

# 科学の 峰々

101

取材日：2019年6月13日  
東京科学機器協会会議室

東京大学名誉教授 独立行政法人 日本学術振興会 理事

いえ やすひろ

## 家 泰弘 先生に聞く

# 未来のエレクトロニクスの基礎 低次元電子系の量子輸送現象の研究

上

聞き手： 南 明則 日本科学機器協会 広報副委員長

高橋 秀雄 ハ 高橋副委員長

外嶋 友哉 ハ 広報委員

岡田 康弘 ハ 事務局長

(取材・撮影・編集協力：クリエイティブ・レイ(株) 安井久雄)



### 家 泰弘 先生のプロフィール

- 1974年 東京大学理学部物理学科 卒業  
1979年 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 博士課程修了  
1979年 東京大学物性研究所 助手  
1981年 アメリカ マサチューセッツ工科大学 客員研究員  
1982年 アメリカ ベル研究所 研究員  
1983年 東京大学物性研究所 退職  
1984年 アメリカ IBMワトソン研究所 客員研究員  
1985年 東京大学物性研究所凝縮系物性部門 助教授  
(1991年～1993年 文部省学術調査官)  
1994年 東京大学物性研究所凝縮系物性部門 教授  
1998年 (研究所の改組により)先端領域研究部門 教授  
2004年 (部門名の変更により)ナノスケール物性研究部門 教授  
2008年 東京大学物性研究所 所長  
(文部科学省 科学技術・学術審議会臨時委員、専門委員)  
(日本学術会議 連携会員／会員、第三部部長、副会長)  
(日本物理学会 会長)  
2015年 東京大学 退職  
2015年 独立行政法人 日本学術振興会 理事

#### 〈受賞〉

- 1993年 日本IBM科学賞  
2007年 日本物理学会論文賞  
2008年 千葉県知事表彰



## 産学官との連携

**世界の先端機関を経験し  
低次元電子系の研究に携る**

家先生は40年に亘り東京大学理学部物理学科や物性研で研究に携ってこられました。これまでの主な研究テーマについて教えていただけますか。

家 私の研究に多少なりとも貫性があったとすれば「低次元電子系の量子輸送現象」という言葉で括れると思います。

「低次元」という言葉を少しあみ碎いて説明しましょう。現代のいわゆるハイテク分野の半導体技術やナノテクノロジーを考える際に、その基礎となるのは固体結晶の中での電子の振る舞いの解明です。

3次元空間より空間次元の低い舞台、つまり2次元や1次元、更には量子ドットと呼ばれる0次元の系などを物質の結晶構造そのものを利用したり、人工的に微細構造を作り出したりして、その中の電子の特徴的な振る舞いを調べることは重要なテーマとなっています。

もともとこの分野は半導体素子の微細化の技術の発達と並行して発展したるものですが、基礎物理としては、低次元構造にして電子の運動に制限を課すことできまざまな量子効果が顕著に現れて来るという意味合いがあります。

人工的な低次元量子構造ではゲート電極というものを付加してそこに与える電圧によって電子の密度を制御することが出来ます。

また、強い磁場を印加することによって電子の運動を本質的に変

化させることも重要な手法です。

そうした事が面白くて低次元電子系の研究にのめり込みました。まあ、次元の低いことを長々とやってきたということですね（笑）。

経歴に沿って研究してきた事を教えていただけますか。

家 私が東京大学に入学したのは、大学紛争の影響で入試が中止になった翌年の1970年でした。

高校の頃から物理をやりたいと思っていたので、理学部の物理学科に進学、物理の同級生には優秀な人たちがたくさんいました。

大学院では、ヘリウム液面電子系を博士論文のテーマとしました。これは液体ヘリウムの表面に電子を浮かべることによって出来るユニークな系で、理想的な2次元電子系になることを明らかにしました。

