

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23740406

研究課題名（和文）

低温・高密度プラズマ中の輸送特性解明に向けた直接 AC-DC 導電率計測法の開発

研究課題名（英文） Measurement Method of AC-DC Electrical Conductivity toward Understanding Transport Properties in Warm Dense Matter

研究代表者

佐々木 徹 (SASAKI TORU)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：90514018

研究成果の概要（和文）：低温・高密度プラズマは、固体やプラズマと異なる特性を持つため、その輸送特性の解明が必要不可欠である。本研究課題は、低温・高密度プラズマの特性の一つである電気伝導度に着目し、直流及び可視光領域の交流導電率を定量的に評価するため、定積パルスパワー放電法を用いた導電率の直接計測法の構築を行った。従来の導電率モデルや過去に実施された電気伝導率の結果を比較すると、本装置で得られる直流導電率は銅の場合にはおおよそ一致していたが、金の場合には従来のモデルと異なることが明らかとなった。また、可視光領域の導電率を評価するために、エリプソメトリックな計測システムの構築を行い、低温・高密度プラズマの偏光状態を評価した。

研究成果の概要（英文）：Electrical conductivity in warm dense state have been evaluated by pulsed-power discharge with isochoric heating, in which has been realized by metallic foam filled in a sapphire capillary. The electrical conductivity and the internal energy of warm dense gold in several densities have been estimated by the voltage and current waveforms, directly. The results indicated that the electrical conductivity in a region of several MJ/kg of internal energy is estimated to be $10^4\sim 10^5$ S/m. It indicated that the density dependence of the electrical conductivity in warm dense gold evaluated by the pulsed-power discharge with isochoric heating was different behavior compared to the exploding wire in water. We have also demonstrated the spectroscopic ellipsometry for evaluating AC electrical conductivity for warm dense copper.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ理工学

キーワード：Warm Dense Matter, 電気伝導率, パルスパワー放電, 定積加熱放電法

1. 研究開始当初の背景

固体の性質とプラズマの性質を併せ持った低温($0.1\text{eV}\sim 10\text{eV}$)・高密度プラズマ($0.001\rho_s\sim \rho_s$ ： ρ_s は固体密度)の一種である Warm Dense Matter は、木星や土星などの巨大惑星の内部や慣性核融合の燃料標的などで形成される。Warm Dense Matter 領域の状態

方程式や輸送特性を明らかにする事で、高エネルギー密度現象が寄与する様々な問題を明らかにする事ができる。しかしながら、Warm Dense Matter 領域は、原子が集団としての振る舞う性質(金属的)とプラズマとして振る舞う性質をもつ中間領域の状態であるため、状態方程式や輸送係数を既存のモデルで表現するための実験的データ量も乏し

く、定量的に依存性を示すことができる理論モデルを構築する事が困難であった。そのため、Warm Dense Matter 領域の物性を明らかにするために、

- (1) Warm Dense Matter 状態の生成手法
- (2) Warm Dense Matter 状態の診断手法 (状態方程式、輸送係数、電離度など)
- (3) 理論的取り扱い (Warm Dense Matter の状態方程式、輸送係数の定式化)

を中心に検討が進められて来た。しかしながら、ごく一部の領域にのみ適用可能な Warm Dense Matter の輸送特性を記述するモデルは存在するものの、幅広い温度-密度領域にわたって輸送特性を記述できる有力な物理モデルを構築することができていない。そのため、Warm Dense Matter 領域の輸送特性のモデル構築を行うために、Warm Dense Matter の自由電子の挙動について評価する手法が必要である。

2. 研究の目的

低温・高密度プラズマである Warm Dense Matter の輸送特性を明らかにするためには、輸送特性を支配する高密度プラズマ中の自由電子の定量的な評価法の確立が必要である。プラズマ中の自由電子を定量的に計測するため、パルスパワー放電を用いた定積加熱法により、交流(可視光)-直流導電率の同時計測方法を構築し、低温・高密度プラズマ中での電子衝突時間と有効電荷を同時に計測する手法を確立することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

