

まつなみひろゆき

## 松波弘之

(独立行政法人 科学技術振興機構 研究成果活用プラザ京都館長)  
シリコンカーバイド (SiC) 半導体・デバイス実用化に貢献



シリコンカーバイド(SiC)というこれまで電子材料として利用されなかった材料に早くから注目し、SiC 薄膜作製法において、特定の面に適度なオフ角を導入することによって、均一な結晶成長を制御する方法を様々な試行錯誤の末に見出し、初めて結晶多形混在のない高品質 SiC エピタキシャル単結晶の作製に成功した。その後、高耐圧・高速・低損失の SiC ショットキーダイオード、電界効果型トランジスタを試作し、シリコン半導体では実現することの出来ない耐熱性に優れた小型・超低損失・簡易冷却の電力用デバイスが実現できることを世界で初めて実証した。常に前人未到の道を歩み続け、SiC を実用的な半導体に育てた。

### 生い立ち、そして学生時代

松波弘之は、1939 年大阪で生まれ、そしてその地で育った。中学卒業の後、大阪府立市岡高校に進んだ。高校時代は将来何になるかということとはあまり深く考えることなく、学校の授業を中心に勉強するまじめな生徒であった。毎日それなりに充実した三年間を送り、理系の学科が得意であったが、将来の夢として、大学の教授になって研究一筋の道に進みたいという気持ちはなく、むしろ一技術者として企業に就職するのだろうなあという気持ちで、工学部に進むこととした。1958 年京都大学工学部電子工学科に入学した。大学に入って、体育会系のバレーボール部に入り、それにかかなりのエネルギーをさき、勉学とスポーツを両立させ楽しい大学生活を送った。4 回生となって、卒業研究のために指導教授につくことになるが、松

波は田中哲郎教授の物性論の講義や、強誘電体のヒステリシス現象がメモリの応用に使えるという講義に強い関心を持ち、田中研究室を希望した。卒業研究の定員 4 名に対し、松波を含め 8 名の応募があり、抽選で決まることになっていた。松波は事前に田中教授のもとに伺い、「抽選に洩れても大学院では、田中研究室で研究をさせていただきたい」ことを、勇気を奮ってお願いした。抽選に受かり、結果的には定員枠より多い 5 名の卒業研究生に入ることができた。研究テーマは、当時ようやく具体的なデバイスとして注目され始めてきた、「電界効果トランジスタ」で、卒業論文提出直前まで、徹夜のゲルマニウム(Ge)への不純物拡散実験を行い、深い pn 接合を作製しトランジスタの動作確認をして、論文を完成した。この成果は、日本では極めて初期の貴重な実験成果であり、その年の電気関係学会関西支部大会で発表することができた。

松波は、1962 年学部を卒業することとなるが、当時は高度経済成長の始まりで、好景気で多くの求人者が殺到していた。しかしながら、松波は 4 年間の大学生活を振り返り、このままでは大学卒として社会でやっていける自信が得られていないと考え、大学院修士課程に進むこととした。研究テーマは比較的自由に決めることができたが、化合物半導体材料の探索が広くなされている状況であったことから、新規物質としての Cd - Sb (カドミウム-アンチモン)系半導体の研究とし、Cd<sub>4</sub>Sb<sub>3</sub>結晶の結晶成長、結晶構造解析、そして電子物性計測と、これまで前例のない新規材料について、紆余曲折のプロセスを経て、修士論文を纏め上げた。この成果は、新しい応用につながるという意味では成功とはいえなかったが、この研究過程を通じて、松波は新規材料開発の困難さを認識すると共に、その困難にさらに挑戦したいという気持ちを強く持つようになり、研究を継続するために、大学院の博士課程に進学したいと考えられるようになった。修士課程の 2 年目の夏、博士課程への進学希望を、田中教授に伝え、教室の会議で承認を得ていた。

1964 年 1 月中旬、修士論文をまとめている時期に、田中教授から、「4 月から研究室の助手と博士課程の二人が会社に就職することとなった。研究室の助手のポストが空くので、君を推薦することができるようになった」との話があり、松波にとっては青天の霹靂であったが、博士課程の学生として大学で研究を続けたいとの意向を持っていたことから、これも挑戦であると考え、京都大学の助手に就任することとなった。1964 年 4 月、松波 24 才のときであった。

## SiC に出会うまで

1964 年、助手となった松波は、研究室の事務処理、装置のメンテナンスなどスタッフとしての仕事をこなしながら、本来の研究を開始しなければならなかった。修士課程のころから、半導体研究への関心はますます強くなっていったが、テーマは研究室の先輩からの助言を受けながら自分自身で決めて行うこととなった。半導体素材としては、あまり研究がやられていな

い Cd - Sb 系化合物および Cd - As(カドミウム - 砒素)系化合物を主に扱い、計測手段としては、半導体に電流を流しておいて、そこに磁界をかけることによって得られる、いわゆるホール効果や、温度を変えて半導体の電流 電圧特性を測定し、半導体の電荷の輸送現象の解明を行った。その成果は 1967 年から 1971 年にかけて 5 編の英文の論文として、日本物理学会、応用物理学会の欧文誌に掲載され、1970 年に「カドミウムをふくむ 化合物半導体の研究」という博士学位論文をまとめ、工学博士の学位を授与された。

1971 年、助手から助教授に昇任した松波は、本格的な半導体研究に打ち込むことを決意した。研究室の物性計測手段は電荷の輸送現象が柱であったが、これだけでは駄目であった、半導体の重要な物性である、エネルギー準位の間を遷移する物性現象としてルミネッセンスが重要であると考え、この計測手法を研究室内に確立することを決心した。

次に半導体材料として何を選ぶかということが、大問題であった。修士課程、助手の時代を通じて Cd-Sb のような 族化合物半導体の研究を行ってきたけれども、欠陥の少ない単結晶を得ることが極めて難しく、また Cd-Sb の比率をきちんと 1 対 1 や 4 対 3 に作製することも極めて困難であった。半導体の本来の基本性質であるイントリンシック(固有)な状態を得ることができず、結果として実用的なデバイス開発にたどり着かない恐れがあるということで、これらの材料を継続して研究することに大きな魅力を感じなかった。

そういう状況の中で、松波は以後数十年にわたって松波のライフワークとしての研究に携わることとなった、新しい半導体材料に出会うこととなる。その半導体材料は SiC(シリコンカーバイド)であった。

半導体材料として SiC をやろうと、松波が決断した当時の半導体の状況を振り返ってみると、1947 年米国ベル研究所での点接触トランジスタの発明に続き、pn 接合型トランジスタが開発され、これまでのラジオなどの増幅器は、真空管からトランジスタに一挙に変わっていった時期であった。しかしながら当時は半導体材料として Ge でしかできなかったため、この材料では 65 以上になるとノイズが大きくなり、使い物にならないという欠点があった。特に米国では軍事用途としてのトランジスタの使用があり、この様な低い温度でしか使えないということでは、とても使い物にならないということで、より高温で動作する半導体材料が注目されていた。この様な状況で 1955 年に SiC の比較的良好な単結晶が得られたことから、高温で動作する pn 接合型トランジスタが可能であることに注目され、大きい予算が投入されて研究開発が始まった。世界中で 10 年程研究を続けたが、欠陥の少ない結晶成長が容易にできなかった。他方、新しい材料として Si(シリコン)が使えるということになり、Si ではトランジスタが 125 まで耐え、実用化の見通しが立ったことから、高温動作半導体として SiC の研究開発は 1960 年代後半徐々に下火になり、1973 年で実質的に終息することとなった。

松波が SiC を手がけてみようとした時期は、正確には 1968 年ころで、当時助手で博士

論文をまとめに入る時期で、次にどういう研究をやるかという問題を内々考えていたときであり、その時期は SiC から多くの研究者が撤退をしていた時期であった。このような状況の中で、何ゆえ松波は SiC の研究を始めることにしたのであるか。一つは先に行った 族化合物半導体に比べて、小さいが結晶欠陥の少ない単結晶が得られており、またデバイスに必要な p 型化、n 型化が可能であることが知られていたこと。二つ目は、半導体のエネルギー準位間遷移としてのルミネッセンスをもとにする発光が観察されていて、物性評価が確実にできることと、ひいては、当時夢であるとされていた青色発光ダイオードの実用化が期待されたこと。三つ目は研究室の保有する装置を転用して、SiC 単結晶薄膜を形成するための装置の試作が容易であり、この仕事は助手の時代の 1968 年ころから装置を作製する経験を持っていたということであった。そして更に SiC への研究を本格的に推進できたのは、上司の田中教授との SiC 研究計画が科学研究費一般 A として 1970 年承認され、その予算で本命の SiC の液相・気相エピタキシーの研究が実施できる状況になったためである。上述の通り SiC の研究そのものは下火になっていたが、松波は逆に誰もできなかったことをやり遂げることが研究として面白いのであり、SiC で難しいのは欠陥のない結晶成長を成し遂げることであって、高価な設備がなくとも大学でやれるのではないかと考え、よしこれでようやく半導体の本格的な研究ができると、チャレンジングな気持ちで SiC の研究を開始した。

## SiC 研究の開始、青色発光ダイオードの開発成功

1971 年、助教授に昇任した松波は SiC の本格的な研究に乗り出した。松波は研究計画として、比較的成果が短期間で得られるであろうと考えられるものと、要素技術開発が多くて長期間を要するであろうと考えられる二つの方向を同時に進める計画を立案した。一つは比較的短期間で成果が見込めると判断したもので、液相エピタキシー技術を用いることによる、青色発光ダイオードの研究開発であった。もう一つは、長期間を要すると考えたもので、Si 基板上への SiC の気相エピタキシー技術を用いて大面積の SiC 単結晶を作製し、これを用いることによる SiC トランジスタの研究開発で、これは当時世界の誰も成功していないものであった。

松波が SiC の本格的な研究の第一段階として始めたテーマは液相エピタキシー法を用いる青色発光ダイオードの開発であり、鈴木彰、池田、早川らと取り組んだ。松波らはこれまでと異なり、デバイス製作が容易なディップ(浸す)法という液相エピタキシー法を採用した。この方法は、グラファイト製のるつぼを用意し、その中に Si を充填する。これを高周波誘導加熱により約 1600 に加熱し、Si の溶解状態を作っておく。このときグラファイトのるつぼから C が溶け出し、Si 溶液に C が混ざった状態になっている。ここにグラファイト製のホルダーの先に、SiC の種結晶をつけたものを、Si と C の混ざった溶液の中に入れることにより、SiC 種結晶の

上に SiC 膜が成長するのである。松波らはこの装置を試作し、液相エピタキシャル SiC 薄膜を得ることに成功して、青色発光ダイオードを作製した。1976 年に、日本国内であったが、発光ダイオードに関する国際会議ではじめて英語で発表する機会を持った。さらに、青色発光ダイオードを試作するためには p 型および n 型の SiC 薄膜を積層して形成する必要があり、そのため松波らは三槽のるつぼを用意して、それぞれの槽に順次ディップさせる回転ディップ法液相エピタキシャル装置を開発した。青色発光ダイオードの高効率化に成功し、1977 年から 1980 年にかけてその成果を論文で発表した。この成果をベースに企業が、SiC 青色発光ダイオードを 1989 年に製作し、実用化された。SiC の材料は間接遷移型の材料であるため、発光効率は決してよくなく、数%以下の効率でしか光らないものではあったが、当時は赤と緑の発光ダイオードは開発されていたけれども、青色は無かったため、三色を必要とするフルカラーディスプレイの特殊な用途には、限定的に利用されていた。SiC 青色発光ダイオードは、1993 年以降の直接遷移型半導体窒化ガリウムによる高効率青色発光ダイオードが市場に出るまでは、実用されていた。

## SiC 以外の半導体材料研究

松波は自分の研究領域は半導体材料工学であるとし、SiC 研究を主体としつつ、様々な半導体材料を手がけている。具体的には、更家、吉本らとアモルファス Si 半導体、更家らとテルル化カドミウム (CdTe) などの Ⅱ-Ⅵ 族化合物半導体、鈴木彰らと砒化ガリウム (GaAs) などの Ⅲ-Ⅴ 族化合物半導体、そしてランタン添加チタン酸ジルコン酸鉛 (PLZT) 強誘電体材料の研究を行った。松波はこれらの半導体材料の製作技術開発に留まらずデバイス化の研究を行い、ダイオード、トランジスタを開発し、冬木らと太陽電池への応用についても研究を行った。

PLZT 材料の研究については、研究開始の動機は恩師の田中教授が強誘電体材料の研究を長年やって来ていたが、焼結体ではなく薄膜化すればディスプレイやメモリの分野への応用が広がるのではないかと示唆を受け、研究を行った。この研究は 4 種類の異なる原子の酸化物分子を均一に薄膜として形成するというもので、鈴木実、石田らと苦勞を重ね、1976 年に、世界で始めて PLZT 薄膜の試作に成功した。この成果は、近年 Si 半導体メモリの記憶材料として強誘電体材料を用いる、いわゆる FeRAM の先駆けともいべき業績である。

## 米国ノースカロライナ州立大学に招請

SiC 研究の立ち上げと青色発光ダイオードの試作がひと段落ついた 1976 年、松波は研究で親交のあった人を通じて、米国ノースカロライナ州立大学のハウザー (Hauser) 教授から、太陽電池関連材料の研究で招請する旨の国際電話を受け、1 年間客員准教授として太陽電

池関連材料の研究の傍ら米国の教育にも触れることとなった。渡米して数ヶ月経過した時点で、学科長から連絡があり、翌年の1月から「半導体デバイスの物理」(Physics of Semiconductor Devices)という科目の大学院の講義をハウザー教授に代わって行うように指示された。当初はそんなことになるとは全く考えていなかったのであるが、准教授として招聘されたものの義務であるといわれ、覚悟を決めて受けることとした。90分の講義を14週で28回、英語でこなさなくてはならず、講義のための準備に、毎週日曜日はかかりきりにならざるを得ないという大変なタスクであった。講義の途中は無我夢中で行ったが、28回全てを成し終えたとき、よくぞここまでやれたなという一つの大きい完遂感を実感し、この体験が大きい自信となった。

ノースカロライナ州立大学滞在中にその後親交を深めることとなる新しい研究者との出会いがあった。同じ大学で材料工学のデビス(Davis)教授である。デビス教授は松波がSiC青色発光ダイオードの研究やSiCの気相法によるヘテロエピタキシーの研究をしてきたことを知っており、新たにSiC材料のエレクトロニクス応用に関して米国政府の研究費支援を獲得したいので、SiCのエレクトロニクス展望について話してほしいとの依頼を受けた。SiC研究者が世界的にもいまひとつ広がりを持っていない時代であり、仲間が増えることは好都合であると、SiCの可能性について語ったことを記憶している。その後、デビス教授は長期間にわたる研究費支援を受けて、SiCの研究に携わることとなり、研究を通じて長い付き合いとなっている。このデビス教授の下でPh.Dを取得した大学院生4人と出資者1人が、1987年にCree ResearchというSiCのベンチャー会社を起業し、いまやCree Inc.という120人規模の会社となり、SiC業界のトップとなっている。

1年間の米国滞在を終え、帰国に当たって、米国での有数のエレクトロニクス関連の研究所を訪問した。ベル、RCA、IBMの各研究所、コーネル大学、ウエスティングハウス社などであり、ウエスティングハウスではSiC研究で著名なチョイケ(Choyke)教授と意見交換を行うことが出来、以後研究を通じての付き合いが始まった。

## 低温バッファ層開発による、SiC薄膜および反転MOSFETデバイスの成功

松波はSiC研究を始めた時期に、液相エピタキシー法と平行して、長期のテーマとして気相エピタキシー法の技術開発とSiCトランジスタの研究を西野らと開始した。

SiCの研究開発でまず問題となるのがSiC基板や薄膜に存在する結晶欠陥の密度が多くて、実用とするデバイスが得られないことであった。この原因がSiCの結晶成長の際に、結晶多形をいかに制御するかという問題であった。これは、SiCの結晶はその成長条件によって、3C型、2H型、4H型、6H型など多くの結晶構造をとり、それぞれの結晶構造でSiCの欠陥の

密度や電気特性も異なるという問題があって、この結晶多形を制御することが第一の関門であった。

まずは欠陥の少ない SiC 薄膜を得ることであった。当時 Si の単結晶基板は直径が 10cm 程度の大きいものが容易に得られるようになっていたので、Si 基板上に SiC を気相エピタキシー法で形成する、いわゆるヘテロエピタキシーに挑戦した。ところが Si 結晶の原子間の間隔である格子定数と、SiC 結晶の格子定数は 20% 程度の差があるため、Si の並んでいる表面に、SiC を並べても、整然と並ぶことが出来なくて、均一な薄膜は得られないという結果になった。ここで松波らはこの問題を解決するために色々試行錯誤を重ね、全く新しい巧妙な方法を考え付いた。それは Si 表面に SiC を直接堆積させるのではなく、その中間層となるべき緩和層(バッファ層)を堆積させることにより、Si 基板上に結晶性の良い SiC 薄膜を得ようとするものであった。具体的には本来の SiC を堆積させる温度より 100 ほど低い温度で、C の原料となるプロパンガスを流すことにより、Si 基板上に薄い非晶質状の SiC 中間層を堆積させることにより、Si 基板の活性状態を緩和させ、その上に本来形成したい SiC をヘテロエピタキシャルに成長させた。この低温バッファ層の形成により、1984 年頃、松波らは直径 2 インチ(5cm)の Si 基板上に、20 ミクロン厚さの均一な 3C 型 SiC 薄膜を得ることに成功した。そして 1986 年に、松波は芝原らとこの方法による薄膜形成で SiC 反転形 MOSFET (金属/酸化物/半導体 電界効果トランジスタ)を試作し、その特性の確認に世界で初めて成功した。これらの成果は米国 NASA の関心を引き、改めてこの研究を取り上げたほか、その後 15 年以上経過して、パデュー大学でトランジスタ性能の向上が図られてきている。

この SiC 薄膜製造技術は、その後企業で実用化に向けて改良がなされ、2006 年の時点で、直径 4 インチで、200 ミクロン厚さの黄色透明な 3C 型 SiC (基板として用いた Si は除去している)が試作され、直径 6 インチのものも技術的には可能となっており、実用化が近くなっている。

この研究開発の中で松波らが考案した特筆すべき研究成果として低温バッファ層の技術開発が挙げられる。これは均一な SiC 薄膜を、原子間隔の 20% 程度も異なる Si 基板上に形成する方法の開発であり、松波らは低温バッファ層の構想を考え付き、その具体的な方法を実現したことにより、世界で初めて均一な 3C 型 SiC 薄膜が得られたものであった。そしてこの考え方は、後年、窒化ガリウム青色発光ダイオードの研究・開発において、サファイア基板上に格子定数の大きく異なる窒化ガリウムの均一な薄膜を形成する際に、この類似の考え方の低温バッファ層の発明により、一気に研究開発が進展したということがあり、松波らのこの低温バッファ層の開発は極めて先駆的な開発であった。

この低温バッファ層やその他の技術開発について、松波は特許などの発明の申請は行っていない。その理由は、当時の京都大学では、国立大学の研究成果は原則としてすべて公

開すべきであるという考えがあった。もちろん、特定の企業などが関心を持った場合には、共同出願という方策もあったが、SiCの研究開発は当時企業の関心が薄く、特許出願を行うためには、研究者個人での出願をせざるを得ないということになり、また、早期の成果発表を要求される博士課程学生を多く抱える研究室の研究活動そのものに影響をきたすと判断し、松波は研究成果の特許出願はしないという原則を維持した。

