

# レーザー生成プラズマの膨張ダイナミクス ～大規模粒子シミュレーションと3次元可視化～

ぬなみ まさのり  
沼波政倫

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

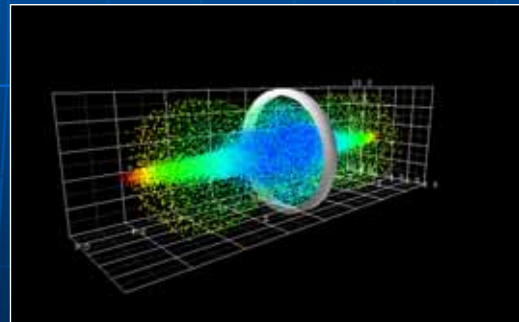
## Contents

### 3D-PIC Simulation

- ・ Introduction
- ・ Physics
- ・ Simulation
- ・ Results & Summary

### HPFについて

### RCM Systemについて



## Introduction

### 極端紫外線 (EUV) リソグラフィー

・・・半導体デバイス用の次世代縮小投影リソグラフィー

### レーザー生成プラズマ (LPP) 光源

・・・スズ (Sn) ターゲットにレーザーを照射し、生成された  
プラズマからの極端紫外放射光 ( $\lambda = 13.5\text{nm}$ ) を利用

### 高エネルギーイオンデブリ

プラズマから発生するイオンのエネルギーは **10 keV程度** におよぶ

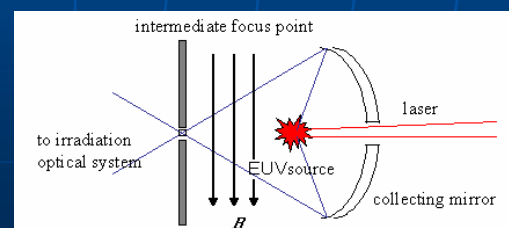
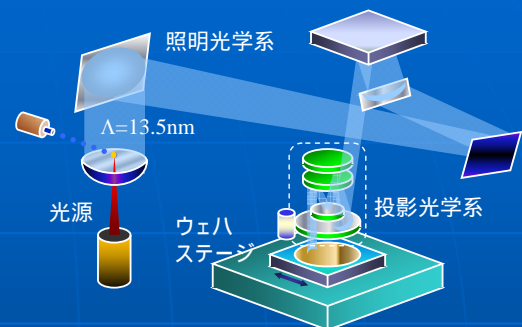
高エネルギーイオンによる集光ミラーの損傷！

- ・ 付着
- ・ 注入
- ・ スパッターング



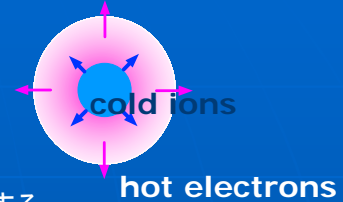
### 磁場シールド

外部磁場によりイオンを制御



## レーザー生成プラズマの膨張

熱せられた電子が膨張      電場形成      イオンが加速



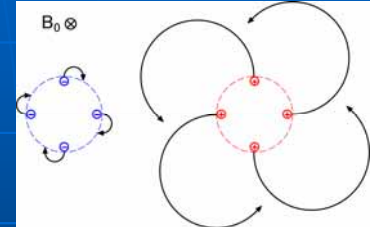
## 荷電粒子のラーマー運動

磁場中の荷電粒子・・・磁力線の周りを旋回運動(ラーマー運動)する。

ラーマー半径・・・  $R_L = v/\omega_{ci} = \sqrt{2m_i E}/(ZeB)$

(例) 1価のスズ(Sn)の場合

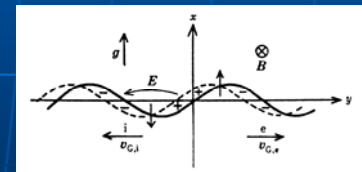
$$\begin{cases} B = 1 \text{ [T]} \\ E_{\text{max}} = 10 \text{ [keV]} \\ Z = 1 \end{cases} \Rightarrow R_{Li} = 11 \text{ [cm]}$$