発泡金属とサファイアキャピラリーを用いた Warm Dense Matter 発生装置により、銅及び金の導電率計測を行った。図1に実験装置の概念図を示す。図1に示す通り、Warm Dense Matter 発生装置は、1つ当たり $2 \mu\text{F}$ の低インダクタンスなコンデンサを6つ並列接続し、ギャップスイッチを介して放電を行う。放電負荷にはサファイアキャピラリーに封入した発泡金属とし、発泡金属の直径 $\phi = 5 \text{ mm}$ 、長さ $l = 10 \text{ mm}$ としている。負荷部はインダクタンスの影響を極力排除し、比較的短い放電周期で放電を行うため、同軸形状としてある。また、実験に使用した発泡金属の気孔径は数 $10 \sim$ 数 $100 \mu\text{m}$ 、気孔率は 90% 程度となっており、材料には金を用いている。なお、発泡金属の封入量については実験毎に電子天秤により計測を行い、質量 m を決定している。また、サファイアキャピラリーは、内径 $\phi = 5 \text{ mm}$ 、外径 $\phi = 8 \text{ mm}$ のものを用いており、放電の時間スケールでは破壊が起きないように設計してある。負荷が設置されているチャンバーは、ロータリーポンプとターボ分子ポンプによって 10^{-2} Pa 程度の真空状態となるようにし、負荷以外の電流パスを極

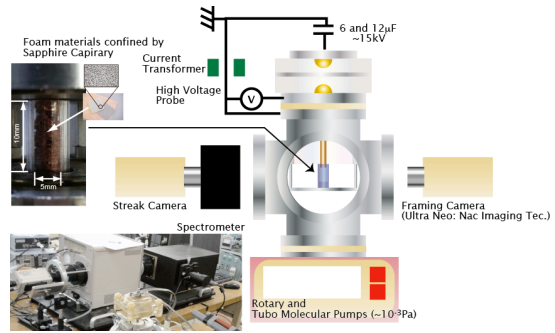


図1 定積パルスパワー放電実験装置

力抑えるようにしている。また、発光分光計測にはストリークカメラに分光器をマウントして可視領域の時間分解計測を行っている。この分光器の波長分解能は、水銀ランプで校正した結果およそ 4 nm 程度である。また、分光装置全体の装置関数は、標準光源によって校正を行っている。また、発泡金属プラズマの挙動の評価のためにフレーミングカメラにより計測を行った。

発泡金属プラズマの導電率計測を行うためには、正確な電圧-電流計測が必要不可欠である。回路中を流れる電流 $I(t)$ は、カレントトランスフォーマーによって校正したログスキーコイルによって計測を行っている。また、実際に発泡金属プラズマへ印加される電圧 $V_{\text{Foam}}(t)$ を計測するために、負荷側のギャップ - GND 間の電圧 $V_{\text{SG}}(t)$ と負荷終端部 - GND 間 $V_{\text{LG}}(t)$ の電圧を計測し、同軸部の電位については短絡試験により回路インダクタンス L を求め、それにより $V_{\text{Foam}}(t)$ の補正を行っている。これらにより発泡金属プラズマの導電率 $\sigma(t)$ は、サファイアキャピラリーに閉じ込められているため、負荷の断面積 $S = \pi r_p^2$ (r_p : 発泡金属プラズマの半径) 及び長さ l から $\sigma(t) = I(t) / \pi r_p^2 V_{\text{Foam}}(t)$ であたえられる。また、発泡金属プラズマに投入されたエネルギー $E(t)$ は、電圧 $V_{\text{Foam}}(t)$ と $I(t)$ によって求められ、発泡金属プラズマの内部エネルギー $e(t)$ は、発泡金属プラズマに投入されたエネルギー $E(t)$ からサファイアキャピラリ

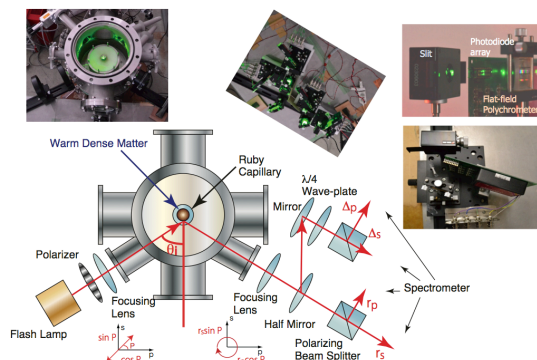


図2 分光エリプソメトリー装置による可視導電率計測系の概念図

一内に封入した発泡金属の封入質量 m で除したのから見積もる事が出来る。

また、可視光の導電率を計測するため、分光エリプソメトリーにより評価を行った。図2に実験装置の概念図を示す。分光エリプソメトリー法は反射計測法で、一般的には固体物性計測に利用されている。一方、本研究で生成する Warm Dense Matter は、固体物性計測と比較して寿命が短いため、短時間で時間分解計測できるように(1)非常に強い光源、(2)高速応答する分光器、(3)それらを収集するデータロギングシステムの構築が必要である。

