

## “未来を見る望遠鏡”ーポスト地球シミュレータ計画

佐藤哲也

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

### 話のまとめ

デカルト科学においては、マクロ現象とミクロ現象は各々別の階層の現象として取り扱い（階層化）、お互いに相手階層の状態を背景として描くことで階層性を容認してきた。このように単色化された階層は非線形ダイナミクス問題としてシミュレーション解析が容易になり、その背景パラメータを操ることによって多くの論文を書くことができた。多くのシミュレーション研究者が学术界で存続できたのはこの階層化概念のお陰であると言っても過言ではない。しかし、階層間にまたがる現象や異なった領域にまたがる複雑現象の多くは未消化問題として残されている。せいぜい継ぎ接ぎ的な安直な形で取り扱うことがあっても本質的な解明は残されたままである。この挑戦に立ちはだかる壁として“世界は閉じていない”という事実突き当たる。外部系からのエネルギーやフラックスの流入を受け、対象領域の非一様性に伴って内部に複雑な循環が生じ、局所的にエネルギーの集積する空間も現れる。その結果、媒質の性質を代表する媒質定数（電気抵抗、粘性率、熱伝導率、磁気レイノルズ数、等々）に局所的な異変が現れる。媒質定数はミクロ場の粒子集団のマクロ場に対する応答係数として定義されている。一般には、媒質定数はシステムが熱平衡状態にあるという仮定の下で成立する性質である。媒質が局所的に平衡状態から大きくずれる時にはもはや定数という仮定は成立せず、ミクロ場のダイナミクスを自己無撞着に取り入れたマクロダイナミクスを追跡することによって決定されるべき性質のものである。マクロシミュレーションの1時間ステップはミクロ場にとっては悠久の時間であり、たとえマクロ場の変動によってマクロ格子点上の状態がミクロ場を不安定な状況に至らしめたとしても、不安定性は十分（非線形）平衡状態に到達していると考えられる。この考察に基づいて現存する最大級のコンピュータで追跡が十分可能なマクロ・ミクロ連結階層（Macro-Micro-Interlocked; MMI）アルゴリズムを核融合科学研究所の理論・シミュレーション研究センターが30年以上前に発案し、その具体的成功例も20年近く前に発表している。

シミュレーションが人間社会にその使命を真に貢献できるのは、この階層間にまたがるリアルな現象を解明できるMMIアルゴリズムにあると私は信じている。その開発はデカルト科学が置き去りにしてきた未来に起きる現象を科学的に信頼のおける形で設計できる手段を人類が手に入れることを意味する。その手段を私は“未来を見る望遠鏡”と呼びたい[1]。

この“未来を見る望遠鏡”、すなわち、“未来を見るシミュレータ”をポスト LHD 実験計画に並ぶ核融合科学研究所のプロジェクト（ポスト地球シミュレータ）として進めることを強く提案したくこの講演を引き受けた。

## 1. 核融合科学研究所とシミュレーションとの関わり

核融合科学研究所の夜明け前の学術的経緯は伊藤公孝氏の論文にその中心論点が理路整然と述べられている [2]。当時の文部省の学術審議会の中に置かれた核融合部会の早川委員会において関係者の中で議論が重ねられた。その中心課題は「トーラスプラズマの総合的理解」であり、そのための学術機関の実験手段としてヘリカル型磁場閉じ込め装置（LHD）が選ばれた精神がよく読み取れる。その精神は磁場核融合炉の地上における実現可能性の科学的知見を徹底的に調べ上げることにあった。

この LHD 計画には当然理論によるデータ解析と理論体系の構築も含まれている。当時その主要な部隊として、プラズマ研究所の大きな理論グループと京大ヘリオトロン研究センターの理論グループの合流が考えられていた。同時に、大研究所の創設に際しては、関連大学組織の大編成も視野に入っていた。理論研究に関しては、当然広島大学に 1978 年に設立された核融合理論研究センターの存在が視野の中に入っていた。1981 年 2 月に文部省学術審議会の特定領域推進分科会核融合部会において大学共同利用機関設立の必要性が議論され、文科省国際局長のもとに「核融合を推進するための調査・研究協力者会議」が設けられ、「大型装置の基本設計ならびに組織のあり方」が検討された。その中でスーパーコンピュータを駆使した理論・シミュレーション研究を一層強力に推進」することが謳われている。この経緯から広島大学の核融合理論研究センターがその大編成の中の一つであると当時の関係者は暗黙の了解をしていたようである。一方、研究所の創設の具体的作業に入った当時（1987）、広島大学の理論センターはすでに 10 年近い研究の歴史を積み、核融合という冠をつけたプラズマに限定せず、自然界のプラズマも対象に広くその不可思議な振る舞い（自己組織化や爆発現象など）に共通する普遍法則を見出すことに精力を注いでいた。

