

ダイヤモンド半導体の社会実装へ向けて

早稲田大学 基幹理工学部 電子物理システム学科 教授 川原田 洋

1. ダイヤモンド・ウェーハ

Lab grown diamondをご存じでしょうか。主にメタンガスをプラズマで分解し、CVD（化学気相堆積）合成されたダイヤモンドのことです。これが宝石市場の1/3ぐらいを占めるようになってきました。品質は天然ダイヤモンドより良いものも作れます。天然ダイヤ採掘には過酷労働や自然環境破壊が伴いますが、それのないLab grown diamondが欧米ではむしろ好まれます。主な生産国はインドで、ダイヤモンドCVD装置を1社で数百台以上稼働させる企業が何社もあります。CVD装置の数で言えば半導体産業なみです。ところで作り過ぎると、宝飾用途の値段が下がるため、生産調整が行われているようです。装置の稼働率を下げないために他の応用を考えているようで、それが次世代パワー半導体として期待されるダイヤモンドのウェーハ作製です。φ3-4インチがCVD装置で可能ですので、インド産ウェーハに期待しています。ちなみに当研究室にも半導体デバイスプロセス用にφ1-2インチ用ですが、ダイヤモンドCVD装置が5台あります。

2. ダイヤモンド集積デバイス

不純物ドーピングでp型やn型半導体を作りますが、シリコンと同じ結晶構造ですので、p型には3族のホウ素をアクセプター、n型には5族の窒素、リンをドナーとします。特にホウ素はダイヤモンド中に高密度で導入でき、早大開発のCVD装置では原子密度で5%以上入り、高密度の正孔で低抵抗となり、超伝導体にもなります。この層を電界効果トランジスタ（FET）のソースとドレインに利用し、高電流密度を得ています。FET動作には早大開発の水素終端（C-H）表面をチャンネル利用してきました。最近、Hに代わりSiを結合させる新たな金属酸化物

半導体（MOS）界面を開発し、これにより電流密度を犠牲にしないでパワー半導体に不可欠なノーマリーオフ化を達成しています。これには材料技術研究所（材研）にある分子線堆積装置が重要な役割を担っています。さらに、従来の横型FETでなく、パワー半導体向けの縦型FETもダイア

モンドでは世界で初めて開発しました。この縦型FET構造開発には材研の断面TEM観察技術が非常に有効で、界面の2-3層のSiの観察やトレンチ構造の結晶性評価が可能でした。おかげで、実電流で数Aの素子を完成することが出来ました。

3. スタートアップ

ダイヤモンド半導体を社会実装するためには、さらなるニーズの取り込みや信頼性の問題をクリアしなければなりません。そこで早稲田大学ベンチャーズ（WUV）の支援を受けpower diamond systemsというスタートアップを2022年8月に設立し、現在活動中です。





早稲田大学 理工学術院教授

平田秋彦

Akibiko Hirata

■profile■

1998年早稲田大学理工学部材料工学科卒業、2003年同大学理工学研究科材料工学専攻博士後期課程修了博士(工学)、2003年大阪大学産業科学研究所助手、2007年同研究所助教、2008年大阪府立大学工学部非常勤研究員、2009年東北大学原子分子材料科学高等研究機構助教、2012年同大学材料科学高等研究所准教授、2018年早稲田大学理工学術院基幹理工学研究科教授。2018年産総研-東北大 数理先端材料モデリングOIL 客員研究員、2021年物質・材料研究機構 先端材料解析研究拠点 客員研究者

数学的に解析することで 無秩序な原子配列に秩序を見出していく

アモルファス材料の本質を探求する平田秋彦研究室。同じく材料を2分する結晶と比べて、学問がほとんど成立していないアモルファスについて、基礎的・体系的に解き明かしていく。その手法と鍵とは。

3つのアプローチにより、アモルファスを追究

——平田先生の研究をごく簡単に説明してください。

非晶質物質、いわゆるアモルファス材料について、結晶学的観点から研究しています。材料を原子配列で見ると、結晶とアモルファスの2つに大別できます。結晶は、原子どうしのユニットが規則正しくつながっている構造をしており、一方、ガラスに代表されるアモルファスは原子がデタラメに並んでいるように見えます。この、一見無秩序に見える原子配列に、秩序を見出していくことが研究の大きな目的です。

結晶については、17世紀頃から研究が進められて結晶学として確立され、やがて固体物理学などに発展していきました。しかし、アモルファスは1950年代初めに本格的な研究が始まったところで、学問体系のようなものがなく、多くのことがわかっていません。

