

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21340171

研究課題名（和文）多階層概念に基づくプラズマ相転移のダイナミクスと構造形成

研究課題名（英文）Dynamics and structure of plasma phase transition based on hierarchical concept

研究代表者

岸本 泰明（KISHIMOTO YASUAKI）

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・教授

研究者番号：10344441

研究成果の概要（和文）：物質の第4の状態であるプラズマは、様々な状態にある中性媒質から複雑な原子・分子過程や衝突・輻射過程を通して生成される。本研究では、複雑な原子過程や衝突・緩和過程と取り入れた統合化粒子コード（EPIC3D）を開発するとともに、これにより、放電・雷過程や高強度レーザーに照射された様々な物質の電離過程の詳細を調べた。これらの研究および核融合プラズマや宇宙プラズマにおける磁気リコネクションの研究を通して、突発的ダイナミクスやその際現出する特異な構造形成を司る物理過程を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Plasmas, the fourth state of matter, are generated from neutral medium through complex atomic/molecular processes and collisional/radiation processes. In this research, we explored an integrated code, referred to as EPIC3D, which is based on the plasma particle method but includes complex atomics and relaxation processes. Using the code, we investigated the details of discharge and lightning process, and also the ionization process of various material states irradiated high power laser. Through such studies and also those of magnetic reconnection in fusion and astrophysics plasmas, we investigated the underlying physical process of plasma phase transition which causes sudden events and prominent structure formation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2010年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2011年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2012年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野：数理系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：プラズマ相転移、原子・分子過程、放電・雷過程、プラズマ生成、相乗的複雑性

1. 研究開始当初の背景

これまで核融合や宇宙・天体を中心に、散逸の微小な高温プラズマの物性が精力的に研究されてきた。一方、自然界や実験室のプラズマ

に広く目を転じると、そこでは、気体や液体、固体や粉塵など、様々な状態にある物質が複雑な原子・分子過程や衝突・緩和過程を通して、中性原子や分子、多価イオンや電子などが共

存した複雑なプラズマ状態を作り出し、上述の高温プラズマとは質的に異なった多彩なダイナミクスや顕著な構造を創出している。

レーザーに照射された物質の電離現象や放電・雷現象に代表されるプラズマ生成過程はその典型例であり、最先端の学術や応用研究の鍵を握る物理過程である。しかし、それらが示す予測困難な突発的なダイナミクスや微細構造は多様性と複雑性に満ちている。これらは、構造の起源を問う物理学の基本問題であるが、現象論や経験則の域を出ることは難しく、原理的解明には至っていない。これは、これらの現象が、プラズマのマクロな特性に加えて、原子過程や衝突過程、輻射過程など、原子レベルのミクロな特性が加わることから複雑性のレベルが増大し、因果関係が明確な単純なモデル化が困難なことに起因している。

近年、本研究の解決の鍵となる進展があった。(1) 超高速度計測技術や極短パルスレーザー技術の進展によって、イオン化率を上回る時定数で現象を捕捉・制御することが可能になってきたこと、(2) 原子過程や衝突過程を取り入れたシミュレーション手法が開発され、高強度レーザーに照射された物質の電離過程や放電・雷過程のダイナミクスを捉らえることが可能になり、第一原理的手法によってプラズマ生成過程が解明・予測できる可能性が出てきたこと、(3) 大気圧放電や極短パルスレーザーによる放電発生時の電離波の高速伝播や構造発展を実験的に同定するなど、プラズマ生成の素過程の解明に直結する展開があったことなど。

その結果、プラズマ生成過程を理解するには、これを非平衡・開放系における「中性媒質からプラズマへの相転移とそれに伴う構造形成」として捉え、これを指導原理として現象を適切に要素還元し、各々の素過程の同定と検証を通して理論モデルを構築する研究アプローチが必要であるとの着想に至った。

2. 研究の目的

レーザー照射された物質の電離過程や放電・雷現象に代表されるプラズマ生成過程は様々な学術・応用技術の鍵を握る素過程であるが、予測困難な突発的な発生など、因果関係を問うことが困難なほど複雑性と多様性に満ちた現象である。本提案は、これらの過程をプラズマ相転移とそれに伴う構造形成であるとの着想のもと、基礎実験に同定・検証されたペタフロップ(PFLOPS)レベルの多階層シミュレーションに基づいて、その背後の物理機構とその制御法を明らかにすることにより、プラズマ生成が本質的役割を示す様々な学術・応用研究に資することを目的とする。

