての研究を振り返ってみると、西洋近代科学に致命的な限界（欠陥）が存在していたと考えざるを得ない。西洋科学は宇宙の過去へ過去へと遡る科学、いわば、宇宙の歴史学であり、考古学である。見方を変えると、西洋科学の欠陥は未来を科学の対象から排除してきたことにある。西洋科学はひたすら厳密性や再現性を追い、過去の宇宙の真理・普遍性を追い続けてきた。

そこで、今日は皆さんと一緒に、西洋科学からの脱出、あるいは、超越することの大切さを考えてみたいと思う。その一つの方向が、西洋科学の落とし物である「未来」を対象とする新しい科学である。ここでいう未来は宇宙の未来ではなく、人間社会の未来である。人間社会の未来は決定論的ではない。無限の可能性を有している。しかも、人類はその未来のあり方を選択できる特権を有している。その「未来学」の探究こそ、現在多くの科学分野のみならず人間社会が陥っている閉塞感を取り払う有効な起爆薬になると私は信じている。その有力な科学手段の一つが「シミュレーション」である。未来の姿を様々な初期条件に対するシミュレーション結果を提示し、その結果を見て、人間社会にとって最適と思われる初期条件（具体的方向性）を選択し、未来に向かって歩を進めていく。新たな問題が起きてくれば、新たな方向性をシミュレーションによって軌道修正を繰り返していく。もしこのような方法論を人間が保有していたならば、少なくとも現在陥っているような

地球上の非人道的で残虐な争いや国内外の貧富の差の極端な拡大や排他性は制御できたはずである。この未来のあり方を科学的に見出す方法として“未来を見る望遠鏡”の開発を提唱したい。当然、すぐにこのような望遠鏡が普及できるとは思っていない。そこで、まず、未来を見る望遠鏡の当面の研究対象としては、自然界では大規模地震、磁気圏サブストーム、オーロラ、地磁気反転等々、トカマク核融合装置ではディスラプションやL/H遷移等を容易に予測可能なシミュレーションアルゴリズムの開発、更には、効率よく答えを出してくれる専用のシミュレータを本学会の皆さんが実現してくれることを望みたい。

2. 旧来の科学から未来学へ

2.1 西洋科学は宇宙の歴史学・考古学

デカルトやニュートンがその創始者と言われる近代（西洋）科学は17世紀に始まった。その考え方の基本は、デカルトの方法序説（1637）に書かれている要素還元論である。その方法論は、「ある現象を理解したければ、その現象を分解し、それを構成している要素（法則）を見出すことから始める（これをここではデカルトプロセス1と呼ぶことにする。古典力学）。その要素にまだ疑問が残れば、それをさらに分解し、より根源的な要素（法則）へと向かう（デカルトプロセス2、量子力学や場の理論等々）。そして、その見出した要素を逆に積み上げていけば元の現象を明確に再現することができる（デカルトプロセス3）」。

デカルトは、プロセス3はその要素への分解過程（1）及び（2）を明晰にするならば、プロセス3は自動的に満たされていることを前提としている。ニュートンは具体的な方法論として、実験（観測）と数学（理論）を導入した（プリンキピア、1687）。その後の多くの天才的な科学者たちによって、流体（連続体）力学、熱力学、電磁気学、一般相対性理論、量子力学等々と物理学の基本法則体系が築き上げられてきた。残念ながら、自然界を構成している最も根本的な粒子（要素）は存在するのか、宇宙の始まりがどのようなものであるかについてはいまだに結論を得ていない。現在の宇宙論、素粒子論の最大の課題として残されている。これらの研究はデカルト・ニュートンの実験・数学を基盤とした要素還元論の究極的課題と言っても過言ではないだろう。

この要素還元科学のめざすところは、宇宙の現在から過去（はじまり）へ過去へと時間を遡り、宇宙（物質）の始まりから現在の宇宙までの進化の歴史を完全に紐解くことにある。その意味で、宇宙の歴史学、あるいは、考古学とも言える。その要素還元論は「厳密性」と「実証性（再現性）」を要求する。この厳密性の故に、要素還元（西洋）科学は天才たちの法則性の発見によって階段状に飛躍してきたと言える。その法則は「普遍」でなければならない。現在では、この原理体系は大きな人類の財産としてすでに存在している。

2.2 未来学への旋回

私は、その財産を出発点として、21世紀に新しい科学の世界を開拓したいと考えている。それは従来の“自然”

を中心に置いた自然科学ではなく、“人間”と“自然”の両者を中心にした科学である。この新しい科学の価値基準は“普遍性”、“厳密性”、“再現性”を担保する必要はなく、人間にとって生き生きと楽しく日常を過ごし、自然環境にとっても自然の生態系が維持され、両者が共生できる関係が保たれることが担保できればそれで良い。いわば、ある程度の“曖昧性”を許し、人間生活にとって信頼性と安全性と楽しさを担保できる科学である。ここに曖昧性と書いたが、シミュレーション科学が明示したように、また人間の心の自由からも由来するように、未来は確率的・蓋然的に見えるものなので、曖昧性を賢く含むことが本質的であることはわかっていたいただけるだろう。

自然は常に突発的に人間社会に襲いかかり、人命・財産を容赦なく奪っていく。あるいは、現代社会では、科学の恩恵がもたらした人間の欲望の増大は制御不可能となり、地球環境を大きく破壊しているにもかかわらず、それを制御することができない。その致命的原因は、それらの破壊を科学的に信頼できる形で予測し（厳密である必要はない）、破壊を防ぐ科学的な解答を得る方法論が存在しないことにある。

2.3 人間は科学の支配者か、それとも被支配者か

人類文明は8千年～1万年前に始まったと言われている。文明とは、人類が自然の循環の営みの法則を見出し、その法則を人類が生き延びるために利用する、即ち、人間の人間による人間のための地球環境を作ることであると私は定義している。古代文明の発生は、大河の上流で堆積した肥沃な土壌が定期的に起きる洪水によって下流に運ばれるという自然の妙味（法則）を知り、それを利用して河の下流域で穀物を作るという定住農耕文明が生まれた。その結果、人口が爆発的に増え、都市化が急速に進んでいく。エジプト王国（エジプト文明）や殷王朝（黄河文明）がその良い例である。しかし、国が巨大化するにつれ、支配する人間どもの権力欲、征服欲が生まれる。人間の統治能力の勢力がその領土の拡大に追いつかなくなり、周辺から崩壊が進む。やがて、内紛に発達し、古代文明が滅びゆく。

その反省として、城壁で囲まれた小さな封建領土が形成され、領主が他国からの侵略を防ぎ、城壁内の領民の争いを調整し生命を守る。その代わりに、領民が自らの生産物を領主に提供する一種の局所平衡状態が生まれた。これが中世封建時代である。この時代には、当然、人類としての人口の爆発や急激な文化の発展は起こらない。これらの局所平衡の封建都市群は、地球というスケールから見ると、小さな存在である。長い年月の経過とともに、人類の知恵と技術の長期にわたる蓄積は航海技術の進展を促し、未知の文明との遭遇を経験し、海洋でつながった領域からの興味をそそる未知の情報（珍品）の流入が、やがて封建都市国家持続の条件である壁（境界）を崩壊していく。イタリアのベネチアやジェノバのような海洋都市は、マルコポーロやコロンブスのような冒険家を生み出し、東方の珍しい文化に触れ、新しい情報や産物の発信源となり、その情報の流入によって封建領土の壁が崩れ、領土の不安定性が増加、加速され、崩壊に至る。

イタリアのベネチアやジェノバのような海洋都市で生まれた自由な雰囲気は、アラビア世界を経て回帰した古くギリシャ以降の学問とともに、やがて周りの地域に伝搬し、フィレンツェ、ローマ、ミラノなどの周辺に広がり、ダビンチやミケランジェロに代表される絵画・彫刻・医学、さらには、音楽やガリレイの天文学など幅広いルネサンス文化が開花することになる。この自由な空気が陽気で暖かいイタリアから陰気で寒いヨーロッパに北上し、フランス・ドイツ・イギリスにおいて突然開花したのが感性よりも論理性を重んじる冷たい近代西洋科学である。この17世紀に始まった近代西洋科学の急速な発展と共に形成された近代文明は、ミケランジェロやダビンチのルネサンス期から数えると、すでに600年以上を経過している。科学の発展は、イギリスでの熱力学の応用としての蒸気機関の発明により産業革命へと発展し、大量生産・大量輸送時代の到来を告げ、全世界を巻き込んだ近代文明へと発展することになる。現在では、人間が機械（人工物）を利用する時代を超え、機械（AI）が人間を支配する恐ろしい時代へと変貌しつつある。

この現代文明については皆さんがよくご存知なのでここでは触れない。ただ、戦後の量子力学に基づく半導体素子の発明は、21世紀に入り、“人間”と科学技術に依拠した人工物、“AI”を創造し、機械と生身の人間とどこが本質的に違うのかという究極的な課題を突きつけている。逆にいうと、宇宙進化の過程で発生した生命体である“知を操る人類”の本質は何かという究極の課題を我々に突きつけている。関係者は、生身の人間は自己意識を持ち、主観的な経験を持つが、AIはそれらを有していないとしてこの究極の課題から逃げようとしている。この逃避は、意識や主観とは何かという根本的な問いに対する哲学的な答えを人間がまだ出せていないことの表れである。いわば、言い逃れである。あるいは、意識や主観は人体を構成するすべての部位が協働して形成されるために、人工的に再現するには無限大近い情報量を知らなければならない。しかも、生体の部位は新陳代謝しており、時々刻々それらの成分が変化している。したがって、人工知能（AI）で生身の人間を再現することは原理的には可能だが、技術的には不可能なのだと考える人も多くいるだろう。しかし、いずれの考え方にしても、技術的には不可能だが、原理的には人間はAIで置き換えることができることを認めている。本当にそうだろうか。私は、個人的に、人間は究極的にも論理的にも人工的には永久に生成できない特別な存在であって欲しいと願っている。

インドの古代ウパニシャッド哲学によると、この宇宙には普遍的な真実（宇宙の根源）であるブラフマン（梵）と人間の本質であるアートマン（我）が存在する。この二つが合体することによって人は真理を知覚するとされている。人間は修行をすることによって自分の“我”を“宇宙の根源”と合体させることができ、真理を知覚できるという哲学である。私は、アインシュタインの一般相対性理論の発想は、彼がこのブラフマンの境地に達したときに生まれたのではないかと考えている。これが天才的な“ひらめ

