

「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」
平成 18 年度採択研究代表者

兒玉 了祐

大阪大学大学院工学研究科 教授

高エネルギー密度プラズマフォトンクス

1. 研究実施の概要

研究のねらい

高エネルギー密度プラズマフォトンクスという新しい概念のもとで、従来取り扱うことが困難であった桁違いに高い強度の光や高エネルギー密度の粒子ビームを直接制御できる新しい光機能性素子の可能性を探求している。そのために、高エネルギー密度プラズマをコヒーレントに制御したり、規則性を維持した過渡的な状態を利用する。このようなプラズマをコヒーレント高エネルギー密度プラズマとして位置づけ、新概念のプラズマフォトンニックデバイスの開発を行っている。超高強度レーザーによる高エネルギー密度プラズマデバイス開発は、単に新技術の開拓だけではなく、わが国オリジナルなプラズマフォトンクスというレーザー光学、ビーム光学、プラズマ物理学、固体物理学の境界領域の学問開拓も目指している。

研究の概要

超高強度レーザーを利用したプラズマフォトンニックデバイスの実現を目指し、大阪大学、電気通信大学、宇都宮大学が、それぞれの実績と技術をもとに有機的に連携協力した体制のもとで(1)高エネルギー密度電子ビーム制御プラズマ、(2)光制御・光分散プラズマ、(3)電磁波発生プラズマに関する研究を進めている。

研究進捗状況

初年度に引き続き本研究計画を立ち上げるための、大阪大学既存の 10TW レーザー整備を重点的に行った。さらに機能性コヒーレント高エネルギープラズマを実現のための本格的な実験を開始した。

研究成果

高エネルギー密度電子ビーム制御デバイス、光制御・光分散プラズマデバイス、電磁波発生プラズマデバイスに関して以下の成果を得た。

[光制御デバイス]

- ・プラズマミラーの導入と新しいプラズマ集光光学系の考案
- ・相対論振動プラズマミラーによる時間変調反射を利用した高エネルギー電子生成
- ・高繰り返し対応可能なプラズマフォトニックデバイスの開発
- ・固体-プラズマ中間状態層の状態方程式データベース構築とそのモデル化

[電子ビーム制御デバイス]

- ・マイクロパルスパワーによる電子ビームガイド極細線固体密度プラズマの生成
- ・高密度プラズマ電子ビームガイドの物理解明

[電磁波発生デバイス]

- ・レーザー誘起 MeV 電子による単色・高指向性 X 線チェレンコフ発生の数値計算評価
- ・レーザー誘起 MeV 電子によるスミスパーセル放射の実証と高輝度テラヘルツ発生の評価
- ・DARC(dc to ac radiation converter)による高輝度テラヘルツ光源開発。

また、実験的研究を効率的に進めるために、大阪大学既存の 10TW レーザーを整備し 3 機関が効率的に利用できるようにシステムの整備を行った。さらに、阪大-宇都宮連携によるテラヘルツシングルショット計測器の開発や阪大-電気通信大学連携によるプラズマフォトニックデバイス用マイクロパルスパワー（パルス磁場発生装置など）の開発を行った。

今後の見通し

レーザー整備、計測器開発、数値計算評価など本格的な実験を実施するための準備が整った。20年度より、これらの成果や技術を駆使して(1)高エネルギー密度電子ビーム制御デバイス、(2)光制御・光分散プラズマデバイス、(3)電磁波発生プラズマデバイスに関する本格的な実験を実施する予定である。

2. 研究実施内容

(文中にある参照番号は 4. (1)に対応する)

本研究は、光・光量子科学技術分野の重要戦略目標の 1 つである「究極的な光の発生技術」を、研究代表者等が提唱している新しい概念の高エネルギー密度プラズマフォトニクスにより展開していくことを目指すものである。具体的には、(1)高エネルギー密度電子ビーム制御プラズマの開発、(2)光制御・光分散プラズマの開発、(3)電磁波発生プラズマの開発を設定して研究を進め最終的には、高エネルギー密度プラズマデバイスを利用した電磁波源実現を目指している。以下に具体的に、19年度の研究実績を纏める。

