



TITLE:

# Modeling Approach to Transient Behaviors in Miscible Fluids with Two Layers( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

Ishikawa, Toshio

---

CITATION:

Ishikawa, Toshio. Modeling Approach to Transient Behaviors in Miscible Fluids with Two Layers. 京都大学, 2023, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2023-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k24390>

RIGHT:

出典：【タイトル】 Model system for the transient behavior of double diffusive convection in two miscible layers 【掲載誌】 Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics 【巻号】 第39巻第2号1頁～25頁 【DOI】 <https://doi.org/10.1007/s13160-022-00540-z>

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	石川 寿雄
論文題目	Modeling Approach to Transient Behaviors in Miscible Fluids with Two Layers (二層構造を持つ混和性流体における過渡的振る舞いへのモデル化によるアプローチ)		
(論文内容の要旨)			
<p>流体系が、定常解や時間周期解を持つ場合、その中に出現する流れ場の構造を解析する手段として、線形安定性解析・分岐理論・その他の力学系理論が挙げられる。そうではない、より一般的な流体系の場合、これらの手法を少なくともそのままの形では適用することはできない。そこで、一般的な流体系に現れる構造の解析手法を提案し、それを実際の系に適用することを本論文の目的とする。</p> <p>本論文では、特に、二層熱流体系を範例的な系に取り上げる。二層熱流体系とは、拡散係数が大きく異なる流体の界面を伴う流れである。この系は、自然界における、例えば、海洋に現れる塩分濃度の著しく異なる流体層のモデルとなっている。</p> <p>先行研究、および学位申請者らが行った直接数値計算から、2つの対流パターンが観察される。z-軸を反転した時の、流体場、温度場の偶奇性に応じて、熱的結合モード (パリティが奇の場合)、力学的結合モード (パリティが偶の場合) が同定された。さらに、これら2つのモード(運動形態)を、<math>F_{vis}</math>、<math>F_{therm}</math> と呼ばれる2つの変換に対する対称性をもって特徴づけることで、次のように数学的に明確な定義を与えた。</p> <p><math>F_{vis}</math> とは、変換 <math>x \rightarrow x, z \rightarrow -z</math> の下での、すべての従属変数の符号の反転、 <math>F_{therm}</math> とは、変換 <math>x \rightarrow x-a, z \rightarrow -z</math> の下での、すべての従属変数の符号の反転、 ここで、<math>a</math> は任意の実数であり、実際に行われた数値計算から <math>a=Lx/4</math> と選ばれた。 (<math>Lx</math>は、<math>x</math>方向の基本周期である。)</p> <p>熱的結合モードは、時間発展の初期段階で見られ、力学的結合モードは後期に現れる。このモードの交替に関わる過渡的現象は、混和性の系の特徴である2重拡散のため、遷移層が「ぼやける」ことによって引き起こされる。この点、明確な界面が時間発展の下で保持される非混和性の系とは決定的に異なり、その解析が各段に困難となる。</p> <p>この困難を克服するため、本学位論文では、遷移層の幅が水平平均の意味で維持されるモデルを導入した。一たびこのモデルが導入されると、それは定常解を持ち得るため、通常線形安定性解析を適用し得るようになる。この意味で、このモデルの導入は決定的なステップである。申請者は、そのモデルに対する直接数値計算を行い、その非線形周期解を求めることが出来た。さらに、上述の射影演算子<math>F_{vis}</math>、<math>F_{therm}</math> を用いることで、不安定性を抑制し、長時間の数値計算を実行することが可能になった。その結果、以下の事が明らかになった；</p> <p><math>\delta</math> が小さい時：粘性結合モードが卓越する。 <math>\delta</math> が 0.02程度の時：粘性結合モードと熱結合モードが共存する。 <math>\delta</math> が大きい時：熱結合モードが卓越する。 <math>\delta</math> がさらに大きい時：静止状態が実現する。</p> <p>すなわち、力学的結合モードと熱結合モードが <math>\delta = 0.02</math> で共存・交換することを示し</p>			

た。結果として、力学的結合から熱結合への遷移が起きる臨界厚さを  $\delta = 0.02$  と特定することに成功している。

有限厚さ  $\delta$  を持つ場合の直接数値計算は、これが世界で初めてのものである。これは、本学位論文で導入された遷移層の幅を固定するテクニックなくしては実行することが極めて困難、ないし事実上不可能であったためと考えられる。

さらに、この定量的知見を踏まえ、元の系の数値計算結果で見られる遷移過程の先行研究結果が、 $\delta \rightarrow 0$  の厚さ無限小の極限として整合的に解釈できることをも示した。最後に、巻末の参考文献は25編に及び、申請者が該当分野の知見に精通していることを表している。

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

学位申請者によるセミナー形式のプレゼンテーションを45分程行い、続いて、公開形式のまま質疑応答に15分程費やした。その後、審査員らが残り、やや細かな質問や、該当研究プロジェクトの背景について20分程の質疑応答の時間を持った。

実際の研究過程においては、問題の同定、数値計算プログラムのコーディング、コードヴァリデーション、結果の解釈など色々な段階がある。この学位論文は共著論文に基づくものであるが、申請者が、いずれの段階においても非自明かつ卓越した貢献をしたことを確認した。

申請者がプレゼンテーションに用いたスライドは、要点を見やすくまとめてあるものであった。とりわけ、概略をまとめた図解のためのスライド、可視化は理解の助けになり、発声の明瞭さと相まって、大変分かり易いセミナーであった。時間配分も当初依頼していた通りのものであったことから、周到に準備をしていたことが窺える。

質疑応答の際には、ほとんどの質問に対して、満足できる回答を即時に返し、申請者のこの問題に関する理解の深さを表すものとなった。一部の質問、例えば、なぜこの手法が成功したのかを別の見方で理解する試みなどに関し、Lewis数に関するスケーリングをめぐって、議論を呼ぶものもあった。しかしながら、このこと自体は、本研究の価値を高めこそすれ下げるものではなく、また、後半の非公開の議論の際に、審査員を納得させる程度の説明が得られている。

口頭試問中には、本研究の成功を踏まえ、ここで取り扱われた2層熱対流系の枠を越え、より一般の力学系に類似の手法が適用できる可能性が指摘されている。

学位論文自体は、すでに学術専門誌に掲載された論文の内容を基に、一般的な導入部分、並びに、一般的な結論部分が拡充され、また、今後の展望についても敷衍されており、専門家以外の読者層に対する可読性が向上している。

一方、本学位論文は、完全無欠なものかと言えば、そうではなく、いくつかの誤植や語法上改良すべき点が散見された。また、学位論文で、数学的な予備的命題が証明なしで述べられている。特に、3.6節の最後(p. 36)にある直交補空間に関するステートメントは自明なものではなく、証明を要するものである。(試問中、申請者は既に口頭で証明の方針を述べた。)これらは些細な点であるので、以下の合格判定には影響しないが、申請者に付録として証明をつけるなど、原稿を改良することを推奨した。

全体として、本論文は、流体力学分野のみならず、より広い力学系にも適用できる新たな解析法を与え、2層熱対流系を範例としてその有効性を実証している。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年1月25日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日：                      年                      月                      日以降