## SiC 研究に本格的に挑戦

1977年、米国滞在から京都大学に戻った松波はSiCを含む様々な半導体材料の電子デバイスへの可能性の研究を本格的に進めることとなった。松波は自分の研究の中心はSiCトランジスタをなんとしても開発することであると決めており、そのためには気相法による良質のSiCエピタキシャル膜の製法を確立することであると考膨大なエネルギーを注入することとなった。SiC気相成長薄膜を得るためには、1500以上の電気炉が必要であり、研究室で設計、製作した。SiC薄膜を形成するための基板としては、高温炉の炉心材料であるとか研磨剤用途として合成されたものの中から、比較的結晶の大きい塊を入手し、微粉末が眼に入るのを防ぐため水中眼鏡をかけて、鑿と金槌でSiC単結晶片をとりだすという原始的な方法しかなかったため、SiC薄膜を得る実験のためにはSiC関連テーマの研究員全員がこの作業を行った。この様にして得られたSiC基板を手作りの高温電気炉に入れ、SiCの原料となるシラン(SiH<sub>4</sub>)、プロパン(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)ガスを、n型用の窒素、あるいはp型用のTMA(トリメチルアルミニウム)不純物とともに電気炉に送り込むことによって、n型あるいはp型のSiC薄膜が得られるものであった。

上述のように、バッファ層を介してSi基板上に3C型を再現性よく成長させることに成功し、3C型薄膜の電気特性や光学特性を測定して、その結果から得られる結論を論文にするという点では、この様な薄膜でも問題はなかった。しかし、pn接合の特性が理想からは大きく外れ、試作したMOSFETに漏洩電流が見られるなど、結晶性が悪く、電子デバイスとしての実用化という点では利用価値が低い。松波は、西野らと、薄膜の形成条件を様々に変えてみることから、得られた薄膜の電子顕微鏡観察など、あらゆる手立てを尽くして高品質化を検討し、10年という気が遠くなる研究を続けていた。1985年頃になっても、この問題解決の手立てはまだ見つかっておらず、この解決は無理かなと松波は思い始めていた。

原因は、Siと3C型SiCの格子定数が20%程度違うために、成長界面での格子の不整合が成長層の3C型の結晶性を悪くしているところにあると推測した。松波は、青色発光ダイオードに用いた6H型基板の活用を思いついた。研磨剤用SiC塊から取り出した基板は小さいながらも、結晶の自然面をもっている。結晶多形は違うものの、6H型と3C型のa軸の格子定数はほぼ等しいので、格子不整合がなく、良質の3C型が成長すると想像していた。六方晶系の

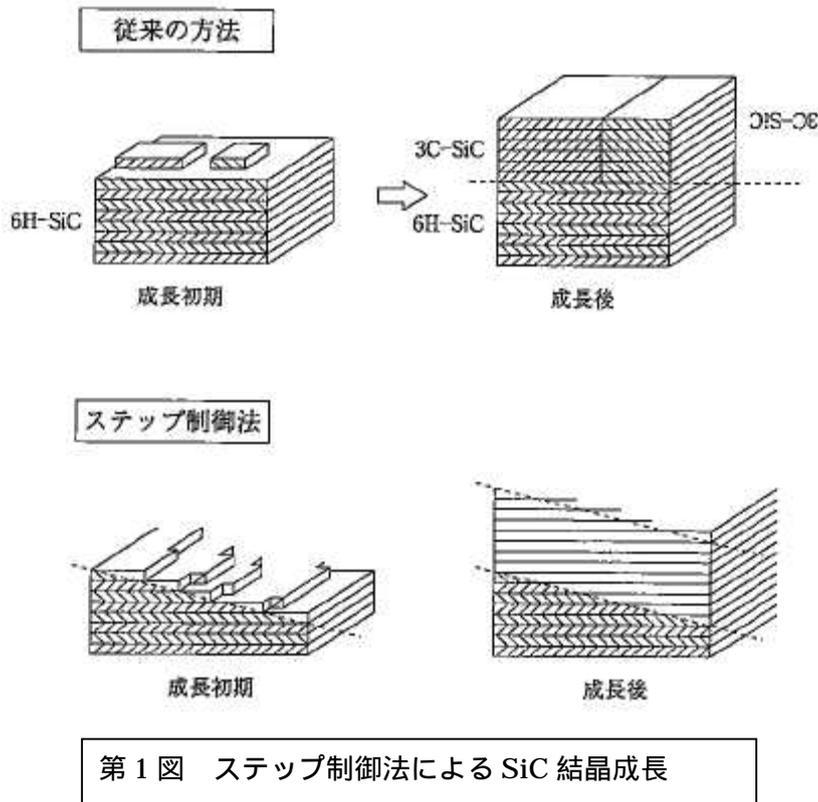
(0001)面を選び、c 軸が平面に垂直になっている状態が、エピタキシャルに薄膜を形成するのに良いとされており、松波もこの方法を採用した。実際に薄膜として形成されるものは 3C 型ではあったが、通常の 3C 型と裏返しの状態の 3C 型が島状に出来るという、いわゆる双晶状態となり、この問題に長年悩まされることとなった。

## ステップ制御エピタキシー技術開発成功

1986 年、研究室のある学生のひとつの間違った実験で、一気に解決されることとなった。SiC 薄膜の研究をやるためには、先に述べたように SiC 基板を原石からとり出し、表面を(0001)面が正確に出るよう表面を研磨加工する必要がある。SiC は極めて硬い素材であり、その研磨加工は実に手間のかかる手作業であった。ある学生とは当時修士課程 2 年の黒田尚孝と言う学生(現在 NEC、システムデバイスリサーチラボラトリーズ)であったが、彼も濃緑色のゴツゴツした SiC の塊から、手間のかかる手作業で何とか(0001)面の SiC 基板を作製し、決められた方法で SiC 薄膜を形成した。そして装置から取り出してみると、いつもと様子が全く違うのである。通常は、3C 型は表側と裏側の二つのものが島状に形成されるために、モザイク状になっているのに、このときは、SiC 基板の上に何も形成されていないかのように SiC 基板表面が透けて見える状態であった。黒田はその結果がどのような状態であるかが判断できず、薄膜を形成するために送り込む原料ガスが流れていなかったのではないかと思っただが、確認してみると原料ガスは間違いなく供給されていることを確認し、おそろおそろ松波の前にこのサンプルを届けた。松波もこのサンプルを一目みて、何か変だな、薄膜はついていないのではないかと思っただが、確認のために顕微鏡で観察してみると、確かに薄膜が形成されているということが確認された。それではということで、ルミネッセンス特性を測定してみると、期待に反して 6H 型 SiC 薄膜が均一に形成されていることが確認された。そして電子線結晶解析の結果、これまで 1500 程度では均一に薄膜が形成できなかった高温安定の 6H 型であることが確認されたのであった。

何故この SiC 基板で透明で、均一な 6H 型 SiC が形成されたのであろうかということが大問題となった。事実は意外なことであることが判明した。それは黒田が基板の裏面を研磨し、厚さの均一な基板を用意したつもりであったが、極めて硬い SiC の裏面研磨を行うにあたって、僅か数度であったが傾いていた。さらにこのときの実験においては、SiC 基板の表側の面に薄膜を形成すべきであったところが、間違っただ結晶表面が数度傾いている状態の基板裏面をセットし、その上に SiC 薄膜を形成したことが判明した。そしてまさにそのことが、すなわち結晶表面が(0001)面から数度ずれていることが、均一な 6H 型の SiC が形成される決定的なポイントであるということが判明したのである。松波は黒田を中心として研究室のメンバーをあげてこの問題の解明に全力をかけた。黒田は 2003 年、松波教授の退官に寄せての一文で、

当時のオフ基板のこの効果につき、再現性を含めて、その効果が疑いないことを確認し、松波のもとに報告に行ったときに、松波から「やったな！」と背中を強く叩かれたことを昨日のように思い出されると記している。



第 1 図 ステップ制御法による SiC 結晶成長

SiC 基板の表面を(0001)軸に対して数度傾けることが、何故均一な SiC 薄膜を形成することが出来るのかということについて、第1図を用いて説明する。従来の方法では、結晶面は正確に(0001)面が出ており、表面からのみ基板の積層順の情報を得て成長するので、表面のあちらこちらに低温安定の 3C 型の結晶が、表となったり裏となったり成長する。今回の新しい方法では、結晶表面が(0001)面より数度傾いていることにより、その表面には基板の 6H 型結晶のステップと呼ばれる段差が出来ており、ステップ部では横方向と基板表面からの結合に関する情報が与えられるので、基板と同じ積層順を引き継ぐ。

このステップの部分から結晶が成長しやすいことは他の結晶でも知られており、SiC の場合において表面に意識的にステップを作っておくことにより、結晶はそのステップ部分から次々と成長することが確認されたものである。その意味をこめて松波はこの方法をステップ制御エピタキシー(Step-controlled Epitaxy) と命名した。1987 年、東京で開催された第 19 回固体デバイスと材料国際会議 SSDM(19th Int. Conf. on Solid State Devices and Materials) で発表した論文は、大反響を呼んだ。以後、SiC 結晶成長技術として欠くことのできない必須の核心技

術の創出であった。その後、木本らとともに、ステップ制御エピタキシーの成長機構、ステップ動力学、不純物制御など、基礎面と実用面を考慮した奥深い研究を発展させ、世界へ向けて SiC 高品質エピタキシャル成長に関する情報を発信し続けることになった。米国のチョイケ教授、ドイツ・エルランゲン大学のペンスル(Pensl)博士らとの共同研究も多い。結晶多形の制御可能なエピタキシャル成長技術が開発されたことにより、この後、成長層の土台となる SiC 基板結晶の開発が一気に進むことになった。この面では米国の Cree の寄与が大きい。

2005 年、SSDM は 1987 年に発表された「ステップ制御 VPE 法による低温での SiC 単結晶成長」に対し、発表者の黒田、松波他 3 名(芝原、兪、西野)を SSDM2005 Award として表彰し、その業績を称えた。この賞は、過去の SSDM 会議で発表された論文で世界的に評価の高いものが 1 年に 1 件だけ表彰されるものである。

## SiC ショットキーバリアダイオード

ステップ制御エピタキシー法により高品質の SiC 薄膜を形成することが出来るようになった松波は本来の電子デバイスの開発によく取り掛かることが出来るようになった。これまでの Si の上に形成した SiC 薄膜でダイオードを試作すると 5V くらいで逆方向の絶縁破壊を示して駄目になってしまったものが、ステップ制御エピタキシー法で試作したものでは、一気に 100V まで向上することを 1987 年の時点で確認していたが、次々と性能の優れた電子デバイスを開発した。