このような状況から、創設準備委員の理論関係の責任者であった九州大学の矢嶋信男先生との間で、広島大学核融合理論研究センターが核融合研究所（仮称）に合流する条件として、LHD 計画（理論解析も含めた）とは（1）独立した理論・シミュレーション研究センターを設置すること、及び、（2）研究所名としては核融合研究所とするのではなくもう少し学術的に広がりを持つ名称にすることを要求した。その結果として、飯吉厚夫氏を室長とする創設準備室のもとで、佐藤哲也を責任者として研究対象をより広い学術的立場からプラズマ現象を捉える理論・シミュレーション研究センターを主計画の LHD 研究部とは独立に設置することになった。ちなみに、研究所名も正式に仮称の核融合研究所から核融合科学研究所に決定した。

## 2. シミュレーション研究体制の変容

今回のセミナーの主旨を話す前に、核融合科学研究所（時には研究所と略す）のシミュレーション研究体制の歴史的な変容について触れておくは大切である。

研究所創設の理念は、理論・シミュレーション研究センター（時にはセンターと略す）が「LHD 実験計画」とは独立して、特定の磁場配位にとらわれず、自然界の磁場閉じ込め配位のプラズマを含め、様々な分野における非平衡開放系の特異な現象を対象として、広く自由な発想で研究する自由度を保証している。これこそがセンターの基本精神であった。

自然科学研究機構に統合（2003年）されるまでの理論・シミュレーション研究センターは創設の理念に沿ってそれなりの研究成果を上げていた。一方、研究所の主計画である大型ヘリカル装置 LHD は 1998 年 3 月にファーストプラズマ点火に成功し、その後着々と成果を上げていった。その成果に伴って、研究所は 2007 年度に最初の研究体制の大幅改組を行なった。本島体制下の運営会議の下の三間組織検討委員会（委員 20 名）は 4 回の委員会を開き、センターの研究成果を丹念に議論し、自然体系を多階層・複合物理過程が相互作用する非線形・非平衡・開放系として捉え、新しい領域を広げ「連結階層シミュレーションモデル」を構想するまでに成長したという外部評価委員会の高い評価（2004）も引用し、「シミュレーション科学」を打ち立てる「シミュレーション科学センター」に改組することを提案した。実際の新体制では「シミュレーション科学研究部」となり、その中に六ヶ所村センターが入るなど、三間委員会の提言とは少し乖離したものとなっている。その僅か 2 年後には二度目の組織大改革がなされ、小森体制下の日野組織検討委員会（10 名、シミュレーション関係の委員なし）において 3 回の会議が持たれた。議事は全て研究所から提出された資料に対する文言等の質疑応答に終始し、その中にシミュレーション研究という言葉は一度も現れていないにもかかわらず、最終の「組織検討委員会」報告書には、「LHD プラズマの高性能化研究」、「数値試験炉を実現させるシミュレーション手法」、及び、「炉設計を現実のものとする核融合工学基盤研究」の三つのプロジェクトが研究目標であると結論している。組織的には研究者全員が「ヘリカル研究部」に属するという学術研究所の創設の理念のみならず自然科学研究機構憲章ともかけ離れたものになった。このことが結果的には LHD 計画の終焉に繋がったことを関係者はよく噛み締めておくべきである。

理論・シミュレーション研究センターはシミュレーションと名のつく日本（世界）で生まれ最初の研究組織であり、センターそのものがまさにシミュレーションを研究手段として学術の新領域開拓という使命を負っていた。事実、流体乱流や物性の結晶構造の相転移などの先駆的領域を開拓してきた（現在ではこの流れは日本の様々な大学に波及している）。センターを設立した責任者としては、本来のシミュレーション研究

の居場所が研究所から消え去ったことは非常に残念と言わざるを得ない。ただ、その残念な結果をもたらした原因を辿っていけば、私自身の不徳の致すところにも行き着くことになる。そのことについてここで少し釈明したい。

2001年の初夏の頃、全く予期せぬ事態が私に発生した。当時 JAMSTEC・原研・宇宙研(旧科学技術庁の研究開発機関)が NEC に依頼していた地球シミュレータ(ES)という世界で圧倒的な規模のベクトル演算機を搭載するスーパーコンピュータの開発が進んでいたらしい。その開発の責任者であった三浦甫氏から内々に新しく創設される予定の地球シミュレータセンター長になってくれないかという誘いが舞い込んだ。当時は所長選にも敗れた後でもあり、2年後の定年(当時63歳)の後の職としてありがたい誘いであると考えていた。ところが、2年後ではなく数ヶ月も経たないうちに、JAMSTEC の平野拓也理事長からすぐにセンターの設立を行なってくれとの話が飛び込み、その開発の状況すら知らなかった私には青天の霹靂であったが、前に約束したことでもあり、2001年の12月から地球シミュレータセンターの発足に注力することになった(当時は兼務として)。シミュレーションは、自然災害に限らず、人間活動の未来のあり方に対しても最適解を見出しくれる知恵袋である。その意味で、日本政府が支援した地球温暖化阻止の知恵を探し出す地球シミュレータプロジェクトは人類と地球の危機に対して日本が科学的に世界の先頭に立って貢献できる先見の明のある優れた計画であった。シミュレーション学を体系化させたいと願う私にとっても最高の贈り物であった。しかし、残念ながら、この大プロジェクトが世界に誇る成果を出し続けていたにもかかわらず6年というごく短期間で当時の日本政府の無責任な政治的独断によって強制的に葬られてしまった(京コンピュータ開発のため)。この突然の廃止によって、日本からシミュレーション学という分野の発信という野望が打ち砕かれ、核融合科学研究所からリクルートした優秀なシミュレーション研究者たちもそれぞれ新しい研究の場を見つけて方々に霧散し、シミュレーション学の集大成の理念も中断した。この時の研究者のリクルートが、理論・シミュレーション研究センターの弱体化・廃止へとつながった可能性は強いと認めざるを得ない。その意味で、研究所におけるシミュレーション研究体制の弱体化は私自身にも大きな責任があると自覚している。

