

6D-4

## ベクトル場における可視化に関する研究

嶋田 尚恭

蔡 東生

筑波大学修士課程理工学研究科

筑波大学電子情報工学系

## 1. はじめに

近年における計算機の発展は著しく、それにともない大規模なシミュレーションが可能となってきている。しかしながら、大規模な数値シミュレーションにより得られた数値結果も膨大なものとなる。従って、得られた数値データから結果を理解、考察することは非常に困難であると考えられる。特に、空間的なシミュレーションを扱う場合は、数値から空間の様子を把握し、理解することは難しい。そこで、数値シミュレーションの結果をコンピュータグラフィックスを用いて可視化することにより、視覚的、直観的にシミュレーションの結果を理解し易くする。

本稿では、三次元ベクトル場を可視化する際に、位相に着目することにより、ベクトル場の解析を視覚的に行う事とした。本稿では、三次元ベクトル場の位相の可視化を、地球磁気圏の粒子シミュレーションに適応した結果について述べる。

## 2. TRISTAN code とその可視化の意義

可視化に使用しているシミュレーションデータは、TRISTAN(TRI dimensional STANford) コードにより生成されたデータを使用している。TRISTAN コードとは完全三次元電磁粒子シミュレーションコードで、スタンフォード大学 O.Buntman、K-I Nishikawa、T.Neubert、D.Cai によって開発されたものである。本研究では、太陽風と地球磁気圏の干渉問題を扱う。またシミュレーションは  $215 \times 95 \times 95$  のグリッドサイズで行なっている。イオンと電子の総粒子数は  $215 \times 95 \times 95 \times 0.9 \times 2 \cong 3.5$  億個 であり、この粒子シミュレーションは世界で最大規模のシミュレーションである。本研究のシミュレーションでは電磁波を吸収する吸収境界を利用しており、データの解析対象は、地球の近傍の  $81 \times 61 \times 61$  に限定している。地球の磁気圏を模するため  $(70.5, 47.5, 48.0)$  を中心とする  $x-y$  平面上に  $x, y$  それぞれ  $\pm 1$  の四角形のリング電流を流している。このリング電流は  $(70.5, 47.5, 48.0)$  に地球磁場を生じさせる。 $x=0$  の  $y-z$  平面から太陽風をモデルしたイオンと電子を熱運動と太陽風速度をもたせて流す。太陽風は地球の磁場と干渉し、衝撃波をつくり、地球磁場を圧迫し、よく知られている地球の磁気圏をつくる。太陽風は地球の磁場にさえぎられて磁気圏には北、南極のカスプ領域以外からは進入できない。しかし、 $x=0$  の  $y-z$  平面で入射される粒子に南もしくは北向きの太陽磁場をもたせると Frozen-In 条件で太陽磁場は粒子によって引きづられて地球の磁場にぶつかる。この時、粒子の時間経過による移動により位相の変化が起き、リコネクションと呼ばれる磁場の繋ぎ代えが行われる、このリコネクションが地球磁場と地球外の磁場である太陽磁場との間で発生した時、大量の太陽風が南極、北極圏に進入する事によりオーロラ現象が起きる。本研究では、太陽磁場の影響を受けた地球磁場の、地球近傍における粒子の変化を時間経過と共に解析し、磁気テールにおける位相の変化により起こる、リコネクションの挙動を研究する。また、実際に解析したデータは、リコネクションが起こっていると思われるデータとその直後のデータを使用する。この2つのデータを解析し時間経過による位相の変化を可視化するものとする。

## 3. 手法と結果

## 3.1 位相

本研究での可視化の手法の目的は、3次元ベクトル空間における大局的な位相を可視化することにより、磁

場のリコネクションを研究する。従って、位相が特異点により特徴づけられることに着目して、3次元ベクトル場における可視化を行なうものとする。また位相は、「特異点におけるベクトル場のヤコビアン行列の固有値（以下、単に特異点の固有値と呼ぶ）の実部が零でなく、正と負の数が同じならば、その2つの特異点でつくられる位相は一致する。」[1]つまり、位相は特異点の分類によって決定される。

