

# レーザープラズマ加速が拓く次世代量子ビーム科学 — 基礎・基盤研究から医療・産業応用まで —



研究ノート

細 貝 知 直\*

Exploring Advanced Quantum Beam Science through Laser-Plasma Acceleration  
— From Foundational Research to Medical and Industrial Applications

Key Words: Laser Wakefield Acceleration, Quantum Beam Science, Laser-Plasma Interaction,  
Beam-Driven Drug Discovery, Laser Peening

## はじめに

筆者は、大阪大学産業科学研究所 第2研究部門(材料・ビーム科学系)において、量子ビーム物理研究分野を主宰している<sup>1)</sup>。本研究室では、高強度の光とプラズマの相互作用を基盤とした量子ビーム科学を軸に、基礎・基盤研究から社会実装に至るまで一貫した研究を展開している。中心となるのは、レーザープラズマ電子加速の代表的手法であるレーザー航跡場加速(Laser Wakefield Acceleration: LWFA)であり、理論・数値計算、実験、応用研究を密接に連携させることで、次世代のビーム科学の創出を目指している。

粒子加速器は、物質構造の解明から医療診断・治療、材料開発に至るまで幅広い分野の研究開発を支えている。しかしその一方で、より高エネルギー・高強度を目指すにつれて装置の大型化が進み、研究利用のハードルが高くなっている。こうした状況の中で、よりコンパクトで柔軟に利用可能な高エネルギー加速器の実現は、基礎科学のみならず産業・医療分野においても重要な課題となっている。本稿では、まずLWFAの原理と実験展開について述べ、続いて理論・数値シミュレーションによる基礎・基盤研究、さらに高エネルギー電子ビームの医療応用(ビーム創薬)、および産業応用(レーザーピーニング)について紹介する。

## レーザー航跡場加速による次世代小型加速器

高エネルギー加速器の小型化に対する有力なアプローチの一つが、レーザー航跡場加速(LWFA)である(図1)。この手法では、高強度レーザーパルスとプラズマとの相互作用によって励起される電子プラズマ波(レーザー航跡場)を利用して電子を加速する。プラズマ中に形成される電場は極めて強く、その加速勾配は従来の高周波加速器の1000倍以上に相当し、約100 GV/mにも達する。このため、従来は大型施設を必要としていたGeV級の電子加速を、飛躍的に小型化できる可能性がある<sup>2)</sup>。

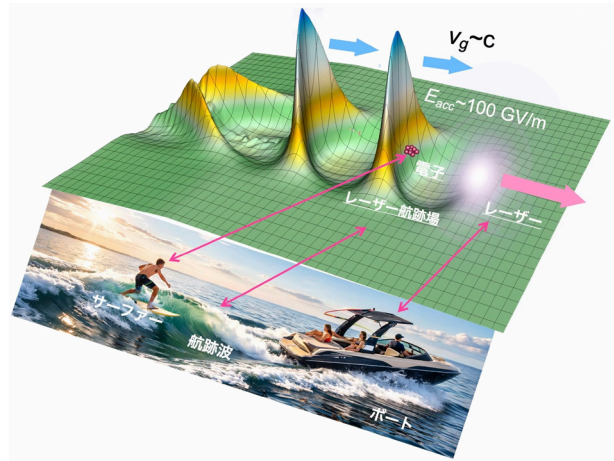


図1 レーザー航跡場加速(LWFA)の概念図。高強度レーザーパルスがプラズマ中を伝播すると、ボートが水面に航跡波を作るように、その後方にほぼ光速で進む航跡場(プラズマ波)が励起される。この強電場(加速勾配 100 GV/m 級)にプラズマ中の電子が捕捉されると、短距離で高エネルギーまで加速される。

これまでに、LWFAによるGeV級電子ビームの生成<sup>3)</sup>や準単色ビームの発生<sup>4)</sup>など、加速原理としての有効性は実験的に示されてきた。さらに近年では、この電子ビームを駆動源とする小型自由電子レーザー(FEL)光源の実現を目指した研究は世界的



\* Tomonao HOSOKAI

1967年10月生まれ  
東京工業大学大学院 総合理工学研究科  
エネルギー科学専攻  
博士後期課程(1997年)  
現在、大阪大学産業科学研究所  
教授 博士(理学)  
TEL: 06-6879-8485  
FAX: 06-6879-8489  
E-mail: hosokai@sanken.osaka-u.ac.jp

