

未来を見る 望遠鏡

核融合科学研究所 Fusion Science Seminar

2025年7月7日

副題：ポスト地球シミュレータ計画

佐藤哲也

名誉教授（核融合科学研究所・総合研究大学院大学・兵庫県立大学）
元地球シミュレータセンター長

話の流れ

- 核融合科学研究所の理念と組織改革
- 理論・シミュレーション研究センターの果たした役割
- シミュレーションは非平衡開放系科学の牽引車
- シミュレーション科学はデカルト科学の限界を超える
- “未来を見る望遠鏡”は新たな社会を生み出す
- 未来望遠鏡計画は新しい学術領域開拓へと踏み出している
- 結びと謝辞

- **プラズマ研究 — 自然現象と室内実験の融合の科学**

- オーロラ発光とファラデーの気体放電（1838）

- 19世紀末頃からオーロラの学術研究：・ビルケランドのTererra実験

- ケネリー・ヘビサイドと電離層 ・ラングミュアとプラズマ振動

1951年 米国プリンストン大学にプラズマ物理研究所設

1958年 バーバ博士の原子力平和利用会議での“20年後には核融合発電実現”

1961年 名古屋大学プラズマ研究所設立

1964年 宇宙科学研究所の設立 — ロケット・人工衛星の開発

1989年 核融合科学研究所の設立 ← **伊藤先生のお話**

- **核融合科学研究所の設置の基本方針（理念）：**

「広く全国の大学等の核融合分野の研究者の英知を結集して、**大型ヘリカル装置**を建設し、同装置を用いる研究を推進するとともに、核融合に関する**理論・シミュレーション研究**の中核的役割を果たすことを基本としつつ、**自由な発想**による研究を進め、**広く核融合の研究を総合的に推進**する。」

国立大学法人法に基づき
文部省の国立研究所は
四研究機構に編成された

(2004)

核融合科学研究所の最初の大きな改組

法令に基づき、核融合科学研究所は、国立天文台、分子科学研究所、基礎生物学研究所、及び、生理学研究所と共に、自然科学研究機構の研究機関となった。この改革によって、各研究機関は機構の掲げる理念（機構憲章）の下で研究を進めることとなった。

自然科学研究機構憲章

○学問の発展は本来、研究者の**自由な発想と自律性**を基本として達成されるものである。研究者が互いの創造的研究を尊重し、分野を超えて闊達に発言し協力してゆくことによって、社会に貢献しうる**新たな学問の創出**が可能となるであろう。

○我々は、この理念に基づき、宇宙、物質、エネルギー、生命など広範な自然科学分野の研究を担う大学共同利用機関の連携と共同により、**自然の理解**を一層深め、**社会の発展**に寄与してゆくことを目指して、本憲章を制定するものである。

自然科学研究機構の第1期目標・中期計画（2004～20010年）

核融合科学研究所の中期計画

- 大型ヘリカル実験装置（LHD）の性能を最大限に発揮させ、環状プラズマの総合的理解と核融合炉心プラズマの実現に向けた学術研究を行う。このためにプラズマ加熱機器及び計測機器の整備・増強、装置の改良を進め、核融合炉心プラズマを見通せるLHDプラズマの高性能化を目指す。
- 核融合プラズマ閉じ込めの物理機構解明及びその体系化を進めるとともに、それを支える基礎研究としての複雑性の科学を探求するため、理論・シミュレーション研究を推進する。このため大型シミュレーション研究用解析装置を積極的に活用する。

本島所長の「研究所におけるシミュレーション研究が近年飛躍的に進歩し新しい段階に入ったと認められ、新しい分野として確立するため」との諮問に基づいて検討委員会（三間委員長他19名）が2005年6月に発足。委員会は四回開催された。

- 報告書の要点1：「理論・シミュレーション研究センター」の最大の学術的成果はマクロ階層とミクロ階層を自己無撞着に解明する「連結階層モデル」の概念を打ち立てたことにある（2004年の外部評価委員会の評価を引用）。
- 報告書の要点2：自然体系を多階層・複合物理過程が複雑に相互作用する「非線形・非平衡・開放系」として捉え、大規模シミュレーション研究で解明する「シミュレーション科学」を構築する組織として「シミュレーション科学センター」を創設すべきである。
- 報告書の要点3：その組織は、大型ヘリカル研究部、特に理論・データ解析研究系と密に協力を図り、共同研究のためのネットワークを構築し、自然科学研究機構の他研究所との学際的な研究協力体制を主導し、さらには、天文学、分子科学、生命科学、社会科学、人文科学にシミュレーション科学を広めることにも努力すべきである。

（2007年度に「シミュレーション科学研究部」として改組される）

自然科学研究機構第2期中期目標・中期計画(2010-2016年)

核融合科学研究所**中期目標**：

大学や研究機関と共に核融合科学及び関連理工学の学術的体系化と発展を図る。

核融合科学研究所**中期計画**：

特記事項のみ記載：3プロジェクトに集中する

- (1) LHDで核融合**炉**を見通すプラズマ実現
- (2) 数値試験**炉**の構築
- (3) **炉**設計の高度化

第2次組織検討委員会（日野委員長他9名：3回開催）の検討目的として、第2期中期目標期間において「核融合炉を実現させる学術基盤の体系化を目指す」としている。再編検討の結果、

- (1) 全ての研究部門を「ヘリカル研究部」の1研究部に統合し
- (2) 研究は中期計画の三つの“炉”プロジェクトに集約し
- (3) デモ炉設計を可能とする組織改変が妥当且つ必要である。

●**内容の欺瞞性**：その議事録には再編の妥当性の議論・検討をした形跡は一切無い。特に、シミュレーション研究についての議論は皆無。全く検討する事なく、最終報告書には、シミュレーション研究部は組織図からは消え、ヘリカル研究部に一本化されている。三間委員会の結論の無視。

機構憲章とは大きな乖離、やがて、学术界からの大きな不審、そして、LHD計画の中止へ！

理論・シミュレーション研究センターの果たした役割

理論・シミュレーション研究センター設立の経緯

新研究所創設に当たって、広島大学核融合理論研究センターは以下の3つの条件を満たすことを条件として最終的に合流することを合意した(1988年の初頭と記憶)。

- (1) 研究所名は「核融合研究所」ではなく、もう少し学術的名称にすること
- (2) センターの移る先として、大型ヘリカル研究部と**独立に**研究センターを設立し、その名称にシミュレーションという文字を入れること
- (3) **広く自由な発想**で研究が遂行できること
- (4) 大型シミュレーション研究を発展させるための必須研究手段として**世界最大級のスーパーコンピュータ**の導入を可能にすること

飯吉創設準備室において名称を「核融合科学研究所」と定め、理論・シミュレーション研究検討グループ(佐藤)を設置し、4回にわたって検討会が開催された。

報告書(1988年11月)の要点:

- (1) 「理論・シミュレーション研究センター」の設置
- (2) 1990年後半にスーパーコンピュータの導入(実際には1992年導入)
- (3) シミュレーション・ラボ(現シミュレーション科学棟)の建設

従来のシミュレーション研究の方法論

- 近代科学（要素還元科学）は階層という概念を作り出した。この階層性を活用し、各階層の特徴ある現象を**階層別**に取り扱う。
- **マクロ階層**は連続体とみなし、現れる現象は偏微分方程式(例えば、MHD方程式)で記述する。その際、マクロ場の各点において**ミクロ階層の特性を媒質定数（マクロ変数に対する応答係数）と仮定**してマクロシミュレーションを行う。
- **ミクロ階層**は無数の粒子群で構成されている。その挙動は**孤立または周期システム**を仮定し、粒子の運動方程式と保存則で記述する。ミクロ現象の不安定性に焦点を当て、その非線形発展をミクロシミュレーション手法を開発して解明する。

理論・シミュレーション研究センターの基本方針 (1989-2002)

- 自然界や磁場閉じ込め実験装置に現れるエネルギー輸送・変換プロセスに伴う不思議な現象（突発現象や異常現象）の因果関係の解明を第一義的とする。
- **仮説**：エネルギー爆発現象や異常現象は（1）**外界からのエネルギー（粒子）の流入**に伴う（2）**マクロ場の変動とミクロ場とのやり取り**によって起きる。
- 外界とのエネルギーのやり取りを取り入れた**開放系**マクロシミュレーション手法の開発を行い、マクロ場の変動に伴うミクロ場の応答をマクロ変数の関数と仮定して（**媒質係数のモデル化**）し、エネルギー爆発現象や異常現象の現象論的解明を行う。
- マクロ場の局所的歪みに適応する**ミクロ場の境界条件・初期条件**を取り入れた開放系粒子シミュレーション手法を開発し、ミクロ場の集団現象のもたらすマクロ場への影響を解明。

これまでのシミュレーション研究から得た教訓

シミュレーションは本来物事のありのままを知る普遍的な研究手段である

すなわち、**過去・現在・未来を同等に**ことができることを意味する。言い換えると、シミュレーションは**科学的に未来を知る手段**となりうる。従って、**学術に新しい領域を開く研究手段**であると言える。その活用にあたっては、シミュレーションの特性、特にその限界を熟知することが求められる。

“研究者は自らが用いる研究手段の特性を熟知すべき”

