

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 鍛島麻理子

メカニカルプローブを用いた微小信号計測の進歩に伴い、今まで非常に小さな雑音であるとしてあまり注目されてこなかった力学系の熱揺らぎが、雑音源として注目されるようになってきた。しかし、力学系の熱揺らぎは、電気系の熱揺らぎに比べて、それほど研究されていない。その主な原因は、力学系の熱揺らぎは、その信号が小さく、直接測定が難しいことにある。そこで、高感度なレーザー干渉計を利用し、弾性材料として広く利用されているゴムの粘弾性と呼ばれる力学物性の精密測定を行うとともに熱揺らぎを同時観測することにより、力学系の熱揺らぎに関しての知見を深める実験的研究を行った。本論文はその成果をまとめたものである。

第1章では、本研究の背景と目的が述べられている。力学系の熱揺らぎを線形応答理論に基づく揺動散逸定理から考え、ゴムに代表される損失の大きな材料に関する研究の重要性が提言された。また、揺動散逸定理を基礎におくことで、力学特性の測定における測定条件等の正当性の確認が可能な点も指摘されている。

第2章では、熱揺らぎの一般論が展開され、これまでの研究との関連が議論されている。熱揺らぎの大きさの周波数分布であるパワースペクトルは、揺動散逸定理によって、系の損失を表す線形周波数応答関数の虚部と関連づけられている。そして、どのような力学損失機構があるかによって、応答関数の虚部の周波数特性が変わってくる。従来は、損失の小さな材料に対する研究が行われており、構造摩擦と呼ばれる、原因のよくわからない内部摩擦の存在が議論されていた。しかし、本研究で試料としたゴムのような損失の大きな材料に関しては、どのような性質が見えるのかを議論するため、より一般的な定式化を行った。

第3章では、力学損失の大きな試料として用いたゴムの典型的な特性である粘弾性について議論されている。ゴムなどの高分子は、弾性と粘性の性質とを併せ持った、粘弾性の性質を示す。このような性質をあらわす量としては、様々な物理量が利用されているが、前章の熱揺らぎの議論に表れる周波数応答関数と同等な量として、複素コンプライアンスを取り上げ議論を展開し、様々な粘弾性モデルに関して熱揺らぎのスペクトルを求めている。

第4章では、粘弾性測定の実験装置と測定結果が述べられている。測定装置は、レーザー干渉計とそれを収納する真空装置、制御装置および計測装置である。高分子物質

におけるコンプライアンスの測定は、市販の機器を用いた測定が一般的である。しかし、今回は、熱揺らぎとの対応付けをするため、十分微小な変位振幅でのコンプライアンス測定を行う必要があった。そこで、レーザー干渉計を変位センサに用いた、非常に高感度なコンプライアンス測定装置を組み立て、微小変位振幅でのコンプライアンス測定を行った。試料としては、ネオプレンゴム、フッ素ゴム、シリコンゴムという3種類のゴムの薄板を円形に切り出し、その面外振動を測定した。その際、市販のフーリエ解析装置では、ゴムの過渡応答の影響でうまく測定ができないことがわかり、2台のロックインアンプを GPIB を利用した PC 制御で動作させるシステムを構築し、特に、低い周波数での測定精度を飛躍的に高めることに成功した。得られた結果は、応答関数の実部である貯蔵コンプライアンスに関しては、周波数依存性が3つのゴムで異なるのに対して、虚部である損失コンプライアンスは、3つの試料で大きさの差はあるものの、共通にあまり大きな周波数依存性を持たないことが判明した。

第5章では、同様の干渉計を用いて試料の熱振動を直接測定し、そのパワースペクトルを得た。実際には、外乱や装置雑音によって測定された周波数帯域は、100Hz 付近から 1kHz くらいであったが、10-13m 程度の振動振幅の信号を十分な信号雑音比で測定した。バルクのゴムの熱振動を直接観測した例は、知りうる限り他にない。

第6章では、コンプライアンスと揺動散逸定理を用いて計算した熱揺らぎの予測スペクトルと直接測定された熱揺らぎのスペクトルを比較し、両者がよく一致していることを示した。これは、揺動散逸定理の実験的な検証のひとつとなるという点と熱揺らぎという力学的な基準と比較することにより、コンプライアンスという力学特性の測定の正しさを保証することができるという両方の意味を持たせることが可能である。また、 $1/f$ の周波数依存性をもつ熱揺らぎが予測されるが、これは損失の小さな材料と同等な形をしており、損失の大きさとは関係ない普遍性をもつ現象であることも判明した。

第7章では、全体をまとめている。

本研究では、ゴムの粘弾性を熱揺らぎレベルの極微小振幅で測定する装置を開発し、揺動散逸定理という物理学における基本的な定理の実験的な検証を行うと同時に、力学系の熱揺らぎという力学的な基準に参照することにより、物質の力学特性の測定の正しさを保証できることを示した。また、これには、今までには雑音としてしか見られていなかった力学系の熱揺らぎを、精密計測における基準として積極的に用いる計測手法として、新しい提案を含むものである。

よって、本論文は、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。