

# Particle-in-cell シミュレーションによる 高強度レーザー生成プラズマアンジュレータに関する研究

中村 浩隆

大阪大学 大学院工学研究科 電気電子情報工学専攻

## 1. はじめに

近年、量子ビーム技術の進展によって X 線自由電子レーザー(XFEL)という形で X 線領域のレーザーを実現できるようになった。[1-3] その XFEL は基礎研究から産業や国民の生活に役立つ応用研究開発において革新的な成果を創出することが期待されており、XFEL による原子レベルのイメージングやたんぱく質結晶構造解析を飛躍的に発展させる可能性がある。しかし、その研究装置は大型の線形加速器と数百 m の長さのアンジュレータから構成されており、その大きさなどの制約から、現在は XFEL 装置を使った実験の機会が非常に限られていると言える。

一方、近年のレーザー技術の進展により 10 TW クラスのレーザーパルスが容易に発生できるようになり、従来では加速器などの大型施設でしか実現できなかった 100 MeV を超えるようなエネルギーを持つ高輝度電子ビームをテーブルトップサイズ(10m 程度)レーザー装置で生成したプラズマからでも得られるようになった。[4-7] 最近の研究では 1 GeV を超えるようなエネルギーの電子ビームの生成も実現されている。[8, 9] このようなレーザー生成プラズマを用いた加速器を XFEL の電子加速器部分に用いることでシステムの小型化が実現できると期待されている。

またアンジュレータ部の小型化に関する研究も盛んに行われており、磁石の厚みを薄化することで小型化を実現しているが永久磁石を用いた従来の手法では技術的に限界に近くなっていると言える。加速器部と同様にアンジュレータ部もプラズマ中に発生する電磁場を利用することで劇的な小型化が可能になると考えられるため、レーザー干渉法 [10] やワイヤー放電プラズマ法 [11]などが提案されている

が実現には至っていない。

本研究ではアンジュレータの小型化を実現するために高強度レーザー生成プラズマを用いたプラズマアンジュレータの新生成法を提案し、その有効性をシミュレーションにより確認した。第 2 章でその手法の原理と利点を説明し、3 章でシミュレーション条件、4 章でその X 線ビーム生成の結果を示している。

## 2. プラズマアンジュレータ生成法の提案

本研究では高強度レーザー生成のプラズマデバイスを利用したアンジュレータの小型化を目指した研究を行った。これまで提案されているプラズマアンジュレータ生成法としてはレーザー干渉法やワイヤー放電プラズマ法などがあるが、前者は周期長を短くするのが困難なため X 線領域のビーム生成が難しく、後者はレーザースポットサイズの制限からアンジュレータの全長を長くすることができないという問題があり実現には至っていない。

この問題を解決するために筆者は図 1 に示すような高強度レーザーを使用した単純な構造のアンジュレータ生成法を提案した。実験配置としてはレーザー加速器などでも使用するガスジェットをターゲットとして高強度レーザーを照射する構造だが、この時あらかじめガスジェットに格子状のマスクを装着することで周期的な密度分布を持たせて、そこにレーザーを照射するというものである。このレーザーと周期的密度構造を持つガスジェットとの相互作用で生成したプラズマに外部から電子ビームを挿入することでその電子を振動させ X 線を放射させる。

この手法は高強度レーザービームが 1 本のみですむことやマスクの格子間隔を調整することで生成される電磁場の周期長を変更することができることか

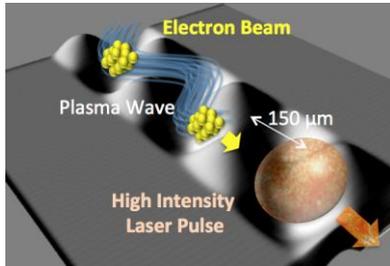
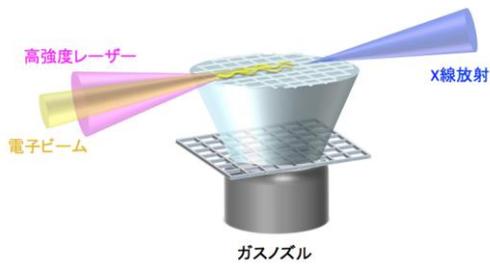