階層化シミュレーションの限界（例1）

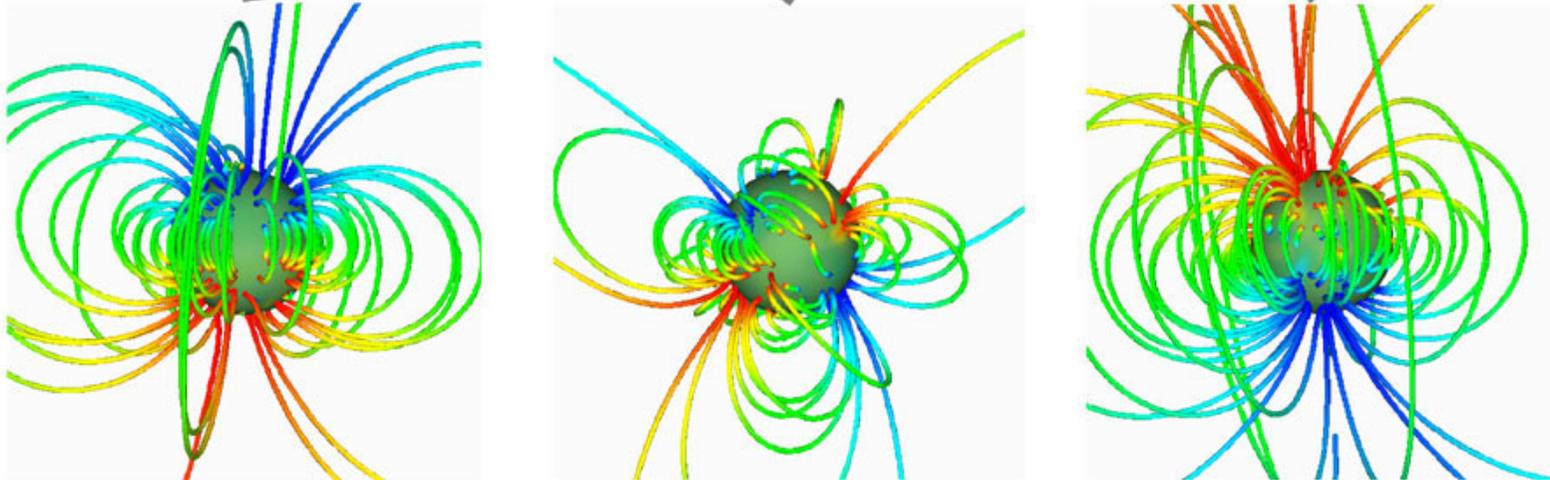
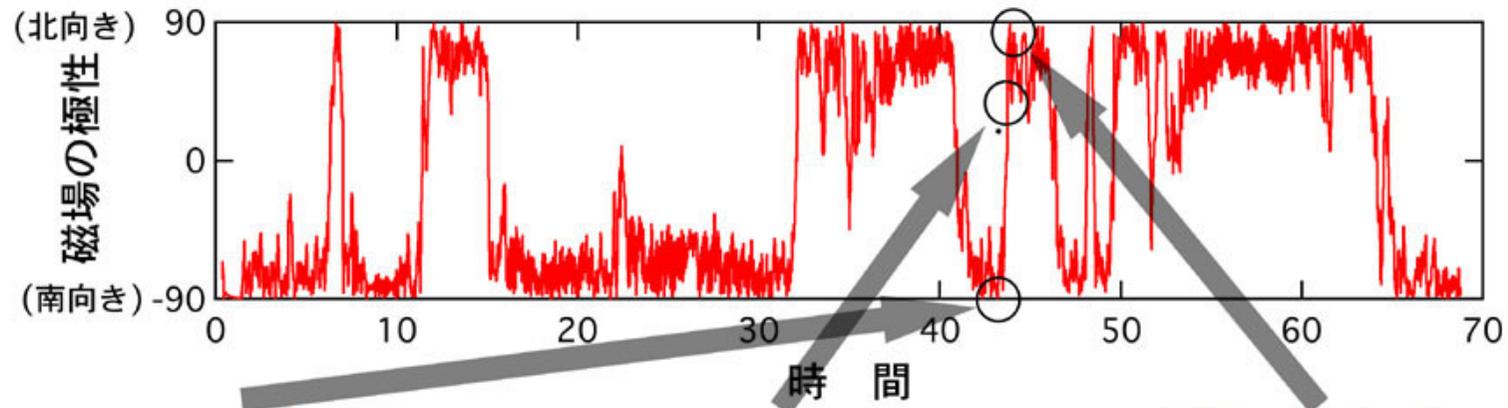
- 例えば、太陽風と磁気圏との相互作用の3次元無衝突MHDシミュレーションによって、太陽風に流された地球の磁力線が太陽側で圧縮され、反太陽側に長く伸ばされたコケシ状の磁気圏が太陽系の中に孤立した平衡空間として形成されることが容易に示される（1990）。
- ところが、太陽風に南向きのIMFを持たせると、弱いリコネクションによって太陽側の地球磁場が尾部に運ばれ、尾部磁気中性面を強く圧迫し、そこで再びリコネクションが強く発達し、**磁気圏サブストームらしき現象**が誘発される（1992）。
- この現象は本来無衝突MHDプラズマ（磁気圏）では**起こり得ない現象**である。
- 原因は、MHD方程式が差分方程式に置き換えられ、差分誤差が磁場の歪点（磁気中性面）において増大し、数値的磁気散逸が増大し、リコネクションが発生するという偽りの現象である（**数値誤差のカラクリ**）。

➡ 現実の磁気圏でリコネクションを引き起こす物理プロセスは一体何か？

階層化シミュレーションの限界（例2）

- 地球磁場はMHDダイナモというマクロ場固有の現象と考えられている。
 - 地球内部の外核領域を模擬する大規模MHDシミュレーションによってダイナモ効果による双極子磁場の発生に成功（1993）。
 - シミュレーションを長時間続けているとダイポールの極性が突然逆転するという不可解な現象が現れる。しかも、逆転は不定期的に幾度となく繰り返えられる（2002）。だが、逆転のトリガーになるものの実体は存在しない。数値誤差以外にトリガーになりうるものは見当たらない。
 - 自然界には、数値誤差は存在しない。では、MHDダイナモシミュレーションにおいて、極性の逆転を誘発するには数値誤差に対応する第3の物理的エージェントは何か。しかも、そのエージェントは不定期的に突然現れるという謎が存在する。
- ➡ 第3のエージェントは数値誤差と関連する物理量でなければならない。

シミュレーション結果

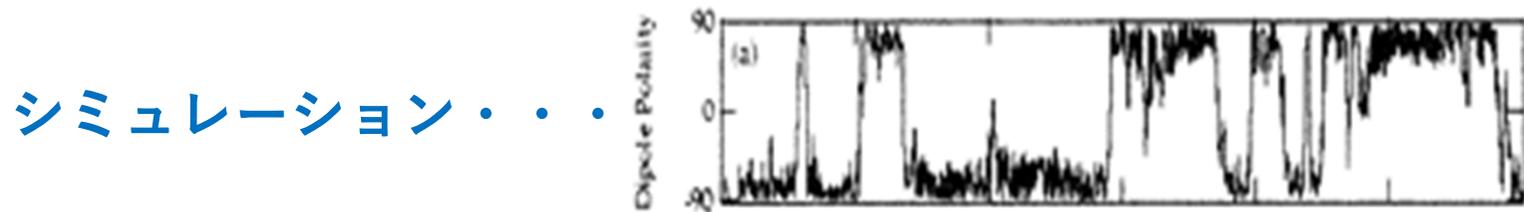


Li-Sato-Kageyama (Science 2002)

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



観測事実とMHDシミュレーションの不可解な一致

観測事実は地球磁場が過去において不規則に逆転を繰り返していることを示している。極点移動という現象も起きている。MHDシミュレーションも同様の現象を再現している。

疑問 1 : 地球磁場はなぜ双極子なのか？

疑問 2 : 南極と北極の双方がなぜ現れるのか？

疑問 3 : 逆転の原因は何か、内的原因かそれとも外的原因か？

疑問 1 と疑問 2 はMHD方程式の範疇で解明可能な事実である。しかし、疑問 3 はMHDスキームにおいては起きてはならない現象である。では何故シミュレーションでは逆転が起き、しかも、それが不定期に起きたのか？

”心頭滅却すれば、火もまた涼し“

双安定回路の状態を一方から他方に移すには、外部からのスイッチ信号が必要である。このことから地球磁場の極性を逆転する原因として第3のエージェントの存在が考えられる。しかも、そのエージェントは不規則に現れなければならない。恐らく、この不規則性と第3のエージェントの条件から皆さんは宇宙からの飛来信号を想像されるのではないだろうか。

