

## 講座

# レーザー生成プラズマの新しい温度、 密度領域における物性とシミュレーション

## Material Property and Simulation Methods Applicable to Laser Produced Plasmas in the New Density and Temperature Region

### 1. はじめに

#### 1. Introduction

大道博行, 佐々木 明<sup>1)</sup>

DAIDO Hiroyuki and SASAKI Akira<sup>1)</sup>

日本原子力研究開発機構敦賀本部レーザー共同研究所, <sup>1)</sup>日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門

(原稿受付: 2013年4月25日)

#### 1.1 はじめに

読者の中には標記タイトルの“新しい”という言葉に奇異な印象を持たれる方も少ないと思われる。本章では今なぜ“新しい”か、を含めて本講座の趣旨を述べることにする。さて1960年、最初のレーザー発振が報告されてから、すぐにレーザーを様々な物質に照射する研究が始まっている[1]。高出力レーザーを気体に照射すると、レーザー電場により絶縁破壊が起こり可視光のスパークが観測され、1963年パリで開催された量子エレクトロニクス国際会議(IQEC)で大きな話題となった[2]。その直後、高強度レーザーを固体物質に照射しプラズマが発生することが報告されている[3]。これらの成果は、種々枝分かれして、それぞれ独自の発展を遂げつつある高出力レーザーの応用研究の原点と言っていいであろう。一方、レーザー自身の高性能化も進んだ。モード同期法等、周波数域、空間周波数域のモード制御技術、または時間・空間域の形状制御法が発展し、空間的には単一モードで波長程度の集光サイズ、時間的には広いスペクトルモード間の高い位相相関により極短パルスで高いピーク出力のものが現れ、レーザー集光技術の高性能化、目的に応じた多様化と相まって物質への高度な照射も可能になってきた[4, 5]。さらに1985年のチャープパルス増幅法の発明[6]により時間幅フェムト秒、ピークレーザー強度>数TWのレーザーが信頼性の高い固体レーザー技術により製作可能となった。1990年代に入り小型実験室規模の高強度場科学研究[7]を筆頭に、多

くの科学分野で用いられるようになった。それらの中で、フェムト秒パルスによるナノ構造創製や3次元加工技術などは、近い将来の産業利用をめざしてレーザー照射実験が活発に行われており、同時に理論的研究も進んでいる[8-10]。

一方、連続発振のレーザーも溶接、溶断の用途を中心に高性能化が進んでいる。近年、レーザーダイオード、増幅器の励起法、冷却法の高性能化により薄型ディスクレーザー[11]、ファイバーレーザー[12]が相次いで高出力化に成功した。それらの小型、高効率、シンプルな構成、メンテナンスフリー、光学素子の高耐力化等の性能が評価され、自動車等の工場生産に大規模に用いられるようになってきた[13]。ところで連続したレーザー光の照射は他の熱加工源と単純な比較はできない。これまで開発された多くの優れた熱加工技術と比較しても、レーザー法には他の熱源ではありえない時間・空間的に高速、繊細な変調が可能であることから、連続光源、準連続光源として新たな加工コンセプトのもと、新たな加工分野を形成しつつある[14, 15]。すなわち高度に制御されたレーザー照射により物質の様々な時間・空間スケールの応答に対応した自在な照射の下で革新的な加工が可能になりつつある。この観点に基づくとフェムト秒パルスレーザーやミリ秒パルスレーザーを用いた穴あけ加工にその先駆的な適用例[16-18]があるが、時間・空間的に異なった照射領域における加工メカニズムの究明と、その知見に基づくレーザー照射の最適

Applied Laser Technology Institute, Japan Atomic Energy Agency, Tsuruga, FUKUI 914-8585, Japan,

