

高いエネルギー密度状態の科学とプラズマフォトニクス



研究ノート

兒玉了祐*

Plasma Photonics in High Energy Density Science

Key Words : plasma photonics, plasma device, high energy density science, high power laser

1. 高エネルギー密度状態の科学

光は、位相をそろえることで時間的、空間的に極めて小さな領域(光の波長程度)にエネルギーを集中させることができる。レーザー光を利用すれば、人類が手にしたどの技術より効率的にエネルギー密度を上げることができる。これは、より小さなエネルギーでより高いエネルギー密度状態を実現できることを意味する。近年の高出力レーザー技術の進歩により、未開拓の高いエネルギー密度状態の環境が比較的容易に実現できるようになった。これまで実現しなかった新しい物質状態が可能となり、従来にない新しい科学技術が生まれようとしている。

図1は、現在のレーザー技術またはその延長の技術により開拓できる高エネルギー密度状態の領域(温度と密度)を示している。高エネルギー密度状態とは、明確な境界があるわけではないが、通常、固体の格子構造が壊れプラズマになりかける状態より大きなエネルギー密度の状態を言う。エネルギー密度としては、1立方センチメートルあたり10-100億ジュール以上、圧力として1億気圧以上に相当する。高出力レーザーで可能性な領域は、金属水素、固体-プラズマ中間状態(warm dense matter), フェルミ縮退、イオン強結合状態など高エネルギー凝縮物性、輻射が流体に影響を強く与える輻射流体、相対論プラズマ、反物質(陽電子)プラズマといった様々な物理過程を伴った状態が含まれる。

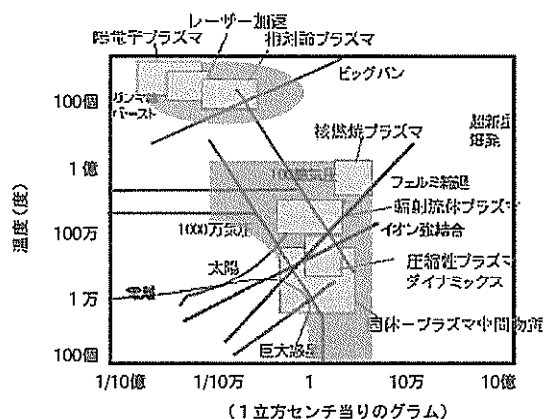


図1 高エネルギー密度状態を示す密度-温度マップ

高エネルギー密度状態の科学は、単に多くの物理過程を含んだ未開拓領域の探査だけではない。超コンパクト荷電粒子加速器、コンパクトコヒーレントX線源(X線レーザー)、超高輝度短パルス極端紫外-X線源、超高輝度パルス放射線源、コンパクトレーザー核融合(高速点火)など新しい科学技術の可能性を秘めた金脈とも言える領域である。そのため高エネルギー密度状態の科学として世界中で精力的な研究が進められている。米国では、新しい核融合と高エネルギー密度領域の開拓を目的とした国立研究所、大学による全米ネットワークとバーチャル研究センターができた。欧州では、ラザフォード研究所(英国)エコール工科大学(仏国)などを中心としたEUネットワークが既に存在し、高出力レーザープラズマ応用の研究が欧州連合として行われている。中国でも高出力レーザー応用は、国家プロジェクト的に最重要課題の1つとして位置づけられている。

一方、わが国では、残念ながら欧米中国のような包括的な取り組みは未だなされていない。我が国の高出力レーザーを利用した応用研究も、世界的な成

* Ryosuke KODAMA
 1961年4月生
 1990年大阪大学・大学院工学研究科・電気工学専攻修了
 現在、大阪大学・大学院工学研究科・電気電子情報工学専攻、教授、博士(工学)、プラズマ理工学
 TEL 06-6879-7800
 FAX 06-6879-7760
 E-mail: kodama@eie.eng.osaka-u.ac.jp



