

XYT 空間での半透明可視化に基づく プラズマプルームの実験・シミュレーションの可視化

Visualizing Experiments and Simulation of Plasma Plumes based on Transparent Visualization in XYT space

川田 修平†
Shuhei Kawata

草薙 龍邦†
Taku Kusanagi

長谷川 恭子†
Kyoko Hasegawa

田中 覚†
Satoshi Tanaka

小田 浩之‡
Hiroyuki Oda

藪内 俊毅‡
Toshinori Yabuuchi

田中 和夫‡
Kazuo Tanaka

1. はじめに

核融合を用いた核融合発電は、次世代のエネルギー源として期待され研究が行なわれている。この核融合反応の際に、高強度の X 線や α 線、カーボン粒子などの飛散物が照射される。これらが炉壁に衝突してアブレーション（溶発）が起き、炉壁を構成する物質がプラズマ粒子群の局在した集まりであるプラズマプルーム化する。このプラズマプルームは、核融合炉の中心に向かって飛散し、互いに衝突・交差し、エアロゾルを形成する。このエアロゾルが、同じ中心部で行なわれる核融合反応の連鎖の阻害になる可能性が指摘されている。一方で、このプラズマプルームを再利用して炉壁を保護する可能性も考えられている。そのためには、炉壁から発生するプラズマプルームの物理的挙動や特性を理解する必要がある。

そこで、プラズマプルームの挙動を解析するものとして、レーザーアブレーションを用いたプラズマ交差実験（交差プルーム法）がある[1]。交差プルーム法は、レーザー核融合炉内における炉壁材料の飛散物の交差現象を模擬する方法である。この方法で、核融合炉の壁として用いられる可能性がある燃料ターゲットにレーザーを照射してプルームを発生させることにより、プルームの交差・衝突挙動を理解することが可能である。交差プルームの測定には ICCD カメラを利用して発光を数十～数百ナノ秒で連続的に撮影した画像を用いる。このような時間的に変化する動的な物理現象を可視化する手法として、一般的にアニメーションがある。しかし、アニメーションには全体の様子を大まかに理解することには有効であるが、特定の時間領域の特徴的な振る舞いに注目することや現象全体を一度で把握することには不向きという問題点がある。

一方、プラズマプルームの物理挙動に対して、計算機シミュレーションを利用して解析を行なう研究も行なわれている[2]。ここで用いるのは、上記の交差プルーム法の実験で得られた交差後の挙動の材質依存性を物理的に理解するために、モンテカルロ直説法を取り入れた二体衝突モデルの粒子法シミュレーションである。シミュレーション結果は実際の実験結果と比較する必要がある。これまでは比較の際に、3 次元のシミュレーションの可視化結果と実験で得られる時系列 2 次元画像群を見比べていた。しかし、これでは異なる種類の画像を別々に視認する必要があり、解析には不便である。

本論文では、科学技術分野におけるプラズマ現象の物理的挙動、特性を解析するために可視化の面から支援する 3 つの手法を提案する：

- (1) 時系列画像群の 3 次元ボリュームレンダリング
 - (2) 構成元素が異なるプラズマプルームの融合可視化
 - (3) シミュレーションデータと実験データの融合可視化
- 本研究では、上記の可視化方法の実現のために、対象データを粒子データに変換した上で、粒子ベースレンダリング[3]を用いて可視化を行なう。このレンダリング法は、「不透明な発光粒子」の描像に基づく半透明ポイントレンダリングであり、複数の可視化対象があってもそれぞれの対象を粒子データ化したうえで単純に混ぜ合わせるだけで高精細な半透明可視化が実現できる。

