



クラスターターゲットと高強度レーザーとの相互作用による陽子線加速メカニズムの解明に向けた研究

浅井, 孝文

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2023-03-25

(Date of Publication)

2026-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8668号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100482416>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 浅井 孝文

専 攻 海事科学専攻

論文題目 (外国語の場合は, その和訳を併記すること。)

クラスターターゲットと高強度レーザーとの相互作用による

陽子線加速メカニズムの解明に向けた研究

指導教員 山内 知也

(氏名： 浅井 孝文 NO. 1)

ペタワットクラスの高強度レーザーと物質の相互作用を利用したレーザープラズマイオン加速はプラズマを加速媒体とすることにより、絶縁破壊によって制限される既存の加速器に比べて 6 桁以上高い加速電場を形成できることから、加速器の小型化・低コスト化につながると期待されている。また、天体の爆発現象に迫る高エネルギー密度状態を実験室内に再現できることから、宇宙線加速メカニズムなどの理論を検証する手段としても利用されてきた。このような状況下、神戸大学と共同研究を行う関西光科学研究所ではマイクロメートルオーダーの直径を有するクラスターターゲットをレーザープラズマイオン加速実験に導入している。クラスターとは、分子がファンデルワールス力で凝集した微小粒子であり、低温・高圧のガスを真空中に超音速で噴射することで生成される。典型的に用いられる固体薄膜ターゲットに比べて、高繰り返し照射可能であり、他のイオン種が同時に加速されないといったメリットを有する。さらに、先行するシミュレーション研究では衝撃波加速をベースとした新たな加速メカニズムにより、指向性を持った 300 MeV 級の準単色陽子線が発生することが示唆されており、その実証に向けて整備が進められている。

クラスターターゲットから発生するレーザー加速イオンの高エネルギー化・安定化のためには、レーザーとクラスターの相互作用を理解し、加速メカニズムを詳細に議論する必要がある。すなわち、発生したイオンのエネルギースペクトルと空間分布の高精度計測、並びに、レーザープラズマの状態を明らかにして、理論・シミュレーションの結果と比較することが重要である。例えば、クーロン爆発ではほぼ等方的にイオンが加速されるのに対して、磁気渦加速や衝撃波加速ではある程度指向性を持った空間分布となり、エネルギースペクトルも加速モデルによって異なる。また、レーザープラズマ中には相対論的に加速された電子に起因して高強度磁場が生成されており、それがローレンツ力で加速イオンの軌道を変える可能性があるため、複数のクラスターや背景ガスといったマクロな影響まで考慮に入れた議論が不可欠となる。そこで本研究では、レーザークラスター相互作用によるイオンの加速メカニズム解明に貢献することを主目的として、原子核乾板を用いた数百 MeV 級レーザー加速陽子線計測手法の開発(第 3 章、第 4 章)、及び、レーザークラスター相互作用中における自己生成磁場計測の確立(第 5 章)を行った。

本論文の構成は次の通りである。

まず、第 1 章では導入としてレーザープラズマイオン加速の基礎となる概念、物理パラメータについて解説する。

第 2 章では、クラスターターゲットを用いたレーザープラズマイオン加速に焦点を当てる。クラスター生成装置や Mie 散乱を利用したクラスターサイズ計測手法を紹介した後、クーロン爆発(両極性膨張)や磁気渦加速、求心衝撃波加速といったクラスターターゲットからのイオン加速メカニズムについて解説する。また、近年の固体・液体水素ターゲットを用いたレーザープラズマイオン加速実験の動向についても端的に紹介する。

