

## 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 24 年 6 月 1 日現在

機関番号： 12608

研究種目： 基盤研究(A)

研究期間： 2008 ~ 2011

課題番号： 20244090

研究課題名（和文） 半実験的逆解析手法に基づいた高エネルギー密度プラズマの科学

研究課題名（英文）

High-Energy-Density Plasma Science based on Semi-empirical Inverse Analysis

研究代表者

堀岡 一彦 (HORIOKA KAZUHIKO)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号：10126328

研究成果の概要（和文）: 本研究は、高出力の電磁パルス発生装置やイオン加速器を用いて一様で良く定義された高エネルギー密度のエネルギー付与を行い、固体密度付近で数千度（WDM：Warm Dense Matter と呼ばれる状態）の物質の相変化や強い衝撃波を伴う高速プラズマ流の挙動を解明することを目的とした。WDM 内の輸送係数や状態方程式を議論するために小型の高速電磁パルス入力装置を製作、同軸で均一な高密度プラズマを形成し、導電率や比熱の密度・温度依存性を調べた。その結果、導電率は固体密度の数十分の一と数千度の状態で最小値を持つこと、最小値は温度の上昇に伴って消失すること、そのような特性は物質に依存しないことなどを明らかにした。電磁エネルギーの入力を制御することによって一次元的な高速・高密度（高エネルギー密度）のプラズマ流を形成し、強いプラズマ衝撃波の構造や輻射輸送の影響を議論した。また、電圧重畳型誘導加速モジュレータを用いる粒子ビーム変調装置を製作してイオン加速器の高出力化に不可欠なビーム・バンチングに伴うエネルギー散逸過程を検討した。

研究成果の概要（英文）: Behaviors of warm dense plasmas and structures of strong shock waves were studied using pulse power device and intense particle beams. Electrical conductivities of warm-dense metallic plasma were measured as a function of density and temperature using pulse power driven electrical discharges. The results showed that, regardless of materials, the conductivity has a minimum value at a state with few tenth of solid density and several thousand K which disappears with the temperature rise. The structure of strong plasma shock waves in which radiation transport plays an important role, was discussed using electro-magnetically driven high speed flows. For generation of high power particle beams, the evolution and energy dissipation processes of intense beams during bunch compression processes were discussed using a beam modulation simulator.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	14,100,000	4,230,000	18,330,000
2009 年度	9,900,000	2,970,000	12,870,000
2010 年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
2011 年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
年度			
総計	38,900,000	11,670,000	50,570,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： プラズマ科学

キーワード： プラズマ，高エネルギー密度，輸送係数，導電率，状態方程式，衝撃波，パルスパワー，イオンビーム，重イオン核融合

### 1. 研究開始当初の背景

高エネルギー密度状態の物質は、相変化や内部自由度の励起、電離、輻射輸送、などを伴った複雑な流体運動を行う。高エネルギー密度状態にある物質の状態方程式や輸送係数の定式化およびそれらのデータベースは、巨大惑星の内部構造や慣性核融合プラズマの振る舞いを理解する上で非常に重要であるにもかかわらず、公開されているデータは限られているうえに誤差が大きい。また、輸送係数が重要な働きをする高温プラズマの物理は、高輝度プラズマ光源の開発や宇宙プラズマの研究に重要であるが、これまでは受動的な観測と ad hoc な計算式が主要な解析手段になっていた。

実験室で高エネルギー密度状態の物質を研究する手段として、従来は超高出力密度の入力を実現できる大型のレーザー施設が用いられてきた。しかしながら、パルスレーザー照射された標的は、空間的にも時間的にもスケールが極端に小さいうえに、吸収領域、エネルギー輸送領域、加熱領域などの構造を持ち、非対称・非定常で状態の評価が非常に難しいという問題があった。