き”ではないであろうか。日本には、“心頭を滅却すれば火もまた涼し”という格言がある。これは人間の心の中の雑念をどんどん減らしていけば、火の中にも涼しく感じる心境に達するという仏教的悟りを表した格言と考えて良いだろう。心の雑念を減らす（瞑想する、坐禅する）ということは、物理の言葉で言えば、心の温度をどんどん下げていくことと等価であろう。物理の世界では、絶対零度に近づけば、零点振動以外は、完全な無雑音・無抵抗状態に至り、日常世界では出現しない超伝導状態が実現する。これと同様、ウパニシャッド哲学や仏教思想では、人間の心の中の雑念（煩惱）を減していくことは、心の中の温度を下げていくことであり、無我（絶対零度）になれば、人間の本質（我）が宇宙の真実（梵）と合体し、仏性（超伝導状態）が現れるとされる。

ウパニシャッド哲学から派生した仏教では、普通の人間は五感と意識（第六識）で外界を認識するとされるが、本来は、その上に第7識から第10識まで存在し、心頭を滅却していけば、これまで雑音（煩惱）にかき消されて受信不可能であった未知の情報を第7識から第10識のより高感度のアンテナが働き出し、未知の情報を取得できるようになると言われている（六神通）。ちなみに、この第10識を仏性という。このインド哲学の流れを信じるならば、この宇宙の中に、西洋科学が見出してきた人間が認識できる物理・化学力（重力、電磁力、圧力、化学反応など）の他に、西洋科学ではまだ解明されていない不可思議な力（梵）が存在していても決して不思議ではない。事実、西洋科学においても、宇宙にはダークマターという謎の観測にかからない物質が、認識された物質よりも多く存在していると言われている。このことは、既存のアンテナでは受信（認識）できない不可思議な未解明の力がこの宇宙にはまだまだ存在していることを示唆している。したがって、ウパニシャッドのいうブラフマンという人の“心”というアンテナのみが認識できる力が存在していても不思議ではない。それこそが、人類という特殊な生き物を地球上に出現させた宇宙の意志であると考えても、西洋科学の宇宙と矛盾しないのではないだろうか。

人類が地球上に創造され、その人類が宇宙の成り立ちを600年にわたって事細かく解き明かす西洋科学を発展させ、人類の繁栄を支えてきた。その繁栄にはウパニシャッド哲学の指摘する人間の心のみが享受できる不可思議力（ひらめき）が時々働いて人類を幸福な世界へと導いていたに違いない。ところが、一方で、人間の数がどんどん増大し、生活の中に無数の便利な人工物が潤うにつれ、人間の煩惱（権威欲、支配欲、物欲等々）、いわば、人間の心の雑音（温度）もどんどん増大していった。地球という有限システムの中で、人間の心の温度が上昇すると、熱擾乱（人間の争い）が地球上のあちこちで勃発するのは当然であろう。現在の人類は、まさにこの欲望の渦、則ち、アートマンの“我”が闊歩し、ブラフマンの“梵”と一如（合体）することを跳ね返す高温状態を作り出しているのではないだろうか。この人間の心の高温状態、欲望の坩堝（るつぽ）を鎮めていく何か良い方法がないかと自問し続けている。

3. シミュレーション科学から未来学へ

上に述べた考えは、私の研究史の中から生まれてきたので、その具体的な例を次に説明したい。シミュレーション科学のレビューをするのではなく、新たな学問の発展に触れたことの意味を説明するためである。新たな学問が発展する現場を示し、読者の皆さんがきっかけを見出す刺激になってくれればという思いで例を選んでいることをご理解願いたい。

3.1 コンピュータとの出会い

コンピュータ（電子計算機）は、1936年のチューリングのデジタル数学定理にその起源がある。終戦直後に、その定理に基づき、真空管をデジタル素子（2値論理素子）として、巨大なENIACが米国で完成した。しかし、これは実用には供しなかった。このENIACの制作と同じ頃、極微のデジタル素子として半導体（トランジスタ）が発明され（1946）、戦後の電子計算機の性能は飛躍的に発展を遂げることになる。

私自身は、電子工学科の卒業研究（1963）として、人間の母音の識別要素であるフォルマント（周波数特性）の抽出をアナウンサーの発した母音データの周波数特性を電子計算機で解析し、そのフォルマント分布の特徴から、母音を決定するというテーマを与えられた。蛇足だが、このテーマは自動音声認識・音声合成研究へと発展し、現在ではAIの時代に突入している。

当時、大学においても実用に供する電子計算機はまだ存在せず、京都大学では半導体電子計算機（KDC-1）を完成させたばかりであった。その計算機の最初の利用者としてフォルマント（周波数特性）抽出に用いたのが私の電子計算機との最初の出会であった。2〜3センチ幅の黒色の長い、長い紙テープに機械言語のデジタル符号を一つ一つ順番にパンチ（穴あけ）し、間違えば、テープを切断して、別のテープに正しい穴を開け、貼り合わせ、機械言語プログラムを修正し、長いプログラムを打ち込んだ紙テープが完成する。そのパンチした長い紙テープを入力装置（コンソール）で読み込み、KDC-1の動作状況を示すコンソール上の横並びしたパイロットランプ列の点滅を凝視し、点滅が正常に繰り返されていればプログラムが順調に実行されていると安心し、点滅が異常停止すると、その止まった時点のパイロットランプ列の点滅の並びから、停止したプログラム番地を2進法から10進法の数値に読み換え、その番地のプログラムを修正し、再び黒色の紙テープにパンチするという作業の繰り返しに明け暮れていた。大きな計算機室に一人、徹夜でコンソール上のパイロットランプの点滅と葛藤していた懐かしい時代が目に浮かんでくる。楽しい電子計算機室での生活に明け暮れ、企業への就職活動を忘れ、結局のところ教授に頼み込み修士課程に進むこととなった。

皆から遅れて修士課程に進むことになったため、同級生たちはすでに指導者が決まり、研究テーマも決まった後であり、若手の先生にはすでに修士の学生が張り付いていた。結局、私の研究テーマは（幸運にも）前田憲一教授（元郵政省電波研所長）預かりとなり、教授の直々の研究

テーマである短波通信を妨げる電離層の密度擾乱（スプラディックE）の発生原因の解明というテーマに決まった。電離層は弱電離プラズマであり、電子工学科の授業では全く習ったことのないプラズマ物理の勉強を理学部の物理教室に通って必死に勉強し、地磁気が貫通している電離層という弱電離した異方性プラズマ中の電子密度波の複雑な振る舞いの連立偏微分方程式の線形分散を導き、密度波動が不安定になる条件を書き下すと、その不安定条件は1メートル四方の用紙でも足りないほど長い一つの分散方程式となり、前田教授や大林辰蔵教授の前でもうこれ以上この研究は進めませんと泣き言を言ったが、解決方法は教えていただけず、一人悪戦苦闘の末、テンソル表示という方法があることを知り、その表現法を用いると極端に簡単な形式（半ページ）で表示できることを見出し、その分散方程式をKDC-1電子計算機で解析し、地球を取り巻く電離層の不安定領域を求めることに成功した（これをクロスフィールド不安定性と名づけた）。この不安定領域と電波研究所が長年の観測によって集積していたスプラディックE層の出現分布と比較し、良い相関が得られることを見出し、前田先生や大林先生からはこれまでの工学部の伝統的な研究方法とは全く異なった方法論を展開したことで褒められ、それ以降の私の研究に対する人生観が大きく転換するきっかけとなった。

いつか企業に就職したいと考えていた私にとって、自然の研究がこれほど充実感を与えてくれ、修士課程を終えた時は、博士課程に進むことが当然の選択肢となっていた。

修士論文は線形理論の研究であり、基本的には理論解析研究である。KDC-1は数値解析のための単なる計算道具として用いたに過ぎない。しかし、プラズマ界では既に非線形現象への模索が始められていた。線形理論は、基本方程式が与えられれば労力を惜しまなければ必ず解析的に解けるが、不安定波動が時間と共に平衡場（バックグラウンド）からエネルギーをもらい有限振幅に成長し始めると、元の不安定平衡場へエネルギーを戻し、不安定性を弱めるように働く。その結果、不安定波動の成長率は下がり、成長率がゼロになるところで波の振幅は飽和し、平衡場は不安定波動と釣り合う非線形平衡場に変形し、システム全体がほぼ定常な状態に達する。不安定波動も一定振幅に落ち着くことが期待される。このような状態を求める理論を準線形理論と呼ぶ。準線形理論は増大した振幅波のエネルギーが平衡場（零次モード）に戻される自己非線形作用のみを取り入れ、他の非線形効果はすべて無視する理論で、それ自体は閉じた理論となる。この準線形理論は原理的には解析的に定式化することができ、陽に解を求めることはできる。しかし、これは現実の世界ではない。現実の世界は多くのモードが乱れた離合集散する乱れた状態となり、数学の厳密解のない複雑多様な世界となっている。

この世界は、不安定システムは不安定モードの成長、それに伴う準線形効果、さらには、モード間結合、あるいは、安定領域のモードも非線形的に励起され、多くのモードが乱立し、解析的に正確に解くことは不可能となる。解析解が見つかる非線形問題もあることはあるが、それは極特殊

な場合（例えば、流体のコルモゴロフ則）である。

解析的には不可能と思われる一般の非線形（現実）問題に関して、その頑固な扉をこじ開けることができる方法論として登場したのが戦後の「電子計算機（コンピュータ）」である。私自身は、修士課程の研究テーマである電離層のスボラディックE層の発生原因として弱電離プラズマにおいて発生する電子密度擾乱の原因を不安定性（クロスフィールド不安定性）の線形不安定理論を展開したが、その理論には飽き足らず、博士課程においては、その不安定波の行く末がどうなるかを知りたく、地上から発した電波（短波）を散乱する電子密度擾乱（スボラディックE）の正体を突き止めたいという欲望に駆られ、なんとしてもその非線形発展を解明したいと思い、その解明を博士論文のテーマとした。当初はその攻め口が全くわからず、プラズマ界はもちろん、流体乱流、カストロフィー理論等を読み漁ったが、具体的な攻め手は見つからなかった。頭の中にはその解法にコンピュータを用いることは浮かんでいたが、手近のKDC-1は非線形発展を解くにはおもちゃのようなものでとても歯が立たない。

しかし、世の中は不思議なもので、欲する者あれば、満たす物が現れてくる。1965年に東京大学に全国共同利用の大型計算機センターが開設された。これは私が博士課程に進んだその年である。計算能力は格段に良くなり、計算機言語は機械言語からフォートラン言語とプログラミングが極端に簡単になり、プログラム媒体も紙テープではなく、カードとなり、高度で複雑なシミュレーションのプログラミングが飛躍的に容易になった。クロスフィールド不安定性の不安定波の成長、成長するモード間の非線形効果によるエネルギー分配（カスケード）をシミュレーションするためのフォートランプログラムを完成させ、世界に先駆けて本格的非線形モード間結合のコンピュータシミュレーションに成功を取めることができた。飽和状態として、最大の線形成長率を持つ波長の波のエネルギーがピークとなり、波のエネルギーは長波長から短波長へとカスケード状に流れ、飽和状態では、もともと安定領域にあった短波長側も励起され、そのパワースペクトルに流体のコルモゴロフ則と同様の冪乗分布（ -3 乗則）の慣性領域が存在することが示された（1968）[3]。このことは電離層にもともと存在していた背景場（電離層E層の電子密度勾配と磁気圏から投影された電場）のエネルギーが不安定波動を励起し、その励起した波動がモード間結合を通じて短波長側へとエネルギーがカスケードし、最終的にはより短波長領域で粒子の熱化となって消滅する定常的な流れが作られていることを示唆している。