液体が冷えていって固化するとき、非常に長い時間がかかれば結晶化する場合がありますが、それ以外は、原子が自由に動き回っている液体がそのまま固まったような状態、すなわちアモルファスになります。これをガラス転移といいます。そもそも、なぜガラス転移が起きるのかも、物理学の未解決問題の1つなのです。

——同じ物質でも結晶とアモルファスとでは、物性が違ってくるのでしょうか。

結晶でなくアモルファスであるがゆえに、電気や熱の伝導、強度などの物性が大きく変化することがあります。たとえば、DVDなどの書換型光ディスクの記録層には同じ物質(Ge-Sb-Te)の結晶相とアモルファス相があり、2つの光学特性の違いを利用してデータの記録・読み込みを行っています。また、アモルファスSiO₂はリチウムイオン電池の負極材として期待されています。

ほかにも、いろいろな物性の可能性があると考えられますが、上述のように、アモルファスの研究は結晶と比べて歴史が浅く、結晶での出発地点である原子配列に関しても未だ不明な点が多く残されていますので、我々の研究室では、応用というよりも原子配列に関係した基礎的な部分から固めていきたいと考えています。

——どのように研究を進めているのでしょうか。

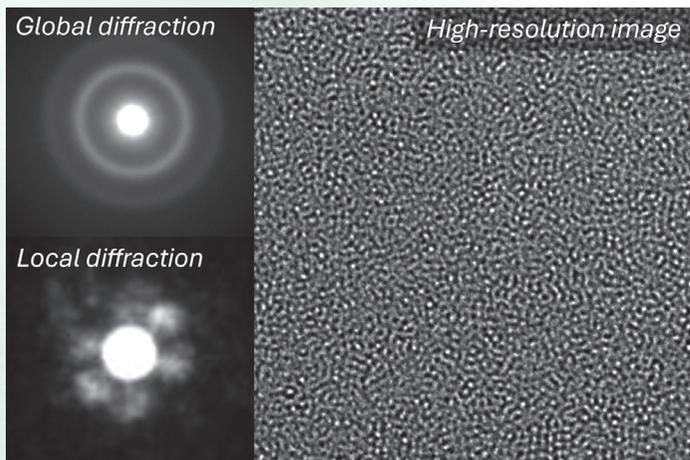
結晶であれば周期性があるため、X線回折で測定したり、電子顕微鏡で観察したりするといった実験を行うことで、ある程度は原子配列がわかります。そのため、そこから先、たとえば、物性との関係も掴みやすくなります。しかし、アモルファスは観測実験にも工夫が必要で、さらには計算機による検討も重要になってきます。

すなわち、上記のような従来方法の延長である①先端計測(電子回折や高分解能像観察などのナノ計測)に加え、②計算機シミュレーション(分子動力学法、逆モンテカルロ法など)、③数理解析(計算ホモロジー解析、ポロノイ多面体解析など)の3つのアプローチにより、研究を進めています。

研究室のどんな活動も将来必ず生かされる

——平田先生の経歴を見ると、当学で博士号取得後、大阪大学に助手・助教として7年、東北大学に、助教・准教授として12年務められています。

大阪大学ではアモルファスを電子顕微鏡で観察している先生がいらして、そこで実験のテクニックやシミュレーションを学びました。東北大学はアモルファス材料で世界的な研究をしている大学です。私が数理解析を始めたのも、東北大学での経験に因ります。そこでは、数学と材料科学の連携という方針があって、数学者と共同研究していました。従来の方では、うまくアモルファスの構造を記述できないとの実感から、何か新しい手が



アモルファス相変化記録材料の（左）電子回折図形および（右）高分解能像。

かりが欲しかったのです。

こうして、東北大学時代に金属ガラス ($Zr_{80}Pt_{20}$) の局所構造を直接観察することに成功しました。かねてより、局所的に20面体構造を取ることが理論として予測されていましたが、オングストロームビーム電子線解析法という手法により、正20面体と面心立方構造の中間的な構造、いわば「歪んだ20面体」をしていることが観察できました。さらにこれを、数学者と共同で計算トポロジーを用いて原子の3次元的なつながりを解析し

たところ、物質全体でそれぞれの20面体がトポロジー的に同じような歪み方をしていることがわかりました。つまり、ガラス中の20面体というのは正20面体とは全く異なる形で強いトポロジー的秩序を持っていたわけです。