(1) 電子ビーム制御電磁波発生プラズマの開発

固体-プラズマ中間体やプラズマの原子過程を考慮した伝導率を利用して超高強度レーザーによる高密度相対論電子ビーム制御を実現し、高輝度の X 線やテラヘルツ電磁波

の発生に役立てる。19年度、以下の成果を得た。

(1)-1 [ワイヤーデバイスにおける高密度相対論電子ビーム伝搬物理]

(参考原著論文: 1, 2, 3, 4, 5)

レーザー生成高密度相対論電子ビームを効率よくガイドするデバイスとしてワイヤープラズマデバイスがある。電子ビームをガイドするうえでプラズマ中の逆起電流の振る舞いや伝導率を決定する自己加熱機構を理解することが重要である。ワイヤー加熱をプラズマ拡がり計測 (図1) やシミュレーション (図2) により調べた。その結果、ワイヤーの表面での逆起電流やこれによるオーム加熱の重要性が明らかになった。

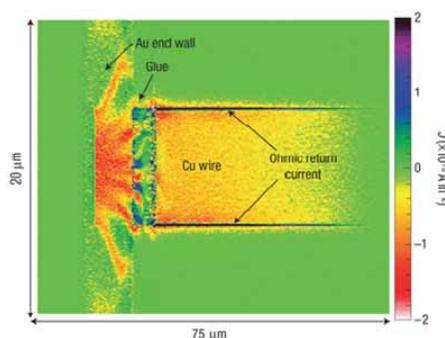
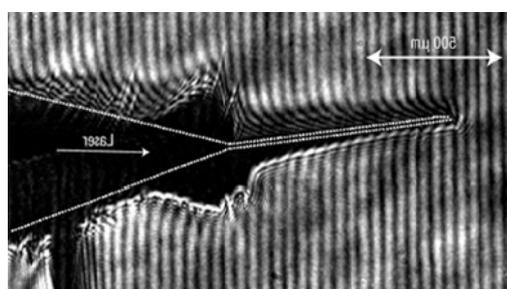


図1 プラズマ拡がりを示す干渉像 図2 加熱の詳細を示すシミュレーション

(1)-2 [超高密度ワイヤープラズマ中の高密度相対論電子ビームガイド]

(参考原著論文: 6, 7, 8)

固体の5-10倍程度の高密度プラズマで真空領域との境界が固体より大きな密度勾配をもった高密度プラズマ中での高密度相対論電子ビームガイドを明らかにした。固体ワイヤーでは電子ビーム自己生成静電場による閉じ込め効果が支配的であったが、密度勾配の大きな高温高密度プラズマ中では静電場は固体の1/10以下となり代わりに自己生成磁場による閉じ込め効果が重要であることが明らかになった。

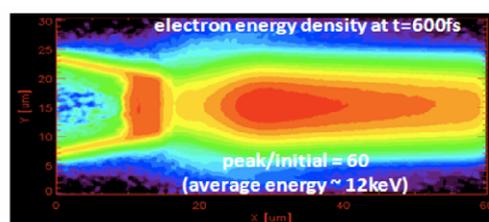


図3 高密度プラズマ中での電子密度分布

(1)-3 [マイクロパルスパワーを使ったガイディング用ワイヤープラズマ生成]

10TW 超高強度レーザーで生成する高エネルギー密度電子の効率的な伝搬を実現するため、高エネルギー密度電子流を補償する帰還電流トリガーを目指したマイクロパルスパワーを開発した。固体-プラズマ中間状態の伝導率を考慮した高速加熱 (立ち上がり時間: 7ns) を実現した。また $>1\text{GW}/\text{cm}^2$ のエネルギー注入に成功した。これはテーブルト

ップレーザーで実現できるエネルギー密度に近い状態をマイクロパルスパワーで実現できたことになる。以上よりレーザー高密度相対論電子ビームのガイディング実験の準備が整った。同時に今後、 $<1\text{ns}$ の超高速加熱をマイクロパルスパワーで実現する。

(2) 光制御・光分散プラズマの開発

高エネルギー密度プラズマに規則性をもたせる技術や原子過程、プラズマの波動性を利用して異なった光学特性を持つプラズマを生成する技術、データベースを構築することで光制御・光分散デバイスの開発をおこなう。19年度、以下の成果を得た。

