

研究報告書

-2016年度研究会活動-

第24回 研究報告会

2017年7月11日

ATI 公益財団法人 **新世代研究所**
FOUNDATION ADVANCED TECHNOLOGY INSTITUTE

界面ナノ科学研究会

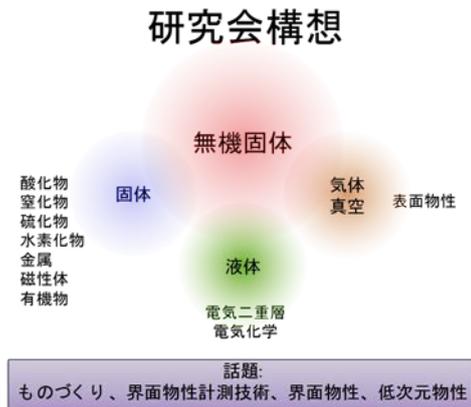
界面ナノ科学を取り巻く環境

委員長 一杉 太郎
東京工業大学 教授

1. 研究構想

界面ナノ科学研究会では幅広い分野の研究者を集め、無機固体物質を中心とした界面物性に関する学理の構築に力を注いでいる(図 1)。その研究テーマは界面が関わる電気伝導性、磁性、誘電性、化学反応と多岐にわたり、最新の物性制御法、試料作製法、評価法、物性発現の理論までカバーする。

本研究会は 2015 年度から第二期に入り、今年度が 2 年目である。人材交流を重視しつつ、多彩な界面について研究を進めている。



(図 1) 無機固体を軸として、他の物質系と形成する界面機能を研究対象とする。

2. 界面ナノ科学研究を取り巻く環境

日本の研究力低下が Nature 誌で取りあげられ、議論が巻き起こったことは記憶に新しい。昨今、日本発の論文数が低下していることは明白である¹。特に固体物理分野の論文数は顕著であり、2015 年は 2003 年の半数以下になっている(その分析については参考文献をご覧ください²)。

そこで、実験手法ごとに、「それを活用した研究数」の推移について考えてみたい。特に、ATI と関わりが深い、走査トンネル顕微鏡(STM)や原子間力顕微鏡(AFM)から検討し、さらに、光電子分光や走査透過電子顕微鏡(STEM)と比較して考察していく。

取り巻く環境

STM は誕生からすでに 36 年が経過した。今でも Nature や Science 誌等に STM を用いた研究が多く掲載されており、ホットな実験装置である。STM は物質研究のツールとして活用され、高温超伝導体、トポロジカル絶縁体、グラフェンなどへ幅広く適用されている。

¹ N. Phillips: Nature 543, S7 (2017).

² 桑原真人、日本物理学会誌 72, 246 (2017).

一般に、技術は発展期、最盛期(安定期)、衰退期を必ず迎えるものである³。では、現在のSTMは、これらのどの時期に該当するのだろうか。私自身の直感では、STMが最大の輝きを放っていたのは1990年代ではなかろうか。Eiglerらが原子を動かし、Hoらが化学結合を操るなど、ナノテクノロジーという文脈で^{4,5}脚光を浴びた。したがって、発展期は過ぎているだろう。

これを裏付ける結果が、データベース(Web of Science)を用いた分析によって得られた。STMを活用した研究について、「毎年の文献数」を調べると、非常に興味深いことが分かってくる。タイトルとアブストラクトに”scanning tunnel* microscop*”を含む、論文、総説、プロシーディングス等の総数を図2に示す。この結果を見ると、1981年の発明後、急速に論文数が増え、1998年に2,000報を越えている(2,017報)。しかし、そこで急速にブレーキがかかり、漸減して2016年には1,754報であった。減少は緩やかであり、世界的には「安定期」であるといつて良いだろう。これらのデータは、前述の、「1990年代が華である」という直感を支持する結果になっている。

では、日本に注目してみよう。上記の結果から、著者所属に“Japan”を含むものを絞り込んだ。この場合、日本の研究機関に所属する研究者が、著者の中に1名でも入っていればカウントされる。驚くべきことに、1999年をピークとして(461報)、現在ではピーク時の半分弱の論文数となっている(2016年に209報)。中国と比較してみると、勢いの差は歴然である。この激減の理由は何だろうか？