第 3 章では、原子核乾板のレーザー駆動陽子線加速への適用可能性について述べる。レ

レーザープラズマイオン加速実験では、イオン以外に電子線や X 線が同時発生し、これらは多くの検出器にとって深刻なノイズ成分となるため、数百 MeV 級レーザー加速陽子線のエネルギースペクトルと空間分布計測に有効な手法は未だ確立されていない。そこで本研究では最小電離粒子まで検出可能な高い感度とサブミクロンの位置分解能という優れた特徴を有する原子核乾板をレーザー加速陽子線検出器として導入している。原子核乾板はその感度の高さ故に、レーザープラズマからイオンと同時に発生する電子線や X 線の影響を受けるが、現像液の還元力を低下させることでノイズの低減を行い、実際に MeV 級のレーザー加速陽子線の検出に成功した。そして、量子科学技術研究開発機構の加速器 Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba(HIMAC)を利用して、その感度を低下させた原子核乾板が 100 MeV を超える陽子線の飛跡を直接検出可能であることも確かめた。まとめると、本研究により原子核乾板が将来の数百 MeV 級レーザー加速陽子線検出に利用できることを証明した。

第 4 章は、第 3 章で解説した感度調整済みの原子核乾板と散乱体を交互に重ね合わせた Emulsion cloud chamber(ECC)内での多重クーロン散乱量から数百 MeV 級の陽子線エネルギーを推定する手法について述べる。ここではまず、HIMAC にて ECC に 100 から 230 MeV の陽子線を照射し、多重クーロン散乱量に関する基礎データの取得を行った。そしてこの実験値を基に、モンテカルロシミュレーションツールキット Geant4 が ECC 内での多重クーロン散乱を精度よく模擬できることを検証した後、Geant4 で陽子線の ECC 内での散乱角度データを生成した。陽子線エネルギー回帰手法としてガウシアンカーネルを用いたサポートベクトル回帰を採用し、Geant4 生成データから入射エネルギー予測を実施したところ、厚さ 0.5 mm のタングステンで 25 層積層した ECC の場合、150 から 300 MeV までの陽子線のエネルギーを 10%程度の分解能で予測可能であることが示した。さらに、230 MeV 加速器陽子線に対しても、その分解能を維持されていることを実験的に確かめた。つまり、第三章と合わせて、これまで有効な手法が確立されていなかった数百 MeV 級レーザー加速陽子線のエネルギースペクトルと空間分布の計測手法の原理検証に成功したと言える。

第 5 章では、レーザークラスター相互作用によってレーザープラズマ中に自己生成される高強度磁場の計測について述べる。ここでは、高強度レーザーを固体密度クラスターに照射した際に非線形効果によって発生する第 2 高調波を偏光カメラを用いてイメージングした。取得画像から偏光面角度分布を算出して解析を行った結果、クラスターから発する第 2 高調波の偏光面の回転方向がレーザー軸を対称として反転していることがわかった。これはレーザー軸に沿って渦状の高強度磁場が生成され、第 2 高調波の偏光面がその磁化プラズマを透過する間にファラデー効果(磁気旋光)によって回転したためだと考えられる。偏光計測で得られたファラデー回転角と別途計測したプラズマ電子密度から磁場強度を算出したところ、少なくとも 100 T 以上であることが明らかになった。

(氏名： 浅井 孝文 NO. 3)

第6章では、本研究で開発した原子核乾板を用いた数百 MeV 級レーザー加速陽子線計測手法、及び、レーザークラスター相互作用中における高強度磁場計測について総括する。