非常に強い光源を実現するために、高压ガスを封入したパルス白色光源(Flash Lamp)を構築し、ブロードな発光スペクトルが得られることを確認した。また、Warm Dense Matter から得られる発光は比較的灰色体の発光スペクトルを有するため、感度よりも応答性に特化した分光器が必要である。一般的に ICCD と分光器を用いても構築可能であるが、データ評価が平易となるよう高速な 4ch フォトダイオードアレイと平面結像型回折格子によって構築した高速応答する分光器を構築した。構築した分光器の応答特性はおよそ 10MHz 程度であることが明らかとなり、本研究で発生させる Warm Dense Matter の時間スケールと比べて十分に短い。これにより、汎用的なデータロガーシステムを用いて 4ch x 4 を直接時間分解計測できる。入射光角度と反射光計測角を 60 度とし、エリプソパラメータの計測を行った。

4. 研究成果

本放電装置によって定積加熱が実現できていることを確認するため、フレーミングカメラによって、発泡金属プラズマの発光の時

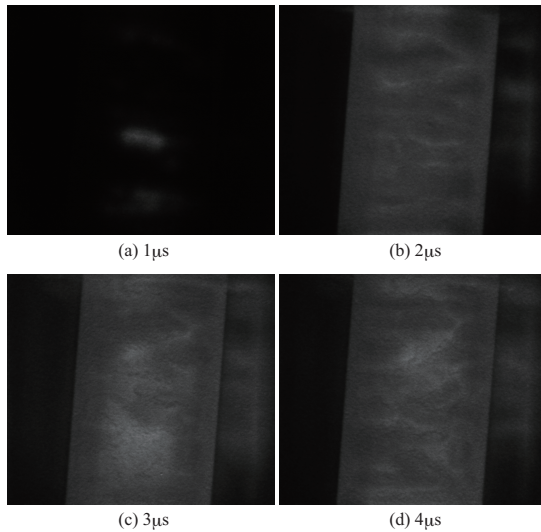


図 5 定積パルスパワー放電法によって生成された Warm Dense Matter の発光の時間変化。キャプションは放電後の時刻を示す。

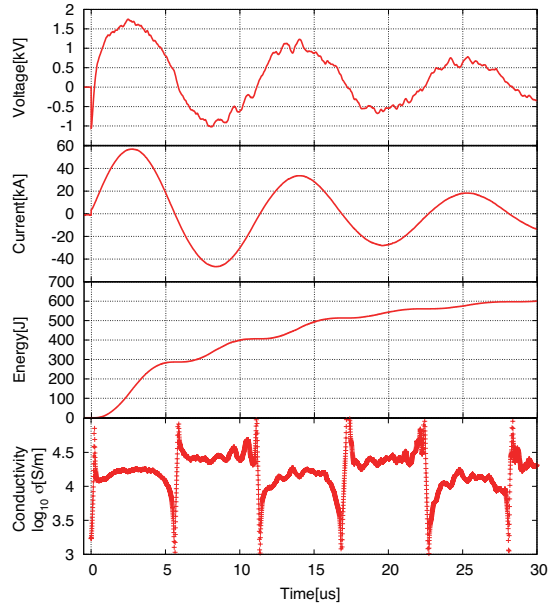


図 3 典型的な電圧-電流波形及びそれらから求められる投入エネルギーの時間変化及び導電率の時間変化

間変化を計測した。図3は、フレーミングカメラによって空間分布を撮影したものである。発光の時間変化を見ると放電初期である 1 μs では、局所的な発光が見られるものの、時間経過に従って発光分布が均一になり、プラズマが空間的に均一に閉じ込められているといえる。そのため、本装置によって Warm Dense Matter を計測している時間スケールでは、ほぼ密度・温度が一樣なプラズマが出来ていることを示唆している。また、発泡金属の表皮効果を実験的に無視できることも明らかとなっている。

