

論文審査の結果の要旨

氏名 中山 和貴

本論文は、5章からなる。第1章は序論であり、本研究の背景および目的と論文の構成が簡潔に述べられている。ナノカーボンにはカーボンナノチューブ(CNT)、グラフェン、フラーレン等の低次元炭素同素体の総称であり、基礎物理から応用まで幅広い観点から興味深い物質群である。本研究では、電気伝導測定を通じて、CNTの3次元ランダムネットワーク試料と酸素分子またはクリプトンを吸着した劈開グラフェン試料の電子物性が調べられた。

第2章ではCNTの3次元ランダムネットワーク試料に対する研究について述べられている。CNTは1次元電子系とみなすことができ、これまで単一のCNTまたはCNT束について、朝永-Luttinger液体(TLL)理論から予想される冪型の電気抵抗率の温度依存性が報告されているが、それらの試料では電極端子条件やクーロンブロックードのようなメソスコピック効果の影響が大きかった。本研究では、それらの影響が小さいことが期待される、無数のCNTが3次元ランダムネットワークをなすbuckypaper試料について、その電気輸送特性を $T=0.5\text{ K}$ に至る低温、 $B=9\text{ T}$ に至る高磁場まで実験的に調べた。CNTには金属型だけではなく半導体型も存在するが、近年、両者を分離した試料の作製が可能となっており、本研究では金属型のCNTが99%以上の試料が使用されている。2層のCNTのネットワーク試料において、3 Kから100 Kまでの広い温度範囲で、冪型の電気抵抗率の温度依存性($\rho \propto T^{-\alpha}$)が観測され、指数 $\alpha=0.233 \pm 0.009$ がTLL理論からの $\alpha=0.24$ と良く一致する結果が得られた。3 K以下の極低温領域においてはTLL理論の曲線よりも抵抗が増大する傾向が観測されたが、3次元弱局在効果によるものとして解釈され、実際に負の磁気抵抗効果も観測されている。一方で、単層のCNTのネットワーク試料に対しては、可変長ホッピングモデルで表される温度依存性と磁場依存性が観測された。2層CNT試料との違いは、CNT間の接合の強さの違いによって説明されている。さらに本研究では、CNT内のナノ空間に硫黄原子の1次元鎖を導入したCNTのbuckypaper試料に対しても測定が行われたが、硫黄鎖の有無による定性的な違いは見られなかった。

第3章では酸素吸着による劈開グラフェン試料の伝導特性の変調に対する研究について述べられている。グラフェンの電気伝導特性は気体分子の吸着によって変化することが知られており、ガスセンサーへの応用も期待されている。本研究では、酸素暴露後の時間変化に対する測定が行われた。吸着分子によるグラフェンへのキャリアドーピング量は、ゲート電圧依存性におけるDirac点のシフトより見積もられた。2層グラフェンにおいては、先行研究と同様に正孔のドーピングを確認したが、本研究ではさらに酸素の圧力を低くするこ

とにより時間変化を長時間にわたって精緻に観測して、時間依存性が二つの指数関数の和で表されることを明らかにした。化学吸着に複数の素過程が存在することが示唆される。単層グラフェンでも同様の時間変化が得られたが、2層に比べて正孔ドーパ量が1桁近く小さいことがわかった。

第4章では、単層グラフェン上に $\sqrt{3}\times\sqrt{3}$ 構造のKrを吸着して、Dirac点の位置にバンドギャップを形成することを試みた研究について述べられている。Krの吸着による伝導特性の有意な変化は観測されず、グラフェン内の電子のホッピング積分に対して物理吸着したKrの影響が非常に小さいことなどが原因として検討されている。

第5章では、以上のまとめが述べられている。

本研究では、複数のナノカーボン物質系に対して電気伝導測定を行い、金属型CNTの3次元ランダムネットワーク試料においてTLL理論からの予測と一致する温度依存性を観測するなど、いくつかの重要な知見を得た。物理的起源が未決着な実験結果も多くあるが、現時点で適切と考えられる解析が行われており、今後の研究につながると期待される。以上より、本研究の成果は物性物理学にとって大いに意義があると言える。

なお、本論文は所属研究室の福山寛氏、松井朋裕氏、東京大学低温センターの戸田亮氏、信州大学の藤森利彦氏、金子克美氏との共同研究であるが、電気伝導測定、データ解析および考察は全て論文提出者が主体となって行ったものであり、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

以上の理由により、博士（理学）の学位を授与できると認める。