松波は、木本らと、1993 年に SiC の厚さが 10 ミクロン程度で、耐圧が Si の数倍を越える、1100V に耐える、ショットキーバリアダイオードの試作に成功した。次いで、4H 型の SiC 薄膜の形成に成功し、1995 年、木本、伊藤らと共に、SiC の厚さが 13 ミクロンで耐圧が 1750V のショットキーバリアダイオードの試作に成功した。この耐圧のデバイスは Si では導通時に大きな損失となるが、SiC を用いると 2 桁半も低損失のパワーデバイスとなるので大いに注目されている。このデバイスは 2001 年ドイツの企業により製品化、市販されるにいたり、SiC パワー半導体として実用化が始まっている。

## SiC MOS-FET

SiC パワーダイオードの研究に目処をつけた松波は、トランジスタの研究に着手した。MOS-FET(金属/酸化物/半導体 電界効果型トランジスタ)の基本動作部分は npn または pnp 構造をしており、両端に電圧をかけても逆方向のダイオードが向かい合っている形になっていて、通常は電流が流れない。この npn 層の真ん中の p 型半導体層の上部に酸化物を介して金属ゲートが設けられており、このゲート電極に負の電圧をかけると p 型半導体が n 型に電氣的に変動し、その結果 npn は nnn となり、両端に電圧をかけると、電流が流れて、いわゆ

るトランジスタスイッチングが可能となる。松波は矢野、木本らと SiC を用いたトランジスタの開発を目指したが、これまでの研究結果では、ゲート電圧を加えて、p型からn型に変わった部分、つまり、チャンネル部分の抵抗が大きく、このために本来の SiC パワートランジスタの実現は困難な状況にあった。

ここで松波は、本人の言葉を借りると、一寸へそ曲がりな工夫を凝らしたという表現をしているが、Si 半導体の実態をよく理解した上で、原理原則に則った基本的なトライアルを行った。Si 半導体では MOS トランジスタには Si 結晶の(100)面が広く用いられてきており、Si 結晶の(111)面では電流は大幅に流れにくいということが知られていた。ところがこれまで SiC の研究では SiC の(0001)面が広く利用されてきていたが、Si 結晶に対照させると SiC の(0001)面というのは Si の(111)面に相当する。松波は、それならば Si 結晶の(110)面に対照される SiC の(11-20)面上に SiC の薄膜を形成するとチャンネル抵抗は小さくなるはずであると考え、この考えに基づき、SiC(11-20)面の結晶を切り出し、薄膜を成長させ、MOS-FET を試作した。結果は予想通りで、チャンネル抵抗は、驚くことに 1/20 に減少した。それならば Si 結晶の(100)面に相当する SiC はというと、これがかなり異常な面となり、4H-SiC では(03-38)面に相当し、その結晶面を切り出して、MOS-FET を試作し、予想通りの好結果が得られた。このあたりの研究では、松波は半導体理論の原理原則を認識して、論理的に進めてゆくことにより新しいデバイスの成果が次々に出てくることを実感した。他方、この成果が出てくる重要な要因として、松波らが自ら開発した高品質の SiC エピタキシャル成膜装置を有しており、これに先立つ 10 年以上前に、ステップ制御エピタキシー法の創出がなければ、このような成果が出てこないことを実感した。松波は、世界に先駆けて大きな成果を生むことができたのは、グループが保有する結晶成長装置で希望の結晶面方位に高品質のエピタキシャル成長できる優越的立場にあったと、材料開発の先陣を競うときの必須要件であると述懐している。

## SiC ワールドの発展

松波らが創出したステップ制御エピタキシー法により、それまで制御できなかった SiC 薄膜が均一に成膜できるようになったことにより、企業各社が SiC パワー半導体に進出してきた。SiC ウエファでは米国の Cree 社がトップを走っているが、日本国内で追隨する企業があり、4 インチのウエファの試作にも成功している。SiC のエピタキシャル成膜についても米国の Cree 社、スエーデンの Acreo 社がビジネスを展開しているが、これらは日本国内ではないので、松波は日本国内においてオールジャパンの国内エピ拠点の必要性に賛同している。

また SiC パワー半導体について、ショットキーバリアダイオードが市販され、MOS-FET の試作が進んでいる中で、松波はあともう少し技術の進展がなされれば、SiC パワー半導体の世界は一挙に花が咲くものと考えている。各種の電気・電子装置、家電製品、産業用機器、非

常用電源、列車、高電圧直流送電など、パワーエレクトロニクスの応用分野はたいへん広い。これらの分野に、SiC を用いた小型・低損失・簡易冷却の半導体パワーデバイスが使われれば、電気エネルギーの有効利用が著しく期待できる。現有の発送配電システムにおいても十分の電力余剰が生まれ、それだけで新規産業創成が可能となる(高効率半導体パワーデバイスが実現すれば、それによるエネルギーの有効利用分は国内において数百万 kW に達するとの試算もある)。新規発電所の開発がなくなれば、それに伴って、環境への負荷が小さくなることは言うまでもない。

