

「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クス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クス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、

昨年度に引き続き本研究計画を推進するため、既存のレーザー整備を行った。設備整備を前半で終了し、機能性コヒーレント高エネルギープラズマに関する本格的な実験を開始すると同時に機能性を評価に関する実験を開始した。

### 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による高効率レーザー集光の実証

- ・ 相対論振動プラズマミラーによる高エネルギー電子生成とその伝搬
- ・ 高繰り返し対応可能なプラズマフォトリ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]

- ・ 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
- ・ 電子ビームガイド極細線固体密度プラズマ生成用マイクロパルスパワー高速化

#### [電磁波発生デバイス]

- ・ レーザー誘起 MeV 電子による高速マルチポイント X線放射実験
- ・ レーザー誘起 MeV 電子によるスミスパーセル放射による高輝度テラヘルツ発生評価
- ・ DARC(dc to ac radiation converter)による高輝度テラヘルツ光源開発.

高強度テラヘルツ電磁波発生のための DARC の実験がようやく開始できる状態となった。現時点では、目標のテラヘルツ領域より低い電磁波帯で電磁波が観測されているが、今後、装置の最適化などを進めることにより、高強度テラヘルツ電磁波の観測が期待される。

#### 今後の見通し

レーザー整備、計測器開発、数値計算評価などを行い (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開始した。21年度はこれらをさらに進め、デバイスとしての可能性、性能評価を行い次年度以降の総合評価装置の設計に役立てる予定である。

## 2. 研究実施内容(文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

### (1)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。

#### (1)-1 [新しいプラズマ集光光学系による高効率レーザー集光の実証]

(主要論文: Nature Photonics submitted 2009)

従来、超高強度レーザーの集光光学系は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光学系の F 値に制限があった。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 1 に示す回転楕円体による集光光学系を超高強度レーザーに適用した。結果、従来の集光強度の 10 倍高い強度を実現するができた。さらに高エネルギー密度プロトンビームの生成を行った結果、反射率 50% にもかかわらず、プロトンの最大エネルギーは 5 倍以上増加した。これらの成果は国際強化策による日仏共同実験の成果である。