(2)-1 [プラズマミラーを利用した広開口集光光学系]

(参考原著論文：9)

従来、ワーキングディスタンスの制約やプラズマデブリの問題から超高強度レーザーを集光する光学系のF値は制限があった。プラズマ集光ミラーを利用することでこの制約を和らげ、かつプレパルスを抑制した集光を可能とした。図に示す光学系を考案し初めて実験に適用した。20年度は従来の集光強度の10倍高い強度を実現するとともに焦点にピンホールを設置することで、空間ローパスフィルターの機能を付加したデバイスを実証する。

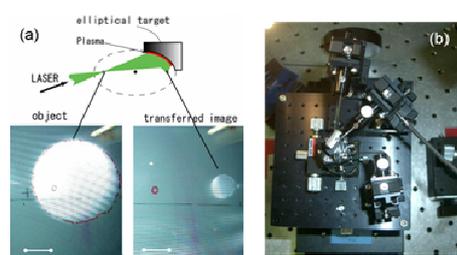


図4 プラズマ集光ミラーと配置

(2)-2 [相対論振動プラズマミラーによる時間変調パルス生成と電子加速の検証]

(参考原著論文：10, 11)

プラズマミラーを相対論強度で使用すると、反射面は相対論的速度で振動を起し反射光は強い変調を受けて反射する。スペクトル変調を受けた反射光は、X線領域に至る高調波として依然観測している (Nature Physics 2006)。19年度、相対論振動プラズマミラーの時間的変調効果に着目しバンチした反射光による電子の加速を検証した。変調パルスによる加速長を増やすことでより高いエネルギーの電子ビームを発生することを初めて実証した(図5)。

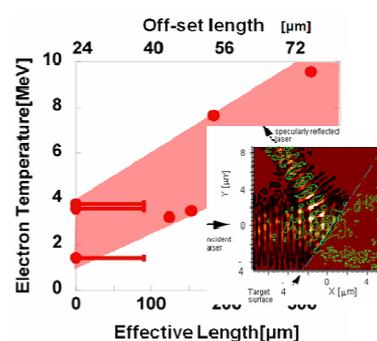


図5 加速長依存性

(2)-3 [電磁誘導透過を利用した複素屈折制御とテラヘルツ発生]

電子プラズマ波と電磁波の干渉効果（電磁誘導透過）を利用することで、高密度プラズマの複素屈折率制御をおこない、従来取り出すことができなかった超臨界密度からのイオン音波による電磁波（テラヘルツ域）を観測できる条件を明らかにした。またシングルショットテラヘルツ波計測器を整備し 20 年度、プラズマにおける電磁誘導透過現象の実証へ向けた準備が整った。

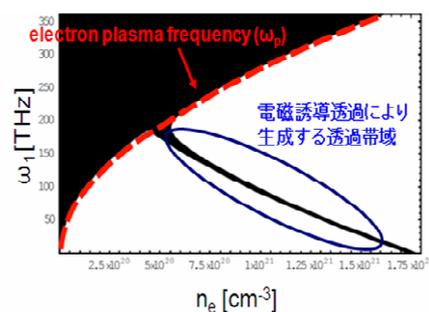


図6 電磁波透過域の電子密度依存性

(2)-4 [高繰り返し対応可能なプラズマフォトニックデバイスの開発]

(参考原著論文：12, 13)

プラズマ回折格子を大気圧プラズマで構築可能性についての研究を行った。ラジカル種が作り出す光学屈折率変化により、安定に 10^{-4} 以上の屈折率変調を作り上げられることが明らかになった。ラジカル種の密度は 10^{-3} 程度であり、ラジカル種の有り無しでの圧力差は非常に小さく、そのために、安定な屈折率の凹凸が形成されていることが明らかになった。このプラズマを実際の光学素子に応用させる場合には、現在の $100\sim 500\ \mu\text{m}$ ピッチの構造を、 $1\ \mu\text{m}$ 台まで下げる必要がある、その場合の安定性、ミキシングによる変調低下を評価する必要がある。この実験的な構築を行っている段階にある。

(2)-5 [固体-プラズマ中間状態層の状態方程式データベース構築]

(参考原著論文：14, 15, 16, 17, 18)