幸運なことに、博士課程を修了してすぐに東大物性研の助手に採用してもらいました。大学院時代から助手として自由に研究をやらせてもらったことは幸せでした。

助手の立場にあった3年半ほど間に、アメリカのマサチューセッツ工科大学(MIT)の客員研究員として3ヶ月赴任しました。また、物性研の研究室が教授の定年退官で閉じることが決まっていたので海外に出ることにして、1982年からアメリカのベル研究所に行きました。

しかし、私がいた間にアメリカでは独占禁止法の関係で電話会社の分割という思いがけない事態が起こり、その影響でベル研究所の体制が変わってしまい、契約更新

が出来なくなりました。

危うく路頭に迷いそうになった時、デトロイトで開かれたアメリカ物理学学会で講演する機会があり、その会場に江崎玲於奈先生がおられました。講演後、江崎先生から近況をたずねられたので事情を話したところ、IBM研究所に来なさいと言ってください、1年間客員研究員として受け入れてもらいました。

その後、1985年秋に東大物性研の助教授として日本に戻り、以後30年物性研で研究生活を送りました。その間、科学研究費制度など学術行政に関わったこともあり、縁あって2015年から日本学術振興会の理事を務めています。

**アメリカでの研究生活：  
MIT強磁場施設、Bell研究所、  
IBMワトソン研究所**

MITの客員研究員になられた経緯を教えていただけますか。

家 そもそもきっかけは、東大物性研で助手として関わったグラファイトの層間化合物の研究です。グラファイトというのは黒鉛、つまり鉛筆の芯に使われている炭素の結晶です。

その研究内容を少し説明するとグラファイトの結晶は層状をしていますが、その層と層の間にカリウム、ナトリウム、リチウムといった原子や分子を入れることで新しい物質を作ることが出来るのです。もともとのグラファイトは黒光りする結晶ですが、層間に入れるものによって金色や青色の金属光沢をもつきれいな結晶になります。つまり、人工

## 産学官との連携

的に新しい金属が出来るわけです。

「合成金属」とも呼ばれていた、グラファイト層間化合物の「電子構造」がどうなっているかを調べていました。磁場をかけた時の電子の振る舞いを調べるもので、そこにいわゆる“量子効果”が現れるわけです。

また、カリウムや水銀などを入れたグラファイト層間化合物のある種のものが示す特徴的な超伝導を調べていました。層間化合物の超伝導は非常に2次元的性質の強いものでしたが、圧力をかけることによって層間距離を縮めて次元性を制御する研究を行っていました。

そして、MITで研究する機会を得たのは、それらの成果を発表した1980年「強磁場の物性への応用」について、箱根で行われた国際会議でした。



国際会議  
「半導体および磁性体への強磁場の応用」

そこでグラファイトが強磁場で劇的な振る舞いを示すことを報告したところ、会議に出席していたMITの看板教授ミリー・ドレッセルハウス先生が大変に興味を持ってくれたのです。折しもその頃、MITの強磁場実験施設において世界最高の強磁場発生装置が完成しつつありました。それは「ハイブリッド・マグネット」といって、超伝導コイルと常伝導コイルとの併用で30テスラという当時世界最高の定常強磁場を発生する装置でした。その強

磁場発生装置を使えば更に精密な研究が出来るということで、ドレッセルハウス先生と話がまとまり、翌年の夏にMIT客員研究員となり、ハイブリッド・マグネットの最初のユーザーとして実験を行いました。

つまりMITが、先端設備の能力を発揮するための知恵を家先生に求めたということですね。

家 完成したばかりの強磁場発生装置の利用価値を実証する上で格好のテーマだったと思います。その実験では短期間に非常に良い結果が出たので、MIT側も強磁場実験施設の存在意義のアピールが出来たと喜んでくれました。

MITが提供してくれたのは強磁場の環境でしたが、我々のグラファイトに関する実験には、もう一つ極低温という実験条件が必要でした。

ハイブリッド・マグネットの中で絶対温度1度以下の極低温環境を作り出すためのヘリウム3冷凍器はそこにはなかったので、その場でステンレスパイプなどの材料をかき集めて、工作室の旋盤や溶接装置を借りて1週間で作り上げました。こうした自作の実験装置を作ることは大好きですし、旋盤を使って色々作ることは得意でした。