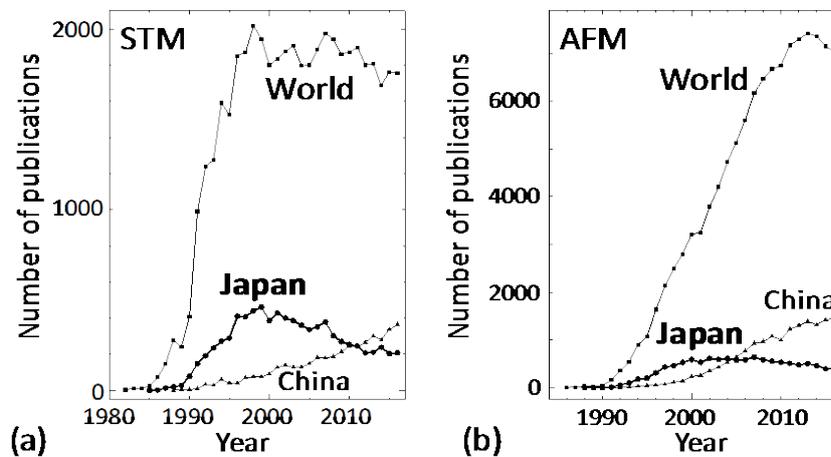


図2 (a) 走査トンネル顕微鏡(STM)に関連した論文、レビュー、プロシーディングスの総数。全世界、日本、中国発の文献について、毎年の推移を調べた。

(b) 同様に、原子間力顕微鏡(AFM)について調べた結果。

Web of Science より、本文に記載した条件で検索した。

³ C. クリステンセン：“イノベーションのジレンマ—技術革新が巨大企業を滅ぼすとき” (翔泳社 2001).

⁴ 科学技術振興機構 研究開発戦略センター(CRDS)、研究開発の俯瞰報告書 ナノテク・材料分野(2017).

⁵ D. M. ベルーベ：“ナノハイブナノ・ハイブ狂騒 アメリカのナノテク戦略” (みすず書房、2009).

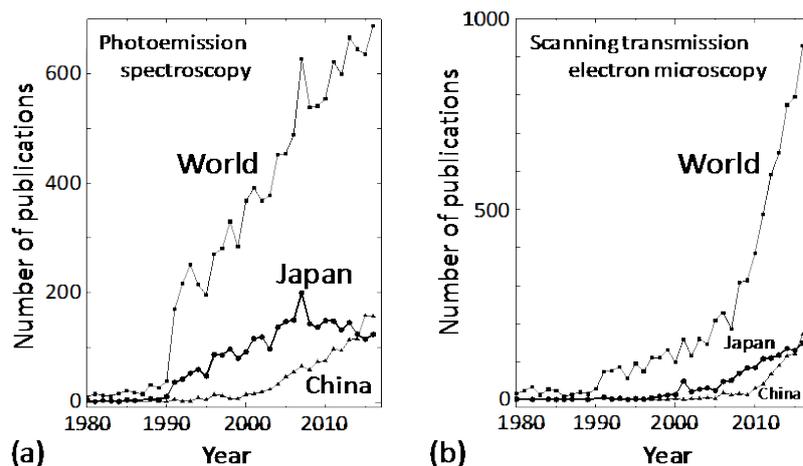


図 3 (a) 光電子分光に関連した論文、レビュー、プロシーディングスの総数。全世界、日本、中国発の文献について、毎年の推移を調べた。
 (b) 同様に、走査透過電子顕微鏡(STEM)について調べた結果。
 Web of Science より、本文に記載した条件で検索した。

さらに、原子間力顕微鏡(AFM)について、“atomic force microscop*”として検索した (図 2(b))。全世界では、AFM を活用した研究数は順調に伸び、2011 年以降は毎年 7,000 報を越えている。しかし、日本では、漸減しているのが実情である。

このような調査を光電子分光(“photoemission spectroscopy”として検索)と STEM(“scanning transmission electron microscop*”として検索)でも行った(図 3)。光電子分光においても、2007 年をピークとして、漸減しているように見える。これは私には予想外であった。光電子分光はますますプレイヤーが増えている印象が強かったからである。一方、STEM は論文数が伸びており、共用装置、あるいは、分析会社における依頼測定が広がっていることから推察できる。ただし、STEM でさえ、学界においてはこの先いつまで伸び続けるのかは定かではなく、いずれ減少に転じるのは確実である。

ここで紙面が許す限り考察を進めたい。このグラフを見ていると以下の四つのことに気がつく。

1. 日本では STM 関連の論文数がピークの半分以下になっているのはなぜか?
2. 全世界の統計では、STM は伸びが急に止まり、安定期に入った。この急ブレーキの原因は何か?
3. STM が 1999 年に論文数がピークを迎えるのに対し、AFM は 2013 年にピークを迎えている。この 14 年のギャップを生む要因は何か。
4. 日本と中国における、研究の立ち上がりの年について差が縮まっている。

考察 1 日本での論文数の低下：日本における研究者のキャリアとその現状分析

論文数の減少は、研究者の数、すなわち、ポストの数とリンクしているはずである。そこで、研

研究者のキャリアに着目しよう。1980年代にSTMの基礎固めがなされ、1990年代にSTMを表面科学研究に活用する数多くの若手研究者が活躍し、その方々が1990年代、2000年代初頭に教授となって研究室を主宰するに至った。そして、昨今、定年を迎えはじめ、研究の現場から離れつつある(1990年に38歳であれば、2017年に65歳)。

今考えるべきことは、定年を迎えた先生方の後のポストである。つまり、表面科学やSTMの専門家が後を継いでいるか?という点である。

これについてはあいにく統計的な情報を持ち合わせていない。私が知っている範囲で、最近退職された教授の後任を冷静に見てみると、答えは明らかに「否」である。つまり、STMを活用していた表面科学系の研究室の後を、そのまま表面科学系の研究室が継ぐケースは極めて少ないという印象である。したがって、表面科学の研究者は、「他分野の研究者を押しつけ」、独立を勝ち取らねばならない。その推測がある程度の射ているとした場合、その要因を考えた。

これについては、最近、日本表面科学会誌に寄稿したので、そちらを参照していただきたい。

考察2: STMはなぜ伸びが急に止まり、1999年にピークを迎えたのか。

これは非常に不思議である。米国がナノテク分野の主導権を握るべくスタートした National Nanotechnology Initiative (NNI, <https://www.nano.gov/>)は2000年の設立である。STMはナノテクの代名詞であったはずだが、実はNNIが始まる前に、ピークを迎えていたのである。

この要因の一つには、STMを用いた研究が応用に直結しないため、STMに流れ込む研究費総額が増えていないということが挙げられるであろう。つまり、企業に実験装置が入っていく余地が無いうえに、大学や公的な研究機関に行き渡ったため、論文数が増えなくなると推察することができる。

考察3: 14年のギャップがなぜ生まれたのか。

STMは発明から18年でピークを迎えた。一方、AFMは、27年後にピークを迎えた。この差は、AFMが「異分野にて活躍している」からこそ生じているのではなかろうか。実際に、データベースで検索すると、AFMの利用が生物学、医学、農学などにも広がっており、非常に重要な技術であることが分かる。そのため、多くの分野に広がっていくのに、9年の差が出たのかもしれない。STMの場合、研究分野の広がりが少ないため、その分、短時間で飽和したと言えるのではないだろうか。

考察4: 日本と中国における、研究の立ち上がりの差

これは非常に興味深い。STM、AFM、光電子分光では、日本と中国の立ち上がりには差がある。しかし、最近、広まってきた実験装置であるSTEMの場合、見方にもよるが、差が小さいように見える(図3(b))。

そのうち、中国が先に立ち上がり、日本が後追いする時代になるのは確実である。本稿は実験装置を主題としたが、物質開発の例として、鉄系超伝導体開発が挙げられる。日本で発見されな

