

中核的研究拠点（COE）育成プロジェクト

原子レベルで制御された構造を有する材料

第3回 評価報告書

平成12年3月10日

金属材料技術研究所

COE 評価委員会

序文

1995年に開始された5ヶ年計画のもと、金属材料技術研究所(NRIM)は、原子レベルで制御された構造を有する、量子効果を示す先端材料の創製に関する研究を実施してきた。この研究は日本政府のCOEプロジェクトの一環として推進され、科学技術庁の振興調整費によって運営されている。

本COEプロジェクトの主要部分は、極限場研究センターにおいて、実施されている。金属材料技術研究所の極限場研究センターには、磁界実験施設、ビーム実験施設、及び極高真空実験施設がある。事実、このプロジェクトは先端材料の研究分野において、これらの実験施設を有効利用するために計画されたものである。

金属材料技術研究所のCOEプロジェクトは、大きく分けて、2つに分類される。ひとつは「原子レベルで制御された構造を持つ材料の物性と創製」である。この研究はCOEのコア研究とされる。コア研究は科学技術振興調整費(COE基金)によって資金を得ている。しかしながら、各研究所にはコア研究を推進するにあたって、この基金のみに頼らない努力をすることが要求されている。極限場研究センターによって開発される技術は原子レベルで制御された構造を持つ材料の研究に大変重要なものである。したがって、もうひとつは「極限環境確立技術の向上」であり、これをCOEサポーター研究として定義している。これらふたつの研究はCOEプロジェクトを成功させるべく、研究協力をしている。

1995年、金属材料技術研究所COEプロジェクトの評価委員会が設立された。評価委員会はナノメーターサイズ技術分野における著名な10人の科学者からなる。評価委員会の主な目的は、プロジェクトの実行を評価し、研究計画に助言を与えることである。委員会設立後すぐ、プロジェクトの計画を評価し、その目的及び計画はこのプロジェクトにふさわしいものとの評価を下した。また、各サブプロジェクトリーダーは、互いに協力をし、定期的に研究成果を報告するべきであるという助言も行った。この提案を受け、金属材料技術研究所はプロジェクトの構造を変更し、COEプログレスレポートを年1回発行するとともに、定期的にサブプロジェクト間のミーティングを行うことになった。第2回評価委員会は1997年9月に行われた。この第2回評価委員会の目的はCOEプロジェクトが残り2年間の研究を継続するに値するかどうかを判定するものであった。評価委員会はこの中間期に成果を評価し、結果は素晴らしいものと判

定し、COE プロジェクトを後半期へと進めることを助言した。また、同時にサブプロジェクト相互間での協力体制をさらに推進することも求めた。この助言をもとに、金属材料技術研究所は COE プロジェクトを 1998 年 4 月に始まり、2000 年 3 月に終了する後半期へと進めた。また、金属材料技術研究所はサブプロジェクトリーダー間の協力サブプロジェクトを開始した。

この COE プロジェクトは 2000 年 3 月に終了する。そこで、2000 年 3 月 6 日から 9 日まで行われた第 5 回極限場における国際シンポジウムに引き続き、3 月 10 日に第 3 回評価委員会を開催した。シンポジウムでは、各サブプロジェクトのリーダー達がこの 5 年間の研究成果のまとめを発表した。評価委員はこのシンポジウムに出席し、彼らの研究結果の評価を行った。3 月 10 日に評価委員会を召集し、再度、各リーダーから研究成果の短いまとめを聞いた後、評価を完了した。

この 5 年間で、金属材料技術研究所は原子レベルで制御された構造を持つ材料の創製に関する研究分野を確立し、多くの若い科学者たちにこの分野で研究する機会を与えてきた。2000 年 4 月以降も、COE プロジェクトの枠組みに従った研究を金属材料技術研究所が継続させていくことを希望する。

金属材料技術研究所 COE 評価委員会委員長

塚田 捷
東京大学 教授

1 第3回評価委員会メンバーリスト

委員長

塚田 捷 教授 東京大学

委員

青野正和 教授 大阪大学
理化学研究所

ジャック クロウ 所長 国立強磁場研究所
教授 フロリダ州立大学

ジェームズ ジムゼウスキー 博士 IBM チューリッヒ研究所

フリッツ ヘルラッハ 教授 リューベン カソリック大学

クラウス フォン クリッツィング(ノーベル賞受賞者) 教授 マックスプランク研究所

三浦 登 教授 東京大学
物性研究所

森博太郎 教授 大阪大学

フリッツ フィリップ 博士 マックスプランク研究所

リン レーン 博士 アルゴン国立研究所

2 運営システム

(1) 研究組織

金属材料技術研究所の COE プロジェクトは 2 つの分野に分けられる。ひとつは、「原子的に制御された構造を持つ材料の物性と創製」である。これは、コア研究として定義される。コア研究は科学技術振興調整費（COE 基金）によって、資金を得ている。しかしながら、各研究所に対して、コア研究を推進するにあたって、この基金のみに頼らない努力をすることが要請されている。極限場センターによって開発された技術は原子的に制御された構造を持つ材料の研究にたいへん重要なものである。そこで、もうひとつは「極限環境確立技術の向上」であり、これはサポーター研究として定義される。このふたつの研究は COE プロジェクトを成功させるべく、研究協力をしている。

