

論文審査の結果の要旨

氏名 下川 信也

熱塩海洋大循環は、熱フラックスと塩分フラックスを通して外系とつながっている開放散逸系である。従来の熱塩海洋大循環に関する研究は、主に力学的視点からなされ、熱力学的視点からはほとんどなされてこなかった。本論文は、熱力学的視点から熱塩海洋大循環を考察し、特に、氷期-間氷期スケールの気候変動との関わりが注目されている熱塩海洋大循環の多重解間の遷移がエントロピー生成率最大の原理と矛盾しないことを、数値モデルを用いて実証したものである。

本論文は、計8章からなる第1部と、計5章からなる第2部によって構成されている。

第1部の導入部では、熱塩海洋大循環の開放散逸系としての性質、および、開放散逸系の安定性に関する2つの考え方、すなわち、エントロピー生成率最小の原理とエントロピー生成率最大の原理に関するレビューが展開されている。また、第2章では、熱塩海洋大循環をはじめとする大規模な開放散逸系とその外系における熱と塩分の輸送に伴うエントロピー生成率の計算方法が導出されている。この計算方法は、熱や塩分のマクロな輸送過程に基づいており、ミクロな散逸過程の表現を直接的には含まないため、海洋大循環モデルの結果にも容易に適用できる。第3章および第4章では、熱塩海洋大循環の定常状態における熱力学的性質が調べられるとともに、その多重解間の遷移を調べるための数値実験の方法が述べられている。数値モデルは、東西72度、南北140度の大西洋を模した、南極周極流のある矩形海洋である。数値実験は、(1) リストローリング境界条件下でのスピニアップ(5000年)、(2) 北半球の高緯度へ加えられた塩分アノマリーを含む混合境界条件下での積分(500年)、(3) 加えられた塩分アノマリーを取り除いた混合境界条件下での積分(1000年)、の3つの手順からなる。(1)の結果、系はある定常状態に達するが、(2)と(3)の手順を繰り返すことによって、同一境界条件下での多重平衡解が得られる。これらのすべての手順において、第2章で導出された方法により、熱塩海洋大循環のエントロピー生成率が計算できる。

数値実験の結果、熱塩海洋大循環の定常状態においては、塩分輸送によるエントロピー生成率は熱輸送によるエントロピー生成率に比べて第1義的に無視できること、また、熱と塩分の輸送によって生成されたエントロピーが海面を通してすべて外系に排出され、全系を最終的な平衡へと

向かわせていることが示された。また、熱塩海洋大循環は、非常に強い塩分アノマリーが加えられた場合を除き、常にエントロピー生成率の小さい状態から大きい状態に遷移し、遷移後の状態に塩分のアノマリーを加えても、元のエントロピー生成率の小さな状態には戻らないことから、多重解間の遷移がエントロピー生成率最大の原理と矛盾していないことが確認された。

第2部においては、地球流体系を含むいくつかの種類の乱流現象の散逸的な性質が考察されている。エントロピー生成率の表現には、従来から知られているミクロな物理過程（熱散逸と粘性散逸）に基づく「エントロピー生成率のローカル表現」と、第1部で導出したマクロな物理過程（熱の輸送）に基づく「エントロピー生成率のグローバル表現」の2つがある。申請者は、この2つの表現を結びつけることで、非平衡系のエントロピー生成率最大の条件が、ベナール型熱対流における熱輸送最大の条件および乱流シアフローにおける運動量輸送最大の条件を含む汎用性の高い概念であることを示した。簡単な例として、熱境界層と粘性境界層を仮定し、ベナール型熱対流における熱輸送の最大値と乱流シアフローにおける運動量輸送の最大値を求め、ともに、実験結果とのよい一致を確認した。

以上をまとめると、申請者は、海洋大循環モデルにも適用できるようなエントロピー生成率の表式を導出するとともに、熱塩海洋大循環の定常状態における熱力学的性質を議論し、その多重解間の遷移がエントロピー生成率最大の原理と矛盾しないことを確認した。さらに、地球流体系を含むいくつかの種類の乱流現象がエントロピー生成率最大の原理という視点から統一的に解釈できることを明らかにした。このことは、特に、氷期-間氷期スケールの気候変動をコントロールしてきたとされる熱塩海洋大循環の多重解間の遷移という重要な問題に関し、新たに熱力学的視点を導入することによって、今後進展させるべき研究の明確な方向づけをしたものとして高く評価できる。

なお、本論文の一部は、地球フロンティア研究システムの佐久間 弘文氏および小澤 久氏との共同研究であるが、何れも申請者が主体となって研究を行ったもので、その寄与が十分であると判断できる。よって審査員一同は、申請者が博士（理学）の学位を授与されるに十分な資格があるものと認める。