小特集

レーザープラズマ粒子加速器開発の最近の進展

Present and Future of Laser Accelerator

1. 歴史と今後の展開

北川 米喜

(大阪大学レーザーエネルギー学研究センター, 光産業創成大学院大学)

History and Future Prospect

KITAGAWA Yoneyoshi

Institute of Laser Engineering, Osaka University, Suita 565-0871, Japan

The Graduate School for the Creation of New Photonics Industries, Kurematsu 1955-1, Hamamatsu, 431-1202, Japan

(Received 1 February 2005)

Plasma is an attractive medium for the advanced accelerator. When combined with the ultra-intense lasers, it makes the acceleration field one thousand times the field of the current microwave accelerators or the size one thousandth the size. The fields, which require now the particle accelerator, are not only the high energy physics, but also the medical, industrial and low energy material fields. In these 10 years, the laser accelerator research has advanced the electron gain of from 22 MeV to 200 MeV. Recently, it has produced 200 MeV electrons from a 2 mm-long plasma. This corresponds to 100 GV/m. On the other hand, a glass capillary has this year succeeded in making the plasma length, the acceleration length, from 2 mm to 10 mm. Mono-energetic peaks were also found. These will be the breakthrough to the second generation of the advanced accelerator development. This review introduces these topics as well as the development of the ion acceleration studies.

Keywords:

laser acceleration, ultra-intense laser, wavebreaking limit, wakefield, beatwave, self-modulated wakefield, Raman scattering, ponderomotive force, relativistic plasma wave

1.1 歴史

1.1.1 相対論プラズマ波による電子加速前史

レーザーで粒子の加速器を作ろうという提案を明確な形で提出したのは、1979年の田島・ドーソンの論文である[1]。しかし、積極的な加速という概念でなく、レーザープラズマ相互作用としての高速電子、高速イオンの発生は、固体では共鳴吸収、気体ではラマン散乱、ブリュアン散乱など、その以前からその後もずっとあり、中でも、1983年のEstabrookとKruerの前方ラマン散乱による高速電子の生成は、示唆的なものであった[2]。レーザー加速の前史にあたるものは、1987年の解説拙著ビート波加速にささかに述べた[3]。

直接の前史に上げるべきは2つあり、ひとつは1985年のUCLAのClaytonらによる2波長CO₂レーザービートによる
author's e-mail: yoneyosi@ile.osaka-u.ac.jp, kitagawa@ghi.ac.jp

る相対論的プラズマ波の励起[4]。ビートで相対論的プラズマ波が励起できることを示した点で大きな前進であったが、電子加速に至っていない。ただ、ここで開発された集団トムソン散乱法（ブラック散乱法）は、プラズマ波の周波数、波数、振幅絶対値まで計測できる優れたもので、今日まで最も強力な波の計測法であり続けている。文献[5]で少しく解説した。もう一つは、翌年の会議報告で、カナダのEbrahimらがビート波で0.6 MeVで入射した電子を2 MeVまで加速したというもの[6]。これが本当かどうか評価は半々にわかれ、Joshiは否定派、著者らは肯定派という具合であった。これから数年日米加仏などで研究が進められ、次の成果を出したのは、初めてガスパフを導入した1992年の阪大のレーザービート波加速で、プラズマ波振幅5%, 最大加速エネルギー22 MeV以上という報告である

[7]. 次の年, UCLA の Joshi らは, 2 MeV 注入電子を 28 MeV まで加速し[8], レーザー加速実証は一応の区切りをみせた. 同時期, フランスでは, YAG レーザーと YLF レーザーでのビートに挑戦しているが, 波の振幅が 1, 2 % に留まっている. レーザー加速に必要な要素をあげると, (1)プラズマ, (2)プラズマ波, (3)種電子であるが, これ以前, レーザーを照射するにあたって, プラズマと種の電子を外部注入しなければならないと主張する向きもあった. 実際は, 中性ガスがあれば, トンネル電離というもの働いて, あらかじめプラズマを生成する必要はないし, 種電子もこのプラズマで供給できることが判明した. 今に至るまでこれらは, 特殊な場合を除いて不可欠の条件ではないようである.