氏名	浅井 孝文		
論文 題目	クラスターターゲットと高強度レーザーとの相互作用による 陽子線加速メカニズムの解明に向けた研究		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	山内 知也
	副 査	准教授	谷池 晃
	副 査	教 授	佐俣 博章
	副 査	教 授	首藤 信通
	副 査	教 授	古山 雄一
要 旨			
レーザー発生装置は1960年に開発され、今日、その利用は生産活動にも日常生活にも深く溶け込んでいる。一方において、レーザー光線の短パルス化と高出力化に向けた取り組みは脈々と進められている。エポックとしてチャープパルス増幅法の開発があった(1985年)。世界各国でペタワット級レーザーが実働しており、高強度レーザーと物質との相互作用に基づいた粒子加速実験が盛んに行われている。高周波加速管を利用する既存の加速器に比べて6桁以上高い加速電場が形成できることから、一桁以上の小型化・低コスト化が図れるレーザー駆動イオン加速器が実現できると期待されている。がん治療装置のみならず、イオン加速器は物質表面改質・新機能導入や物質中微量元素分析などに広く活用されている。小型でコストのかからない加速器技術の普及は、移動式の社会インフラ非破壊検査装置や海洋を含む汎用の地球環境試料分析システム、実験室での天体爆発現象実験等をも可能とし、理工学から化学、生物学、ひいては海事科学を含めた地球環境科学まで幅広い研究分野に波及することが予想される。 本研究は量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所及び名古屋大学との共同研究として取り組まれている。日本を代表する大型レーザー装置であるJ-KARENや大型重イオン加速器HIMACが活用され、原子核乾板技術として独特の進化を遂げ世界最高峰の性能を誇る名古屋大学の自動飛跡読み取り装置HTSが利用されている。また、レーザー、プラズマターゲット、粒子線、のそれぞれについて最適なシミュレーション手法が最大限活用されている。文字通り最先端の研究資産を活用しつつ、クラスターターゲットから発生すると期待される数百MeVクラスの陽子線を10%の精度で計測する原子核乾板を使った計測システムを開発し、その性能実証に成功している。また、レーザープラズマ中に自己生成される高強度磁場を、第2高調波の偏光面角度分布の解析を通じて評価することに成功している。 第1章では、レーザープラズマイオン加速の概要と歴史的進展についての解説が与えられ、その理解の基礎となるレーザーと物質との相互作用に関係する物理的レーザーパラメータが簡潔に解説されている。続く、高強度レーザーによるイオン化プロセス、レーザー場中における電子の運動、レーザーと物質との相互作用の小節は、本論文を読み進む上で必要とされる必要最低限の物理学的背景を与えている。 第2章は、クラスターターゲットを用いたレーザープラズマイオン加速についての解説である。クラスターとその生成手法と実用された装置、クラスターサイズの計測に用いられているMie散乱とその手法についての紹介があり、クラスターターゲットが優位となる理由が説明されている。次いで加速メカニズムに関しては、クーロン爆発(両極性膨張)や磁気渦加速、求心衝撃波加速が取り上げられており、それぞれに専門的解説が与えられている。そして、固体及び液体水素ターゲットを用いたレーザープラズマイオン加速実験の研究動向が紹介されている。この章をおくことで、次章以降の内容がもつ学術的意味と意義をより具体的に理解することができる。先行研究の検討が十分に行われており、課題設定も明確である。 第3章には、原子核乾板のレーザー駆動陽子線加速への適用可能性についての議論が置かれている。レーザープラズマイオン加速実験では電子線やX線が同時発生し、これらが深刻なノイズ成分となるため、数百MeV級レーザー加速陽子線のエネルギースペクトルや空間分布の計測に有効な計測手法は未確立であった。本研究では最小電離粒子まで検出可能な高い感度とサブミクロンの位置分解能を有する原子核乾板を敢えて利用している。本来、原子核乾板は同時発生する電子線やX線の影響を強く受けるが、本研究			

では、現像液の還元力を低下させることでノイズを低減させ、MeV 級のレーザー加速陽子線を電子線と弁別して検出することに成功している。そして、HIMAC を利用して、感度を低下させた（感度調整済みの）原子核乾板が 100 MeV を超える陽子線の飛跡を直接検出可能であることを実証している。

