

平成 21 年 6 月 23 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006 年度～2008 年度
 課題番号：18360141
 研究課題名（和文） レーザ誘雷における長尺レーザプラズマチャンネルによる放電制御に関する研究
 研究課題名（英文） Discharge control using by long-laser-plasma-channel for laser triggered lightning
 研究代表者
 島田 義則（SHIMADA YOSHINORI）
 財団法人レーザー技術総合研究所・レーザー加工計測研究チーム・副主任研究員
 研究者番号：80250091

研究成果の概要：レーザプラズマチャンネルを用いて放電をガイドすることやプラズマチャンネルから放射されるマイクロ波を用いて地中に埋設されている金属片の探査の基礎実験を行った。大気中に生成されるプラズマの密度は約 10^{17}cm^{-3} で電子温度は 1.0 eV であった。計測された負ストリーマの進展速度はおよそ 10^6 m/s である。ポッケルス電界計で測定したストリーマ先端付近の電界は約 2.3 MV/m であった。マイクロ波を用いて埋設物の探査が可能である結果を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2007 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
総計	6,500,000	1,950,000	8,450,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力・電気機器工学

キーワード：レーザプラズマ、レーザプラズマ放射マイクロ波、ストリーマ、プラズマ温度・密度

1. 研究開始当初の背景

レーザ誘雷の概念は、強力なレーザをミラーにより集光して長尺のレーザプラズマを生成することにより雷をガイドし、最終的に雷と地上とが短絡されることにより雷の電荷を中和する技術である。

当研究所では日本海側の冬季雷を研究対象として、レーザ誘雷野外実験を行い、CO₂ レーザ光を照射して、世界で始めてレーザ誘雷に成功した。しかし、CO₂ レーザ装置で生成されるレーザプラズマ長は、まだ十分な長さではなく、雷をトリガできる確率は低い。そのため確実に雷をトリガさせるためには、放電をガイドするためレーザ生成プラズマの条件を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、(1) レーザプラズマの時間的变化、プラズマ中を進展するストリーマの詳細な動き、ガイド可能なプラズマの寿命等を測定し、プラズマ（密度の高い空間電荷）が存在する場合のストリーマの進展過程の把握。(2) 新しい電界計測器（位相共役鏡と電気光学結晶を用いる）の開発。(3) 長尺プラズマチャンネル生成とプラズマチャンネルによる放電制御の実験を行い、レーザプラズマ（制御された空間電荷）が存在する場合の放電解明と放電制御技術を確立する。

また、プラズマチャンネルから放出されるマイクロ波を用いて埋設物の探査を行う基

礎実験を行う。

3. 研究の方法

大気中に生成したプラズマチャンネルの温度密度を計測することがどのようなプラズマで放電制御を行うかを考察する上で重要なパラメータである。プラズマ温度密度を計測するに先立ち、スチロール板上にレーザーをシリンドリカルレンズを用いて集光し、固体を起源とするプラズマプラズマチャンネルを生成した。レーザー波長は $1 \mu\text{m}$ 、パルス幅 10 ns 、レーザーエネルギー 19 J/Pulse で実験を行った。長さ 10 cm のプラズマチャンネルを生成させ、分光器により発光スペクトルを計測することにより温度密度計測を行った。 $\text{H}\alpha$ ライン (656 nm) のシュタルク広がりを用いて温度を算出した。実験配置を図1に示す。

次に、ラングミュラープローブを用いたプラズマの導電率計測の実験配置を図2に示す。

また、ストリーマの進展速度および先端電界を計測するために図3のような実験配置で、ストリークカメラおよびポッケルス電界計を用いて計測を行った。

4. 研究成果

図1の実験配置を用いて得られた放射スペクトルを図4に示す。シュタルク広がり約 5 nm で、電子密度は約 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ であった。また、酸素のラインスペクトル比より算出した電子温度は 1.4 eV であった。

