

松元 叡一¹、常行 真司²

¹ 東京大学理学部物理学科（4年生）、² 東京大学大学院理学系研究科

1. はじめに

理学部物理学科で開講される専門科目「解析力学・量子力学 I」は、ニュートン力学の数学的な定式化である解析力学から量子力学への移行までを週 2 コマ半年でカバーする、物理学科の重要な必修科目である。学生は板書による講義を受講し、並行して行われる「物理学演習 I」で具体的な問題を解きながら内容の理解を深めていく。しかしながら解析的な手計算によって解ける問題は限定されるため、物理学の基礎方程式と実際の物理現象をつなぎ、より直観的な理解を進めるには、計算機を用いたシミュレーションが有効であると考えられる。そこで本特別補修ゼミでは、東京大学の「五月祭」での一般向け展示を目標に、本講義の受講生である物理学科の学部学生が主体となって並列プログラムを開発し、さまざまな物理現象の計算機シミュレーションを行った。

2. 概要

東京大学本郷キャンパスで 5 月に開かれる学園祭「五月祭」で、理学部物理学科では毎年学部生が中心となって企画を出展している。2012 年の企画「Physics lab. 2012」では、6 つの班（プラズマ、非線形、超伝導、BEC、メタマテリアル、計算機）に分かれて実験やポスター展示を行った。その中で筆者の一人（松元）が計算機班の班長を務めた。

計算機班は物理シミュレーションの面白さや大切さを一般の方に伝えようという目標で始まった。メンバーは（最終的には）10 名程度、活動を開始したのは 2011 年の 10 月くらいからである。勉強会（本ゼミ）を開いてプログラミングとシミュレーションの知識をつけ、五月祭に向けてプログラムを作成した。五月祭では来場者が触って楽しめるような物理シミュレーションを使ったプログラムを展示すると共に、シミュレーションの解説などをポスターにまとめて簡単な発表を行った。その際、情報基盤センターの計算機の教育利用枠を使わせて頂き、並列計算の学習と、五月祭に展示するための宇宙、流体シミュレーションの計算を行った。これらの成果は動画などの形にまとめて、五月祭当日に DVD で配布した。

3. 五月祭までの活動

班の設立当初、メンバーの大部分ははまだプログラミングの経験のほとんどない 2 年生だった。現在の物理学科のカリキュラムでは、数値計算はあまり扱わない（学生実験で多少出てくる程度である）ということもあって、勉強会（ゼミ）を開いてプログラミングやシミュレーションの技法を身につけようということになった。勉強会の内容は表 1 のとおりである。

4. 五月祭での展示

五月祭での展示は、物理に詳しくない一般の来場者でもわかりやすく、楽しめるような内容を目指した。展示のメインは PC を使ったシミュレーションプログラムで、来場者がマウスなどで操作してインタラクティブに応答が見られるようにした。それに加えてポスターと口頭で、

「シミュレーションとは何か、どのように使われているのか」といった簡単な説明を行った。興味のある人向けに、展示したプログラムのシミュレーション手法や、背景にある物理学などを詳しく説明したポスターも用意していた。

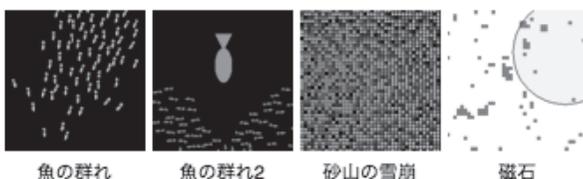
(1) シミュレーションプログラム集

展示したシミュレーションプログラムは、班員各々が作ったものを寄せ集めたものである。最初にそれぞれテーマを決めて、制作に取りかかった。プログラミング言語は GUI に強い Processing を主に用いた。次の図は、最終的に展示したプログラムの一覧である。

