

宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションサマースクール

FX10 スーパーコンピュータシステム教育利用報告

松元亮治, 松本洋介

千葉大学大学院理学研究科

1. はじめに

2012年8月6日(月)～8月10日(金)に「宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションサマースクール」を千葉大学で開催し、東京大学情報基盤センターのFX10スーパーコンピュータシステムを用いたシミュレーション演習を行った。このサマースクールはHPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の構造と起源」、及び千葉大学大学院理学研究科附属ハドロン宇宙国際研究センター主催で大学院生以上のシミュレーション初心者を対象として実施したスクールである。

宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションスクールは今回が最初ではなく、2002年～2004年に「天体とスペースプラズマのシミュレーションサマースクール」を3回、2006年3月には総合研究大学院大学アジア冬の学校「天文シミュレーションウィンタースクール」を開催した実績がある。その後、多人数のシミュレーションスクールはしばらく実施していなかったが、昨年度からHPCI戦略プログラム分野5の活動の一部として宇宙磁気流体コード・プラズマ粒子コードの改訂・整備が進展したことから、久々の開催となった。

参加者は講義担当講師8名、演習担当講師8名、受講者42名であり、受講者の内訳は修士課程大学院生33名、博士課程大学院生6名、その他3名、大学院生の所属は東北大学1名、茨城大学1名、千葉大学8名、東京大学9名、総合研究大学院大学1名、京都大学10名、大阪大学1名、神戸大学1名、甲南大学1名、九州大学6名であった。



第1図：参加者の集合写真

2. サマースクールの内容

本スクールは荷電粒子系をマクロに扱う磁気流体モデル、プラズマを粒子的に扱う電磁粒子モデルに基づくシミュレーションの基礎についての講義、第一線で活躍している研究者による最新のシミュレーション技法とその応用についての講義、基本課題演習、テーマ別にグループに分かれて行う応用課題シミュレーション演習から構成し、最終日には各グループの成果を報告してもらう発表会を開催した。講義は千葉大学の新図書館であるアカデミックリンクセンターの講義室で行い、シミュレーション演習には千葉大学総合校舎の情報処理演習室を使用した。プログラムを表1に示す。

8月6日 (月)		
13:00-13:10	はじめに	松元亮治 (千葉大学)
13:10-14:10	太陽活動現象の磁気流体シミュレーション	横山央明 (東京大学)
14:20-15:20	磁気流体波の性質	花輪知幸 (千葉大学)
15:40-16:30	差分法の基礎	松元亮治 (千葉大学)
16:40-17:30	差分法の演習とCANSの紹介	松元亮治 (千葉大学)
8月7日 (火)		
9:30-10:50	HLLD法に基づく磁気流体方程式の差分法	三好隆博 (広島大学)
11:00-12:00	PIC法に基づく電磁粒子シミュレーション	松本洋介 (千葉大学)
13:00-14:00	応用課題の説明	
14:00-17:30	応用課題演習	
8月8日 (水)		
9:00-10:00	解適合格子法による磁気流体シミュレーション	松本倫明 (法政大学)
10:10-11:10	天体プラズマにおける粒子加速機構	星野真弘 (東京大学)
11:20-12:20	解適合格子法によるプラズマ粒子シミュレーション	藤本桂三 (国立天文台)
13:30-17:30	応用課題演習	
8月9日 (木)		
9:30-17:30	応用課題演習	
8月10日 (金)		
9:30-12:00	発表準備	
13:00-15:30	発表会	

