グローバル COE プログラムを振り返って* —自然現象の精緻さによって製造技術をかえる—

Global Center of Excellence Review
—Production Innovation by Exquisite Accuracy of Nature—

山内和人**
Kazuto YAMAUCHI

Key words

global COE, atomically controlled fabrication, education program, ultrafine surface finishing, diffraction-limited X-ray optics

1. ま え が き

精密工学会誌新年号で、「大型プロジェクト特集」という企画が決まったようである。グローバル COE プログラム「高機能化原子制御製造プロセス教育研究拠点」（平成 19 年度から 23 年度）について書くようにとの依頼を受けた。どのようなことを書けばよいのなかなか分からず、編集委員会に改めて尋ねてみたが、「何を書いてもよろしい」と乾いた答えが返ってきた。腰が引けそうになったが、せっかくの機会なので、われわれが実施したグローバル COE プログラムを概観し、その上で、申請から今までを振り返ってみようと思う。なお、本プログラムをベースキャンプとした研究の例として、科研費特別推進研究「硬 X 線 Sub-10 nm ビーム形成と顕微鏡システムの構築」（平成 18 年度から 22 年度）の話題も加えたい。グローバル COE プログラムは、主に教育プログラムだが、これを行うベースは研究にあるので、蛇足になると思うが、紙面を取らせていただこうと思う。

まずは、それぞれのプロジェクトの簡単な紹介から始めたい。

2. プロジェクト内容

2.1 グローバル COE プログラム「高機能化原子制御製造プロセス教育研究拠点」

グローバル COE プログラム「高機能化原子制御製造プロセス教育研究拠点」は、自然現象の精緻さをその極限まで利用し、製造技術において、原子レベルの制御性と環境調和性を実現する原子制御製造プロセスの創出を目的としている。人類の繁栄は、ものを作る技術、すなわち製造技術によって支えられているといっても過言ではない。多くの企業が、この開発にしのぎを削り、よりよい製品や他社に真似できない製品を生み出してきた。しかしながら、技術開発の現場では、すでに使っている加工や計測の原理を

継承しながら、IT や制御技術を武器に、装置性能を上げる方法が取られる場合が多い。すなわち、「装置精度」型の開発が続けられている。現在に至るまで、例えば、薄型テレビは限りなく大型化し、半導体デバイスは限りなく高集積化を続けることができていた。しかし、このやり方では、到達できる精度や環境との調和性に限界がくることは明らかである。

われわれの拠点は、大阪大学大学院工学研究科精密科学教室から研究者が集まり、表面科学や計算科学を駆使しながらナノ工学を展開し、表面での物理・化学現象の探索とその本質の理解によって、自然現象の精緻さをその極限まで利用する「現象精度」型の製造技術の創出を目指している（図 1）。そして、目標とする「価値」に「原子レベルの制御性」と「環境との調和性」の 2 つを掲げ、この「価値」を共有する国内外の研究機関との間で、基礎科学から応用、融合分野の創出までの幅広い階層をつなぐ教育研究プラットフォーム（グローバルネットワーク（GN）プラットフォーム）（図 2）を構築している。この GN プラッ

図 1 自然現象の精緻さを利用する現象精度型技術開発の概念図

*原稿受付 平成 25 年 11 月 5 日

**正 会 員 大阪大学大学院工学研究科（大阪府吹田市山田丘 2-1）

図2 グローバルネットワークプラットフォームの概念図

トフォームは、学際的にも国際的にも真にグローバルな教育研究環境を提供するものであり、このもとに、深い専門性と国際感覚、異分野との融合能力を備えた若手研究者の育成を行っている。

GN プラットフォームは、平成7年度から7年間のCOEプログラム「完全表面の創成」と、平成14年度から5年間の21世紀COEプログラム「原子論的生産技術創出拠点」の中で始まったさまざまな連携関係がもとになっており、新たな製造技術が創出される都度に成長する仕組みとして構築されている。若手研究者や博士課程学生は、GNプラットフォームを活用した外部連携テーマを立案することができ、提案に応じて、研究費や海外渡航費の支援を受けることができる。研究の「価値」を広く展開するチャンスが与えられるのである。連携先との議論を通して、たくましさや国際感覚が涵養されている。