また、大気中に生成したプラズマチャンネルの温度密度計測を行った。大気中に生成さ

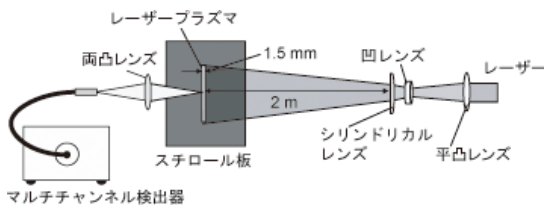


図1 プラズマチャンネルの温度密度計測実験配置

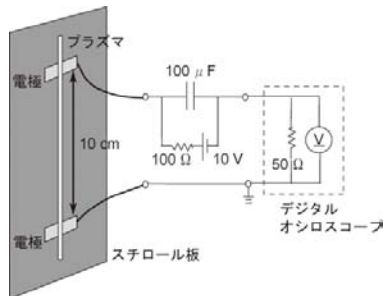


図2 ラングミュラープローブを用いたプラズマの導電率計測

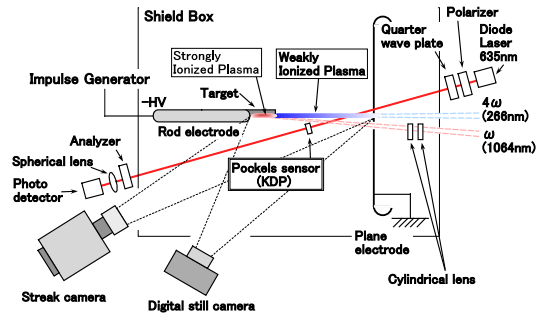


図3 ハイブリッド放電実験配置図

れるプラズマは大気中のダストなどが起源となる。このため生成されるプラズマの位置はショット毎に変化する。また、ダストの直径に依存してプラズマ発光量が変化する。この実験では 10 ショットの平均を持ってプラズマの温度密度を算出した。シュタルク広がり 2 nm であり、電子密度は約 10^{17} cm^{-3} であった。また、酸素のラインスペクトル比より算出した電子温度は 1.0 eV であった。予想通り、固体からのプラズマが大気中のプラズマより温度、密度とも高くなった。

ラングミュラープローブを用いたプラズマ導電率計測の結果を図5に示す。得られた電流値とレーザープラズマの寸法(長さ: 10 cm 、直径: 1 mm 、厚み: 1 mm)から、寸法内のプラズマが均質であると見なして、その導電率を見積もった。横軸は時間 [μs] で、縦軸は導電率 [S (Siemens) / m] を示す。同じ条件で3回の計測を行い、その標準偏差を図中のエラーバーで示した。 $t=0$ 秒にレーザープラズマが生成され、導電率が約 $3,500 \text{ S/m}$ まで上昇した後、時間の経過とともに減少していった。このときの減衰時定数は約 $2 \mu\text{s}$ であった。

$3,500 \text{ S/m}$ という導電率は、半導体 ($10^6 \sim 10^8 \text{ S/m}$) に分類され、アンテナや導波路といった通信コンポーネントとして性能を発揮するには抵抗が大きい。(例えば、良くアンテナや導波路の材料として利用される銅は $6.5 \times 10^7 \text{ S/m}$ 、高抵抗とされるニクロム線でも $9.3 \times 10^5 \text{ S/m}$)。