蛇足であるが、主として用いたのは東京大学のコンピュータHAITAC-5020である。その後まもなく京大にもFACOM-230が導入され、一つのシミュレーションを完成させるには、東大・京大の両コンピュータの数値表現形式の違い（演算部の数字の指数部と仮数部の位置とデジット数の違い）から出（入）力データを機械語で交互に変換するという厄介な前処理を繰り返しながら、巨大なシミュレーションランを続けた。しかも当時丁度完成したばかり

の新幹線に乗って京都と東京の往復を繰り返しながら、2年間ほどこのような研究生生活を続けた。その間に、電子工学の博士課程の途中から物理学教室の西川恭治先生のユニットの助手となり、時代は安保闘争の時代に突入していった。安田講堂陥落の日と東大大型計算機センターへの出張の日が重なり、壮絶な攻防に出くわすという経験も若き日の思い出の一コマである。

3.2 スーパーコンピュータと複雑性

1960年代半ばから1970年代半ばにかけては、コンピュータは計算処理の高速化・効率化、そして一般への普及が進み、研究活動や企業活動において大いに役立ってはいたが、所詮補助的な役割を超えることはなかった。研究分野においても、個々の研究の課題解決のスピード化と裾野の拡大に貢献し、課題解明にコンピュータを利用する研究者の数も急速に増大していったコンピュータ利用研究の揺籃期である。

一方、私のような非線形科学を追求したいシミュレーション研究者にとっては、処理能力の遅さにかかなりの不満が蓄積していた。しかし、この状況が、複雑な非線形相互作用をさまざまな方向から徹底的に論理思考を醸成する時間を与えてくれた。非線形研究の高まりをコンピュータ開発者たちも当然察知しており、非線形相互作用の産物である自然現象の因果関係を定量的に解明したいシミュレーション研究者の要望に応える半導体デバイスの開発が進んでいた。そして、遂に1976年に、米国のシーモア・クレイによって、記憶部と演算部をパイプラインで直結するいわゆるベクトル型構造を採用する演算回路が発明された。ベクトル型コンピュータ（スーパーコンピュータという呼び方はこの時誕生した）の登場である。シミュレーション科学の幕開けである。

物理における非線形問題を解くシミュレーションは、基本的には連立偏微分方程式を解くことであり、コンピュータでは一般に空間を格子状に分割し（デジタル化）、その各格子点状の物理変数にかかる作用力（空間微分）を周りの格子点の変数の差分から求め、時間発展も離散的に現在と過去の変数値から求めるという前進差分の方法を取る。したがって、従来のスカラ・コンピュータでは、各格子点上の1つの変数に対し、一回の時間ステップ毎に、記憶部から演算に必要なデータを送り、その演算結果を記憶部に戻すという操作を延々と繰り返す操作が必要となる。この一回の往復のデータ転送の時間を τ とし、全ての格子点の数を N 、変数の数を M とすると、全ての格子点の全ての変数の演算に要する転送時間 T は $T = NM\tau$ となる。演算時間はデータ転送時間に比べて一般には小さく無視すると、演算処理に要する時間はほぼデータ転送時間で決まり、 $NM\tau$ となる。この格子点数 N は一般に $10^9 \sim 10^{12}$ と膨大な数であり、一つの演算のためにデータを記憶部から演算部へ、そして演算結果のデータを演算部から記憶部へ輸送する。そのデータ転送時間の方が一般に演算時間よりも大きい。したがって、全格子点上の演算をするには、膨大なデータ転送時間がかかることになる。これがコンピュータの演算効率の悪さを示す致命的なデータ伝送時間問題で

ある。

ベクトル方式は、従来のスカラ方式に対し、記憶部と演算部を直結するベルトコンベア（パイプライン）を設けている。格子点に番号をつけ、順番に n 個（ベクトル長）の格子点のデータをベルトコンベアに乗せて記憶部から演算部に連続的に送り込めば、伝送時間は (N/n) 、即ち、ベクトル長 n だけ短縮され、データ転送時間は大きく減少する。理論的にはベクトル長が256であれば256倍演算速度が速くなる。追跡する物理変数には、密度や電磁場など複数の変数がある（ M ）。これらの変数の数だけベルトコンベア（パイプラインの数）を並列に設ければ、伝送時間はさらに M 分の1に短縮される。今述べた話は、非常に単純化した話であるが、現実のプロセッサはそれぞれ工夫を凝らして、演算処理時間を大きく短縮している。ここで、これまでの最大の性能を誇るベクトルコンピュータ（スーパーコンピュータ）は日本（NEC製）の地球シミュレータであったことを指摘しておきたい。

デカルトプロセスの1と2の要素の解明には、もっぱら天才的な物理的ひらめきと数学力が要求されるが、プロセス3は、要素間の因果関係を積み上げるという複雑な作業であり、コンピュータという人工物を利用するシミュレーション法以外に現在のところ解法は存在しない。しかし、自然現象にしても社会現象にしても複雑微妙な因果関係で結ばれているために、シミュレーション結果の正当性を見抜くには、研究者の複雑な因果関係を見抜く俯瞰力・洞察力が要求される。自然現象には地震、土砂崩れ、オーロラ、太陽フレアのように爆発的に起きる異常現象があり、磁場閉じ込め核融合実験装置においてもデスラプションやL/H転移という突発現象があり、社会現象には戦争やリーマンショックというような突発的な異常現象が発生する。このような異常な現象は、デカルトプロセスの1や2の数学的方法は機能しない。とはいえ、それらは全て人類の生存にとっては無視できない現象であり、このような現象を解明する科学的な方法論の開発は不可欠と言える。これら集団的に起きる爆発的あるいは突発的現象に潜んでいる共通性を私は複雑性と呼ぶことにする。シミュレーションはまさにこの複雑性の科学を探究する有力な方法論と言える。

3.3 二つの自然の妙味に惹かれて

自然の妙味には、宇宙の誕生から、元素（物質）の形成、人類の誕生と数えれば切りがない。私自身が科学の研究対象として興味を持ったのは人間が直接“見て”、“感じる”ことができる不思議な自然現象であった。その中でも二つの現象には大いに魅せられた。一つは、地球の極域の夜空に現れる色彩豊かなオーロラとその振る舞いの不思議さである。古来エスキモーはオーロラを黄泉の国への誘う松明の行列と見た。もう一つは、地球を取り巻く双極子（ダイポール）磁場の存在である。航海の羅針盤として人類の発展に大きな役割をしてきた。古地磁気学の教えるところによると、その地球磁場は永久不変の存在ではなく、その極性が不規則に比較的頻繁に逆転を繰り返していたことが明らかとなった。プレートテクトニクス（大陸移動説）によると、太平洋の海底は年に1~2 cmほど西に移動してい

る。このベルトコンベアのごとく動く（プレートテクトニクス）太平洋の海底岩石の残留磁場の方向を測定してみると、何万年あるいは何十万年に一度地磁気の南北の極性が逆転を不定期に繰り返している事実が見出されている。

3.4 オーロラのダイナミズム

オーロラは極域で磁気圏から磁力線に沿って降下してきた高速の電子（~10 keV）が100 km~200 km（電離層E層）の大気（酸素など）に衝突して発光する自然現象である。地球の夜側の地磁気緯度65度~70度辺りに出現する。この領域をオーロラ帯と呼ぶ。一方、地球磁気圏は、太陽から常時流れてくるプラズマの流れ（太陽風）の圧力で地球から張り出しているダイポール磁力線は太陽風に流され反太陽方向に地球を取り巻くように流されている。

オーロラは、南北（緯度）方向に一定の幅（1 km程度）で、東西（経度）方向に磁極を取り巻くように円弧状に長く（数百km~数千km）伸び、比較的はっきりした下限（100 kmあたりの電離層E層）を持ち、上空に100 km以上広がるカーテン形状をしている。そのカーテン（オーロラアーク）は静止しているのではなく南北（極）方向に動き、東西にも揺らいでいる。しかも、オーロラアークは一つとは限らず複数のアークが間隔（数10 km程度）を置いて磁極を取り囲むように縞模様をなす。そのカーテンの色も下方は薄緑色で上方は赤みがかっていることが多い（酸素や窒素などの大気成分と磁気圏から降り注ぐオーロラ電子のエネルギーの強さによって緑色や赤色の発光となる）。その形状や色合い、あるいは、発生地域は太陽活動に大きく依存しており、比較的静穏時には、低緯度側に発生し、形状も静かなカーテン状をしており、複数個のカーテン縞がほぼ等間隔で並んで発生していることが多い。太陽活動が活発な時は、真夜中あたりから急激に強い発光が現れ、極に向かって激しく変形しながら移動する。このようなオーロラをオーロラサブストーム、あるいは、オーロラ嵐と呼んでいる。静穏なオーロラとオーロラ嵐の電子の加速機構は異なっていると考えられている。

太陽活動が盛んになると、太陽フレアが発生し、それに伴って強い太陽風が地球に襲来し、磁気圏尾部のプラズマシートを上下（南北）から強く圧縮し、プラズマシートのエネルギー蓄積が増大する。その結果、磁気圏尾部の磁場構造的に最も脆弱な箇所（プラズマシートの地球側境界付近）で磁気中性面電流（プラズマの電子とイオンの複雑なジャイロ運動の作る電流）を増大させ、プラズマ粒子のマイクロ不安定性を引き起こし、異常抵抗が発生し、磁気中性面電流として蓄えられた磁気エネルギーが、赤道面の上下の南北反平行磁力線を繋ぎ変え、一部は太陽風と共に宇宙空間へ逃げ去り、大部分は閉じた地球側に引き戻されることになる。この現象を磁力線再結合（磁気リコネクション）と呼ぶ。この磁気リコネクション過程においてプラズマシートのイオン・電子が強く加速・加熱され、再結合した地球側の磁力線に沿って真夜中の極域の電離層に激しく落下し、大気成分を爆発的に発光した結果がオーロラ嵐である。