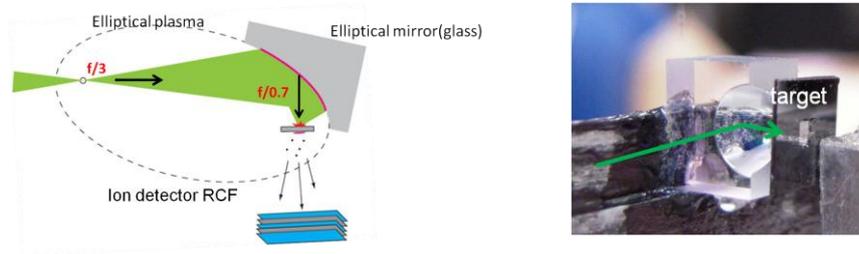


図1. 回転楕円体プラズマ集光光学系配置図とプラズマミラー

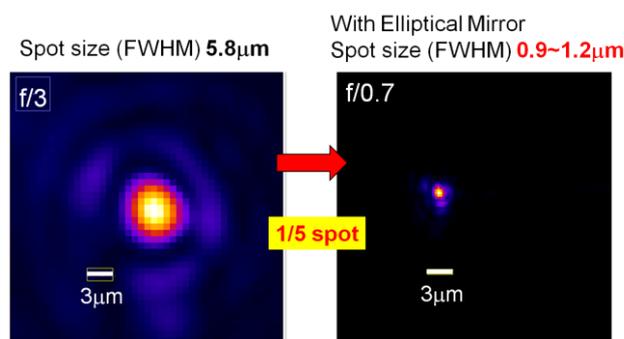


図2. プラズマミラーを使用した場合と使用しない場合の集光スポットサイズ

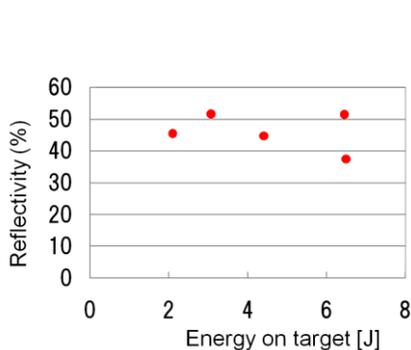


図3. プラズマミラー反射率

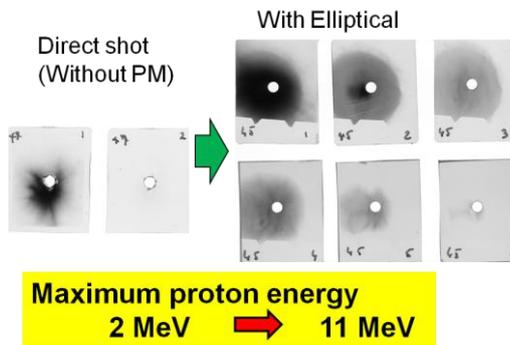


図4. プラズマミラー集光によるプロトンビーム

### (1)-2 [相対論振動プラズマミラーによる高エネルギー電子生成とその伝搬]

(主要論文: Phys. Rev. Lett. 102, 45009 1-4(2009))

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こし反射光は強い変調を受けて反射する。その結果、バンチした反射光による電子は加速することを初めて実証した。さらに、この加速電子による細線プラズマ中の伝搬と加熱の詳細を実験およびシミュレーションで明らかにした。

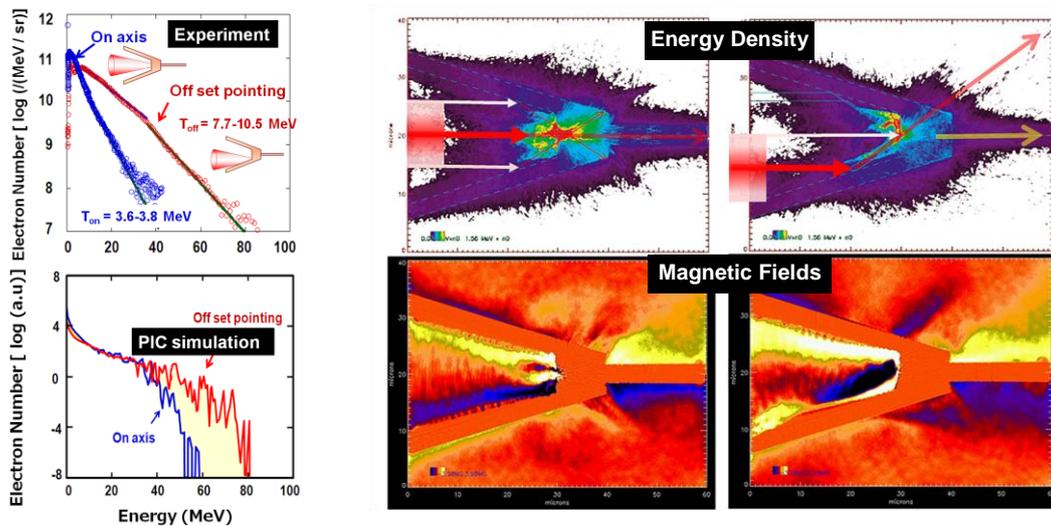


図5. 相対論プラズマミラーによる電子生成と細線プラズマデバイス伝搬・加熱

### (1)-3 [高繰り返し対応可能なプラズマフォトリックデバイスの開発]

光分散デバイスとして1の超高速過渡応答を持った高密度デバイスの逆の極限として低損失長尺化が可能な低密度プラズマとして大気圧放電を利用したデバイスを提案している。屈折率変化として通常のファイバグレーティング程度のものが可能なことが明らかになってきたが、この初期状態を作る手法としてレーザー書き込みを考えている。今年度はエネルギーが比較的とれるナノ秒の紫外 KrF レーザーを用いた行ったが、作動ガスとして窒素を用いた場合には、十分な初期密度構造を作ることができないことが分かった。そのために、フェムト秒レーザーパルス列を発生させるレーザーシステムを注入同期ベースで行うシステムを準備している。

### (1)-4 [固体-プラズマ中間状態層(Warm dense matter)の状態方程式データベース構築とそのモデル化]

回折格子などプラズマを用いて光分散性の優れたデバイスを設計するためには、従来のプラズマが持つ自由電子様な光学応答だけでなく、原子分極を基礎とした特性に置き換える、双方の差分を大きくする条件を見出すことが重要になる。