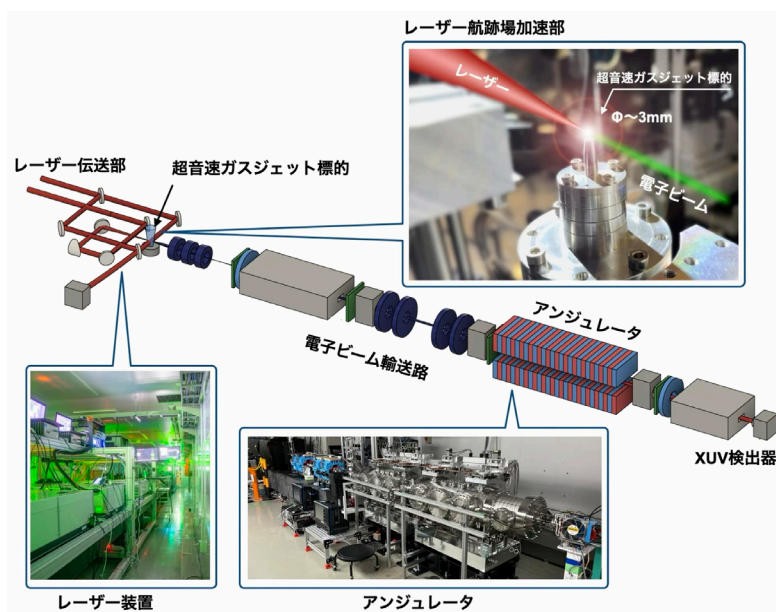


図2 理化学研究所 放射光科学研究センター (SPring-8) におけるレーザープラズマ加速実験プラットフォーム。高強度レーザーと超音速ガスジェット標的を用いたレーザー航跡場加速部、電子ビーム輸送系、アンジュレータおよび XUV 検出系から構成され、LWFA 駆動自由電子レーザー (FEL) の実証を可能にした統合実験システムである。

に進められており<sup>5)</sup>、極端紫外(XUV)領域における増幅実証も報告されている<sup>6)</sup>。

こうした国際的な研究開発の流れの中で、本研究室においても、理化学研究所放射光科学研究センター (SPring-8) におけるレーザープラズマ加速実験プラットフォーム(図2)の構築を主導し、LWFA 電子ビームの高品質化と安定化、ならびにLWFA を駆動源とする小型自由電子レーザー (FEL) 実現に向けた研究に取り組んできた<sup>7)</sup>。近年、レーザー波面の制御<sup>8)</sup>およびプラズマ標的制御技術の高度化<sup>9)</sup>により、ビームの再現性と安定性は大きく向上している。その結果、本研究室でも、XUV領域の自由電子レーザー増幅に必要なビーム条件を満たし、極端紫外領域における増幅の実証に成功している<sup>10)</sup>。これらの成果は、従来は大型施設に依存していた光源技術を、小型化・高機能化する可能性を示すものである。

### 相対論的プラズマの数値シミュレーション

レーザー航跡場加速(LWFA)では、超高強度レーザーによってプラズマ中の電子が加速され相対論的領域に入るため、プラズマは相対論的な振る舞いを示す。このような相対論的レーザープラズマ相互作用は、強い非線形性と非平衡性を有する複雑な現象であり、その理解には理論解析だけでなく高精度

な数値シミュレーションが不可欠である。

本研究室では、数値シミュレーションを理論・実験と並ぶ「第三の柱」と位置づけ、研究を推進している。中核となるのは、PIC (Particle-In-Cell) 法<sup>11)</sup>と呼ばれる、Maxwell方程式と粒子運動方程式を直接解くプラズマシミュレーション手法である。PIC法では、プラズマを多数のマクロ粒子として表現し、それらの運動をローレンツ力に基づいて追跡すると同時に、空間格子上で電磁場を計算することで、粒

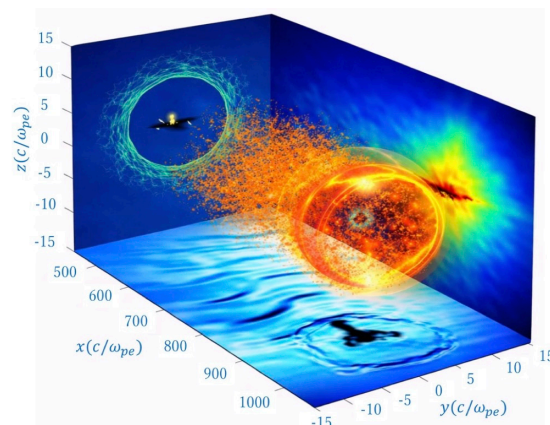


図3 PICシミュレーションによるレーザー航跡場加速過程の三次元計算例。超高強度レーザーがプラズマ中を伝播することで航跡場が形成され、電子が捕捉・加速される様子を可視化している。実験では直接観測困難な内部ダイナミクスの理解に重要な役割を果たす。