——その後、2018年に教授として早稲田大学に戻ってこられました。

やはり母校ですから、戻る機会があるなら戻りたいという気持ちがありました。戻ってからは、恩師である小山泰正先生にもサポートして頂き、小山・平田研究室として研究室を共同で運営させて頂きました。2023年に小山先生が定年退職されて、改めて単独の平田研究室としてスタートしました。

——平田研究室の特徴はどんなところでしょうか。また、学生にはどんな点を指導しているのでしょうか。

他の材料科学の研究室よりも、計算機シミュレーションが多いかもしれません。実験を増やそうとも思っているのですが、しばらくコロナ禍で実験がスムーズにできなかったことに加え、アモルファス構造の実験は結晶に比べて難しいので、現在、模索しているところですが、今年度からは、アモルファス構造の像観察や像シミュレーションのテーマを増やしています。また、たとえシミュレーションのみを行う学生に対しても、常に実験結果との対応を意識するよう指導し、実験の大切さを伝えるようにしています。

私から学生に対しては、まずは学会発表、できればプロシーディングスや論文の執筆を行うことを奨励しています。漫然と研究を行うのではなく、これらの目標を定め、研究の中で論理的に考えて1つのストーリーを組み立てる、それに対して必要なデータや証拠を集める、という一連の行動が極めて重要となると考え

ます。また、発表するに際して、人に伝えることが如何に難しいかを体感してもらいたいと思っています。したがって、たとえ就職が決まっていってその仕事内容と関係の薄い活動だったとしても、何かしらの意義があり、研究活動を経て得た力は必ず生きてくるのです。

研究室の活動としては、月に1回、私との1対1の報告会を開いています。ほか、参加者が順に研究に関係した論文を発表する輪講も行っており、学生には質問することを課しています。他人の発表を聞いて内容を把握し、質問することも大事だからです。ただ、基本的には学生の自主性に任せており、学生も互いにサポートしあいながら発表する場を定期的に設けているようです。

——平田先生ご自身はどんな学生だったのでしょうか。

大学に入った頃は、企業に入ってエンジニアになろうとも考えていましたが、3年あたりからドクターを目指すようになり、なかでも基礎的な研究をしたいとの考えから小山研究室に入りました。しがたって、就職活動は一切していません。

今、当研究室ではドクターに進むことを決めた人、検討している人も出てきました。ドクターへ進学するのも、就職して働くのも、それぞれに大変な道であるとは思いますが、特に、ドクターに進む人には研究に一生を捧げるような気持ちを持ってほしいと思います。

情報を捨てよ、物の見方を変えよ

——これからどんな方向で研究を進めたいと考えているのでしょうか。

アモルファスの構造の特徴を記述する方法を明らかにしたり、アモルファスになりやすいかどうか、アモルファスの物性や特性、それらの関係をトポロジー的に解き明かせればと考えています。ここ数十年やっているトポロジーが解明の1つの鍵になると思っていて、今年からトポロジーに関係した講義を始めました。数学というのは、見方を変えれば、外形は違っていても中の関係性が同じだとか、そういうことを教えてくれます。

トポロジーでは物の見方が違います。結晶では、原子の座標とか原子間の距離や角度が厳密にわかっている、同じ形を再現できますが、アモルファスではそのようなユークリッド幾何学的な見方では、有用な情報は得られません。

言い換えれば、様々な情報を捨てるということが大切で、その上で、共通する本質的な特徴を捉えていく。それが、無秩序と言われているアモルファスに秩序を見つける道筋ではないかと考えています。

翻って、先ほどの学生に伝えたいこととして、別の見方を学ぶことは、学問以外でも生きてくると思います。

【研究員】

一般社団法人産業環境管理協会 令和4年度リサイクル技術開発多賞（第27回） 所 千晴（教授）
 韓国原子力学会 優秀査読賞（Certificate of Excellence in Reviewing） 大木 義路（特任研究教授）
 Wiley Top Cited Article（IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering）
 大木 義路（特任研究教授）

