

機関番号：63902
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007年度～2010年度
 課題番号：19740346
 研究課題名（和文） 開放系粒子シミュレーションによる磁気リコネクションのダイナミクスの研究
 研究課題名（英文） Dynamics of Magnetic Reconnection by Particle Simulation in Open System
 研究代表者
 大谷 寛明（OHTANI HIROAKI）
 核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
 研究者番号：90332189

研究成果の概要（和文）：

磁気リコネクション現象における異常電気抵抗の物理機構解明を目指して、開放系3次元電磁粒子シミュレーションを実行した。コード開発では精度が高く非物理的ノイズが抑えられる開放系境界モデルの開発に成功した。電流層中心付近の粒子メアンダリング運動が圧力テンソルの非対角成分を励起して磁場凍結条件が破ることを簡単なモデルで解析的に示すことができた。粒子軌道をバーチャルリアリティ装置によって解析した結果、イオンの非熱的運動と加熱機構の間の強い相関が明確に示された。

研究成果の概要（英文）：

In order to clarify the physics mechanism of anomalous resistivity in magnetic reconnection, we performed three-dimensional electromagnetic particle simulation in the open system. In the development of the simulation code, we succeeded in achieving an open boundary model which had a high accuracy and decreased unphysical noise. We could show analytically by simple model that the meandering motion of particles around the center of current layer excited the off-diagonal components of pressure tensor, and that it broke the frozen-in condition. In analysis of particle trajectories by using the virtual-reality system, it was clarified that non-thermal motion of ions strongly related to the heating process of the magnetic reconnection.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	0	900,000
2008年度	800,000	240,000	1040,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
総計	2,900,000	600,000	3,500,000

研究分野：数物系科学

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：プラズマ物理

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は本課題の研究開始まで、磁場反転配位(FRC)の粒子シミュレーション研究で、電子電流密度とイオン電流密度の動径方向の空間分布形状がそれぞれ凹型と凸型に

なることを示し、このような分布の場合、傾斜モードが安定化されることを示した。この電流密度分布の結果は東大実験グループのスフェロマック合体のFRC生成において観測され、高い評価を得ている。他方、このFRC

生成実験でのスフェロマックのトロイダル磁気エネルギーから FRC のイオン熱エネルギーへの変換は、磁気リコネクションが原因ではないかと推測されている。

磁気リコネクションは、プラズマ中で磁力線が互いにつながりかわる現象で、電子やイオンという微視的な物理から、磁場のトポロジー変化など巨視的な物理が関わる。FRC プラズマのみではなく、太陽コロナや地球磁気圏サブストーム、トカマクの閉じ込め崩壊などエネルギー解放現象で重要な役割を果たすと考えられている。しかし、この現象を通じて発生する、磁場からプラズマへのエネルギー解放機構や粒子加速機構、リコネクションを支配する電気抵抗の詳細などについて十分な理解は得られていない。

2. 研究の目的

本研究の全体構想は、高ベータプラズマにおける粒子運動論的効果とプラズマ不安定性の関係、系のダイナミクスへの影響を電磁粒子シミュレーションによって運動論的に解明することである。これまでの高ベータプラズマ(FRCでは磁場反転領域)の運動論的シミュレーション研究の中で、磁気リコネクション現象を支配する電流層中心の高ベータ領域に着目し、プラズマ不安定性に伴う異常電気抵抗の物理機構の解明を目指して、磁気リコネクションの研究を推進した。

3. 研究の方法

本研究ではリコネクションのエンジンとなる磁場拡散領域をシミュレーションボックスとして切り出し、外部の物理情報を開放系境界条件として与え、リコネクションで発生したエネルギー流は系外へ排出される開放系3次元電磁粒子シミュレーション手法を採用した。

電磁粒子シミュレーション法では Particle-in-Cell 法に基づくアルゴリズムで粒子の運動方程式と Maxwell 方程式をセルフコンシステントに解いている。積分法は陽解法を採用した。また、上流境界では、frozen-in 条件が成立していると仮定して粒子の分布等を決めている。下流境界では、自由境界条件の下で粒子の分布等を決めている。

高温希薄な無衝突プラズマでは古典的 Spitzer 抵抗は小さいので、リコネクションには磁場拡散過程を担う電気抵抗が必要である。その候補として、プラズマ不安定性によって励起されたプラズマ波動と粒子の散乱過程に起因する異常電気抵抗がある。例えば、低周波混成帯域の波(LHDI)やドリフトキック波(DKI)が挙げられる。二流体描像による解析等を通じて、 $V \times B$ 項や慣性項、圧力項、プラズマ波動による揺動の成分など、どの力