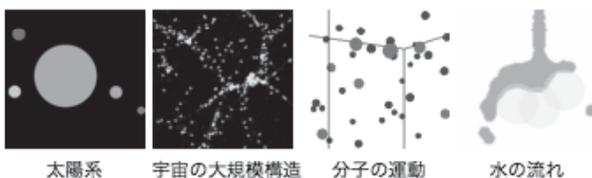
● フラクタル



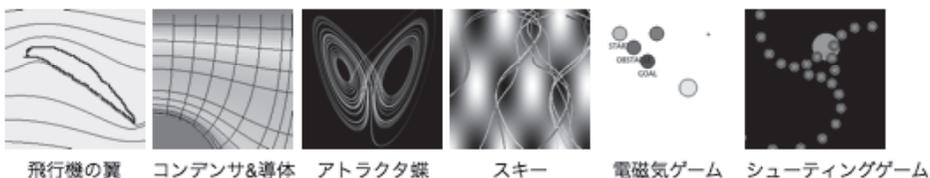
● 臨界現象



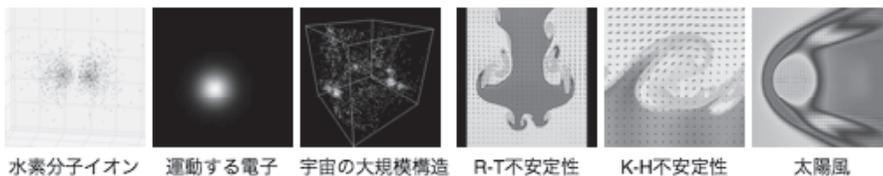
● 宇宙・多体問題



● その他・ゲーム



● 動画集



この中からいくつかピックアップして説明しよう。

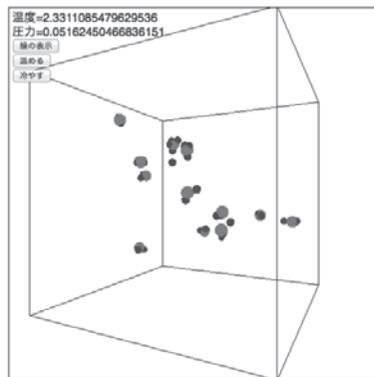
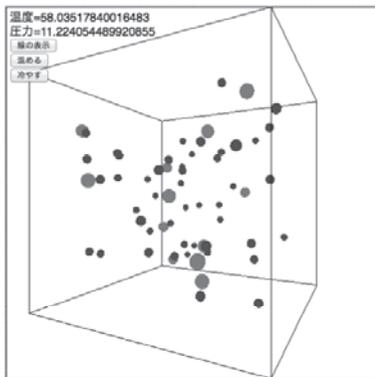
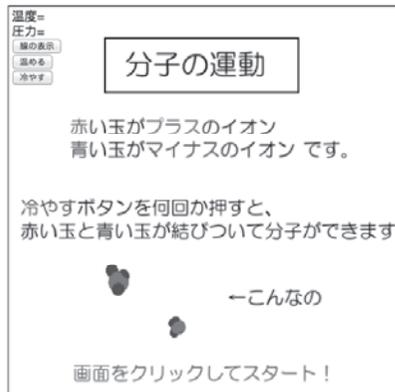
表1 勉強会のテーマ例

C言語入門	変数、if文、for文、配列、関数定義などを演習形式で学んだ
コンピュータの仕組み	ノイマン型コンピュータについて。浮動小数点などの基礎知識もあわせて。
計算量	アルゴリズムの計算量の見積もり方の基本を学んだ
差分法	差分法の基本的な考え方、精度の見積り。
MPIプログラミング	並列計算機を使ってみる。
Processing言語入門	当日の展示に向けてGUIに強いProcessing言語を学んだ
分子動力学法	分子動力学法の原理。シンプレクティック法
GPUを使った並列計算	Cudaを使ったGPU並列計算と、それを利用した量子シミュレーション
カオスとフラクタル	カオスとフラクタルの数学的背景とシミュレーション例
宇宙シミュレーション	重力多体問題の解法、P3M法、高速フーリエ変換
流体シミュレーション	流体方程式の解法、安定性、Lax-Wendroff法

・分子の運動

「分子の運動」は分子動力学法を使ったシミュレーションで、温度による物質の状態変化を体験できるプログラムである。赤い玉と青い玉には電磁気的な力と、近づきすぎた時の斥力が働くようになっており、ベルレ法でその動きがシミュレーションされている。マウス操作で全体の運動エネルギーを変化させることができ、物質の状態変化（この場合はプラズマが分子になる変化）のミクロなメカニズムを目で見て実感することができる。

下図左：高温状態、右：低温状態（アンモニアのような分子ができる）



・飛行機の翼

「飛行機の翼」は物体の周りを流れる流体の動きのシミュレーションである。マウスを使って物体を書くと、そのまわりの完全流体の速度場が表示される。解いている方程式は完全流体のポアソン方程式で、ガウス-ザイデル法を使って計算している。完全流体の定常状態というシンプルな系だが、どんな形を書いてもそれらしい流れをインタラクティブに表示してくれるので、来場者の方々にも楽しんでいただけたようである。