## 空間スケール

## 交換不安定性

$R_{Le} < R_0 < R_{Li}$       局所的に形成された電場に伴う  
 $E \times B$ ドリフトにより擾乱が成長

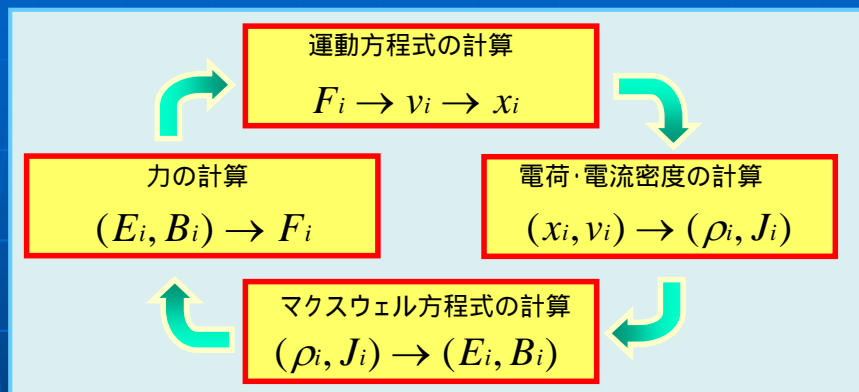


レーザー生成プラズマの磁場中での膨張ダイナミクスを  
粒子シミュレーション(PIC法)により解析する



# Simulation (1/3)

## PIC (Particle in cell) 法

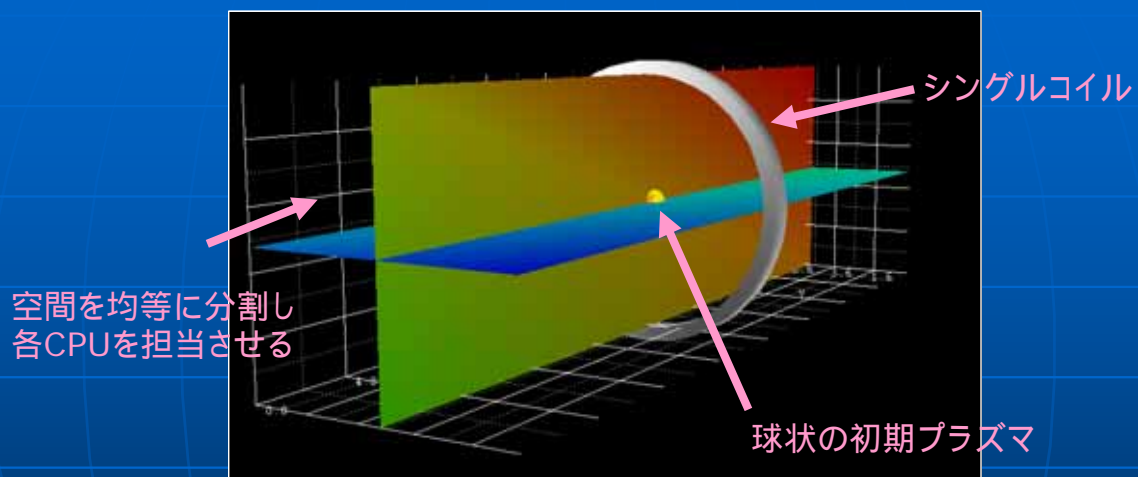


粒子と電場・磁場の時間発展をダイレクトに解くことが可能



## Simulation (2/3)

空間並列化 (MPIによる並列化)



