

## 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 4 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21604008

研究課題名（和文） プラズマ中に作られるソリトンからの電磁放射の計測

研究課題名（英文） MEASUREMENT OF ELECTROMAGNETIC RADIATION FROM SOLITONS IN PLASMA

研究代表者

神門 正城（KANDO MASAKI）

独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究主幹

研究者番号：50343942

研究成果の概要（和文）：高強度レーザーとガスプラズマの相互作用により形成されるソリトン構造について調べた。波長 800 nm の高強度レーザーをヘリウムガス中に相対論強度で集光することにより、波長 2-14 $\mu\text{m}$  の赤外光および 10GHz-40THz 領域の電磁波が発生することを確かめた。この電磁波はポンプレーザーと同じ偏光成分をもつことから、ソリトンからの放射が示唆される。また、対向プローブ光の散乱光を観測し、ポンプ光の伝播距離が長いほど強度が高くなることを示した。これはソリトン構造の壁面からの散乱と考えられる。

研究成果の概要（英文）：We investigated solitons that are formed via the interaction of intense laser pulses with gaseous plasma. By focusing a 800-nm laser pulse onto a helium gas-jet with a relativistic intensity, electromagnetic (EM) radiation with an infrared region (2-14 $\mu\text{m}$ ) and a terahertz region (10GHz-40THz) were observed. Since the EM radiation has a same polarization direction as the laser, it is inferred that the radiation comes from solitons. In addition, we observed scattered radiation in a 90degree shadowgraph with a counter-propagating probe pulse. The scattered radiation becomes intense as the pump laser propagates. The radiation seems to be the scattered counter-propagating probe pulse by the soliton density walls.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：時限

科研費の分科・細目： ・量子ビーム科学

キーワード：高強度レーザー、レーザープラズマ相互作用、ソリトン、テラヘルツ、赤外光

## 1. 研究開始当初の背景

パルス幅 数十 fs、パルスエネルギー 100mJ-1J の高強度レーザーをガス中に集光させ、プラズマを生成し、レーザーとプラズマの相互作用を行わせる研究は幅広く行われている。特に、集光強度が  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> を

超える領域は相対論的なプラズマが生成され、光速に近い速さで電子は振動するようになる。このような領域では、電子密度や磁場、電場などに特徴的な構造（例：密度カusp、磁気渦、ソリトンなど）が形成される。特にプラズマ波長がレーザーのパルス幅と同程

度の領域では、レーザーの動重力によりプラズマ波が効率よく励起され、プラズマ電子を捕捉し、高エネルギーの電子を発生させるレーザー電子加速研究がある。このレーザー加速研究が、高品質で高エネルギーの電子生成を目指して国内をはじめ、世界各国で精力的に研究が進められている。一方、相互作用の理解の観点からは、レーザーがプラズマ中で自己集束し、変調され、周波数が変わり、エネルギーを失う過程は実験的にあまり調べられていない。断熱近似では、光子の数が保存されるため、レーザーの光子エネルギーが下がることになる。従って、レーザーが相互作用をするにつれ、その周波数は下がる。同時に、レーザーの持つ動重力により、プラズマ電子を押しつけ、電子空洞部を生成する。この電子空洞部はソリトンと呼ばれ、周波数の下がったレーザー電磁波はこの中に蓄積される。ソリトンは密度勾配に沿って移動し、プラズマ真空境界部で臨界密度以下になるところで電磁波を放出する。このシナリオがソリトンによる電磁波放出機構であり、理論・シミュレーションにより存在が示唆されている。電子空洞部がレーザー・プラズマ相互作用により生成されることは、イオンビームを使ったプローブにより実験的に計測されているが、電磁波の放出に関しては研究開始当初は明確な結果が無い状況であった。我々は研究開始前のレーザー電子加速研究において、低周波数の電磁波計測に成功しており、その存在が示唆されていたが、スペクトル形状、密度依存性など、その詳しい特性は未解明のままであった。

## 2. 研究の目的

高強度レーザーをプラズマ中に集光するレーザープラズマ相互作用により生成されるソリトンと呼ばれる構造の生成条件やその特性について調べる。特に、ソリトンからの電磁放射を調べる。

## 3. 研究の方法

ソリトンは、チャープパルス増幅法を用いたチタンサファイアレーザーシステムをヘリウムガスジェット中に集光することで生成する。レーザー進行方向に発生する電子ビームを二極磁石により偏向させ、蛍光板にて位置を検出することで運動量を計測する。低周波の電磁波は、金コートミラーなどにより、KRS5 やサファイア窓を通して大気中に出

