

## 欧州における半導体低次元電子物性の研究動向

Research Activities on Low-Dimensional Electronic Systems in Europe

平川一彦\*

Kazuhiko HIRAKAWA

### 1. はじめに

電子のフェルミ波長(典型的には数百オングストローム)と同程度の寸法を有する半導体超薄膜超微細構造中に量子力学的に閉じ込められた電子は、その自由度を奪われ、低次元電子状態となる。近年の半導体結晶成長技術の進歩により、1原子層レベルで膜厚が制御された非常に良質な半導体超薄膜ヘテロ構造が作製可能となっている。その中に閉じ込められた2次元電子系の特異な電子物性は大いに注目を集め、またその物性研究の成果はHEMTと呼ばれる超高速トランジスタや量子井戸レーザの実用化というかたちで生かされるに至っている。さらに最近の微細加工技術の急速な進歩により、電子をさらに膜に平行な方向にも閉じ込め、1次元、0次元電子状態をも実現することが可能になってきた。このような低次元電子系は、3次元のバルク的な電子系にはないさまざまなおもしろい物性を示す。1985年のノーベル物理学賞の受賞対象となった量子ホール効果も2次元電子系が示す特異な物性の一つである。

本調査では、1989年9月4日から8日まで、フランスのグルノーブルで開かれた第8回2次元電子物性国際会議(8th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems;略してEP2DS)において研究発表を行い、半導体超微細構造中に形成される低次元電子系の物性に関する最新の研究状況を把握すること、および欧州において活発に本分野の研究を進めているグループを訪問し、討論することを目的とした。

### 2. EP2DS-8

本国際会議は、固体や液体表面上に形成される量子力学的に閉じ込められた2次元電子伝導層の物性を議論するために1975年にブラウン大学で開催されて以来、'77年(ベルヒテスガーデン)、'79年(山中湖)、'81年(ニューロンドン)、'83年(オックスフォード)、'85年(京都)、'87年(サンタフェ)と開催され、今回のグルノーブルにおける会議で第8回目を数える。

\*東京大学生産技術研究所 第3部

冬季オリンピックが開催されたことでも有名なグルノーブルは、パリのリヨン駅から南へTGVで約2時間半ほど行ったところにあるヨーロッパアルプスの西端に位置する風光明媚な町である。TGVの車中では、同じ会議に向かわれているIBMの江崎玲於奈夫妻と偶然隣り合わせになり、楽しく談笑させていただいた。主催者および参加者の大半が“物理屋さん”ということもあり、会議の運営はきわめて質素で、会議場はグルノーブル大学の講堂、宿舎は学生ドミトリーであったが、和気あいあいと十分に議論ができるような雰囲気が漂っていた。会議の参加者は約280人で、そのうち日本からは6名(うち東大から4名)が参加した。

本研究分野の活発さを反映して、現在、同種の会議が多く存在する中で、老舗格のEP2DSは高く評価されている。もともとは、主にシリコンMOSトランジスタ中に形成される2次元電子系の電気伝導現象を主な議論の対象として始まった会議であるが、そのトピックスや扱う対象は年々変化してきており、現在では発表論文の約70%が半導体超薄膜ヘテロ構造の電子物性に関するものである。

今回の会議の内容の大きな特徴は、半導体量子細線(1次元電子系)や量子箱(0次元電子系)中の電子物性に関するものの占める割合が30%を越えてきたことであろう。最近の半導体超微細加工技術の進歩により、半導体表面に500~1000オングストローム(結晶成長を用いる特殊な場合には約100オングストローム)の寸法で加工を施すことが可能になり、電子をさらに量子力学的に閉じ込めた低次元(1次元、0次元)な電子系が制御性よく作製できるようになってきている。これらの低次元電子系が示す特異な物性やその電子工学への応用に関して活発な議論がなされた。

なかでもヨーロッパの研究グループからの発表件数の多さが注目された。今回の会議の場所柄ということもあろうが、やはり最近のヨーロッパの研究グループのアクティビティーの高さを物語っている。特に、フィリップス研究所(アイントホーフェン)やケンブリッジ大学のグループからの、量子ポイントコンタクトと呼ばれる極

微小スリットを通しての電子波透過の実験結果に関する発表は、その質の高さで群を抜いていた。

このような点にヨーロッパにおける学問のあり方の一端をかいまみるような気がした。これまでEP2DSにおいては、議論の主導権はIBMやベル研究所に代表される米国の研究グループにとられていたように思う。それは、本分野の研究のフェーズがこれまで成長期にあり、研究のアクティビティ＝パワー（力）という状態にあったことによると思われる。ところが研究のフェーズが成熟期に入ってくると、少数の良質な研究グループが学問の伝統を継承し、こつこつと着実に研究を進めて行くといったヨーロッパ的な学問のやり方のほうが適しているのかも知れない。フィリップス研究所やケンブリッジ大学による半導体量子ポイントコンタクトの美しい仕事は、低温物性研究のメッカであったオランダと金属中の電気伝導現象の研究のメッカであったケンブリッジ大学の学問の伝統とは無関係ではありえない。

筆者は、ガリウムひ素系単一障壁トンネルダイオードにおけるトンネル過程の電子フォノン相互作用に関して研究発表を行い、Stern, Mendez, Goldman, Hipolitoの各博士, Gornik教授らと議論できたのは有意義であった。

### 3. 欧州における研究グループ

EP2DSに参加した後、当時榊研究室の学生で筆者の後輩であった吉村尚郎君（現東芝半導体技術研究所勤務）といっしょに、ヨーロッパにおいて活発に研究を行っているグループを訪問し、見学・討論をおこなった。