1.1.2 超高強度レーザーによる電子加速

その後, チャープパルスの超高強度レーザーが出現するや, レーザー加速は, それまでの $10^{14} \sim 10^{15}$ の比較的低強度の領域から, 満を持して超高強度レーザーの領域に突入した. レーザー加速は超高強度レーザーでこそ, 本領を発揮するからである. 長パルスでは, ビート波をつくってプラズマ密度に共鳴させることが効率的であったが, 超短パルス, 超高強度レーザーでは, パルスの固まり一つでなんとかプラズマ波が励起でき, 加速もできることが知られるようになった. 航跡場加速という. さらに, レーザーパワーが強力になった結果, 励起されたプラズマ波の振幅も 100% 近くになり (波破壊限界値), 元のレーザー光が反対に変調を受けるという事態に至る. 幸い正帰還がかかるので, プラズマ波はさらに成長する. これを自己変調航跡場という. これらによって, レーザー加速で達成された電子エネルギーは, 年ごとに増大し, 2002年, 高繰返し超短パルスステープルトップレーザーで Fig. 1 にあるように, 200 MeV までの加速をフランス LOA の Malka らが報告[9], 2004年には英国で単一ショットのペタワットレーザーでの 350 MeV が報告された. 加速勾配は, 300 GV/m という従来の RF 加速器の優に 3 桁以上高い値が得られている. 残念ながらこの超高加速勾配が生かされていないところが最大の問題点である. 超高強度レーザーで励起されるプラズマ波の電場は, レーザー周波数 ω_0 とプラズマ周波数 ω_p との比を $\gamma_\phi = \omega_0/\omega_p$ とすると $E = E_{\text{laser}}/\gamma_\phi$ となるので, レーザーパワーは強ければ強い方がいい[10]. 電子密度も高ければ高い方がいいように見える. 今からは, この極端に優れた加速勾配を実際の加速器としてどう作り上げていくにかかっている.

一方, 加速エネルギー利得は, 加速勾配 $\times$ 加速距離で与えられるが, 加速距離が自動的に決まってしまうので, そう単純でない.

エネルギー利得は, 相対論強度領域では $2mc^2\gamma_\phi^2 a_0^2 / \sqrt{1+a_0^2/2}$ と与えられる[10]. ここで a_0 は規格化レーザー強度 $eE_L/m\omega_0 c$ である. 普通に用いるレーザー強度 $2 \times 10^{18} \sim 2 \times 10^{19} \text{ Wcm}^{-2}$ に対して, a_0 は 1~4 なので, もしこれで GeV 電子を得ようとする, 上式から γ_ϕ は 15 から 30 あるいはそれ以上, つまり密度は 10^{19} cm^{-3} 以下でなければならないことになる. 薄くて長いプラズマが必要なの

である. その方策の一つが現在世界中で研究されているキャピラリー加速であり, 阪大での初めての電子加速を中心に第 3 章で論ずる[11]. また加速エネルギーの単色化も日, 米, 英, 仏各国から報じられた. 仏では, 170 MeV のモノピークである. 第 4 章で詳細を論ずる. これも従来型 RF 加速器でいえば, 捕捉電子が加速位相と減速位相の間で十分な時間の後, バンチされるのが望ましいのであるが, 上の結果はそうになっているのかどうか, まだ確定的なものではない. 以上は電子加速に限っての話である.

1.1.3 高品質電子ビームの生成

レーザー加速器実用化には, 装置がコンパクトであることとともに, 従来型 RF 加速器に比べて, 加速電子の質(縦バンチ長, 横方向エミッタンス, エネルギー幅, 出力安定度など)に遜色ないことが望まれる. 進行方向のバンチ長はレーザーパルス長程度なので, 遙かに短い. 横方向のエミッタンスも同程度まで絞られている. ただエネルギー幅は, 前節の Fig. 1 にあるように, 広くかつ右下がり, 特定のエネルギーに集中したものではないのが一般であった.

2003 年ぐらいから, 特定のエネルギー付近に準単色のピークが, 我が国の産業技術総合研究所を皮切りに, 仏英米の研究所で得られ始めた. フランスでは最高 170 MeV あたりにピークがある[12]. 航跡場に捕捉された電子が, 加速相から減速相に到達して離調し, 電子運動量ピークが折れ曲がることにより, エネルギー領域でのバンチが起こっている可能性があるが, 確定的でない.

1.1.4 イオン加速

レーザーで気体プラズマ中にプラズマ波を作ると, プラズマ波の位相速度は光速に近いものになるので, 光速に近い初速度を持つ粒子以外は, 直接の加速の対象になり得ない. 電子は MeV 程度のエネルギーを与えれば光速になるが, 陽子は GeV 台のエネルギーを得てはじめて光速になるからである. いったん加速された電子に引っ張られてイオンが加速されるのを利用するのも一つである. イオン(陽子も含めて)の加速には, プラズマ波の利用とは別なアプローチもある. ここ数年注目されているのは大パワーレーザーで薄膜を照射して MeV 以上のイオンを得る方法である.