がリコネクション電場と釣り合っているかを調べる。さらに、粒子の軌道や速度分布の時間変化・空間依存性を観測する。以上の研究を通じて、磁場拡散領域における微視的な物理を開放系粒子シミュレーションで調べ、磁気リコネクションを担う異常電気抵抗の発生機構の物理やそれを支配する物理の解明を目指す。

4. 研究成果

(1)開放系境界条件：プラズマや磁気フラックスが流入する上流境界において高精度で磁場凍結条件が成立する上流境界モデル及び、プラズマや磁気フラックスが排出される下流境界において非物理的なノイズを抑えることができる自由境界モデルの開発に成功した。この成功で、より高精度な粒子シミュレーションによって磁気リコネクションを研究できるようになった。

(2)コードの最適化：コードの更なる最適化を図った結果、コードの使用メモリ量の大幅な削減、計算効率の向上に成功し、シミュレーションの規模をより大きくすることが可能となった。

分散メモリ型スカラー計算機で実行性能を得るため、領域分割法による分散並列手法を開放系電磁粒子シミュレーションコードに適用した。今回採用した領域分割法では1次元方向のみ(電流方向)でシミュレーションボックスを分割した。分割されたそれぞれの領域での電磁場や粒子データをそれぞれの領域に割り当てられた MPI プロセスが担当して、運動方程式や Maxwell 方程式をその領域内について解く。MPI プロセス数の増加とともに計算領域を増加させて計算効率を調べた結果、1ステップあたりの計算時間がプロセス数に対してほぼ比例して増加した。これは、Poisson ソルバーが領域分割されていないため、計算領域の拡大とともにソルバーの計算負荷が増したことが原因であると考えられる。今後はこのソルバーの使用も含めた検討、具体的には局所的に電荷保存が保証される方法の適用の検討などが必要である。計算手法の改良の余地はまだあるが、今後のさらなる大規模シミュレーションの実行が可能となってきた。

(3)シミュレーション結果：電流層での粒子の速度分布がマックスウェル分布から非等方な分布になる。これは電流層の中心付近での粒子のメアンダリング運動の結果であり、この非等方分布によって圧力テンソルの非対角成分が発生して磁場凍結条件を破り、無衝突リコネクションを引き起こす。この関係について、簡単なモデルによってメアンダリング運動と圧力非対角成分の励起の関係を

示した。以下にその関係を示す。

上流境界に加えられた駆動電場によって、プラズマのフローと磁気フラックスが上流から中心へと向かう。駆動電場は粒子の運動論的效果によって電流シートへと侵入し、その中心に到達すると、磁気リコネクションを誘発する。

駆動フローの影響で無衝突リコネクションが発生するイオン拡散領域近傍では、圧力テンソル項 $1/qn (\partial\Pi_{yz})/\partial y$ によって磁場凍結条件が破られる(図1)。ここで q は電荷、 n は数密度、 Π_{ij} は圧力テンソルである。圧力テンソルは、リコネクション発生領域近傍における複雑な粒子の運動「メアンダリング運動」に起因するものである。このメアンダリング運動と圧力テンソルの関係を調べるため、簡単なモデルを構築した。このモデルで用いた近似は以下のとおりである。(i)メアンダリング運動の平均的な振幅は粒子の位置と局所イオンラーマー半径で決められる。(ii)磁場は線形で変化する。(iii)拡散領域の大きさはメアンダリング運動の振幅と等しい。(iv)圧力テンソルは、semi-cold プラズマ近似で与えられる。このモデルのもとで、圧力テンソル項を求めると、

$$\frac{1}{qn} \frac{\partial\Pi_{yz}}{\partial y} = -\frac{1}{qn} \frac{mnE_z B'_x v_{th} (B_x'^2 y^2 - B_y^2)}{(B_x'^2 y^2 + B_y^2)^2} \quad (1)$$