ここで述べた磁気リコネクションは私の比較的初期の重

要な研究テーマの一つで、私はこれを駆動型磁気リコネクションと名づけた。反平行磁力線に挟まれた平衡プラズマを初期条件として与え、上下から遅いプラズマ流(太陽風)をゆっくりと流し込み、磁力線とプラズマの相互作用を磁気流体方程式に則ってシミュレーションで追跡する研究である。この駆動型磁気リコネクションのシミュレーションによって爆発的に磁気エネルギーがプラズマの運動エネルギーに変換されるダイナミックなプロセスを東京大学の助教授時代(1974~1980)に林隆也院生と共に精力的に研究を行い世界で初めてそのダイナミックな発展をシミュレーションで示すことに成功した[4]。

オーロラは地球から地球半径の10倍も20倍も遠くの磁気圏の夜側(尾部)のプラズマシート内の電子が地球の磁力線に沿って地球大気に衝突して発光するという単純な話で済む現象ではない。この物語には、二つの全く次元の異なる世界で起きている現象が互いに協調しあって展開する劇的なドラマである。一つは、地球から大きく離れた磁気圏尾部のプラズマシート内に存在する数百電子ボルト(~200 eV)程度の比較的低エネルギーの電子が磁力線に沿って数キロ電子ボルト(~2 keV)という10倍も大きな高エネルギー粒子(電子)に加速され、電離層の大気と衝突して発光する現象である。発光現象そのものは粒子というミクロ世界で起きるドラマである。もう一つは、我々の前に現れるオーロラの姿はオーロラ帯と呼ばれる電離層領域に現れ、その大きさは地球規模のカーテン状の姿となって現れる。しかも、一つとは限らず、二重、三重のカーテンのアーチが列をなして揺れ動くマクロな世界のドラマでもある。この前者(ミクロ世界)と後者(マクロ世界)の世界は空間スケールと時間スケールがそれぞれ5~10桁ほど違う現象である。3次元シミュレーションでは時空にして4次元を扱うので、その格子点の数は40桁にもなり、シミュレーションの演算の回数は無限に近くなる。即ち、ミクロ世界とマクロ世界を一つのシミュレーションで厳密に解くためには、(時間)×(空間)ステップが 10^{40} 回という驚異的な数の演算を繰り返さなければならないことを意味する。この数は中国語の兆 = 10^{12} 、京 = 10^{16} 、垓 = 10^{20} を遥かに超える数であることを想像していただければ、それ以上の呼び名がない無量大数(10^{68})まではいかないが正(10^{40})に対応する大きさである。この天文学的なスケールの差があるプロセスを一度に矛盾なく扱えるスーパーコンピュータは、科学技術の限界をはるかに超え、現実には開発不可能である。結論すると、ミクロの時空スケールでマクロ現象までを一気通貫に解くことは不可能なことがわかっていただけるでしょう。

このオーロラのダイナミズムは、人間社会で起きている環境問題、政治問題、経済問題を彷彿とさせる。社会を構成しているのはミクロな人間一人一人であり、その一人一人の行動が集団的なマクロな異常現象として現れる。大きくは温暖化現象がその例であり、また戦争も然りである。バブルという経済現象も然りであるが、これらのマクロな現象が人間の振る舞いと関係なく自然発生的に起きる現象でないことは誰もが知っている。その裏には、政治的なマ

クロな力が必ず存在している。その政治的力(教育体制も当然入る)が働き、社会全体に歪みが起き、その歪みが社会の脆弱な箇所集中し、2極化(分断)が進み、社会が不安定化(2流体不安定に対応)し、制御が効かなくなる。宗教戦争、経済戦争、侵略戦争、あるいは、地球温暖化現象がその代表的なマクロ現象である。しかし、社会というマクロ集団は、それ自体が自律的に存在する基本要素ではなく、それを構成するミクロな人間(基本要素)の集まりによって成立しているマクロ変数の一つである。マクロな力が一人一人の心の中に染み込み、各人の異なる人生環境(教育や家庭など)によってその受け止め方が大きく異なり、それぞれが異なった活動をする。その一人一人の活動の結果として社会の統一性が崩れ、温暖化や戦争というマクロな“帰らざる河”に発展するのである。

要約すると、いかなる社会システムも外部から常に情報(エネルギー)が流入している開放されたシステムである(開放系)。外系からのエネルギー(情報)流入はシステムを構成しているミクロ基本要素(粒子であり、個人である)に伝えられ、マクロシステムの構造的に脆弱な部分の粒子(人間)に最も大きな影響を及ぼす。その影響がある限界値(閾値)を超えるとそこに局所的な異常(暴動)が発生し、増大し、その脆弱な部分の亀裂がシステム全体の崩壊につながる。自然界では地震や太陽フレア、あるいは、オーロラが典型的な例である。人間社会においては、ミクロ人間の個々の欲望の増大がエネルギー消費を増大させ、温暖化ガスの排出を強め、やがて“帰らざる”地球温暖化へと発展する。あるいは、地球表面という有限資源のシステムにおいて、各国が毎年成長し続けようとするならば、当然人口も増大させ、一人一人の生涯において必要とする物資もエネルギーも鰻登りに増大させることになり、貧富の差が社会不安を起こし、戦争にまで発展する。現在はまさにその臨界状態にあると言える。民主主義国と呼ばれる国においても、各人の能力を自由に発揮できる競争原理を基本原理とする限り、富の一局集中は当然の帰結として起きる。この富の極端な偏在が有限の社会において存続し続けることはあり得ない。いずれ、社会崩壊や戦争という異常現象に至る。このような異常現象を起こさない社会にするには、少なくとも富の偏在の元凶である民主主義の原理の一つである競争原理に変わる原理を探す必要があるであろう。

私の長い研究者人生において、自然界に生起するスプラディックE層、オーロラ現象、磁気圏サブストーム、太陽フレア、地球磁場極性の逆転現象、あるいは、実験装置内で生起するトカマク装置のディスラプション、ヘリカル装置のL/H遷移、逆磁場ピンチの形成プロセス等々のプラズマ核融合科学の代表的研究対象、更には、日常生活に直接甚大な被害をもたらす自然災害は、悉く爆発的あるいは突発的に発生する。これらの直接的研究や観察を通じて、私は次のような“爆発仮説”を提唱している。

“自然現象であれ、人間社会現象であれ、粒子(人)で構成せられている集団は常に外部系からの情報・エネルギーの流入にさらされており、それらは集団の中を循環し、脆

弱な箇所に集積する。その結果、その集積点の構成粒子(ミクロ安定状態)の持ち堪えることのできる安定限界を越え、いつかは集積したエネルギーが爆発的に解放される。”

ここで強調したいことは、学術界において、これらの爆発・突発現象を具体的に解明してきたのがプラズマ・核融合科学界、特にシミュレーション研究、であるという事実です。このことは、その解明に対する学術的あるいは方法論的先導性・優位性を最も有しているのが当学会であるということを物語っている。言うなれば、

“プラズマ核融合科学こそ自然界の複雑な不思議な現象の解明を他の学術界に先駆けて主テーマとし、その攻略法を最も熟知しているということである”。

3.5 オーロラのシミュレーション

さて、ここで大規模シミュレーションの二つの典型例として我々の行った静穏時のオーロラアーク発生のシミュレーションの具体的な話に入る。太陽フレアの発生がなく、比較的静かな状態においても、オーロラがカーテン状の形状をして、地球の夕方側の磁極を取り囲むように二重三重の縞となって突然現れる。これを静かなオーロラと呼んでいる。このオーロラアークが現れる様子を再現するシミュレーションである。

まず、太陽活動が活発な時に発生するオーロラ嵐は磁気圏尾部における磁気リコネクションが直接の原因だと信じられているが、ここではこの荒々しいオーロラ嵐ではなく、比較的太陽活動が緩やかな時に起きる形状も動きも比較的雄大なオーロラ、これを静穏オーロラと読んでいますが、それを取り上げる。以下に静穏オーロラがどのようにして発生するかについて、まず(イ)太陽風と磁気圏と電離層の大域的(マクロ)な視点から考察をし、次に(ロ)オーロラを発光させる高速電子がどのようにして生成されるのかというミクロプロセスの話をする。最後に(ハ)これらの大域的(マクロ)なプロセスとミクロなオーロラ電子の加速プロセスを自己無撞着にシミュレーションするMMIアルゴリズム(Macro-Micro Interlocked Algorithm法)の解説と具体的なシミュレーション結果を話すことにする。

(イ) 太陽風—磁気圏—電離層結合系の大域的アルフベンフィードバック不安定性

静穏オーロラは真夜中から夕方側のオーロラ帯(緯度60~65度)に現れ、その形状は磁気緯度に沿って極を取り巻くように東西に長く(数百キロ以上にわたり)伸び、幅が狭く(数キロメートルほど)細長いアーク状である。数十キロメートルほどの間隔で複数のアークが南北に並行に現れることがよくある。その光っている高度は地上100 km(電離層E層)から200 km(電離層F層)あるいはそれ以上に達する立体カーテン構造を示す。

この静穏オーロラアークのエネルギー源は元々太陽風である。太陽風(速さ V)という動力源は地球ダイポール磁力線(B)との相互作用で $E = -V \times B$ という発電作用で太陽風に対して静止している磁気圏の赤道面では東半球(朝側)から西半球(夕側)に向かう電場(起電力)を誘起する。その磁気圏の起電力(太陽風発電機)は、磁力線(導

体)で結ばれている電離層にそのまま投影されている。電離層は弱電離プラズマ媒質(抵抗性媒質)であり、しかも極域では地球磁場がほぼ垂直に電離層を貫いているので電場方向に流れる電流(ペダーセン電流)と電場と磁場に垂直な方向に流れるホール電流が流れる。ホール電流は電離層のオーロラ帯で極を取り巻く二つの大きな渦の電流(磁気圏赤道面の渦対流対)に対応)を形成する。これに対しペダーセン(オーム)電流は電離層内で閉じることができず、東半球(朝側)側の太陽風発電機(電池)のプラス極から沿磁力線電流となって磁力線に沿って電離層へ流れ込み(実際には電子電流となって磁気圏に流れ出す)、電離層を朝方側(東側)から夕方側(西側)へと横切り、そこで沿磁力線電流となって西半球(夕側)の磁気圏赤道面のマイナス極に流れ出す(実際には電子電流が電離層に向かって流れ込む)。その結果、磁気圏赤道面に誘導された太陽風電池と磁気圏沿磁力線電流と電離層終端電流は、太陽風—磁気圏—電離層をつなぐ大規模な大規模電流系を構成する(図1)。

ここで賢明な読者の皆さんは、複数のカーテン状のオーロラアークが、この太陽風—磁気圏—電離層という巨大なグローバルな大循環電流系のもとたすダイナミックな天空のドラマであろうと想像していただけるのではないのでしょうか。