2. 粒子ベースレンダリング

本研究では、大量点群に対してもソートをしなくてもよいポイントレンダリングの一種である粒子ベースレンダリングを用いる。粒子ベースレンダリングとは、坂本、小山田、田中らによって提案された大規模データの品質レンダリングが可能な新しいボリュームレンダリング方法である[3,4,5,6]。粒子ベースレンダリングには、粒子ベースボリュームレンダリング (PBVR) とこの考え方を曲面に応用した粒子ベースサーフェスレンダリング (PBSR) がある。

本章では、粒子ベースレンダリングについて述べる。粒子ベースレンダリングは、Sabella の発光粒子モデル[7]である「不透明な発光粒子」という描像を活かしたポイントレンダリングである。手順は以下のとおりである。

1. 粒子生成
2. 粒子投影
3. ピクセル輝度値の決定

2-1. 粒子生成

ボリュームレンダリングではメトロポリス法[8,9]によって、伝達関数で定められる不透明度分布に比例する粒子密度で粒子を生成する。等値面のサーフェスレンダリングでは、マーチングキューブ法などでポリゴンメッシュを生成した上で、各ポリゴンの一様サンプリングによって粒子を生成する。

2-2. 粒子投影

まず、生成した粒子群を L_R 個のグループに分割する。 L_R をリピートレベルと呼ぶ。次に、各グループで、生成した粒子群を画像平面に投影して中間画像を生成する。粒子投影の際には、粒子が不透明であることを反映させるため

に Z バッファ法を実行して陰点処理を行なう。これにより、様々なデプスの粒子が同一ピクセルに投影され、中間画像群に粒子色が保存される。

2-3. ピクセル輝度値の決定

上で生成した L_R 枚の中間画像の平均画像を求める。これが、様々なデプスの情報を取り込んだ半透明画像となる。

3. 実験データ

3-1. 交差実験データ

大阪大学では、プラズマ交差実験を行なっている。実験では、慣性核融合炉の炉壁の材質として考えられているカーボンとタングステンに加え、プラズマブルームの物理的挙動を理解するためにアルミニウム、銅及びモリブデンを用いている。プラズマの挙動を時間経過毎に取得するためにレーザーと同期させた信号を ICCD のトリガーとして用いて、レーザーがターゲットに照射された後、一定時間毎にプラズマブルームの自然光を測定している。

シミュレーションとの融合可視化を行なう実験データについて述べる。ICCD カメラから取得した画像データは、解像度 1024×1024 であり、実験の様子を撮影しているためノイズが含まれている。取得した時系列データは、 $20\text{nsec} \sim 3000\text{nsec}$ を $20\text{nsec}/\text{フレーム}$ で撮影しており、合計フレーム数は 150 フレームである。

シミュレーションとの融合可視化以外の可視化に用いる実験データについて述べる。ICCD カメラから取得した画像データは、解像度 1024×1024 であり、時系列データは 50nsec ごとに露光時間 50nsec で撮影している。合計フレーム数は 100 フレームである。

プラズマブルームの衝突の方向として、今回は 2 種類の実験データを用意した。図 1(左)の赤い矢印のようにレーザーを 2 つの資料に照射すると、生成した 2 つのプラズマブルームは互いに直交して進み、画面中央で衝突する。一方、図 1(右)の赤い矢印のようにレーザーを資料に照射すると、生成した 2 つのプラズマブルームは画面右下で正面衝突する。

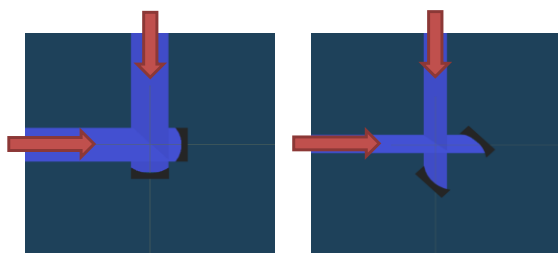


図 1 ターゲットの配置

3-2. シミュレーションデータ

交差実験で観測された交差後の挙動の物質依存性を物理的に理解するために、粒子シミュレーションを行なっている。粒子シミュレーション法には、モンテカルロ法と分子動力学法の 2 つがある。モンテカルロ法は粒子の配置を与えられた確率法則の下に乱数を用いて作成していく確率論的な方法であり、分子動力学法は粒子の運動方程式を連立