ことが必要になる。今年度は特に可視域においてこの原子分極の極値となる波長、元素、条件を見出すための研究を行った。その結果、Mo, W, Al において特徴的な極を示すものがあることがわかった。特に Al, Mo では、従来、比較的自由電子応答が強いと考えられていた高密度状態で大きなパラメータ変化が期待できる短寿命(広帯域)の極が見つかりつつあり、この最適化条件を実験的に求めている。

また、このような最外殻電子状態を超短パルスレーザーなどで制御する場合に、固体の持つバンド端が変化することで大きな光学特性変化が期待できると考えられてきたが、ここでは、その詳細物理モデルを構築するために、高密度状態にある物質内で原子がクラスタを構成するようになることで新しいエネルギーバンド構造を持ち、バンドエッジシフトが起きることなどを行える物理モデルを開拓した。これにより、ある種の金属元素では、9個程度のクラスタで3価程度のイオン化が起きたとしても結

合状態が崩れない条件があることが明らかになってきた。このことは、バンド構造という固体特有の特性を保ちつつ光学特性を大きく変えられる可能性を意味しており、超高速デバイス、高エネルギー光子の制御用媒質候補として考えられるようになった。

## (2) 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。

### (2)-1[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]

(主要論文: Phys. Rev. Lett. 100, 165001 (2008))

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論文化した。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り、開発中のマイクロパルスパワーを利用したパルス超高磁場により高エネルギー密度電子のコリメーションを行うことを検討した。

### (2)-2[電子ビームガイド固体密度プラズマ生成用マイクロパルスパワー高速化]

19年度開発した、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の高密度プラズマを生成するマイクロパルスパワーの高速化を実現した。これを 10TW レーザーシステムと同期をとり集光チャンバー内でオペレーションできるシステムを開発した。21年度はこれを利用した初めての超高強度レーザー電子ビームガイドを実証する。またマイクロパルスパワーによるパルス高磁場による電子ビームコリメーションを実証するための実験系を設計し21年度実験を開始する予定である。

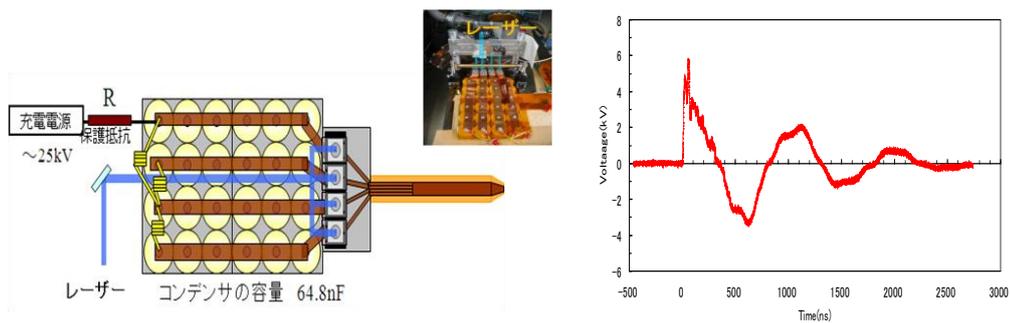


図 6. 超高速マイクロパルスパワーと高速電圧波形

## (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発生デバイスの可能性

### (3)-1 [レーザー誘起 MeV 電子による高速マルチポイント X線放射]

K $\alpha$ 線発生の実験を行った。ターゲットは銅とニッケルをエミッターとしたコーンワ

イヤーターゲットであった。図は X 線ピンホールカメラで取得された発光像であり、レーザーが照射されたコーン先端と共に、銅、ニッケルからの発光が確認された。また、同時に計測した X 線スペクトルから、これらの発光がそれぞれの  $K\alpha$  線であることが確認された。この結果、コーンターゲットで生成された相対論電子ビームがワイヤーをサブミリメートルの距離を伝播し、 $K\alpha$  線を発光させることが可能であることが明らかとなった。