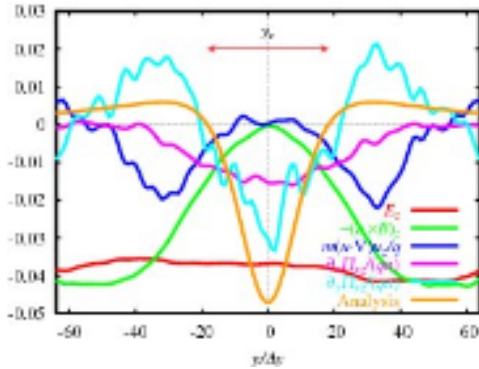


図1：イオンの force balance 方程式(式(2))と解析解(式(1))の各項の空間分布。リコネクション点を通過する上流方向の依存性を示している。赤、緑、青、マジエンダ、空色、オレンジは、それぞれ、 E_z , $-(u \times B)_z$, $m(u \nabla)u_z/q$, $1/qn (\partial\Pi_{xz})/\partial x$, $1/qn (\partial\Pi_{yz})/\partial y$ のシミュレーション結果と解析解を示す。

のように導かれる。ここで m は質量、 B'_x は B_x の線形変化の係数である。図1は force-balance 方程式

$$E_z + (u \times B)_z = \frac{m}{q} \left\{ \frac{\partial}{\partial t} + (u \cdot \nabla) \right\} u_z + \frac{1}{qn} \left(\frac{\partial\Pi_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\Pi_{yz}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

と解析解(Eq. (1))の空間 profile を示している。ここで、 u は flow velocity である。この解の変化傾向(オレンジ色の線)は、シミュレーション結果の圧力テンソル項 $1/qn (\partial\Pi_{yz})/\partial y$ ((空色)と一致している。このことから、メアンダリング運動は無衝突リコネクションにおいて重要な役割を果たしていることが分かる。

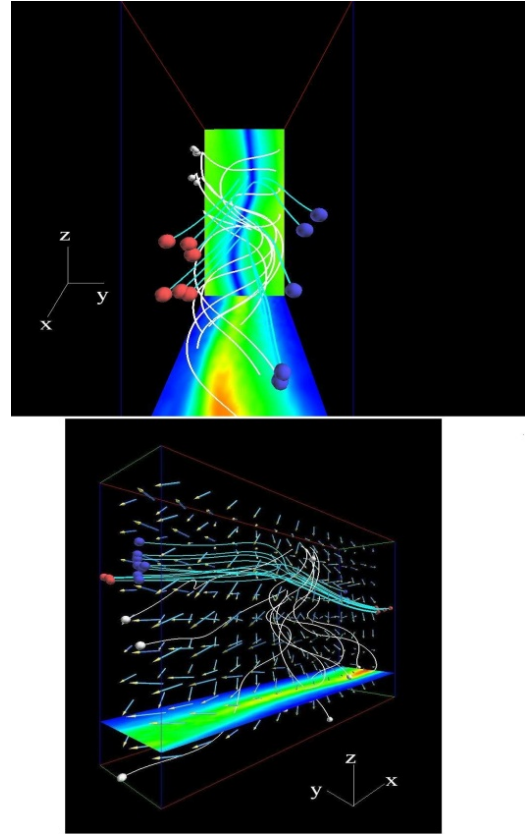


図2：バーチャルリアリティ装置を使ったリコネクションのシミュレーション結果の可視化。上図の白線と青線はそれぞれ粒子軌道と磁力線を表す。xy 面と yz 面のカラーマップはそれぞれ、イオンの温度分布と磁場のリコネクション成分の分布を表している。下図の矢印はイオンの速度の分布を表している。

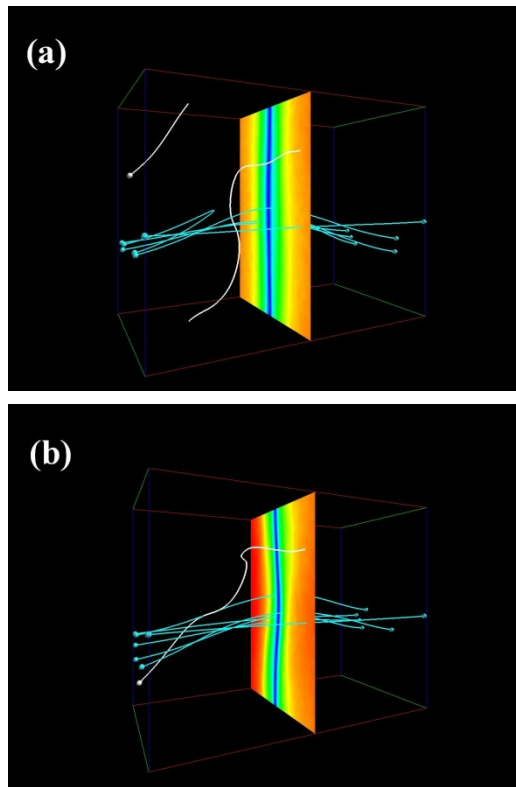


図3：時間変化する電磁場中での粒子軌道をバーチャルリアリティ空間での可視化。(a)では、ある特定の時刻における電磁場の下で粒子軌道を計算した場合で、(b)では時間変化する電磁場の下で計算した場合を示す。