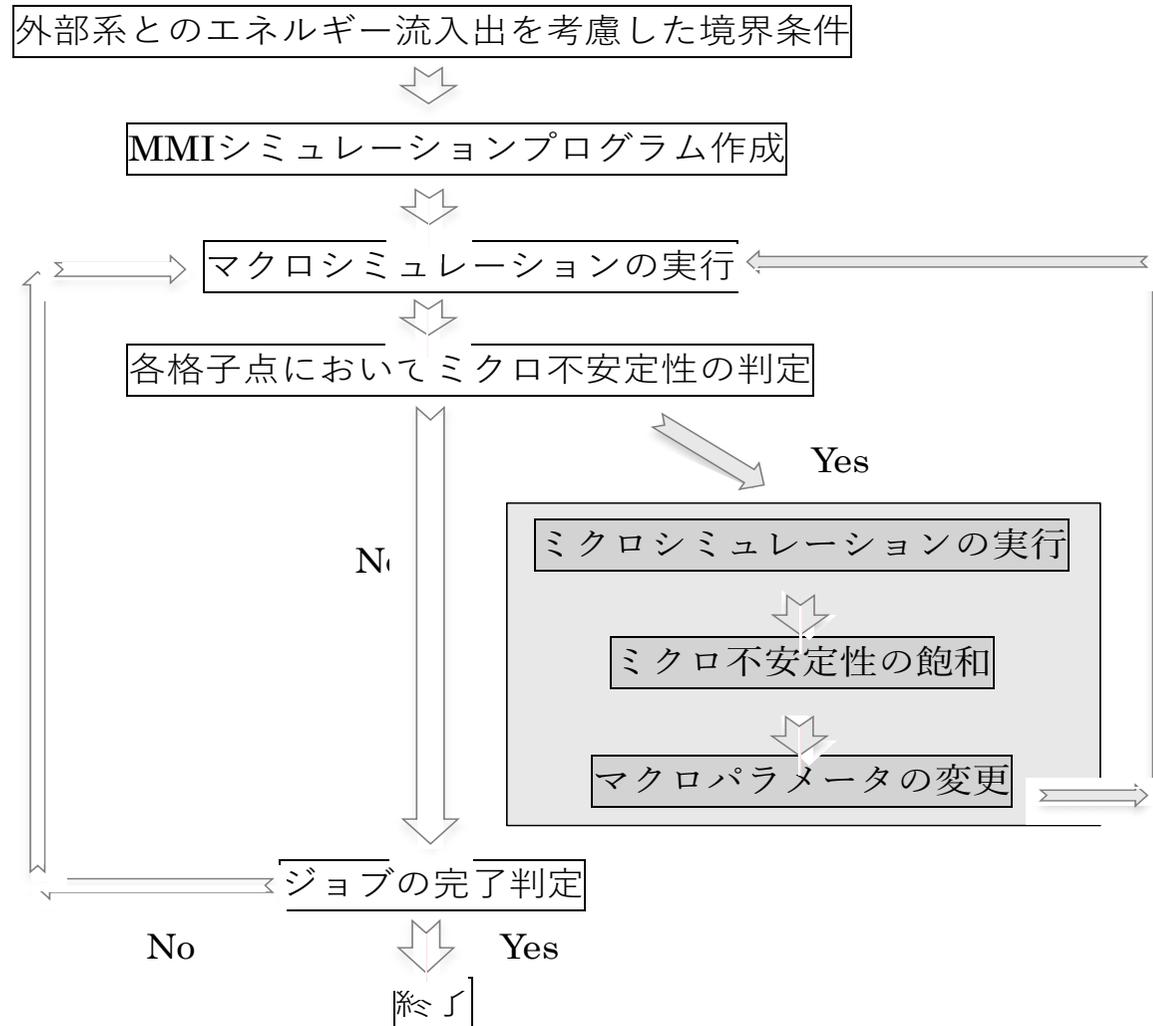
そこで、冷静に、MHDシミュレーションの中で不規則な逆転が発生している事実を思い出してほしい。シミュレーションの途中でコンピュータの外からそんな得体の知れないな信号が入ってくるとは考えにくい。では何が原因か？

シミュレーションの中に逆転の原因が隠されているはずである。数値誤差、即ち、ミクロプロセスの存在？それとも別か？

研究対象に同化すれば、新しい発想が生まれる

- 平衡状態を常態と考える従来の科学は、マクロ変数に対するミクロ場の反応として媒質定数モデルを導入し、マクロ世界の中だけで完結させる。しかし、現実にはシステムは開放系でしかも非平衡状態である。なんとか、マクロ場の変動に対するミクロ場の反応（散逸機構）を正しく取り扱いたいという**探究心**が湧いてくる。
- 自然に同化して観察していると、マクロ場のエネルギーの集積点（特異点）で異常現象（エネルギー爆発や磁場逆転）が起きることに気がつく。この**局所性**ということからマクロ・ミクロ連結（MMI）アルゴリズムという概念が自然発生的に生まれてくる。

MMIアルゴリズム



従来の
シミュレーション
研究がもたらした
贈り物

- デカルト科学（要素還元論）の再現性の検証：

自然界を現象界（マクロ階層）と粒子界（ミクロ階層）という階層性概念を活用することによって自然現象の科学的解明に大きな役割を果たし、要素還元論の階層内の基本法則（因果関係）を積分していくことによってその階層内で起きる個々の現象を再現できることを次々と実証していった — 非線形現象の要素積分による再現性の証明

- 未来を制御できる科学の提言：

自己無撞着にマクロ界とミクロ界を繋ぐMMIアルゴリズムという新しい学術手法の開発は、未来に起きる自然災害や地球環境破壊に伴う様々な人工災害を科学的信頼性を持って予測できることを示唆する。このことは、非平衡開放系の科学の体系化、さらには、“未来を見る望遠鏡”の実現を示唆し、人類が未来を制御できる科学の到来を意味する。

シミュレーション研究から見たデカルト科学の限界

“デカルト科学は未来を見ない”

西洋科学がもたらした社会の質的变化

- 西洋科学の基本的研究手段は数学と実験である。そして、物事の成り立ち（過去・現在）を支配する要素の普遍法則を次々と解き明かしてきた。そして、その成果（法則性）を機械化することによって生産性と輸送が格段に向上：ハードと共存する社会－産業革命から第2次世界大戦まで
- 戦後現れたコンピュータと半導体は、パソコンとインターネットの普及をもたらし、人間の事務処理を格段に効率化：ハードとソフトの共存する社会－1950~2000
- 今世紀に入り、米国はベクトルプロセッサ（スーパーコンピュータ）に変わって、蓄積した膨大なデータの中から人間の生活を支配している規則性を見出してくれるマルチスカラプロセッサ（HPC）に切り替え、全世界を通信ネットワークで覆い、データサイエンスを打ち立て、生成AIの登場となり、人間の本質である脳の働き、即ち、思考能力に取って代わるまでに巨人化してきた：生成AIに支配される社会－2006~現在
- 現在では、人間そのものの存在意義が脅かされるまでに至ろうとしている。

西洋科学は人間社会の
未来を保証してくれない

世界は21世紀の初頭からのインターネット（通信網）の整備とマルチコアプロセッサの開発に伴い、AI支配の社会が急速に進み、個としての人とデジタル情報との直接的な関係性のみで展開する無味乾燥の世界が広がる。これは、人間の間たる“われ思う故に我あり”の思考の減退、即ち、生身の砂漠化を意味し、人間性の消滅に通じる。

近代西洋文明の牽引車である要素還元論は、物質の成り立ちを支配する因果関係（要素）を解明する唯物学であり、現在生じている現象の来し方、即ち、過去の事実（歴史）を暴くことを主題とし、暴いた法則を利用して人間の欲望を満たせばそれでよしという**冷たい科学**である。

従って、人類（社会）の未来をどう設計し、どう導いていくのがよいかという究極の問いには無関心で、それに応える術は与えてくれない。

未来を見る科学的 手段の必要性

西洋科学は、例えば、地球温暖化が人類を滅ぼすことを知りながら、それを止める科学的手段の開発には真剣に立ち向かおうとはしない。あるいは、核兵器使用を止める科学的方法論も持ち合わせていない。歯止めは**人間の善意（モラル）**のみである。現在のSDG'sの取り組みが思うような効果が現れない理由は、人間のモラルに頼り、確固たる科学的方法論を持っていないことが原因ではないだろうか。

モラルだけでは人類の消滅のみならず生命の活動の場である地球環境の破壊を止めることは難しい。

少なくとも、人間の感覚ではなく、科学的に信頼のおける未来の姿を予測し、その予測を現在にフィードバックし、適切な未来のあり方を選択する術を持つべきではないだろうか。

今回の計画は、人類の忘れ物である未来を探る新しい科学的方法論を提唱し、人間のあり方に歯止めをかけられる“未来を見る望遠鏡”を開発することである。

シミュレーション科学は新しい学術への扉を開く

“未来を見る科学の創生”