し、赤外検出器や THz 検出器によって計測する。また、レーザー伝播の様子を横方向(90°)プローブレザー光によるシャドウグラフにより時間分解計測する。プラズマ発光の様子を調べるために、散乱光イメージングを垂直方向においた CCD カメラにより観測する。典型的な実験配置図を図 1 に示す。

発生する電磁波を、赤外領域(波長 2-14  $\mu\text{m}$ )では液体窒素冷却型赤外検出器(InSb、MCP)を用い、THz 領域(10 GHz-40 THz)では DTGS(重水素置換トリグリシンサルフェイト)計測器を用いる。また、電磁波の偏光方向を制限するために、ワイヤーグリッド偏

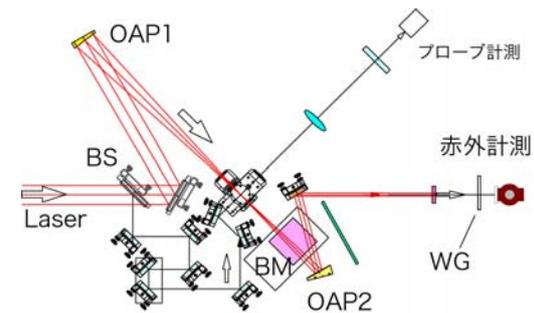


図 1: 実験セットアップ

光子やフィルターを適宜挿入する。レーザーは直線偏光しており、必要に応じて  $\lambda/2$  波長板を挿入することで偏光方向を水平、垂直方向に変えることができる。

## 4. 研究成果

本研究で得られた成果について、項目毎に記す。

### (1) 電磁放射の計測

4 TW, 40 fs レーザーをヘリウムガス(電子密度  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )に集光し、前方方向に発生して赤外計測器にて電磁波の計測を行った。典型的な波形を図 2(a)に示すような振動波形が得られた。ノイズではない証拠として、検出器の前に遮蔽板を置いた場合(b)とガスジェットを off にした場合(c)を示す。このように明確に差異が見られるため、放射線やノイズ光を拾っているとは考えにくい。信号が振動波形になる原因としては、用いた検出器の 2 段アンプに起因しており、得られた信号パルス幅が短いことを示唆している。実際に、テストパルサーを用いてこのような波形が再現されることを確かめた。

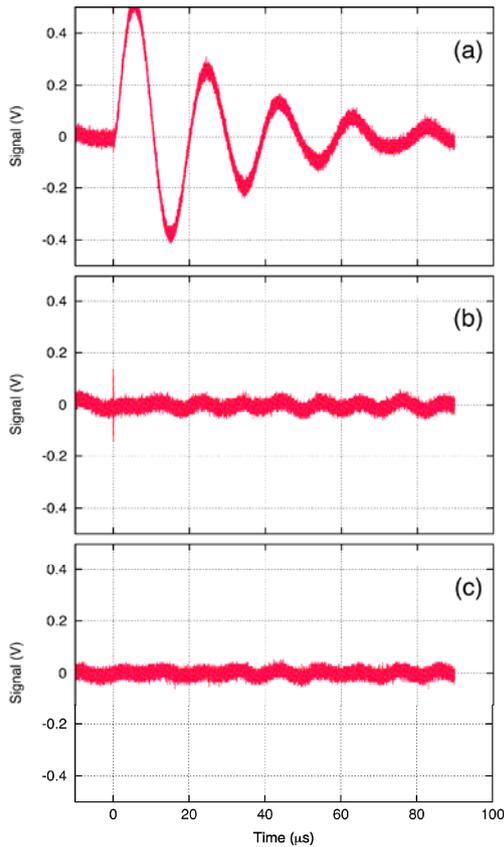


図 2 InSb 検出器にて観測された信号波形。(a) 典型的な波形、(b) 検出器の前に遮蔽を置いた場合、(c)ガスジェットを off した場合。

次に、この信号の偏光依存性を調べた結果を図 3 に示す。この計測の場合、バンドパスフィルターを用いて波長  $5 \pm 0.085 \mu\text{m}$  の範囲の電磁波のみを観測した。横軸は用いたレーザー光の偏光方向を示し、四角記号がレーザーと計測電磁波が平行な偏光を持つ場合、丸形記号がレーザーと計測電磁波の偏光が垂直な場合を表している。なお、レーザーの偏光を垂直に変える場合は、挿入した波長板による損失のため、水平偏光の場合の約 8 割のエネルギーとなっており、電磁波の信号強度が低くなっている。いずれの偏光の場合も、観測された  $5 \mu\text{m}$  の電磁波はレーザーと同じ偏光成分が主要な成分となっている。これはソリトンモデルの予測と一致する。レーザープラズマ相互作用により低周波数の電磁波生成としてはソリトン以外にも、プラズマ振動に起因するモデルや高速電子の遷移放射などがあるが、これらはいずれもレーザーの偏光方向には依存しない。従って、観測された電磁波はソリトンモデルのものと考えられる。

