

## 論文の内容の要旨

### 量子ホール系における熱電効果

#### (Thermoelectric Effects in Quantum Hall Systems)

氏名 藤田 和博

分子線エピタキシー法の開発によって不純物の極めて少ない半導体 2 次元電子系が作製されるようになった。2 次元電子系は、平均自由行程が数ミクロンに及ぶクリーンな系であるため、既存の物理理論の検証や新しい量子現象が多く研究されてきた。低温強磁場下の 2 次元電子系（量子ホール系）の輸送現象において、整数および分数量子ホール効果をはじめとする多彩な電子状態が観測されることは良く知られている。量子ホール系における電気伝導現象の解明は進んでいるのに対して、熱輸送現象の解明は十分ではない。そこで本研究では、量子ホール系における熱輸送現象として、電子拡散の熱電効果への寄与について実験的に調べた。

初めに、電子拡散のネルンスト効果への寄与が直接観測できたことを報告する。熱電効果とは、試料に温度勾配をつけることにより、その間に電圧が生じる現象である。図 1 に、2 次元電子系での熱電効果測定の様式図を示す。温度勾配のある 2 次元面( $x-y$  面)に対して鉛直方向( $z$  方向)に磁場を印加することにより、電圧は温度勾配に対して平行方向( $x$  方向) (ゼーベック効果:  $S_{xx}$ )、および垂直方向( $y$  方向) (ネルンスト効果:  $S_{yx}$ )、に生じる。これらの熱起電力には 2 種類の異なる機構からの寄与がある。(1)電子自体が拡散して熱流を運び

電圧を生じる拡散機構、(2)フォノンが熱流を運び電子-フォノン散乱により電圧を生じるフォノンドラッグ機構、の 2 つである。熱電効果については、外部ヒーターを用いて温度勾配を導入する実験(図 1(a))が数多く行われてきた。この加熱法では電子系と格子系をともに加熱するため、電子拡散とフォノンドラッグの両方からの寄与が加算されて観測される。半導体 2 次元電子系試料では、2 次元電子の厚みが基板全体に比べて非常に薄く、フォノンの担う熱流が電子の担うものより圧倒的に大きいことを反映し、観測される熱起電力に占めるフォノンドラッグの寄与は電子拡散の寄与より 2 桁ほど大きい[1]。そのため、この加熱方法では純粋な電子拡散の寄与のみに関する知見を得ることは困難である。そこで本研究では、2 次元電子系に直接電流を流し、そのジュール熱による加熱で温度勾配を導入する手法[2]を採用した(図 2 (b))。この手法では、格子系を加熱せずに電子系にのみ温度勾配を導入することが可能である。この手法を用い、温度勾配と磁場方向に対して垂直方向に生じるネルンスト電圧  $V_{yx}$  を測定した。図 2 に、測定結果を示す。このような測定から、フォノンドラッグの寄与を生じさせずに電子拡散の寄与のみを直接観測できることを明らかにした。