3. 研究の方法

具体的には、プラズマ生成過程を ①初期状態の形成、その下での ②トリガーと連鎖のダイナミクス、その後の ③大域的な構造発展 という時空間スケール(階層)の異なる三つの素過程に要素還元し、これらの階層がミクロな原子・分子過程や衝突・緩和過程を通して連結することにより突発性に支配される特異的かつ大域的なダイナミクスと構造を現出するという仮説を立てる(図1参照)。これに基づいて、各階層の素過程とそれら階層間に干渉や連結をもたらす物理機構を同定・検証することが可能な統合シミュレーション手法を開拓するとともに、これによりプラズマ生成過程の全様を明らかにする。

このため、以下の研究を実施した。

- 1) 多階層概念に基づく原子過程・緩和過程と取り入れた統合化シミュレーション手法の開拓
- 2) プラズマ相転移現象の応用研究
 - 2-1 放電・雷過程の突発性と構造形成
 - 2-2 高強度短パルスレーザーと固体薄膜の相互作用に関するシミュレーション
- 3) 磁気リコネクションにおける突発性と構造形成の起源: 構造駆動型非線形不安定性

以下では、1) および 2) の結果を報告する。

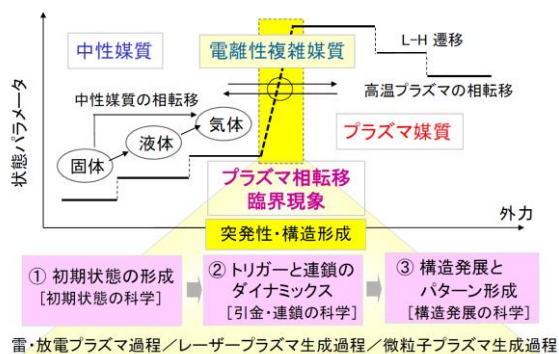


Fig.1 : Concept of plasma phase transition and the related fundamental dynamics.

4. 研究成果

1) 多階層概念に基づく原子過程・緩和過程と取り入れた統合化シミュレーション手法の開拓

本研究では、中世媒質からプラズマへの相転移とそこでの基礎過程（初期状態の形成、トリガーと連鎖のダイナミクス、構造発展とパターン形成など）(Fig.1) を再現することを目的に、原子過程や粒子間の衝突・緩和過程などを自己無撞着に取り入れた拡張型 3 次元電磁粒子コード（EPIC3D : 3-Dimensional Extended Particle based Integrated Code）を開発した。特に、EPIC3D 実装される様々な物理モデルの高度化と超並列計算を行うためのコードの高効率の並列化を行った。

物理過程	要因	素過程	
電離過程	光電離過程	トンネル電離	単一・多光子吸収電離
	電子衝突	外殻電離	内郭電離
再結合過程	電子衝突	放射的再結合	2 電子衝突再結合
		3 体衝突再結合	電子付着負イオン生成
内部励起過程	電子衝突		
分子過程	電子衝突	分子解離	イオン対生成

Table 1 : Atomic and relaxation process installed and/or planned atomic and molecular process.

EPIC3D は、荷電粒子間の衝突・緩和過程モデルとして、衝突前後の運動量、およびエネルギーを相対論的に厳密に保存する pairing 法を、モンテカルロ法と併用して用いている。これにより、電子の平均自由行程に対して温度勾配のスケール長が同程度となり、Fick の法則（拡散近似）が成立しない状況下での非局所熱伝導過程が正しく

再現することができる。原子過程に関しては、電磁場によるトンネル電離過程と電子衝突による電離過程が実装されている。電子衝突による電離過程に関しては、衝突緩和過程に pairing 法を使用していることを利用して、衝突緩和で用いた電子・原子（イオン）の pairing を用いている。また、トンネル電離および単一・多光子吸収電離による光電離過程も実装されており、再結合過程・内部励起については今後導入予定である。Table 1 に、導入されている原子過程（予定を含む）を示す。

2) プラズマ相転移現象の応用研究

2-1 放電・雷過程の突発性と構造形成

プラズマ相転移の典型例として、放電・雷過程のシミュレーションを行い、それらの現象で普遍的に観測される突発性と構造形成の研究を行った。Fig.1 は、ヘリウムの高圧ガス（密度： $4.6 \times 10^{20} [\text{cm}^{-3}]$ ）に静電界（ $1.0 \times 10^7 [\text{V/cm}]$ ）を印加したときの様子を示している。電離スポットから高い空間電界によって微細な枝葉構造を有するパターンが生成され、それが短時間に左右に発展して大域的な放電に発展している様子が分かる。これらの構造発展は、長時間の大域的な電離状態の形成後、1psec 程度の短時間で突発的かつ大域的に発展してることが分かる。また、放電路の形成に伴って電流 (図(b)) が駆動され、それに伴って、磁場 (図(c)) が発生している。これらは、初期の電離スポットから生成された高エネルギー逃走電子が作る 2 次的な電離スポットの空間充填率が臨界値に達したときに発生することが分かり、パーコレーション転移の特性を示している。対応するパーコレーションモデルを構築した。