この磁気圏—電離層電流系を電気回路でモデル化してみましょう。磁気圏赤道面と電離層は磁力線という送電線で結ばれ、電離層という異方性抵抗媒質で終端されている。地上の送電線では、送電線を流れる電流(電子電流)を伝搬するのは電磁波である。その伝搬速度は光速(c)であり、伝送線(単位長あたり)のインダクタンス L は真空の透磁率 μ_0 、キャパシタンス C は真空の誘電率 ϵ_0 であり、光速は $c^2 = 1/LC = 1/\epsilon_0\mu_0$ という関係式で結ばれている。地上の送電線と違い、磁気圏という媒質では沿磁力線電流を伝えるのはアルフベン波と呼ばれる磁力線の振動を伝える磁気流体(MHD)波である。その沿磁力線方向のインダクタンス L_A は真空のインダクタンス μ_0 に磁力線の形状に依存する形状因子がかかっている。キャパシタンス C_A は ρ/B^2 (ρ は磁気圏の代表的な密度で、 B はその磁場)であり、アルフベン波動速度 V_A と $V_A^2 = 1/L_A C_A$ という関係で結ばれている(図2)。

この送電線モデルで考えると、磁気圏—電離層システムが不安定になる条件が存在することが比較的容易に予想できる。例えば、電離層に東西(経度)に波面を持ち南北(緯度)方向に伝わる縞模様の微小振幅密度波(電気ポテンシャル波)を仮定しましょう。このポテンシャル波のプラ

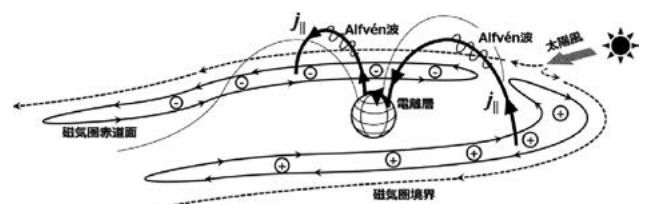


図1 太陽風(太陽風発電機)—磁気圏(沿磁力線電流)—電離層(抵抗性電流)を結ぶ大循環電流モデル。

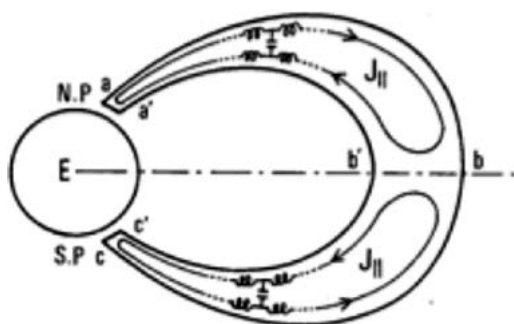


図2 磁気圏と電離層を結合する送電線モデル(子午面).

ス部分からは磁力線に沿う東西に広がるシート状電子電流となつて磁気圏側に流れ出し、磁力線に沿つてアルフベン波として磁力線に沿つて伝搬し赤道面（電源）から反射して再び磁力線に沿つて元の電離層のポテンシャル波のマイナス部分に帰ってくる。その間、電離層のポテンシャル波が半波長だけ南北方向に伝搬して、電子流が流れ込んでくるマイナスポテンシャル部分に戻ってきたとすると、そのアルフベン波動が運んでくる電子流部分が、元々の電離層の密度波に伴う電子流に加わることになり、電離層のポテンシャルの波の振幅は増大することになる[5]。これはまさに正帰還回路、即ち、進行波増幅管（発振回路）である。この考察から、電離層の磁力線を横切る電離層ポテンシャル波と電離層を貫く磁力線に沿う磁気圏アルフベン波の異なつた方向に伝搬する二つの波の伝搬速度の位相がうまく噛み合うと、電離層の密度波と磁気圏の沿磁力線電流を運ぶアルフベン波の3次元結合系が不安定になる。この不安定波動は、経度方向と高度方向に波面（カーテン面）をもち、緯度方向に伝わるカーテン上の不安定波であることがわかる。これはまさに太陽風発電機に駆動される磁気圏—電離層結合大電流システムが不安定性となり、オーロラアークの原型となりうることを彷彿とさせている。

京大物理教室の助手時代（1967～1974）に、大学で習った送電線の講義を思い出し、磁気圏と電離層の結合を送電線回路で表現するアイデアが浮かび、電離層の密度擾乱がアルフベン波となり磁気圏に伝播し、磁気圏赤道面から反射してきた位相と密度波との位相関係がある条件を満たすと、磁気圏—電離層電流システム全体が巨視的な不安定を起こすという発想である。このことは、学生時代の講義も大いに役に立つという一つの証となるだろう。

その頃、米国 NAS-NRC から Resident Researcher としてコロラド州ボルダーの NOAA の国立大気研究所で研究することが決まった (1972)。同僚の Tom Holzer 博士との共同研究として、この磁気圏—電離層の大域電流システムの方程式系の自己無撞着な定式化を完成し、その後ドイツの Max-Planck 研究所 (フンボルト財団研究員) に研究拠点を移し (1973)、一定の条件を満たすと、南北に伝わる電離層の電子密度波が磁気圏を磁力線方向に伝わるアルフベン波と共鳴し、磁気圏—電離圏電流システムが不安定 (アルフベン不安定) となり、カーテン状の沿磁力線電流面が極に向かって縞状に伝搬する理論を完成し、電離層において数 10 km ほどの波長の極方向に伝わる波が数分の

成長率で成長するという結論を得ていた[6].

ここで、太陽風—磁気圏—電離層結合系の本格的なシミュレーションコード作成の手順を簡単に説明しておこう。まず、磁気圏ダイナミクスの記述は沿磁力線電流の伝搬、即ち、アルフベン波を記述するMHD方程式を用意する。次に、磁気圏の沿磁力線電流（アルフベン電流）が電離層の弱電離プラズマ電流と連続する条件（電流の連続の式）を用意する。この両方程式を連立させることによって、磁気圏の赤道面につながる太陽電池から磁力線に沿って流れてくる沿磁力線電子電流と電離層という異方性抵抗（ペターセン及びホール抵抗）を持つ媒質を流れる電流が自己無撞着につながることになる。ここで注目すべき点として、電離層における抵抗（ペターセン及びホール）が電離層の電子密度に比例しているという事実である。したがって、電離層の電子密度という変数（自由度）が磁気圏の状態を記述する変数である沿磁力線電流に加わることになる。もう一つの注目点は、沿磁力線電流と電離層密度との間に別のプロセスが存在していることである。そのプロセスは、平常時においては無視できるが、この大域結合系が不安定となり、沿磁力線電流が局所的に増大することによって磁力線に沿うどこかの高度でマイクロプラズマ（イオン音波）不安定性の発生する条件が満たされるとダブルレイヤ（電気二重層、ポテンシャルショック構造）が形成され、下降電子流が大きく加速され、電離層高度で酸素や窒素を電離し、大量の電子密度が増大する。同時に発光も起き、オーロラが生成される。したがって、自己無撞着な磁気圏—電離層結合系を行うシミュレーションには、マイクロプロセス（ダブルレイヤ）で発生した降下電子流の速度分布関数に基づいて電離層での電離度を計算し、電流の連続の式に正しく電子密度の生成率を従属変数として算出するプロセスの導入が欠かせないということである。

(ロ) オーロラ粒子の加速機構—ダブルレイヤ

磁気圏尾部のプラズマシートには数百 eV のエネルギーを持つプラズマ粒子(電子)が存在している. ところがオーロラを光らせるものには 10 KeV という高エネルギー電子があり, 磁気圏の磁力線に沿って何らかの強い加速メカニズムが存在しなくてはならない.

東大の助教授時代の後半（1979年2月）に、プリンストン大学のプラズマ物理研究所（PPPL）に客員研究員として招かれた。その際、日本から送った研究資料が間違っ
て船便で送られ、届くまで1ヶ月ほど暇だった。そこで、以前からの友人であるPPPLの奥田英雄氏のプラズマ粒子コードを用いてオーロラ電子の加熱機構を解明する共同研究を提案した。当時は、まだ誰も具体的な加速メカニズムをシミュレーションで実証したものはいなかった。上に述べたように、兼ねてから磁気圏には太陽風電池が繋がっており、太陽風電池から磁気圏と電離層を繋ぐ磁気圏大電流系が存在していると考えていた。その磁力線に沿う電子電流（下降電子電流）が電離層と磁気圏赤道面との間の何処かで不安定となり、異常電気抵抗が発生し、沿磁力線電場が局所的に形成され、その電場がプラズマシートの電子を加速し、オーロラ電子になるというアイデアをあたためて

いた。そこで、怪我の功名ではないが、幸いにPPPLの奥田氏の粒子コードでこのシナリオを実証することを企てることができた。更に幸いなことに、米国には丁度シーモア・クレイの発明したベクトル型スパコンCRAY-1がカリフォルニアのリバモア研究所に設置されていて、東海岸のプリンストン大学のPPPLの研究者はそれを通信回線でリモート利用することができた。このCRAY-1との出会いがその後の私のシミュレーション人生への非常に大きなインパクトとなった。とにかく、東海岸と西海岸の時間差をうまく利用して、リバモア研究所の研究者が真夜中で寝ている間にCRAY-1に電話回線で繋ぎ、プリンストンのアパートの1室から端末機をツートンツートンと毎晩ジョブを打ち込み続けていた。ある日、突然出力の数字に異変が起き、何が起きたのかと不思議に思い数値の整理をしたところ、驚いたことに、磁力線方向の電気ポテンシャル分布にステップ状のプラズマショック構造が現れているではないか。いわゆる、電気二重層（ダブルレイヤー）の発見である[7]。この不安定性はイオン音波不安定性であり、イオン音波ダブルレイヤーと名付けた。世界で初めてその実態がシミュレーションによって明らかになった。

PPPLは核融合プラズマのメッカで、当時はTFTRという世界最大のトカマク装置を建設中であった。核融合磁場閉じ込めプラズマも磁気圏プラズマも共に磁場とプラズマの絡み合いが共通のコンセプトであることから、PPPL研究所長のハロルド・ファース博士が提唱していたスフェロマックと呼ぶ外部からプラズマと磁気フラックスを真空容器内に適当に注入すると自己組織化的に巣籠もりした閉じ込め磁力線構造（スフェロマック）が自動的に形成されるというアイデアである。このダイナミックなアイデアに大いに魅せられ、スフェロマックの自己組織化のシミュレーション研究を開始した。PPPLからベル研究所に移ってしばらくこの研究を続けていたところ、京大から広島大学に移った西川恭治先生から核融合理論研究センターの設立が認められ、教授を一人とれることになったとの誘いで急遽広島に移ることになった（1980）。