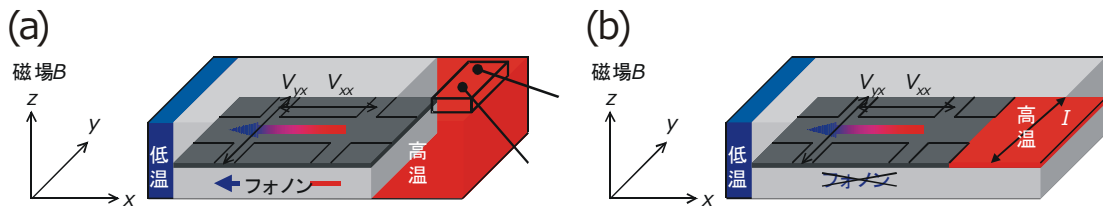


図 1：熱電効果測定の様式図。(a)外部ヒーター加熱法を用いた場合。(b)電流加熱法を用いた場合。

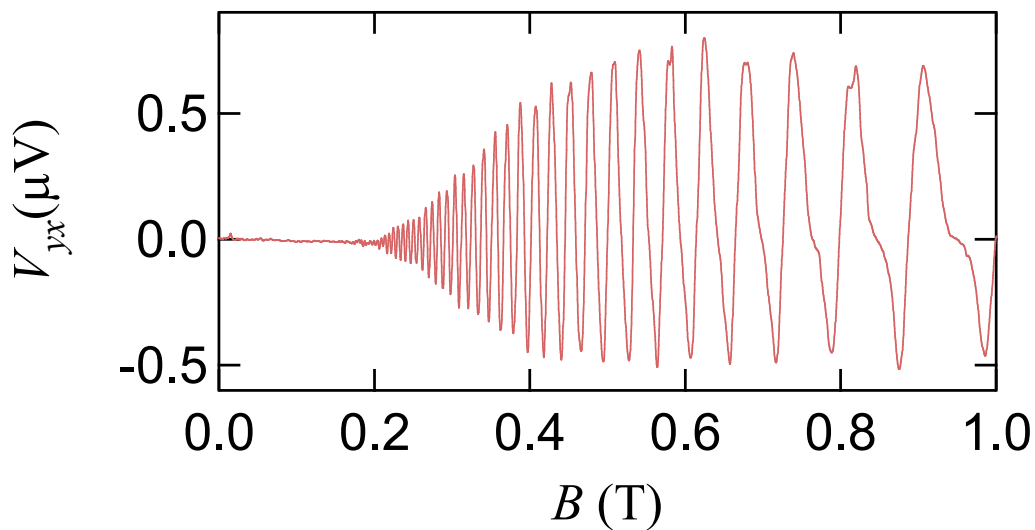


図 2：電流加熱法を用いて測定したネルンスト電圧  $V_{yx}$  の磁場依存性。

次に、磁場中での拡散機構に因る熱電係数を電気抵抗率と関連づける一般化したモットの関係式に関して議論する。一般化したモットの関係式は正確には電気抵抗率のフェルミエネルギーでの微分を必要とする[3]。電子密度を変えられない試料に対して、一般化したモットの関係式を磁場微分の形式に変形できるとよい。しかし、この磁場微分への変形は散乱時間にエネルギー依存性がない場合では成り立つが、エネルギー依存性がある場合では厳密には成り立たない。電子密度を制御できる試料を用いて、本来の電気抵抗率のエネルギー微分を用いた場合 ( $S_{yx,E}$ ) と、散乱時間のエネルギー依存性が小さいと仮定して磁場微分で代用した場合 ( $S_{yx,B}$ ) に電気抵抗率から導出されるネルンスト係数を比較した。図 3 に、電子温度  $T = 0.04$  K とした場合の両者の比較を示す。比較の結果、両者は定性的にも定量的にも良い一致を示した。

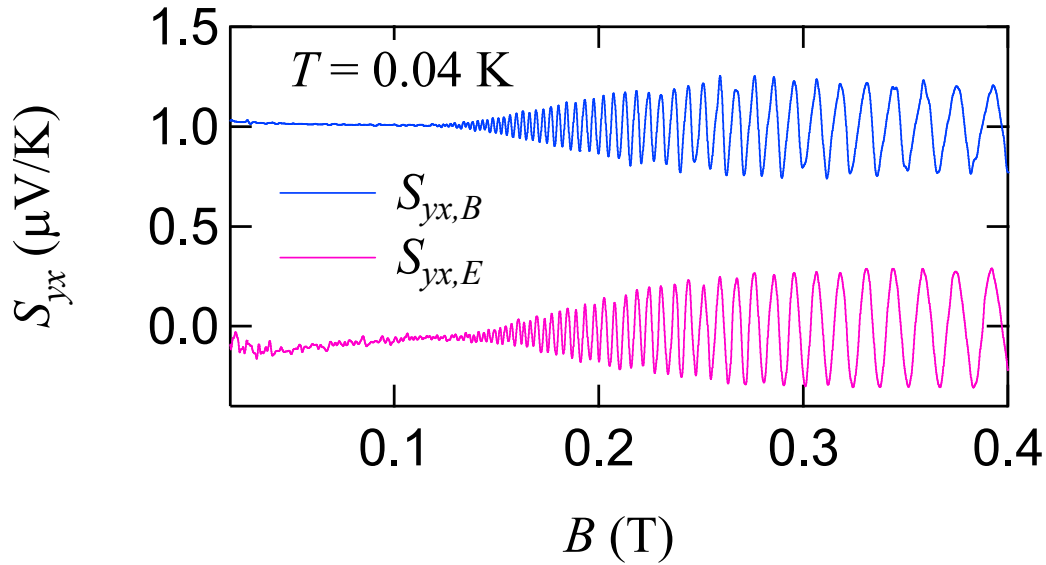


図 3：エネルギー微分( $S_{yx,E}$ )、および、磁場微分( $S_{yx,B}$ 、オフセット  $1.0 \mu\text{V/K}$ )を用いて一般化されたモットの関係式から導出したネルンスト係数の比較。