もう一つ、拠点の継続性の観点から行っているプログラムを紹介したい。エリート発掘・育成プログラムである。対象は学部3年次生からであり、トップ-8（エイト）という制度によって、8名を上限に、優秀な学生を研究室に早期配属している。また、優秀な修士課程学生には、若手研究者や博士課程学生が提案した連携テーマにサブリーダーとして参加することを認めている。つまり、優秀な学生には、できるだけ早い時期にグローバルCOEの教育研究システムに触れるチャンスが与えられる。製造技術は、先端科学の陰に隠れた「縁の下の力持ち」であり、大切な分野であるにもかかわらず、若者にとってその魅力を感じにくい。エリートと認められた学生が、GNプラットフォームを通じ、できるだけ早く連携研究に参画できる環境は、製造技術研究の意義を知ること大いに役立っている。10年先を見据えて、若手研究者が継続して育つ環境が醸成されつつある。

さて、グローバルCOEプログラムをベースキャンプにして推進した研究を2つ紹介したい。本COEプログラムが対象とする研究の分野は広いが、私が受けた原稿なので、私の研究を紹介したいと思う。本COEプログラムが

目指す「原子レベルの制御性」において、高精度X線光学素子を実現する「究極の一品料理」が可能になった。作るために手間はかかるが、誰も作ることができなかったX線領域での回折限界性能を備えた集光デバイスが実現した。この内容は、もう一つの研究プロジェクトの話題の中で述べる。ここでは、まず「究極の一品料理」とは対極の関係にある話題を紹介したい。

半導体基板では、いかに表面の性能が優れていても、大変な時間をかけて、たった1枚つくるといわけにはいかない。われわれは、表面でのさまざまな物理・化学現象を探索しながら、自己組織化的に原子スケールで完全に制御されたヴィシナルな結晶表面を創成する方法を開発した。

通常、半導体基板は、「基準面」となるポリシャの上に微粒子を含む液体を撒き、ここに表面をこすりつけて基準面を転写することによって作られている。いわゆる研磨である。微粒子による機械的な作用が効くこの方法では、作られた表面の性能に限界がある。われわれは、基準面の上でのみ化学エッチングを誘起したいと考えた。これができれば、基準面を化学的に転写できる。幾何学的にも、結晶学的にも、究極の表面が短時間でつくれる可能性がある。このためには、次の3つの条件を満たす必要がある。①基準面上でのみ反応種がつくれ、②反応種の寿命が短く、③基準面の物性が長時間変化しない、の3点である。基準面上で反応種が作られ、その寿命が短ければ、反応を基準面上に局在させることができる。その基準面を基板表面に近づければ、基板表面の凸部が選択的にエッチングされるため、基準面を化学的に転写できる。基準面は変化してはいけなないので、反応種を作り出す触媒機能を備えている必要がある。これを触媒表面基準エッチング法と名付けた。

最新の成果では、この方法によって、4H-SiC (0001)、GaN (0001)、ZnO (0001) やサファイア (0001) の表面を完全なステップ-テラス状の構造にすることができている(図3)¹⁾²⁾。このとき、触媒はフッ素ゴム上に約100nm成膜された白金であり、エッチング液は純水である。白金の触媒作用によって、表面原子のバックボンドが効率的に加水分解され、エッチングが進む。SiCには、これまでフッ化水素酸が必要だったが、今では純水でも可能になった。まだ完全ではないが、第一原理分子動力学計算によって、エッチング過程の全様も見え始めている。薬液や微粒子を一切使用しない「環境との調和性」と「原子スケールの精度」を兼ね備えた表面創成法であり、GNプラットフォーム上では、2名の博士課程学生が、表面科学研究やデバイス開発を行う研究機関との間で連携研究を展開した。

少し冗長な説明になってしまった。続けて、これを推進するにあたっての思いなどを述べてみたいが、ひとまずもう一つの研究プロジェクトの内容を紹介したい。

2.2 特別推進研究「硬X線 sub-10 nm ビームの形成と顕微鏡システムの構築」

本研究もグローバルCOEをベースキャンプにして進めた研究の一つであり、3名の博士課程学生が参加した。プ

図3 触媒基準エッチングされた (a) 4H-SiC (0001), (b) GaN (0001), (c) ZnO (0001), (d) サファイア (0001) の AFM 像。図中のステップ高さはすべて結晶学的な最小単位である。