レーザープラズマチャンネルに沿って誘導されたストリーマの電界を測定するために、新しく KDP 結晶を削りだし、研磨を行って測定できる装置とした。

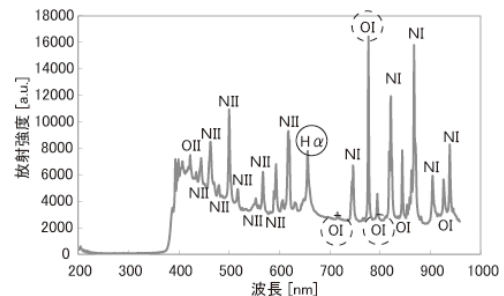


図4 レーザプラズマからの放射スペクトル

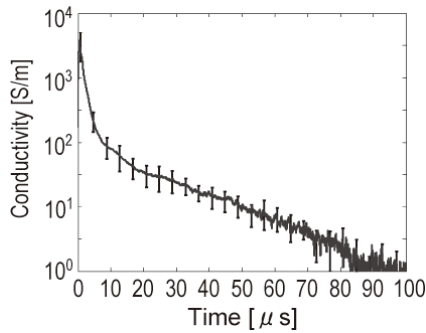


図5 プラズマの導電率の時間発展

また、放電の進展様子をストリークカメラを用いて観測した。図6はレーザで生成した初期弱電離プラズマ密度の変化に対するストリーマの進展速度の変化である。平板電極付近の初期外部静電界強度は電荷重畳法を用いて算出した。図より各電界強度において密度の増加とともにストリーマの進展速度が線形的に増加する。実験結果から速度は $5 \times 10^6 \sim 10^7$ m/s である。自然放電に於ける負ストリーマ速度はおよそ 10^6 m/s である。今回測定した弱電離プラズマチャンネル中を進展するストリーマは1桁程度速い速度である。

各放電で興味深い現象が観測された。その一例として下記に述べる。図7は、放電路写真からは放電路に沿った放電がガイドされ、その後、ストリーマの進展過程がステップ（階段）状となる。図8は、棒電極から進展してきたストリーマが平板電極に至る直前付近で、平板電極から正極性ストリーマの進展していることが分かる。

次に、ポッケルス電界計を用いてストリーマ先端の電界を計測した。図9にポッケルス電界計で得られた値を示す。横軸はプラズマチャンネル中心からのポッケルス結晶までの距離 y を示す。ポッケルス電界計を y 軸に沿って 22.0、17.0、8.0、2.0、0.8、0.5 cm と近づけて電界計測を行なった。近づけていくにつれて電界は大きくなる。特に 2.0 cm から 0.8 cm の間で約 500 kV/m から約 2 MV/m

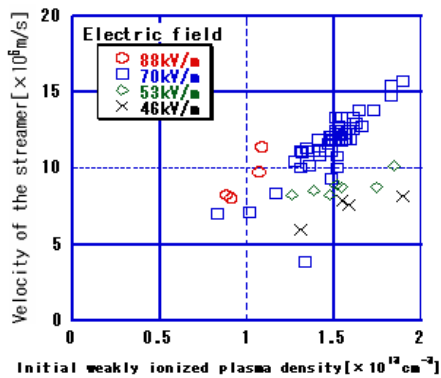


図6 初期プラズマ密度に対するストリーマ進展速度特性

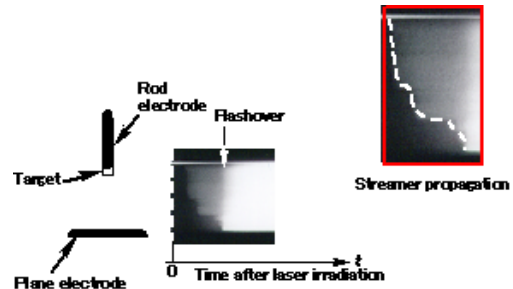


図7 ステップ状のストリーマ進展

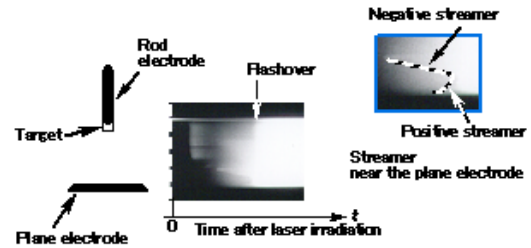


図8 平板電極より正ストリーマが進展

へと電界の増加が顕著である。ポッケルス電界計の位置を 0.5 cm とした場合、計算ではかなり大きな電界の増加が予想されるが、図の拡大図から分かるとおり、0.8 cm の位置での電界からの変化はそれほど見られず、飽和する傾向が見られた。自然放電におけるストリーマ半径は数 10~数 100 μ m 程度と言われており、前方にはストリーマが進展していくために電離領域（活性領域）があるとされている。実験で得られた $y=0.5 \sim 0.8$ cm はこの領域内に入ったため電界が飽和したと考えられる。この電界は約 2.3 MV/m であり、この位置での弱電離プラズマチャンネル中を進展するストリーマ先端の外部電界と言える。自然放電におけるストリーマ先端の電界に関しては、およそ 3 MV/m という観測結果が得られており、弱電離プラズマチャンネル中を進展するストリーマはより低い先端電界で進展していると考えられる。また、今回の実験条件の棒-平板電極においてポッケルス電界計の観測位置 ($x=50$ cm) におけるプラズマチャンネル中心の初期外部静電界を電荷重畳法により計算すると約 114 kV/m であり、ストリーマ進展によって電界は約 20 倍に増倍されている。