信号のガス密度依存性を調べたものが図 4

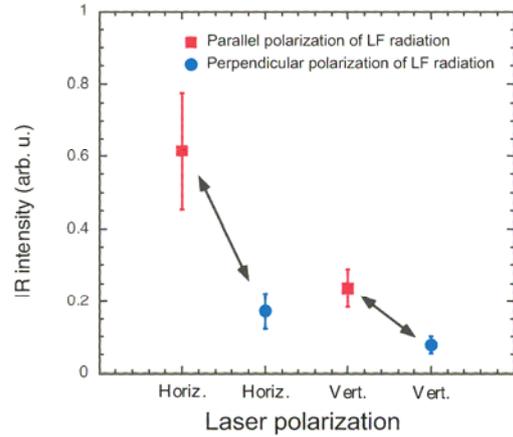


図 3 波長  $5 \mu\text{m}$  の信号の偏光依存性。

である。この場合、バンドパスフィルターは用いず、偏光子を 2 枚用いてダイナミックレンジを稼いでいる。プラズマ密度はおおよそ  $4 \text{MPa}$  が  $4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  に相当する。高エネルギー電子は  $2 \text{MPa}$  以上から観測され、電子数は密度を上げて行くと増えて行く傾向がある。しかしながら、電磁波の信号強度には最適値がある。

## (2) 密度構造の観測

ソリトン生成とその放射過程を解明するために  $12 \text{TW}$ ,  $30 \text{fs}$  のレーザー光 (ポンプ光) がプラズマ中に作る構造を側面および対向から 2 種類のプローブ光を導入し、側面から観測を行った。対向プローブを導入しない場合に、図 5 (a) のように、通常のシャドウグラフ上にソリトン構造からと思われる強い発光点を観測した。この発光点の位置は、図 5 (b) のように、プローブ光のタイミングを変えてもそれほど変化しなかった。次に対向プローブを入射させると、ポンプ光よりも遅く

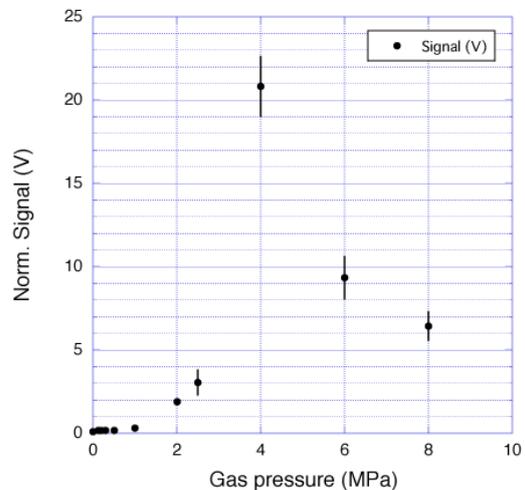


図 4 信号のガス密度依存性

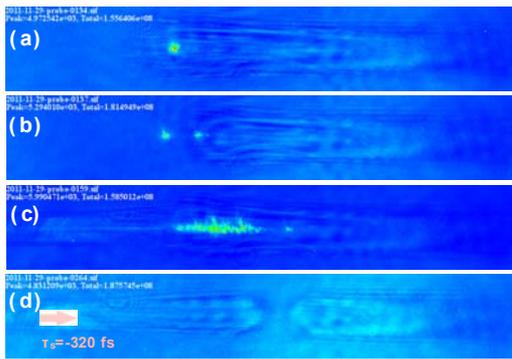


図 5 90° 方向のプローブ光にて観測したシャドウグラフ像。図でポンプ光は右から左へ、対向プローブ光は左から右へ進んでいる。強い発光も同時に観測された。各像の取得条件は、(a) ソース光なし  $tp=-256fs$ , (b) ソース光なし,  $tp=+411fs$ , (c) ソース光あり,  $ts=-80fs$ ,  $tp=0fs$ , (d) ソース光あり  $ts=-320 fs$ ,  $tp=+1.6ps$ 。