広島の核融合理論研究センターはシミュレーション研究にとって最適の環境であった。コンピュータを単なる非線形問題の良き解析道具と考えるならば、大きなスーパーコンピュータを使える環境でさえあれば、研究は何処でもできる。しかし、当時私も40歳となり、コンピュータを単なる高度な研究用解析道具とはみなさず、複雑性科学を構築するための貴重な研究道具であると考えていた。理論研究センターの規模は適当に小さく（教授一人と数人の助教授）、しかも、シミュレーション研究を推進するためのシミュレーション・ラボ（実験室）の設置も設備も予算の獲得も物性学科の西川教授の計らいで順調に進んだ。人材的にも数人の優れた助教授と物性学科の大学院生を比較的自由に取ることができた。核融合のテーマも宇宙空間のテーマも自由に進めることができる環境であった。理論系にしては科研費もかなり潤沢に当たった。トカマク、スフェロマック、逆磁場ピンチ（RFP）、逆磁場配位（FRC）などの核融合科学から、磁気圏形成、磁気圏サブストー

ム、オーロラ等の宇宙空間科学の非線形現象のシミュレーション研究を皆なで同時並行的に行っていた。しかし、これらの複数のテーマをバラバラに行っていたのではない。シミュレーション科学の中心課題である非線形現象、中でも、爆発現象や相転移現象など異常現象の中に共通する自然界の自己組織化プロセス（複雑性現象）とは何かを体系的に探ることが目標であった。即ち、流体的な集団（マクロ）運動と粒子（ミクロ）の運動との相互作用として起きる複雑現象を解き明かす「複雑性の科学」の構築をめざしていた[8]。

世界の核融合研究は急速な進歩を遂げ、日本においても、様々な大学において核融合研究のための異なったプラズマ閉じ込め方式による高価な装置を要求し始め、文部省は方式を一本化することを命じた。紆余曲折の末、磁場閉じ込め装置は京都大学のヘリオトロン装置に決まり、名古屋大学プラズマ研究所と京大ヘリオトロン核融合研究センターを統合し、核融合科学研究所を岐阜県土岐市に設立することが決まった。ところが、いざ設立となると、両者がそれぞれの大学にその一部を残すと主張し、2体衝突が3体に分裂することになり、行政改革にならない。共に譲らず、広島大学の核融合理論研究センターに大きなトバッチリが飛んできた。広島のセンターを廃止し、それを核融合科学研究所にそのまま移せば、3体衝突で3組織となり、辛うじて行政改革の面目が立つという私にとってははけしからん論理である。結局、九州大学の矢嶋信男先生の取り持ちで新研究所に大型ヘリカル装置（LHD）研究部とは独立した理論・シミュレーション研究センターを設立することで私も移ることを渋々承諾した。

私が土岐に赴任した関係で、広島のセンターのほとんどの研究者と院生も移ることになった（伊藤肇苗助教授はその後間も無く九州大学に移る）。高丸尚教氏（現中部大学教授）もその院生の一人で、オーロラ電子のダブルレイアによる加速問題に関し、従来の周期的境界条件という上流と下流が周期的に繋がっているという非現実的な境界条件ではダブルレイアがオーロラ電子を発生するほど大きく成長できないと考え、上流には常にフレッシュな電子やイオンが境界（プラズマシート）から自由に出入りすることができると自由境界端のアルゴリズムを開発し、見事スーパーダブルレイヤーが形成されることを解明した[9]。この新粒子コードで得られた例では、プラズマシート起源の電子のエネルギーを10倍程度加速されることが見出され、ダブルレイアがオーロラ電子の加速の原因であることが一般に認められることになった（図3参照）。

(ハ) MMIアルゴリズムとオーロラのシミュレーション

(イ) (ロ) でマクロプロセス及びミクロプロセスの各々のシミュレーションはすでに別々には完成している。しかしながら、マクロプロセスとミクロプロセスを自己無撞着に取り入れたシミュレーションを実行するとすると両者の時空4次元の格子間隔には30桁以上の差があり、そのまま同時進行的に自己無撞着にシミュレーションを進めることができないという致命的な困難に出会う。

かねて核融合科学研究所時代にあたためていたシミュ

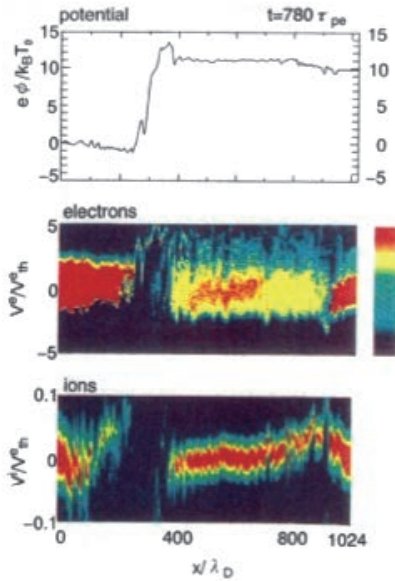


図3 粒子シミュレーションによるスーパーダブルレイ形成(上段), 高エネルギー加速を示す電子速度分布(中段), イオンの速度分布(下段)の構造[11].

レーションの世界で不可能と言われていたマイクロ過程とマクロ過程を無撞着につなぐ画期的なアルゴリズム“マクロ・マイクロ連結階層シミュレーションアルゴリズム(Macro-Micro Interlocked Algorithm, MMI法)”を核融合科学研究所から地球シミュレータ(海洋研究開発機構)のセンター長(2002~2008)に着任してまもなく発表した[10]. このMMIアルゴリズムのフローチャートを図4に示す.

我々が現象界において出くわす魅力ある現象は, 突然に, あるいは, 爆発的に起きることが多い. 地震, 洪水, 火山, 土砂くずれ, といった自然災害から, オーロラ, 太陽フレアという自然現象, より身近な現象として, 積乱雲の発生, 車のタイヤの爆発, 水道管の破裂など枚挙に遑がない. これらの異常現象に共通するのは, いずれも, 突発的に起きる直接の原因が岩石の強度, 土壌の摩擦, プラズマ粒子の不安定性, 固体の結合力破壊など媒質粒子の結合

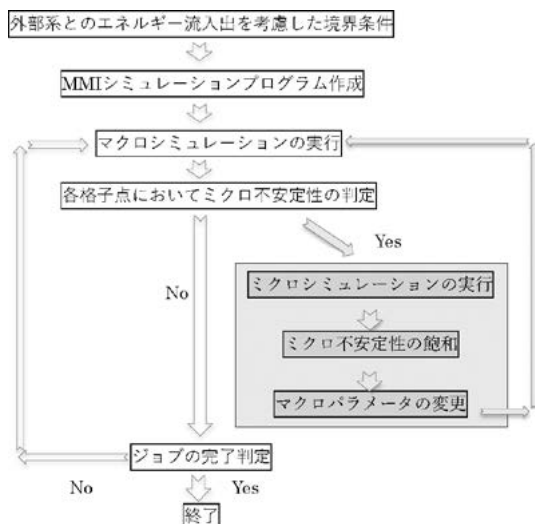


図4 マクロ・マイクロ連結階層(MMI)アルゴリズムのフローチャート.

力というマイクロな世界のなせる技だということである. しかし, このマイクロな不安定性はマクロ場が安定な状態が続いている間は自発的に起きることはまずない. 佐藤の爆発仮説に従うと, 大抵周りのマクロ環境が外圧の影響で変形し, その皺寄せが構造上の脆弱なところに押し寄せ, 最終的にその脆弱なところにマクロなエネルギーが蓄積した結果, ミクロ構造が耐えきれずに爆発的に崩壊すると考えられる.

京都時代, 東京時代, プリンストン時代, 広島時代, 土岐市時代を通じて一貫して非線形問題に取り組んできた集大成として完成したのがこの地球シミュレータ時代のMMIアルゴリズムである. マクロシミュレーションを実行し, 各格子点のマクロ変数をモニターし, ミクロ不安定を起こしそうな格子点を検知し, その格子点における臨界マクロ状態をマイクロコードの初期条件・境界条件として与え, ミクロシミュレーションを実行し, ミクロ不安定性が成長し切った状態において, 例えば, その地点(格子点)の異常抵抗, 破壊係数と言った異常に増大したマイクロ場の異常な変化をマクロ場に受け渡す最適な変換方式を見出し, それを用いてその後のマクロ状態の時間発展を追跡し, 突発(爆発)異常現象を解明する.

MMIアルゴリズムによると, マクロシミュレーションにおいてマクロ状態が静かな状態が続いている間はマイクロ場の状態を調べるマイクロシミュレーションを動かす必要が全くない. 外力でマクロ場にエネルギーの循環が起き, その循環の停留点にエネルギーの蓄積が起き, ついにはマイクロ構造が不安定となる状態に近づく. その点を検出した時のみ, ミクロシミュレーションを発動させ, ミクロ不安定によってマイクロ構造が大きく崩れてマクロ場を規定する媒質係数, 例えば, 電気抵抗, 粘性率, 拡散係数, 熱伝導率, 結晶結合係数などに大きな変化がみられたならば, その格子点上のマクロ場に適切にその情報を伝えて, マクロ場のシミュレーションを続行し, 異常現象の自己無撞着な解明が可能となる. 例えば, 岩石破壊のシミュレーションを例にとると, マクロシミュレーションを実行し, 外圧によって岩石全体が変形し, エネルギーの蓄積が局所的に集中し固体の結合力の限界近くに達したマクロ格子点を見出し, その格子点の状況をマイクロシミュレーションのシステムとして設定し, 固体破壊のマイクロシミュレーション(例えば, 分子動力学シミュレーション)を行い, その格子点近傍の破壊につながる鍵となるマクロ変数を抽出し, それをマクロコードに入れ, 岩石全体の破壊のマクロなダイナミクスを続行する. 鍵となる変数を抽出と一言で書いたが, 現実にはマイクロプロセスとマクロプロセスを物理的に矛盾なく繋ぐキー変数を見つけるのはそれほど容易なことではない. いかに巧妙な関係を見出すかが, ミクロプロセスとマクロプロセスを論理的に矛盾なくMMIシミュレーションを実行する上での最重要課題である. 逆に言えば, このマクロとマイクロの繋ぎの関係を見出すことこそがシミュレーション研究者の最も醍醐味を味わえる場面とも言える.