地球温暖化という人間がもたらした地球大気汚染という未曾有の危機問題の解決に導くべき地球シミュレータが空中分解したことに加え、南海トラフ大地震に代表される大恐慌の発生の可能性、さらには、地球上の生命を宇宙からの放射線を遮蔽してくれる地球磁場の逆転問題、近くでは、核融合エネルギー実現の成否を決する磁場閉じ込めプラズマの未解決問題等々、さまざまな世界の将来を決する大問題の科学的解明がますます大きく望まれる状況に世界は追い込まれている。地球シミュレータが廃棄され、既に15年以上経過している。現在のコンピュータの趨勢はマルチスカラコアプロセッサが主流となり、地球上に存在する膨大なデータ・情報のスタティックな解析に非常に適したデータ解析手段となっている。このマルチスカラコアプロセッサの

隆盛に伴ってデータサイエンス、さらには、無機質なデータから有機的機能を抽出する生成 AI アルゴリズムが人間の有り様までも大きく左右しようとしている。その発達は目を覆うような速さで、悪い意味で人間の“考える”という特異性を踏み躪るまでに達している。

シミュレーション科学の弱体化とシミュレーション科学からデータサイエンスへの変遷という世界の状況とが同時進行的に進んでいる中で、研究所が学術研究へと舵を戻す吉田改革は世界におけるシミュレーション研究者にとってもシミュレーション科学の重要性を世界に再度喚起する絶好の機会と捉えたい。

### 3. ポスト LHD 計画とポスト地球シミュレータ計画

吉田新体制が4年前に誕生し、学術研究所の新しい夜明けが始まった。現在では組織改革はほぼ完了している。その中核をなすユニット研究体制も2年前から活動を開始した。今年度からは、この研究体制を全面的な実働に移す任を負う山田弘司所長体制が始まった。この研究体制を実働に移す山田体制の出発は20年間失われたシミュレーション学においても再び世界を先導して挑戦する絶好の機会の再来と私は見ている。

核融合科学研究所は、吉田善章前所長によってユニット研究体制という10の学術的分節あるいは方法論を単位とするグループ体制になった。従来のヘリカル核融合炉開発を思考する単色の開発研究体制からの脱出という使命を遂行するための吉田所長の改革理念から生み出されたアイデアであり、その体制は固定的なものではなく、研究の推進に基づいて変形する流動的な枠組みであると私は解釈している。このユニット体制はその中から自発的に研究所の存在を世界に発信する挑戦的なプロジェクトが生み出される体制となっている。

研究所の主プロジェクトとしてポスト LHD 計画という実験計画が計画されている。この実験計画が今後の核融合科学研究所の大きな柱に育てることが山田新体制の最初の大きな具体的な取り組みになることは疑いがないであろう。このプロジェクトがどうあるべきかに関して伊藤公孝先生がこのセミナーでお話される。私自身としては、ポスト LHD 実験計画という大きな柱の設計に当たって、研究所皆さんが伊藤公孝先生の話を実際に捉え、伊藤早苗・伊藤公孝先生の最近の著書「プラズマの乱流輸送の基礎」をしっかりと頭に入れ、彼の深い学識と経験を吸収し、文部科学省からの資金の獲得に全力を注ぎ、ポスト LHD 計画を誤りなく入念に打ち立てて欲しいと願っている。

だが、世界の核融合科学研究所として君臨するには、ポスト LHD 計画だけでは迫力不足なのではないかと危惧している。この計画と並ぶ独立した役者があと一人か二人は出てこなくては研究所としての威容と包容力とバランスにおいて世界の覇者としての面目躍如を保てないのではないだろうか。その有力候補の一つとして本島体制の三間組織検討委員会の提案した「連結階層シミュレーション」計画の復活を取り上

げたい。最初の連結階層シミュレーションを成功に導いた地球シミュレータに準え、ポスト地球シミュレータ計画とでも呼べる大プロジェクトを打ち立てることを研究所にシミュレーション科学を打ち立てた先輩として強くお願いしたい。