<sup>1)</sup> Quantum Beam Science Directorate, Japan Atomic Energy Agency, KYOTO 619-0215, Japan

authors' e-mail: daido.hiroyuki@jaea.go.jp, sasaki.akira@jaea.go.jp

化は今後、益々重要な課題になると考えられる。以上述べてきた高出力レーザーを物質に照射することによる物質の改変には、アブレーションとともに起こる電離過程が大なり小なり必ず含まれており、この意味でレーザープラズマが研究対象になる。このようにレーザープラズマは近年、科学研究、産業の中で様々な分野に広がりつつある。その一方で、レーザー照射により有用な現象が見つかる、経験的事実の積み重ねによる技術開発が一気に進み、現象の解明が追いつかないといった現実も見受けられる。

本講座では、この章に引き続き各分野の専門家によるレーザープラズマの新しい展開が紹介される。レーザーと物質との相互作用に関する古くから調べられてきた知見、ならびに最近得られた知見を整理し、広がりつつあるレーザープラズマの境界領域が“新しい領域”における“新しい知見”、“新しい課題”として浮かび上がってくることを期待したい。このようなプラズマ生成の科学的知見に基づいた高度に制御されたレーザー照射法の開拓は学術的意義が大きいだけでなく、その知見を基礎にしたレーザー加工等の産業利用に今後大きな発展が見込める。この点を強調する目的で、あえて“新しい”を講座のタイトルに使用した。

## 1.2 広がりつつあるレーザープラズマの境界領域

### 1.2.1 ナノ秒レーザーパルスによるプラズマの発生

まず、レーザー核融合で想定されているような、時間幅がナノ秒のレーザーでターゲット物質を照射する場合を考え、これまで標準的に用いられてきた理論に基づいて、そのプラズマ生成過程について検討する。一般にレーザー照射によりターゲット表面からプラズマが噴出する時、入射するレーザーのパワーと噴出するプラズマが持ち去るパワーとの間に瞬時に釣り合いが成り立つことが本質と考えることにより、現象は単純化され、定常的なターゲット物質の噴出と、一次元的なプラズマの温度、密度の分布を考えることができる。電子熱伝導の効果によって、プラズマの温度は膨張部において一様となり、密度は、等温膨張の相似解に従い、ターゲット表面から指数関数的に減少する分布を持つ[19, 20]。高温のプラズマがターゲット表面から噴出する反作用（ロケット作用）として、アブレーション

ン圧力が発生する[21]。このような考え方は、慣性核融合のターゲットの爆縮の考え方の基本になり、レーザープラズマの多くの現象を説明するのに成功を収めてきた。

### 1.2.2 レーザー照射初期の物理過程

現在では、1.1はじめに示したように、様々な加工技術など多くの分野でレーザープラズマが深く関与している。このような応用において、固体物質がレーザー照射を受けると、液相、気相の状態への相転移や、電離過程を伴ってプラズマ化する。精度を要求する高度な加工では、溶融、蒸発、凝固と関連するプラズマの過程を詳しく理解して制御することが重要となる。

レーザー核融合の実験において、レーザー光の照射初期のビーム強度パターンに不均一性が存在すると、プラズマの噴出による表面の質量分布の不均一性が生じる。これはイニシャルインプリントと呼ばれ、レーザー核融合の高密度爆縮にとって有害な効果をもたらすことが示されている[22]。このようなプラズマの現象は、レーザー照射初期のごく短時間に起こる過渡的現象で、かつ空間スケールも微細な現象であることから、その実験的な解析にはしばしば特別な技術が必要である。例えば、イニシャルインプリント現象については、レーザー照射初期のアブレーションに伴うきわめてわずかな質量の変化を軟X線レーザーによるプローブ計測で捉える試みが行われている[23, 24]。

一方、このようなプラズマに着目した理論研究も行われている。Anisimovらは、アブレーションの初期過程における熱伝導の性質に注目し、ターゲット物質を、熱伝導の特性や、レーザーが照射された時の初期電子の生成およびレーザー光の吸収の特性ごとにカテゴリーに分けて解析し、溶融や蒸発が起こる界面に不安定性が起こる可能性を理論的に指摘した[5]。このようなプラズマの特性をシミュレーションするには、相転移過程の温度や密度の3次元空間分布の急速な変化や、その確率論的な振る舞いを取り扱うが必要になる。