(4)没入型バーチャルリアリティ装置による解析1：電磁粒子シミュレーションの結果を表示し、また、その電磁場下でのテスト粒子軌道を計算・表示するソフトウェアを開発し、リコネクションのシミュレーション結果をバーチャルリアリティ空間で解析した(図2)。その結果、イオンのメアングリング運動の軌道幅とイオンの高温領域の幅がほぼ同じであることがわかり、イオンの軌道効果と加熱機構の間の強い相関を明確に示すことができた。

(5)没入型バーチャルリアリティ装置による解析2：時間変化する電磁場中での粒子軌道をバーチャルリアリティ空間で追跡する可視化ソフトウェアを開発した。シミュレーション結果である電磁場データについて時間方向のデータ間を線形で補間するようにした。これにより、粒子軌道の追跡がより精密に行うことができるようになった。リコネクションでの解析でこの可視化ソフトウェアを適用したところ、時間変化する電磁場中での粒子は、時間固定された電磁場中での粒子

よりも下流方向への加速が大きいことが分かった(図3)。この加速はプラズマ不安定性が発生しているリコネクション発生領域で起こっており、時間変動する電磁場が粒子の加速に影響を与えていることが示唆された。

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16件)

1. N. Ohno, H. Ohtani, D. Matsuoka and R. Horiuchi: 'Visualization of Particle Trajectories in Time-Varying Electromagnetic Fields by CAVE-Type Virtual Reality System' *Plasma and Fusion Research* Vol.7 (2012) 1401001 (6pages) 査読有.
2. S. Usami, H. Ohtani, R. Horiuchi and M. Den: 'Simulation of Plasma Flow Injection with Multi-Hierarchy Model Aiming Magnetic Reconnection Studies' *Communications in Computational Physics* Vol.11 (2012) pp.1006-1021 査読有.
3. S. Ishiguro, S. Usami, R. Horiuchi, H. Ohtani, A. Maluckov and M. M. Skoric: 'Multi-scale simulation for plasma science' *Journal of Physics: Conference Series* Vol.257 (2010) 012026 査読有.
4. R. Horiuchi, S. Usami, H. Ohtani and M. Den: 'Magnetic Reconnection Controlled by Multi-Hierarchy Physics in an Open Systems' *Plasma and Fusion Research* Vol.5 (2010) S2006 査読有.
5. S. Usami, H. Ohtani, R. Horiuchi and M. Den: 'Development of Multi-Hierarchy Simulation Model for Holistic Understanding of Magnetic Reconnection Phenomena' *Journal of Plasma and Fusion Research* Vol.85 (2009) 585 査読有.
6. S. Usami, H. Ohtani, R. Horiuchi and M. Den: 'First Demonstration of Collisionless Driven Reconnection in a Multi-Hierarchy Simulation' *Plasma and Fusion Research* Vol.4 (2009) 049 査読有.
7. H. Ohtani and R. Horiuchi: 'Open Boundary Condition for Particle Simulation in Magnetic Reconnection Research' *Plasma and Fusion Research* Vol.4 (2009) 024 査読有.
8. R. Horiuchi, S. Usami, H. Ohtani and M. Den: 'Multi-Scale Simulation of Collisionless Driven Reconnection in Open Systems' *Journal of Plasma and Fusion Research SERIES* Vol.8 (2009) 184-188 査

読有.

9. H. Ohtani, W. Horton, T. Petrosky and R. Horiuchi: 'Energy Conversion in Magnetic Reconnection with Chaos Diffusion' *Journal of Plasma and Fusion Research SERIES* Vol. 8 (2009) 203-207 査読有.

10. S. Sudo, M. M. Skoric, T.-H. Watanabe, Y. Todo, A. Ishizawa, H. Miura, R. Ishizaki, A. Ito, H. Ohtani, S. Usami, H. Nakamura, A. Ito, S. Ishiguro, Y. Tomita, A. Takayama, M. Sato, T. Yamamoto, M. Den, H. Sakagami, R. Horiuchi, S. Okamura, and N. Nakajima: 'Simulation Science for Fusion Plasmas' *J. Phys.: Conf. Ser.* Vol. 133 (2008) 012025 査読有.