これまででは実空間 2 次元配位であったが、今後は、超並列計算による 3 次元シミュレーションを実現する必要がある。Fig.2 は、EPIC3D で 3 次元の放電シミュレーションの結果を示している。これまで 2 次元で見られたような放電の突発的な発生や放電路の枝葉構造などが再現できている。

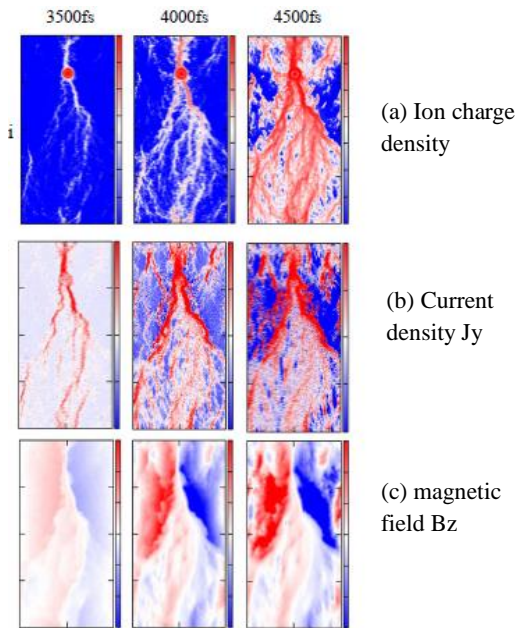


Fig.1. Two dimensional simulation of discharge process of compressed helium gas using EPIC3D. (a) ion charge density, (b) current J_y , and (3) magnetic field B_z at different three times are shown.

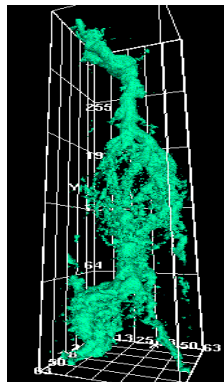


Fig.2. 3 dimensional simulation of discharge process of compressed Neon gas using EPIC3D. Electron density distribution is shown at the instantaneous time of discharge.

2-2 高強度短パルスレーザーと固体薄膜の相互作用に関するシミュレーション

レーザーと物質が相互作用すると、レーザー場が進んでくれない固体内部においても電離波が高速で伝播して短時間にプラズマ状態になるが、その詳細な過程は明らかでない。ここでは、光学的に透明である炭素薄膜($Z=6$) (但し、密度は固体の $1/20$ に設定: $n=n_s/20=0.88 \times 10^{22} / \text{cm}^3$) に集光強度 $5.07 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ ($a_0 = 5.0$)、波長 820nm 、パルス長 100fsec (Gauss 分布形状) の高強度レーザーを照射したときの電離ダイ

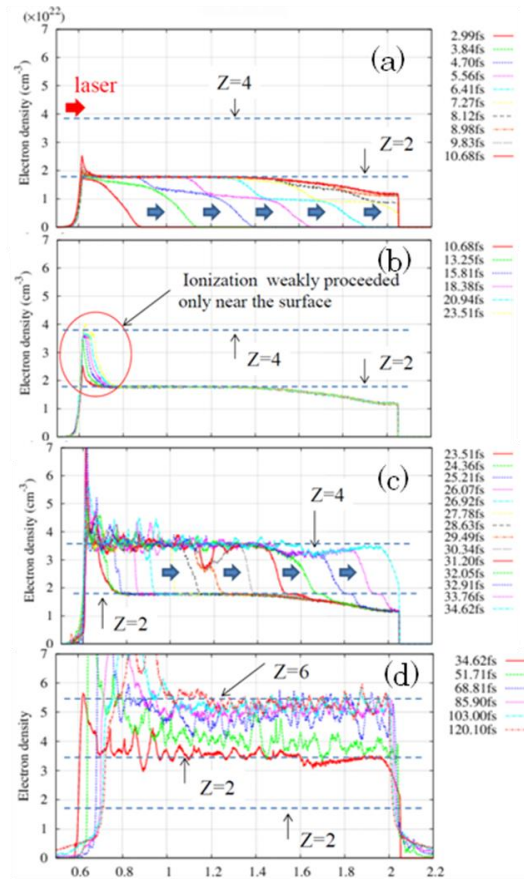


Fig.3. Electron density profiles after laser hits the carbon film at each time of (a) $3.0 < t < 10.6$, (b) $10.65 < t < 23.5$ and (b) $23.5 < t < 34.6$, (d) $34.6 < t < 120$. Dashed line represents the density corresponding to the fully ionized $Z=2, 4$ and 6 plasmas. The initial carbon density is $n=n_s/20$.