図1はプラズマ生成過程の一例を示す。レーザー照射により、はじめに、多光子過程やレーザー電界による電離で自由電子が生成し、自由電子はレーザーの電界でさらに加速され、固体中の格子と衝突しターゲット物質は加熱される。次に、ターゲット物質は溶融、蒸発し、一部プラズマ

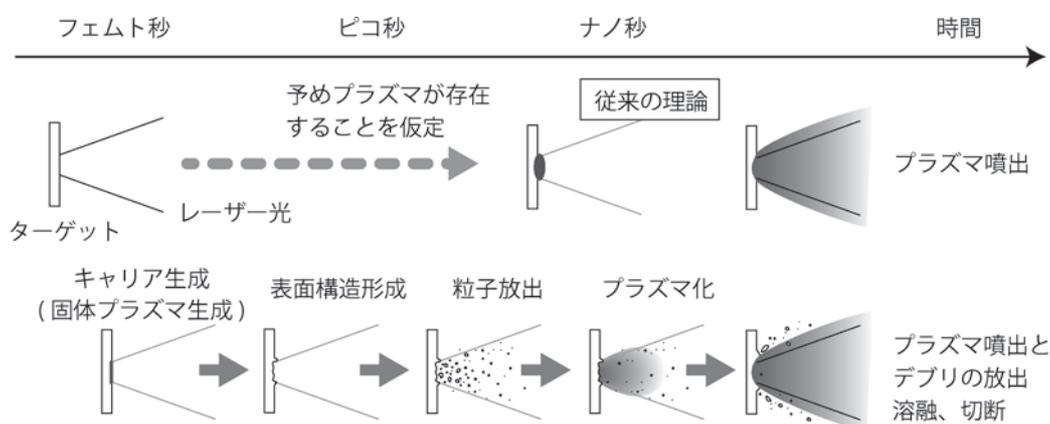


図1 レーザー照射によるプラズマ生成のメカニズム。

化した高温の粒子が発生し、それらの粒子とレーザー光の相互作用によって、密度の低下したガス状のプラズマブルームが生成する。レーザー照射後のスポットにみられる痕跡や、発生するデブリなどから、照射領域とその周辺で複雑な物理過程が存在することが類推される。

なお、図1のような、表面の構造形成や粒子発生などの現象は、レーザー照射プラズマにおいて常にこのような順序で発生するというよりは、むしろ、レーザー核融合、EUV光源、レーザー加工それぞれの照射条件において、異なった現れ方をする。レーザー光で固体ターゲットを照射した場合、強度の強いスポット中心部ではプラズマが生成する一方で、周辺部からは、溶融したターゲット物質のデブリとしての放出が起こる場合もある。

実際、矢部らはナノ秒レーザーをアルミニウムターゲットに照射して得られる照射領域からのデブリの空間分布の観測結果と、独自に開発したシミュレーションコードによる結果を比較対比することにより、レーザープラズマとその周辺の複雑な過程の説明に成功している[25]。関連する研究として、ナノ秒レーザー照射により、例えば材料表面に流した水の中にプラズマを生成し、その圧力により材料の応力分布を制御することを目的にしたピーニングへの応用がある[26,27]。また長年に亘り研究されてきたEUV(極端紫外)光源の最近の話題の一つに、短パルスプリパルスとナノ秒メインパルスを組み合わせた照射による高効率EUV光発生技術がある[28]。これは1990年代、軟X線・EUVレーザーで用いられ、発振波長を広げ、高効率化に貢献した手法と同様なものであり[29]、低強度プリパルス照射で放出されるプラズマや中性粒子とメインパルスとの相互作用を、望まれるパラメータのレーザープラズマの高効率生成のために積極的に利用したものである。