【学生】

環境資源工学会 優秀ポスター賞 福田 賢人（山口研究室・M2）
 日本セラミックス協会 2022 年年会 優秀ポスター発表賞 最優秀賞 川久保 優香（下嶋研究室・M1）
 Acta Journals 2022 Acta Student Award 田畑 千尋（鈴木研究室・D1）
 日本液晶学会 若葉賞 嶋田 裕大（多辺研究室・M2）
 日本ゾルゲル学会 第20回討論会 ベストポスター賞 川久保 優香（下嶋研究室・M1）
 一般社団法人ターボ機械協会 若手優秀講演賞 中嶋 和志（宮川研究室・M2）
 日本金属学会 2022 年秋期講演大会 優秀ポスター賞 緑川 壱丸（山本研究室・M2）
 一般社団法人日本機械学会 2022 年度日本機械学会女性未来賞 田畑 千尋（鈴木研究室・D1）
 日本セラミックス協会 第35回秋季シンポジウム 最優秀プレゼンテーション賞 服部 哲也（下嶋研究室・M2）
 日本セラミックス協会 第35回秋季シンポジウム 学生優秀講演賞 菊地 弥温（下嶋研究室・M1）
 IEEE International Ultrasonics Symposium Best Student Paper Award Winner（Physical Acoustic） 工藤 慎也（柳谷研究室・M2）
 2022 IEEE MTT-S International Conference on Microwave Acoustics and Mechanics（IC-MAM） 2nd Place Student Paper Award 石井 直輝（柳谷研究室・M1）
 日本マイクログラフィティ応用学会 第34回学術講演会（JASMAC-34） 奨励賞 馬淵 勇司（鈴木研究室・M1）
 日本マイクログラフィティ応用学会 第34回学術講演会（JASMAC-34） 敢闘賞 山中 亜里紗（鈴木研究室・M1）
 日本マイクログラフィティ応用学会 第34回学術講演会（JASMAC-34） 奨励賞 片岡 美波（鈴木研究室・M1）
 日本マイクログラフィティ応用学会 第34回学術講演会（JASMAC-34） 優秀賞 花田 知優（鈴木研究室・M1）
 日本マイクログラフィティ応用学会 2022 年度 若手奨励賞 折笠 勇（鈴木研究室・D3）
 8th DGIST-WASEDA Workshop on Electrochemistry 2022 Best Poster Presentation Award 小宮 歩睦（本間研究室・LD1）
 日本機械学会 若手優秀講演フェロー賞 永田 駿介（宮川研究室・M2）

※表題年度の受賞者を掲載しておりますが、一部その前年度の受賞者を含む場合があります。
 ※受賞者の情報は、表題年度の情報で記載しております。（一部除く）

【学生】

8th DGIST-WASEDA Workshop Best Poster Presentation Award 宮崎 馨流（門間研究室・M2）
 応用物理学会 第53回（2022年秋季）応用物理学会講演奨励賞 成田 憲人（川原田研究室・B4）
 第29回ゼオライト夏の学校 高石哲男記念賞（優秀ポスター賞） 岡 大智（下嶋研究室・B4）
 EARTH 2022 BEST POSTER AWARD 村田 敬（山口研究室・D3）
 6th International Symposium on Frontiers in Materials Science Best Posters Silver Award 緑川 壱丸（山本研究室・M2）
 2022 MRS Fall Meeting & Exhibit Best Student Poster Award 上田 真由（川原田研究室・M1）
 一般社団法人日本機械学会 第20回流れの夢コンテスト 最優秀賞 玉田 洋一朗、大場 直哉、久山 晃平、吉田 将太、峯 祐樹（宮川研究室・B4）
 日本ゼオライト学会 第38回ゼオライト研究発表会 若手優秀講演賞 川久保 優香（下嶋研究室・M1）
 第36回ダイヤモンドシンポジウム ポスター賞 最優秀賞 橋本 裕太郎（川原田研究室・B4）
 日本機械学会 三浦賞 佐藤 祐輔（岩瀬研究室・M2）
 理工総研 第12期アーリーバード成果報告会 Presentation contest 最優秀賞 澤田 万尋（鈴木研究室・D2）
 早稲田大学 小野梓学術記念賞 田畑 千尋（鈴木研究室・D1）
 一般社団法人日本機械学会 三浦賞 阪井 健人（宮川研究室・M2）
 一般社団法人日本機械学会 島山賞 大場 直哉（宮川研究室・B4）
 機械工学記念学術賞 渡部賞 玉田 洋一朗（宮川研究室・B4）

2022年度 第9回 ZAIKEN Festa 受賞者



最優秀賞

太田 康介（川原田研究室・M2）

題名「C-Si-O側壁チャンネルを有した縦型ダイヤモンドMOSFETのノーマリーオフ動作達成」

優秀賞



永野 真衣
 （東京都立大学 表界面光物性研究室・M2）

題名「エッジを制御した遷移金属ダイカルコゲナイドへテロナノチューブの合成」

優秀賞



早坂 京祐
 （川原田研究室・M2）

題名「超高濃度窒素ドーピングCVDダイヤモンドに作製した高濃度NVセンター」