図1：(上) 高強度レーザーを用いたプラズマアンジュレータの新生成法の配置図と (下) 電子ガイドの概念図

らコンパクトなエネルギー可変のアンジュレータとなることが期待される。

### 3. Particle-in-cell シミュレーション法 (PIC 法) の初期条件

第2章で記述したアンジュレータ生成法の有効性を PIC 法を行うことで確認した。

PIC 法とは荷電粒子の相対論的運動方程式と Maxwell 方程式を時間ステップごとに互いに解き進めることによってプラズマや電磁界時間空間発展を行うものであり、次の3つのステップを繰り返し計算していく手法である。(1)粒子の位置、速度から電荷密度、電流密度を求める。(2)電荷密度、電流密度から Maxwell 方程式を用いて電磁場分布を求める。(3)電磁場分布から電磁力を求め、次の時間ステップでの粒子の位置、速度を相対論的運動方程式から求め(1)に戻る。PIC コードの詳しい解説は文献 [12] に示されている。高密度プラズマのシミュレーションは、大量のプラズマ粒子の軌道を計算するため、必要なランタイムメモリーがテラバイト級の大規模並列計算が必要であり SX-ACE システムを使用させていただいた。

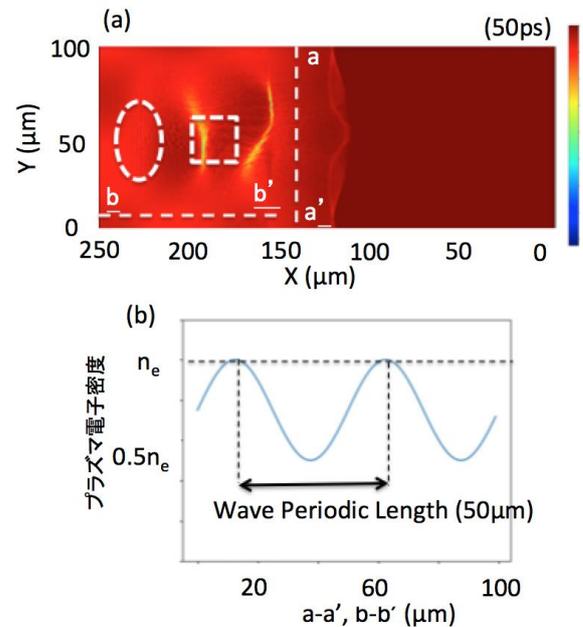


図2：(a) 初期密度プラズマ分布 (プラズマ周期長 50 μm) 楕円：レーザーパルス位置、四角：電子ビームパンチの位置。(b) a-a', b-b'の密度プロファイル、プラズマ電子密度  $n_e$  は  $5.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  または  $1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

計算 Window 内のセルの数は  $3840 \times 800$  とし、レーザーパルスの伝搬に追従する Moving window 法を用いている。計算領域は  $240 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$  でグリッドサイズは X 軸 (レーザー伝搬軸) :  $\lambda/16$ 、Y 軸 (レーザー磁場方向) :  $\lambda/8$  としている。ここで  $\lambda$  はレーザー周波数であり、この計算では  $1 \mu\text{m}$  である。電子はセル当たり 25 個で、イオンの運動は無視している。

図2に周期的密度分布を持つプラズマの初期条件を示している。白色楕円が高強度レーザーパルス位置、四角が外部挿入電子パンチの位置を表しており、レーザーとビームの距離は  $70 \mu\text{m}$  としている。レーザーおよび電子ビームは図2の左方向へ伝搬していく。a-a' (Y 軸)、b-b' (X 軸) での初期電子密度のラインプロットを図2(b)に示しており、単純な正弦分布としている。

電子密度最大値  $n_e$  は  $5.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  または  $1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  で最小値を  $0.5 n_e$  とし、密度の周期長を  $50 \mu\text{m}$ 、 $150 \mu\text{m}$ 、および  $0 \mu\text{m}$  (一様) と設定した。

レーザーパルスのパラメータは波長  $1 \mu\text{m}$ 、集光強度  $1.0 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ 、パルス幅  $20 \text{ fs}$ 、集光サイズ  $20$