11. H. Ohtani and R. Horiuchi: 'Scientific Visualization of Magnetic Reconnection Simulation Data by CAVE Virtual Reality System' *Plasma and Fusion Research* Vol. 3 (2008) 054 査読有.

12. B. Lin, R. Horiuchi and H. Ohtani: 'Formation of Sweet-Parker-like electron dissipation region in a driven open system' *Plasma and Fusion Research* Vol. 3 (2008) S1054 査読有.

13. S. Usami, H. Ohtani, R. Horiuchi and M. Den: 'Development of Multihierarchy Simulation Model for Studies of Magnetic Reconnection' *Communications in Computational Physics* Vol. 4(3) (2008) 537-544 査読有.

14. R. Horiuchi and H. Ohtani: 'Formation of non-Maxwellian distribution and its role in collisionless driven reconnection' *Communications in Computational Physics* Vol. 4(3) (2008) 496-505 査読有.

15. H. Ohtani, S. Ishiguro, R. Horiuchi, Y. Hayashi and N. Horiuchi: 'Development of Electromagnetic Particle Simulation Code in an Open System' *Lecture Notes in Computer Science* Vol. 4759 (2008) 329-343 査読有.

16. T. Moritaka, R. Horiuchi, H. Ohtani: 'Anomalous resistivity due to kink modes in a thin current sheet' *Physics of Plasmas* Vol. 14 (2007) 102109 (10 pages) 査読有.

[学会発表] (計 20 件)

1. H. Ohtani, A. Kageyama, Y. Tamura, M. Nunami, S. Ishiguro, M. Shohji, N. Ohno, D. Matsuoka, R. Horiuchi 2012 (oral): 'Effective Approach to Plasma Physics and Fusion Plasmas by Virtual-Reality Visualization', 18th International Stellarator/Heliotron Workshop & 10th Asia Pacific Plasma Theory Conference, Jan.

29 - Feb. 3, 2012, Australian National University & Murramarang Beachfront Nature Resort (Canberra & Murramarang, Australia)

2. H. Ohtani, A. Kageyama, Y. Tamura, M. Nunami, S. Ishiguro, M. Shohji, N. Ohno, D. Matsuoka, R. Horiuchi 2011 (poster): 'Application of Visualization by Virtual-Reality Technology to Plasma Physics' (24D04), Plasma Conference 2011 (PLASMA2011) / プラズマ・核融合学会第 28 回年会 / 応用物理学会第 29 回プラズマプロセスング研究会 / 日本物理学会 (領域 2) 2011 年秋季大会, Nov. 22-25, 2011, 石川県立音楽堂 (Kanazawa, Japan)

3. H. Ohtani, Y. Tamura, A. Kageyama, M. Nunami, S. Ishiguro, M. Shohji, N. Ohno, D. Matsuoka, R. Horiuchi 2011 (poster): 'Scientific Visualization of Fusion Plasma and Plasma Physics by Virtual Reality System', 22nd International Conference on Numerical Simulations of Plasmas (ICNSP2011), Sep. 7-9, 2011, Ocean Place - Resort & Spa (Long Branch, NJ, USA)

4. H. Ohtani, N. Ohno, R. Horiuchi 2009. (oral): 'Particle Simulation Analysis by Virtual Reality System', US-Japan JIFT Workshop 2009 on 'Advanced Simulation Methods in Plasma Physics', Dec. 14 - 16, 2009, NIFS, (Toki, Japan)

5. H. Ohtani, N. Ohno, R. Horiuchi 2009. (poster): 'Simulation Data Analysis by Virtual Reality System', 19th International Toki Conference (ITC19), Dec. 8 - 11, 2009, Ceratopia Toki, (Toki, Japan)

6. 大谷寛明, 大野暢亮, 堀内利得 2009. (invited): 「開放系 3 次元粒子シミュレーションと没入型バーチャルリアリティ装置を用いた磁気リコネクション研究」, 第 26 回プラズマ・核融合学会年会, 12 月 1 日 - 4 日, 2009, 京都市国際交流会館, (京都, 日本)

7. H. Ohtani, N. Ohno, R. Horiuchi 2009. (oral): 'Role of Particle Kinetic Effects on Magnetic Reconnection by Analysis of Virtual Reality System', The 7th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association (APFA2009) and the Asia-Pacific Plasma Theory Conference (APPTC2009), October 27-30, 2009, AUGA building, (Aomori)