#### 4. 理論・シミュレーション研究センターの主な研究活動

研究所は LHD のファーストプラズマの点火に成功するまでの約 10 年間は、大型ヘリカル研究部は LHD 装置を完成させるための装置技術、計測機器・加熱装置の開発や超伝導冷却方式の開発などの工学的な仕事に注力しており、具体的な閉じ込めプラズマの実験データの取得は主にプラズマ研究所から受け継いだ CHS の研究に委ねられていたと承知している。

一方、理論・シミュレーション研究センターは発足と同時に、LHD の建設費の獲得と並行して、世界最高水準のスーパーコンピュータの導入のために文部省の担当官と密な交渉を重ね、米国商務省からの圧力と戦い(日米スパコン戦争)、1992 年度に NEC 製の大型シミュレーション研究用解析装置(スーパーコンピュータの導入ではない)を導入することができた。この専用機の導入によって、3次元実空間で生じる強い非線形現象、例えば、自己組織化現象を解析する道具立てを手に入れることができた。

研究対象としては、様々な磁場閉じ込め装置の磁場トポロジーのダイナミックな変換に伴う諸現象や太陽風—磁気圏—電離層結合系や太陽表面におけるマクロなエネルギー輸送と爆発的なエネルギー解放問題、さらには、オーロラ電子の局所加速機構(ダブルレイヤやスーパーダブルレイヤの発生機構)や高分子錯の結晶化等が中心であった。一言で言うと、非平衡開放系における自己組織化、あるいは、エネルギーの爆発(突発)現象など複雑系に発生する異常現象に共通する普遍的性質の解明であった。ただ、これらの研究の発展に伴って、センターには一つの大きな障害を乗り越えなければならない難問が横たわっていた。その難問にいて次に触れる。

#### 5. マクロ階層とマイクロ階層の協働現象への挑戦

理論・シミュレーション研究センターは設立から粒子の集団運動(マイクロ現象)とそのマイクロ集団運動を支えているマクロ場(磁場、電場、電流、温度)との相互作用(自己組織化や異常現象)の解明に重点を置いてきた。しかし、現実にはマクロ場とマイクロ場のスケールの違いは時空の各次元において一般に5桁から10桁程度の開きがあり、全てのミクروسケール(電子スケール)の解像度で3次元実空間のマクロシステム全体の時空(時空4次元では30桁から40桁の解像度を要する)のダイナミクスをそのまま取り扱えるシミュレータはおそらく未来永劫出現しないであろう。そこで、センターでは、当面、(1)マクロ現象のシミュレーション研究に関しては、いずれかの

空間格子点上においてマイクロ状態が不安定（非平衡状態）になっていたとしてもマクロ時間ステップというマイクロ場にとっては悠久の時間が経過しておりマイクロ状態はすでに何がしかの非線形安定状態に達しているはずであるとの前提のもとに、マクロ場のマイクロ状態を代表する媒質定数（電気抵抗、熱伝導率、磁気レイノルズ数など）をマクロ変数の既知関数と仮定してマクロダイナミクスを追う安直な方針を採用することにした。他方、(2) 離散的な粒子のマイクロダイナミクスを追う粒子シミュレーション研究に関しては、非現実的な周期境界条件という数値シミュレーション上の簡便法を超えて、マクロ場の特徴的な情報をマイクロシステムの境界条件として与えるアプローチをとった。例えば、マクロ場のプラズマ流束や電流を境界条件として与える開放系粒子シミュレーションアルゴリズムの開発を行い、マクロ場の中で引き起こされる粒子集団運動の異常現象の研究を行ってきた。

これらの研究は、マクロ階層の特徴的な構造変換や爆発現象、あるいは、マイクロ階層の特徴的な異常現象・相転移という階層化された各層の現象論的解明（分節化）にはそれなりの貢献ができたと考える。

しかしながら、現実世界に起きる現象は人間が導入した階層化という勝手な分類概念とは無縁に現れる。階層化の概念は、従来のデカルト的要素還元論に従って人間が物事を容易に理解できるように複雑な絡み合いを取り払い、単純化するために導入した賢い分類法である。しかし、この方法では、現実の世界で常に経験している不可思議な現象（例えば、オーロラアークの生成）、あるいは、自然災害を自己無撞着に再現することは不可能である。さらに、人類が自ら導いた大災害（地球温暖化はその最たるもの）から逃れる学術方法論も見出していないことを意味する。その結果、従来のデカルト科学（学術）が人間社会から遊離した存在と受け止められている。

現実世界に現れる異常あるいは不可思議と呼ばれる現象（Hモードやディスラプション、太陽フレアや磁気圏サブストーム、プレート衝突型大地震、オーロラ電子加速、地球磁場の逆転、オーロラ電子加速、個体の結晶化などなど）はマクロ階層やマイクロ階層の単独行動ではなく、深く両階層の物理が互いに協働して初めて起きる協働現象である。この点に関し、研究所は、マクロ世界とマイクロ世界の協働作業を包摂し、自己無撞着に取り扱うことのできる研究手段であるマクロ・マイクロ連結階層（MMI）シミュレーションアルゴリズムの開拓者であるにもかかわらず、ここ20年以上にわたって休止の状態にある。学術界に復帰した核融合科学研究所はその忘れ物を思い出し、率先してその計画を成就させる使命を負っているのではないだろうか。