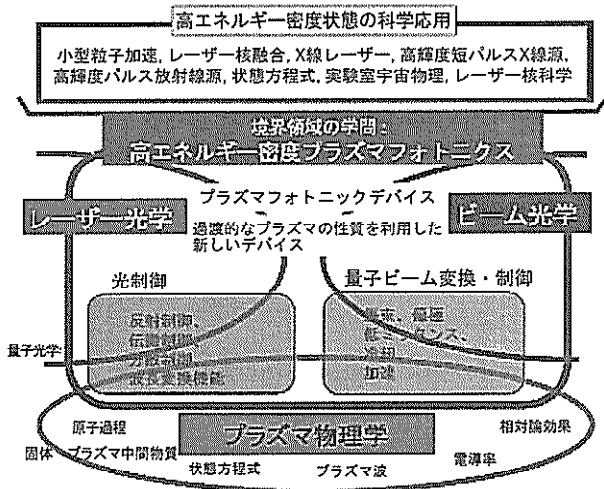


図2 高エネルギー密度状態の科学を支える新しい境界学問領域としてのプラズマフォトンクス

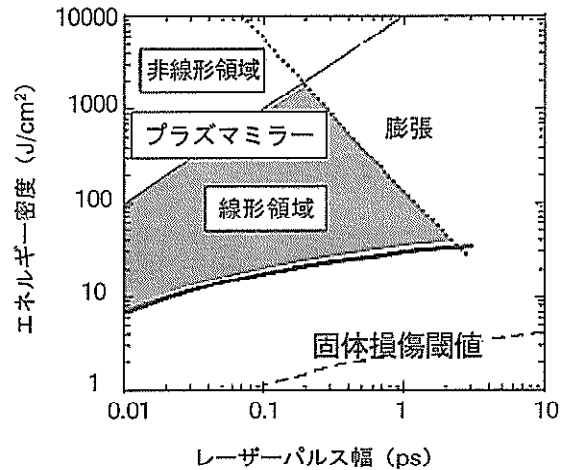


図3 固体の損傷閾値とプラズマミラーが使える領域

果をあげてはいるが、それぞれの応用に特化した形で個別に進められている。このような状況において、それぞれの応用(縦糸)に対して横断的な連携を可能にする我が国オリジナルな学問体系(横糸)として“高エネルギー密度のプラズマフォトンクス^[1]”を提案している。プラズマ物理学を基本とし、レーザー光学と粒子ビーム光学の境界領域を体系化する試みである(図2)。過渡的なプラズマの性質を利用して、高いエネルギー密度のレーザー光や荷電粒子ビームの伝播などを制御するための学問である。

2. 光制御プラズマデバイス

高密度プラズマが持っている高いエネルギー密度性は、それに対応するエネルギー密度の高強度光を制御できることを意味する。もっとも典型的な光制御デバイスとしてプラズマミラー^[2]がある。これは、現在人類が手にできる最も強い鏡といえる。通常の固体ミラーの損傷閾値に比べ1桁から2桁以上高い強度の光を操ることができる(図3)。従来、高出力レーザーシステムに使用される大型光学素子を極端に小さくできる可能性を内在している。さらにプラズマの非線形性を利用することで光の時間、空間フィルターの機能を有した高機能デバイスにもなる。

その他、光ガイド機能(利得ガイド^[3,4]、コーンガイド^[5])、分散機能(ラマン圧縮^[6])、波長変換機能光機能を有したプラズマデバイスがこれまで提案・実証されている。特にコーン光ガイドは、レーザー核融合における効率的なプラズマ加熱^[7]を可能にする

重要なプラズマデバイスとして位置づけられている。さらに、最近の研究の結果、電磁誘導透過を利用した複素屈折率制御。それによる超高出力Thz波発生デバイス、負の屈折率デバイス、光の速度を極端に抑え強い分散を与える機能を有したデバイスの可能性が示唆されており、フォトリックプラズマと位置づけられるような機能も将来期待されている。