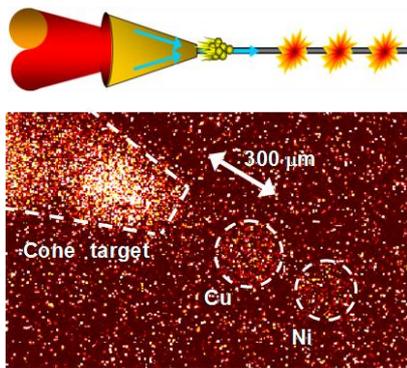


図 7. 高速マルチポイント X 線放射像

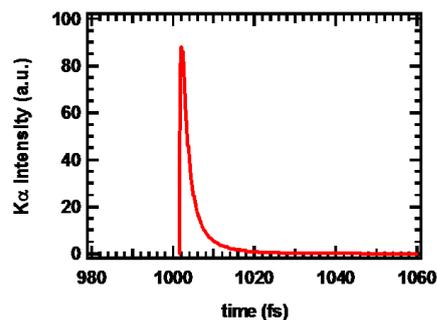


図 8. X 線パルス時間波形 (数値計算)

### (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]

(主要論文: Nature Photonics submitted 2009)

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は既の実証している。20年度はフェムト秒レーザーで生成される波長以下の短バンチ電子ビームによるスミスパーセルテラヘルツ波発生評価をおこなった。コヒーレント変換が期待でき数値評価で可視域に比べ5ケタ近く高輝度のコヒーレントテラヘルツが期待できることが分かった。

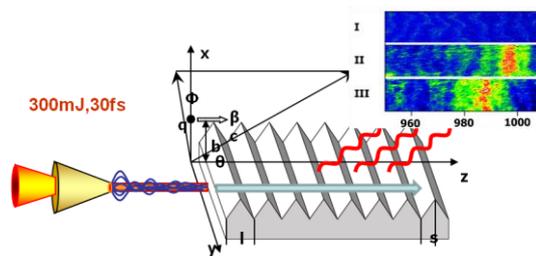


図 9 スミスパーセル放射スペクトル

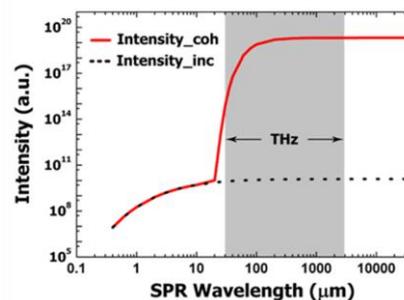


図 10 出力波長依存性

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

高輝度テラヘルツ増幅デバイスを開発するために、DARC(dc to ac radiation converter) をテラヘルツ発生用に改良を行い、実験を開始した。昨年度、半導体結晶を媒質としてテラヘルツ電磁波の発生を確認したが、半導体では高出力化が望めないため、ガスを媒質し、初期に印加する電圧を高電圧化できるように改良を行った。レーザーを強収束す

るため、プラズマの生成領域が限られるため、相互作用長が短くなるため、中空ファイバーを用いて相互作用領域の長尺化を行った。図11に実験装置の外観を示す。真空容器内に、周期 2 mm の DARC の構造体を構築し、そのギャップ間に最大電圧 1 kV を印加し、Ar ガスを電離用レーザーによって電離し、相対論電離面を形成している。電磁波の観測には、光伝導アンテナ(photo conductive antenna)を用いた。現在までに観測されている電磁波の電場波形を図12に示す。この波形より、マイクロ波領域(30 GHz)の電磁波の発生が確認されている。現在、パラメーターの最適化を行っている。