マクロステージとマイクロステージのシミュレーションコードを完成させ, 図4に示すMMIアルゴリズムに従っ

て二つのステージを繋ぐシミュレーションの結果得られるオーロラアークのアニメーション作成に核融合科学研究所の長谷川裕記氏が成功している[11]。図5はシミュレーションで得られた動画のスナップショットを、地上から眺めたオーロラアーク（左図）と宇宙ステーション高度から見たオーロラアーク（右図）として示した画像である。これまでに観測されているオーロラアークの写真と比較するといかに見事にその特徴が一致しているかを理解していただけであろう。見事なシミュレーション研究と言える。

ここで示した例の他に、地球シミュレータセンターのセンター長時代（2002～2008）にMMIアルゴリズムを用いて成功したシミュレーション例はいくつかある。例えば、上昇気流に乗って大気粒子が結合し雨粒を形成するマイクロプロセスを取り入れてマクロな入道雲が形成されていく過程（図6参照）や走っている自動車のタイヤが道路との摩擦で摩滅するマイクロプロセスを取り入れたタイヤの破裂のマクロシミュレーションなどである。

3.6 ダイポール地球磁場のシミュレーション

次に、シミュレーションの威力を示すもう一つの代表的な大規模シミュレーションの例を紹介する。

地球のダイポール磁場がどうして存在しているのかという疑問を少年時代に抱いた人がいるのではないのでしょうか。地球の中心に巨大な磁石が存在していると思っている人もいるかもしれない。地球の中心がどのようなになっているかは直接行って観測するわけにはいかない。せいぜい弾性波（地震）で遠隔測定するぐらいである。とは言え、地球の生まれるプロセスの研究や地震波の伝搬の解析等から既にある大まかな地球内部構造は明らかにされている。

現在では、地球の内部には地球の誕生過程で重力収縮した5～6千度の高温の金属（鉄合金）の固体で構成され

た内核と呼ぶ領域が地球中心から1300 kmあたりまで広がり、その上に液状化した鉄合金のドロドロとした層が3500 km 辺りまで広がっている。これを外核と呼んでいる。その上にマントル対流層が地表近くまで占めている。

この外核は鉄合金という磁性体が液状になっており、高温の内核から熱せられ続けていて、上部（地表）に向かって熱対流が生じていると考えられている。しかも地球は自転しているためコリオリの力が働く。鉛直方向には重力がかかっている。したがって、熱対流によって駆動された流体には3次元の力がかかり、複雑な3次元の運動をすると考えられる。大気の偏西風の蛇行運動や台風の動きと同様である。オーロラが太陽風をエネルギー源として地球磁気圏に対流を引き起こし、それが起電力となって、磁気圏を貫通する沿磁力線電流系を構成し、電離層という抵抗性の媒質と相互作用して発生する。この複雑なオーロラの物語と同様の物語が地球内部に発生しても不思議ではない。外核が鉄合金の液体であることは、電流が流れる電気伝導媒質であること、さらに、鉄合金であるために磁性媒質でもある。この二つの事実は、外核という電磁流体（磁気流体）の中でダイナモ発電が現れても不思議ではないことを示唆している。磁性媒質でもあり、微小磁場が熱擾乱的に存在していると考えられる。外核の下方には高温の内核から常時熱伝導により下部から上部に向かって熱対流が生じ、種磁場があればダイナモ効果で電場（ $E = -V \times B$ ）が発生するであろう。熱対流には地球の自転に伴うコリオリ力も加わり、対流は複雑な電場の空間変動を生じる。この電場の変動から磁場が発生する（ $\partial B / \partial t = -\nabla \times E$ ）。このようなプロセスで発生した磁場が元の熱擾乱（種）磁場を増大させるような条件が満たされると、磁場は局所的に増大することになる。この条件が満たされるかどうかは、外核というシステムが球殻層であり、しかも自転しており、重力が鉛直方向に働いているという極めて複雑な力の形状をしているために予測することはほとんど困難である。仮に磁場が局所的に不安定となることが理論的に予測されたとしても、その不安定モードが地球を取り巻くダイポールモードを生み出すかどうかは不明である。ある不安定モードが成長し、複雑なモード間結合を起こし、最終的にダイポールモードに集約される非線形プロセスが起きているのかもしれない。多くの優秀な研究者が長年理論的に、あるいは、模型的に研究を重ねたが納得のいく答えが得られなかったことがこの難しさを物語っている。

1989年に広島大学から核融合科学研究所に研究拠点を移したことはすで書いたが、そこで理論・シミュレーション研究センターという日本初の「シミュレーション」という名の付く研究組織を立ち上げ、日本で最大級のベクトル方式スーパーコンピュータ（SX-3）を導入することに成功した。広大から核融合研への大移動の際に大学院生の陰山聡氏（現神戸大教授）もその一人として移動した。そこで、陰山氏と共に地磁気ダイナモのシミュレーション研究という難解な課題にも取り組んだ。

シミュレーションに用いる基本法則は電磁誘導方程式、ナビエ・ストークス（運動）方程式、連続（質量保存）の

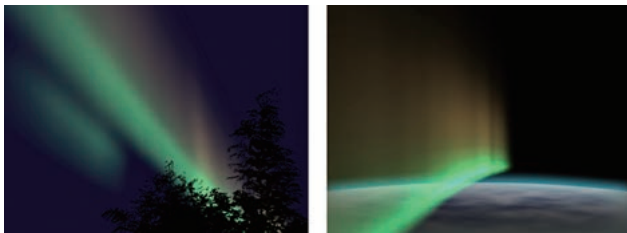


図5 MMI シミュレーションで得たオーロラアークの形成・発展の動画のスナップショット。左図は地上から見上げたオーロラ（うっすらと2重のアークが写っている）。右図は人工衛星高度から見たオーロラ[11]。

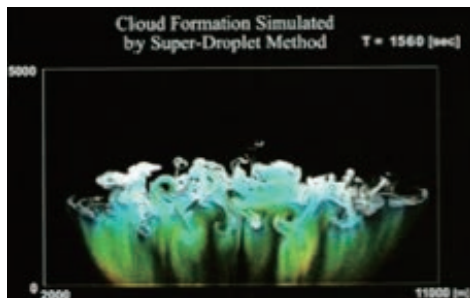


図6 上昇気流に伴う雨粒子の生成（マイクロプロセス）と積乱雲・夕立が形成される MMI シミュレーション例。

式、熱伝導の式というマクロ法則のみである。この地磁気ダイナモのシミュレーションにおいては、ダイナモ層（外核）の媒質が理想流体ではなく、電気伝導度、粘性、熱伝導係数などのマクロパラメータ（媒質定数）が存在し、それらが定数であるという仮定に立つて行う。もう少し詳しくいうと、地球磁場の発生は、磁気流体というマクロな媒質のダイナミクスで説明できるという立場に立つということである。オーロラのように粒子のダイナミクスを伴わなくても地磁気の発生は起きるという前提である。

実際のシミュレーションでは、地球の内部と同じパラメータを採用することは、時定数の極端に違う変数が存在するために極端に小さな空間格子間隔や時間ステップを取らざるを得なくなり、シミュレーションは実質的に不可能となる。そこで、シミュレーションの実行が可能となる合理的なパラメータセットを選び、試行錯誤を何年も重ねた。その結果、ダイポール磁場が見事に形成されるシミュレーションに成功した[12]。その結果の1例を図7に示す。

このダイポール形状は、その後、かなり長時間シミュレーションを続けたがほぼ同じ大きさ形状を示し続けた。そこで、陰山氏は、このダイポール解は非常に安定な非線形解であるという見解をとった。これに対し、私は自転しながら太陽の周りを大きく周回する幾何学的対称構図から考えて、形成されるダイポール磁場の極性が一方に定まっているという蓋然性に大きな疑問を持っていた。電気回路のフリップフロップ回路のように二つの安定状態があり、その二つの安定状態をシミュレーションコードの避けることのできない差分誤差が存在し、これが原因となってフリップフロップ的に二つの安定解を行ったり来たりを返しても良いはずだという信念を持っていた。そこで、新しい院生、またその次の院生と何年もシミュレーション精度を上げながらどんどん続けてもらった。その結果、驚いたことに、私の予想通り、南北の極性が逆転を起こすことが判明した。さらに続けると、何度も、何度もその逆転現象が現れた。しかもその周期は一定ではなく、不定期に逆転していることがわかった[13]。図8は、現在も一年に1~2センチほどの速さでハワイから日本の方に大陸移動するベルトコンベアに乗って動く太平洋の海底の残留磁気の測定から得られた地球磁場の逆転の時系列（上）とシミュレーションで得られた逆転の模様（下）を比較した図である。図9は一つの逆転時における磁力線の逆転していく姿を示した図である。

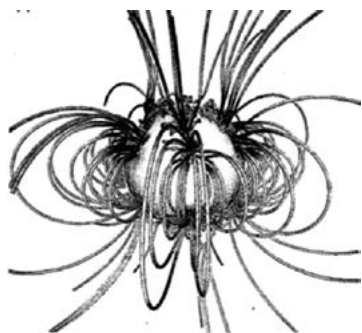


図7 シミュレーションで明かされた双極子磁力線の生成[12].

この観測とシミュレーションの逆転の振る舞いを比較してみると定性的に見事な一致をしているのがわかっていただけるだろう。一つは、比較的長い一定の期間を経て突然短期間で逆転をすること、二つ目は、その逆転の周期が一定ではなく、不定期（不規則）に起きていることである。これら二つの事実は、地球内部のダイナモ作用によりダイポール（双極子）磁場が発生すること、しかも、その極性の継続は永久ではなく、ある長い期間の経過後に不意に逆転をするという不思議なフリップフロップ現象であることを示している。自然界におけるこのような不思議なフリップフロップ現象がシミュレーションによって再現できたのは驚くべき進歩と言える。ただ、逆転がなぜ度々発生するか物理的原因はこのマクロなシミュレーションでは未解決問題として残されている。恐らく数値（差分）誤差が原因であろうとしか言えない。数値誤差は物理プロセスではないが、自然界に存在する擾乱と類似の役割をするだろうとも予想される。

この地球磁場の逆転をトリガーする未解決物理課題の解決はプラズマ科学の今後の展開にとって大きな意味を含んでいる。最後に少し詳しく述べるが、現在核融合科学研究所の長谷川裕記助教と大谷寛明准教授を中心この磁極逆転のトリガーとなるミクロプロセスの原因を突き止めるためのチームを組んで戦っている。この問題は、自然界という

プレート運動観測から得られた4千万年間の地磁気ダイポール地場の逆転現象



シミュレーションが得た生成ダイポール地場の不規則且つ突然の逆転現象

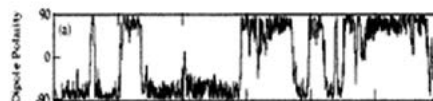


図8 (上) 太平洋海底の残留磁気の測定から得られた10~100万年に一度逆転を繰り返す地磁気の逆転現象と(下) MHD ダイナモシミュレーションで得られた双極子磁場の不規則に繰り返す逆転現象[13].

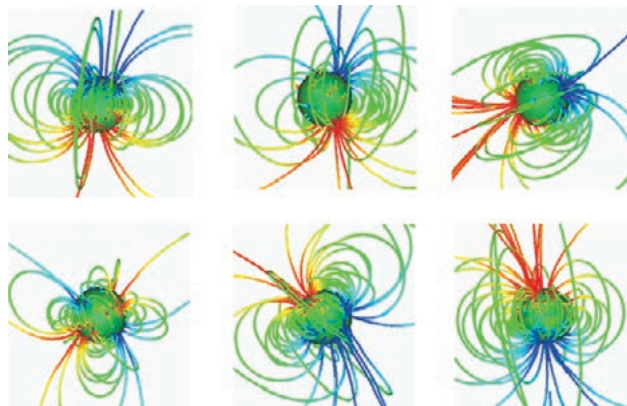


図9 MHD ダイナモシミュレーションの双極子磁場が逆転する磁力線構造の変化を示す3次元図[13].