研究所における “未来を見る望遠鏡” 開発の使命

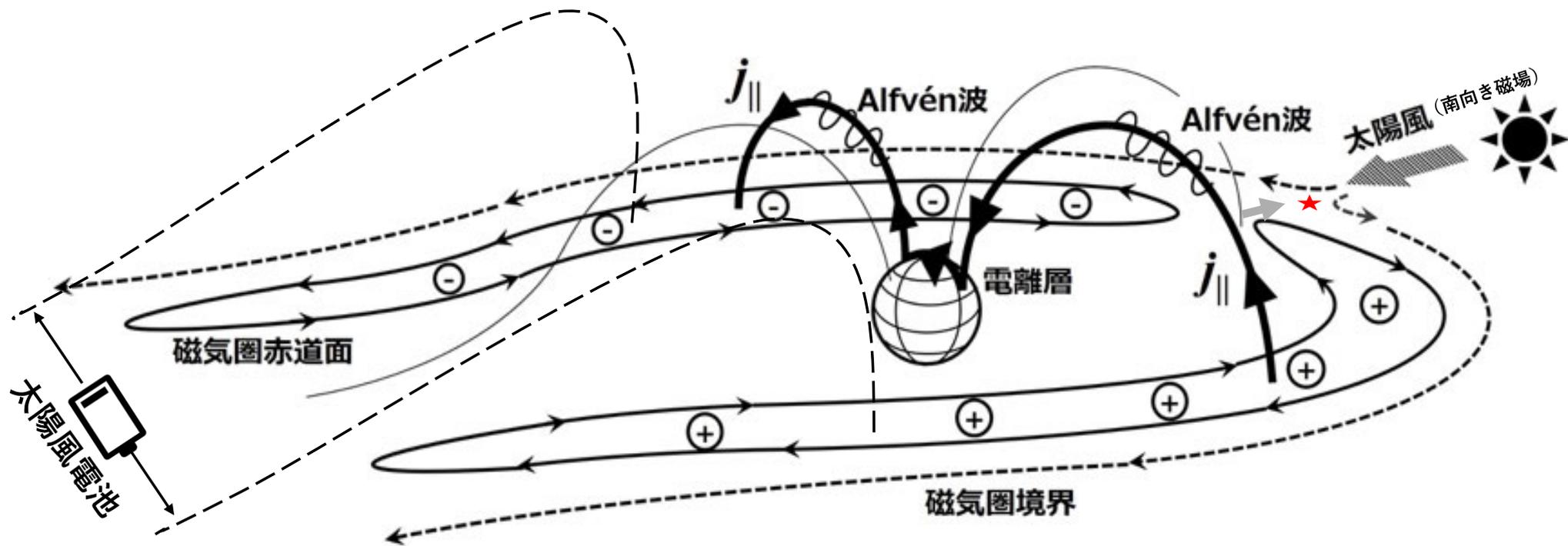
◇ プラズマ・核融合科学分野は自然界の複雑な現象を追跡できる**マクロ・ミクロ連結階層 (MMI) アルゴリズム**という方法論を率先して開発した。このMMIアルゴリズムはミクロな無数の個々の要素の絡み合いとその結果として発生する現実の集団的（マクロ）な振る舞いの複雑な因果関係を自己無撞着に解き明かすことのできる現存する唯一の自己無撞着なアルゴリズムと言える --- **”脱階層“の概念**

◇ このことは現在を初期条件としてMMIアルゴリズムに基づくシミュレーションを実行すれば科学的蓋然性を持って**未来への展開が見える**ことを意味する。例えば、温暖化も地震も必要なデータが存在すれば、災害による被害を科学的蓋然性を持って予測することが可能であることを示唆している。

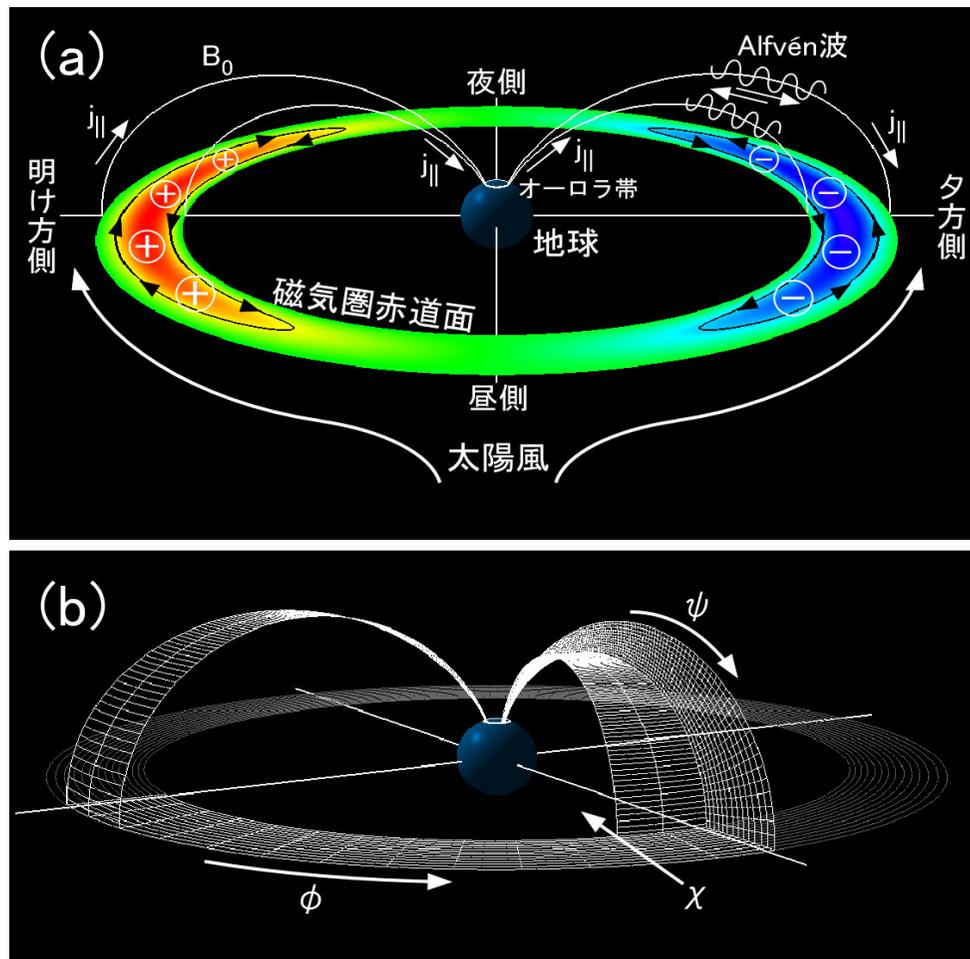
◇ **未来を見る望遠鏡は、ハード的には、所謂ガリレオの“過去の出来事を見る望遠鏡”ではなく、MMIアルゴリズムに則って未来に発展する事象を科学的蓋然性に基づき解き明かすことのできる“シミュレータ”である。**

MMIシミュレーションの威力を示す具体例

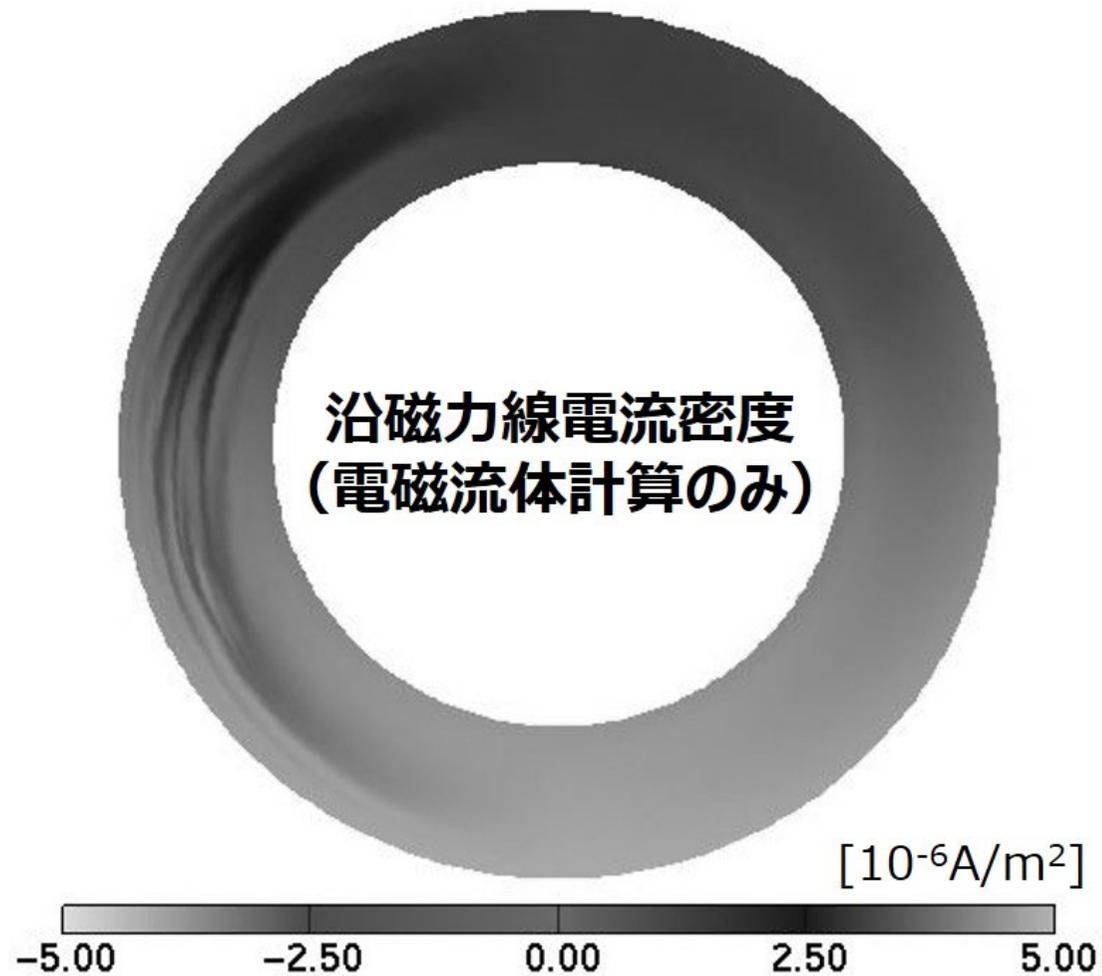
長谷川、大野、佐藤（2009~2011）



太陽風－磁気圏－電離層結合によるオーロラアークの形成シミュレーションモデル



太陽風－磁気圏－電離圏結合系における大域アルフベンフィードバック不安定性



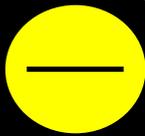
Sato & Holzer (JGR, 1973); Hasegawa-Ohno-Sato (JGR, 2010)