して解く決定論的方法である。大阪大学で行なわれている粒子シミュレーションは、前者のモンテカルロ法を用いており、二体衝突モデルで衝突現象を取り扱っている。計算に考えている粒子は、中性粒子とイオン粒子である。そのため衝突計算は、中性粒子と中性粒子、中性粒子とイオン粒子、およびイオン粒子とイオン粒子が考えられ、全て完全弾性衝突としている。中性粒子と中性粒子および中性粒子とイオン粒子の衝突に関してはモンテカルロ法より計算され、イオン粒子同士の衝突に関してはクーロン衝突モデルにより計算される。

シミュレーションで取得したデータは、粒子の位置データ (x 軸、y 軸、z 軸) の時系列データである。また、シミュレーションに用いる粒子は中性粒子とイオン粒子に分類されており、それぞれ 70,000 点、280,000 点存在している。計算条件として、初期状態 (時間 0 ns) は図 2 (a) のようになっている。計算領域は $3\text{ cm} \times 3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ の 3 次元空間であり、 $100 \times 100 \times 100$ 個のセルで構成されている。初期状態において、粒子は全部で 500,000 点配置している。グループ分けされた同じ形状の 2 つの粒子群はそれぞれ 250,000 点ずつの粒子で構成されており、2 つの粒子群は並進速度をもって互いに交差する。並進速度は、交差点に対して集束するように与えており、交差点を通過する密度が前方に配置された粒子と後方で配置された粒子で均一になるように分布をもたせて配置している。シミュレーションの各時間の時系列データの一例を以下に示す。図 2 はカーボンのシミュレーションデータである。

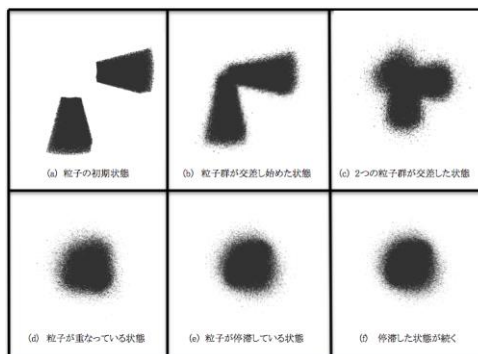


図 2 カーボンのシミュレーションデータ

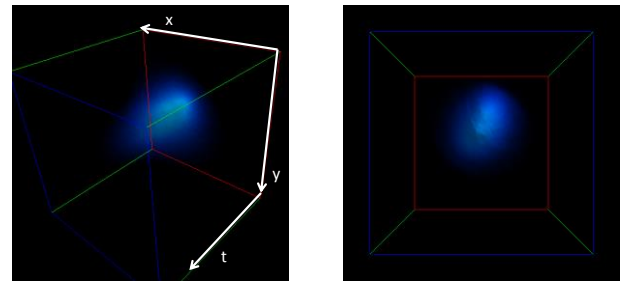
3-3. データの作成

時系列静止画像群からボリュームデータを作成するには、ICCD カメラから取得した時系列静止画像を順に重ね合わせる。これにより、空間 2 次元 (XY) + 時間 1 次元 (T) の 3 次元ボリュームデータが作成できる[10]。3-2 で述べた 150 フレームの取得した画像を単純に重ね合わせるとノイズを含んだ薄い板のようなボリュームデータを作成することになる。しかし、薄いボリュームデータではプラズマ交差現象の挙動が把握しにくい。そこで、本研究では取得した時系列静止画像群に対して、ノイズを軽減するために平滑化を行なった後リサイズを行なう[11]。この処理を行なって作成したボリュームデータに 2 章で述べた粒子ベースレンダリングを適用して可視化を行なう。