子分布と電磁場の時間発展を自己無撞着 (self-consistent)に求める。これにより、流体近似では記述が困難な、非平衡分布形成、電子の捕捉・加速、ビーム形成、不安定性の発展といった運動論的過程を高精度に再現できる。さらに、シミュレーションは現象理解にとどまらず、電子ビーム発生条件の最適化、安定化制御、実験設計の高度化にも重要な役割を果たしている。大規模並列計算機を活用した高精度シミュレーションにより、実験では直接観測が困難なプラズマ内部ダイナミクスを可視化し、次世代加速器開発を理論・実験の両面から支えている。図3に示すように、PICシミュレーションによりレーザー航跡場加速過程の詳細な三次元解析が可能である。

### LWFA電子ビームの医療応用:ビーム創薬

レーザー航跡場加速(LWFA)によって生成される高エネルギー電子ビームは、新たな医療応用の可能性を切り拓く。本研究室では、近年、レーザープラズマ加速技術を応用した次世代医療技術の創出を目指し、医療応用研究を推進している。従来の化学療法では、抗がん剤が全身に作用するため、副作用の低減が大きな課題となっている。その解決策の一つとして、特定の刺激に反応して体内の特定部位でのみ活性化するプロドラッグが提案されているが、光などの外部刺激では体内深部への到達が難しいという制約がある。

この課題に対するアプローチとして、本研究室では、VHEE (Very High-Energy Electrons)<sup>12)</sup>に相当するレーザー航跡場加速(LWFA)による高エネルギー電子ビームを外部刺激として用い、体内深部において薬剤を局所的に活性化する新たな治療概念として、ビーム創薬(B3D: Beam-Driven Drug Discovery)を提案している<sup>13)</sup>。

高指向性のVHEE電子ビーム照射により、生体組織内での水のイオン化によって生成される水和電子やラジカルなどの活性種が化学反応を誘起し、空間選択的にプロドラッグを活性化(図4)。この手法の特徴は、放射線治療のように細胞を直接破壊するのではなく、照射部位における電子ビーム誘起化学反応を介して薬剤を活性化する点にある。そのため、低線量で患部に限定した化学治療が可能となり、副作用の低減につながる事が期待される。

本研究室ではこれまでに、LWFAおよび従来加速器を用いた高エネルギー電子ビームによる化学反応誘起、薬剤活性化、細胞照射、動物照射(図5)などの基礎的検証を進めており、反応効率や薬剤効果の空間選択性に関する知見が蓄積されつつある。現在、医学・薬学分野との連携により、将来的な医療応用を目指した研究を推進している。

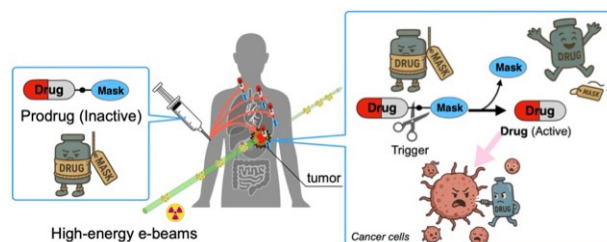


図4 ビーム創薬(B3D: Beam-Driven Drug Discovery)の概念図。不活性なプロドラッグを体内に投与し、高指向性の高エネルギー電子ビームを照射することで、照射領域においてのみ薬剤を活性化。これにより、体内深部の腫瘍に対して空間選択的な化学治療を実現し、副作用の低減が期待される。

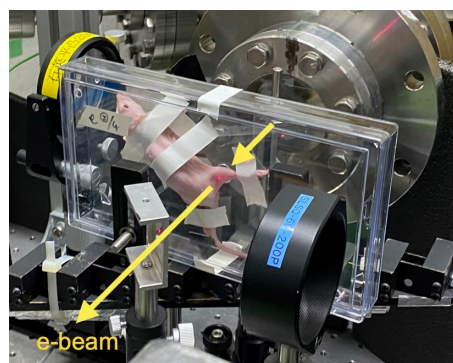


図5 高エネルギー電子ビームを用いた動物照射実験の様子。ビーム創薬の生体内実証に向け、マウス腫瘍モデルを用いた電子ビーム照射を実施し、薬理効果および生体応答の評価を行っている。

### 小型高出力レーザー技術の産業応用:レーザーピーニング

金属材料の疲労や腐食は、航空宇宙、エネルギー、輸送機器など幅広い産業分野に共通する重要課題である。本研究室では、高強度パルスレーザー照射によって発生する高圧プラズマの反作用で駆動される衝撃波を利用し、材料表面に圧縮残留応力を導入するレーザーピーニングによる材料強化技術の研究開発を進めている(図6)。従来のショットピーニングに比べて表面粗さの増加が小さく、微小領域や複雑形状部への局所処理に優れることから<sup>14)</sup>、次世代の