図4に銅の発泡金属を定積パルスパワー放電法により加熱したときの典型的な電圧-電

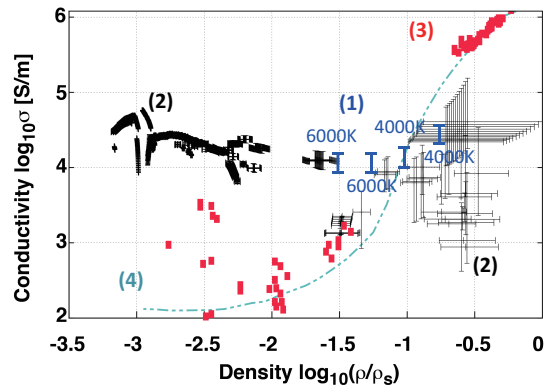


図 4 温度 $5000 \pm 500 \text{ K}$ における銅の導電率の密度依存性(1)本研究で得られた導電率、(2),(3)水中細線放電法によって得られた導電率、(4)Lee-More-Desjarlais の導電率モデル。

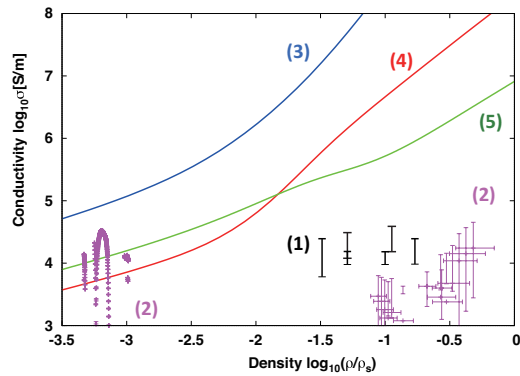


図 6 温度 5000 ± 500 K における金プラズマの導電率の密度依存性。(1)本実験により得られた導電率, (2)水中細線放電法によって得られた導電率, (3)-(5) Spitzer, Lee-More, Ichimaru の導電率モデル

流波形及びそれらから求められる投入エネルギーの時間変化及び導電率の時間変化を示す。放電周期はおよそ $T = 11 \mu\text{s}$ であり, ピーク電圧及びピーク電流はそれぞれ 2 kV, 60 kA となっている。また, 入力エネルギーは, $30 \mu\text{s}$ までで 600 J 投入されている。図 4 の導電率の時間変化は, およそ $10^4 \sim 10^5$ S/m 近傍で停滞している様子が見て取れる。なお, 時刻 $6 \mu\text{s}$, $11 \mu\text{s}$ 等の導電率の急峻な変化は, 本装置が交番電流を流している際に電流が零となる事が原因でおこっているものであり, 物理的な意味を持たない。

図 5 は, 温度 5000 ± 500 K における銅プラズマの導電率の密度依存性を示している。

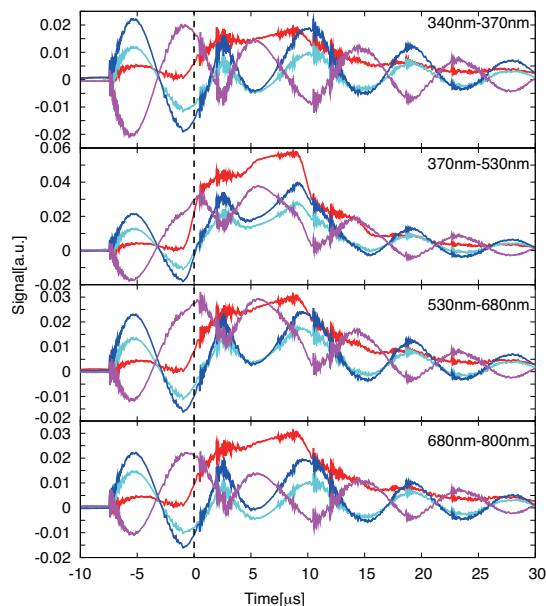


図 7 密度 $0.1\rho_s$ の銅プラズマの可視光領域の偏光パラメータの時間変化(赤 : s 偏光, 水色 : p 偏光, 青 : s 偏光位相, 紫 : p 偏光位相)

比較のために, 過去の水中細線放電法により得られている導電率の計測結果及び Lee-More-Desjarlais の導電率モデルを示す。この結果より, 本装置で得られた導電率の結果は従来の導電率計測結果とおおよそ一致していることが分かる。