この自作の低温装置には後日談があり、この半年後にベル研究所のダン・ツイとホルスト・ストーマーの2人がMITの強磁場実験施設で行った実験で「分数量子ホール効果」を発見して、1998年にノーベル物理学賞を受賞することになります。

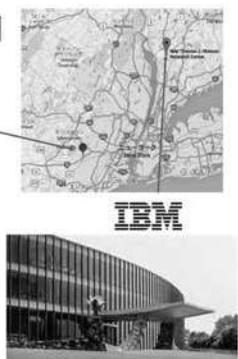
1982年からベル研究所に行っ

て、ホルスト・ストーマーと雑談していたところ、その実験は私が作ってMITに残していく装置を使用して行ったものだったことが分かりました。ストーマーらの「分数量子ホール効果」の先駆けとなったのは「量子ホール効果」という現象で、それを発見したフォン・クリッツィングは1985年にノーベル賞を受けましたが「量子ホール効果」の世界で初めての報告は、先ほど述べた箱根の国際会議でした。

MITに客員として3ヶ月滞在した頃、ドレッセルハウス研究室は黄金時代で多くの優秀な大学院生たちがいました。後に大教授になった人も何人かいいます。こうした環境で様々な刺激を受けたことは間違いないかもしれません。

MITに滞在した夏にゴードン会議に参加する機会があり、そこでベル研究所の物理部の部門長だったプラツツマン氏と初めて会って、翌年からベル研究所に行く話がまとまりました。1983年の9月から2年間をニュージャージ州マレーハイブルのベル研で過ごしました。その後、先ほど言ったような事情でニューヨーク州ヨークタウンハイツのIBM研究所に移って、半導体2次元電子系の研究に携わった後、日本に戻ってきました。

### 米国での3年間



## 産学官との連携

### 「高温超伝導」という物性科学の一大事件

**家** 物性研で研究室を立ち上げることになり、IBMで行っていた2次元電子系の研究を進める準備をしていたのですが、そこに“高温超伝導”という科学界の一大事件が起こりました。

超伝導というのは、ある種の金属極低温に冷却した時に電気抵抗がゼロの状態になる現象で、1911年にライデン大学のカメリン・オネスによって発見されたものです。

超伝導は極低温でしか実現しないというのが長年の常識でしたが、1986年に銅酸化物系の物質で絶対温度40度という従来の常識を破る超伝導が発見され、ほどなく90度という液体窒素温度を超える超伝導が見出されて、世界中で研究に火が点きました。

私が高温超伝導研究に関わることとなったのは、物性研の同僚で“結晶作りの名人”であられた武居先生から「非常に小さな単結晶試料が出来たのだけど超伝導の測定をやってみませんか」というお話をいただいたことからでした。武居先生は高温超伝導物質の高品質単結晶を世界で初めて作ることに成功した方です。

実際に測定してみると、それまで世の中に出ていたデータより格段に優れた超伝導特性を示す試料であることが分かりました。超伝導状態は強い磁場をかけていくと壊れるのですが、高温超伝導では非常に強い磁場をかけないと壊れません。また磁場をかける方向

によっても超伝導の壊れ方が違います。これを「超伝導異方性」と言うのですが、そのデータを世界で初めて出すことが出来ました。

ゴールデンウイーク明けに試料をいただきてさっそく測定を始めてみると、素晴らしい試料だったので興奮状態のまま3日3晩徹夜して詳細なデータをとりながら論文を書いて、5月12日には投稿しました。一週間で論文を投稿したというのは当時の異常な状況を反映しています。これだけ急いで発表しなければというほど、高温超伝導に関することは世界中で大変な競争状態だったわけです。

ここでいう高温は絶対温度90度、摂氏で言うと-170℃くらいです。それ以降の研究で超伝導転移温度の記録は塗り替えられて来ていて、今最も高温の超伝導は絶対温度200度、つまり-70℃くらいとなっています。