実線はストリーマを 1.0 μ C/m の線電荷と近似し、線電荷密度を電荷重畳法により電界計算した結果である。ポッケルス電界計で得られた結果と一致させた。また、自然放電に於けるストリーマの内部電荷密度はおよそ 10 μ C/m と言われており、弱電離プラズマ中を進展するストリーマがより低い線電荷を持ち進展していると考えられる。

レーザプラズマチャンネルを用いた産業応用として、レーザプラズマから放射されるマイクロ波を計測することにより埋設され

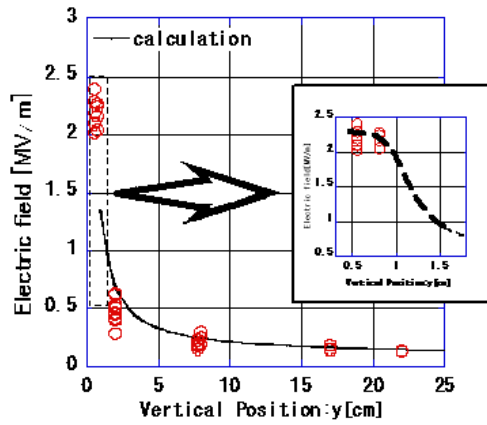


図9 ストリーマ外部電界強度分布

た金属を探索する基礎実験を行った。

スチロール板上にレーザ光をシリンドリカルレンズを用いて集光し、固体を起源とするプラズマプラズマチャンネルを生成した。レーザ波長は1 μm 、パルス幅 10 ns、レーザエネルギー 19 J/Pulseで実験を行った。レーザプラズマからは0.3から2 GHzのマイクロ波が放出された。また、この方向分布はレーザプラズマを軸としてドーナツ状、すなわち代ピール状に放出されていることが判明した。

線状プラズマの長さを変えた時の、放射マイクロ波を計測した。実験配置を図 10 に示す。レーザ(波長:1064 nm、パルス幅:10 ns、レーザエネルギー:40 J/pulse)を、平凸レンズ(集光距離:800 mm)、平凹レンズ(集光距離:-250 mm)、シリンドリカルレンズ(集光距離:50 mm)を通すことで、2 m 離れたスチロール板(厚み:3 mm)上に線状に集光(長さ:30 cm、幅:1 mm、レーザ強度: $1.3 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$)した。線状レーザプラズマは、集光系の前に挿入したアパーチャの開閉により、5, 10, 15, 20 cm と長さを変えた。レーザプラズマから 80 cm 離れたアンテナで、プラズマから放射されるマイクロ波を受信し、低雑音アンプで増幅後、デジタルオシロスコープにて波形を記録した。同じ条件で3回計測を繰り返した。

図 11 にプラズマ長とピーク周波数の関係を示す。横軸がプラズマ長さ[cm]で、縦軸がピーク周波数[GHz]を表している。図中のエラーバーは、計測データの標準偏差を示した。図から、プラズマ長が長くなると、ピーク周波数が低くなっていることが判る。図中の破線は実験の線状プラズマの長さ L_p と、同じ長さのダイポールアンテナの基本共振周波数 $f = c/(2L_p)$ であり、線状プラズマからの放射のピーク周波数と相関が良いことが判る。

