

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	中野裕義
論文題目	Singular behavior near surfaces: boundary conditions on fluids and surface critical phenomena (表面近くでの特異な振る舞い：流体の境界条件と表面臨界現象)		
(論文内容の要旨)			
<p>ある現象を理解しようとするとき、その現象が生じる空間スケールで法則を捉えるだけでは現象の機構が明晰にならず、よりミクロ、もしくは、よりマクロな記述との関係を通して法則を考察することが有効になる場合がある。ナノメートルスケールで生じる固体境界近くの液体の流れを考察する際には、この視点がとりわけ重要である。バルクの流体の振る舞いは流体方程式によって正確に記述されるので、マクロな記述においては境界条件の設定を通して固体境界付近の流れの測定量と結びつく。その一方、固体境界近くの粒子はハミルトンの運動方程式によって記述されるので、ミクロな記述においては多粒子の長時間の統計量を通して測定量と結びつく。そして、ふたつの記述の整合性を通して、ナノメートルスケール特有の現象の本質に迫ることができる。提出された中野氏の論文では、固体境界付近の流れが示す現象に対して、この視点で理論的に研究された結果がまとめられている。</p> <p>固体境界付近の非自明な流れの例として、境界付近に局在する協同現象がある。バルクでは単純な流れのままなのに、境界付近では長距離相関が生じることが数値実験により観測された。固体表面近くの振る舞いは、バルクと質的に異なるだけでなく、表面単独では生じない現象を示す。このような表面近くの特異な現象を理解するために、まず、固体付近の振る舞いとして普遍的に観測される「すべり現象」について議論される。19世紀より「部分すべり境界条件」としてバルクの流れの境界条件が提案されてきたが、その現象論的な分類やミクロな力学との関係は十分ではなかった。そこで、もっとも簡単な「線形部分すべり境界条件」については微視的な記述との関係が完全に明らかにされ、より一般的な場合も含めて現象論的な分類を行なわれる。さらに、すべり現象にとどまらず、境界近くで生じる協同現象の機構を探るために表面臨界現象が解析される。第1章では、以上の問題設定がその背景とともに述べられる。</p> <p>第2章では、「線形部分すべり境界条件」がミクロな力学、および、ゆらぐ流体力学を用いて解析される。まず、基本公式として、すべり長に対する2種類の線形応答公式が導出される。2種類の線形応答公式は、ミクロとメソ、および、メソとマクロという2つのスケール分離に付随して得られるもので、一見して全く違う形をとり、異なる物理的機構に由来しているように見える。そして、それらの等価性がメソスケールで定義されるゆらぐ流体力学を使って示される。</p> <p>第3章では、ミクロな力学にもとづいて直接的に得られる流れの境界条件から、マクロな記述における普遍的な境界条件を導かれる。この際、「線形すべり境界条件」を超えて、一般的な分類が行われる。また、この普遍的な境界条件を議論する際に、2種類のマクロ極限（準平衡極限と流体極限）を考慮することが重要であることが議論され、それぞれの極限における境界条件が導かれる。</p> <p>第4章では、3次元ボーズアインシュタイン凝縮の表面臨界現象が議論される。表面だけでホッピングパラメータが大きい場合、バルクでは正常相のまま表面に凝縮が生じる。この現象について、徹底して正確な解析が行なわれ、表面の異常現象とバルクの関係が明らかにされる。</p> <p>第5章では論文全体がまとめられる。</p>			

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

近年、ナノメータースケールで作動するマシンなど、ナノメータースケールでのダイナミクスをめぐる議論が活発になりつつある。その際、分子の集合体がつくりだすダイナミクスの法則を確立するのは重要な課題である。本学位論文は、その問題にもっとも基礎的な立場から理解を蓄積しようとするものである。実験や数値実験により、固体表面近くの流れの振る舞いは極めて個性が強いことが明らかになってきた。そのため、現在では、工学的な発見論的な制御が有効になっている。その一方、非平衡統計力学の近年の発展により、個性の強い現象の背後に簡単な普遍的な法則があることも示されてきた。本学位論文では、後者の発展を個性的な現象にまで推し進めようとするものと位置づけられる。

理論物理の解析としては、第2章が圧巻である。断片的に知られていた線形応答公式によるすべり長の表現について統一的な記述を与えることに成功している。特に、二つの線形応答公式に対してゆらぐ流体力学を使ってその等価性を議論する解析は極めて独創的である。また、異なるスケールの異なる物理的過程を結びつける議論の仕方は今後の非平衡統計力学研究のひとつの雛型を与えている。

また、第3章で提示されたすべり境界条件の現象論的分類もこれまでの研究に全くない新しい着眼である。個性の強い振る舞いから普遍的な法則があらわれるのを明示的にする議論は印象深いだけでなく、今後、具体的な応用問題を考える際にも有用になるだろう。基礎理論的には、2種類の極限を区別するのがもっとも重要な論点であり、基本概念の段階から理論を構築していることを評価したい。

さらに、第4章の3次元ボーズアインシュタイン凝縮の表面臨界現象の理論では、基本的に自由粒子系の解析とはいえ、随所に技術的に高度な計算を実行している。これは、ずり流の固体表面で観測された長距離相関の理論的解析に向けた第一歩として位置づけられ、次の理論的解析の基盤になるであろう。また、そこで得られた表面とバルクの協奏関係についての物理的描像は今後の研究で検討される題材を与える。

以上のように、第2章から第4章まで有意義な結果を報告している。その一方、現時点では、理論的な解析が可能になるように、原子的になめらかな表面に限定しているし、固体の力学自由度も無視されている。より現実的な問題では、これらの影響は無視できず、それらの効果を考えるのは今後の課題である。さらに、本研究の動機でもあった「ずり流における固体表面の協同現象」の理解に至る道のりは依然として遠く、今後さらに研究を積み重ねる必要があるだろう。流行している研究テーマについて短時間で消費される結果と対極的で、長い時間をかけて熟成していくタイプの研究結果である。

主論文は136ページにわたって丁寧に書かれており、背景、結果、今後の展望が明確に表現されている。これまでに述べたように、本学位論文は、表面近くのナノメータースケールの振る舞いの特異性に着目して、マイクロダイナミクスとマクロダイナミクスを結びつける非平衡統計力学の構築に向けて堅実な進展を与えるものと判断する。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、平成31年1月15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。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降