19 年度、新しく、可視～近赤外域で多波長プローブにより同時に光学特性を測定できるシステムを完成させ、それにより、種々の金属のデータ測定に成功した。その結果、金などの良金属では見られなかった可視光領域での共鳴的な特異点波長が、W などの金属で Warm dense matter の領域になると現れてくることがわかった。特にこれは、吸収などの変化ではなく、反射光の位相が顕著に変化しており、電子の導電性モデルに大きな影響を及ぼすことが考えられる。また、水銀に関して、第一原理的に近い状態からの、状態方程式を記述するモデルを開発した。これにより、特に臨界点付近では、Hg のような低融点金属であっても高密度化による励起状態準位の変化が大きくあり、6s-6p という s-p 間での逆転現象すら起きていることが明らかになった。これらは、WDM 領域の特に臨界点近傍の性質を決める大きな要素になり、他の金属でのモデル化を現在検討している。

(3) 電磁波発生デバイス

高エネルギー密度プラズマにより制御される高密度相対論電子ビームを利用した電磁波(テラヘルツからX線)発生デバイスや高輝度のテラヘルツ波の増幅を目的として、高エネルギー密度プラズマを利用したテラヘルツ波発生・増幅デバイスの開発を行っている。またそのための計測手法を開発した。19年度、以下の成果を得た。

(3)-1 [レーザー誘起 MeV 電子による単色・高指向性X線チェレンコフ放射]

高エネルギー密度プラズマにより制御される高密度相対論電子ビームを利用した単色チェレンコフX線発生に関する数値評価とこれを実証するためのX線分光器、分布計測器の整備を行った。図7に示すようにブロードバンドの電子ビームでもモノクロ電子ビームと変わらない単色X線が期待できることが分かった。また図8に示すように指向性のある高輝度X線が期待できることが分かった。10TWレーザー生成電子ビームで最大0.3-0.5keVの単色X線で $\sim 10^{22}$ [photons/ mm² mrad² sec 0.1%B.W.]が数値計算上得られた。

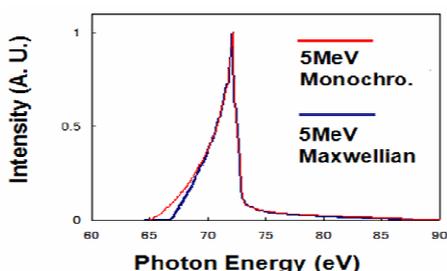


図7 チェレンコフX線スペクトル

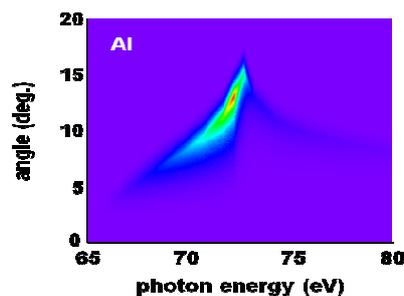


図8 チェレンコフX線角度分布

(3)-2 [レーザー誘起 MeV 電子によるスミスパーセル放射-高輝度テラヘルツ]

(参考原著論文: 19)

超高強度レーザー生成高エネルギー密度電子をグレーティング構造に伝搬させることで高輝度スミスパーセル放射が可能であることを初めて実証した。スペクトルピークが回折格子および観測角に依存しスミスパーセル放射でよくされるピークと一致することを実証した。19年度は計測の容易さから可視領域で実証したが、20年度はこれをテラヘルツ領域に拡張する。数値評価で可視域に比べ5ケタ近く高輝度のテラヘルツが期待できることが分かった。

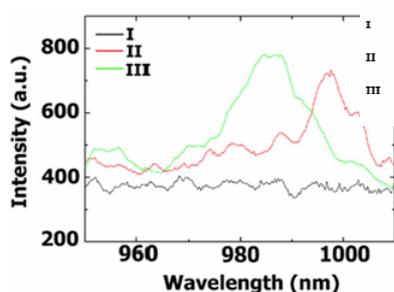


図9 スミスパーセル放射スペクトル

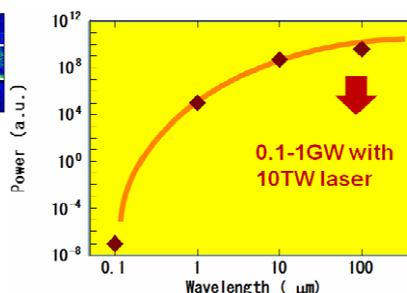


図10 出力波長依存性

(3)-3 [レーザー誘起 MeV 電子によるマイクロシンクロトロン放射-高輝度テラヘルツ]