高温超伝導は今のところ非常に限られた用途ではありますが、既に一部は実用化されています。高温超伝導物質を線材に加工することなど材料工学として難しい問題がありますが、短い箇所で大電流を流すパーツなどに応用されています。

### 自作装置での実験データが世界の超伝導の教科書に

今日のようなデジタル機器はまだなかったわけで、その作業は測定もデータ収集も大変だったと想像します。

**家** 研究室の立ち上げでは、当

時普及し始めていたパソコンを使って自動測定を行うシステムを構築することにかなりの時間と労力をかけました。他の研究グループが出来ない測定をやろうという実験屋としてのこだわりがありました。

自作装置が活躍した例では「高温超伝導の磁束ダイナミクス」に関する実験があります。高温超伝導物質は層状構造をもつていて強い異方性を示すので、結晶軸に対して磁場をかける方向を精密にコントロールして測定する必要があります。そのような測定を実現するためにはステッピングモーターと特殊ギアシステムを組合せて磁場をかける角度を0.01度の分解能で精密に調整する装置を自作しました。また、強磁場下で温度を0.01Kの精度で一定に保つ技術も開発しました。

私がこうして得た実験データは超伝導の教科書にも引用されることになりました。超伝導の教科書でハーバード大学のティンカム教授による有名なものがいますが、高温超伝導研究の進展を踏まえて1990年代に加筆改訂されました。その際に私の実験データのグラフを掲載したい旨をティンカム教授からもちかけられ、名誉な話と感じながら喜んで提供した次第です。

先生が苦労をされたデータをもとに、世界中の学生が超伝導を学んでいるわけですね。

**家** ちなみに先ほどの“磁場の角度を精密にコントロールする装置”は高温超伝導以外の実験でも活躍してくれました。ある種の有機導

## 産学官との連携

体では磁場中の電気伝導度が磁場の角度に対して周期的に変化するという現象が現れます。

「角度依存磁気抵抗振動効果」というこの現象は物性研究所における共同研究の中で発見したものです。この現象の本質を解明したことろ、非常に一般性のあるものであることがわかりました。実際その後さまざまな物質で同様の効果を確認することが出来ました。さらに、新たなパターンの角度依存磁気抵抗振動効果も色々と明らかに出来ました。工夫を凝らして自作した装置のおかげで有益な研究成果がかなり得られたというわけです。

東大物性研に在籍した30年の間には、磁性半導体の仕事にも取組み、量子ホール系や量子ドットなど、様々な研究を若い人たちと進めることが出来ました。

東大の物性研究所は千葉県柏市にあります、その当時は東京都六本木にありましたね。

家 助教授として着任して以来、物性研に30年間在籍しましたが、前半の15年を六本木、後半の15年を柏で過ごしました。その中間に柏移転があり、私は移転委員長として、移転プロジェクトのために奔走しました。現在、六本木キャンパスだった場所は国立新美術館となっています。

1994年頃に移転先候補地として初めて柏に視察に来た時には、一面の野原にぽつんと小学校の建物があるだけという風景でした。ちなみにその一帯は小金牧といって、

江戸時代は幕府の軍馬の放牧場だったそうです。都心の六本木からの移転には当然ながら反対意見もありましたが、今になって思うと、あの時点で移転を決断したことは良かったと思います。

柏移転に際しては、柏市や地元企業の方々から歓迎と、ご協力をいただきました。そのお返しの意味もあって、近隣の小学校への出前授業や市民講座、夏休みの子供科学教室などを10年間続けました。

2008年から5年間、研究所長を務めました。物性研は物性科学の分野の共同利用研究所として、通常の大学の研究室では運営が困難であるような高度の大型実験施設やスーパーコンピューターを設置して共同利用・共同研究に供することを使命としています。所長在任中には、兵庫県の播磨にある放射光施設SPring-8における軟X線のビームラインや、茨城県東海村の加速器施設J-PARCにおける中性子散乱の実験施設の整備を進めました。