電子の流れ

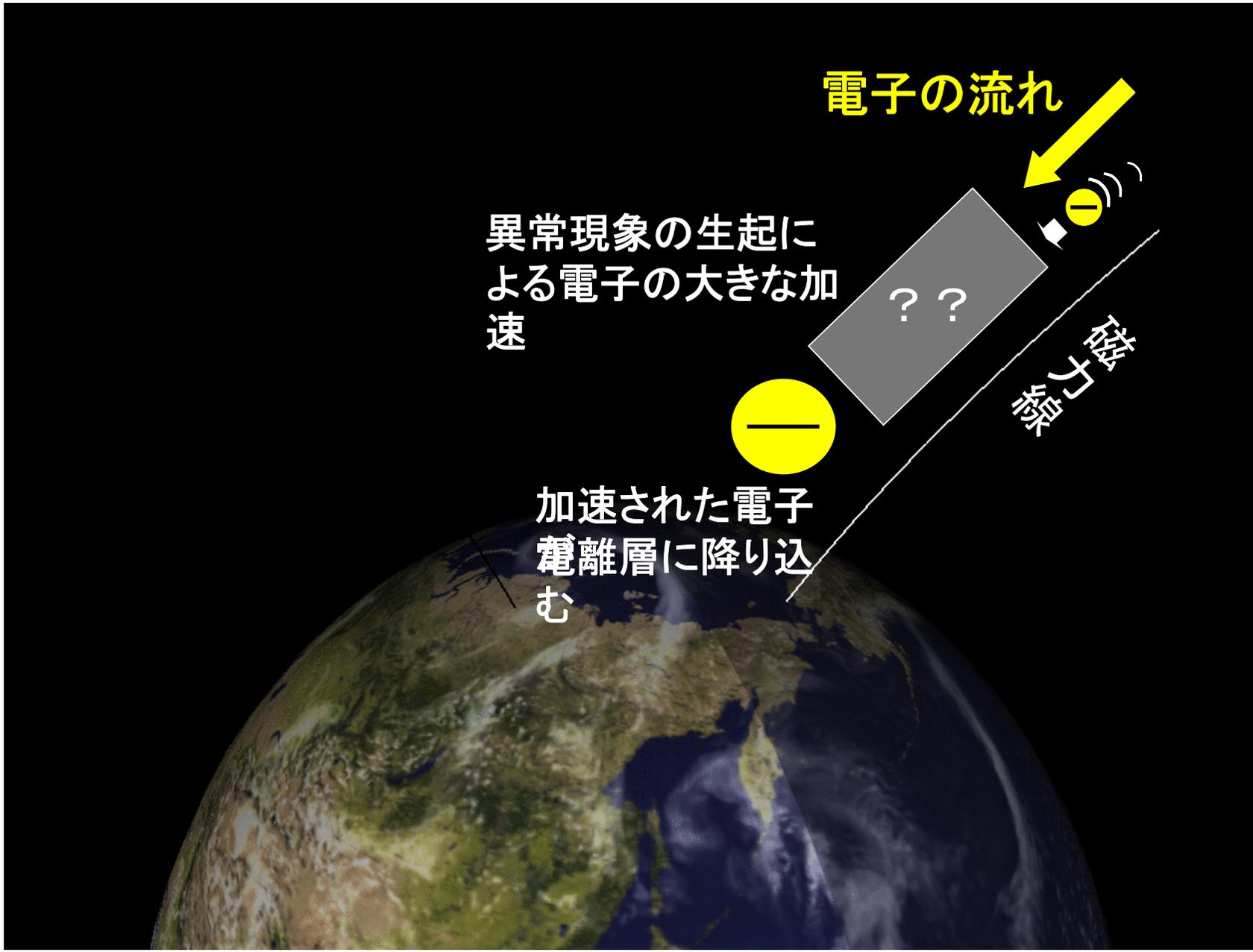
異常現象の生起による電子の大きな加速



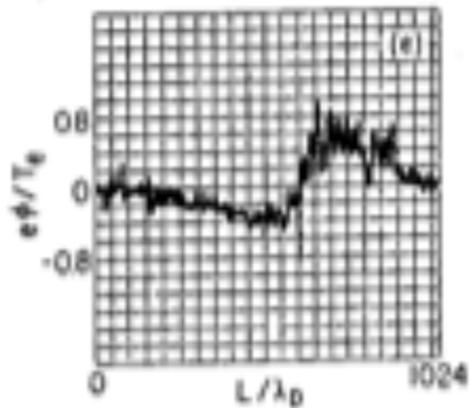
磁気圏



加速された電子
電離層に降り込む

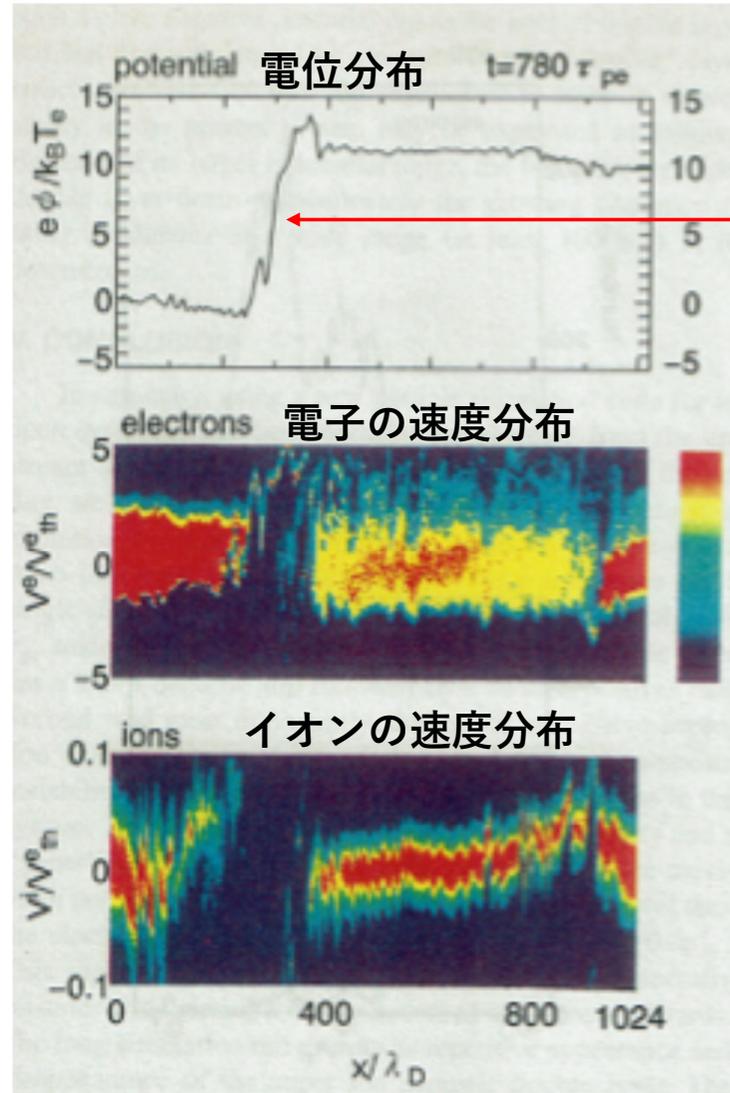


オーロラ電子の加速機構



イオン音波ダブルレイヤ
(周期境界条件)

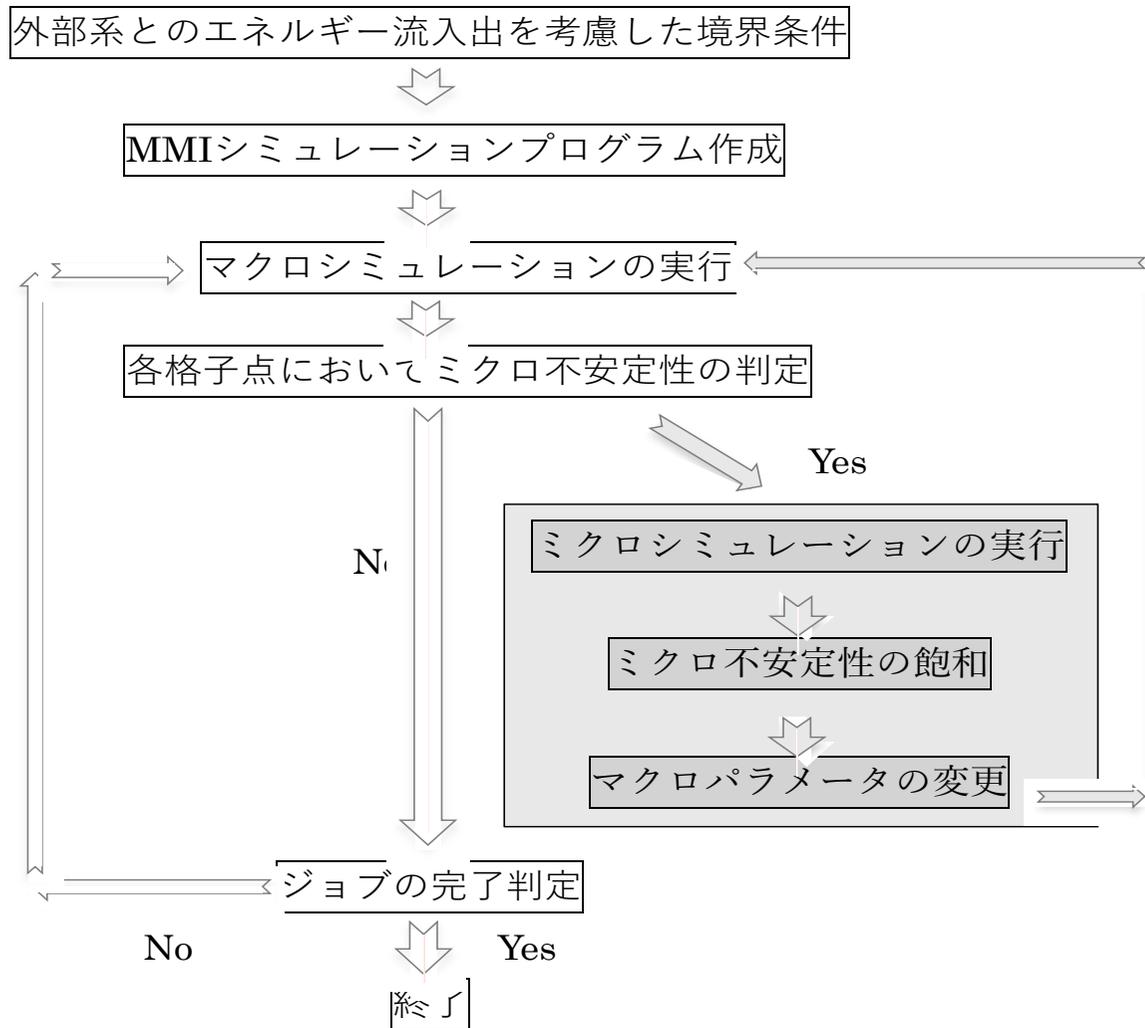
Sato & Okuda(PRL 1980)