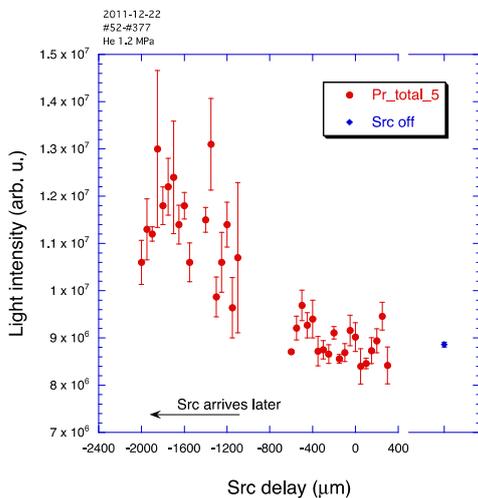


図 6 ソース光のディレイと発光強度の依存性。

到着する場合[図 5(c)]に、より強い発光が観測された。このタイミングを変え、対向プローブが先行するようにディレイを変えるとこの強い発光は観測されなかった[図 5(d)]。この様子をより詳しくプロットしたものが図 6 である。図 6 により、このシャドウグラフで観測された発光は、対向プローブがある地点より下流側で相互作用する場合に強くなるのがわかる。これによりこの発光の原因となる構造がポンプ光と同期していることから、ソリトン壁により対向プローブが散乱されたものと考えられる。ソリトンモデルでは、これによりソリトン機構を支持する結果を得た。

また、THz 領域の電磁放射観測を試みた。計測器は、レーザー進行方向から 150° 方向

でレーザーの偏光方向面内で DTGS (重水素置換トリグリシンサルフェイト) 計測器を用いた。この計測器に厚さ 1mm のポリエチレン窓が取り付けられており、10 GHz~40 THz の電磁波に感度がある。この出力をオシロスコープにて観測した。パルス幅 40 fs では、10 MeV 以上の高速電子が発生するが、観測された信号は、通常の DTGS 検出器の出力と異なり、幅 3ms 以上にわたってほぼ減衰のない出力であり、値も 400 mV 程度であった[図 7(a)]。パルス幅を増大させ、レーザー出力を下げて行くと、140 fs を超えたあたりから信号強度は図 7(b) のように高くなり、最大 6V の出力が得られた。このときの波形は 0.5ms 程度で信号強度が半分となり、通常 DTGS で期待される波形である。レーザー光を導入しない場合のバックグラウンド信号を図 7(d) に示す。以上から、パルス幅が長い場合に 10GHz-40THz の領域の電磁波が生成されていることが確かめられた。集光強度が高い場合に観測できなかった理由の 1 つとして、プラズマ生成に伴う電磁パルスによるノイズにより検出器が正常に応答していない可能性が考えられる。これは固体ターゲットを用いた場合には観測されていた現象であるが、ガスターゲットでは今回初めて観測されたものであり、電磁シールド強化などの対策を行う必要がある。

以上のように、レーザープラズマ相互作用により、ソリトンモデルで予測されるような密度構造が存在する証拠と、5 $\mu$ m から THz に至る低周波数の電磁放射を観測することに成功した。しかしながら、この密度構造から確かに放射が行われているかどうかについては直接的な証拠は得られてはおらず、間接的証拠を得た段階である。また、その放射の詳しいスペクトルは未だ得られていない。高強度レーザーでは荷電粒子、X 線など幅広い量子ビームが同時に、短時間に発生するため、他の分野で使われている計測器が適用できない場合があるので、今後計測器を含めた開発が必要になってくるであろう。

本研究の途中で当初予期していなかった副次的な、しかし有意義な結果を得たのでそれらについて最後に記す。

### (3) 相対論強度のレーザーからの高次高調波の生成

高強度レーザーとヘリウムガスの実験を行い、元のレーザー周波数よりも短波長化した高調波のようなスペクトルを計測した。この放射はこれまでに知られておらず、粒子シミュレーションでは高強度レーザーが作り出す電子空洞部の壁面(電子が集群している部分)とレーザーの船首波が交差する部分の高電子密度部とレーザーが相互作用し、コヒ