Fig. 1 High-repetitive Ti:Sap laser accelerated electron spectrum at LOA, France (referred to Science [9]).

期待される。高速電子と同時に加速されるイオン、あるいは真空中に放出された高速電子のつくる仮想陰極によって引き出されたイオンも、数100 keVから数MeV以上のエネルギーを持つが、それらはガンマ線生成にほとんど寄与しない。

1.2.3 レーザーコンプトンによるガンマ線の生成

加速器で生成した電子ビームに高強度レーザー光を対向より照射すると、レーザー光子は電子ビームで逆コンプトン散乱を受ける。静止電子が光子で反跳を受けるのをコンプトン散乱と言い、逆に、この場合のように走行電子から光子が反跳を受けるのを逆コンプトン散乱と言う。そして、エネルギーを貰って光がガンマ線に変換される。レーザー光の光子エネルギーを k_0 とすると、ガンマ線のエネルギー k は、 $k = 4\gamma^2 k_0$ となる。電子ビームのエネルギーは、単色の γ とする。超高強度レーザーの場合は、 $k = 4\gamma^2 k_0 / (1 + a^2)$ となる[17]。

レーザーと相互作用する電子ビームは、狭いスペクトル、低エミッタンスが要求される。そのかわり、生成されたガンマ線は、入射レーザー光と逆方向に $1/\gamma$ 程度にまでコリメートされていて、かつ、入射レーザー光の偏光に依存して、円偏光なら、円偏光と極めて高い偏極度を持つ。短パルスレーザーであれば、短パルスガンマ線が得られる。非常に応用範囲の広い高品質ガンマ線源といえる。対向する電子線にペタワットレーザーを 10^{21} Wcm $^{-2}$ の強度に集光照射すれば、電子線から見た強度は γ^2 倍だけ増大する。フェムト秒レーザーを蓄積リング電子に当て、現在の放射光のpsの時間分解からfsの時間分解へと進むことができる。次の10年間の世界の主要な方向となろう。

1.3 レーザー加速器開発の国際競争

コンパクトな加速器への潜在需要の大きさが、国際開発競争の牽引力であり、最初のアイデア、緒戦こそ我が国がリードしたものの、各国総力戦の様相を呈しつつある。

昨年度の核融合分野日米ワークショップ派遣団長でもある広島大学 小方 厚氏の報告から借用しながら、序論を終わる。

1. レーザー加速の分野は客観的に言えば、米高日低である。もちろん日本側が抜きん出ているピークもなきにしもあらずだが、標高の平均ではくらべものにならない。ここで最大の課題はレーザーとプラズマによる新しい加速法の開発である。いくつかの研究所で単色のビームを得たことを特筆すべきであろう。この分野は地味ではあるが確実に進歩している。プラズマ物理の成果が周辺に波及した結果、成長しつつある分野で、核融合研究の成果が核融合以外の分野で実を結びつつあることの意義が大きい。
2. 米国研究者はDOEから締め付けられているせいもあり、日本など外国の成果を過小評価する傾向がある。Physical Review Letters (PRL)は権威ある(とされる)速報誌だが、論文採択は国内論文優先である。ヨーロッパの研究者も感じていることらしい。PRLに採択されるには、当該分野の研究者がある程度顔をそろえ

た学会やワークショップの場で研究成果を公表し、認知されることが必要である。そんなことより論文は日本の欧文誌に発表し、実質的な成果をあげる、極端に言えば、核融合あるいはプラズマ加速器を実用化してしまえばいいということもあり得る。