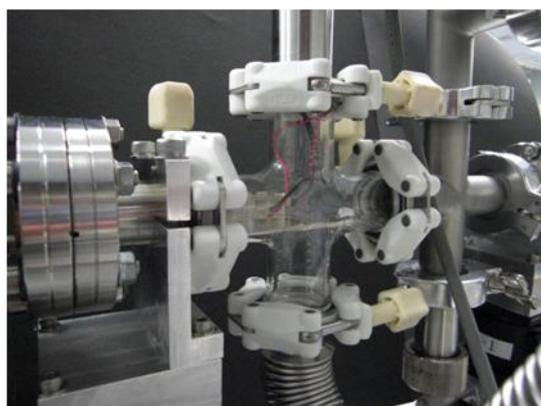


図 11 DARC 外観

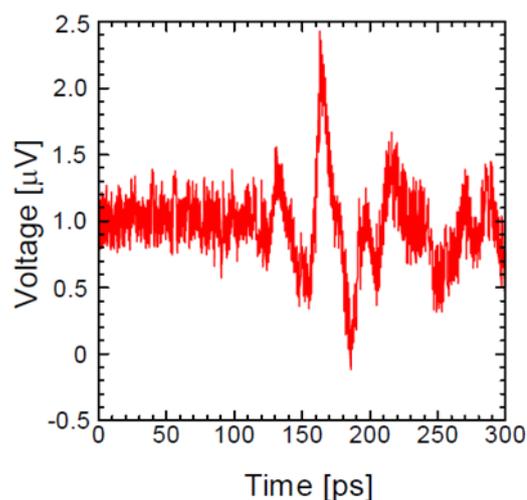


図 12 観測された電場波形

### 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)

#### 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

シングルショットテラヘルツ波計測システム開発

マイクロパルスパワー技術

#### (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、教授)

#### ②研究項目

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

マイクロパルスパワー技術

(2)「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

#### 4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

1. E. Brambrink, H. G. Wei, B. Barbrel, P. Audebert, A. Benuzzi-Mounaix, T. Boehly, T. Endo, C. Gregory, T. Kimura, R. Kodama, N. Ozaki, H.-S. Park, M. Rabec le Gloahec, and M. Koenig,  
“X-ray source studies for radiography of dense matter”  
Phys. Plasmas **16**, 033101\_1-7(2009)
2. J. Rassuchine, E. d’Humières, S. D. Baton, P. Guillou, M. Koenig, M. Chahid, F. Perez, J. Fuchs, P. Audebert, R. Kodama, M. Nakatsutsumi, N. Ozaki, D. Batani, A. Morace, R. Redaelli, L. Gremillet, C. Rousseaux, F. Dorchie, C. Fourment, J. J. Santos, J. Adams, G. Korgan, S. Malekos, S. B. Hansen, R. Shepherd, K. Flippo, S. Gaillard, Y. Sentoku, and T. E. Cowan,  
“Enhanced hot-electron localization and heating in high-contrast ultraintense laser irradiation of microcone targets”  
Phys. Rev. E, **79**, 036408\_1-5(2009)
3. H. Nakamura, B. Chrisman, T. Tanimoto, M. Borghesi, Y. Sentoku, T. Matsuoka, M. Nakatsutsumi, T. Norimatsu, K. A. Tanaka, T. Yabuuchi and R. Kodama  
“Superthermal and efficient-heating modes in the interaction of a cone target with ultraintense laser light”  
Physical Review Letters **102**, 45009 1-4 (2009)
4. Michael C. Rushford, Jerald A. Britten, Christopher P. J. Barty, T. Jitsuno, K. Kondo, N. Miyanaga, K. A. Tanaka, R. Kodama and G. Xu,  
“Sprit-aperture laser pluse compressor design tolerant to alignment and line-density differences”  
Opt. Letters, **33**, 1902-1904(2008)
5. 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. Mackinonnon, 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 **10**, 043046 (2008)