## 6. 従来のシミュレーション科学の限界点

例えば、磁気リコネクションのような磁場形状のトポロジー変換やマクロエネルギーの爆発的解放現象を引き起こすプロセスにおいては、マクロ的にはそのトリガーがマイクロ

な粒子の異常な集団運動に基づく局所的異常抵抗発生によって引き起こされていると一般には理解されている。リコネクションの発生するポイントでは3次元的にマクロ場は大きく変形し、粒子の運動も3次元的に平衡状態から大きくずれている。従来の要素還元的科学の範疇においては、ミクロな集団運動を磁気中性面電流というマクロ場の異常抵抗という一元的な媒質定数に押し込めてしまうことでマクロ階層内の問題に単純化する。そして、MHDシミュレーションを実行し、太陽フレアや太陽風-磁気圏結合系のマクロダイナミクスを調べる。他方、このマクロ場とは独立に、適当な太陽風-磁気圏結合系のマクロ場を境界条件として導入し、局所的なマクロリコネクション場を想定した粒子シミュレーションモデルを開発し、どのようなミクロ不安定が発生し異常現象がリコネクションポイントで発生するかミクロ階層の研究を行う。このような階層化されたアプローチは、他の領域においてもよく採用されているアプローチである。例えば、プレート衝突にともなうマクロな運動エネルギーがどのようなプロセスでプレートに蓄積され、どのようなミクロプロセスを通して大規模地震エネルギーへと変換されるのかを適当にマクロ場（階層）とミクロ場（階層）の分離を行い、それぞれ独立な階層の問題としてシミュレーション研究が進められているのが現状である。

以上述べてきたことからわかるように、従来の階層化した科学のあり方はその因果関係を明らかにするというデカルト的な科学哲学（真理の探究）の範疇において価値ある研究の進め方であり、学術の分節化には十分役立つと考えて良からう。しかし、あくまでデカルト的象牙の塔の中で成立する科学であり、人間のあり方そのものに助言し、その成り行きを人が制御できる人間のための科学にはならない。社会のあり方を制御するには、マクロ場とミクロ場を自己無撞着に取り扱う科学的手段が強く望まれる。

## 7. シミュレーションから出た瓢箪の駒

マクロ階層シミュレーションに固有な現象と思われる現象の中にも不可解な現象が見出されることがある。例えば、地球のダイポール磁場発生の問題である。センターでは30年前にこの難問をMHDシミュレーションによって解明することに成功している。ところが、このシミュレーションを長時間続けると、不思議な現象が出現しているのが発見された。安定して存在していたダイポール磁場の磁極が突然逆転するという現象である。しかも、そのシミュレーションをさらに続行すると不定期的に何度も磁極の逆転を繰り返す。

実は、プレートテクトニクスの提唱する大陸移動による太平洋海底の定常的な悠久の動き（東から西へ1~2cm/年）を利用した地磁気の残留磁場の測定は、地磁気が10万年から100万年に一度という不定期的な逆転を幾度となく繰り返しているという観測事実を見出している。確かに、双安定な平衡解を持つ非線形マクロシステムの存在は現実世界においてそれほど珍しくはない。しかし、双安定回路においては、外部から

安定状態を転換する何らかの信号（スイッチ）を入れなければ別の安定解へとフリップフロップ（相転移）的に転換することはない。言い換えると、双安定回路を形成する場と安定状態を変換するエイジェントは別次元のものとして存在しているはずである。

では一体この磁極の転換をトリガーする信号は何であろうか。これについての解答は現在では全く不明である。我々の MHD ダイナモシミュレーションプログラムの範疇にもこのスイッチにあたる信号（エイジェント）は存在していない。しかも、その存在しないはずのスイッチ信号が自発的にしかも不定期的に作動しているのである。この不思議な不規則逆転現象がプログラミングミスによって生じたとはとても考えにくい。我々には気がつかない何か不思議な物理的に意味のあるエイジェントがシミュレーションスキームの絡繰りの奥に隠れているに違いない。

その絡繰りの原因がマクロ場（連続体）を差分化して表現しているところに秘められているとしか考えられない。そこで、同じダイポール極性が長時間保たれている場合を考えてみよう。シミュレーションスキームには数値的揺らぎが常に存在している。今、そのマクロ変数の揺らぎの皺寄せが増大する状況が局所的に発生したとしよう。ここでは差分誤差がより増大し、数値的異常散逸が生じ、現状の安定極性が崩れる状況が起きないとは言えない。要約すると、MHD シミュレーションの差分誤差が、現実の地球磁場の逆転のトリガーを等価的に起こしているに違いない。この数値的絡繰りは、マクロシミュレーションのマクロ場の変数の時々刻々の動きを詳細に調べることによって、即ち、差分誤差の局所的増大につながる物理情報（データ）を定量的に丁寧に検証することによってミクロ場とマクロ場を結びつけてくれる相転移のトリガーとなるミクロ物理情報が得られる可能性が十分考えられる。地球の深部の出来事であり、直接観測することはほぼ不可能で、しかも、非常に複雑な環境下で不規則に突然発生し、その発生原因を論理的に予測することが非常に困難な問題である。このような状況に対し、数値手法の誤差という学術的には不要な異物が解決の糸口を与えてくれる可能性があるということとは学術研究にとってのまさに瓢箪から駒とも言える事象ではないだろうか。