### 1.2.3 レーザーによる溶接・切断技術の物理過程

溶接、切断などのレーザー加工においては、ターゲット物質の溶融、蒸発とデブリの発生などが、空間的に移動しながら、時間的にはできるだけ定常的に起こるように、種々の条件を設定することが求められる。連続出力レーザーによる溶接現象のX線管を用いたりリアルタイム観測[30]や大型放射光施設SPring-8を用いた同様の研究もある[31]。また第一原理計算による金属の溶融・蒸発現象の初期過程のシミュレーション[32]、伝熱特性のシミュレーション[33]、流体モデルによる伝熱・対流シミュレーションなどが行われている[34,35]。

### 1.2.4 超短パルスレーザー

レーザーのパルス幅、フェムト秒から数ピコ秒までの超短パルスレーザー照射による微細構造の生成に関しても研究は進んでいる[36,37]。例えば波長以下の空間的構造形成やナノメートルサイズの粒子発生の観測があり、生成機構の検討も行われている[9]。一方、主として超高速過程の直接観測の観点から、レーザー照射面の極微小な変位の測定を可能にしたパルス幅数ピコ秒の軟X線レーザーを用いた干渉計測[38]、レーザー照射により物質中の格子の崩れていく様子[39,40]や溶融の初期過程の直接観測[40]がレーザープラズマからの超短パルス内殻遷移X線を用いた

時間分解X線回折によって観測されている。また、超短パルス高強度レーザー照射によって地上では容易に発生できない物質状態の発生が可能になる。例えば固体の炭素にレーザーを照射することにより瞬時に液体にする。同時に反射率の測定を行い、電気抵抗を評価する実験が行われ話題になったことがある[41,42]。超短パルスレーザーの固体への照射により、固体の規則的構造を保ちつつ、電離を起こしている状態、すなわち固体とプラズマの両方の性質を有するWarm Dense Matter[43]のような地上ではきわめて特殊な状態を生成することも可能であり、種々工夫を凝らした研究が行われている。このようにレーザーにより様々なプラズマを自在に生成することが可能になり、多種多様な研究が可能になっている。これも研究の境界が“新しい領域”に広がりつつあることを示している。

## 1.3 本講座の対象

### 1.3.1 広い範囲のレーザープラズマ相互作用

図2にはレーザーの時間幅を横軸にして、本講座のテーマをリストアップした。まず非熱的領域に注目してみよう。パルス幅数ピコ秒以下の超短パルスレーザーの場合は2の液体を通過することなく、直接物質が剥がれていくことなども提唱されている[44]。またそれを用いて、ナノメートルスケールの微細構造形成や微粒子生成などの新しい応用が可能になり[45,46]、固体物性の立場でのモデリング、シミュレーションも行われるようになった[47]。

レーザー照射時に熱伝導が支配的になる高強度レーザー光の固体ターゲット照射においては、照射部の高密度・高温プラズマと同時に固体、液体状態のデブリの放出が観測されている。応用分野の必要に応じてレーザー照射時間に比べ時間スケールの桁違いに長い周辺部の溶融、剥離現象も物理的に把握していくことが求められている。連続光を用いたレーザー加工(溶接、切断)においては固体の溶融、蒸発がほぼ連続的かつ定常的に起きており、パルスレーザー照射における照射周辺部の物理過程と重なる部分や異