ワイヤーデバイスで制御された 10TW レーザー励起相対論電子ビームをマイクロパルスパワー高磁場で偏向しコヒーレントな GW クラスのテラヘルツ波を発生できる可能性がある。これを実証するため、マイクロ光源に適応できるレーザー同期した 20 テスラーの磁場をマイクロパルスパワーで実現した。20 年度はこれを使いマイクロシンクロトロン放射デバイスを実証する予定である。

(3)-4 [DARC(dc to ac radiation converter)による高輝度テラヘルツデバイス]

(参考原著論文: 20)

平成 19 年度は、テラヘルツ放射に加えて放射強度のバイアス依存性などを明らかにした。図 11 は印加電圧に対する出力電圧特性である。この結果から出力電圧が印加電圧に比例する特性が得られた。DARC の印加電圧と放射電磁波の電界強度の関係は ($E_0 \approx E_{\text{Rad}}$, $E_0 \approx V_B/b$) 比例関係であり、実験結果の特性は DARC の理論により説明できた。

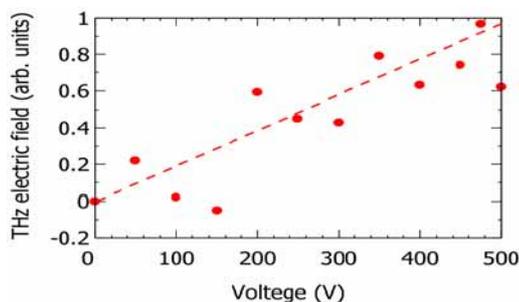


図 11. THz 電場の DARC 印加電圧依存性

これらのことから観測した電磁波が DARC の放射であることに加えて、印加電圧を大きくすることで放射電磁波の出力電力を大きくすることができることを初めて実証した。この成果は現在 Appl. Phys. Lett に投稿中である。また、他の国際会議論文でも公表している。この計画の最終目標であるテラヘルツ増幅器に入射するシード電磁波源の候補の一つが確保できたと考えている。またシード光源としての光伝導アンテナも整備した。

[シングルショットテラヘルツ波計測器開発]

レーザーによるパルス状の高輝度テラヘルツ波やプラズマの電磁誘導透過によるテラヘルツ波発生を診断するため、テラヘルツシングルショットスペクトル計測器の開発を

行った。本計測器では電磁波を計測するために電気光学効果を利用した。検出したいテラヘルツ電磁波とそのテラヘルツ電磁波のパルス幅に対し、十分パルス幅の長いチャープパルスを電気光学結晶に入射し、相関を測定することでテラヘルツ電磁波のパルス波形を測定しフーリエ変換によりスペクトルを求めるシステムを構築した。

3. 研究実施体制

(1)「大阪大学」グループ

①研究分担グループ長: 兒玉 了祐 (大阪大学大学院、教授)

研究分担グループ長: 近藤 公伯 (大阪大学大学院、准教授)

②研究項目

- ・ 電子ビーム制御プラズマデバイス
- ・ 高エネルギー密度パルス電子励起電磁波(テラヘルツ-X線)発生プラズマ
- ・ 光分散プラズマデバイス
- ・ 電磁誘導透過と複素屈折率制御プラズマ

(2)「電気通信大学」グループ

①研究分担グループ長: 米田仁紀 (電気通信大学レーザー新世代研究センター、教授)

②研究項目

- ・ 新機能性プラズマミラーデバイス
- ・ 光分散プラズマ
- ・ 固体 - プラズマ中間体光物性データベース

(3)「宇都宮大学」グループ

①研究分担グループ長: 湯上 登 (宇都宮大学大学院、教授)