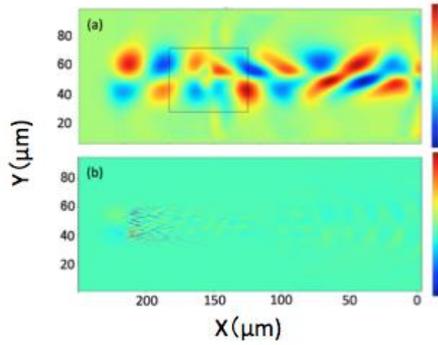


図 3 : プラズマ中に生成された電界分布 (初期密度最大値  $n_e$  (a)  $5.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  (b)  $1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ )

$\mu\text{m}\phi$  であり、外部挿入電子バンチのパラメータはエネルギー 355 MeV (ローレンツファクター  $\gamma = 700$ )、電荷量 1 pC、ビームサイズ  $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  と設定した。設定したレーザーや電子ビームのパラメータはレーザー加速器としても容易に得られるパラメータであり、数 m 程度の小さなシステムで得られるレーザー、電子ビームの値とした。

#### 4. プラズマアンジュレータシミュレーション結果

##### 4.1 レーザープラズマ相互作用により生成された電界分布

図 3 にレーザーと周期的密度分布を持つプラズマ (周期長  $50 \mu\text{m}$ ) の相互作用により生成された Y 方向 (電子ビームの伝搬方向とは垂直方向) の電界分布の例を示している。図 3(a) は電子密度最大値が  $5.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  の場合、図 3(b) は  $1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の場合の分布となっている。

図 3(a) では周期的な構造の電界分布が生成されており、電子ビーム伝搬方向の周期長は初期密度分布の長さ  $50 \mu\text{m}$  と一致している。図中の黒い四角の枠は電子ビームの位置を示しているが電子ビームの前方では正負が交互に入れ替わっている分布をしているが、後方では崩れた形状の分布となっている。

一方、図 3(b) ではより高密度のプラズマとの相互作用の結果、電界分布がレーザーパルス近傍のみ発生し、またその分布は複雑な構造をしている。これは高密度領域の不安定な相互作用による。

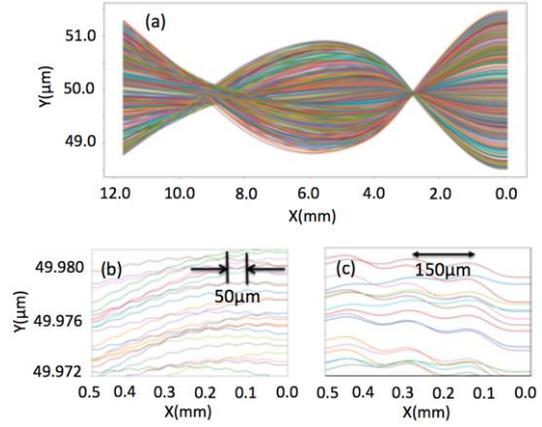


図 4 : (a) プラズマ中での電子ビーム軌道と拡大図 (初期プラズマ周期長 (b)  $50 \mu\text{m}$ , (c)  $150 \mu\text{m}$ .)

#### 4.2 周期的構造電界分布中の電子ビームの伝搬

図 4 に周期的電界分布を持つプラズマ中を伝搬する電子ビームの伝搬軌道の結果を示している。図 4(a) は周期長  $50 \mu\text{m}$ 、プラズマ密度  $5.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  の場合の  $1.5 \text{ cm}$  の領域での伝搬軌道を表しており、ビームが発散、収束を繰り返しながら振動しながら伝搬しているのがわかる。この振動は Budker-Bennett 効果[13] によるプラズマレンズの影響で発生しているが、振動周期が  $1.0 \text{ cm}$  以上の長さとなっている。

この場合のそれぞれの電子軌道を拡大したものを図 4(b) に示している。この結果から、電子ビームはそれぞれ  $50 \mu\text{m}$  の周期長で振動していることがわかる。また、プラズマの初期周期長が  $150 \mu\text{m}$  の場合は電子の振動周期長も  $150 \mu\text{m}$  となり、プラズマの初期周期長と一致していることがわかる。

#### 4.3 電子ビームからの X 線放射スペクトル

式(1)[14]を用いて、電子ビームから放射される X 線のエネルギースペクトルをポストプロセス計算により求めた。最終的なスペクトルはそれぞれの電子ビームの軌道に対して計算を行い、電子ビーム密度に応じて重み付けをして合計して算出している。

$$\frac{dI^2}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2 \omega^2}{4\pi c} \left| \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ n' \times (n' \times \beta') \right\} e^{i\omega(t' - n' \cdot r(t')/c)} dt' \right|^2 \quad \text{---(1)}$$