表 1 : 宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションサマースクールのプログラム

3. シミュレーション実習環境と教材

シミュレーション実習には千葉大学総合メディア基盤センターが情報処理演習室に設置・管理している教育用端末システムを Linux でブートして使用した。利用者のファイルは総合メディア基盤センターに設置されたファイルサーバーに保存されるようになっており、どの端末からも同じ環境で実習を行うことができる。千葉大学総合メディア基盤センターには本スクール用に 60 名分の教育利用のアカウントを発行していただいた。このアカウントを用いて千葉大学総合メディア基盤センターの高速演算サーバーSR16000 の教育利用も可能だが、利用できるノードは 1 ノードに限られている。初日の差分法についての実習等の小規模なシミュレーションは教育用端末を用いてローカルに実施することができるが、応用課題演習では教育用端末では能力が不足し、また、千葉大学の SR16000 でも多人数のジョブを処理することは難しいと判断した。そこで、私たちの研究室の Opteron24 core のワークステーション 1 台、Xeon 12core のワークステーション 3 台を使用するとともに、東京大学情報基盤センターの FX10 スーパーコンピュータシステムの教育利用申請を行い、60 名分のアカウントを発行していただいた。FX10 の教育利用では 12 ノード (192 コア)、計算継続時間 15 分までの利用が可能であり、従来のシミュレーションスクールでは扱うことができなかつた比較的大規模で並列度の高いシミュレーション課題をとりあげることが可能になった。FX10 の受講者用のキューは総合メディア基盤センターの自習用端末が利用できる 21:00 まで使用可能にいただいた。

シミュレーション実習の教材としては 2000 年～2002 年に実施した ACT-JST プロジェクト「宇宙シミュレーションネットラボラトリーシステムの開発」(代表: 松元亮治) で開発・公開した宇宙磁気流体シミュレーションソフトウェア CANS (Coordinated Astronomical Numerical Software) と、HPCI 戦略プログラム分野 5 の支援を受けて作成したプラズマ電磁粒子シミュレーションソフトウェア pCANS を使用した。CANS は差分法を用いて磁気流体の時間発展を計算す

るシミュレーションエンジン，初期条件・境界条件・入力パラメータなどをセットにしたシミュレーションモデル群（基本課題モジュール），各モデルの解説・シミュレーション結果の画像等を掲載した Web ページから構成され，利用者が解こうとしている問題に近い基本課題モジュールを修正することによって，初心者でも新たなシミュレーションモデルを設定してシミュレーションを実施することを可能にしている。シミュレーションエンジンとしては修正 Lax-Wendroff 法，Roe 法，CIP-MOCCT 法のエンジンが用意されている。磁気流体の近似リーマン解法として広く利用されるようになってきた HLLD 法に基づくエンジンも実装中であり，本シミュレーションスクールの一部の応用課題演習で使用された。CANS は MPI を用いて並列化されており，多数のコアを持つ並列計算機でも高い実効効率が得られる。このため，最先端の研究でも利用されている。CANS のソースコードは公開されており，Linux PC からスーパーコンピュータに至る様々な計算機でコンパイルするだけで利用できる。

pCANS は CANS と同じ設計思想で開発されたプラズマ電磁粒子シミュレーションソフトウェアであり，小文字の p は particle を表す。pCANS では Particle In Cell (PIC) 法を用いて荷電粒子の位置，速度と電磁場の時間発展を計算する。領域分割法を用い，MPI によって並列化しているため，CANS と同様に様々な並列計算機において高い実効効率を得ることができる。また，代表的なシミュレーションモデルとその解説等が掲載された Web ページが用意されている。pCANS のソースコードも公開されている。

4. 応用シミュレーション課題

今回のシミュレーションスクールでは以下 10 テーマの応用課題を準備した。

1. 太陽活動：太陽大気のように重力によって成層化された流体中を伝わる磁気流体波の非線形伝播をシミュレートする（担当：横山央明，飯島陽久）
2. 降着円盤とジェット形成：重力を及ぼす天体の周りを回転する磁気流体円盤（降着円盤）からジェットが噴出する過程をシミュレートする（担当：松元亮治，小野貴史）
3. ジェット伝播：超音速ジェットと星間ガスの相互作用を流体・磁気流体コードを用いてシミュレートする（担当：朝比奈雄太）
4. パーカー不安定性：重力によって成層化された円盤において磁気浮力によって駆動される磁気不安定性の非線形成長にガス冷却が及ぼす影響をシミュレートする（担当：工藤哲洋）
5. 輻射流体：輻射と流体の相互作用をシミュレートする輻射磁気流体コードを用いて強い輻射に照射されたガス雲等の運動をシミュレートする（担当：高橋博之）
6. 二流体不安定性：プラズマの対向流中に発生する二流体不安定性の線形・非線形発展を 1 次元電磁粒子シミュレーションによって調べる（担当：簗島敬）
7. Weibel 不安定性：プラズマの速度分布関数が非等方的である場合に発生する Weibel 不安定性の非線形時間発展を 2 次元電磁粒子シミュレーションによって調べる（担当：加藤恒彦）
8. 運動論的磁気リコネクション：プラズマ中で磁力線方向が反転する領域で発生する磁気リコネクションの時間発展を，2 次元電磁粒子シミュレーションによって調べる（担当：銭谷誠司，藤本桂三）
9. 無衝突衝撃波：粒子間の衝突が無視できる無衝突衝撃波面近傍における粒子加速を 1 次元，2 次元の PIC シミュレーションによって調べる（担当：天野孝伸，坪内健）
10. ケルビン・ヘルムホルツ不安定性：プラズマ中で速度差がある領域で発生するケルビン・