3. 荷電粒子ビーム制御プラズマデバイス

高エネルギー粒子ビームの分野ではプラズマレンズ^[8]やプラズマ偏向^[9]などプラズマを利用した高エネルギー粒子ビームの方向制御、粒子ビームによるプラズマ中での航跡場を利用したプラズマ加速ブースター^[10]などの研究が進められている。レーザー生成高エネルギー密度粒子ビームを含め、これらを体系化することで、高エネルギー密度状態の科学をより効率的に発展させる可能性がある。

このような見地にたち、レーザー生成高エネルギー密度粒子ビームを光制御するがごとく操ることができるプラズマフォトリックデバイスが発明された^[1]。これは、レーザーエネルギーをより効率よく高エネルギー電子数(100億電子ボルト/1億アンペア相当)に変換し、さらに光コリメーターレンズとファイバーで光を制御するがごとく、高エネルギー密度電子を操ることができるデバイスである(図4)。その結果、従来の方式に比べ100分の1以下のレーザーエネルギーで同様の高エネルギー密度状態を得ることができた。さらに、高エネルギー密度電子の横方向エミットン

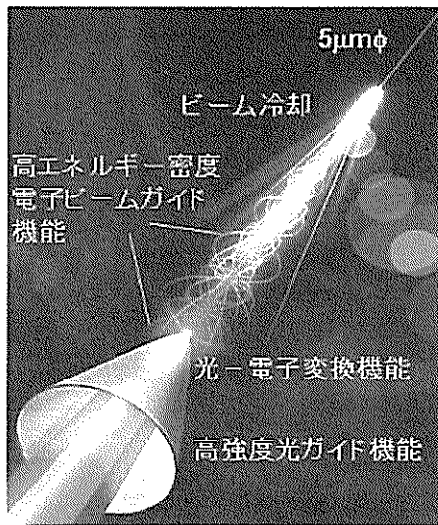


図4 高エネルギー密度電子ビームをガイド、コリメートし冷却するプラズマフォトニックデバイスのイメージ図

スを下げるビーム冷却の機能も有した高機能性プラズマデバイスである。

この新しいデバイスは、従来の開発パターンに見られるように、ある1つの目標のために開発されたプラズマ幾何学配置ではなく、プラズマデバイスとしての機能性を目的に考案されたものである。従って、新しいX線源、電子ビーム源、粒子加速、X線レーザーさらに、超高压状態方程式、高速点火核融合、実験室宇宙物理になど様々な分野に役立つ可能性が注目されている。

4. おわりに

高出力レーザーによる高エネルギー密度状態の科学は、学術的な新規性、応用の可能性から欧米中国で精力的かつ包括的な研究が進められている。このような状況においてプラズマ物理学だけでなく、新たに高エネルギー密度プラズマフォトンクスという我が国オリジナルな応用物理学的な学問的体系化により、様々な応用研究の学問的な連携が期待できる。結果として、より効率的なプラズマデバイス開発が可能となり国際的にも十分な競争力をもって高エネルギー密度状態の科学を開拓することができる。

参考文献

- [1] R.Kodama et al., Nature 432, 1005 -1008 (2004).
- [2] A. N. Malkov et al., JET Lett. 33, 615 - 618 (1981).
- [3] R. A. London et al., Phys. Rev. Lett. 65, 563 -566 (1990).
- [4] R. Kodama et al., Phys. Rev. Lett. 73, 3215 (1994).
- [5] R. Kodama et al., Nature 412, 798-802 (2001).
- [6] V. Malkin et al., Phys. Rev. Lett. 82, 4448 -4451 (1999).
- [7] R. Kodama et al., "Nature 418, 933 - 934 (2002).
- [8] P. Chen, Phys. Rev. Lett. 64, 1231-1234 (1990).
- [9] P. Muggli et al., Nature 411, 43 (2001).
- [10] P. Muggli et al., Phys. Rev. Lett. 93, 014802 (2004).

