

短期招聘派遣プログラム報告書

1. 被招聘者 (被派遣者)

派遣者氏名: 木村 恵二

所属: 京都大学 大学院理学研究科数学・数理解析専攻 数理解析系 (数理解析研究所)

身分: 博士後期課程 2 年

滞在期間: 2011 年 6 月 20 日 – 2011 年 8 月 26 日

滞在先: Woods Hole Oceanographic Institution, United States of America

2. 受け入れ担当者

受け入れ先期間: Woods Hole Oceanographic Institution

Co-Director:

Professor Norman Lebovitz

Department of Mathematics, The University of Chicago

Professor Philip Morrison

Physics Department, The University of Texas at Austin

3. 招聘 (派遣) の目的

Woods Hole Oceanographic Institution で行われる, 国際サマースクール Geophysical Fluid Dynamics (GFD) Program 2011 に参加のため.

4. 成果報告

Woods Hole Oceanographic Institution で夏季休暇中に開催される Geophysical Fluid Dynamics (GFD) Program は, 大学院生を対象とする 10 週間の国際サマースクールであり, 世界各国から集まった Fellow と呼ばれる 10 人程度の大学院生が奨学金を受けて参加し, 同じく世界各国から集まった著名な研究者のもとで講義を受け, 研究活動を行うものである. このプログラムは 1959 年に開催されて以来 50 年以上にもわたって毎年開催されており, これまで, 地球流体力学のみならず広く地球惑星科学, 物理学, 数学などの分野で今現在世界的に活躍している研究者が Fellow として何人も参加している.

このプログラムでは毎年地球流体力学に関連するテーマが一つ設定され, 主任講義者および来訪研究者によるセミナーが 10 週間を通じてほぼ毎日行われる. Fellow はまず最初の 2 週間, 主任講義者が行う集中講義を受けてその講義ノートを作成することが義務付けられる. またその後 8 週間, 来訪研究者のセミナーを受けつつ, プログラムに参加している研究者達が提案する様々な研究テーマのうち一つを選択して研究を行い, 最終週にその研究結果を報告することがもう一つの義務である.

2011年のGFD Programのテーマは“Shear Turbulence: Onset and Structure”であり、プログラム第1週目をProfessor Fabian Waleffe (University of Wisconsin, Madison)が、第2週目をProfessor Richard Kerswell (Bristol University)がそれぞれ担当した(彼らはともに過去にFellowとしてこのプログラムに参加している)。

Shear Turbulenceは、O. Reynoldsによるパイプ中の流れの乱流化の実験に端を発する、流体力学の最も古典的な問題の一つである。このパイプ中の流れや平板間の流れ(Couette流)などでは、層流である基本解が線形安定な領域にあっても、有限の攪乱によって突然流れが乱流化することが実験的にも数値的にも確認されているが、そのメカニズムは十分に理解できておらず、現在も盛んに研究がなされている。近年の計算機性能の飛躍的な向上により、流れ場の詳細な構造が再現できるようになり、また従来計算不可能だった物理量が計算できるようになってきたため、系の理解が大きく進んでいる。Waleffeはこれらの研究を概括したのち、まず乱流化したときにあらわれる流れの構造を議論した。またいくつかの基本流の線形安定性およびエネルギー安定性、そしてそれらの不安定モードの構造の違いを議論し、最後に、乱流化した流れが維持されるメカニズムとしてWaleffeが提唱したSelf-Sustaining Process (SSP)と呼ばれるモデルを、その維持機構の物理的解釈とともに議論した。

続いてKerswellは、まず一般に基本解からの超臨界・亜臨界分岐を線形演算子の正規性と関係づけることを通して、前述の突然起こる乱流への遷移の特徴を議論し、次にこの乱流状態と層流状態を分離するセパトリックス構造に注目してそのエッジを数値的に追跡するいくつかの方法を紹介した。また乱流化させるための最小のエネルギー状態を発見するため、攪乱の成長率についての非線形変分問題を立ててそれを数値的に解く方法を提示し、攪乱が局在した状況の方がより低いエネルギーで乱流に遷移することを示した。最後に、パイプ内の局在化した乱流状態(パフ乱流)が維持され続けるか層流への遷移状態であるか、またその判定法について議論した。