ナミックスを、EPIC3D を用いて解析した。

Fig.3 は、(a) $2.9 < t < 10.5\text{fsec}$, (b) $10.5 < t < 23.5$, (c) $23.5 < t < 34.6$, (d) $34.6 < t < 120$ の各時間における電子の空間密度分布(n_e)を示している。初期には、1 価から 2 価に変化するなだらかな階段状の分布を有する電離波が光速で伝播している (Fig.3(a))。これは、強度の比較的弱いレーザー場先端部初期には薄膜内部に透過し、そのレーザー場による場電離によるものである。2 価のプラズマ生成に伴い薄膜内部のレーザー場は遮断され、相互作用表面で反射される。この時刻から表面では電離が進み、4 価が徐々に生成される。その後 4 価は急峻な電離波面を保ちな

から薄膜内部に向かって高速で伝播し、裏面に達する。この波面速度は $1.2 \times 10^8 \text{m/sec}(=v_p)$ で光速の 1/3 を上回る。4 価の電離波が裏面に到達した後は、薄膜の両面に形成されたシース電場に閉じ込められた高エネルギー電子による衝突イオン化によって、5 価を経由して薄膜全体に 6 価が緩やかに形成されていく(Fig.3(d))。レーザー強度がピークに達する 50-60fsec からは、空間的に局在した電子およびイオンの衝撃波が形成され、薄膜中を伝播していく様子が見られる(Fig.3(d))。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- 1) S. Kato, Y. Kishimoto, E. Takahashi and A. Sasaki, Role of Field and Electron Impact Ionization in Ionization Front Generated by an Intense Electron Beam, Plasma and Fusion Research 7, 1204038 (2012) 査読有
- 2) N. Iwata, Y. Kishimoto and K. Imadera, Analysis of relativistic ponderomotive force and higher-order particle motion in a non-uniform laser field using the noncanonical Lie perturbation method, Plasma and Fusion Research 6, 2404105 (2011) 査読有
- 3) K. Imadera and Y. Kishimoto, Stability Analysis of Relativistic Electron Beams in a Wiggler with Harmonic Gyro-Resonance Using the Noncanonical Lie Perturbation Method, Plasma and Fusion Research: Rapid Communications 6 Volume 4 (2011) 査読有
- 4) M. Janvier, Y. Kishimoto, and J. Q. Li, Structure-Driven Nonlinear Instability as the Origin of the Explosive Reconnection Dynamics in Resistive Double Tearing Modes, Phys. Lev. Lett. **107**, 195001(1-5) (2011) 査読有
- 5) M. Janvier, A. Ishizawa, J.Q. Li, and Y. Kishimoto, Role of the pressure force in the explosive dynamics of magnetic islands in double tearing modes, Physics of Plasmas **18**, 102112 (1-6) (2011) 査読有
- 6) M. Janvier, Y. Kishimoto and J.Q. Li, Critical parameters for the nonlinear destabilization of double tearing modes in reversed shear plasmas, Nuclear Fusion **51**, 083016 (1-13) (2011)
- 7) A. Sasaki, Y. Kishimoto, E. Takahashi, S. Kato, T. Fujii, and S. Kanazawa, Percolation simulation of laser guided electrical discharge, Phys. Rev. Lett., 105, 075004 (2010) 査読有
- 8) N. Iwata, K. Imadera and Y. Kishimoto, Analysis of Relativistic Particle Orbit in a Transversely Focused High-Power Laser Field by Using the Noncanonical Lie Perturbation Method, Plasma and Fusion Research: Volume 5, 028 (2010) 査読有
- 9) Mo Chen, D. Saito, and Y. Kishimoto, Collisional Effects on Absorption and Energy Transport in a Dense Solid-Carbon Thin Film Irradiated by Subpicosecond Lasers, Plasmas and Fusion Reserch 4, 040 (2009) 査読有
- 10) Kenji Imadera, Y. Kishimoto, Daisuke Saito, Jiquan Li, Takayuki Utsumi, A numerical method for solving the Vlasov – Poisson equation based on the conservative IDO scheme, Journal of Computational Physics 228, 8919-8943 (2009) 査読有

[学会発表] (計 14 件)