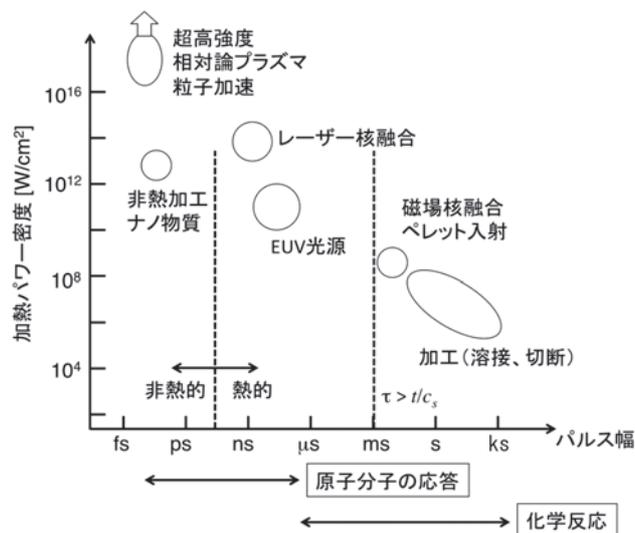


図2 本講座で取り扱う課題を、照射レーザーの強度とパルス幅および、現象のタイムスケールに対するマップ上です。

なる部分など、興味深い課題も様々浮かび上がってくる。有意義な課題抽出のためにも、これら各レーザー照射時間幅と対応する物質の特徴的な時間応答を整理しておくことは価値があると思われる[48]。一方、磁場閉じ込め核融合の核融合プラズマ密度を上げることが目的であるペレットインジェクション技術における射出ペレット（固体物質）とその周囲の高温プラズマによる溶発過程は、中性ガスの熱的シールドによる比較的緩やかな熱の移動による溶融・蒸発過程とするモデルがよく成り立っているとされている[49]。固体からプラズマへ転移していく過程にはレーザー加熱と共通する部分、共通しない部分があり、それらを比較対比することによって有用な知見が得られることが期待される。例えばレーザー加熱による固体と液体、気体境界における熱伝導など、インジェクションにおける物理過程との比較は興味深い。この研究の主たる目的である核融合燃料の供給とともに、それを用いたプラズマの計測技術としての研究開発が活発に進められており[49,50]、広い意味での熱源によるプラズマ生成に、異分野間の交流による“新しい知見”がもたらされることを期待したい。

### 1.3.2 シミュレーションの対象

ここで述べた諸点に留意して周辺分野を眺めると、固体物性や、熱流体の立場での、レーザーと物質の相互作用の研究も活発に行われている。図1にもう一度着目する。およそパルス幅数ピコ秒以下の領域では、非熱的な相互作用によって初期のプラズマが生成する。この過程について、第一原理に基づくポテンシャルの仮定のみに基づく分子動力学からマクロな物理量の関係を物理の法則に基づいて把握する所謂現象論的な手法も含むモデリングが行われている[32]。ミリ秒より長いパルス幅では、ターゲット物質の溶融、蒸発を経て、固体物質が連続的にプラズマ状態へと遷移する過程のモデル化、シミュレーションが行われている[25,35]。これらの計算は、実験と連携し、観測結果と比較しながら行うことが可能であり、それを通じて、各領域のより深い理解と、より広い応用可能性を展望することが可能になるものと期待される。プラズマ物理学が対象とする広い温度、密度領域の中における、本講座の対象領域を図3に示す。地上で通常見ることのできる固体密度周辺の広い温度範囲を取り上げており、古くからある対象でありながら、“新しい観点”、“新しい計測”、“新しいシミュレーション手法”を導入することにより、“新たな挑戦”の対象となっていることを講座の中で示していきたい。

### 1.4 本講座の構成

以上の問題意識の下に、本講座では、以下の構成にした。本講座の目的および取り上げる対象を第1章で論じ、以後の各章の基礎となる物理を第2章で論じるとともに、実験と緊密に結びついたシミュレーションを中心に種々の分野の事例を第3章から第5章にわたり紹介し、第6章でまとめを行い、同時に今後の課題等を提示する。各章の表題と執筆者は以下のとおりである。