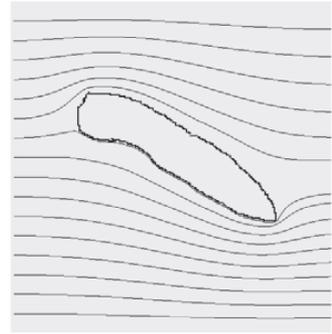
飛行機の翼

画面に翼の断面図を描いてください。
その周りの空気の流れを
シミュレーションします。

※翼は中央付近に、2つ以上の部分に
分かれないように描いてください。

マウสดラッグ：翼を描く
rキー：リセット

クリックしてスタート！



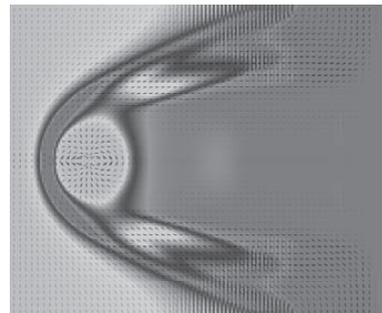
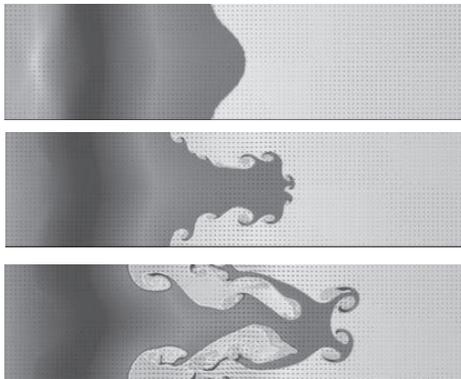
(2) 大規模計算

東京大学情報基盤センターの HA8000 教育利用枠と、物理学科のフォトンサイエンス教育用計算機システムを用いて、大規模計算も行った。その結果を以下に示す。

・数値流体計算

左の3枚の図は、流体力学の方程式を modified Lax-Wendroff 法で解き、レイリー・テイラー不安定性を再現したものである。MPI で並列化を行い、上述の計算機で計算した。色が密度の違いを（赤が高密度で緑が低密度）、黒線が速度場を表している。右の方向に重力がかかっていて、高密度の流体が低密度の流体に潜り込んでいるのが分かる。

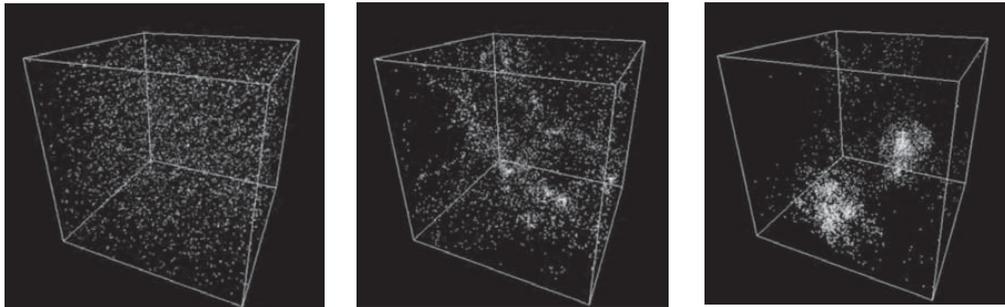
右図はこの流体シミュレーションに磁場による項を加え、地球磁気圏におけるプラズマの磁気流体方程式を計算したものである。画面左側の円状の部分の中心に地球が位置し、左側から太陽風が吹き付けている。太陽風による衝撃波面と、地球磁気圏の磁場形状の再現に成功した。



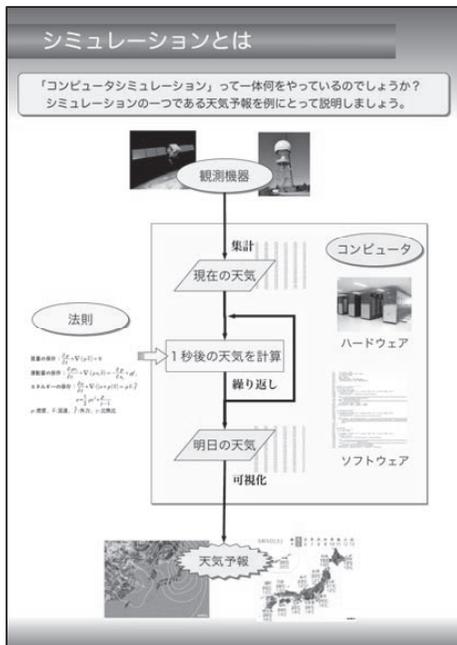
・宇宙の大規模構造

宇宙の銀河団は、初期宇宙における物質分布の微小なゆらぎが成長した結果として、網目構造をとっていることが知られている。重力によって引き合う質点の多体問題を解くことで、この大規模構造を再現した。多体問題はポアソン方程式のフーリエ変換と P3M 法を使って解き、また、ダークマターの存在も考慮している。

下の3枚の図はこれを3次元周期系で計算したものである。左の図から順番に時間が進んでいる。当初一様だった分布（左）はゆらぎが成長して網目状となる（中）。ただし今回のシミュレーションでは散逸などを考慮していないため、さらに凝集した構造へと発展した（右）。



(3) ポスターの例



(4) 当日の様子

五月祭当日は天候にも恵まれ、老若男女問わず多数の来場者にお越しいただいた。下の写真はPCを使ってシミュレーションで遊んでもらっている様子。



4. web ページ

Physics lab. 2012 の公式ページに、当日展示したプログラムをブラウザ上で見られる形で公開している。大規模計算の結果の動画も載っているので、ぜひご覧になっていただきたい。

<http://event.phys.s.u-tokyo.ac.jp/physlab2012/6-computer>