②研究項目

- ・ 高輝度テラヘルツ電磁波発生デバイス
- ・ シングルショットテラヘルツ波計測システム開発
- ・ ミクロパルスパワー技術

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

(1)-1

1. M. Nakatsutsumi, J. R. Davies, R. Kodama, J. S. Green, K. Lancaster, K. U. Akli, F.N. Beg, S. N. Chen, D. Clark, R. R. Freeman, C. D. Gregory, H. Habara, R. Heathcote, D. S. Hey, K. Highbarger, P. Jaanimagi, M. H. Key, A.J. Mackinnon, H. Nakamura, R. B. Stephens, M. Storm, M. Tampo, W. Theobald, L. VanWoerkom, M. S. Wei, N. C. Woolsey and P. Norreys
“Space and time resolved measurements of the heating of solids to ten million Kelvin by a PetaWatt laser”
New Journal of Physics in press 2008
2. M. Nakatsutsumi, R. Kodama, Y. Aglitskiy, K. U. Akli, D. Batani, S. D. Baton, F. N. Beg, A. Benuzzi-Mounaix, S. N. Chen, D. Clark, J. R. Davies, R. R. Freeman, J. Fuchs, J. S. Green, C. D. Gregory, P. Guillou, H. Habara, R. Heathcote, D. S. Hey, K. Highbarger, P. Jaanimagi, M. H. Key, M. Koenig, K. Krushelnick, K. L. Lancaster, B. Loupiau, T. Ma, A. Macphee, A. J. Mackinnon, K. Mima, A. Morace, H. Nakamura, P. A. Norreys, D. Piazza, C. Rousseaux, R. B. Stephens, M. Strom, M. Tampo, W. Theobald, L. V. Woerkom, R. L. Weber, M. S. Wei, and N. C. Woolsey
“Heating of solid target in electron refluxing dominated regime with ultra-intense laser”
Journal of Physics in press 2008
3. M. H. Key, J. C. Adam, K. U. Akli, M. Borghesi, M. H. Chen, R. G. Evans, R. R. Freeman, H. Habara, S. P. Hatchett, J. M. Hill, A. Heron, J. A. King, R. Kodama, K. L. Lancaster, A. J. MacKinnon, P. Patel, T. Phillips, L. Romagnani, R. A. Snavely, R. Stephens, C. Stoeckl, R. Town, Y. Toyama, B. Zhang, M. Zepf, and P. A. Norreys
“Fast ignition relevant study of the flux of high intensity laser-generated electrons via a hollow cone into a laser-imploded plasma”
Physics of Plasmas **15**, pp 022701-1-022701-5,(2008)
4. J. S. Green, K. L. Lancaster, K. U. Akli, C. D. Gregory, F. N. Beg, S. N. Chen, D. Clark, R. R. Freeman, S. Hawkes, C. Hernandez-Gomez, H. Habara, R. Heathcote, D. S. Hey, K. Highbarger, M. H. Key, R. Kodama, K. Krushelnick, I. Musgrave, H. Nakamura, M. Nakatsutsumi, N. Patel, R. Stephens, M. Storm, M. Tampo, W. Theobald, L. Van Woerkom, R. L. Weber, M. S. Wei, N. C. Woolsey & P. A. Norreys
“Surface heating of wire plasmas using laser-irradiated cone geometries”
Nature Physics **3**, 853 – 856(2007)

5. S. D. Baton, M. Koenig, P. Guillou, B. Loupiau, A. Benuzzi-Mounaix, J. Fuchs, C. Rousseaux, L. Gremillet, D. Batani, A. Morace, M. Nakatsutsumi, R. Kodama, Y. Aglitskiy
“Relativistic electron transport and confinement within charge-insulated, mass-limited targets”
High Energy Density Physics **3** pp 358-364 (2007)