ロポーザルを出したころの研究の背景は以下のようなものである。

SPring-8 に代表される第 3 世代放射光施設の活用が広がり、第 3 期科学技術基本計画の国家基幹技術として X 線自由電子レーザーの開発が始動したところである。X 線を利用したナノスケール分析への期待が急速に高まっていた。X 線ナノビームが形成できれば、分子サイズの分解能で物質の機能イメージングや単一分子の構造解析などが可能となる。この期待のもとに、世界中の研究機関で、屈折レンズ、ゾンプレート、ミラーなどの X 線集光デバイスの開発が行われていた。X 線顕微鏡への応用を考えると、集光デバイスには、大開口、高集光効率、長作動距離を実現できるミラーが最も適している。われわれは、X 線ミラー作製法の高度化に取り組み、グローバル COE プログラムが始まる 2008 年には、任意形状の表面に対して原子レベルの平滑面を得る表面ナノプロセスや、大面積非球面を精度 2 nmPV で計測可能な形状測定機の開発などに成功しており、これによって X 線を当時の世界最小サイズである 30 nm に集光することにも成功していた。

さて、本研究の目的は、くぎりとなるサイズ 10 nm を切る X 線ナノビームを世界に先駆けて実現することである。ところで、集光とは焦点に光を集めるということであるが、話は若干複雑である。ミラーの各点で反射した光が、焦点で強め合いの干渉条件を満たさなければならない。Rayleigh の基準によれば、焦点に集まる X 線の位相誤差を波長の 1/4 以内に収める必要がある。位相誤差は、ミラーへの X 線の斜入射角を θ 、その点の形状誤差を d 、X 線の波長を λ とすると

図4 (a) 水平方向および (b) 垂直方向の集光プロファイル。両方向において、10 nm を切る極限の集光が実現している。

$$\phi = 2\pi(d/\lambda)\sin\theta$$

で与えられる。本光学系では、 θ が 10 mrad、 λ が 0.6 Å なので、 ϕ を $\pi/2$ ($\lambda/4$ に相当) 以下にするためには、 d が 1 nm 以下になる必要がある。自信をもってできますといえる値ではない。また、ミラーへの斜入射角 θ が全反射の臨界角よりも大きい場合、ミラー上に多層膜を形成する必要がある。このとき、多層膜の積層誤差も位相誤差の発生原因となる。仮に基板の形状が 1 nmPV 以上の精度で正しく評価できたとしても、最終的に Rayleigh の条件が満たされていることを保証できないのである。このままでは万事休すとなるのだが、光の属性である強度と位相の関係を利用し、焦点近傍の強度プロファイルから逆問題を解くことによって位相情報を回復できることに気がついた。これによって、基板の形状誤差と多層膜の積層誤差をまとめて知ることができる。これが分かれば、その場で位相補正する補償光学への展開が可能になるのである。X 線の極限的な集光のための全く新しい概念に基づく光学系であり、この考え方は、2005 年に米国のサンディエゴで行われた「X 線集光における今後 10 年の展開」と題されたワークショップで、世界で初めて提案した。特別推進研究の申請書を書く前であったので、しまったと思ったが、今考えれば、ここで世界に宣言して、勢いをつけておいたのがよかったと思う。

この提案が成功すれば、電子顕微鏡に比べて、材料内部

の観察や大気圧下での利用が可能な X 線顕微鏡が、空間分解能においても大きな進歩を遂げることができる。ヒアリングでは、これまでに培った加工技術と計測技術に加え、この意義を審査委員に今生限りの資料を用意して訴えたことを覚えている。

結果は、図 4 に示すように、7 nm×8 nm の集光を実現した。位相補正は、ピエゾ素子によって 0.1 nm レベルで形状を変えることのできるミラーを新たに開発し、これを集光ミラーの前段に置いて、誤差をその場でキャンセルするシステムとした。この成果は、2010 年に Nature Physics から発表し³⁾、雑誌「子供の科学」でも紹介された。また、Nature Nanotechnology では、この成果を online 版で取り上げ、その意義を独自に解説している⁴⁾。

本研究は、グローバル COE プログラムの GN プラットフォームで、世界中の放射光施設と「価値」を共有する関係にある。若手研究者や博士課程学生には、これらの施設でのビームライン開発に参画し、幅広く成果を展開するチャンスが与えられている。