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 **100**, 165001 1-4 (2008)
7. C. D. Gregory, J. Howe, B. Louprias, S. Myers, M. M. Notley, Y. Sakawa, A. Oya, R. Kodama, M. Koenig, and N. C. Woolsey  
 "ASTROPHYSICAL JET EXPERIMENTS WITH COLLIDING LASER-PRODUCED PLASMA"  
 The Astrophysical Journal **676**, 420-426 (2008)
8. Z. Jin, Z.L. Chen, and R. Kodama  
 "Estimation of Smith-Purcell Radiation in Laser-plasmas Interaction"  
 Journal of Phys. **112**, 022087\_1-022087\_4 (2008)
9. 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. Louprias, T. Ma, A. Macphee, A. J. Mackinnon, K. Mima, A. Morace, H. Nakamura, P. A. Norryes, D. Piazza, C. Rousseaux, R. B. Stephans, 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 Phys. **112**, 022063\_1-022063\_4 (2008)
10. D Batani, S Baton, M Koenig, P Guillou, B Louprias, T Vinci, C Rousseaux, L Gremillet, A Morace, R Redaelli, M Nakatsutsumi, R Kodama, N Ozaki, T Norimatsu, J Rassuchine, T Cowan, F Dorchie, C Fourment and J J Santos, "Recent experiment on fast electron transport in ultra-high intensity laser interaction"  
 Journal of Phys. **112**, 022048(2008)
11. J Rassuchine, E d'Humières, S Baton, J Fuchs, P Guillou, M Koenig, R Kodama, M Nakatsutsumi, T Norimatsu, D Batani, A Morace, R Redaelli, L Gremillet, C Rousseaux, F Dorchie, C Fourment, J J Santos, J Adams, G Korgan, S Malekos, Y Sentoku and T E Cowan, "Enhanced energy localization and heating in high contrast ultra-intense laser produced plasmas via novel conical micro-target design",  
 Journal of Phys. **112**, 022050\_1-022050\_4 (2008)
12. A Lei, W Yu, Y Tian, H Xu, X Wang, X Yang, V K Senecha, K A Tanaka and R Kodama, "Effect of focus position on a high intensity laser propagation in a dense plasma",  
 Journal of Phys. **112**, 022089\_1-022089\_4 (2008)
13. T Yabuuchi, Y Sentoku, H Habara, T Matsuoka, K Adumi, Z Chen, R Kodama, K Kondo, A L Lei, K Mima, M Tampo, T Tanimoto and K A Tanaka, "Hot electron emission limited by self-excited fields from targets irradiated by ultra-intense laser pulses",

- Journal of Phys. **112**, 022093\_1-022093\_4 (2008)
14. T Tanimoto, A L Lei, T Yabuuchi, H Habara, K Kondo, R Kodama, K Mima and K A Tanaka,  
"Hot electron spatial distribution under presence of laser light self-focusing in over-dense plasmas",  
Journal of Phys. **112**, 022095\_1-022095\_4 (2008)
  15. W Yu, L Cao, H Xu, A Lei, X Yang, K A Tanaka and R Kodama,  
"Plasma hole boring by multiple short-pulse lasers",  
J. Phys. Conf. Ser., 112(2), 022100\_1-022100\_4 (2008.06.12)
  16. N Nakanii, K Kondo, Y Mori, E Miura, K Tsuji, K Takeda, S Fukumochi, M Kashihara, T Tanimoto, H Nakamura, T Ishikura, M Tambo, R Kodama, Y Kitagawa, K Mima and K A Tanaka,  
"Electron acceleration in imploded hollow cylinder",  
Journal of Phys. **112**, 042041\_1-042041\_4 (2008)
  17. N. Nakanii, K. Kondo, Y. Kuramitsu, Y. Mori, E. Miura, K. Tsuji, K. Kimura, S. Fukumochi, M. Kashihara, T. Tanimoto, H. Nakamura, T. Ishikura, K. Takeda, M. Tambo, H. Takabe, R. Kodama, Y. Kitagawa, K. Mima and K. A. Tanaka,  
"Spectrum modulation of relativistic electrons by laser wakefield"  
APPLIED PHYSICS LETTERS **93**, 081501(2008)
  18. S. D. Baton, M. Koenig, J. Fuchs, A. Benuzzi-Mounaix, P. Guillou, B. Loupias, T. Vinci, L. Gremillet, C. Rousseaux, M. Drouin, E. Lefebvre, F. Dorchies, C. Fourment, J.J. Santos, D. Batani, A. Morace, R. Redaelli, M. Nakatsutsumi, R. Kodama, A. Nishida, N. Ozaki, T. Norimatsu, Y. Aglitskiy, S. Atzeni, and A. Schiavi,  
"Inhibition of fast electron energy deposition due to preplasma filling of cone-attached targets",  
Physics of Plasmas **15**, 042706(2008)
  19. 米田仁紀  
"warm dense matter 物質の電離・励起構造と物性"  
プラズマ・核融合学会誌、**84**, No.6, 369-373(2008)
  20. H. Kitamura  
"Predicting the gas-liquid transition of mercury from interatomic many-body interaction"  
J. Phys.: Conf. Series **98**, 052010 pp.1-4 (2008)
  21. H. Kitamura  
"Cluster-model study on the K-shell excited states of crystalline lithium under intense laser irradiation"  
accepted in Eur. Phys. J. D 2008.

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 3 件)