AVSによる3次元可視化

プラズマの膨張ダイナミクスの直観的理解



## Simulation (3/3)

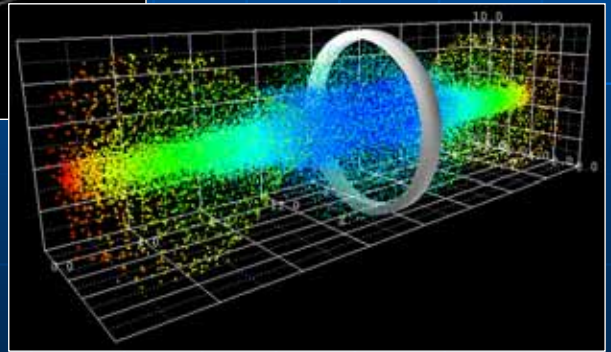
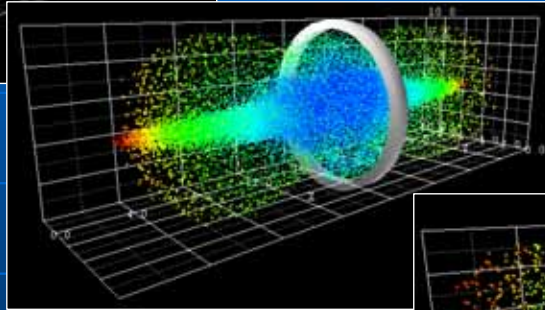
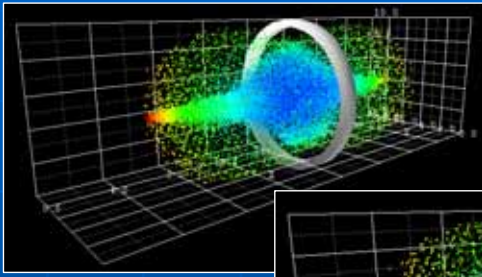
シミュレーション条件

初期プラズマ形状	$R/\lambda_D = 62$ の半径の球状ドロップレット
粒子種類	電子と1価イオンをそれぞれ約60万~1600万个配置
質量比	$m_i/m_e = 100$
初期速度分布	電子にのみ $m_e c^2 / k v_T = 17$ の熱速度のマクスウェル分布
比	磁気軸上で $\beta = p/p_B \sim 12$ となる磁場を用意



# Results (1/3)

## イオンの運動



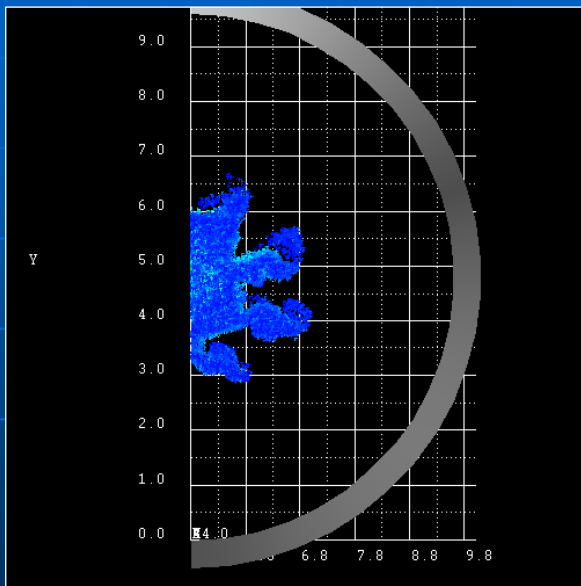
高エネルギーイオンが磁場  
に沿って強く排気されていく



# Results (2/3)

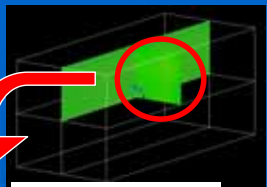
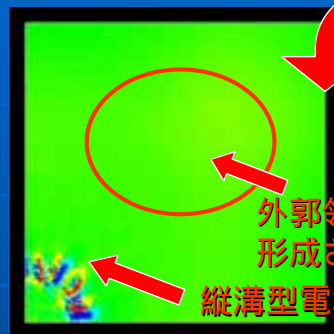
## プラズマ不安定性

### 電子の運動 (y-z plane)



ExBドリフトによる不安定性

### 回転方向電場

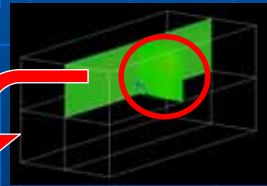
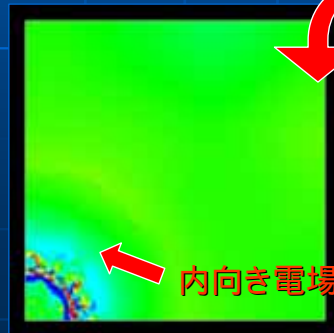