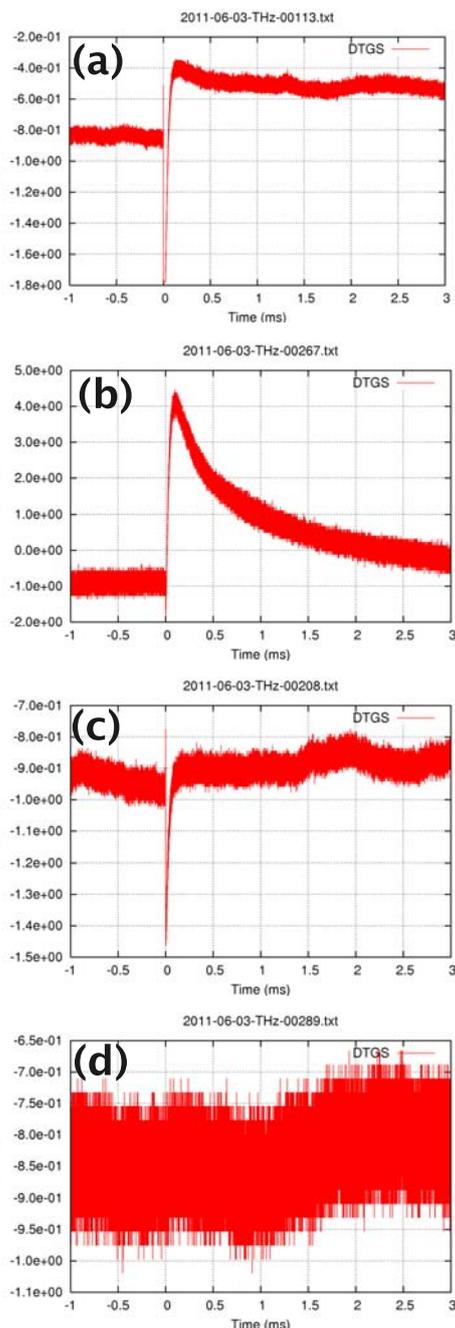


図 7 DTGS 計測器にて観測された信号波形。(a) He 2MPa, パルス幅 40 fs、(b) 2MPa, パルス幅 200fs、(c) 0.7 MPa、パルス幅 40fs、(d)レーザーなし(BG)。

ーレントな放射を行っていることを示唆している。現在、観測を行っているのはレーザーの進行方向のみであるが、大角度ではレーザー進行方向に亜光速に進む高電子密度部とレーザーの相互作用で赤方偏移した成分も観測される可能性がある。これらは当初考えていなかったモデルによる放射機構であ

る。

(4) 高エネルギー電子加速による応用研究  
高強度レーザーの応用として、航跡波を励起し電子を PeV まで加速することで拓かれる超高強度場物理に関して考察を行い、現在宇宙線を用いてしか行えない、高エネルギーでの相対論の破れに関する実験のモデルを提案した。

#### 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 4 件)

- ① A. S. Pirozhkov, M. Kando et al, Soft X-ray Harmonic Comb from Relativistic Electron Spikes, 査読有, Phys. Rev. Lett. 108, 2012, 135004 (5pages), DOI: [10.1103/PhysRevLett.108.135004](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.135004)
- ② M. Kando, T. Nakamura, A. Pirozhkov, T. Esirkepov et al., Laser technologies and the Combined Applications towards Vacuum Physics, 査読有, Prog. Theor. Phys. Suppl., 193, 2012, 236-243, DOI: [10.1143/PTPS.193.236](https://doi.org/10.1143/PTPS.193.236)
- ③ T. Tajima, M. Kando, M. Teshima, Feeling the Texture of Vacuum - Laser Acceleration toward PeV -, Prog. Theor. Phys., 査読有, 25, 2011, 617-631. DOI : [10.1143/PTP.125.617](https://doi.org/10.1143/PTP.125.617)
- ④ M. Kando, A. S. Pirozhkov, Y. Fukuda, T. Esirkepov et al., Experimental studies of the high and low frequency electromagnetic radiation produced from nonlinear laser plasma interaction, Euro. Phys. J. D, 査読有, 55, 2009, 465-474, DOI: [10.1140/epjd/e2009-00246-x](https://doi.org/10.1140/epjd/e2009-00246-x)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 神門正城, 高強度レーザー・プラズマ相互作用により発生する長波長電磁放射の観測, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012. 3. 27, 兵庫
- ② M. Kando, Flying Mirror as a tool for ultra-high field and ultra-short pulse generation, LEI2011 Light at Extreme Intensities (招待講演), 2011.11.16, Szeged, Hungary.
- ③ M. Kando, “XUV and IR electromagnetic radiation from nonlinear laser-plasma interaction”, SPIE Europe: Optics and Optoelectronics, 2009. 4. 22, Prague, Czech Republic.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.apr.kansai.jaea.go.jp/aprc/beam-la.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

神門 正城 (KANDO MASAKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子  
ビーム応用研究部門・研究主幹

研究者番号：50343942

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし