

§ 6. 仁科記念財団の活動

—1996年度—

1. 仁科記念賞

本年度は下記3件5氏の研究に対して贈呈しました。

研究題目 短波長半導体レーザーの研究

受賞者 日亜化学工業(株)開発部 中村 修二 氏

業績の概要

われわれの日常生活においても、多くの場面で半導体レーザーの恩恵に与っている。たとえば、コンパクトディスクの読み取り、また、電話の音声情報を半導体レーザーの光にのせて光ファイバー中を伝送している。しかし、これらは GaAs 系を用いた赤色レーザーでのみ可能であった。さらに、光の3原色である青色と緑色（黄色）を発する半導体レーザーの開発は、長年にわたる夢であったが、短波長半導体レーザーを構成する物質系の不安定さと加工技術の困難さが障害となってきた。中村氏は GaN 系の半導体を用いてその障害を一つ一つ取り除くことに成功し、室温で作動する青色および緑色の発光ダイオード（LED）とレーザーダイオード（LD）の作成に成功した。さらに、これらは製品化され、市販されるまでにいたった。この波及効果は大きく、第一に、次世代のコンパクトディスク(CD)，デジタルビデオディスク(DVD)などの光ディスクの高密度光記録用光源に使用されようとしている。光ディスクの記録密度は一般にレーザー光の発振波長の逆数の二乗に比例し、発振波長がほぼ半分になるので、記録密度はほぼ4倍になるといわれている。第二に、GaAs 系の赤色 LED に加えて、中村氏の開発した青色 LED と緑色 LED を組み合わせると白色光源、フルカラーディスプレイなどいろいろな用途が可能になる。

中村氏のブレークスルーと物理的意義を詳しく述べてみたい。まず図1(a)に中村

氏の作成した短波長半導体レーザー(LD)の、図1(b)にはLEDの構造を示す。発光層は $In_xGa_{1-x}N$ (x はたとえば0.06)の三元の半導体で、発光のピーク波長は x の濃度を変化することにより、364nmから620nmの間で変えられる。この発光層をp型とn型のGaNあるいは $Al_yGa_{1-y}N$ の半導体(クラッド層と呼ぶ)でサンドイッチした構造となっている。この系において、p電極とn電極の間に電圧を印加して、電流を流すと発光層(LDでは $Al_zGa_{1-z}N$ の多重量子井戸構造、LEDでは単一量子井戸構造)の伝導帯に電子がn型のクラッド層より注入し、またその価電子帯にはp型のクラッド層より正孔が注入する。この発光層で電子と正孔が結合して、青色あるいは緑色の発光を示す(図1(b))。SiCのLEDの100倍も明るい数

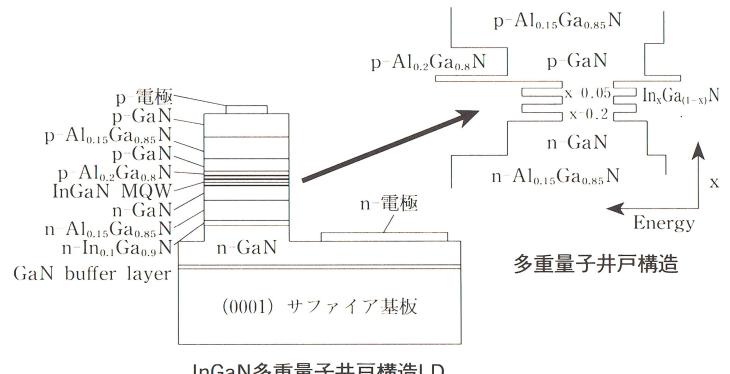


図1(a)

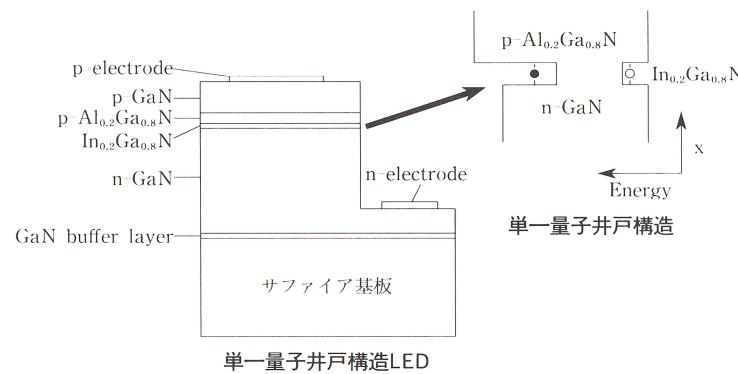


図1(b)

cdの輝度を得ている。さらに電流注入を増すと発光層が共振器として働き、誘導放射が有効に起こるようになったものが、短波長半導体レーザーでLEDに比して、コヒーレントでより輝度の高い発光が得られる(図1(a))。

この構造の作成には、多くの人々が超えることができなかつた幾多の困難があった。第一にはGaN系結晶の成長温度は約1000°Cと非常に高温である。そのため、有機金属化学気相成長(MOCVD)法で作成するには反応ガスを生成するヒーター材料の選択と、一様な結晶成長を行うために図2に示すツーフローMOCVD装置を設計・作成した。次に、良質のGaN系結晶薄膜を作成するための基板の選択とGaNバッファー層の導入の工夫が必要であった。一般に今までの半導体加工技術では結晶格子定数の近い結晶の組み合わせで、基板・クラッド層・発光層が作成されていた。しかし、その常識を覆す工夫が随所に施された。

図1の発光層の上下にp型とn型のクラッド層を作成する必要がある。特に、II-VI族半導体とこのGaN系半導体においてはp型の作成が特に困難であり、中村氏はまずその理由を解明した。窒素Nはアンモニアガスから供給されるが、p型にするために添加されたMg金属がアンモニア NH_3 から出た水素原子Hと結合して、正孔を供給できないことをつきとめた。次に、MgをドープしたGaN結晶に電子線照射や窒素雰囲気中で熱処理することによって、水素原子を追い出し、p型GaN系結晶を作成することに成功し、短波長の発光ダイオードとレーザーダイオードの作成に成功した。

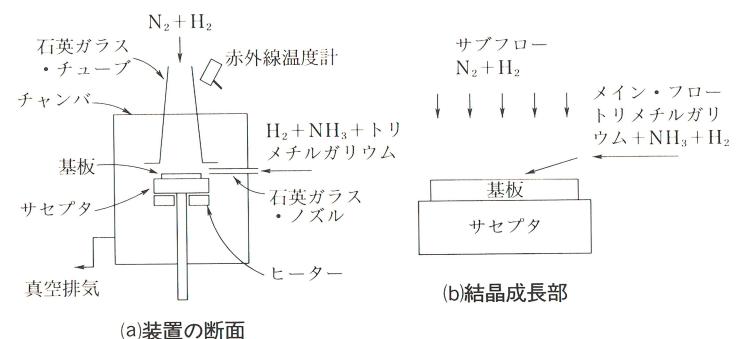


図2

研究題目 固液界面でのアトムプロセスの解明に関する研究

受賞者 東北大学工学部 板谷 謙悟 教授

業績の概要

固体と液体が接する固液界面（図1）で行われる反応の本質を理解するには、その界面構造に関する原子・分子レベルの知見が必要不可欠である。板谷謙悟氏は、走査トンネル顕微鏡（STM）という真空中で誕生した手法を、固液界面に適用し、原子レベルの分解能で界面構造を決定しうる新しい方式（4極式）のSTM装置を発明した。さらに、この新手法を用いて、貴金属単結晶電極上への各種イオンの吸着構造、電解析出過程の原子レベルの解明、吸着有機分子の配列決定、さらにはSi, Ga, Asの半導体表面上で起こるエッティング過程を原子レベルで解明してきた。これらの先駆的成果は、物理および化学の広い分野に強いインパクトを与えており、国内外において高く評価されるにいたっている。主な業績は以下のとおりである。

1. 電位制御STM装置の開発

1982年にIBMで開発されたSTM装置は試料と探針の間にトンネル電圧を印加し、その間に流れるトンネル電流を制御因子とする2極方式であるのに対し、板谷氏は試料電極さらには探針の電極電位を参照電極に対して制御しうる、まったく新しい方式（4極方式）のSTM装置を考案し開発した（図2）。これにより溶液中の電極表面上で行われる種々の物理・化学過程を厳密に制御しつつ、しかも原子分解

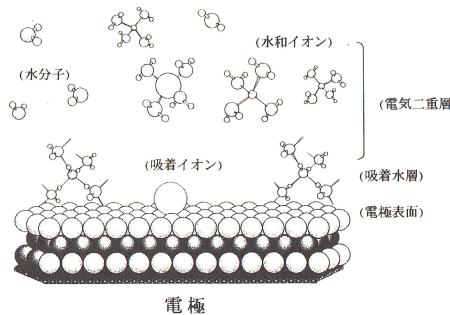


図1 固液界面の概念図

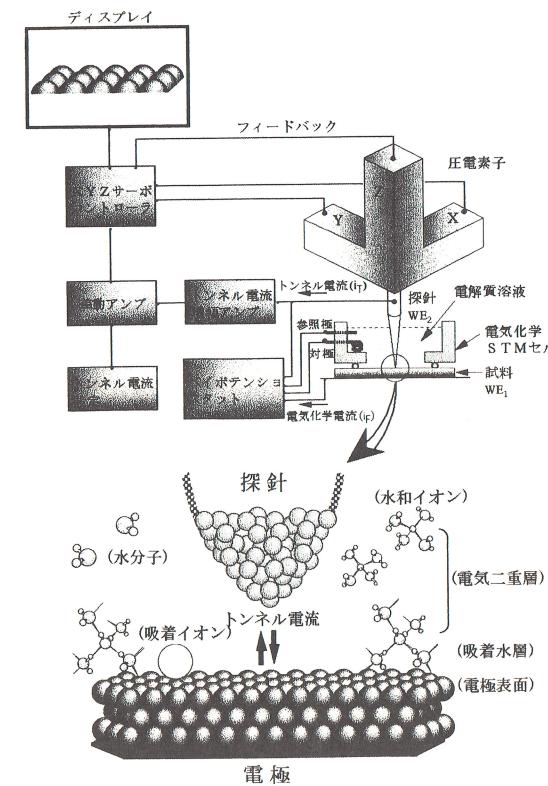


図2 4極方式液中STM装置

能で表面構造を決定し、反応の動的過程を追跡することが可能となった。現在、この新しい装置はすでに世界の標準手法として確立するにいたっている。

2. 原子的に規定された界面の形成とその実証

板谷氏は高度に精製した電解質水溶液中で白金、金をはじめとする多くの単結晶電極表面が、その結晶配列に従った原子的に平滑なテラスと単原子ステップから成る構造を有することを、電位制御STM装置によって実証した（図3）。清浄表面は超高真空中でのみ存在することができるというこれまでの常識を覆し、電解質溶液中においても形成されることを明確に示す結果となった。

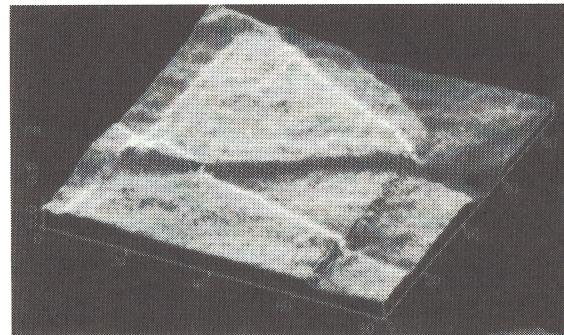


図3 Pt(111)面のSTM像

3. 電解析出の初期過程の解明

板谷氏は電位制御下の電極表面上において、最もその解像が困難と考えられる最密充填面((111)面)の個々の原子の解像に成功した。この成功に端を発し、白金および単結晶電極上への銅あるいは銀の電解析出過程を原子レベルで解明することに成功している。析出した銅、銀原子は基板電極上に超格子を形成し、整然とテラス上に配列していることが明らかとなった。

4. 有機化合物の吸着構造

ポルフィリン等の重要な有機化合物は、これまで多くの金属表面に吸着することが知られていたが、規則構造はとらない。ところが、ヨウ素原子で修飾した金属表面上では、高度に配向することをSTMで発見した。高度に配列したポルフィリン単分子層の高解像度STM像はポルフィリン分子構造を明確に捕えており、分子の内部構造を明らかにした(図4)。さらに、最近ではロジウムおよび白金表面に吸着したベンゼンの配列およびベンゼンの分子内構造の解明に成功しており、今後の新しい分子科学の発展に寄与するものと考えられる。

5. 半導体表面の化学的溶解過程の解明

金属表面のみならず半導体表面の化学反応性を解明することは、物理および化学のきわめて重要な課題である。板谷氏はシリコン単結晶表面(Si(111)面)の化学エッティングを行い、溶液中でシリコン原子位置の同定に世界で初めて成功した。あ

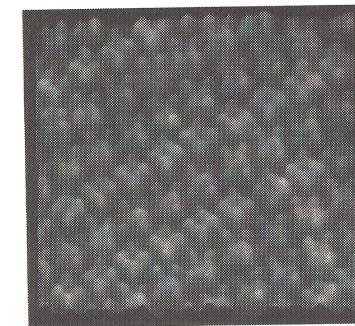


図4 ポルフィリン单分子吸着層のSTM像

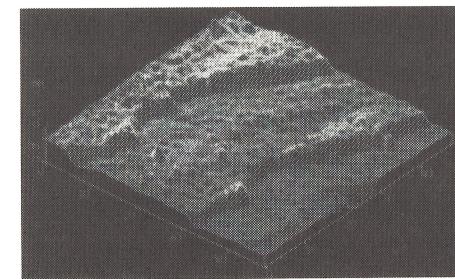


図5 Si(111)面のSTM像

るエッティング条件下では、シリコン原子はモノハイドライドで理想的に終端していることが直接観測された。界面で結合が切断される化学的溶解過程の原子レベル制御に、道を開く成果として高く評価されている(図5)。

以上のように板谷謹悟氏は、固液界面の原子レベルでの構造決定という未開の分野において、それを解析する装置および方法論の開発から研究を進め、多くの重要な界面反応の解明に成功した。その業績は国内外において電気化学、界面科学、触媒化学、表面物理さらには結晶成長、吸着配向等に関連する広い分野で高く評価されている。

研究題目 銀河中心巨大ブラックホールの発見

受賞者 国立天文台 中井 直正 助教授（電波天文系）
国立天文台 井上 允 教授（電波天文系）
国立天文台 三好 真 助手（地球回転研究系）

業績の概要

銀河には強い電波を放射しているものがあり、それは銀河中心核の活動によるものだと考えられている。活動のエネルギー源となっているのは巨大ブラックホールであるとする説が一般的であるが、これまで、その直接の観測的証拠はなかった。もっとも、銀河中心核に物質が集中しているという観測はあったが、観測の角度分解能からくる限界のために、十分に中心近くの領域まで追いつめることはできなかったからである。

中井、井上、三好の3氏は、2100万光年の距離にあるりょうけん（獵犬）座の銀河M106（写真1、NGC4258ともいう）に毎秒1000キロメートルの速度で運動する電波源があるのを、国立天文台野辺山宇宙電波観測所の45メートル鏡による観測で発見した（Nature, 1993）。それは水（水蒸気）が銀河中心核からの強い放射を受



写真1

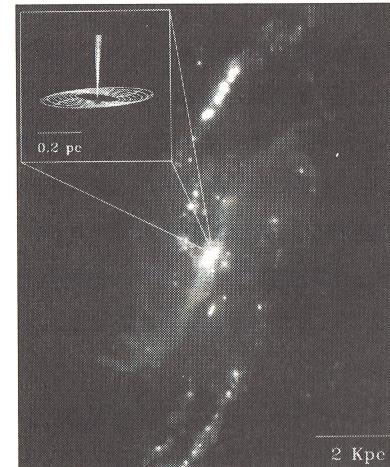


写真2

けてメーザー（レーザーの電波版）発信をしているものであった。

その後、彼らは日本国内の VLBI（超長基線電波干渉計、野辺山一鹿島一水沢をつなぐもの）でも観測したが、さらに、稼働を始めたアメリカ国立電波天文台の VLBA（超長基線電波望遠鏡アレー、ハワイからアメリカ本土を経てペルト・リコまで8000キロメートルにわたって、口径25メートルの電波望遠鏡を10台配置したもの）を使ってより詳しい観測を行った（Nature, 1995）。

この観測では、東京から見て京都の米粒を見分けることができるほどの高分解能であること、水メーザーを発信しているガスの塊が小さいものであること、さらに根本的には、水メーザー電波の周波数がきわめて正確であることがいまって、精度の高い情報が取得された。その結果、銀河全体の10万分の1(0.4光年)の領域に高速で回転している円盤の存在が、そこにある水メーザー源の分布と運動として明らかにされた。その解析によって、回転円盤より内部に太陽の3600万倍もの質量が存在することがわかった。写真2（赤色を基調とするもの、Nature誌の表紙になった）はM106の中心核領域であり、その中に回転円盤が観測されたことを示す（長さの単位である pc（パーセク）は3.26光年に等しい。また kpc=1000 pc）。写真3は、水メーザーの電波スペクトルと、回転円盤のモデルを示したもので、円