図 6 は, 5000 ± 500 K における金の導電率の密度依存性を示している。同様に比較のため, 水中細線放電法によって観測した温度 5000 K の導電率及び, Spitzer, Lee-More, Ichimaru の導電率モデルも合わせて示している。図 6 より, 本研究によって得られた金の導電率の密度依存性は既存の理論評価の結果と一致しないことが明らかとなった。また水中細線放電による過去の実験結果に対して $0.1\rho_s$ (図中 $\log_{10}(\rho/\rho_s) = -1$) 以上の密度において約 10 倍の導電率の値が得られた。また, 従来の結果では, 金の低密度領域において絶縁体への転移が起こることが指摘されていたが, 本研究結果では, 10^4 S/m 程度の導電率であることが確認され, この領域に対して他の手法を用いて評価する必要があると考えられる。

図 7 は, 高圧パルス放電光によって分光エリプソメトリーを行った結果を示す。時刻 0 から Warm Dense Matter の生成が始まり, そのときの s 偏光, p 偏光, 及び s 偏光位相差, p 偏光位相差の計測を行っている。この結果より, Warm Dense Matter 状態の交流導電率の解析ができており, これらを詳細に解析することで, 交流導電率の波長依存性を明らかにすることができる。

これらの結果より, 定積パルスパワー放電法による低温・高密度プラズマ発生法と分光エリプソメトリーを組み合わせることで, 直接直流及び交流導電率を計測することができることを明らかにした。一方, 現在得られている結果では, 自発光由来の発光量が強く短波長領域のエリプソパラメータの S/N が悪いので十分な評価が行えていない。今後の課題として, 短波長領域を解析可能な光源開発及びこのエリプソパラメータを詳細に解析することで, 低温・高密度プラズマ領域の自由電子の挙動を定量的に評価することが重要である。これにより, 境界領域の物性である低温・高密度プラズマ中での電子衝突時間と有効電荷を同時に計測し, その物理モデルが構築できると考えられる。

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 5 件)