複雑な現象を解明するには、単純で良く定義された状態を形成することが重要である。慣性核融合のドライバー技術に関連して電磁パルスや高強度のイオンビームを発生する技術が洗練され、高エネルギー密度状態の物質の生成・制御や計測が可能になってきた。図1の密度・温度平面上に電磁パルス発生装置や高出力イオンビームで実現できる高エネルギー密度状態を示す。これらの手段を用いると、幾何学的に単純な構造を持つ（良く定義された）状態を形成することができる。また、バルク（均一な）加熱が可能であるため、大体積で様な状態を実現できるという特長がある。さらには、エネルギー入力の履歴を制御できること、衝撃波条件に束縛されない幅広い条件下で状態量の測定ができること、エネルギー変換過程や幾何学的な自由度

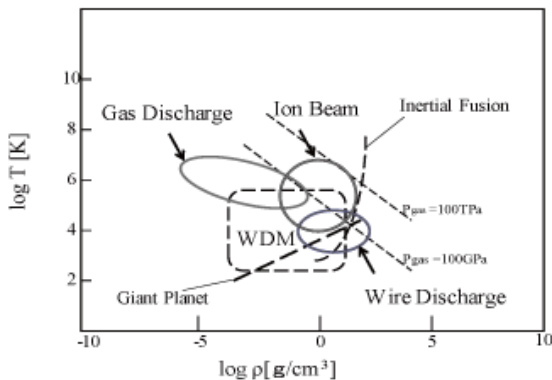


図1 密度・温度平面上に表示したパルスパワーやイオンビームで生成できる物質状態

が大きいことなどの利点を持ち、形状や負荷の工夫によって円筒状の均一な高密度プラズマや一次元的な強い衝撃波を形成できるので、高エネルギー密度科学の有力な道具として確立しつつあった。

### 2. 研究の目的

本研究は、高速の電磁パルスや重イオンビームを用いて高エネルギー密度プラズマを形成し、半実験的・逆解析手法によって極限（高エネルギー密度）状態のプラズマの状態方程式、輸送係数、輻射輸送特性を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

高速のパルスパワーで駆動される細線放電プラズマや高速のキャピラリー放電を用いて良く定義された（対称性と均一性に優れた）高エネルギー密度プラズマの試料を作成し、輸送係数、状態方程式、および輻射輸送などに関する信頼性の高いデータを得るために以下の研究課題に取り組んだ。

実施した研究は、次の4つに大別できる。

パルス水中細線放電による WDM の科学

水中のパルス細線放電を用いると均一で対称性の良い WDM 状態を形成できる。マイクロ秒程度の時間スケールで金属細線にエネルギーを注入すると、細線は相変化を伴って WDM 状態を通過しながら爆発的に膨張し、最終的には低密度のプラズマ状態となって蒸散する。水は電気絶縁と膨張を抑制（タンパー効果）するとともにプラズマ境界を安定に保つ役割を果たす。

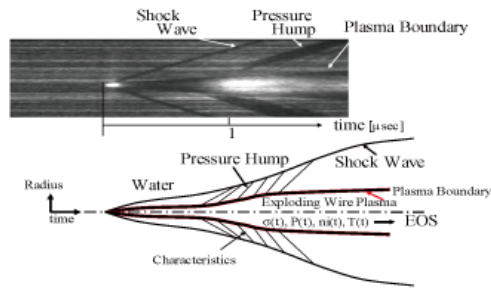
金属細線の半径を  $r$ 、導電率を  $\sigma$ 、パルス回路の角周波数を  $\omega$ 、透磁率を  $\mu$  とおくと、エネルギー入力が均一になる条件は表皮厚さが細線半径よりも大きくなることであり、 $\delta = \sqrt{2/\sigma\omega\mu_0} > r$  と表現できる。一方、ワイヤーの直径を  $d$ 、音速を  $a$  とすると、内部の流体的な変化は  $t_F \approx d/a$  の時間程度で起こる。したがって、放電周波数が低いと入力の均一性は保証される。一方、エネルギー損失と不安定性の影響を少なくするには周波数は高い方がよい。