## 8. 核融合科学研究所に課せられたもう一つの使命

私自身が今日ここで是非みなさんをお願いしたい事は、ポスト LHD 実験計画に加えて、シミュレーションプロジェクトを核融合科学研究所のもう一つの独立した柱として打ち立てて欲しいということです。これまでの私の説明から察していただければと思うが、具体的にはマクロ場とミクロ場を自己無撞着に包摂するシミュレーションを実行可能とする専用シミュレータ計画の立ち上げです。

理論・シミュレーション研究センターはその創設から 10 年余りでシミュレーションの重要性を世界に発信することができた。磁場に閉じ込められたプラズマの示す挙動は外部システムからのエネルギーや粒子の流入を受けて、磁場トポロジーの変換や系の爆

発的なエネルギー解放、磁気圏—電離層結合システムの大規模アルフベン不安定波動と沿磁力線スーパーダブルレイヤ生成の協働作業によるオーロラアークの形成、地球ダイポール磁場の発生と連続する不規則な磁極逆転等々、自然界における異常現象の解明を通して自然界における異常現象の発生に対する一つの一般的な仮説に至っている。

その仮説とは、

“一般に、自然界に発生する異常現象（自然災害）は、自然界のエネルギーの流れの中の有限システムに外部からのエネルギー（フラックス）流入の増大に伴って大きな循環が生じ、流れの淀み点（線、面）にエネルギーの蓄積が増大し、淀み点のマイクロ場が大きく変形し非平衡状態となり、蓄積したマクロエネルギーを放出しようとする。その放出されたエネルギーが淀み点からマクロ場全体に広がる”

というものである。

自然災害は人間の実生活に対し大きな被害をもたらす重要な課題であり、その全容を明らかにすることは大きな社会的意義を持っている。人間生活に限らず、閉塞感漂う現代の科学にとっても、慣れ親しんだ要素還元的（分析的）哲学の枠組みを乗り越え、マクロ階層とマイクロ階層を包摂した現実世界を自己無撞着に解き明かす積分の科学の方法論、即ち、非平衡開放系の科学の新しい扉を開く突破口となりうる方法論の開発は、シミュレーション研究者にとっての宿命的な役割であると考えられる。

核融合科学研究所の理論・シミュレーション研究センターに始まり、地球シミュレーターセンターに受け継がれた研究の歴史から生み出された最も大切な価値観・世界観は、現実の世界に生起する異常現象あるいは突発現象と呼ばれる現象を自己無撞着に解き明かすことのできる道具立てを打ち出したことである。学術的には、確かに、時空を階層化し、その階層の中をさらに要素に分離することによって物事の複雑な絡繰りをより単純化し、人間が理解しやすくするアプローチは確かに合理的である。物事によって来る因果関係を知りたいという人間の欲求を満たすにはこの階層化された世界をそれぞれに有効なMHDシミュレーションや粒子シミュレーションを用いて解析することで十分であるかもしれない。しかし、自然災害からの本質的な防御、あるいは、核融合炉の開発という複雑極まりない装置の開発という未来のあり方を左右する問題解決には従来の要素還元的な方法論のみでは十分とは言えない。マクロ場もマイクロ場も限なく自己無撞着に包摂し、それらの因果関係を矛盾なく時間的に追跡できる道具立てが不可欠である。核融合科学研究所にその端を発するMMIアルゴリズムはそれを可能にする一つの有力な方法論である。研究所にはそれを開発してきた自負がある。この財産を元にして、多くの異常現象に適応できるより普遍的なアルゴリズムを具体的な事例に合わせて開発する使命が課せられているのではないだろうか。

## 9. 「未来を見る望遠鏡」の開発計画

大きな科学プロジェクトの成功には、当然その目標を考え出し、それを可能にする最適

な方法論を生み出す人間の知恵の存在が第一である。その目標を効果的に実現するための「道具立て」無くして成功はあり得ない。ポスト LHD 計画然りである。

この“未来を見る望遠鏡”計画においても忘れてはならない重要な課題がある。既に、研究所においては望遠鏡が未来を見るという働きを実行する仕掛け・方法論、即ち、ソフトウェアについては十分説明した。しかし、ソフトウェアを動かす「道具立て」、即ち、ハードウェアについては触れてこなかった。現存するプラズマシミュレータは確かにその任を果たしてくれるかもしれない。しかし、このハードウェアは研究所の全研究者に解放された共用コンピュータである。今回提案する「未来を見る望遠鏡」はマクロ場のシミュレーションとマイクロ場のシミュレーションを MMI アルゴリズムに則って同時並行的に処理する特殊なアーキテクチャでなければならない。マクロ場とマイクロ場のシミュレーションはそれぞれの演算の仕方において大きく異なり、それぞれ世界最大級の計算能力を必要とする。その演算法は根本的に異なっている。それぞれの特性に応じて最適化された半導体素子（例えば、ベクトル素子や GPGPU）を基盤とするヘテロジニアス専用大型 MMI シミュレータであることが求められる。従って、そのハードウェアを開発することが不可欠である。