非平衡開放システムの典型的な突発現象のシミュレーションによる解明という科学的意義のみならず、我々生物の生存を支えている地球の磁場の逆転という人類史上経験したことのない大災害にも大きく関係する問題である。逆転が起きている期間は地磁気が弱まり宇宙線が直接地球上に降り注ぎ、文明を支える社会インフラだけでなく生命体も大きなダメージを受けるだろうと考えられている。現在の磁極は既にかなり長い間（80万年）続いており、平均10万年程度に一度という観測上の逆転の事実からすると、すぐにも逆転が起きてもおかしくない。その逆転の兆しがシミュレーションで解明できれば、次に逆転が起きる時期の予測に大いに役立つ。これは、ある意味人類の存亡にとっても重大な問題への大きな挑戦課題でもある。

その逆転劇のミクロプロセスは別にしても、逆転を引き起こすシミュレーションの成功は、前に示したオーロラの発生などととも、シミュレーションという研究方法が想像以上に複雑な自然現象解明への強力な科学的手段となりことを裏付けていることを理解していただけるであろう。

3.7 シミュレーションは未来を見る望遠鏡

シミュレーションに用いた基本法則性は、電磁場の法則、質量保存の法則、運動量保存の法則、エネルギー保存である。これらの法則は、デカルトの要素還元論の物事を要素に分解するという方法論で見出した法則である。この過去へ向かう要素還元論によって見出された基本法則を初期環境から出発して順に時間発展を続けていけば、いかに複雑奇妙な現象でもシミュレーションによって統計的な蓋然性ととともに再現できることがわかってきた。このことは、一面では、普遍性を担保するデカルト的要素還元論に基づく現代の科学のあり方が正しかったことを裏付けたことになる。一方で、科学が将来の行く末を見通し、進むべき未来の姿を見出し、現在にその姿をフィードバックし、すべての人が安心して生きていける未来社会に向かうための条件を吟味するための科学の方法論を開発することを怠ってきたのも事実である。

皆さんは、上に示したオーロラアークの発生・発展や地球双極子磁場の発生・発展のシミュレーションが現在起きている複雑な自然現象を再現し、その因果関係を解明するための科学的道具（研究手法）であると認識しているかもしれない。しかし、この認識はシミュレーションの威力を過小評価している。現在起きている現象の因果関係を解明するという現代の科学の重要な研究の方法論であることは間違いないが、その認識から離れ、未来に起きる現象を見たい、知りたいという一般人としての立場に立ってみてください。シミュレーションは、現在の状態を初期状態として、未来に向かってどのように発展していくかを科学的な確からしさを持って示してくれる、いわば、未来に起こる現象を“見る”ことができる新しい望遠鏡となりうる。我々が日常に手に触れることができる“現在”あるいは“過去”の出来事を“知る”のが望遠鏡であったのに対し、シミュレーションは“未来”を見る“望遠鏡”である。

4. まとめ — “未来を見る望遠鏡” 計画のすすめ

この稿で私がプラズマ・核融合研究者の皆さんにまず知って欲しかったことは、人間を幻想的な世界へと引き込む大自然界の大パノラマ“オーロラ”の不思議な振る舞いの源流からの再現、あるいは、生命を宇宙の放射線から守ってくれる地磁気の生成、さらには、その地球の歴史の中で繰り返される度重なる極性の逆転の再現に成功したという事実があり、日本のプラズマ・核融合研究が非平衡開放系という分野において世界に誇りうるポテンシャルティを身につけているということです。今後、MMIアルゴリズムを用いてプレート衝突による巨大地震の科学的解明や近い将来起きるかもしれない地球磁場の逆転の物理プロセスなどの科学的解明を行い、突発現象や爆発現象の一般的なシミュレーション解法の確立をめざしてほしいと願っている。そして、最も強調したかったことは、非平衡開放系現象の専用シミュレータ、いわゆる、“未来を見る望遠鏡”を核融合科学研究所が中心になって開発してくれることである。

シミュレーションという方法論は、単にデカルト的な現象の再現を実証する道具という限定的なものではなく、物事が未来に向けて発展する様子を見通す科学的な方法論、いわば、「未来を見る望遠鏡」として人類の大切な道具になり得るということである。過去において、地球シミュレータは人間活動がどのように地球の温暖化に寄与しているかを科学的に予測するというタスクフォースを課せられていた。これは、まさに未来学の始まりであった。しかし、日本政府は愚かにも未来を対象とする温暖化研究という千載一遇の未曾有の地球シミュレータプロジェクトをたった6年あまりで、開発費用400億円、建屋、設備、運転経費、人件費等を加えると数千億円の投資を行った計画をいとも簡単に御払い箱にした。

温暖化問題はシミュレーションに最も適した未来学の課題の一つである。人間が放出する炭酸ガスの量を入力パラメータとして、さまざまな条件の下で、温暖化の予測のシミュレーションを行い、どの条件が温暖化の悪い影響を最も減らすことができるかを徹底的に調べ上げ、それを実行するように国際的に実行していく仕組みを提案することも未来学の役割の一つである。温暖化だけではなく、プレート型の大規模地震の予測も未来学の重要な課題の一つである。これらの現象をシミュレーション可能な、例えば、ベクトル型+GPGPUハイブリッド型大規模専用シミュレータを開発し、改良型のMMIアルゴリズムを改良することによって現在よりはるかに確度の高い地震予測が可能となる。この予測による地震被害の減少は国民に安心感を与えるのみならず、相当の国家財政の改善につながることは間違いない。更に、台風、激甚降雨、土砂災害、洪水などの予測も専用シミュレータが開発されれば、相当の確度をもって予測可能となり、被害の予防に十分生かすことができる。その結果、人的・物的損害も大きく減らすことが可能となる。大規模な専用シミュレータを持つことによってこれら自然災害の科学的信頼のおける予測が可能になるだけでも、日本の国力と信用度の増進に大きく貢献できるも

のと信じる。経済性の高い現行のマルチコアスカラプロセッサに資本主義政策の推進を託すと同時に、並行して、本当の意味での人類を救う人間中心政策の推進のために災害専用のシミュレータの開発に少々経費をかけても決して日本の国民にとって無駄ではないだろう。

人間社会のあり方は人間自身が決めることができる。これは自然界にはない特権である。言い換えると、人の進むべき方向は人が決めることができるという特権である。この特権を利用するならば、専用シミュレータを用いて、様々な条件を入力として、社会がどのような方向に向かうのかということを予測し、その中で最も人間社会としてあるべき姿を選び、その姿を実現する条件を見出し、よき未来社会を創設していくことも可能となる。安心と安全を科学的確かさで保証する未来社会を提起するのがシミュレーション科学の本質である。この学問領域を、私は「未来学」、あるいは、「未来創成学」と呼んでいる。人間社会の未来学を完成させるための先駆けとして“未来を見る望遠鏡”計画をプラズマ・核融合科学の分野から進めてはいかがだろうか。現実にそれを世界に先駆けて実現できるのは日本のプラズマ・核融合科学の強みであることを忘れないでほしい。

核融合科学研究所は、この4年近く開発研究所から学術研究所に向けて180度の構造改革を行ってきた。現在、本来の学術への回帰のための構造改革はしっかりと進んでいる。新しい研究目標を定めたユニット体制による研究も2023年から開始された。残念ながら、現在のところ学術界に新風を吹かせ、何か突出した効果を社会に与えると期待できる息吹を私は未だ感じ取れない。今こそ改革途上の核融合科学研究所は、小さな井戸の中から外界に思い切って飛び出し、天空に羽ばたく絶好のチャンスである。最初書いたように、プラズマの乱流輸送は核融合科学を代表する非平衡開放系の最大の課題として未解決のままである。今後の核融合科学研究所がどのようにしてこの問題に対処していくかが喫緊の課題であり、皆さんの果敢なチャレンジに期待したい。

プラズマ・核融合科学に特有の非平衡・開放性は自然界のみならず一般社会に共通に見られる状態である。有限の系に外部系から継続的なエネルギー（情報）の流入があり、系内にエネルギー（情報）の流れの循環が起き、その停留

点においてエネルギーが異常に蓄積し、その結果、ミクロ構造が破壊（不安定性）し、遂には、マクロ構造の大変換へと発展するという過程は一般的に起きる事象である。

シミュレーション手法はこのような複雑なプロセスを解明する一般的方法論として開発されてきた。核融合科学研究所には、実験的研究に加えて、様々な複雑な自然現象を再現するシミュレーション研究を世界を先導して発展させてきた歴史と自負がある。その流れを継承している研究グループとして現在でもMMIアルゴリズムを基盤とする小さいが一つのグループ（長谷川・大谷）が存在している。このグループを起点として、より学際性を広め、“未来を見る望遠鏡”実現に向けた挑戦がソフトおよびハードの両面からプラズマ・核融合科学界に湧き上がることを期待し、その実現に読者の皆さんからの温かい応援を心からお願いしてこの稿を終えたい。

参考文献

- [1] 佐藤哲也：マグネシウム学会誌 **43**, 5 (2024).
- [2] 佐藤哲也：シミュレーション文化の胎動, 学会会報, 2007-IV, No.865, 42-45 (2007); 佐藤哲也：未来を予測する技術, (ソフトバンク新書, 2007); 佐藤哲也：巨大科学で探る地球, 金田義之 / 佐藤哲也 / 巽好幸 / 鳥海光弘編, 第3章 (東京大学出版会, 東京, 2008).
- [3] T. Tsuda and T. Sato, Phys. Fluids **11**, 677 (1968).
- [4] T. Hayashi and T. Sato, J. Geophys. Res. **83**, 217 (1978).
- [5] T. Ogawa and T. Sato, Planet. Space Res. **19**, 1393 (1971).
- [6] T. Sato and T. Holzer, J. Geophys. Res. **78**, 7314 (1973).
- [7] T. Sato and H. Okuda, Phys. Rev. Lett. **44**, 740 (1980).
- [8] 佐藤哲也：自己組織化するプラズマ, 大槻義彦編／物理学最前線 **31** (共立出版, 1993).
- [9] H. Takamaru *et al.*, Phys. Soc. **66**, 3826 (1997).
- [10] T. Sato, J. Phys. Conference Series **16**, 31(2005).
- [11] 長谷川裕記, 大野暢亮, 佐藤哲也：ながれ **30**, 401 (2011).
- [12] A. Kageyama and T. Sato, Phys. Plasmas **2**, 1421 (1995); Phys. Rev. Lett. **55**, 4617 (1997).
- [13] H.J. Li, T. Sato and A. Kageyama, Science **295**, 1787 (2002).