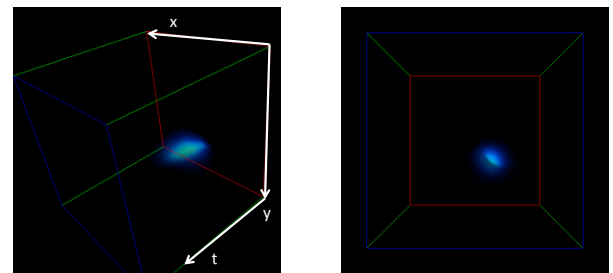
また、サーフェスを用いた可視化では、3-2 で述べたデータを上記と同様の方法で作成したボリュームデータに対

して、マーチングキューブ法を適用して等値面のデータを作成する。このサーフェスデータに 2 章で述べた粒子ベースレンダリングを適用して可視化を行なう。

シミュレーションから取得する粒子データは、XYZ 空間の粒子の位置情報が格納されている。シミュレーションデータから XYT 空間の粒子群データを作成する際、XY 空間に射影を行ない、時系列静止画像群と同様に時系列順に重ね合わせて作成する。粒子群データから粒子の密度に基づいたボリュームデータを作成する際、粒子群データに対する時系列ごとの密度分布が必要となる。シミュレーションデータ XYZ 空間から XY 平面へと平行投影を行なう。投影したグリッドごとに粒子の密度分布を求め、粒子の密度に応じて輝度値に変換を行なう。粒子の密度が密なグリッドを最大値、密度が疎なグリッドを最小値とし、レインボーカラーで投影された画像ごとに変換を行なっていく。輝度値に変換された画像を時系列順に重ね合わせて空間 2 次元 (XY) + 時間 1 次元 (T) の 3 次元ボリュームデータを作成する。これにより、実験データとシミュレーションデータはともに XYT のボリュームデータになるため、比較が容易に行なえるようになる。



鳥瞰図 正面
図 3.1 カーボンの対向衝突



鳥瞰図 正面
図 3.2 カーボンの直交衝突

4. 可視化結果

4-1. XYT 空間における単一物質の 3 次元可視化

実験データは 2D の白黒画像が 100 枚集まった画像群である。この画像群を連続再生すること (アニメーション) で衝突から衝突後の挙動までを見ることができ、また、画像群から画像を選択することでその時間の広がり具合を見ることができ、並べると時間での広がり具合の比較を行なうことができる。しかし、アニメーションとして見た時に最初と最後や最後と途中を同時に見ることは不可能である。見るためには、アニメーションを繰り返し見ることや画像群から画像を取り出すという作業を行なわなければならない。そこで、2D の画像を時間軸に沿って並べて補間し 3 次元のボリュームデータを作成する。通常、3 次元データは x 軸、y 軸、z 軸の 3 軸であることが多いが、本研究で用いる 3 次元データは x 軸、y 軸、t 軸の 3 軸である。このように時間軸方向に重ね合わせることで、アニメーションで見ていた挙動を一目で見ることができ、異なる時間を同時に見て比較することも可能になる。

ここでは、最近新たに行なわれた実験の結果を用いる。この実験からは、カーボン粒子を用いて直交に衝突させた結果と対向に衝突させた結果が得られる。図 3.1 にカーボンを対向衝突させたデータの可視化結果、図 3.2 に直交衝突させたデータの可視化結果を示す。この結果から、時間軸方向への変化をスムーズに見ることができ、全体を一度で見ることができていることがわかる。図 3.1 に示す結果から、対向衝突ではとどまらずに全体的に、特に進行方向に平行な方向 (図 3.1 の上下方向) に広がっていることがわかる。一方、図 3.2 に示す結果からは、どの方向にもあまり広がらずにとどまっていることがわかる。