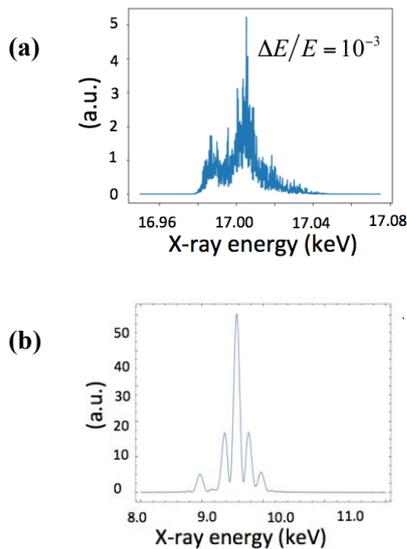


図 5: 電子ビームから放射される X 線のエネルギースペクトル(初期プラズマ周期長(a) 50  $\mu\text{m}$ , (b) 150  $\mu\text{m}$ )

図 5(a)に示したように振動周期長 50  $\mu\text{m}$  の場合は 17 keV の単色 X 線ビームが得られ、150  $\mu\text{m}$  の場合は 9-10 keV の単色 X 線ビームが得られた。

これらの結果からプラズマアンジュレータを用いて単色 X 線ビームが得られることが示され、プラズマの密度周期長を変更することで X 線のエネルギーを制御できることが示された。

## 5. おわりに

エネルギー可変の単色小型 X 線源の実現を目的として、高強度レーザーを用いた新しいプラズマアンジュレータ生成法を提案し、その有効性を PIC 法により確かめた。

レーザーのエネルギー 10mJ 程度、集光強度  $10^{17}$  W/cm<sup>2</sup>、プラズマ密度  $5.5 \times 10^{17}$  cm<sup>-3</sup>、初期プラズマ周期長 150  $\mu\text{m}$ 、電子エネルギー 355MeV の条件で 9-10 keV の単色 X 線ビームの実現を計算により確かめた。

これらの条件を満たす装置は 1-2m 程度で設計することができ、さらにレーザー加速器と組み合わせることで全装置が 5 m 程度の大きさでエネルギー可変単色 X 線発生装置として実現することが可能になると期待できる。

## 参考文献

- (1) T. Ishikawa et al., "A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-ångström region" Nat. Photon. 6, 540 (2012).
- (2) P. Emma et al., "First lasing and operation of an ångström-wavelength free-electron laser", Nat. Photon. 4, 641 (2010).
- (3) M. Altarelli et al., "The European X-Ray Free-Electron Laser, Technical Design Report", DESY Hamburg, (2006), <http://xfel.desy.de/tdr/tdr/>.
- (4) T. Tajima and J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett. 43, 267 (1979).
- (5) S. P. D. Mangles et al., "Mono-energetic beams of relativistic electrons from intense laser-plasma interactions", Nature, 431, 535-538 (2004).
- (6) C. G. R. Geddes et al., "High-quality electron beams from a laser wake-field accelerator using plasma-channel guiding", Nature, 431, 538-541 (2004).
- (7) J. Faure et al., "A laser-plasma accelerator producing mono-energetic electron beams", Nature, 431, 541-544 (2004).
- (8) Ian Blumenfeld et al., "Energy doubling of 42 GeV electrons in a metre-scale plasma wakefield accelerator", Nature, 445, 741-744 (2007)
- (9) J. Gonsalves et al., "Petawatt Laser Guiding and Electron Beam Acceleration to 8 GeV in a Laser-Heated Capillary Discharge Waveguide", Phys. Rev. Lett. 122, 084801 (2019)
- (10) 鈴木康夫 et al., "電場型プラズマ・アンジュレーターの解析", JAERI research 95-009(1995).
- (11) 池畑 隆 et al., "レーザー干渉共鳴イオン化法を用いたプラズママイクロアンジュレーターの形成", JAERI-Research 95-028 (1995).
- (12) C. K. Birdsall and A. B. Langdon, "Plasma physics via computer simulation", CRC press (2004).
- (13) W. Bennett, "Self-Focusing Streams", Physical Review 98, 1584 (1955).
- (14) J. D. Jackson, "Classical Electrodynamics", Wiley (1965).