ヘルムホルツ不安定性の非線形時間発展を、PIC法を用いた2次元電磁粒子シミュレーションによって調べる(担当:松本洋介)

これらの課題のうち、課題1-4がCANSを用いて行う磁気流体シミュレーションの課題、課題5は現在開発中の輻射磁気流体コードを用いた課題(いずれはCANSに組み込む予定)、課題6-10はpCANSを用いて行うプラズマ電磁粒子シミュレーションの課題である。2日目の午後に各演習課題について説明を行い、受講者の希望に応じてグループ分けを行った。各課題について3名~8名のグループが作られ、これ以後は各課題の担当講師・シミュレーション経験が豊かな大学院生のアドバイスを得つつ課題に取り組んだ。あらかじめ準備しておいた典型的なモデルを用いた演習を行った後は、パラメータを変えたりモデルを変更したりしてシミュレーションを実施した。少し時間をかければ論文になりそうな新しい問題に取り組んだグループもある。

課題1, 2, 4, 6は演習室のLinux PC, 課題7はこれに加えて宇宙物理研究室のワークステーション, 課題3, 5, 8-10は東京大学情報基盤センターのFX10を主に使用した。FX10の利用者は受講者の半数、約20名であった。

最終日の午後には1グループ15分の割り当てで各課題についてシミュレーションモデルとシミュレーション結果を報告していただく発表会を開催した。

5. 受講者・主催者の感想

受講者を対象として講義の理解度、実習の達成度についてのアンケートを実施した。講義については初日に行った磁気流体波の性質や差分法の基礎等については概ね理解できたとの回答が多かったが、2日目以後の最新のシミュレーション技法の紹介等の講義では理解度は普通との回答が多く、理解できなかったという回答が1/4程度あった。実習については満足との回答が半数以上、残りは、満足度は普通との回答で、不満足との回答はほとんどなかった。個別の感想では千葉大学のLinux PCで使用できるメモリとディスク領域が小さかったため不便との感想が多かった。次回には改善したい。東大のFX10については教育利用で、1ジョブで使用できる時間が15分というのは短いとの感想があった。

スクール実施側からの感想としては、今回FX10の12ノードを利用できたことにより、従来のサマースクールでは取り上げることができなかった比較的規模の大きな問題を演習課題とすることができたメリットが大きかった。磁気流体については輻射との相互作用まで考慮した2次元計算を課題として実施することができた。プラズマ粒子シミュレーションは計算コストが大きいため、これまでのサマースクールでは簡単な1次元計算しか実施できず、受講者にとって粒子計算の実用性がわかりにくかったが、今回は2次元計算が可能になって受講者の大多数が2次元計算の問題を演習問題として選び、サマースクール期間内に計算結果の解析を行うところまで進めることができた。また、比較的大きな並列計算を体験させることができたこともこれまでのサマースクールにはない特徴になった。ジョブを投入してから実行されるまでの待ち時間は比較的短く、同時に走るジョブ数も今回の参加人数に対しては適切であった。今後も引き続き、このような教育用のサービスを続けていただきたい。

本サマースクールの講義資料等は以下のページで公開している。自習等に役立てていただければ幸いである。<http://www.astro.phys.s.chiba-u.ac.jp/hpci/ss2012/>