Clockwise  
Anticlockwise

外郭領域には縦溝型電場は  
形成されていない

縦溝型電場が形成

### 動径方向電場



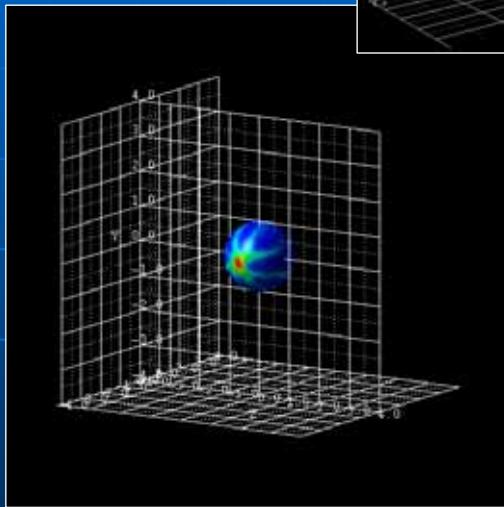
Outward  
Inward

内向き電場が形成

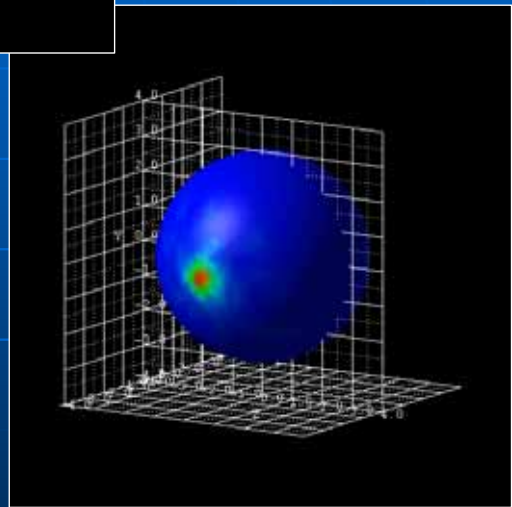


## イオンの角度分布

R = 1



R = 3



内部領域では不安定性が生じているが、外部領域では不安定性の影響が小さい



## Summary

- LPP-EUV光源プラズマからの高エネルギーイオンデブリ
  - ・ 最大10keVにも及ぶ高速イオンの集光ミラーへの損傷が懸念
  - ・ 磁場によるイオンデブリの排気の可能性
- 磁場中でのレーザー生成プラズマの膨張
  - ・ 直径20cmに及ぶイオンラーマー運動
  - ・  $E \times B$ ドリフトによる不安定性の成長
- 3D-PICシミュレーション結果
  - ・ 磁気軸方向へ高速イオンがよく排気されている
  - ・ 交換型不安定性は内部領域で発生
  - ・ 集光ミラーの配置への**Suggestion**



## HPFについて

### HPF (High Performance Fortran)

最小限の指示文によるデータ分割配置指定で、  
並列計算(計算の分割と通信の生成)を自動的に行うFortranの拡張言語

```
INTEGER A(10),B(10),C(10)
DO I=1,10
  A(I) = C(I)+B(I)
ENDDO
WRITE(*,*) A
END
```



```
INTEGER A(10),B(10),C(10)
!HPF$ DISTRIBUTE (BLOCK) :: A,B,C
DO I=1,10
  A(I) = C(I)+B(I)
ENDDO
WRITE(*,*) A
END
```

### レーザー研での取り組み

- 7月26日27日にレーザー研においてHPF講習会が行われた。
- 殆どの参加者が直ぐにコードを書き換えてHPFで動かすことができた。  
HPF推進協議会による冊子を興味のある方には配布します。