そろそろ、一通りの説明を終え、グローバル COE プログラムの申請のころを振り返ってみたいと思う。

3. グローバル COE プログラムを振り返って

われわれの教室は、平成 7 年に初代の COE プログラムに採択され、続いて 21 世紀 COE プログラムにも採択されている。これらに続いてグローバル COE プログラムをリーダーとして推進したが、申請書を書いたころを振り返ってみたいと思う。そのためには、まず、先行した 2 つの COE プログラムを振り返る必要がある。

初代の COE プログラムは、教室内で始まっていた原子スケールの物づくりの先進性が評価されて採択されたもので、「完全表面の創成」を目標に掲げて拠点形成を目指した。今でも財産になっているウルトラクリーンルームが設置され、原子レベルの表面現象を扱う研究基盤が整った。また、教室全体が一体感をもって協力する下地ができ、教室内のプロジェクト研究体制もこのころから始まっている。教室として、「加工の技術」から「加工の科学」を目指そうとした原点が、この COE プログラムにあった。

21 世紀 COE プログラムはどうだっただろうか。プログラム開始から 2 年ほどの間、先行した COE プログラムの主たる成果を実用化するフェーズとの認識を共有し、教室全体がプロジェクト研究体制のもと、自分たちで引いたレールの上をひた走った。大いに成果が上がったが、問題点も見えてきた。プロジェクト研究体制では、研究者が自分の得意な部分で貢献し、一丸となって成果を上げる。これは素晴らしいことであり、必要なことなのだが、物づくり研究の場合、研究の根幹が確定していれば、「装置精度」型の技術開発の様相を呈する場合がある。大学は、新規かつオリジナルな方法を提案し続ける必要があるのだが、大きな研究費が使われるプロジェクト研究は、この当たり前の考えが分かっている、行動力をマヒさせていた。21 世

紀 COE プログラムが中盤に差ししかかったころ、皆がこのことに気づき始め、多少大げさだが、雨後の竹の子のように新しい研究の芽が出たことを記憶している。触媒表面基準エッチングや X 線集光における補償光学の展開も、このころに開始したテーマである。

2 つの COE プログラムは、どちらも高い評価を得て終了した。その間、紆余曲折があったが、大学での物づくり研究をとことん考える下地ができた。その結果として、グローバル COE プログラムでは、「これまで以上」に、自然現象の探索と理解という基礎学問を前面に掲げる物づくり教育研究拠点になるべきであるとの結論が教室として得られたのである。このように構えると、「大学ならではの物づくり」とは何か？ 言い換えると「大学ならではの研究テーマの決め方」が問題になってくる。このことについて少し私見を述べ、グローバル COE プログラムを振り返ったことにしようと思う。

4. 大学ならではの研究テーマの決め方

新しい物づくりのテーマを発想したとき、まずテーマの位置づけをしっかりと認識する必要があると思う。このとき、図 5 に示すようなグラフを考えるといろいろなテーマの立ち位置が比較できる。縦軸を物づくりのレベル（例えば精度）、横軸をコストパフォーマンスとし、原点は、発想したテーマの特徴から考えて、どのレベルの物づくりに利用され、どの程度のコストなら実用化されるかという指標を示す点と考える。次に、自分の考えた方法がどの位置にあるかをプロットする。図 5 の①、②と示すように、原点の少し左上や右下にプロットがくる場合が多いと思われる。性能はよいが、少しコストが合わないという場合と、コストはよいがもう少し性能を上げなければならないという場合である。このようなテーマは、実用化領域である第 1 象限を目指して、すぐに産学連携研究に発展すると考えられるが、あえて大学から提案するほどのものではない。

図 5 物づくりテーマの位置づけ。①、②は、それぞれ、性能は基準を満たすがコストに少し問題がある場合と、コスト的には基準を満たすが、性能面が少し劣る場合の例。第 2 象限の彼方が大学ならではの物づくり。