高性能表面改質技術として注目されている。

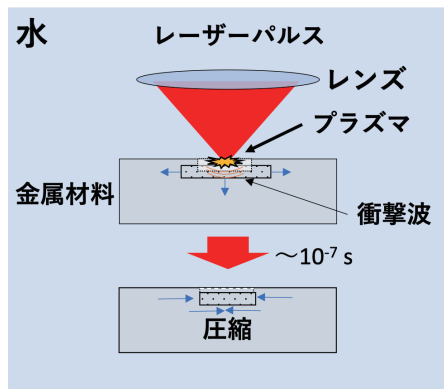


図6 レーザーピーニングの原理模式図。水中で高強度パルスレーザーを照射し、高圧プラズマの反作用で駆動される衝撃波を利用して、材料表層へ圧縮残留応力を導入する表面改質技術である<sup>14)</sup>。

本研究室では、レーザー航跡場加速(LWFA)用ドライバーレーザー開発で培った小型高出力レーザー技術を基盤として、卓上サイズの超小型レーザーピーニング装置を独自開発した(図7)。本装置により、従来は大型設備を要したレーザーピーニングを研究室レベルで迅速に実施可能とし、大学・企業との共同研究に広く活用されている。さらに、多様な金属材料およびその積層造形材に対して疲労特性改善効果を実証しており、疲労寿命の大幅な向上を確認している。今後は、自動化・ロボット化・AI最適化を進めることで、次世代スマートものづくりへの展開を目指している。

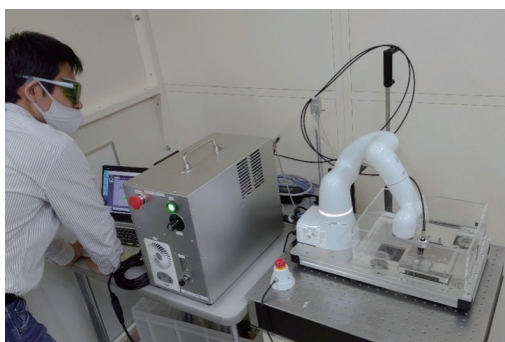


図7 独自開発した卓上サイズの超小型レーザーピーニング装置。LWFA用ドライバーレーザー開発で培った小型高出力レーザー技術を応用し、従来は大型設備を要したレーザーピーニングを研究室レベルで実施可能とした。

#### まとめ ー基礎・基盤研究から社会実装へー

本研究室の特徴は、レーザー航跡場加速を中心とするプラズマ物理の基礎研究を出発点とし、そこで

培った量子ビーム制御技術と高強度レーザー技術を基盤として、医療・産業応用へと展開していることにある。すなわち、理論・シミュレーションによる現象理解、実験によるビーム生成と制御、さらには応用研究が有機的に結びついている。また、量子ビームそのものの高性能化を追求するだけでなく、各応用分野が求めるビーム特性を起点として最適な量子ビーム設計を行う、応用駆動型の研究開発を重視している。

このような一貫した研究体制により、単なる技術開発にとどまらず、新たな応用領域を創出することが可能となる。今後は、ビームのさらなる高品質化と安定化を進めるとともに、医療・産業分野との連携を強化し、量子ビーム技術の社会実装を一層加速させていく。こうした応用展開を通じた技術基盤の高度化は、基礎研究のさらなる深化を促し、基礎と応用が相互に発展する好循環を形成すると期待される。

なお、本稿で紹介した研究は、JST未来社会創造事業(大規模型)「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」(Grant No. JPMJMI17A1)の支援を受けて推進されている。ここに記して、多大なるご支援を賜った関係各位に深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) <https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/bmp/home-jp/>
- 2) Esarey, E. et al., *Reviews of Modern Physics* **81**, 1229–1285 (2009).
- 3) Leemans, W. P. et al., *Nature Physics* **2**, 696–699 (2006).
- 4) Faure, J. et al., *Nature* **431**, 541–544 (2004); Geddes, C. G. R. et al., *Nature* **431**, 538–541 (2004); Mangles, S. P. D. et al., *Nature* **431**, 535–538 (2004).
- 5) Couprie, M. E. et al., *Reviews of Accelerator Science and Technology* **9**, 243–270 (2016).
- 6) Wang, W. T. et al., *Nature* **595**, 516 (2021).
- 7) Kando, M. et al., *JINST* **17** T06001 (2022).
- 8) Nakanii, N. et al., *Applied Physics Express* **16**, 026001 (2023).
- 9) Lei, Z. et al., *Prog. Theor. Exp. Phys.*, 033J01 (2023).

- 10) Jin, Z. et al., Phys. Rev. Research **8**, 013207 (2026).
- 11) C. K. Birdsall and A. B. Langdon, Plasma Physics via Computer Simulation (McGraw-Hill, 1985).
- 12) DesRosiers, C. et al., Phys. Med. Biol. **45**, 1781 (2000).
- 13) 細貝知直、山下泰信、他：一般社団法人レーザー学会学術講演会第45回年次大会，予稿集 I07-22p-III-04.
- 14) Sano, Y., Metals, **10**, 152 (2020).