1. はじめに（大道、佐々木）本章
2. プラズマの状態方程式（モア）

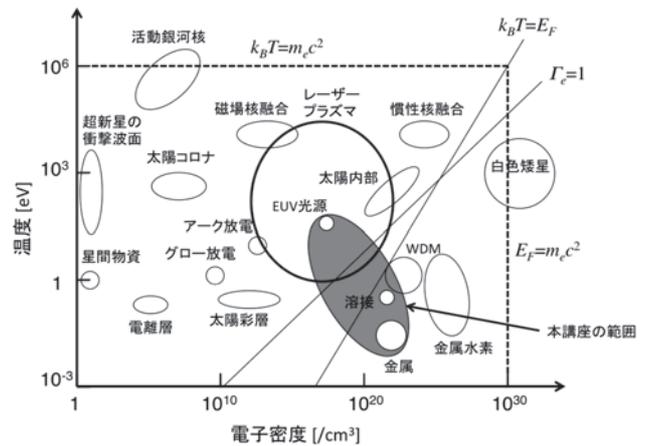


図3 プラズマ物理学の種々の研究課題が対象とする温度、密度範囲と、今回の特集で主に取り扱われるレーザープラズマの範囲および、各章で議論される代表的な応用のうち、放射流体が問題となるEUV光源や、熱流体として扱われる加工（切断、溶接）が対象とする領域を示す。

3. EUV光源やICFにおけるレーザープラズマ相互作用の初期過程（砂原）
4. 固体物性からみたレーザーアブレーション（富田）
5. レーザー加工のシミュレーション（村松，山田，山下，杉原）
6. 磁場閉じ込め核融合におけるペレット溶発の物理と応用（坂本）
7. レーザープラズマ相互作用において問題となる物質状態に関する考え方のまとめ（米田）

### 参考文献

- [1] T.P. Hughes, *Plasma and Laser Light* (Adam Hilger Ltd, London, 1975), and references cited therein.
- [2] P.D. Maker *et al.*, *Proc. 3rd International Conference on Quantum Electronics*, Paris (New York, Columbia Univ. Press, 1964) Vol. 2, 1559.
- [3] F. Haught and D.H. Polk, *Phys. Fluids* **9**, 2047 (1966).
- [4] M. von Allmen and A. Blatter, *Laser-Beam Interactions with Materials*, 2nd Edition, (Springer Berlin, Heidelberg, New York, 1995).
- [5] S.I. Anisimov and V.A. Khokhlov, *Instabilities in Laser-Matter Interaction* (CRC Press Boca Raton, London, Tokyo, 1995).
- [6] D. Strickland and G. Mourou, *Opt. Commun.* **56**, 219 (1985).
- [7] 例えば大道博行：レーザー研究 **31**, 698 (2003).
- [8] 橋田昌樹 他：レーザー研究 **33**, 514 (2005).
- [9] 橋田昌樹 他：第78回レーザー加工学会講演論文集 **87** (2012).
- [10] P. Balling and J. Schou, *Rep. Prog. Phys.* **76**, 036502 (2013).
- [11] A. Giesen and J. Speiser, *Proc. SPIE* **8547**, 85470B (2012).
- [12] D.J. Richardson *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.* **B27**, B63 (2010).
- [13] 佐藤彰生：第78回レーザー加工学会講演論文集 **25** (2012).
- [14] 片山聖二：レーザー加工学会誌 **13**, 259 (2006) および 片山聖二：レーザー加工学会誌 **15**, 35 (2008).
- [15] 新井武二：レーザー加工学会誌 **15**, 255 (2008).
- [16] B.N. Chichkov *et al.*, *Appl. Phys.* **A63**, 109 (1996).
- [17] A.H. Khan *et al.*, *Optics and Lasers in Engineering* **44**, 826