- 1) 岸本 泰明, 杉山 裕一, 内田 智之, 岩田 夏弥, 福田 祐仁, 高強度レーザーとクラスター媒質との相互作用と粒子加速・輻射特性 II, 日本物理学会 第 68 回年次大会, 広島大学 (2013 年 3 月 29 日) .
- 2) 岩田 夏弥, 岸本 泰明, 高強度レーザービーム中での粒子ダイナミクスにおける相対論的動重力の高次非局所効果, 日本物理学会 第 68 回年次大会, 広島大学 (2013 年 3 月 26 日)
- 3) Y. Kishimoto, N. Iwata, Y. Sugiyama, T. Uchida and Y. Fukuda, Interaction between high power laser and clustered medium -propagation, acceleration, and radiation, 54th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Providence, USA , Oct. 29-Nov.2, 2012

- 4) N. Iwata and Y. Kishimoto, Higher order nonlocal effects of relativistic ponderomotive force in high power lasers, 54th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, Providence, USA, Oct. 29-Nov.2, 2012.
- 5) 岸本 泰明, 杉山 裕一、岩田 夏弥、内田 智之 (京大エネ科)、福田 祐仁, 強度レーザーとクラスター媒質との相互作用と粒子加速・輻射特性, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学, (2012 年 9 月 19 日)
- 6) 岩田 夏弥, 岸本 泰明, 今寺 賢志, 非正準 Lie 摂動論で導いた高次非局所効果を含む相対論的動重力の表式の特性と平均化法との相異, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学, (2012 年 9 月 19 日)
- 7) 岸本 泰明, 原子・緩和過程を取り入れた粒子シミュレーションと応用研究 – 電離性複雑媒質とプラズマ転移現象の理解に向けて – (特別講演), 原子衝突学会第 37 回年会, 電気通信大学, 2012 年 7 月 29 日
- 8) 岩田夏弥, 岸本泰明, 今寺賢志, 強集束高強度レーザー場中での相対論的粒子運動と非局所動重力, 日本物理学会 2012 年春季大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 27
- 9) 岸本泰明, 中野諭, 松田知也, 岩田夏弥, レーザー物質相互作用における電離ダイナミックス, Plasma Conference 2011, 石川県立音楽堂, 2011 年 11 月 22 日
- 10) 岩田夏弥, 岸本泰明, 今寺賢志, 非正準 Lie 摂動論を用いた高強度レーザー場中での動重力の非局所効果に関する理論研究, Plasma Conference 2011, 石川県立音楽堂, 2011 年 11 月 22 日
- 11) 岸本泰明, プラズマ転移概念の創出に向けて (シンポジウム), 趣旨説明、プラズマ生成・電離過程の奥に潜むもの, Plasma Conference 2011, 石川県立音楽堂, 2011 年 11 月 22 日
- 12) 高橋栄一, プラズマ転移概念の創出に向けて (シンポジウム), ICCD カメラを用いた高時間分解計測によるストリーマ放

電の開始・分枝条件の研究, Plasma Conference 2011, 石川県立音楽堂, 2011 年 11 月 22 日

- 13) 金澤誠司, プラズマ転移概念の創出に向けて (シンポジウム), 水中放電のダイナミックス: 放電前から放電後までのシナリオ, Plasma Conference 2011, 石川県立音楽堂, 2011 年 11 月 22 日
- 14) 藤井 隆, プラズマ転移概念の創出に向けて (シンポジウム), 長ギャップ気中放電における逃走電子の発生と役割, Plasma Conference 2011, 石川県立音楽堂, 2011 年 11 月 22 日

[その他]

ホームページ等

<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/kishi/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岸本 泰明 (KISHIMOTO YASUAKI)
京都大学大学院エネルギー科学研究科・教授
研究者番号:10344441

(2) 研究分担者

加藤 進 (KATO SUSUMU)
産業技術総合研究所・エネルギー技術研究部門・主任研究員
研究者番号: 20356786
李 継全 (LI JIQUAN)
京都大学大学院エネルギー科学研究科・准教授
研究者番号:00437253

(3) 連携研究者

中島 浩 (NAKAJIMA HIROSHI)
京都大学学術情報メディアセンター教授
研究者番号:10243057
内海 隆行 (UTSUMI TAKAYUKI)
山口東京理科大学・教授
研究者番号:50360433
金澤 誠司 (KANAZAWA SEIJI)
大分大学工学部・准教授
研究者番号:70224574
藤井 隆 (FIJII TAKASHI)
電力中央研究所・上席研究員
研究者番号:60371283
高橋 栄一 (TAKAHASHI EIICHI)
産業技術総合研究所・主任研究員
研究者番号:90357369