4-2. 異なる物質を用いた融合可視化

核融合炉の炉壁の材質には複数の選択があり得る。その選択を適切に行うことを目的として、プラズマの物理的挙動や特性を理解するためには、単一物質の結果だけでは難しい。そこで、複数物質の物理的挙動や特性の違いを見るために、2 つの物質の実験結果を融合可視化する。異なる物質の挙動を重ねて表示することで、それらの物質の挙動の違いを一目で判断することができる。また、これにより物質依存性解析も行なうことができる。

ここでは、アルミニウム、カーボン、タングステンの 3 種類の物質を用いて、それぞれボリュームデータ、サーフェスデータを作成して融合可視化を行なう。融合可視化の種類としてはボリューム-ボリューム融合、ボリューム-サーフェス融合、サーフェス-サーフェス融合が挙げられる。今回はこの中からボリューム-ボリューム融合とサーフェス-サーフェス融合を取り上げる。

・サーフェス-サーフェス融合

図 4 にアルミニウム (マゼンタ) とカーボン (シアン) のサーフェス-サーフェス融合の結果を示す。ここでは、サーフェス同士が重なり合う部分を強調するために白色にしている。また、サーフェスはそれぞれボリュームデータから 100 の等値面で生成している。この結果から、ほとんどの時間において重なり合う部分である白色が存在するため、アルミニウムとカーボンはこの等値面では挙動が似ていると推測できる。このように、サーフェス-サーフェス融合ではある一定の値において、挙動が似ているか似ていないかを推測できる。これは、物質間の各温度における比較に有効であると考えられる。

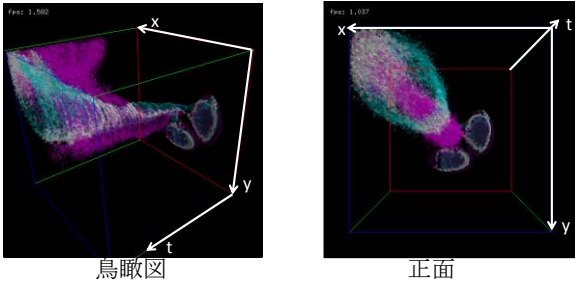


図 4 サーフェス・サーフェス融合

・ボリウム-ボリウム融合

図 5 に、カーボン（黄色）とタングステン（紫色）のボリウム-ボリウム融合の結果を示す。この結果から、カーボンは時間の経過とともに広がっていくがタングステンは時間が経過しても広がらずにすり抜けていくことがわかる。このように、異なる 2 つの物質の全体の挙動が一目で把握でき、また比較することができる。

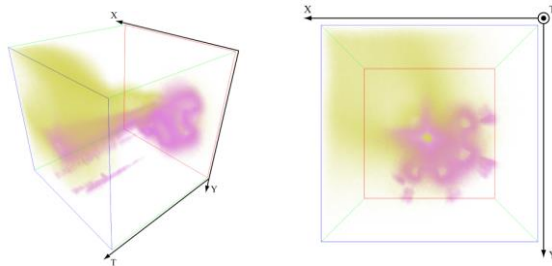


図 5 ボリウム-ボリウム融合

4-3. 実験とシミュレーションの融合可視化

まず、実験データを可視化する。本論文では、カーボンの実験データである静止画像群の可視化を行なう。実験で得た時系列静止画像群を同じ基準により正規化する。この正規化では、発光強度の比較は材質ごとで発生するプラズマブルームの性質の比較ということになる。各図中の赤色が高発光部、緑色が中発光部、青色が低発光部を示している。特に低発光部の可視化で材質ごとの挙動に違いがはっきりと判断できる。

図 6 にカーボンの実験データを可視化した結果を示す。この結果から、交差してから発光が大きくなっていることがわかる。そのため、この発光強度を温度として解釈すると、粒子が密であるために強く発光している可能性があると考えられる。