スーパーダブルレイヤ
(開放端境界条件)

Takamaru et al. (JPSP 1997), 長谷川・大野・佐藤 (ながれ 2011)

MMIアルゴリズム



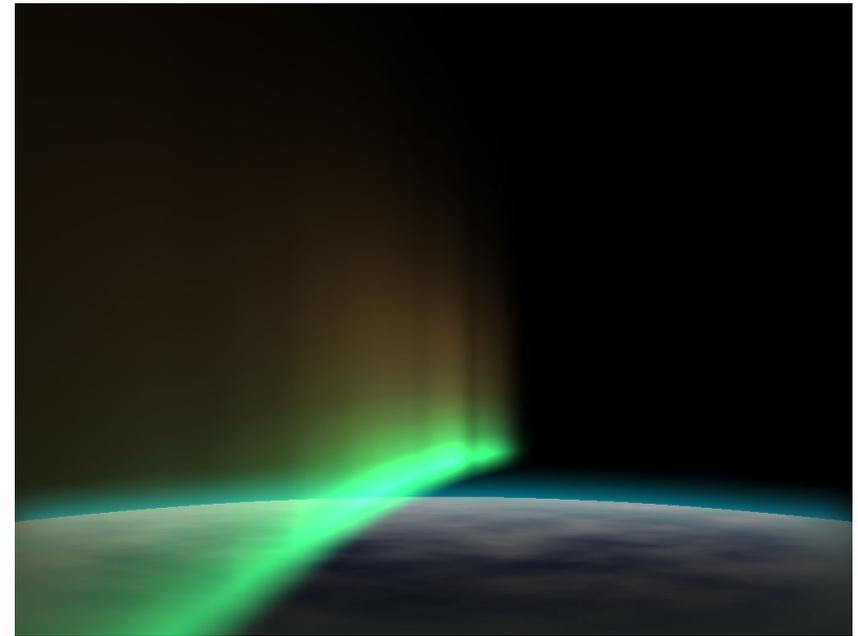


オーロラの実写真

MMIシミュレーションで求めたオーロラ形成



地上から見たアニメーションの一コマ

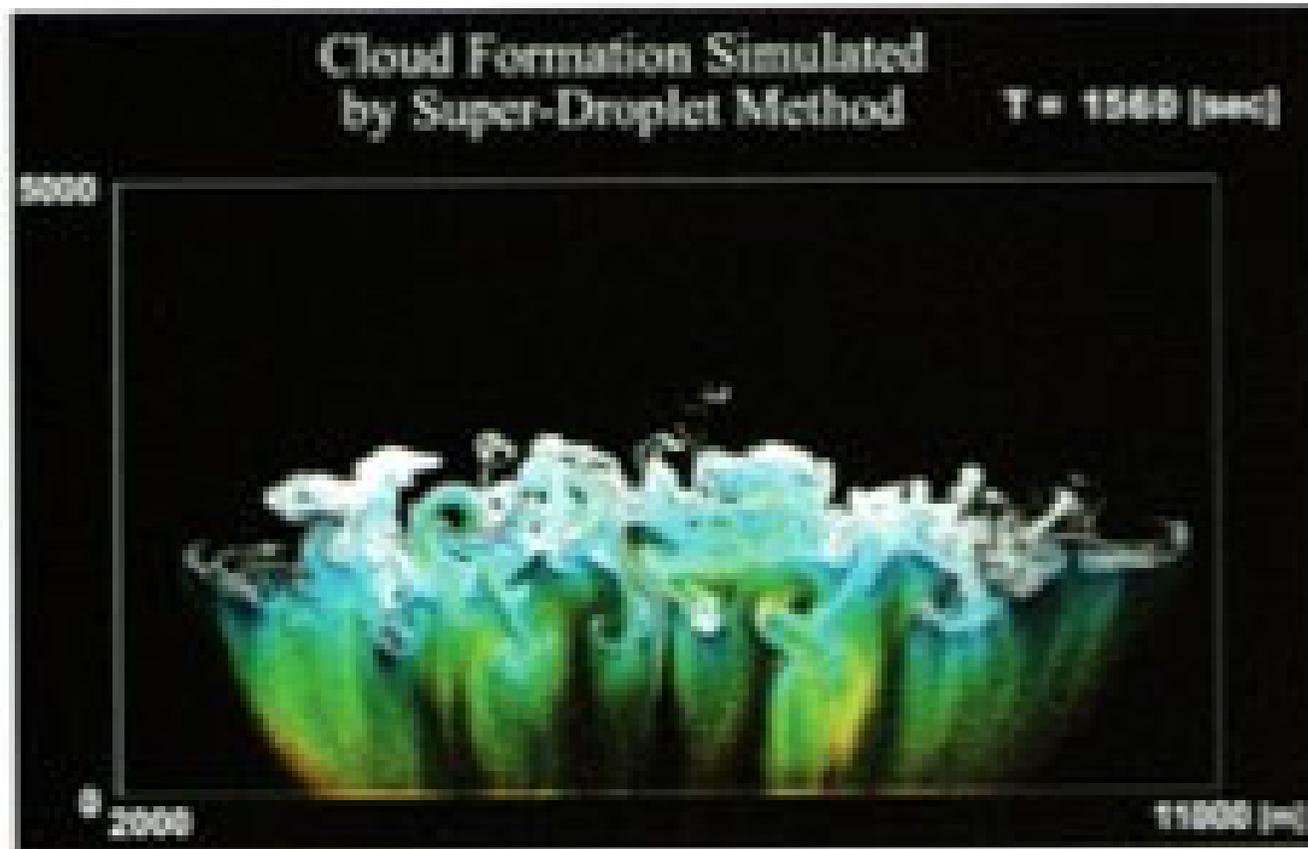


宇宙空間から見たアニメーションの一コマ

オーロラアーク (ダブルレイヤ加速電子による O_2 の発光)

長谷川・大野・佐藤 (ながれ、2011)

MMIアルゴリズムによる上昇気流と雨粒形成（雲）のシミュレーション



未来を見る望遠鏡計画とは何か

未来を見る望遠鏡計画（要素1）

- “未来を見る望遠鏡（Future-Viewing-Telescope: FVT）”計画の究極を目指すところは、地球上において、人々が生きることが楽しいと感じる社会の構築に学術的な側面から貢献できる研究手段を提供することである。
- 核融合科学研究所におけるプロジェクトは、その「さきがけ」として、次に示す3つの要素の開発を行い、その実効性を固めていくことにある。

○第1の要素：自然現象の未来を見るアルゴリズムの開発とその検証

現時点において実行可能なFVTは、その科学的な基本法則体系が解明されている自然現象（地磁気の逆転、プレート型地震、L/H遷移、さらには、生命現象や物性現象、等々）を科学的蓋然性を持って予測するMMIアルゴリズムとシミュレーション技術を開発する。このアルゴリズムとシミュレーション技術を具体的な自然現象に適用し、具体的な発生予測の科学的な正当性を検証する。

未来を見る望遠鏡計画（要素2）

- 望遠鏡計画は第1の要素であるシミュレーションコード開発に加えて、時々刻々の複雑なシミュレーションデータの状態を見える化する最適データ表現法の開発が同時に不可欠である。

○第2の要素：未来に起きる現象を逐次見える化する技術開発

望遠鏡の信頼度を上げ、その能力を向上するには、望遠鏡内に現れる時々刻々の姿を観測者であるシミュレーション研究者が五感で即座に認識できる手法の開発である。現象は3次元であり、動的である。その時間経過を詳細に知ることによって、研究者は望遠鏡の心臓部であるMMIプログラムを修正し、その精度や信頼度を上げることが可能となる。加えて、どのような現象が未来に発生するかを一般の人々が即座に認識し、予防に備えることが可能となる。その結果、未来を見る望遠鏡の存在がより一般社会に対して科学的に信頼度の高いものとなり、安心感をいたかせることができる。