最後に、直接測定したネルンスト電圧と一般化したモットの関係式から求めたネルンスト係数を比較して、低温磁場中での電子拡散のネルンスト効果への寄与が測定されていることを定量的に調べた。電子拡散によって低温領域に向かって流れる熱流は、電気伝導率に依存するため、磁場中では小さくなると予想される。そのため、格子系に逃げる熱が相対的に大きくなり、格子系に逃げる熱が無視できなくなると考えられる。一般化したモットの関係式が正しいとして、加熱された電子のエネルギーの一部が格子系へ逃げることを考慮に入れて温度および温度勾配を計算し、一般化したモットの関係式から求めたネルンスト電圧 ( $V_{yx,cal}$ ) を、実際に測定したネルンスト電圧 ( $V_{yx,exp}$ ) と比較した。図 4 に、図中に明記した磁場中での両者の比較を、ホールバー上での温度勾配方向の位置  $x$  の関数として示す。比較

の結果、磁場が  $0.21 < B < 0.3$  T の範囲では、両者は定量的に一致した。測定したネルンスト電圧は実際に電子拡散の寄与である事が明瞭となった。

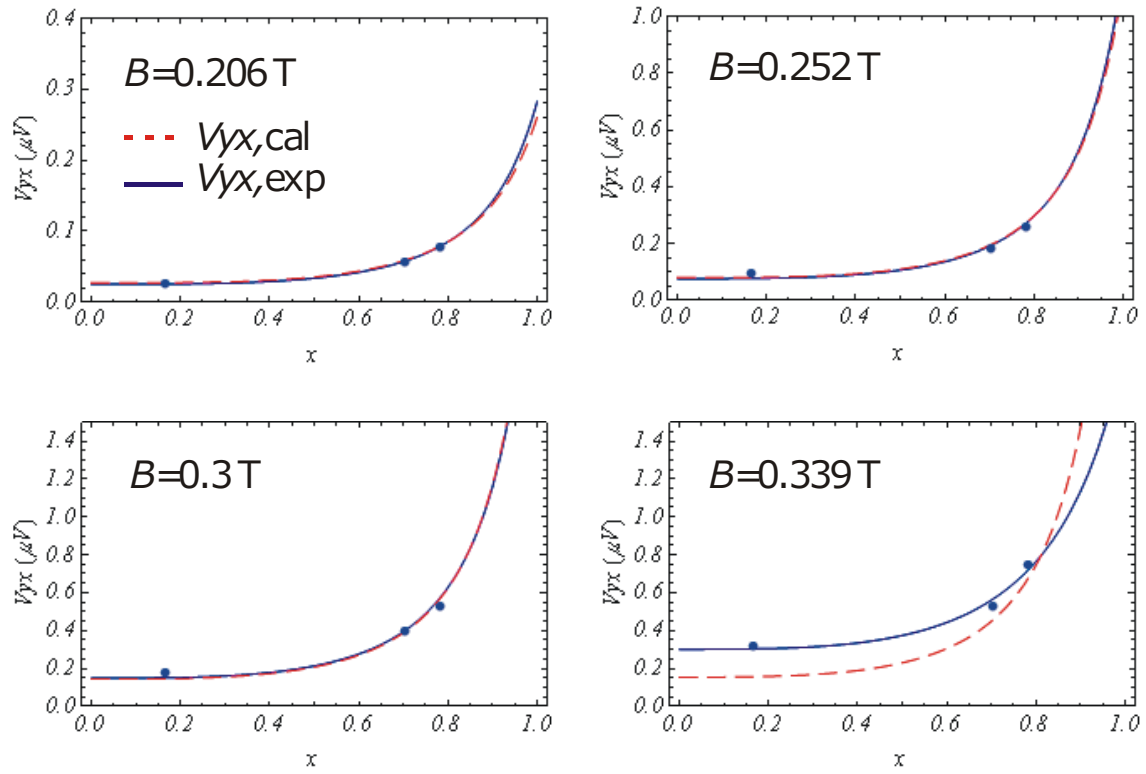


図 4：磁場中でのネルンスト電圧の位置  $x$  依存性。

#### 参考文献

- [1] R. Fletcher, Semicond. Sci. Technol. **14** (1999) R1.
- [2] S. Maximov, M. Gbordzoe, H. Buhmann, L. W. Molenkamp, D. Reuter, Phys. Rev. B **70** (2004) 121308.
- [3] M. Jonson, S. M. Girvin, Phys. Rev. B **29** (1984) 1939.