(1)-2

6. H. Nakamura, Y. Sentoku, T. Matsuoka, K. Kondo, M. Nakatsutsumi, T. Norimatsu, H. Shiraga, K. A. Tanaka, T. Yabuuchi and R. Kodama
“Fast heating of cylindrical imploded plasmas by PW laser light”
Physical Review Letters in press 2008
7. T. Yabuuchi, K. Adumi, H. Habara, R. Kodama, K. Kondo, T. Tanimoto, and K. A. Tanaka, Y. Sentoku, T. Matsuoka, Z. L. Chen, M. Tambo, A. L. Lei, and K. Mima,
“On the behavior of ultraintense laser produced hot electrons in self-excited fields”
Physics of Plasmas **14**, pp 040706-1-040706-4 (2007)
8. Toshinori Yabuuchi, Yasuhiko Sentoku, Takeshi Matsuoka, Hideaki Habara, Ken Adumi, Zenglin Chen, Ryosuke Kodama, Kiminori Kondo, Anle Lei, Kunioki Mima, Motonobu Tambo, Tsuyoshi Tanimoto, and Kazuo A. Tanaka
” Influence of Electrostatic and Magnetic Fields on Hot Electron Emission in Ultra-Intense Laser Matter Interactions”
Plasma and Fusion Research **2**, 015-1-4 (2007)

(2)-1

9. M. Nakatsutsumi, R. Kodama, P. A. Norreys, S. Awano, H. Nakamura, T. Norimatsu, A. Ooya, M. Tambo, K. A. Tanaka, T. Tanimoto, T. Tsutsumi, and T. Yabuuchi,
“Re-entrant cone angle dependence of the energetic electron slope temperature in high-intensity laser-plasma interactions” ,
Physics of Plasmas **14**, pp 050701-1-050701-4 (2007)

(2)-2

10. A. L. Lei, A. Pukhov, R. Kodama, T. Yabuuchi, K. Adumi, K. Endo, R. R. Freeman, H. Habara, Y. Kitagawa, K. Kondo, G. R. Kumar, T. Matsuoka, K. Mima, H. Nagatomo, T. Norimatsu, O. Shorokhov, R. Snavely, X. Q. Yang, J. Zheng, and K. A. Tanaka
“Optimum hot electron production with low-density foams for fast ignition” ,
Physical. Review. E **76**, 066403-1-066403-5 (2007)

11. J. Fuchs, M. Nakatsutsumi, J.-R. Marques, P. Antici, N. Bourgeois, M. Grech, T. Lin, L. Romagnani, V. Tikhonchuk, S. Weber, R. Kodama, and P. Audebert
“Space- and time- resolved observation of single filaments propagation in an underdense plasma and of beam coupling between neighbouring filaments”
Plasma Physics and Controlled Fusion **49**, B497-504 (2007)

(2)-4

12. 近藤公伯、“レーザープラズマ研究と最新レーザー技術”、プラズマ・核融合学会誌 **83** 619-623 (2007).
13. 近藤公伯、兒玉了祐「プラズマの空間的周期構造の生成とレーザー光制御への応用」プラズマ・核融合学会誌 **84**, in press.(2008.4)

(2)-5

14. Kazunori Shibata and Ryosuke Kodama
“Significant reduction of inter nuclear potential in superconductive solid metallic hydrogen”
Journal of Physics Condensed Matter **20**, pp 075231(1-5) (2008)
15. H. Kitamura, “Cohesive properties of mercury clusters in the ground and excited states”,
EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL D **43**, Issue: 1-3 Pages: 33-36 (2007)
16. H. Kitamura, “Equation of state for expanded fluid mercury: Variational theory with many-body interaction”, JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS **126**, Issue: 13 Article Number: 134509 (2007)
17. H. Kitamura, “The role of attractive many-body interaction in the gas-liquid transition of mercury”, JOURNAL OF PHYSICS-CONDENSED MATTER **19**, Issue: 7, 072102 (2007)
18. 米田仁紀、「超短パルスレーザー応用 Warm Dense Matter 計測技術」、プラズマ・核融合学会誌 **83**, No.7, p.624 (2007)

(3)-2

19. Z. Jin, Z.L. Chen, and R. Kodama
“Estimation of Smith-Purcell Radiation in Laser-plasmas Interaction”
Journal of Physics in press 2008

(3)-4

20. Takeshi Higashiguchi, Nobuo Ohata, Kun Li, and Noboru Yugami., “Observation of temporal behavior of the emission frequency from an ultrashort, high-power, and compact millimeter-wave source”, Applied Physics Letters **90**, pp. 111503 (2007).

(2) 特許出願

平成 19 年度 国内特許出願件数:0 件(CREST 研究期間累積件数:3 件)