自動車のスタイルが大いに変わるであろう。石油埋蔵量、ならびに環境への負荷低減の課題からモータ駆動が注目され、エンジンとモータ共用などはすでに実用の域に入った。限られた場所、高温部の存在、電池の長時間利用などを考えると、この分野でのパワー半導体には大きな変革が望まれている。SiC デバイスを中核とする新しいパワーエレクトロニクスはまさにこの分野に最適である。

以上のように SiC デバイスはこれまでの Si デバイスでは実現することのできなかった高温、高電力の様々な分野に限りなく広がってゆく可能性を秘めており、その波及効果は Si デバイスに劣らない広がりを持ち、超波及デバイスといっても過言ではない。

その実現のためには、松波は一つの提案をしている。それはこれまでの SiC の開発には国の研究プロジェクトの支援が大きかったが、SiC 基板の開発、次にエピタキシャル薄膜技術開発、次にパワーデバイス開発という形の、いわゆるリニアモデルでの開発であった。しかしながら、要素開発がそれぞれの段階でそれなりのレベルに達した現在では、リニアモデルではなく、具体的な商品を実現するために、設計、試作、評価のサイクルの中で問題となった事項について、基礎研究に戻って平行して研究開発を行う、いわゆるモード 2 的な研究開発体制の構築が不可欠であると、松波は提言している。

これほどまでに SiC に執着した理由について松波は次のように語っている。師の田中教授が、日本において、「チタバリの田中」と言われる名前に相応しい研究・開発をされた。師のレベルに到達するために、一つの材料にこだわって、できれば、国際的に評価されたいとの気持ちはあった。材料・プロセス・デバイス提示と、一段ずつ積み上げた。それぞれのステップで必要な装置、機器の取得にたいへんな苦労をしたが、大学においてこのような垂直統合型の研究・開発をやり、SiC が半導体材料として市民権を持つところまでに来た。今、松波は「Mr. SiC」という表現で呼ばれることがあり、1993 年から長年付き合いしてきたドイツの SiCED のリーダー Stephani から 2004 年に、「my mentor だ」と言われたときは、たいへん嬉しかったと述懐している。

デバイス提示まで進めることができた根元には、卒業研究における「Ge 電界効果トランジスタ」の成功経験がある。半導体材料の結晶成長に成功しただけでは、その材料が使われると

いう保証はない。材料からデバイスまでの道のりを提示することによって、はじめて社会に認められることを示したものと言える。

2004年に、応用物理学会から「研究業績賞」を授与されたとき、榊会長からの紹介に、「ほとんど皆が絶望的とも思っていた半導体材料 SiC に一生をかけて取り組み、結晶成長から、プロセス、デバイスの研究に寄与した...」という言葉を買った松波は、「絶望的と思ったら挑戦はしなかった...」とつぶやいていた。

松波は40年を越える教育、研究生活を通して、へそまがりというか他人がやっていないことに注目してきた。そこには誰もやっていない未知の解明すべき困難な問題が横たわっていた。松波はこれらの問題を、幹、枝、葉は何であるかを常に問い続け、困難であっても問題の本質を解き続ける努力を行ってきた。そして多くの徒労ともいえる実験の集積の中から、幾多の独創的なブレイクスルーに到達したのである。松波の尊敬する先人の言葉として、次の二人の言葉をあげている。一人はエジソンの言葉で、「天才とは 99%の努力と、1%のひらめきからなっている」であり、もう一人はトランジスタ発明のショックレーの言葉で「幸運は心で待ち受けている場合にだけ恵まれる」である。松波は自らの研究活動を振り返り、基本的な考えとして、似たような経験をしてきたと、これまで研究を続けてきたことに喜びと満足な気持ちで満たされているとしている。これら先人の言葉を常に頭に置きながら、この方向で今後も若い世代の人々を指導してゆきたいと考えている。

松波は 2003 年京都大学を定年退官し、現在、独立行政法人 科学技術振興機構 研究成果活用プラザ京都館長として、SiC の開発状況の指導のみならず、大学等の新しい研究成果の社会への橋渡しという重要な課題に日夜精励している。

## 略歴

1939年 大阪府生まれ

1964年 京都大学工学研究科電子工学専攻修士課程修了

1964年～71年 京都大学工学部助手

1970年 京都大学工学博士

1971年～83年 京都大学工学部助教授

1976年～77年 米国ノースカロライナ州立大学 客員准教授

1983年 京都大学工学部教授

1996年～2003年 京都大学工学研究科教授

1998年 日本結晶成長学会論文賞

- 2001年 電子情報通信学会フェロー、第1回山崎貞一賞(半導体及び半導体装置分野)  
材料科学技術振興財団
- 2002年 文部科学大臣賞(研究功績賞)
- 2003年 京都大学名誉教授、米国電気電子学会(IEEE)フェロー
- 2003年～ 独立行政法人 科学技術振興機構 研究成果活用プラザ京都館長
- 2004年 応用物理学会 研究業績賞、電子情報通信学会 業績賞
- 2005年 SSDM 2005 Award
- 2006年 応用物理学会 解説論文賞