

電気力としての磁力とローレンツ力の検証

井石 雄太 (指導教員 佐藤 憲史)

1. まえがき

電気電子工学科では、4年の電磁気の授業でローレンツ力を学習する。この力を考える上で、特殊相対性理論と、それに関連するローレンツ収縮など理解が難しい現象を考えなくてはならない。本研究はローレンツ力を実験的に検証することを目的としている。

2. ローレンツ力

ローレンツ力は、導線内部のローレンツ収縮による電荷密度の違いから導出される[1]。

図1のように長い導線に電流 I を流す。導線を通る自由電子の速度は、銅線の直径が 0.1 mm 、電流 400 mA で、 $3.74 \times 10^3\text{ m/s}$ 程度である。次に、その導線に電荷 q の金属球を近づける。この金属球を導線にそって移動させれば、移動速度 v に応じた力を金属球は受けることになる。上記の考えは、金属球が移動したと見る観測者、すなわち導線が静止していると見る観測者の見方（以降 S 系）である。

次に金属球と共に動く観測者から見る場合（以降 S' 系）を考える。図2のように、この場合移動を始めるのは導線である。導線内の自由電子と金属球は同じ速度とすれば、移動しているのは導線内の自由電子を除く金属イオンとなる。金属イオンはローレンツ収縮を起こし、金属イオンの間隔は縮んで観測される。したがって金属イオン密度は増加する。 S' 系において導線は全体として正に帯電した導線として見る事ができる。よって電界が発生し、金属球は電界からの力を受ける。

このように磁界からの力と考えられるローレンツ力は、観測者の立場が変わると導線が帯電して見えることによる電気的な力である。

S 系において、電子が動くことによるローレンツ収縮を考えれば、自由電子の間隔が縮んで観測され、自由電子の密度が増え、導線は負に帯電すると考えられる。しかし、従来は電流の流れている導線は電氣的に中性であると考えられてきた。もし、 S 系でローレンツ収縮が起きていれば、金属球が静止していても力が働く。しかし、自由電子の速度は遅いため、発生する力が小さく、観測が困難であると予想される。

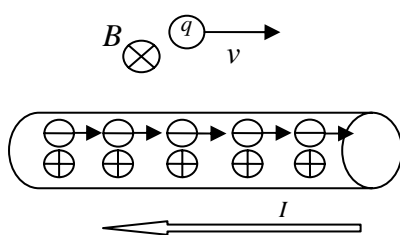


図1 導線静止系 (S 系)

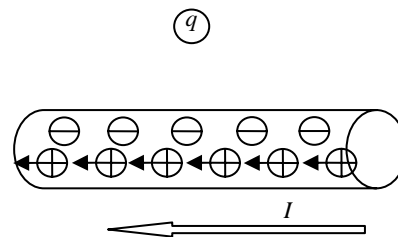


図2 金属球静止系 (S' 系)

3. ローレンツ力の測定

自由電子のローレンツ収縮によるローレンツ力の測定を行うために、ホール素子を用いて測定を試みた。ホール素子は、半導体内部のキャリア（電子とする）が、ローレンツ力を受けることにより分布が偏り、その偏りがホール電圧として出力される。ホール素子に電流を流し、外部から磁界を加えたときのホール電圧は $2.53 \times 10^{-3}\text{ V}$ であった。ホール素子に電流を流したとき、ホール素子の電子速度は 3.72

$\times 10^4 \text{ m/s}$ と見積もられる．この値は先に述べた導線内の電子の速度より 10^7 程大きな値である．したがって，半導体内の電子が静止している系から見ると導線の電子の運動によるホール電圧は 10^{-10} V という，微小な値であることが予想される．

製作した測定回路を図 3 に示す．ホール素子に加えられる磁界を増やすために，100 回巻のコイルを製作した．コイルの一部分を直線にし，その部分をホール素子に近づけた．まずコイルに電流 I を流す．コイルの直線部分を考えると，電子がローレンツ収縮を起こし，電子の密度が増えたことにより導線が負に帯電する．その結果，ローレンツ力により 10^{-8} V 程度のホール電圧が発生すると予想される．このような考えの下実験を行った．

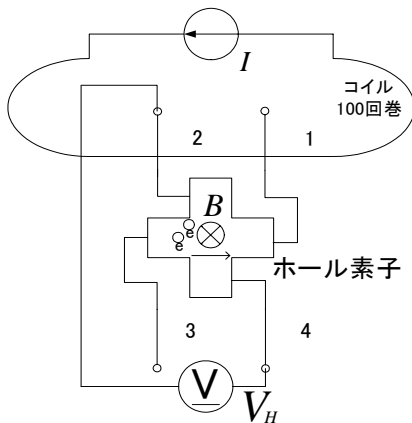


図 3 測定回路の構成

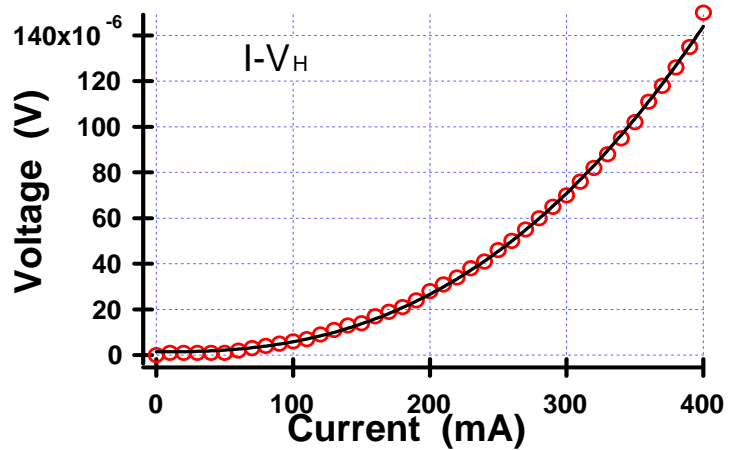


図 4 測定結果

4. 実験結果と検討

実験結果を図 4 に示す．ホール素子に電流は流さず，近傍に置いたコイルの電流を増やしていき，ホール電圧を測定した．縦軸はホール電圧，横軸はコイルに流した電流である．コイルに用いた導線が 0.1 mm と細く，電流を流すと熱によって切れてしまうため 400 mA までとした．図 4 の実線は，丸で表わされている測定値に対して累乘法による回帰分析を行った結果である．回帰分析の結果より，ホール電圧はコイルに流した電流の 2.5 乗で変化していることがわかった．

コイルの電流の増加に伴い，半導体に加わる磁界と導線の電子の速度が増える．このことからローレンツ力は 2 次関数的に増える．しかし，ホール電圧は予想より 10^4 倍大きい電圧となった．実験からホール電圧の応答の遅れが観測された．コイルに 200 mA 電流を流していて電流を切ると，ホール電圧が 0 V になるまで 35 s 程時間を要した．原因として，温度勾配による熱起電力が挙げられる．用いたコイルは 62.2Ω の抵抗を持っており，電流が流れるとジュール熱 RI^2 が発生する．熱が増加すれば，熱起電力も増加する．以上の結果は熱起電力が大きいことを意味しており，ローレンツ力によるホール電圧を観測することはできなかった．

今回行った方法では，熱の影響が大きく関係し，正確な測定が困難であることがわかった．今後は違う方法を検討していかなければならない．

参考文献

[1] Feynman, Leighton, Sands : The Feynman Lectures on Physics volume II, pp. 13.6-13.11, ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, 1964.