3. この課題のDOEの担当者(D.F.Sutter)は、少なくともここ15年は交代していない。日本の文部科学省の担当者がきわめて短い周期で交代するのと対照的である。
4. プラズマ加速の用途として、米国の研究者の念頭にあるのは高エネルギー物理学研究用の高エネルギー加速器である。日本の研究者はプラズマ加速を、癌治療などを目的とするそこそこのエネルギーの加速器として早期に実現することを、視野に入れている。この点日本の研究者のほうが現実的である。
5. ビーム航跡場加速は、レーザーでプラズマ波を作る代わりに、相対論的電子ビーム(ドライブビーム)をプラズマに入射し、ビーム電子とプラズマ電子の反発を利用してプラズマ波を作り、この波で第2の電子ビーム(ドリブンビーム)を加速する方法である。この実験がUCLAのグループを中心にSLAC(スタンフォード線形加速器センター)で行われた。Joshiにより実験結果とともに、アフターバーナーと称する、プラズマ航跡場加速でSLACのビームエネルギーを倍増する計画が紹介された。一般の高エネルギー加速器研究者はプラズマ加速をサイエンスフィクションとして退ける傾向があったが、このアフターバーナーに関しては少なくともnot crazyと受け取っているようだ。プラズマを媒体とせずレーザーの電場で直接粒子を加速する方法(Nakajima, Umstadter)、レーザーとプラズマの相互作用で電磁波を発生する方法などもある(Yugami)。またシミュレーションに関する系統的な要約は、実験屋にとっても有益だった(Mori, Mima)。
6. 先端加速器研究のための共同研究施設として、西海岸にはSLACにORION(オライオン)がある。日本が開発したレーザー電子銃はすでに実用化されている。ORION発足以前に、高エネルギー物理学分野の日米科学技術協力事業の一環として、日本側から研究者を派遣して、SLACのビームラインを用いたプラズマレンズの共同研究が行われた。ビームを絞る、すなわちビームサイズを縮小する研究で、このときの「協力」の実体は米国側に主体があり、日本側は労力と多少の機材を提供したというものであったが、派遣された若手研究者にはそれなりの経験になった。

1.4 終わりに

昨年11月より、プラズマ・核融合学会で、プラズマ粒子加速の専門委員会設置が認められた。賛同をいただいた方々20数名が最初の委員である。ここで述べたように、昨年度ははじめて核融合分野での日米双方向事業としての日米ワークショップ開催も認められ、来年度は日本側で主催することも決まった。国内では、10年近くビーム物理研究

会があり、加速器研究分野に入り込んで細々とした融合が続いてきた。加速器開発や研究の中でも、特に先進加速器開発のなかで、プラズマ加速、レーザー加速が従来型 RF 加速器技術に遜色なく活躍する場が広がってきつつある。不断的な努力が大事である。

この小特集の章立ては、最近のトピックスを中心に、以下のようになっている：

- 第1章 歴史、応用分野、開発課題、photon source としての展開、国際開発状況。北川米喜担当（大阪大学）
- 第2章 加速の原理。小方 厚担当（広島大学）
- 第3章 ガラスキャピラリーを用いた電子加速。北川担当
- 第4章 単色電子ビームの発生。三浦永祐，小山和義，加藤 進担当（産総研）
- 第5章 イオン加速。大道博行担当（原研関西研）

参考文献

- [1] T. Tajima and J.M. Dawson, Phys. Rev. Lett. **43**, 267 (1979).
- [2] K. Estabrook and W.L. Kruer, Phys. Fluids **26**, 1892 (1982).
- [3] 北川米喜：核融合研究 **58**, 369 (1987).
- [4] C.E. Clayton *et al.*, Phys. Rev. Lett. **54**, 2343 (1985).
- [5] 小方 厚，“超小型加速器”－プラズマレーザー加速器－第5章プラズマ航跡場加速，杉原，西田，小方編著，（アイピーシー出版，1998）。
- [6] F. Martin and N.A. Ebrahim, “Electron Acceleration by a Resonant Beat Wave”, Proc. SPIE Conf. 2-6 June, 1986 Québec (1986).
- [7] Y. Kitagawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **68**, 20 (1992).
- [8] C.E. Clayton *et al.*, Phys. Rev. Lett. **70**, 37 (1993).
- [9] V. Malka *et al.*, Science **298**, 1596 (2002).
- [10] Y. Kitagawa, J. Plasma Fusion Res. **79**, 985 (2003).
- [11] Y. Kitagawa, Y. Sentoku *et al.*, Phys. Rev. Lett. **92**, 205002 (2004).
- [12] J. Faure *et al.*, Nature, **431**, 541 (2004).
- [13] 瀬谷道夫，桑原輝隆：“加速器技術に関する先端動向調査，” 文部科学省科学技術政策研究所 NISTEP Report No. **67** (June, 2001).
- [14] 北川米喜，瀬谷道夫：日本物理学会誌 **57**, 678 (2002).
- [15] F. Brunel, Phys. Rev. Lett. **59**, 52 (1987).
- [16] ハイトラ：輻射の量子論，25節（吉岡書店，京都 1958）。
- [17] 広瀬立成：日本物理学会誌 **54**, 862 (1999)；藤原守他：放射光 **10**, 23 (1997).