「未来を見る望遠鏡」はシミュレーション演算用のハードウェアだけでは研究者がシミュレーション実行中の複雑に展開する現象の動的データの様子を時々刻々認識できる認識能力（可視化装置など）を備えていることが必須である。この能力を備えることによってプログラムの最適化・効率化に寄与するだけでなく、広く一般市民に対する災害に対する訴えにも役立つ装置となる。

このような大規模で社会貢献が大きく期待されるプロジェクトの成功には、政府からの資金の獲得が必要不可欠である。山田研究所体制において、そのプロジェクトをポスト LHD プロジェクトと並行して立ち上げていくことは研究所にとっても有意義で欠かすことのできない基本学術基盤の一つであると考えます。

このソフトとハードの一体化したプロジェクトを、デカルト科学の推進役であったガリレオ・ガリレイの「宇宙の過去の姿を見る望遠鏡」にちなんで、「未来を見る望遠鏡計画」と名づけたのはその目標の大きさと社会への貢献の大きさからである。近代の歴史において要素還元の方法論（望遠鏡・顕微鏡）が大きな働きしたことは事実であろう。未来を建設的に創り出すにはその因果関係を現在のありのままの状態から出発して未来に向かって解くことができる「未来を見る望遠鏡」の存在は現在の閉塞感のある学術界に新しい風を吹かせてくれるはずである。この計画は日本にとっては地球温暖化防止のために海洋研究開発機構（JAMSTEC）で始まり僅か6年でシャットダウンした地球シミュレータ計画を越えるプロジェクトであり、ポスト地球シミュレータ計画と呼んでも良いであろう。

## 10. 「未来を見る望遠鏡計画」の現状

未来を見る望遠鏡計画が単なる私の空想の物語で終わるのか、あるいは、学術研究所として再出発した核融合科学研究所の一つの柱に成長するかどうかは、一重に研究所の皆さんの意思の総和にかかっている。研究所の意思の総和とは研究者の構成員が我関せずではなく、このプロジェクトの学術的意義を理解してくださり、直接参加ではなくとも応援しようという気持ちを持っていただけるかどうかにかかっている。今回核融合科学研究所の先輩の一人として、皆さんにお話ししたのは是非ともその実現に積極的に応援していただきたいからです。できる限り多くの研究者がこのプロジェクトに直接参加していただきたい。間接的にでも助言をいただく形で参加していただければ幸甚です。

とはいえ、現在の研究所にプロジェクトを進める上での全くその種がなければ、無から有は生じない。そこで、1年ほど前から MMI アルゴリズムの最初の活用者として太陽風—磁気圏—電離層を結ぶ大規模システムのマクロ場 (MHD シミュレーション) とオーロラ電子加速を作り出すマイクロ場(粒子シミュレーション)を自己無撞着に結ぶ MMI コード体系を作成し、オーロラアークが夜空に展開する大パノラマを映し出すことに成功した長谷川裕記氏に発破をかけている。マクロ場とマイクロ場のダイナミクスを on-line に可視化できるコード体系を開発している大谷寛明氏はこのプロジェクトに賛同し、すでに長谷川氏と協働している。OB の石黒静児氏にもポスト地球シミュレータとしての“未来を見る望遠鏡”のハードウェアの開発に NEC との協力を進めている。中部大学の高丸尚教氏はマイクロ場のシミュレーションコード開発に参加している。月に一度の Zoom 会合を開き、具体的な最初のテーマとして5章で述べた地磁気ダイナモ問題の不可解な不規則に繰り返される極性の逆転がなぜ起きたのかを解明するための研究が進んでいる。とオーロラ電子加速を生み出すスーパーダブルレイヤによる位相空間における電子とイオンの織りなすマイクロ集団現象の解明を同時に開始している。これには、神戸大学の陰山聡氏の開発した Yin-Yang コードの提供を受け、ダイナモ領域の赤道面上に一定の渦対流を外部から駆動するキネマティックダイナモのシミュレーションにおいて、学術的に非常に貴重な成果を得ている。その成果は、成長するダイポール磁場の極性が磁場の種として与える小さな初期擾乱を決める乱数によって決定されるという不思議な現象であることを示している。この結果は、(1) 地球内部ダイナモ環境が南北どちらの極も安定に出現することのできる双安定システムでありうること、(2) そのグローバルな南北の極性が初期の物理擾乱の微細な違いによって決定される、という地球という壮大な自然の物語の中に双安定回路が存在しているという事実が科学的に証明できた。この事実は本プロジェクトが大きな学術的発展をもたらす可能性を沸々と現わしているといえるのではないのでしょうか。また、オーロラ電子加速機構を解明する開放端システムのイオン音波不安定システムの予備的粒子シミュレーション研究において、実イオン/電子質量比、1万デバイ長という巨大なマイクロシステムを採用したところ、