1. Toru Sasaki, Yasutoshi Miki, Fumitaka Tachinami, Hiroataka Saito, Takuya Takahashi, Nobuyuki Anzai, Takashi

- Kikuchi, Tsukasa Aso, and Nob. Harada, "Warm Dense Matter Study and Pulsed-power Developments for X-pinch Equipment in Nagaoka University of Technology", accepted for Nuclear Instruments and Methods Physics Research section A. (査読有り)
2. Yasutoshi Miki, Hirotaka Saito, Takuya Takahashi, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi, and Nob. Harada, "Evaluation of Transport Properties of Warm Dense Matter using Isochoric Pulsed-power Discharges", accepted for Nuclear Instruments and Methods Physics Research section A. (査読有り)
 3. Toru Sasaki, Takuya Takahashi, Yusuke Amano, Yasutoshi Miki, Takashi Kikuchi, Nobuhiro Harada, and Kazuhiko Horioka, "A semi-empirical evaluation of the thermal conductivity in ablated dense tungsten plasma", IEEE Transactions on Plasma Science, **40**, pp. 3455 – 3467 (2012). (査読有り)
 4. Yusuke Amano, Yasutoshi Miki, Takuya Takahashi, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi, and Nob. Harada, "Isochoric heating of foamed metal using pulsed power discharge as a making technique of warm dense matter", Review of Scientific Instruments, **83**, pp. 085107-1 - 085107-4 (2012) (査読有り)
 5. Toru Sasaki, Tsuneo Suzuki, Yusuke Amano, Yasunori Miki, Takashi Kikuchi, Nob. Harada and Kazuhiko Horioka, "Evaluation of Electrical Conductivity in Warm Dense State using Pulsed-power Discharges", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, **21**, pp. 012016-1- 012016-4 (2011)(査読有り)
- [学会発表] (計 25 件)
1. 佐々木徹, 三木康稔, 齋藤弘隆, 高橋拓也, 林亮太, 菊池崇志, 阿蘇司, 原田信弘, 「剛体キャピラリーを用いた Warm Dense Matter 計測法の検討」, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 28 日, 広島大学 (広島県)
 2. 菊池崇志, 齋藤弘隆, 三木康稔, 林亮太, 高橋拓也, 佐々木徹, 阿蘇司, 原田信弘, 「パルスパワー放電によって生成された Warm Dense Matter の熱力学・光学特性評価のための数値解析」, 2012 年度 核融合科学研究所研究会「パルスパワー技術による高エネルギー密度プラズマ」, 2013 年 1 月 10 日, 核融合科学研究所 (岐阜県)
 3. 佐々木徹, 高橋拓也, 菊池崇志, 阿蘇司, 原田信弘, 「ルビー細管定積加熱放電によ
- る高密度タングステンプラズマの熱伝導率計測法の検討」, プラズマ・核融合学会第 29 回年会, 2012 年 11 月 28 日, クローバープラザ (福岡県)
4. 三木康稔, 齋藤弘隆, 佐々木徹, 菊池崇志, 阿蘇司, 原田信弘, 「サファイアキャピラリーを用いた定積パルス加熱放電による Warm Dense Matter の導電率評価」, プラズマ・核融合学会第 29 回年会, 2012 年 11 月 28 日, クローバープラザ (福岡県)
 5. Hirotaka Saito, Yasutoshi Miki, Takuya Takahashi, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi, Tsukasa Aso, and Nob. Harada, "Study on Optical Properties for Warm Dense Matter Generating by Pulsed-Power Discharge Device", The 11th APCPST (Asia Pacific Conference on Plasma Science and Technology) and 25th SPSM (Symposium on Plasma Science for Materials), 2012 年 10 月 2 日, 京都大学ローム会館 (京都府)
 6. Takuya Takahashi, Yasutoshi Miki, Toru Sasaki, Takashi Kikuchi, Tsukasa Aso, and Nob. Harada, "Transport Properties of Tungsten Plasma used as Divertor of Fusion Reactor", The 11th APCPST (Asia Pacific Conference on Plasma Science and Technology) and 25th SPSM (Symposium on Plasma Science for Materials), 2012 年 10 月 2 日, 京都大学ローム会館 (京都府)
 7. T. Kikuchi, Y. Miki, H. Saito, R. Hayashi, T. Takahashi, T. Sasaki, T. Aso, and Nob. Harada, "Numerical Study on Measurement of Optical and Thermal Properties for Warm Dense Matter Generated by Pulsed Power Discharge Device", 4th Euro-Asian Pulsed Power Conference and the 19th International Conference on High-Power Particle Beams, 2012 年 9 月 30 日, Karlsruhe (Germany)
 8. R. Hayashi, K. Kashine, T. Sasaki, T. Aso, T. Kikuchi, A. Tokuchi, W. Jiang, and Nob. Harada, "Study on Measurement for Solid-Plasma Transition Process of Foamed Metal using Intense Pulse Power Generator ETIGO-II", 4th Euro-Asian Pulsed Power Conference and the 19th International Conference on High-Power Particle Beams, 2012 年 9 月 30 日, Karlsruhe (Germany)
 9. T. Sasaki, Y. Miki, F. Tachinami, T. Takahashi, N. Anzai, T. Kikuchi, and Nob. Harada, "X-pinch Diagnostic for Warm Dense Matter and Pulsed-power Developments in Nagaoka University of Technology", 19th International Symposium on Heavy Ion Inertial Fusion, 2012 年 8 月 17 日, Hotel Shattuck Plaza, Berkeley (USA)
 10. Yasutoshi Miki, Hirotaka Saito, Takuya