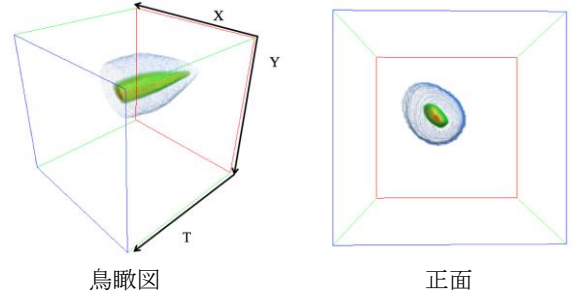


図 6 カーボンの実験

続いて、シミュレーションデータを可視化する。本論文では、カーボンのシミュレーションから取得する粒子データ XYZ 空間の粒子情報から XYT 空間に変換した粒子群データの可視化を行なう。このデータは粒子の密度が密なグリッドを最大値、密度が疎なグリッドを最小値としたボリウムデータであり、それに基づいて伝達関数の色を反映する。この場合、粒子密度の比較を行ない、材質ごとで発生し拡散、または停滞している粒子を理解することができる。

図 7.1～図 7.3 にカーボンのシミュレーションデータを可視化した結果を示す。図 7.1 では、中性粒子、イオン粒子を分けることなく 1 つの発生した粒子として密度を求め可視化したものである。粒子密度が少ない場所は薄い茶色、高い場所は黄色で描画している。どの粒子の密度が高いかを把握する場合には、それぞれの粒子を分けて可視化する。次にそれぞれ分けて可視化した結果を示す。図 7.2 がカーボンの中性粒子のシミュレーション結果、図 7.3 がカーボンのイオン粒子のシミュレーション結果である。カーボンのイオン粒子は、取り扱うシミュレーションデータでは 1 荷 2 荷を区別できないためイオン粒子として可視化を行なっている。図 7.2 から、中性粒子は互いに衝突することなくすり抜けていくことがわかる。そのため、粒子密度の高い箇所には関係性が非空位と考えられる。一方、図 7.3 からはカーボンの粒子の動きとして粒子全体の動きと似ており、中性粒子とは異なる結果であることがわかる。

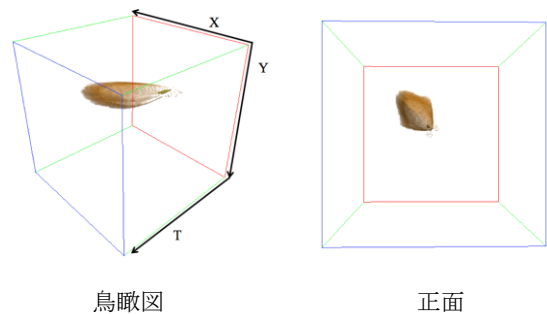


図 7.1 カーボンのシミュレーション結果 (粒子区別なし)

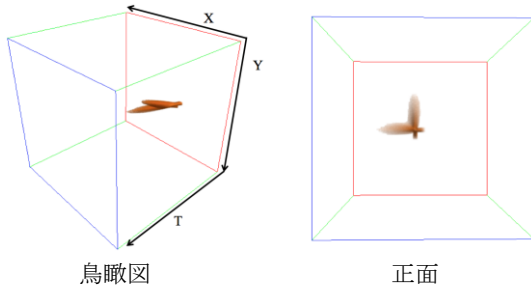


図 7.2 カーボンのシミュレーション結果 (中性粒子)

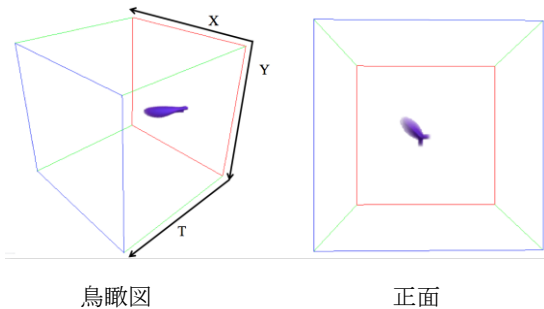


図 7.3 カーボンのシミュレーション結果 (イオン粒子)