均一なプラズマを形成する条件は、パルスパワーの特徴的な時間  $t_p$  とおくと、

$$t_F \approx d/a < t_s \approx 2\pi/\omega < t_p \quad (1)$$

となる。また、金属状態の導電率は温度の上昇とともに大きくなるので、少なくとも蒸発するまでは細線内部のエネルギー密度は均一化される。

図2に高速カメラで撮影した水中細線放電の典型的なストリーク像を示す。ワイヤー/プラズマと放電に伴って水中に駆動される衝撃波の境界を強調するために、ストリーク



像は半導体レーザーでバックライトされて  
図2水中細線放電のストリーク写真と模式図

いる。爆発的に膨張するワイヤー物質は水中に衝撃波を駆動しながら、少なくとも数マイクロ秒に亘って安定に軸対称性を保つこと、電圧・電流の履歴や流体的な挙動は非常に再現性が良いことが確認された。また、水中ワイヤー放電プラズマは、軸対称プラズマ径の時間発展と温度の情報を $\mu$ 秒に渡って得ることができ、導電率を幅広い領域で評価することができることがわかった。

図3に水中ワイヤー放電法によって得られたアルミニウム細線の導電率 ( $T=5000\text{K}$ ) の密度依存性を示す。図3に示すように、導電率は固体密度の  $1/30$  程度で極小値を持つことがわかった。また、銅、タングステン・ワイヤーについても調べた結果、導電率は材質にかかわらず密度に対して同様の依存性を持つことも明らかになった。このことは温度一定 ( $5000\text{K}$ ) の条件のもとでは、格子間隔が常圧下の固体の3倍程度に広がった時に導電率が極小値をとることを示唆しており、最近の分子動力学計算結果とも一致している。細線爆発放電そのものは非常に古くからある技術であるが、WDM 領域を通過して膨張するプラズマの流体的な挙動を定量的に正確に予測することは難しい。一方、流体挙動はワイヤーへのエネルギー投入履歴と対応する圧力の履歴を反映している。実験で観測された流体挙動と適切な状態方程式を導入した流体シミュレーションとを比較することによって、WDM の状態方程式を半実験的検討する

電磁加速高速プラズマによる衝撃波実験  
パルスパワー装置でガス中に大電流を駆動すると、放電プラズマはピンチ効果によって自己収縮しながらエネルギー密度を高めに逆解析することが可能であると考えられる。プラズマ境界と水中に駆動される衝撃波の挙動、ワイヤーに入力される放電エネルギーの履歴から WDM 状態にあるワイヤーと水の状態方程式と輸送係数を逆解析することが試みた。逆解析を行うには、均一性が保たれていると同時にできるだけ単純な幾何学

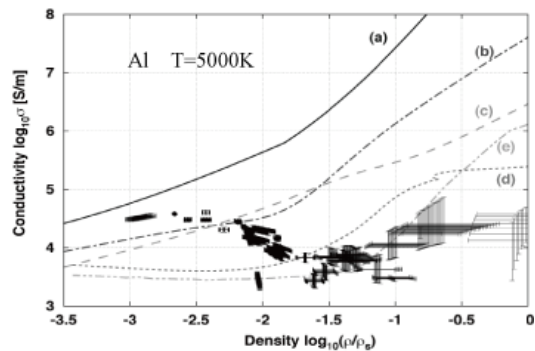


図3 WD 状態の物質 (アルミ) の導電率の密度依存性。数字は各種理論曲線: (1) Spitzer, (2) Ichimaru, (3) Lee-More, (4) Kuhlbrodt, (5) Lee-More-Desjarlais

的形状で、安定でよく定義された物質の状態の形成が必要であり、水中細線放電プラズマは有力なテスト問題を提供できることがわかった。自発的に高エネルギー密度状態を作り出す。

たとえば、電流  $100\text{kA}$  のプラズマが直径  $100\ \mu\text{m}$  まで収縮すると、磁束密度は  $400\text{T}$  に達する。高速のピンチ放電で発生するエネルギー密度の高いプラズマは不安定性で激しく時間・空間的に変動しながら、高速のジェット、強い衝撃波、相対論的な電子や高速イオンの加速、などを誘起するため、動的な現象の宝庫である。しかし、これでは状態を均一に制御したり衝撃波の物理を調べたりすることは難しい。