いと思う。大学人はコストなど考えず、産業应用到うつつを抜かすことなく、専門力の幅広さと奥深さをもってこそ発想できるテーマ、図の左上隅、つまり、第2象限の彼方のテーマを狙うべきではないかと思うのである。成功すれば必ず No.1 になれるし、研究者としてのプレゼンスを獲得できる。また、このようなテーマには、発想した時点では予想できないが、作れなかった物が作れる可能性があるし、極限の性能をもつ方法には、使ってみたいと思う人が必ず現れるはずである。つまり、研究の開始時とは全く違う原点が知らぬ間に設定され、気が付けば第1象限にいて、実用化ということも有り得る。ここまで幸運ではなくても、自分で面白い原点を見つければ、十分に素晴らしい展開が待っている。よい研究は、仕組みなくとも、いずれ必ず社会に貢献できる。若手研究者がテーマを決めるときは、どうか第2象限の彼方を意識してほしいと思う。ただし、同じ第2象限の彼方のテーマであっても、研究のための研究にしかならない「お遊び（物づくり研究として）」になってはいけな。この見極めは難しくなく、研究の意義を科研費の申請書に文章で書くのではなく、信念をもって他人に言葉で伝え切れるかどうかで決まるはずである。

さて、大学ならではの物づくりは、この x - y 平面の条件だけを満たせばよいのかというそうではない。この図には、最も大切な基礎科学の軸という z 軸がある。基礎科学に深く根差した懐の深いテーマでなければならないと思うのである。基礎科学に深く入り込むテーマなら、思いがけないところで、新たな発見や発想が生まれるし、使いたい現象を真に理解して制御するためには、より広い基礎科学の利用が求められる。このようなテーマは、プロジェクト型の研究に発展しても、技術開発ではなく科学であり続けることができる。グローバル COE プログラム開始以降、このことを今でも強く意識している。本 COE プログラムの推進によって、若手研究者や博士課程学生が成果を発表するとき、物理や化学などの基礎科学系の雑誌から発信する比率が高くなった。これからも「大学ならではの物づくり」ができる拠点に少しでも近づいていきたいと思う。

5. む す び

今回は自分にとってグローバル COE プログラムを振り返るよい機会となった。まず、このような機会をいただいた編集委員会に感謝したいと思う。

教育プログラムでは、自分たちのできること以上の理想

を掲げ、自分たちも成長しなければならない。大型プロジェクトの場合だけでなく、個人プロジェクトとしても「人づくり」は最も重要なプログラムである。このための努力を避けるわけにはいかない。その上で、物づくりにおける「大学ならではの研究テーマ」とは何か？ 若手研究者にとっては、まさに自分の将来がかかっているし、学生にとっては、ある意味では選択の余地なく受け入れ、そこで研鑽することになる。これを決める責任は重い。

上段に構えたが、すきだらけであり、自分ができているわけでも何でもなし。最後に言い訳を言わせていただくと、今も y 座標と z 座標が原点から大きく外れたテーマを1つでもよいからもつ必要があると自分に言い続けている。

グローバル COE プログラムは、大学人として、解決していかなければならない課題を見つけ、それを考えるチャンスを数多く与えてくれたと思っている。このプログラムを推進できたことに心から感謝したい。また、このプログラムを実施する礎は一朝一夕に築けるものではなく、教室の諸先輩方に心から感謝を申し上げたい。

参 考 文 献

- 1) J. Murata, T. Okamoto, S. Sadakuni, A.N. Hattori, K. Yagi, Y. Sano, K. Arima and K. Yamauchi: Atomically Smooth Gallium Nitride Surfaces Prepared by Chemical Etching with Platinum Catalyst in Water, *J. Electrochem. Soc.*, **159**, 4 (2012) H1.
- 2) 山内和人, 佐野泰久, 有馬健太: 触媒表面基準エッチングによる単結晶 SiC, GaN 表面の平滑化, 精密工学会誌, **78**, 11 (2012) 947.
- 3) H. Mimura, S. Handa, T. Kimura, H. Yumoto, D. Yamakawa, H. Yokoyama, S. Matsuyama, K. Inagaki, K. Yamamura, Y. Sano, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa and K. Yamauchi: Breaking the 10 nm Barrier in Hard-X-ray Focusing, *Nat. Phys.*, **6** (2010) 122.
- 4) P. Rodgers: X-ray Optics: Hard Work Pays off, *Nat. Nanotechnol.*, Published online: 27 Nov., 2009 doi: 10.1038/nnano.2009.383.

山内和人

1983 年大阪大学大学院工学研究科博士前期課程。精密工学専攻修了。1984 年博士後期課程単位取得退学。同年大阪大学工学部助手。1992 年同大学助教授。2003 年より大阪大学大学院工学研究科教授。工学博士。専門は、超精密加工、表面計測、表面形状計測、X 線光学等。精密工学会、日本放射光学会、応用物理学会等に所属。