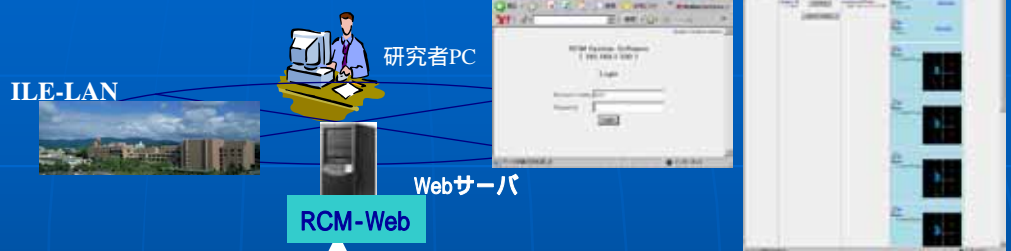


## RCM System Softwareにより、3D-PIC計算環境が、 DB連携機能を備えたWebポータルに！



### システムイメージ

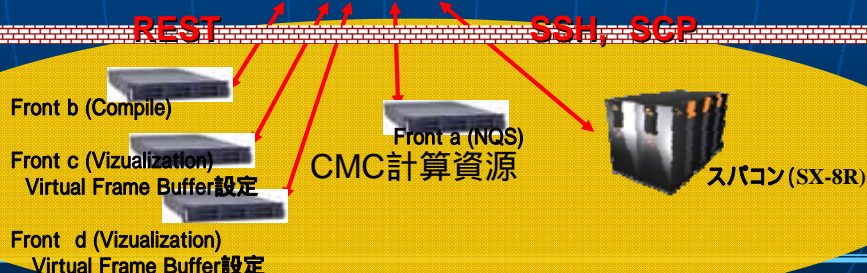
1階層  
133.1.154.XX



2階層  
172.18.50.XX

RCM-XML-DB & RCM-Controller

3階層  
172.20.0.XX



## ポータル化されたシステムは、DBと連携し、ブラウザ上で 様々なユーザー支援を実現



### 1) コンパイルエラー修正フェーズのコード開発支援Workflow機能

ソース転送 コンパイル ソース、コンパイル結果の自動データベース化

### 2) 実行エラー修正フェーズのコード開発支援Workflow機能

実行入力値設定、実行ファイル選択 入力ファイル転送 コンパイル 実行  
実行結果のe-mail結果通知 実行入力値、結果の自動データベース化

### 3) シミュレーション・可視化(AVS)自動実行Workflow機能

実行入力値設定、実行形式ファイル選択 実行形式、入力ファイル転送 シミュレーション実行  
シミュレーション途中経過e-mail通知 結果データ可視化 可視化途中経過e-mail通知  
実行入力値、結果データ、可視化パラメータ、可視化データの自動データベース化

### 4) 一括batch再可視化(AVS) Workflow 機能

再可視化パラメータ値、再可視化対象ファイル設定 batch型再可視化実行(VFB利用)  
可視化途中経過 e-mail 通知 可視化パラメータ、可視化データの自動データベース化

### 5) 過去データ検索、派生関係表示機能

様々な作業を通してデータベースに蓄積された、日時、ファイル名、パラメータ値をもとに、過去のシミュレーション設定やファイル、それらのデータ間の派生関係(このjpegは、どのrawデータからどのような可視化パラメータで作られたか)が検索、表示できる。

平成19年度スーパーコンピュータシンポジウム 2007年8月3日 @大阪大学



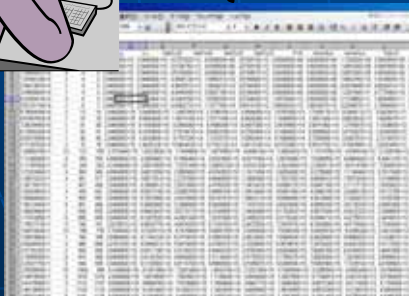
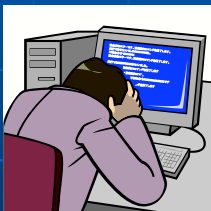
## 研究者を単純・繰り返し業務から開放し、研究時間を増大 させることと、研究の品質管理/品質保証向上を両立！



### DB連携Workflow機能

#### 現状

沢山のデータをグラフ化し、  
比較データを探し、資料作  
成するのは手間がかかる



#### システム化後

データベースと連動したワークフロー  
機能で、シミュレーションも可視化もポ  
タンひとつで自動処理、DB化により  
結果検索も簡単！

モチベーションと効率化のスパイラル



平成19年度スーパーコンピュータシンポジウム 2007年8月3日 @大阪大学