また、柏キャンパスでは、超強磁場実験施設や新型レーザー実験施設の高度化のための予算獲得に腐心しました。これらの大型実験装置を維持・運転しつつ、計画的に更新していくことが重要です。

### 物理を志すきっかけとなった海外サイエンス・スクール

どのようなきっかけで物理の世界へ興味を抱かれてでしょうか。

家 私は京都生まれですが、親

が転勤族だったため5年に1度は引っ越しという生活で、小中高学校の間にも東京～大阪～東京と5年ごとに転居していました。

高校受験では兄と同じ大阪府立北野高校を受けるつもりでした。(兄は天文学者の家正則先生)しかし、願書を出す当日の朝に父親の東京転勤が発令になり、急遽東京の高校を探すことになりました。都立高校の入試受付は既に終了していましたが、その年は都立高校の「学校群制度」というものが始まった年で入試に混乱があり、あちこちの高校で定員割れが起こったようです。そうした中で都立戸山高校の二次募集を父親が見つけて、何とか補欠で滑り込んで入学出来たという顛末でした。

私が物理への興味を強く抱いた契機は高校3年生の夏に、オーストラリアのシドニー大学が行っていた高校生のためのサイエンス・スクールに参加したことでした。このサマースクールはオーストラリアとニュージーランドの高校生を対象に始まったのですが、やがて国際色をつけたいということで、アメリカ、イギリス、やがて日本の高校生にも対象が広がったようです。

日本からの5人の1人に選ばれ、総理官邸で当時の佐藤栄作首相と記念撮影などを行うなどして出発しました。シドニー大学での科学学校の間も、主催者側の国際イベントアピールのためだったと思うのですが、現地の新聞社に「やらせ」の写真を撮られました。(笑)

シドニーには2週間滞在しました。シドニーへ向かう経路は、日本から

## 産学官との連携

「自作の実験装置で、他の研究グループには出来ない測定をやってやろう」という実験屋としてのこだわりがありました。



まずロンドンへ行き、イギリスの高校生と合流して、その後ワシントンでアメリカの学生と合流、ハワイ経由でシドニーへ入るというものでした。

1969年当時は1ドル360円、オーストラリアドルは400円でした。まだ海外旅行が夢のようだった時代に大変恵まれた体験が出来ました。

現地ではどのようなことを学んだのでしょうか。

その年のスクールのテーマは、「NUCLEAR ENERGY TODAY and TOMORROW」でした。当時は日の出の勢いだった原子力科学、そして素粒子物理学の講義がありました。特に素粒子物理の講師は超一流の講師で、パノフスキーというスタンフォード大学の教授、またダリツとというケンブリッジ大学の理論物理学者などが名を連ねていました。

今思うと、シドニー大学がこれだけ高名な研究者を高校生向けのイベントに招聘できたことに驚きます。主催者であったメッセル先生というシドニー大学の教授は政治力のあった人だったようです。高校生にしてその講義を受けることが出来たのは非常に贅沢なものでしたね。

このシドニー大学での体験が、大学で物理を志すきっかけとなりました。ちなみにその夏の学校の副校長はバトラー先生というシドニー大学の教授でしたが、超伝導の分野で良く名を知られた先生だったことを、後に超伝導の研究をやるようになってから知りました。

そんな経緯もあって、東大では物理学科へと進み、大学院では手を動かすことが好きだったこともあって実験の研究室を選びました。よく実験もしましたが、スポーツや飲み会もよくやった学生時代でした。



地元新聞に掲載されたシドニー大学物理の助教授との写真

1969年シドニー大学国際科学学校「海外サイエンス・スクール」総理官邸で出発前の記念撮影。中列左より2人目が家先生  
前列中央は佐藤栄作首相・Prof.Messel・坂田道太文相

次号「科学の峰々」は引き続き独立行政法人 日本学術振興会  
理事 家泰弘先生(東京大学名誉教授)にお話を伺います。