第 4 章では、前章で述べた感度調整済みの原子核乾板と重金属の散乱体とを交互に重ね合わせた Emulsion cloud chamber (ECC) 内での多重クーロン散乱量から数百 MeV 級の陽子線エネルギーを推定する手法について述べている（一般論として、陽子線エネルギーが高くなると、ECC 内の多重散乱量は小さくなる）。同手法をレーザー加速イオンに適用するのは全く新しい試みである。実験としては、HIMAC において ECC に 100 から 230 MeV の陽子線を照射し、多重クーロン散乱量に関する基礎データを取得している。これと並行して、実験体系に基づいたモンテカルロシミュレーションを、Geant4 ツールキットを用いて実施している。それが ECC 内での多重クーロン散乱を精度よく模擬できることを検証した後に、Geant4 を用いて陽子線の ECC 内での散乱角度データを生成している。候補者の独自の取組みとして陽子線エネルギー回帰手法としてガウシアンカーネルを用いたサポートベクトル回帰が採用され、Geant4 生成データから入射エネルギー予測している。結果として、厚さ 0.5 mm のタングステンに 25 層積層した ECC の場合、150 から 300 MeV までの陽子線のエネルギーを 10% 程度の分解能で予測可能であることが示されている。また、230 MeV 加速器陽子線に対して、その分解能が維持されていることが実験的に確かめられている。第 3 章が与えている結論と合わせるならば、従来有効な手法が確立されていなかった数百 MeV 級レーザー加速陽子線のエネルギースペクトルと空間分布の計測手法を新たに開発し、その原理検証に成功したと言える。

第 5 章は、高エネルギー陽子の計測を課題とした前章までとは異なり、レーザーとクラスターとの相互作用によってレーザープラズマ中に自己生成される高強度磁場の計測に関する議論が行われている。新しい試みとして高強度レーザーを固体密度クラスターに照射した際に非線形効果によって発生する第 2 高調波を、偏光カメラを用いてイメージングしている。取得した画像から偏光面角度分布を算出して解析し、クラスターから発する第 2 高調波の偏光面の回転方向がレーザー軸を対称として反転していることを明らかにしている。これに対してレーザー軸に沿って渦状の高強度磁場が生成され、第 2 高調波の偏光面がその磁化プラズマを透過する間にファラデー効果（磁気旋光）によって回転したためだとの解釈を与えている。さらに、偏光計測から得たファラデー回転角と別途計測したプラズマ電子密度から磁場強度を算出し、少なくとも 100 T 以上に達していることを明らかにしている。この実験結果は、2 次元 PIC シミュレーションによっても再現されている。この手法は、レーザープラズマ中での粒子線加速における磁場の役割を実験的に明らかにすることに貢献することが期待できる。また、偏光計測をクラスターサイズ評価に役立てる可能性についても言及している。

第 6 章には、全体の総括が与えられている。(1) 厚さ約 2 cm という他の検出器に類を見ないきわめてコンパクトな計測体系で、10% の精度を有する数百 MeV 級レーザー加速陽子線計測手法の開発に成功した。これにより、先行するシミュレーション研究が予測する加速モデルが検証可能となった。(2) レーザープラズマ中の第 2 高調波のイメージングによって、直接計測が難しいと考えられていたレーザー駆動イオン加速実験における自己生成磁場発生を示唆する結果を得ている。磁場の定量評価のためには詳細なシミュレーションが必要になるとしても、磁場がイオン加速に与える影響を実験的に明らかにする手がかりを与えている。

本研究は、クラスターと高強度レーザーパルスとの相互作用による陽子線加速メカニズムの解明に向けて、そこで必要となる複雑な混成場での数百 MeV 級の陽子を識別計測する手法を新たに開発しており、さらに従来極めて難しいとされていたレーザープラズマ中での自己生成磁場の計測を試み、新しい成果を出している。新しい陽子線計測手法と自己磁場計測について他にない知見を得ており、今後の同分野の研究に波及する価値のある研究成果の結実である。このような卓越した独創性と創造性が認められる。さらに、全体を通じて論旨は明確であり、一貫している。結果として、論文体系と体裁とが十分に整えられている。

このように提出された論文は海事科学研究科学学位論文の評価基準を満たしている。
学位申請者の 浅井 孝文 は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。