がら、発見後の最高転移温度の向上は中国が主体であり、絨毯爆撃的なカチオン置換により、最高転移温度の更新は中国人研究者の独壇場であった。このような人海戦術は、現代の日本では制度・体力的に難しい。そのような時代にどのように研究を進めるのか、今から考えて実際にシフトしておく必要がある。

何よりも生産性の向上が必要である。そのための方策の一つが、マテリアルズインフォマティクスの導入により、高速にスクリーニングすることである。さらに、昨年度の本報告書で述べたように、AI と人工知能を導入した「ロボット科学者」がどうしても必要になってくる。学術・産業の国際的競争力を保持するうえで、材料研究・開発スタイルの刷新は喫緊の課題である。

3. 2016 年度の研究活動の概要

本研究会メンバーには、ものづくり、物性測定、第一原理計算・理論家、など多様な人材がそろっており、メンバーは総勢 15 名である。メンバー間のフランクな関係を築き上げ、「議論すべきことはきっちり議論する」、という姿勢で、研究会メンバー内で幹事を決め、研究会を開催している。

第一回研究会 2016 年 7 月 4 日@越後湯沢

越後湯沢にて研究会を開催した。駅に到着後、最初に行ったことは、日本酒の試飲と購入である。越後湯沢駅には利き酒コーナーがあり、彩り華やかな日本酒のラベルを愛でつつ、様々な味わいを楽しむことができる。購入したのはもちろん、夜の交流会のためである。界面ナノ科学研究会は、人のつながりを作ることを重視しているので、そのためのツールとして日本酒は欠かせない(単に私が日本酒好きということだけが理由ではないことを強調したい)。

研究会は、東工大・教授・大場史康さんの講演から始まった。今、脚光を浴びているデータ科学を活用して新物質開拓を進めている。膨大な候補物質の中から効率的に理論予測(スクリーニング)を行い、実際に物質を合成する、「物質研究のあるべき姿」を見ることができた。その研究プロセスから現状の研究者層を考えると、「コンピュータを駆使して計算できる研究者」が不足していると感じた。

次は、新規ヒドリド伝導体の開発に成功した分子研・准教授・小林玄器さんの講演である。水素の陰イオンをヒドリド(H)と呼び、ヒドリドイオン伝導体を活用した高電位・高容量のエネルギーデバイスが期待される。小林さんらは固体電解質 $\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_{x+y}\text{LiH}_{1-x+y}\text{O}_{3-y}$ の開発に成功し、極めて高いイオン伝導性に一同驚いた。

この 2 名の講演は、各自 2 時間の持ち時間だった。

その後 ATI 研究助成採択者の講演を行った。

界面ナノ科学研究会では、採択者と研究会員の交流を進めるため、研究会に数名お呼びして、講演をいただいている。今回は3名の研究者をお呼びした。

- 東北大学・助教・丸山伸伍さん: イオン液体の薄膜作製について報告していただいた。ガスセンサーへの応用も検討され、今後の展開が楽しみである。
- 東工大・助教・北條元さん: $\text{BiFe}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_3$ において、室温で強磁性と強誘電性が共存していることが示された。室温で実現していることは非常に意義深く、今後、エレクトロニクスデバイスへの応用が期待される。
- 東北大学・助教・伊野浩介さん: 集積化された電気化学デバイスによるバイオイメーキングが報告された。細胞活性が実際に評価され、イメージングシステムの再生医療や創薬研究への応用が期待される。

第二回研究会 2017年3月30日@お茶の水

年度末の忙しい時期にお集まりいただいた皆さんに感謝である。私の場合、予算の締めが完了できるか不安を持ちつつ研究会が始まった(秘書さん頼み)。しかし、研究会が一旦始まると、そのことはまったく忘れ去り、興味深い講演に没頭することができた。