最後に、実験データとシミュレーションデータの融合可視化を行なう。ここでは、上記で述べた実験データとシミュレーションデータを重ねた可視化を行なう。これにより、ICCD カメラから取得した画像の輝度値が高い箇所は、粒子がどのように挙動を示しているかを把握することができる。

図 8.1、8.2 に、カーボンのシミュレーションデータと実験データを融合可視化した結果を示す。図 8.1 のシミュレーションデータは図 7.1 に示した中性粒子、イオン粒子を分けることなく 1 つの発生した粒子として密度を求めたものであり、図 8.2 のシミュレーションデータは図 7.2 に示した中性粒子と図 7.3 に示したイオン粒子である。このとき、実験データをレインボーカラー、中性粒子を紫色、イオン粒子を茶色で可視化している。図 8.1 から、粒子密度の高い箇所が実験データの輝度値が高い箇所と関係性があると考えられる。一方、図 8.2 からは中性粒子は実験データの輝度値と関係性が少なく、イオン粒子が実験データの輝度値が高い箇所と一致していることがわかる。

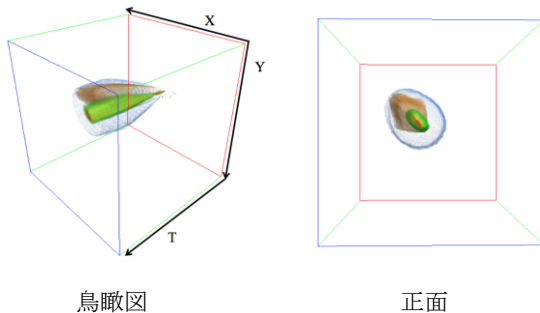


図 8.1 カーボンの実験とシミュレーションの融合可視化 (中性粒子とイオン粒子の区別なし)

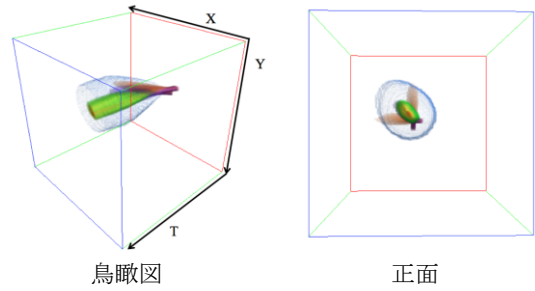


図 8.2 カーボンの実験とシミュレーションの融合可視化 (中性粒子とイオン粒子を区別)

5. 結論

本研究では、プラズマの物理的挙動を理解することを可視化の面からサポートするために、XYT 空間での可視化、異なる物質の融合可視化、実験データとシミュレーションデータの融合可視化を提案した。

XYT 空間の可視化では、アニメーションでは不可能であった時間全体の挙動を同時に見る方法を提案した。ICCD カメラから得られる時系列静止画像群を時間軸方向に順に重ね合わせることで、空間 2 次元 (XY) + 時間 1 次元 (T) の 3 次元ボリュームデータが作成できる。また、このボリュームデータは粒子ベースレンダリングを適用して可視化した。これにより、一度に全体の挙動を把握することが可能になった。

異なる物質の融合可視化では、物質間の挙動の違いや物質依存性を理解するための融合可視化を提案した。異なる物質のボリュームデータを融合可視化するボリューム・ボリューム融合、ボリュームデータからサーフェスデータを作成し、異なる物質のサーフェスデータを融合可視化するサーフェス・サーフェス融合を行なった。これにより、物質間における挙動の違いや物質依存性を把握することが可能になった。