- (2006).
- [18] C. Momma *et al.*, *Opt. Commun.* **128**, 101 (1996).
- [19] 例えば M. Murakami, *Phys. Plasmas* **12**, 062706 (2005).
- [20] M. Murakami *et al.*, *Phys. Plasmas* **12**, 062706 (2005)およびその参考文献を参照.
- [21] 例えば B.H. Ripin *et al.*, *Phys. Fluids* **23**, 1012 (1980).
- [22] C.J. Pawley *et al.*, *Phys. Plasmas* **6**, 565 (1999).
- [23] M.H. Key *et al.*, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **54**, 221 (1995).
- [24] D.H. Kalantar *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 3574 (1996).
- [25] 矢部 孝：レーザー研究 **26**, 788 (1998).
- [26] 佐野雄二 他：レーザー研究 **26**, 793 (1998).
- [27] 佐野雄二：表面技術 **60**, 698 (2009).
- [28] T. Akiyama *et al.*, *J. Plasma Fusion Res. SERIES*, Vol. 8, 496 (2009).
- [29] H. Daido, *Rep. Prog. Phys.* **65**, 1513 (2002).
- [30] 松縄朗, 片山聖二：レーザー研究 **26**, 783 (1998).
- [31] T. Yamada *et al.*, *Proc. 12th Int. Symp. Laser Precision Micro-fabrication* (2011) paper number #11-055 Tu3-O-7, Att 0091
- [32] 大村悦二, 宮本 勇：レーザー研究 **26**, 800 (1998).
- [33] 例えば, 大中逸雄：コンピューター伝熱・凝固解析入門 (丸善, 1985).
- [34] 田中 学 他：プラズマ・核融合学会誌 **87**, 522 (2011).
- [35] 杉原健太 他：第25回数値流体力学シンポジウム C08-1, 2011年12月 大阪大学.
- [36] 平尾一之, 邸建栄編：フェムト秒テクノロジー基礎と応用 (化学同人, 2006)
- [37] 板倉政明：第77回レーザー加工学会講演論文集 (2012年5月) p.129.
- [38] 富田卓朗 他：レーザー研究 **40**, 592 (2012).
- [39] A. Rousse *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **73**, 17 (2001).
- [40] K. Sokolowski-Tinten and D. von der Linde, *J. Phys.: Condens. Matter* **16**, R1517 (2004).
- [41] D.H. Reitze *et al.*, *Phys. Rev. B* **45**, 2677 (1992).
- [42] N. Bloembergen, *Nature* **35**, 110 (1992) (News and Views).
- [43] 米田仁紀：プラズマ・核融合学会誌 **81**, 172 (2005).
- [44] B.J. Demaske *et al.*, *Phys. Rev. B* **82**, 064113 (2010).
- [45] 藤田雅之, 橋田昌樹：プラズマ・核融合学会誌 **81**, Suppl., 195 (2005).
- [46] H. Azuma *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, L1172 (2004).
- [47] D. Perez and L. J. Lewis, *Phys. Rev. B* **67**, 184102 (2003).
- [48] A.H. Zewail and J.M. Thomas, *4D Electron Microscopy* (Imperial College Press, 2010) page 3.
- [49] 坂本隆一, 星野光保：プラズマ・核融合学会誌 **83**, 560 (2007).
- [50] N. Tamura *et al.*, *プラズマ・核融合学会誌* **78**, 837 (2002).



だい どう ひろ ゆき  
大道博行

1981年3月大阪大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。大阪大学レーザー核融合研究センターにて超高出力レーザーを用いたX線レーザー等の研究に従事。2000年より(特)原研関西研(現在(独)原子力機構原子力機構・関西光科学研究所)にて極短パルス超高強レーザーを用いた高強度場科学研究, 高エネルギー粒子発生とその利用研究に従事した。2009年より新設された(独)原子力機構・敦賀本部レーザー共同研究所にてレーザーの原子力エネルギー開発への応用とそれを通じた産業利用, それらの基盤的研究およびデータベース構築をめざした研究開発に従事している。



さ さ き あきら  
佐々木明

日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門研究副主幹。主な研究分野：レーザー生成プラズマを用いたEUV光源やX線レーザーの原子過程, プラズマの複雑性の数理モデルとシミュレーションの研究を行っています。趣味：再生可能エネルギーの研究。かつて同じように夢のエネルギーといわれながら, 置くだけで発電し, 燃料不要, 騒音, 排気ガスもなく, 既存のエネルギー源と考えがまったく違うエネルギー源の出現に関心を持っています。