- Takahashi, Toru, Sasaki, Takashi, Kikuchi, and Nob. Harada, "Evaluation of Transport Properties in Warm Dense State by using Isochoric Pulsed-power Discharge", 19th International Symposium on Heavy Ion Inertial Fusion, 2012年8月13日, Hotel Shattuck Plaza, Berkeley (USA)
11. 齋藤弘隆, 佐々木徹, 菊池崇志, 原田信弘, 「パルスパワー放電装置実験と数値解析を用いた Warm Dense Matter の光学的特性評価の検討」, 第9回核融合エネルギー連合講演会, 2012年6月28日, 神戸国際会議場 (兵庫県)
 12. 三木康稔, 高橋拓也, 佐々木徹, 菊池崇志, 原田信弘, 「サファイアキャピラリーを用いたパルスパワー放電による Warm Dense Matter の導電率計測」, 第9回核融合エネルギー連合講演会, 2012年6月29日, 神戸国際会議場 (兵庫県)
 13. 佐々木徹, 高橋拓也, 三木康稔, 菊池崇志, 原田信弘, 堀岡一彦, 「パルスパワー放電による高密度タングステンプラズマの熱伝導率計測法の検討」, 第9回核融合エネルギー連合講演会, 2012年6月29日, 神戸国際会議場 (兵庫県)
 14. 佐々木徹, 稲垣領太, 高橋拓也, 菊池崇志, 原田信弘, 「パルスパワー装置を利用した高エネルギー密度プラズマ実験とその応用」, 平成23年度核融合科学研究所研究会「パルスパワー生成プラズマの物理とその応用」, 2012年3月28日, 核融合科学研究所 (岐阜県)
 15. 三木康稔, 天野祐介, 佐々木徹, 菊池崇志, 原田信弘, 「パルスパワー放電定積加熱による金と銅の Warm Dense Matter 生成と電気伝導率の評価」, 平成23年度核融合科学研究所研究会「パルスパワー生成プラズマの物理とその応用」, 2012年3月28日, 核融合科学研究所 (岐阜県)
 16. 三木康稔, 天野祐介, 高橋拓也, 佐々木徹, 菊池崇志, 原田信弘, 「パルスパワー放電定積加熱による発泡金属の Warm Dense Matter の生成と電気伝導率の特性評価」, 日本物理学会第67回年次大会, 2012年3月27日, 関西学院大学 (兵庫県)
 17. 佐々木徹, 高橋拓也, 天野祐介, 三木康稔, 菊池崇志, 原田信弘, 堀岡一彦, 「パルスパワー装置によるディスラプション時の高密度タングステンの熱伝導率の検討」, 日本物理学会第67回年次大会, 2012年3月27日, 関西学院大学 (兵庫県)
 18. 佐々木徹, 天野祐介, 三木康稔, 高橋拓也, 菊池崇志, 原田信弘, 「発泡金属を利用したパルスパワー駆動定積 Warm Dense Matter の導電率の内部エネルギー依存性」, 電気学会 パルスパワー研究会, 2012年3月9日, 熊本大学 (熊本県)
 19. 天野祐介, 三木康稔, 高橋拓也, 佐々木徹, 菊池崇志, 原田信弘, 「パルスパワー駆動定積 Warm Dense Matter の導電率評価法」, Plasma Conference 2011 (Plasma2011), 2012年11月23日, 石川県公会堂 (石川県)
 20. 佐々木徹, 高橋拓也, 天野祐介, 三木康稔, 菊池崇志, 原田信弘, 堀岡一彦, 「ダイバータの熱輸送特性評価に向けた高密度タングステンプラズマの熱伝導率解析」 Plasma Conference 2011 (Plasma2011), 2012年11月24日, 石川県公会堂 (石川県)
 21. 三木康稔, 天野祐介, 高橋拓也, 佐々木徹, 菊池崇志, 原田信弘, 「発泡金属パルスパワー放電定積加熱による金の Warm Dense Matter の生成と導電率の密度依存性」, 電気学会新潟支所大会, 2011年11月23日, 長岡技術科学大学 (新潟県)
 22. 三木康稔, 天野祐介, 高橋拓也, 佐々木徹, 菊池崇志, 原田信弘, 「発泡金属のパルスパワー放電定積加熱による Warm Dense Matter の導電率評価」, 電気学会 A 部門大会, 2011年9月21日, 東京工業大学 (東京都)
 23. 佐々木徹, 高橋拓也, 天野祐介, 三木康稔, 菊池崇志, 原田信弘, 「高密度タングステンプラズマの生成と輸送特性の半実験的計測法の検討」, 電気学会 A 部門大会, 2011年9月22日, 東京工業大学 (東京都)
 24. Y. Amano, Y. Miki, T. Takahashi, T. Sasaki, T. Kikuchi, and N. Harada, "Evaluation of electrical conductivity for copper foam / plasma using isochoric pulsed-power discharges", The Seventh Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA 2011), 2011年9月, Palais des Congrès de Bordeaux-Lac (France)
 25. 天野祐介, 三木康稔, 高橋拓也, 佐々木徹, 菊池崇志, 原田信弘, 「定積パルスパワー放電による発泡金属プラズマの導電率計測」, 電気学会プラズマ研究会, 2011年5月27日, 富山大学 (富山県)
6. 研究組織
(1) 研究代表者
佐々木 徹 (SASAKI TORU)
長岡技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号：90514018