よって、ベクトル場の位相を調べるには、特異点の近傍のふるまいを調べるとよい。そこで本研究では、特異点の近傍からベクトル場にそって流線を流し、その軌跡を元に可視化を行う。

### 3.2 可視化

3次元空間での位相は全て、一次元空間と二次元空間の組合わせで構成する事ができる。従って、位相の可視化は、特異点を含む二次元の特性平面（シグマ平面）と一次元の流線（ $\gamma$ 線）により表現する。

また、元となるデータを可視化するまでの流れは以下の順番で行っている。

データを解析シュミレーション範囲内の特異点を見つけ出す  $\Rightarrow$  それぞれの特異点を、固有値により分類する  $\Rightarrow$  特異点の近傍から、特異平面上に流線を流す  $\Rightarrow$  流線間に面を張る

と言う順に作業を行う。3次元空間での位相は全て、一次元空間と二次元空間の組合わせで構成する事ができる。従って、位相の可視化は、特異点を含む二次元の特性平面（シグマ平面）と一次元の流線（ $\gamma$ 線）により表現する。

### 3.3 結果と考察

時間経過による2つのシュミレーションデータを可視化した結果、地球圏磁場と地球外圏磁場とのリコネクションが起きていることがわかる。これは、特異点は構造的に結合していることを示すデータと、時間経過後のデータがその構造を示していないからである。従って、本論文ではリコネクションを起こす前のトポロジーと、リコネクションが起こった後のトポロジーを可視化したこととなる。可視化によって、構造的な結合を示していた位相が、乱流状態へ変化した様子も確認することができた。このことは、リコネクション前のデータが、構造的に不安定であったことも示していると考えられる。

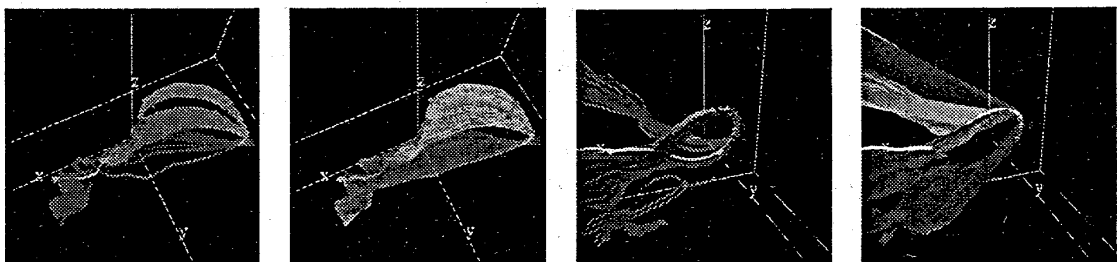


Figure 0.1:

### 4. 今後の展望

本研究の可視化はリコネクションが起きていると思われる、時間の前後するデータ2セットを使用している。そして、それぞれのデータに関して地球近傍における局所的なデータのみを扱っている。今後、リコネクションの解析、可視化において、更に大局的なデータの解析、可視化と時間経過を追って、リアルタイムなアニメーションによって可視化すると言った方向も、有効であると考えられる。

#### 参考文献

- [1] V.I.Arnold 著, 足立正久, 今西英器 訳 「常微分方程式」 現代数学社, 1981
- [2] Abraham, Shaw 著, 東保光彦 訳 「ダイナミクス-力学系ふるまいの幾何学 (上)」 現代数学社, 1989
- [3] Abraham, Shaw 著, 東保光彦 訳 「ダイナミクス-力学系ふるまいの幾何学 (下)」 現代数学社, 1989
- [4] 中橋 一宏, 藤井孝蔵 著 「格子形成法とコンピュータグラフィックス」 東京大学出版, 1995