放電電極形状の工夫によってよく定義された状態を実現することができる。図4は一次元的な衝撃波を発生させるために工夫されたパルス放電装置である。軸対称性を保ちつつ回路インダクタンスを小さくするため、同軸状に設定されたコンデンサーは、マイクロ秒の時間スケールで最大  $160\text{kA}$  の電流を駆動できる。同軸円錐形状を持つ電極間に誘起された衝撃波は、電流シートによって電磁的に加速・収束された後、アクリル製のガイド管内を上昇し非常に強い一次元衝撃波を形成できた。Xe を動作ガスに用いて高速放電を駆動し、ガイド管内を上昇する衝撃波フロントを高速ストリークカメラで観測した結果、衝撃波は定常とみなせる(等速)領域があり、実験結果と輻射輸送を含む定常一次元の計算結果との比較が可能になった。また、衝撃波のマッハ数  $M$  は  $200$  以上に達することがわかった。Xe イオンの線スペクトルをストリークすることによって衝撃波の電離緩和領域を定量的に評価できた。衝撃波加熱されたプラズマの時間発展は Xe の電離緩和過程で支配されていること、衝撃波加熱領域からの輻射輸送によるプリカーサー(前駆領域)が衝撃波構造の形成に大きな役割を演じてい



ることなどが明らかになった。

輻射エネルギー密度を考慮した保存則から衝撃波速度が以下の基準を満たす時、衝撃波の形成に輻射の寄与が無視できなくなる。

$$u_s \geq \left( \frac{7^7 k_B^4 N_1}{72a \mu_1^3} \right)^{\frac{1}{6}} \quad [m/s] \quad (2)$$

ここで、 $k_B$  はボルツマン常数、 $a$  は輻射密度常数、 $N_1$  は上流の原子数密度、 $\mu_1$  は粒子の質量、である。同様に、輻射が無視できなくなる衝撃波マッハ数の基準  $M_{rad}$  は、以下のように導かれる。

$$M_{rad} = \frac{7^2}{6} (6\gamma)^{\frac{1}{2}} \alpha_r^{-\frac{1}{6}} \quad (3)$$

ただし、 $\gamma$  は比熱比、 $\alpha_r$  は輻射圧と運動論的な圧力の比である。 $M > M_{rad}$  の時、衝撃波背後からの輻射輸送が衝撃波の構造そのものに影響することを示唆している。

希薄な Xe ガス中に形成されたマッハ数  $M \sim 200$  の強い衝撃波は、上記の条件を満たしている。分光法によって観測されたイオン・電子緩和領域は予想以上に大きく、輻射輸送による衝撃波背後からの輻射が構造に大きく影響していることが明らかになった。

これらの結論が得られた最も大きなポイントは、パルスパワー装置の電極形状の工夫によって準定常とみなせる一次元的な衝撃波の形成が可能になったことである。定常・一次元の条件下では輻射の項を含めたエネルギーの保存の条件を用いることができるので輻射の項を考慮した Rankine-Hugoniot の条件を求めることができた。

#### イオンビーム加熱標的の検討

GeV 級の高エネルギーイオンビームは固体標的中での飛程が大きく、大体積・均一加熱に適している。また、ビーム加熱は材質を選ばないうえに標的内のエネルギー付与分布が高い精度で予測可能であることが、よく定義された高エネルギー密度状態を得るうえで大きな利点である。

パルスパワー技術をベースにした新しい形式の加速器が提案され、高速のイオンビームを用いた標的加熱実験も視野に入ってきた。現在建設中の KEK のデジタル加速器施設では、バンチ当たり  $10^9$ - $10^{11}$  個の各種 GeV イオンの供給が計画されており、ビーム収束系と標的構造の工夫により WDM 生成実験が可能であると予測されている。

木星をはじめとする巨大惑星の構造や太陽系の起源を解明する鍵となるのが水素の状態方程式である。特に水素分子から金属水素に遷移する領域 ( $\sim 200$  GPa,  $\sim 6000$  K) の状態方程式が重要である。大強度のイオンビームを用いると Off-Hugoniot の条件で (衝