8. H. Ohtani, N. Ohno, R. Horiuchi 2009. (oral): 'Scientific Visualization of Particle Simulation Data by Virtual Reality System', 21st International Conference on Numerical Simulation of

Plasmas 2009 (ICNSP09), October 6-9, 2009, Congress Center of Pavilhao Atlantico, (Lisbon, Portugal)

9. 大谷寛明, 大野 暢亮, 陰山聡, 堀内利得 2009. (oral): 「3次元バーチャルリアリティ装置におけるプラズマ粒子シミュレーションデータの可視化 II」, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 9月25日-28日, 2009, 熊本大学黒髪キャンパス, (熊本, 日本)

10. 大谷寛明, 堀内利得 2009. (oral): 「3次元バーチャルリアリティ装置におけるプラズマ粒子シミュレーションデータの可視化」, 日本物理学会第64回年次大会, 3月27日-30日, 2009, 立教学院池袋キャンパス, (東京, 日本)

11. 大谷寛明, 堀内利得 2008. (poster): 「CAVE 装置におけるリコネクションのシミュレーションデータの可視化」, 第25回プラズマ・核融合学会年会, 12月2日-5日, 2008, 栃木県総合文化センター, (宇都宮, 日本)

12. Hiroaki Ohtani and Ritoku Horiuchi 2008. (oral): 「PIC model for magnetic reconnection interlocked simulation model」, JIFT Workshop on 「Progress of Multi-scale Simulation Models」, November 21-22, 2008, Hyatt Regency Hotel, (Dallas, TX, USA)

13. Hiroaki Ohtani, Wendell Horton, Tomio Petrosky and Ritoku Horiuchi 2008. (poster): 「Role of Chaotic Orbits of Meandering Particles in Magnetic Reconnection」, 50th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, November 17-21, 2008, Hyatt Regency Hotel, (Dallas, TX, USA)

14. Hiroaki Ohtani, Wendell Horton, Tomio Petrosky and Ritoku Horiuchi 2008. (poster): 「ENERGY CONVERSION IN MAGNETIC RECONNECTION WITH CHAOS DIFFUSION」, 2008 International Congress on Plasma Physics (ICPP2008), September 8-12, 2008, Fukuoka International Congress Center, (Fukuoka, Japan)

15. Hiroaki Ohtani, Ritoku Horiuchi, Wendell Horton and Tomio Petrosky 2008. (poster): 「Energy release in Magnetic Reconnection with Chaos Diffusion」, 2008 International Sherwood Fusion Theory Conference, March 30 - April 2, 2008, Millennium Harvest House, (Boulder, Colorad, USA)

16. Hiroaki Ohtani and Ritoku Horiuchi 2008. (oral): 「Open boundary condition for particle simulation of collisionless driven reconnection」, The US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection 2008 March 3-6, 2008, Zampamisaki Royal Hotel

(Okinawa, Japan)

17. Hiroaki Ohtani, Ritoku Horiuchi, Wendell Horton 2007. (poster): 「Dynamics of magnetic dissipation region in collisionless driven reconnection in open system」, 20th International Conference on Numerical Simulation of Plasmas, October 10-12, 2007, Renaissance Arboretum Hotel (Austin, TX, USA)

18. Hiroaki Ohtani, Ritoku Horiuchi 2007. (oral): 「Improved boundary model for particle simulation of collisionless driven reconnection in an open system」, US-Japan Simulation Science Workshop, October 8-9, 2007, Renaissance Arboretum Hotel (Austin, TX, USA)

19. 大谷寛明, 堀内利得, W. Horton, 李斌, 森高外征雄, 宇佐見俊介, 田光江 2007. (oral): 「開放系無衝突駆動リコネクションにおける散逸領域形成のダイナミクス」, 日本物理学会 第62回年次大会 2007年9月21日-24日, 北海道大学札幌キャンパス(北海道).

20. H. Ohtani, R. Horiuchi, and W. Horton 2007. (poster): 「Three dimensional particle simulations of driven magnetic reconnection」, 2007 International Sherwood Fusion Theory Conference, April 23 - 25, 2007, Loews Hotel (Annapolis, MD, USA)

[その他]

ホームページ等

<http://www-fps.nifs.ac.jp/ohtani/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大谷 寛明 (HIROAKI OHTANI)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：90332189

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：