(1) 発展の初期においてはイオン音波ダブルレイヤ（～1電子温度程度のポテンシャルショック）が500～1000デバイ長間隔で連なって現れ、発展中期においてはダブルレイヤ間の電子分布が乱流状態になり全てのダブルレイヤが潰れてしまうが、最上流のダブルレイヤだけは常に境界からフレッシュな電子流が流入してくるため加速された電子ビームが整った形で常に存在しているためにそこでは強力な電子ビーム不安定条件が形成されているためにダブルレイヤが成長し、それに伴って電子ビームが加速度的に強くなり、結果的には巨大なダブルレイヤへと指数関数的（数10電子温度ポテンシャル）に発展することが解明された。この予備的研究において未解明であったスーパーダブルレイヤの発生機構の解明に繋がったことは特筆に値するであろう。また、(2) 下流側に発生した全てのイオン音波ダブルレイヤが消滅していくプロセスがダブルレイヤ間での加速電子と反転電子の位相空間上での非線形相互作用による乱流化していくプロセスの詳細な数値データも得られている。

現在は地磁気の原因と考えられる地球の内核の熱源によって引き起こされる2002年のサイエンス誌に掲載されたダイナモの逆転現象の再現を（極座標ではなく）Yin-Yangスキームで継続している。その目的は逆転時のマクロ変数の構造変化を可視化手段によって入念に調べ上げ、どのようなマクロ状態が実現したときに逆転が起きるかを見出し、差分誤差と何らかのマイクロ不安定性との関係を見極めるための作業である。前回の研究においては逆転現象の再現にはダイポール磁場生成に成功後5年の年月を費やしたことからも理解していただけたと思うが、今回は前回の極座標モデルからYin-Yang座標モデルに変更しており、ダイポール磁場の発生とそれに続く非周期的な逆転の繰り返しを再現するにはかなりの苦勞をしている。この差分誤差の増大原因とマイクロ不安定性の関係が明らかになれば、マクロゴードとマイクロコードを合体させたMMIシミュレーションが可能となり、未磁気圏・電離層結合系におけるオーロラ発生のMMIシミュレーションに次ぐ地磁気の逆転問題に対する学術的の第2の成果となり、未来を見る望遠鏡計画の重要性・有用性を示すことになり、この計画の実現に向けた大きな駆動力になると考えている。このダイポール磁極反転の課題と並行して、位相空間乱流の実験ユニットとの将来の共同研究を見込んで、オーロラの発生原因の一つと考えられる開放系において発生するスーパーダブルレイヤに伴う位相空間における電子ホールやイオンホールなど位相空間乱流についてのシミュレーションによる定量的な情報を得る課題にも挑戦している。

現在取り組んでいる課題は従来の研究所において未解決のままになっている課題を取り上げているが、開放システムに外界からのエネルギーの注入によって引き起こされる異常現象や突発現象は核融合磁場閉じ込め領域、太陽風—磁気圏—電離圏プラズマ領域に限らず、物性科学、天文学、流体力学、生命科学などの領域においてもよく現れる。人間社会においても自然災害あるいは人工災害として生命や財産を奪う。これらの問題をありのまま再現できる“未来を見る望遠鏡”が存在したならば、未来の人間社会の設計

やあり方に大いに役立つ。その意味でも、自然科学研究機構の学術研究所として研究所がその先頭に立って推進していくことの意義は非常に大きいと考える。

中村浩章氏には研究所においてこの「未来を見る望遠鏡」プロジェクトを立ち上げる責任者となることが決まっており、物性現象や生命現象における具体的なマクロ・ミクロ結合問題が検討されており、三浦英昭氏も流体力学の立場から流体乱流における微細渦形成による散逸問題等での具体的な課題によるプロジェクトの推進を行う。

最後に、山田弘司、伊藤公孝両氏には研究所の今後の研究の方向性としてポスト LHD プロジェクトと並行してこのプロジェクトを立ち上げていくことの大局的な観点において相談をさせていただいている。

尚、理論・シミュレーション研究センターから他の大学に輩出し様々なシミュレーション分野で活躍しておられる多数の優秀な研究者がおられる。神戸大学の陰山聡氏、兵庫県立大学の野暢亮氏、甲南大学の田村祐一氏、京都工芸繊維大学の藤原進氏、京都大学の村上定義氏、大阪大学の後藤晋氏、名古屋大学の渡邊智彦氏がおられる。草野完也氏を含め彼らには是非とも参加のお願いをすることにしています。

#### 参考資料

- [1] 佐藤哲也：プラズマ核融合学会誌 101、No.2 (2025) 57-72.
- [2] 伊藤公孝：本講演 “LHD, for What, and What beyond”