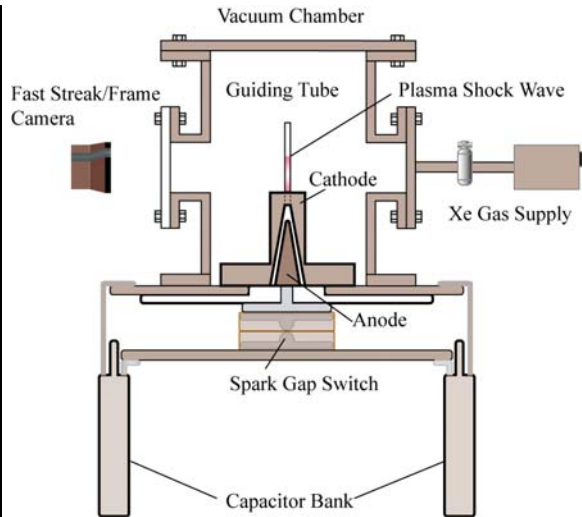


図4 プラズマ衝撃波発生用パルスパワー装置

撃波の生成なしに) 大きな体積の試料の均一な加熱が可能である。目標とするパラメータ領域を実現するために同軸状の金属ライナー内に閉じ込めた固体水素をパルスパワーによって予備圧縮し、イオンビームで追加熱する方法を提案した。

図5に密度・圧力平面上に衝撃波圧縮とイオンビーム圧縮過程の履歴の比較を示す。波線は既存のデータベース (SESAME-5251) から得られる関係を目安として示したものである。等エントロピー的な予備圧縮とビーム加熱を用いる方法は基本的には密度・圧力平面上の幅広い領域をカバーできる。金属ライナーは、圧縮時はピストンとして、膨張時にはタンパーとして均一な Warm Dense 状態の水素の生成に寄与する。状態方程式の評価は、内部エネルギー、密度、温度あるいは圧力を評価できれば決定できる。標的を貫通したイオンのエネルギーから温度を評価する方法が検討されている。標的形状を工夫することによって軸対称性が期待できるので、標的径の時間発展から逆問題的に決定する方法も有効であることを示した。

#### 高出力イオン加速器のためのビーム物理

レーザーが、主として標的の低密度領域で吸収され、エネルギー付与された物質は複雑な構造を持つものに対して、イオンビームは固体密度領域内部にまで侵入できる。また、標的物質を選ばないことや大体積へのエネルギー注入が可能など、高出力のイオンビームは高エネルギー密度科学に理想的なドライバーである。一方、イオンビームの高出力化には新しいビーム操作技術の確立が必要である。なかでも、加速器システムの最終段階でのビームバンチの縦方向圧縮技術 (バンチング) が確立していない。

図6に最終段圧縮部とバンチング操作に伴

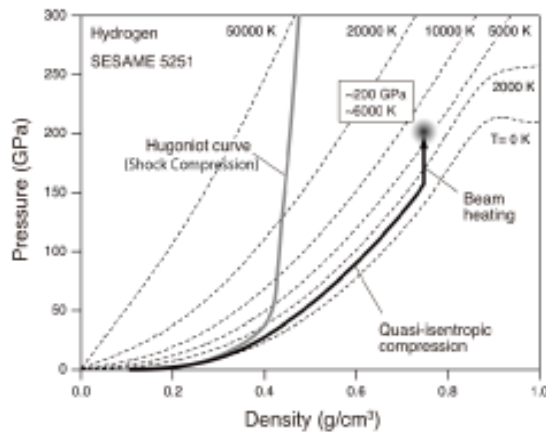


図5 密度・圧力平面上に示した衝撃圧縮とイオンビーム圧縮の履歴の比較

うビーム・パラメータ変化を模式的に示す。イオンビームのパワー増大のために速度変調を受けたビームは、非断熱的な圧縮に伴う空間電荷効果や集団効果によってビームエネルギーを散逸させ、収束性が低下する。

急激な（非断熱的）縦方向圧縮（バンチング）操作は、ビームエミッタンスを増加させ、収束性を低下させると予想される。本研究では、小型のシミュレータを製作し、バンチング操作に伴うエネルギーの散逸過程を検討した。