未来を見る望遠鏡計（要素3）

• 未来を見る望遠鏡が望遠鏡となるためには、プログラムコードの充実（第1要素）と時々刻々の事象を状態を認識できる表現法（第2要素）を最適かつ最速に処理をするハードウェアシステムが不可欠である。

○第3の要素：大規模な未来を見る望遠鏡（専用シミュレータ）の開発

自然現象にしろ社会現象にしろ、その原点は物質粒子や人間個人の行動であり、無数のミクロな集団の因果関係を効率よく精密に追いかけることができる最適なアーキテクチャを持つプロセッサが必要となる。同時に、自然現象も社会現象も個々人の活動を押しなべた大域的な力が支配するマクロな活動でもある。このマクロな行動を支配するマクロなダイナミズムを効率よく求める最適なアーキテクチャを持つプロセッサも同時に必要である。さらに、時々刻々のシミュレーションデータを見える化するための可視化装置を内蔵する（オンライン化）ことが求められる。これらの要素を全て備えた最適なハードウェアシステムを企業と協力し開発することが本プロジェクトの要である。

具体的なチーム構成についての佐藤私案

チーム 1 : 人間社会に悪影響をもたらす自然現象の発展を科学的に信頼の
おける形で記述できるMMIアルゴリズムの開発とその具体的
シミュレーションコードの作成と実行。具体的には、

- (1) 地球磁場の極性反転と極点移動の原因究明とMMI研究
- (2) プレート型地震発生とエネルギー伝搬のMMI研究
- (3) 積乱雲の発生のMMI研究、等々

チーム 2 : 流体乱流、生命現象、物性現象におけ分子間力や量子効果 (ミクロ)
に起因する相転移に代表される変異を記述できる科学的に信頼のお
けるMMIアルゴリズムの開発とその具体的シミュレーションコード
の作成。具体的には、

- (1) 流体における乱流と微細散逸プロセスのMMI法の開発
- (2) 光渦とプラズマ・物質の相互作用のMMI法の開発
- (3) 宇宙空間における有機物質生成のMMI法の開発、等々

チーム 3 : 磁場閉じ込めプラズマにおける突発現象や異常現象のMMI
アルゴリズムの開発と解明。具体的には、

- (1) 磁気閉じ込め装置のMHDシミュレーションと粒子
シミュレーションを繋ぐMMIアルゴリズムの開発
- (2) 磁場閉じ込め装置の突発現象のMMIコード開発
- (3) 太陽フレア・磁気圏サブストームのMMIコード開発
等々

チーム 4 : • シミュレーション・データの途中経過を見える化する
最適表現法（可視化法）の開発

- シミュレーション研究を効率化・迅速化、さらには、
プロジェクトの成果の一般へのアピールのための
表現法開発
- “未来を見る望遠鏡（シミュレータ）”と一体化したデータ
可視化装置のアーキテクチャの検討

チーム5：シミュレーションチームが開発したマクロ及びマイクロシミュレーションコードを実行するための最適半導体素子、最適プロセッサ方式（記憶装置、接続方式等を含めた）を検討し、最善の未来を見るシミュレータシステムを完成する。同時に、チーム4で検討したデータの最適表現方式（可視化）のハードウェアを開発し、本体のシミュレータシステムの中に繰り込み、“未来を見る望遠鏡”の統合システムを完成させる。このチームは半導体・プロセッサ企業との密なる協力体制を構築することが肝要となる。

未来を見る望遠鏡計画の準備研究

長谷川・大谷・石黒・高丸・佐藤は1年ほど前から未来を見る望遠鏡計画の予備的研究として

- (1) 懸案のMHDコードのダイポール磁場逆転の不可解な振る舞いの物理的解明
- (2) 粒子コードのスーパーダブルレイヤ発生に対する最適境界条件の選定

を具体的テーマに選び、自然と同化したMMIアルゴリズムの高度化に向けた研究を開始している

磁場逆転の謎を解く予備研究から“瓢箪から駒”

- **対流駆動によるダイポール磁場発生と南北極性の双安定性と極性決定因子の検証：**

特定の対流を与えることによって安定したダイポール磁場が生成される。その南北の極性は与える初期擾乱によって決まり、その**発生確率は概ね50/50**である。このことからMHD方程式がダイポール磁場の解を内包し、しかも**南北二つの極性を双安定解**として持つことが結論できる。

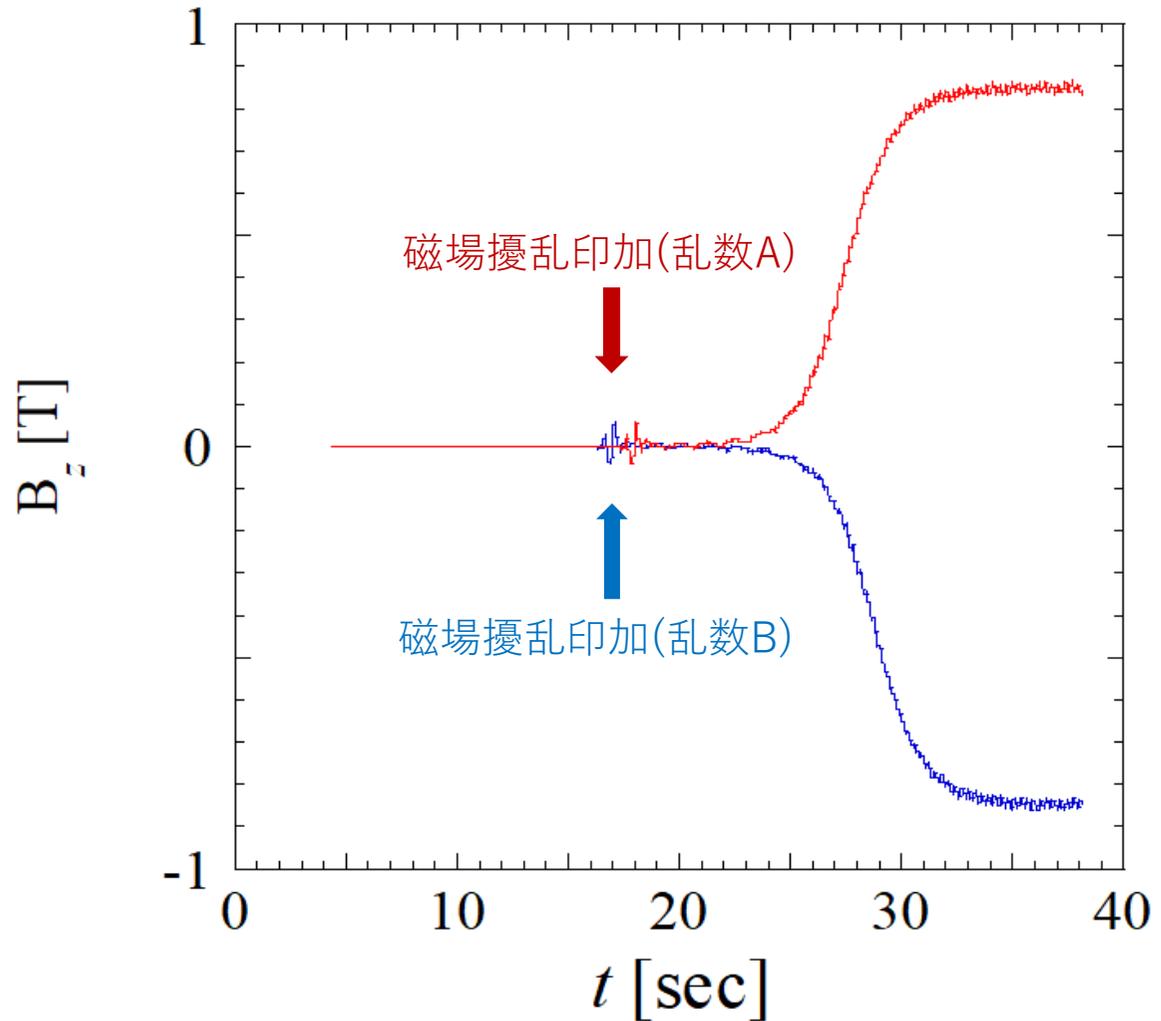
ただ、微小擾乱がこの非線形安定状態にあるダイポール磁場極性を逆転に導く物理原因とは到底考えられない。