まず最初に訪問したのは、オーストリアのインスブルック大学である。グルノーブルからフランス・スイスアルプスの山脈に挟まれた雄大な渓谷をコトコトと一日中登山電車で揺られながら、インスブルックに着いた。インスブルックも冬季オリンピックの開催された美しい町である。インスブルック大学では、Gornik教授の率いる研究グループを見学させていただいた。（ミュンヘンにあるショットキー研究所の教授でもあるGornik教授には翌日ミュンヘンにてお会いした。）このグループは、以前から半導体中における高電界効果の研究で優れた成果を挙げてきている。ホストであるHopfel博士に、ピコ秒レーザを用いた半導体中の超高速現象の研究について最近の成果を説明していただいた。このほかにも、このグループではP型ゲルマニウムを用いた遠赤外レーザ動作の研究、表面プラズモンを用いた指向性光ディテクタ・エミッタの作製などのたいへん興味ある話をうかがった。話によれば、オーストリアの人々（特に田舎の人）は大へん信心深く、教会のしきたりや行事などのため、とにかく休日が多いそうである。また雄大な自然にも恵まれ、このような精神の余裕と研究活動の両立には、学ぶとこ

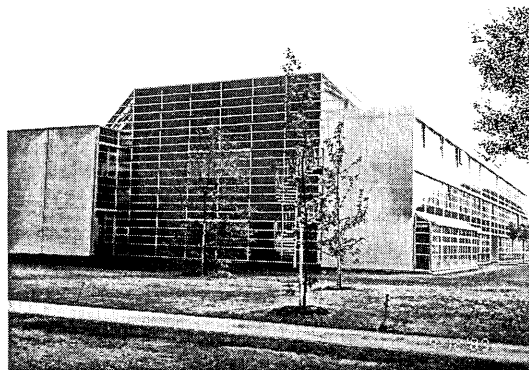


写真1 ミュンヘン工科大学のキャンパス内にある最新鋭のショットキー研究所

ろが大きいような気がする。

インスブルック大学を訪問した日の夕方、電車で次の訪問地であるミュンヘンにむかった。ミュンヘンでは、約3年ほど前に発足したばかりのショットキー研究所を訪問した。ショットキー研究所は、ババリア州政府が州の威信をかけてミュンヘン工科大学の敷地内に設立したといわれている最新の研究所である。研究所は、3人の教授が率いるグループで構成されており、Gornik教授およびAbstreiter教授がそれぞれ半導体超微細構造の電氣的性質（おもに半導体中の高電界効果、トンネル現象など）、光学的性質（おもにラマン分光法を用いた半導体超微細構造の評価）の研究を行い、またWeimann教授が半導体の超微細加工（おもに分子線エピタキシー法による半導体ヘテロ構造の作製）を受け持ち、3グループがうまく連携して研究をおこなっている。ここでは「まず完ぺきな実験システムを組み上げ、その後、きちようめんな実験を行う」というドイツ式の研究ポリシーが買われているらしく、非常に立派な研究設備が備えられていた。ついでに余談であるが、教授の絶大な権力もドイツ的であった。

その後、ミュンヘンを夜の10時半に夜行寝台車でたち、次の訪問先であるオランダのアイントホーフェンにあるフィリップス研究所に向かった。アイントホーフェンはアムステルダムから電車で約1時間のところにある田舎町であるが、ここにヨーロッパの巨人といわれたフィリップスの中枢がある。以前からの知己であり今回の訪問のホストでもあったBauer博士（その後、1990年10月から3か月間、先端科学技術研究センターの客員助教授として本学に来られている）が、寝ぼけている我々を駅まで迎えに来てくださった。（ちなみにこの日の夜はBauer博士のお宅に泊めていただき、たいへんお世話になった。）Bauer博士からは、半導体超薄膜中の2次元電子が示す磁気光学効果における電子多体効果と磁場の効果に関する最近の理論的研究について説明していただき、議



写真2 ミュンヘン市庁舎前の広場にて

論を行った。

さらにデルフト大学のグループと共同で量子ポイントコンタクトの発見で先駆的な成果を挙げている van Houten博士および彼の共同研究者たちと議論できたのは大きな収穫であった。まず研究室におじゃましたとき、たまたま誰かの誕生日のお祝いをしている最中で、「おまえもケーキを食べろ。」ということになり、和気あいあい

とした雰囲気を楽しませていただいた。

きわめて微細なゲート電極（寸法は約1000オングストローム）により半導体中に形成された極微小スリットからなる量子ポイントコンタクトは、観測されるコンダクタンスが $(e^2/h)$ を単位として量子化されることで大いに注目を集めた。van Houten博士からは、量子ポイントコンタクトのスリットから射出される電子波が高い指向性を有すること、またある条件下ではそのようにして射出された電子が、“ピンボール”のような粒子として振る舞うことなど、最近のきわめておもしろい研究成果についてお話をうかがった。今後、この量子ポイントコンタクトをいかに工学的に応用できるかを検討することが重要になってくるであろう。

フィリップス研究所で受けた強い印象は、優秀な若い研究者が、のびのびと、しかもきわめてアクティブに研究を行っていたことである。ヨーロッパの学問の伝統と若い研究者のバイタリティーが結合し、大きく花開いたという感じがした。最近、フィリップスが巨額の損失を出してしまったことにより、基礎研究部門の大幅な削減がなされつつあり、研究者の配置転換、解雇が進んでいると聞く。惜しいことである。

後半、3日間で3カ国の3研究所を訪問するというハードスケジュールではあったが、日本における研究環境と大いに異なる研究所の様子を見学でき、きわめて印象深い訪問であった。

最後に、この調査の機会を与えていただいた生産技術研究奨励会に感謝致します。（1991年1月18日受理）