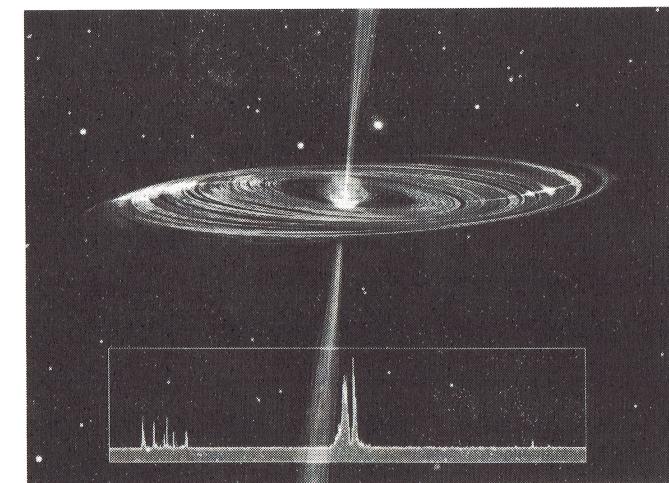


写真3

盤がワープしていることまで測定されている。

これだけの質量がブラックホールになっていても、その事象の地平線の半径は1光年の10万分の1ということになる。彼らの観測は、そこまで追いつめたわけではない。観測からいえることは、物質の密度が非常に高く、円盤以内の平均値で、半径1光年の球の中に太陽質量の恒星が5億個存在することに相当するということになる。これだけ多くの星がより集まって存在していると、4000万年の間には星どうしが互いに衝突し、ばらばらに壊れてしまっているはずだということになる。これは、約100億年という銀河の年齢に比べると一瞬の出来事である。したがって、その巨大な質量は多くの星ぼしの集合ではなく、円盤の中心に集中して存在するものであり、巨大ブラックホールだということになった。

この議論は、その後、さらに進められた。VLBAによる精密観測のおかげで、いろいろな水メーラー源の運動について、純粋な（点状天体の周りの）ケプラー運動からの速度のずれまでわかり、それは0.4パーセント以下であることが示された。この事実と、恒星の集団（恒星系）の中での星の分布に関するモデルとを組み合せて論じると、集団の中心部における星の密度は、上に引用した値のさらに1000倍になることが E. Maoz (Astrophysical Journal, Letters, 1995) によって指摘された。そうなると、星どうしの衝突時間は数万年という短い時間で起こることになる。こうして、回転円盤の内部にあるものは星の集団ではなく、巨大ブラックホールであることがますます確実になった。この物質密度の値は、われわれの銀河系の中心核における密度（この測定値もここ数年間に70倍になったが、さらにその値）の700倍であり、一般的の銀河である M87 に見出されている値の400万倍にも達する。すなわち、ブラックホールを示唆する質量集中の観測としては、破格に良質のものなのである。

この研究が高く評価されるのは、上に述べた質量集中を通じた巨大ブラックホールのことに留まるものではない。彼らは、水メーラー源の運動速度が時間的に変化していく様子、すなわち加速度まで観測した。この事実によって、初めて、回転円盤の角度による大きさだけでなく、実際の大きさ（実寸）が確定し、それに対応して、その銀河までの距離の絶対値が5パーセントの精度で求められた(6.57 ± 0.32

メガパーセク（メガパーセク=100万パーセク=326万光年）；シンポジウム・プロセーディングス, 1996年）。これは、遠くの銀河までの距離の絶対値を高精度で測定する新しい方法を開拓したものとして、きわめて重要である。さらに、この距離を銀河の宇宙膨張による後退速度と結びつけて、宇宙論の基礎的パラメーターであるハッブル定数が求められた（メガパーセクあたり毎秒 81 ± 4 キロメートル；同上, 1996年）。そのような結果は宇宙論の研究にも重要なので、その後、他の銀河についても同様な観測をするために、水メーラー源の測定が世界の数グループで精力的に進められるようになってきている。現在のところ、まだ中井氏らの観測に匹敵するものは見出されていないが、中井氏らの研究は、銀河中心核の構造の研究と宇宙論の研究に、同時に新しい局面ないしはパラダイムを開きつつあるものとしても高く評価される。

2. 仁科記念講演会

本年度は次の記念講演会を開催しました。

第42回定期講演会（お茶の水女子大学理学部と共同主催）

日 時 1996年12月14日（土） 午後2時～5時（開場1時半）

挨 拶 仁科記念財団理事長 西島 和彦

講 演 フリーラジカルの科学——その現状と将来——
総合研究大学院大学学長 廣田 榮治

映 画 「朝永振一郎」（午後4時～5時）

会 場 お茶の水女子大学理学部3号館7階大講義室

3. 仁科記念奨励金

- (1) 本年度は小規模国際シンポジウムに対する助成は休みました。
- (2) 研究者の海外派遣

本年度は次の2名を派遣しました。