線状プラズマと受信アンテナの距離を離していったときの放射マイクロ波の減衰の

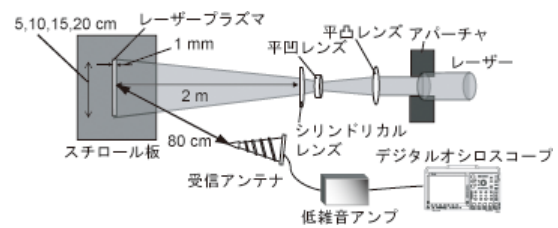


図 10 レーザプラズマからのマイクロ波放射計測実験配置

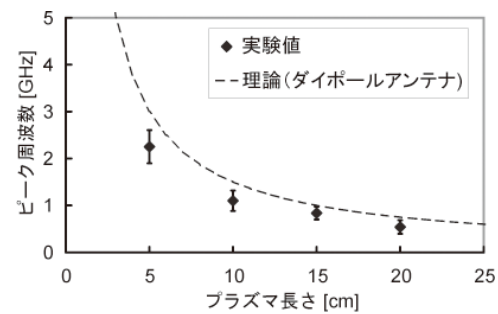


図 11 プラズマ長さと放射マイクロ波のピーク周波数との関係

仕方調べた。スチロール板上に長さ 20 cm の線状レーザプラズマを生成し実験を行った。受信アンテナを、スチロール板に正対させながら、その離隔距離を 30, 60, 90, 120 cm と変えて、放射マイクロ波の強度を同条件で3回ずつ繰り返し計測した。

図 12 にその計測結果を示す。図中横軸が、線状プラズマから受信アンテナまでの距離 [cm]、縦軸が受信電力である。図中の直線は最小二乗法により、計測データにフィッティングされた累乗関数である。これから、放射マイクロ波は距離の二乗に比例して減衰していていることが判る。これはダイポールアンテナからのマイクロ波放射の距離減衰と等しい。

線状プラズマからの放射マイクロ波を利用して、スチロール板で隠されたアルミ円盤を見つける模擬探知実験を行った。スチロール板上に長さ 20 cm の線状レーザプラズマを生成した。集光位置はスキャニングミラーを用いて、縦 5 箇所、横 5 箇所の計 25 箇所に集光した。それぞれの集光点の間隔は 10 cm

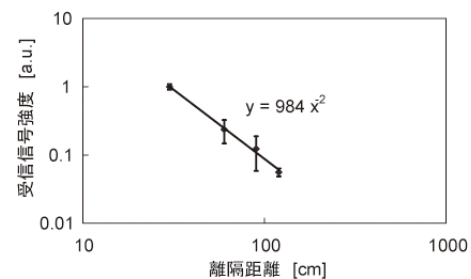


図 12 レーザプラズマ放射マイクロ波の距離減衰の計測結果

とした。プラズマ生成時に放射されるマイクロ波を、90 cm 離れた受信アンテナで受信し、低雑音アンプで増幅した後、デジタルオシロスコープで記録した。スチロール板の裏面に設置したアルミ円盤(直径 15 cm、厚み 9 mm)である。

隠されたアルミ円盤の探知は、近傍に金属導体が存在すると、放射周波数スペクトルが変わるという性質を利用して行った。各集光点で、周波数スペクトルを求め、高周波周数帯域(1~2.5 GHz)での最大値をプロットした。図 13(a)は、アルミ円盤が有る場合で、図 13(b)は、アルミ円盤が無い場合である。図 13(c)、(d)は、図 13(a)、(b)の縦軸を見やすいように、最大-10 dB、最小-30 dB で、256 階調のグレイスケールで表現した物である。図中 X、Y はプラズマを生成した座標[cm]で、縦軸はスペクトル強度[dB]の最大値となっている。アルミ円盤が有る場合、原点座標で-13 dB のピーク値を示しており、これによりスチロール板裏面に取り付けられたアルミ円盤を探知することができた。

照射するレーザーのパルス幅を変化させ、放射されるマイクロ波の周波数の違いを実験的に求めた。パルス幅が短くなるほど発生するマイクロ波の周波数は短くなり、サブナノ秒程度のレーザーパルス幅であると地中探査に最適な 1 GHz 帯の放射が最も良いことを確認した。

