

2次元電子系のホール電場分布と粘性流体のストークス層

北海道大学大学院 工学研究院 明楽 浩史¹

流体力学はマクロな時空間変動を記述し、一方物性物理は輸送係数の変数依存性を議論し、それぞれ多彩な現象を説明してきた。これら2つの領域の間に位置する広大な学際領域にも無数の興味深い現象が埋蔵されているはずである。たとえば、流体現象の一例として、せん断流のもとでの液体の一樣状態の不安定化がせん断粘性率の密度依存性によって引き起こされることが議論されている [1]。物性物理で議論されている電子輸送現象にも流体力学的記述が有効な場合があるが、ここでのマクロな時空間変動はほとんど未開拓である。流体の非線形応答の一例である音響流 [2] が電子輸送現象にも出現すれば、物質のもつ自由度の多様性から多彩な音響流が期待できるだろう。

本発表では、線形応答の範囲内で、交流電流が流れる2次元電子系に発生するホール電場の分布を求め [3]、振動平板の上の粘性流体における流速分布 [4] と比較した。2次元電子系では分極や長距離クーロン相互作用などの点で粘性流体との違いもあるが、これらを見捨てると、2つの分布の振動数依存性が一致することを示した。

電流が流れるとその方向に電場が生じる。磁場中では電子にローレンツ力が働くため、はじめに与えた電流に垂直な方向にも電流が生じ、電子（ホール電荷）が端にたまり、電流に垂直な電場（ホール電場）が形成される。このホール電場の分布について3次元と2次元、直流と交流で比較してみよう。

3次元の場合、ホール電荷が面電荷となるので、平行平板コンデンサー中の電場と同様に一樣なホール電場が生じる。これは直流でも交流でも変わりはない。

2次元では、正負の線電荷がつくる電気力線が2次元面からはみ出すことから、3次元とは異なるホール電場分布が実現する。ここで $t = 0$ のとき2次元電子系に流す電流を0から不連続的に増加させた場合を考えると、 $t = 0$ からホール電荷が2次元電子系の端にたまり始める。このホール電荷によるホール電場は、初めのうちは、端に集中した非一樣分布をもつ。ところが、定常状態に達すると、エントロピー生成率が最小となるように電荷が再配置し、一樣なホール電場になる。すなわち、直流では一樣である。一方交流では、 $t = 0$ 近傍の過渡応答と同様に、ホール電場が端に集中することが分かる。分極を見捨て電荷の間に短距離相互作用を仮定すると、角振動数 ω を増加させたとき、ホール電場の減衰長は $\omega^{-1/2}$ のように減少する。これは粘性流体のストークス層の厚み [4] と同じ ω 依存性である。減衰長が2次元電子系の幅に一致するところで一樣から非一樣分布に移り変わる。

¹E-mail: akera@eng.hokudai.ac.jp

このように、2次元電子系でも粘性流体のストークス層が現れることが分かった。磁場が強い場合ホール電場と電流密度は比例し、この場合電流分布にストークス層が現れることになる。この電流分布は、長距離相互作用の場合や、伝導率の振動数依存性（分極の効果）が重要になる領域では、ストークス層の流速分布から外れることが計算により明らかになった [3]。

強い磁場の中の2次元電子系は、ランダウ量子化のため電子密度の増加とともに伝導率が振動するという特徴をもつ。この量子振動は、電子密度勾配がある2次元電子系において伝導率の空間振動に転写された結果、多様な電流分布をもたらすことが実験 [5] と理論 [6, 7] で明らかにされている。また、電子はスピン自由度をもち、up スピンと down スピンの分布の差（スピン偏極分布）がスピントロニクス分野における中心テーマの一つになっているが、このように2種類の流体がある場合のストークス層も今後の興味深い課題である。2次元電子系では電場分布やスピン偏極分布を高い空間分解能で測定する方法が確立しており、この系におけるストークス層の観測が期待される。

参考文献

- [1] A. Furukawa and H. Tanaka: Nature **443** (2006) 434.
- [2] 解説の一例は, J. Lighthill: J. Sound Vib. **61** (1978) 391.
- [3] H. Akera: cond-mat arXiv: 0912.5008.
- [4] G.G. Stokes: Trans. Camb. Phil. Soc. **9** (1851) 8.
- [5] E. Ahlswede, P. Weitz, J. Weis, K. von Klitzing and K. Eberl: Physica B **298** (2001) 562.
- [6] K. Güven and R. R. Gerhardts: Phys. Rev. B **67** (2003) 115327.
- [7] S. Kanamaru, H. Suzuura and H. Akera: J. Phys. Soc. Jpn. **75** (2006) 064701.