トップバッターは分子研・教授・岡本裕巳さんである。金の微小ロッドに生じるプラズモンの空間分布について、当初は予想もできなかった実験結果について講演いただいた。走査近接場光学顕微鏡と超短パルス光技術を組み合わせて世界で唯一の実験装置を作り上げ、画期的な成果を上げておられるのが非常に印象的であった。また、研究キャリアについても強く記憶に残った。教授になってから、准教授時代の研究から大転換して新しいこと、すなわち上記テーマを始めたとのことである。自分自身もそのようにたくましく研究を続けたいと強く思った。

次に、大阪大学・准教授・酒井英明さんから、ディラック電子状態を有するビスマス正方格子層の物性に関する研究を紹介していただいた。そのディラック電子状態が、ビスマス正方格子近傍の原子のスピン状態に影響を受け、特異な物性を示すことが議論された。また、モリブデンダイカルコゲナイドについて、元素置換により極性-非極性転移の制御に成功し、強誘電金属の合成を報告した。そして、臨界点近傍における異常な熱電能の増大が報告された。

続いて、ATI研究助成採択者からの講演である。

- 東京大学・助教・坂本良太さん: 液液界面、あるいは気液界面を舞台として分子合成する研究について延べた。今後、特徴的な電氣的・磁氣的性質が発現する新たな二次元物質の誕生を期待したい。
- 東北大学・助手・込山英秋さん: ブロック共重合体ナノ相分離構造を用いたプロセスについて講演していただいた。二種類の相に分離した構造を作製し、選択的に片方の相にのみ物質が入っていく仕組みを上手に使い、様々なナノ構造の形成を行っていた。中空の穴があいたテンプレートでは実現できない構造が多数示され、新機能の誕生を期待が望まれる。

研究会開催記録

【第1回】2016年7月4日（月）－5日（火）越後湯沢

1. 「先進計算科学による半導体物性の高精度予測と新物質探索」
大場 史康（東京工業大学）
2. 「ヒドリドイオン導電体の開発」
小林 玄器（自然科学研究機構 分子科学研究所）

研究助成採択者による講演

3. 「イオン液体ナノ薄膜の構造と物性」
丸山 伸伍（東北大学）（2014年度）
4. 「Co置換 BiFeO₃ 薄膜における強磁性発現と強誘電・強磁性ドメインの相関」
北條 元（東京工業大学）（2015年度）
5. 「マイクロ・ナノ電気化学に基づくバイオイメーjingデバイス」
伊野 浩介（東北大学）（2015年度）

【第2回】2017年3月30日（木）御茶ノ水

1. 「プラズモンの近接場光学イメージング：
光場構造，波束伝搬ダイナミクス，キラリティの実空間観察」
岡本 裕巳（自然科学研究機構 分子科学研究所）
2. 「機能性原子層の三次元積層物質における新奇量子物性の開拓」
酒井 英明（大阪大学）

研究助成採択者による講演

3. 「ボトムアップ型ナノシート：構築と機能」
坂本 良太（東京大学）
4. 「ブロック共重合体ナノ相分離構造を用いたテンプレートプロセス」
込山 英秋（東北大学）

界面ナノ科学研究会員名簿

一杉 太郎	東京工業大学 物質理工学院	教授 研究会委員長
山田 啓文	京都大学 工学研究科電子工学専攻	教授
梶村 皓二	産業技術総合研究所 電子光技術研究部門	研究顧問
高橋 琢二	東京大学 生産技術研究所マイクロナノメカトロニクス国際研究センター	教授
森田 清三	大阪大学	名誉教授
大友 明	東京工業大学 物質理工学院応用化学系	教授
柴田 直哉	東京大学大学院 工学系研究科総合研究機構	准教授
戸川 欣彦	大阪府立大学 工学研究科 電子数物系専攻	准教授
陰山 洋	京都大学大学院 工学研究科物質エネルギー化学専攻	教授
村上 修一	東京工業大学 理学院物理学系	教授
合田 義弘	東京工業大学 物質理工学院 材料系	准教授
安藤 康伸	産業技術総合研究所	研究員
千葉 大地	東京大学 工学系研究科物理工学専攻	准教授
福間 剛士	金沢大学 理工研究域電子情報学系	教授
杉本 宜昭	東京大学大学院 新領域創成科学研究科物質系専攻	准教授

2017年3月現在