次に、探査できる金属の大きさを見積もった。図 14 に埋設する金属片の直径を 7, 15, 26 cm とした場合のエコー強度を示す。この結果より直径 7 cm 程度までは検出できることが判明した。また、図 15 に示すように砂中であれば、深さ 35 cm まで探査は可能であることが分かる。水を含む土壌であるとマイクロ波の減衰が激しく、数 cm 程度が計測限界であると思われる。

マイクロ波の放射メカニズムについても検討を行った。レーザーパルスの立ち上がり、或いは立ち下りの勾配が放射周波数を決定していることがわかった。

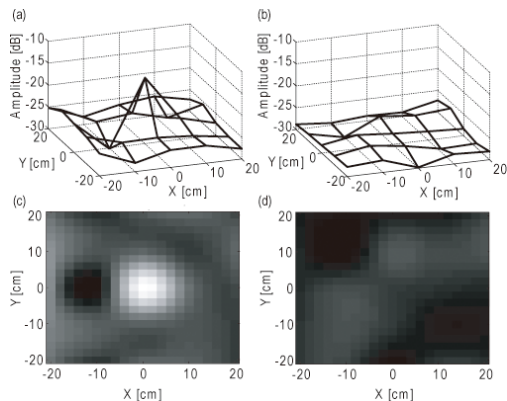


図 13 アルミ円盤探査実験結果

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 7 件)

- ① H. Nakajima, Y. Shimada, T. Somekawa, M. Fujita and K. A. Tanaka, “Nondestructive sensor using microwaves from laser plasma by a sub-nanosecond laser pulses”, IEEE Geosciences and Remote Sensing Letter, accepted (2009).
- ② H. Nakajima, Y. Shimada, T. Somekawa, M. Fujita and K. A. Tanaka, “Nondestructive sensor using microwaves from laser plasma”, Plasma and Fusion Research, 4, 003 (2009).
- ③ H. Nakajima, Y. Shimada, T. Somekawa, M. Fujita, and K. A. Tanaka, “Nondestructive sensor using microwaves from laser plasma”, Institute of Laser Engineering Annual Progress Report 2008, pp.137-138 (2009).
- ④ H. Nakajima, Y. Shimada, and K. A. Tanaka, “Characteristics of microwaves radiation from a line-focused laser plasma column”, Institute of Laser Engineering Annual Progress Report 2007, p.105-106 (2008).

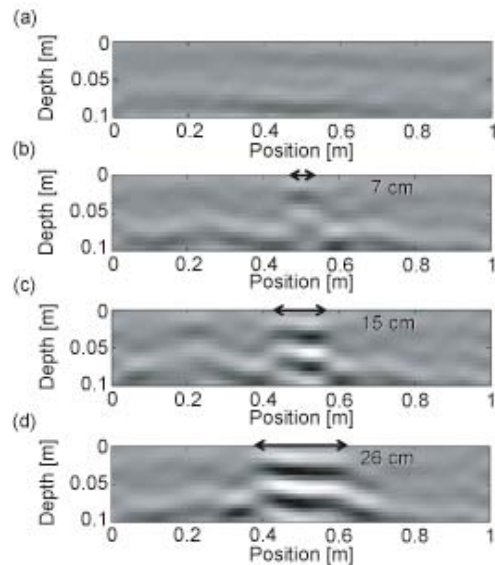


図 14 埋設する金属片の直径を変化させた場合のエコー強度の違い

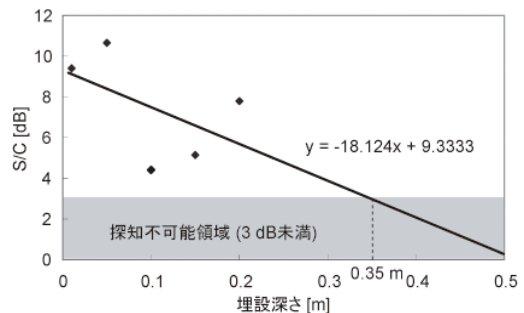


図 15 探知可能深度の評価

- ⑤ H. Nakajima, M. Yamaura, Y. Shimada, M. Fujita, and K. A. Tanaka, "Ground penetrating radar using a microwave radiated from laser-induced plasma", IFSA2007, 112, 42086(2007).
- ⑥ H. Nakajima, K. Hashimoto, M. Yamaura, Y. Shimada, M. Fujita and K. A. Tanaka, "Micro wave propagation via laser plasma channels", Plasma and Fusion Research, 2, 012, (2007).
- ⑦ H. Nakajima, K. Hashimoto, M. Yamaura, Y. Shimada, M. Fujita, and K. A. Tanaka, "The micro wave propagation via laser plasma channels", Institute of Laser Engineering Annual Progress Report 2006, p.99-100 (2007).