この逆転や磁極移動の原因は現在熱対流によって発生する地球型ダイナモシミュレーションを用いて検討中である（長谷川、大谷、石黒、高丸、佐藤）

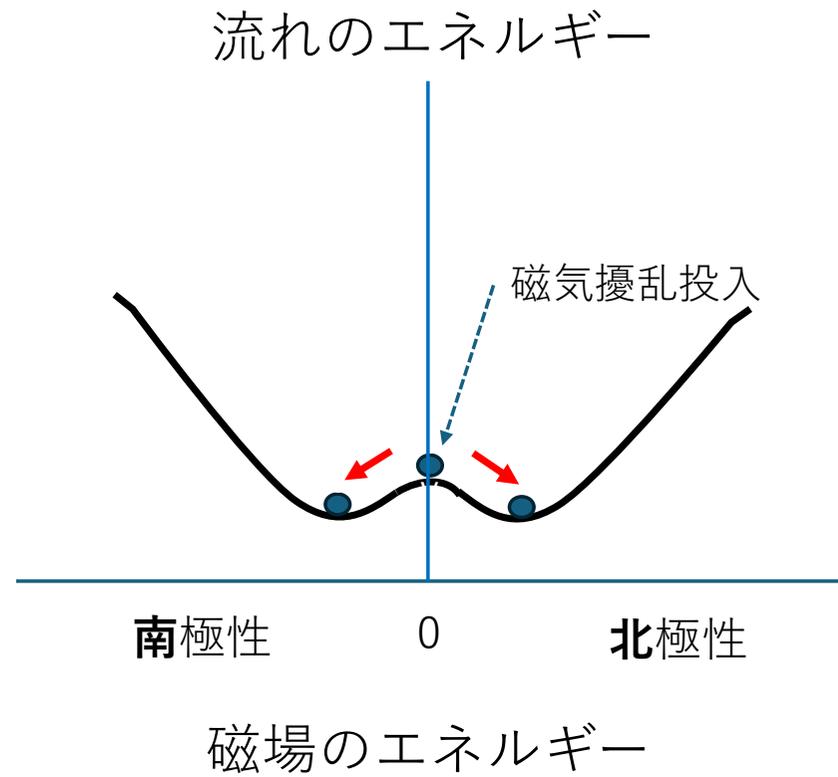
球形モデルのMHDシミュレーションによるダイポール磁場の生成実験

“乱数を変えること
によって発生する
ダイポール磁場の
南か北かの極性
はほぼ50/50の確
率で発生する”

ダイポール磁場の極性



MHDダイナモシミュレーションの示す双極子磁場の状態関数



現実に即した粒子モデルの境界条件の選定から新しい知見

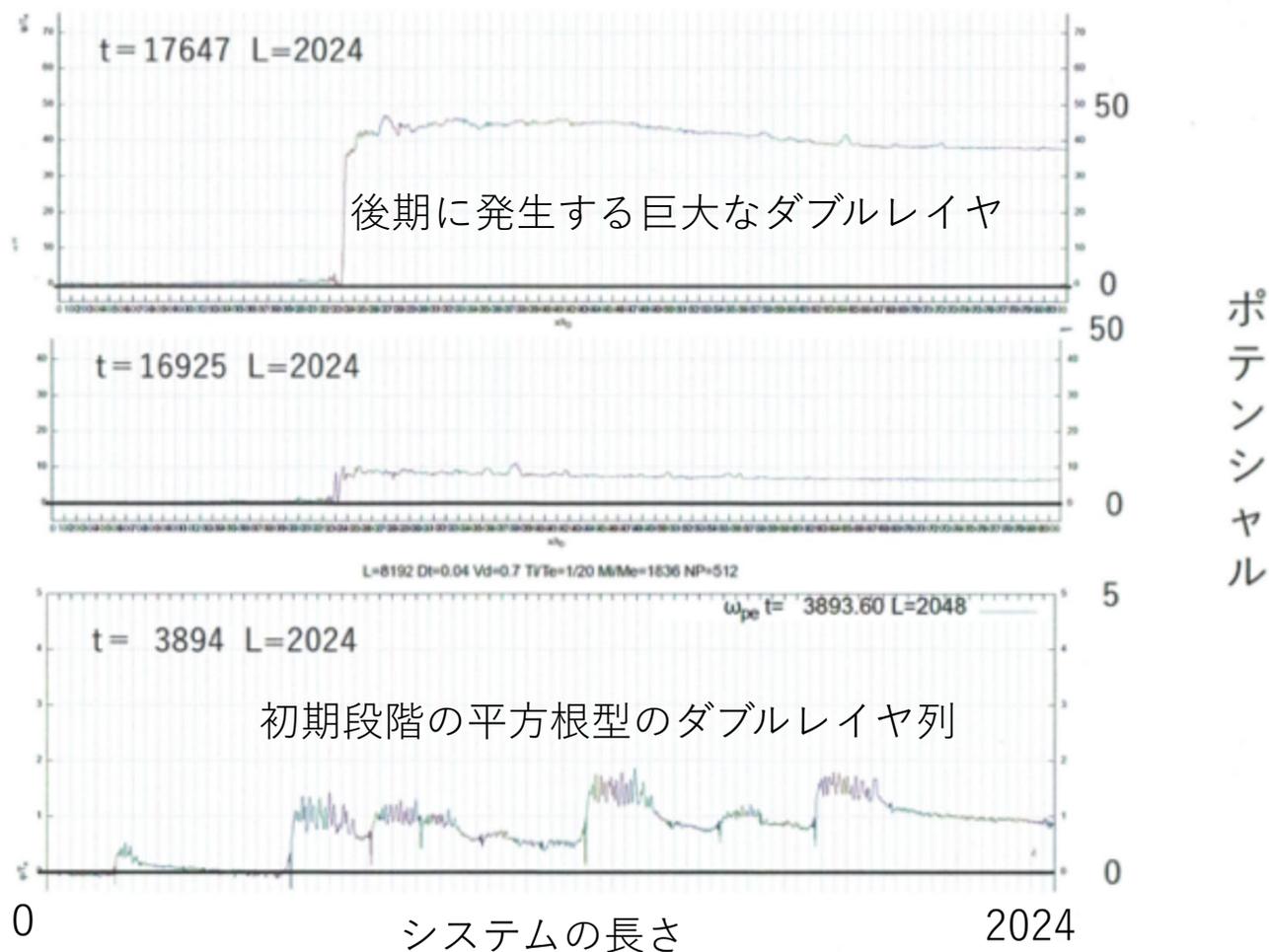
・巨大ダブルレイヤ発生につながる不思議なプロセス：

マクロ場（磁気圏－電離層結合系）に適合する境界条件を適用し、イオン/電子質量比 = 1836、システム長 = 2024 デバイ長とする粒子シミュレーションを行った結果、初期には小さなイオン音波ダブルレイヤ（電子温度程度のポテンシャル壁）が100～300 デバイ長間隔で連なる状態が形成されるが、その後、**下流側の全てのイオン音波ダブルレイヤは上流のポテンシャル壁で跳ね返されてくる電子分布の混在で消滅してしまう。ところが、最上流のダブルレイヤのみが数十倍から百倍にも達する巨大なダブルレイヤへと発達することが見出された。**（高丸、長谷川、大谷、石黒、佐藤）

開放系沿磁力線電子流によるスーパーダブルレイヤ発生の粒子シミュレーション

後期：最上流のダブルレイヤが非線形的に急激に発達
二番目以降のダブルレイヤは消滅（スーパーダブルレイヤ）

初期：イオン音波ダブルレイヤが連なって発生
（全面に負のポテンシャルを持つ平方根型ダブルレイヤ）



“未来を見る望遠鏡計画”は研究所の柱になりうるか？

“超高温プラズマの「マイクロ集団現象」と核融合科学”が文科省から認められている研究所の現在の唯一のロードマップ計画である。

確かに、ロードマップ23の計画の中には理論・シミュレーション研究という項目は載っている（伊藤先生のOHP）。しかし、その実体は私には無様である。しかし、それが現実である。

私の話は、20年かけて研究所が世界に先駆けて構築したシミュレーション科学の牙城、即ち、三間報告書がいみじくも提唱しながら3年後に研究所が自らの手で葬ったその牙城を再興し、未来を科学の対象とする新しい学術の領域を再出発した研究所においてルネサンスを起こすことである。それが可能であることが今回のセミナーで十分皆さんに伝わったと私は信じる。

では、計画を実現する具体的方法はあるのか

- 大局的行動として、学術会議の「未来の学術振興構想」のNo.64の改訂版に「未来を見る望遠鏡計画」を何らかの形でエントリーできるように働きかける。
- 研究所内及び関係者に対し、本計画への参加を強く呼びかけ、先に述べた5つの研究チーム作りを行い、MMIから展開される研究の推進に努める。
- 研究資金の獲得として、全体計画として大規模科研費等を、各チームはそれぞれの規模に応じた科研費等への申請を行う。
- ポストLHD計画と独立した研究所の第2のロードマップへの申請に向う計画を立てる。

終わりに

自然科学研究者は“目標”に到達することではなく、常に“目的”に向かってただ黙々と歩き続けるのみである

その“目的”とは、自然と同化することであり、同化には自然への愛着と一体感と洞察力が不可欠、その道程に科学することの楽しさが生まれてくる

注釈：自然科学・・・自然

社会科学・・・社会

人文科学・・・文化

感謝

伊藤公孝先生には、“学術とは何か、研究者に必要な要素は何か”についての突っ込んだ議論の中から今回の話がセミナーへと進んだことに心から感謝の意を表します。

計画が夢物語ではなく、実現するには優れたリーダーが必要不可欠です。悠々自適の中村浩章先生が敢えてこの虎穴に飛び込む決心をしてくださったことに大いに感謝します。

一寸先は闇の中において、その闇の中に敢えて飛び込んでくれている長谷川裕記氏、大谷寛明氏、石黒静児氏、及び、高丸尚教氏（中部大）にはその勇気に感謝したい。

最後に、山田弘司所長には研究所の貴重なセミナーに浦島太郎の伊藤・佐藤が話すことに賛同して下さったことを心から感謝申し上げます。吉田善章前所長には核融合科学研究所に学術研究の芽を蘇られせくださったことに深く感謝申し上げます。

お疲れ様でした