#### 4. 研究成果

研究成果の概要は以下の通りである。

小型のパルスパワー装置を立ち上げ、水中に駆動される高密度金属プラズマの導電率を温度・密度をパラメータに計測した。

準剛体キャピラリーに閉じ込めた高密度プラズマの導電率や比熱を、幅広い密度・温度領域に渡って計測した。

電磁駆動される高速プラズマ発生装置を考案し、プラズマ衝撃波の構造に及ぼす電離緩和と輻射輸送の影響を明らかにした。

小型の電子線誘導加速器を立ち上げ、粒子ビームバンチング（縦圧縮）に伴うビーム物理を検討し、粒子ビーム源の高強度化への指針を示した。

電磁力を利用した高密度・高速プラズマ流発生法を提案するとともに、基本的な動作特性を明らかにした。

パルスパワー技術をベースにしたドライバは大体積で対称性の良い試料を比較的長い時間スケールで形成できる。均一で幾何学的に対称性の良い密度分布と良く知られた内部エネルギー付与を利用して精度良い計測ができると期待される。また、制御されたエネルギー入力を行うと、衝撃波条件に束縛されない等エントロピー的なエネルギー付与が可能で、精度の高い状態方程式や導電率のデータを得ることができる。超高圧力、高温と輻射輸送、励起や電離、相変化、非平

#### Beam Dynamics during Bunch Compression in the Final Stage

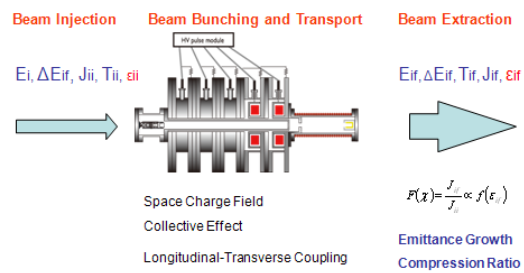


図6 高出力ビームの最終段圧縮部の概念

衡と緩和過程、衝撃波の形成、などは流体時間以下のパルスでエネルギー付与された高エネルギー密度状態の物質の振舞いの特徴づけている。パルスパワー技術を用いて生成される電磁パルスやイオンビームを用いると、さまざまな物質に制御されたエネルギー付与が可能になり、状態方程式や輸送係数を精度よく調べることができる。また、極端な非平衡状態を調べることが可能である。そのような状況で検討される相図には、密度、温度、圧力といった代表的な状態量空間に時間軸という新しい座標が加わる。高エネルギー密度の科学が枠組みを拡大し、そのような広大な空間で議論される時代がやってくると予想される。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 21 件)

堀岡一彦, パルスパワー技術に基づいた高エネルギー密度科学の展開, 日本物理学会誌, 査読有, 67 巻, 2012, pp.252-257

T.Kawamura, K.Horioka, F.Koike, K. Radiation from Low Charge Chlorine Heated by an Ion Beam for Cold Dense Plasma Diagnostics, *Laser and Particle Beams*, 査読有, 29 巻, 2011, pp.135-140  
T.Sasaki, K.Horioka, et.al., Electrical Conductivities of Aluminum, Copper, and Tungsten Observed by an Underwater Explosion, *Physics of Plasmas*, 査読有, 17 巻, 2010, 084501

堀岡一彦, 佐々木徹, 高山 健, 長谷川純, パルスパワー技術による Warm Dense Matter 実験, プラズマ・核融合学会誌, 査読無, 86 巻, 2010, pp.269-281

K.Horioka, T.Kawamura, M.Nakajima, S.Kawata, et.al., Activities on Heavy Ion Inertial Fusion and Beam-driven High Energy Density Science, *Nucl. Instr. Meth.*, 査読有, Vol. 606, 2009, pp.1-5

T.Kikuchi, K.Horioka, Beam Behavior under a Non-stationary State in High-current Heavy Ion Beams, 査読有,

*Nucl. Instr. Meth.*, Vol.606, 2009, pp.31-36

T.Kikuchi, K.Horioka, M.Nakajima, S.Kawata, Beam Dynamics during Longitudinal Bunch Compression of High-Current Heavy-Ion Beams, 査読有, *Nucl. Instr. Meth.*, Vol.577, 2009, pp.103-109