講義後の8週間、私はProfessor Philip Morrisonの指導の下、電子の慣性を考慮したMagnetohydrodynamics (Inertial MHD model)の研究を行った(研究題目: A one-fluid MHD model with electron inertia)。天体現象や核融合などの分野において、磁場のエネルギーを他のエネルギーに変換する際に、磁気リコネクションと呼ばれる磁場のつなぎ換え現象が重要な役割を果たしていると考えられており、現在盛んに研究がなされているが、この現象のタイムスケールは非常に短いと考えられている。そこで我々は、イオンと電子が完全電離しつつも準中性的な状態を保った状態で運動するプラズマ(one-fluid plasma)について、一般化されたオームの法則(電子の運動方程式と等価)において電流の変化のタイムスケールが短く電子の慣性が他の効果に卓越する状況を考え、電子の慣性の効果が及ぼす影響を調べることを試みた。

まず我々は、一般化されたオームの法則の中で電子の慣性由来の項の取り扱いが研究者によって様々であるということに注目し、エネルギー保存則の観点からこれらのモデルを分類した。その結果、電子の慣性由来の項をすべて取り入れた場合には、プラズマの運動方程式(イオンと電子の運動

方程式の和と等価) に、上記のモデルでは無視されている、電流の電流による移流項 $\frac{m_e}{e}(\mathbf{j} \cdot \nabla) \frac{\mathbf{j}}{en}$ (m_e は電子の質量, e は素電荷, \mathbf{j} は電流, n はイオン (電子) の数密度であり, 以下この項を補正項と呼ぶことにする) が存在しないとエネルギーが保存しないことが見出された。

次に我々はこの運動方程式の補正項の影響を調べるため、Grad-Shafranov 方程式を修正することを試みた。この方程式は、理想 MHD 方程式系において、トカマクなどといったトーラス内の、速度場が零の定常状態を記述する非線形方程式であり、核融合の分野で盛んに研究されている。この方程式は、圧力によってプラズマが広がろうとするが、それがローレンツ力によって抑えられている状況を記述している。まず曲率の影響を無視し、円筒内で Grad-Shafranov 方程式を修正することを試み、プラズマが非圧縮の場合及びバロトロピック ($p = p(\rho)$) である場合には修正 Grad-Shafranov 方程式を得ることができた。しかし曲率を考慮した実際のトーラス内では、物理量が満たす条件は記述できるものの、曲率のために Grad-Shafranov 方程式のような一本の方程式に変形することはできなかった。この物理的解釈が直近の課題である。

Woods Hole はヨーロッパ人にとって北アメリカ初入植地である Cape Cod の南端に位置し、夏の気候が特に素晴らしく、高級避暑地として非常に有名である。この素晴らしい気候の中、若い優秀な研究者からその分野を牽引してきた世界的に著名な研究者に至るまで様々な研究者と交流し議論できたこと、またそのような研究者とともに研究に没頭できたことは私にとって何物にも代え難い経験であり、貴重な財産となった。

私にとってもう一つ貴重な財産となったものがある。それは、この恵まれた環境の中で、海外の優秀な大学院生と出会い、共同生活を通じて友情を深められたことである。この友情を深める助けとなったのがルームシェアであり、そしてソフトボールであった。Woods Hole では毎年 6 月から 8 月の間ソフトボールリーグが開催され、Fellow はスタッフとともに GFD チームとしてリーグに参加することが義務付けられている。毎週 1 回試合が行われるが、通常 Fellow の多くがソフトボール初体験であるため、週に何度か練習を行いながら試合に臨むことになる。この練習で Fellow は技術を磨くとともに、お互いにコミュニケーションをとり、互いに励ましあうことで、友情を深めていくことができた。その練習の甲斐あってか、今年は試合で 5 勝することができた。これは GFD チームの最多勝記録であり、今年参加した Fellow の最大の成果の一つかもしれない。

このような、決して忘れることのできない貴重な体験をさせていただき、CPS の関係者の皆様に心よりお礼申し上げます。