[学会発表] (計7件)

- ① 中島弘朋、島田義則、田中和夫、レーザープラズマ放射マイクロ波を利用した埋設物探査技術、レーザー学会学術講演会第29回年次大会、2009年1月、徳島大学
- ② 中島弘朋、島田義則、染川智弘、藤田雅之、田中和夫、サブナノ秒パルスレーザーを利用したレーザー駆動地中探査レーダーの開発、第69回応用物理学会学術講演会、2008年9月、中部大学
- ③ 中島弘朋、山浦道照、島田義則、藤田雅之、田中和夫、線状レーザープラズマから放射されるマイクロ波の特性について、レーザー学会学術講演会第28回年次大会、名古屋国際会議場、2008年2月
- ④ H. Nakajima, Y. Shimada et al, "Ground penetrating radar using a microwave radiated laser induced plasma", Kobe, Japan, Sep. 2007
- ⑤ 中島弘朋、橋本和久、山浦道照、島田義則、藤田雅之、田中和夫、レーザープラズマチャンネルのマイクロ波伝搬、第54回応用物理学関係連合講演会、青山学院大学2007年3月
- ⑥ 中島弘朋、橋本和久、山浦道照、島田義則、藤田雅之、田中和夫、"レーザープラズマチャンネルのマイクロ波伝搬特性"、平成19年電気学会全国大会、富山大学、2007年3月
- ⑦ 中島弘朋、橋本和久、山浦道照、島田義則、藤田雅之、田中和夫、地中探査レーダーのためのプラズマプローブ、第24回プラズマプロセッシング研究会、千里ライフサイエンスセンター、2007年1月

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称：レーザープラズマ放射電磁波を利用した非破壊検査方法および装置

発明者：田中和夫、中島弘朋、島田義則、橋本和久、山浦道照、藤田雅之
権利者：財団法人レーザー技術総合研究所、国立大学法人大阪大学

種類：特許権

番号：2007-216481

出願年月日：2007年7月27日

国内外の別：国内

○取得状況 (計0件)

[その他]

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

島田 義則 (SHIMADA YOSHINORI)
財団法人レーザー技術総合研究所・レーザー加工計測研究チーム・副主任研究員
研究者番号：80250091

(2) 研究分担者

(2006年度～2007年度)

山浦 道照 (YAMAURA MICHITERU)
財団法人レーザー技術総合研究所・レーザー加工計測研究チーム・研究員
研究者番号：20370215

コチャエフ オレグ (KOTYAEV OLEG)
財団法人レーザー技術総合研究所・レーザー加工計測研究チーム・研究員
研究者番号：80399352

古河 裕之 (FURUKAWA HIROYUKI)
財団法人レーザー技術総合研究所・理論シミュレーション研究チーム・研究員
研究者番号：70222271

(2006年度)

橋本 和久 (HASHIMOTO KAZUHISA)
財団法人レーザー技術総合研究所・レーザー加工計測研究チーム・研究員
研究者番号：20353526

(3) 連携研究者 (2008年度)

コチャエフ オレグ (KOTYAEV OLEG)
財団法人レーザー技術総合研究所・レーザー加工計測研究チーム・研究員
研究者番号：80399352

古河 裕之 (FURUKAWA HIROYUKI)
財団法人レーザー技術総合研究所・理論シミュレーション研究チーム・研究員
研究者番号：70222271

(4) 研究協力者

中島 弘朋 (NAKAJIMA HIROTOMO)
大阪大学・大学院工学研究科