T.Sasaki, Y.Yano, M.Nakajima, T.Kawamura, K.Horioka, Warm Dense Matter Studies using Pulse Power Discharges in Water, 査読有, *Nucl. Instr. Meth.*, Vol.577, 2009, pp.313-316

T.Kikuchi, K.Horioka, Static Analysis of Possible Emittance Growth of Intense Charged Particle Beams, *Physics of Plasmas*, 査読有, Vol.16, 2009, 050703

Y.Aoyama, M.Nakajima, K.Horioka, Counter-facing Plasma Focus System as a Repetitive and/or Long-pulse High Energy Density Plasma Source, 査読有, *Physics of Plasmas*, Vol.16, 2009, 1107 (他 11 件)

[学会発表](計 23 件)

堀岡一彦, 河村 徹, 長谷川純, 中島充夫, 小栗慶之, 高山 健, 川田重夫, 菊池崇志, 佐々木徹, 重イオン加速器の高出力化の検討と高エネルギー密度科学への展開, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 27 日

K.Horioka, M.Nakajima, T.Kawamura, et.al., Beam Dynamics Studies in High-flux Ion Injectors and during Longitudinal Bunch Compression for High Power Ion Acceleration, GSI-2011-2, 2010/08/31, Germany

堀岡一彦, 電磁パルスとビーム加熱を用いた実験室宇宙・惑星科学, 日本地球惑星科学連合大会, (招待講演) 2010 年 5 月 26 日, PEM035-15 幕張メッセ

堀岡一彦, 実験室天体物理-高速重イオンによる高温・高密度科学の展開-, 第 42 回放射線科学研究会, (招待講演) 大阪ニュークリアサイエンス協会, 2010 年 7 月 16 日、大阪

K.Horioka, Pulse Power Device as Tools for High Energy Density Science, BEAMS '08, (Invited) Proceedings of 17<sup>th</sup> Int. Conf. High Power Particle Beams, 2008/07/06 ~ /07/11, China, (他 18 件)

[図書](計 2 件)

J.Barnard, K.Horioka, Ion Induction Accelerators, Induction Accelerators, Springer, 2010, 339p, pp.185-213

Y.Oguri, J.Hasegawa, K.Horioka,

S.Kawata, Ed., Proceedings of 17<sup>th</sup> Symposium on Heavy Ion Inertial Fusion, Vol.606, Issues 1-2, 2009, 1-231

[産業財産権]

出願状況(計 2 件)

名称: プラズマ光源とプラズマ光発生方法

発明者: 堀岡一彦, 桑原 一

権利者: 国立大学法人東京工業大学

番号: 特願 2008-322526

出願年月日: 2008 年 12 月 18 日

国内外の別: 国内

名称: プラズマ光源とプラズマ光発生方法

発明者: 堀岡一彦, 桑原 一

権利者: 国立大学法人東京工業大学

種類: PCT/JP2009/070403

番号: 特願 2008-322526

出願年月日: 2009 年 12 月 4 日

国内外の別: 外国

[その他]

ホームページ等

[http://t2r2.star.titech.ac.jp/cgi-bin/researcherpublicationlist.cgi?q\\_researcher\\_content\\_number=CTT100381272](http://t2r2.star.titech.ac.jp/cgi-bin/researcherpublicationlist.cgi?q_researcher_content_number=CTT100381272)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀岡一彦 (HORIOKA KAZUHIKO)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号: 10126328

(2) 研究分担者

河村 徹 (KAWAMURA TOHRU)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・講師

研究者番号: 10370214

中島充夫 (NAKAJIMA MITSUO)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・助教

研究者番号: 30198098

川田重夫 (KAWATA SHIGE0)

宇都宮大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 30150296

(3) 連携研究者

菊池崇志 (KIKUCHI TAKASHI)

長岡技術科学大学

准教授

研究者番号: 30375521

高山 健 (TKAYAMA KEN)

高エネルギー加速器研究機構

教授

研究者番号: 20163321

(4) 研究協力者

佐々木 徹 (SASAKI TORU)

長岡技術科学大学

助教

研究者番号: 90514018