実験データとシミュレーションデータの融合可視化では、プラズマの交差挙動とシミュレーションの比較を一目で行なえる方法を提案した。シミュレーションデータを XY 平面に射影して時系列に重ねることで、実験データと同じ空間 2 次元 (XY) + 時間 1 次元 (T) の 3 次元ボリュームデータに変換し、融合可視化を可能にした。これにより、シミュレーションの粒子密度と実験データとの輝度値の関係性を把握することが容易になった。

本研究は、プラズマブルームの物理的挙動を理解するために、可視化の面から複数の方法を提示し、実験より役立つことができた。

今後の展望としては、4-1 で述べた実験 (1) で用いた、最新新たに大阪大学で行なわれた実験データの融合可視化が挙げられる。現在は直交・対向それぞれを単一で可視化しているだけであるが、これを融合可視化することでターゲットの配置の違いを一目で把握することができるようになると思われる。また、現在行なっている融合可視化において、表示色の課題がある。現在行なっている可視化が必ずしも見やすいわけではないため、どのような色の組み合わせにすると結果が見やすくなるかを理論に基づき考える必要がある。これらにより、様々な形でプラズマブルー

ムの物理的挙動や特性を理解する助けになることが期待できる。

6. 参考文献

- [1] Y. Hirooka, K.A. Tanaka, H. Sato, K. Ishihara and A. Sunahara, "Laboratory experiments on cluster/aerosol formation by colliding ablation plumes", *Journal of Physics* 244, pp.32-37, 2010.
- [2] 御前成吾, 砂原淳, 河野卓也, 田中和夫, "粒子シミュレーションを用いたプラズマ交差実験の挙動解析", 第25回数値流体力学シンポジウム, 大阪, December, 19-21, 2011.
- [3] K Koyamada, N Sakamoto and S Tanaka, "A Particle Modeling for Rendering Irregular Volumes," *Proceedings of the International Conference on Computer Modeling and Simulation (UKSIM 2008)*, Cambridge, England, April 13, 2008, pp.372-377, 2008.
- [4] N Sakamoto, J Nonaka, K Koyamada, S Tanaka Volume, "Rendering Using Tiny Particles," *IEEE International Symposium on Multimedia*, pp.734-737, 2006.
- [5] N Sakamoto, T Kawamura, K Koyamada, K Nozaki, "Improvement of particle based volume rendering for visualizing irregular volume data sets," *Computers & Graphics*, vol.34, Issue.1, pp.34-42, 2010.
- [6] 小山田耕二, 坂本 尚久, "粒子ボリュームレンダリング 理論とプログラミング," コロナ社, 東京, 2010.
- [7] P. Sabella, "A Rendering Algorithm for Visualizing 3D Scalar Fields", *Computer Graphics*, vol.22, No.4, pp.51-58, 1998.
- [8] N. Metropolis, A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. Teller and E. Teller, "Equation of State Calculations by Fast Computing Machines", *Journal of Chem. Physics*, vol.21, pp.1087-1092, 1953.
- [9] S Tanaka, K Hasegawa, S Nakata, H Nakajima, T Hatta, F R Ngana, T Kawamura, N Sakamoto, K Koyamada, "Grid Independent Metropolis Sampling for Volume Visualization" *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, vol.1, No.2, pp.119-218, June, 2010.
- [10] 畑中佑一, 田中寛, 仲田晋, 長谷川恭子, 石原一樹, 田中和夫, "2+1次元静止画像を用いた動的プラズマ現象の可視化", 第29回日本シミュレーション学会大会発表論文集, pp.335-338, 山形, June, 19-20, 2010.
- [11] N.Kawamoto, Y.Hatanaka, T.Yamamoto, K.Hasegawa, S.Nakata, S.Tanaka, N.Sakamoto, K.Koyamada, S.Misaki, K.Tanaka, "Visualization of Plasma Plume Collisions Using Fused Volume Data", *Asia Simulation Conference 2011*, Seoul National University (Korea), November, 16-18, 2011.