原子的に制御された構造を持つ物質は量子ドット、量子細線と極薄膜に分類され、この 3 つの分野に渡り、COE のコア研究は 5 つのサブプロジェクトに分かれている。

金属材料技術研究所所長 岡田博士は COE プロジェクトリーダーとして、コア研究、及びサポーター研究を監督している。

評点（得票数）

評点 A (優) 10

評点 B (良) 0

評点 C (劣) 0

(2) 研究基盤

COE の 5 ヶ年計画に対する合計予算は 1,799,000,000 円である。予算の約 70% が装置と消耗品に、約 25% が COE フェロー雇用に充てられている。毎年 20 名を越すフェローが招聘され、海外、及び日本国内からの若い科学者達の研究参加により COE 研究が実質的に促進されている。「コア研究」では技術サポートスタッフ、フェロー、及び学生の占める比率は金属材料技術研究所の他研究グループのそれよりも多い。

(a) COE プロジェクト予算

評点（得票数）

評点 A (十分) 8

評点 B (やや不足) 2

評点 C (不十分) 0

(b) COE プロジェクトの設備機器

評点 (得票数)

評点 A (世界的レベル) 10

評点 B (良) 0

評点 C (不備) 0

(c) 技術者による援助などの研究支援システム

評点 (得票数)

評点 A (適切) 3

評点 B (やや不適切) 6

評点 C (不適切) 1

(3) 協力体制

相互の情報交換の場を広げるため、極限場に関するシンポジウムが金属材料技術研究所で毎年行われて来た。また、当研究所は COE 研究に関するセミナー開催のために世界中より 129 名の科学者を招待した。さらに、最新の研究成果を発表する場として「プログレスレポート」を 5 回出版した。

1997 年に行われた評価委員会よりの助言を受け、金属材料技術研究所はサブグループ間の研究協力を組織した。

外部により開かれた研究とするために COE 研究フェロー、短期招聘者、国際会議での招待講演者などの人数が増員された。

評点 (得票数)

評点 A (十分) 9

評点 B (やや不足) 1

評点 C (不十分) 0

(4) 評価システム

塚田教授を委員長とする評価委員会が研究計画とその成果を評価するために組織された。1996 年 3 月に COE 研究の目的と計画を評価する評価委員会が開かれ、1997 年 9 月には計画中期の成果が評価された。2000 年 3 月には COE 計画の成果のまとめが評価された。一方、金属材料技術研究所はそれ自体でも、極限場研究センター長を委員長とする COE 推進委員会という評価委員会を有している。この委員会は、年に 4 回から 5 回開催され、成果状況の評価、予算申請内容の審議、及び運營業務の審議を実施している。

評点 (得票数)

評点 A (適切) 9

評点 B (やや不適切) 0

評点 C (不適切) 0

評価委員コメント

海外からのフェローも含めて、若い研究者たちの研究成果が向上している。この傾向が研究所の他の研究分野にも波及することが望ましい。

この COE プロジェクト終了後もこれらの研究は続けるべきである。しかしながら、無機材研と統合された後は、これらの他に、特にセラミックに関する研究テーマが追加されるべきであろう。

(コメントは、順不動)

コア研究のバランスは良い。各サブテーマを上手く連携することで、より効果があるだろう。さらに、各サブテーマを通じて解析結果を共有することで、より一層効果を上げられるだろう。

金属材料技術研究所の科学的成果の多くは、COE によるものがあるようだ。例えば、COE プロジェクトは金属材料技術研究所の約 5%の予算を使っているが、論文数が占める割合は約 20%である。

COE フェローの招聘は最も重要な点のひとつである。フェローシップとセミナー開催は COE 以外の所にも効果を及ぼして来た。金属材料技術研究所一般の研究活動にも特筆すべき影響があった。COE 以外の研究活動にも良い刺激になった事だろう。

フェロー招聘及び、より積極的なセミナーの開催を今後も続けられるように取り組むべきである。

COE プロジェクトにおける、日本国内はもとより、海外研究機関との相互作用により、国際的な研究機関としての金属材料技術研究所の地位が著しく向上した。COE の成果によって、科学と技術の中心としての金属材料技術研究所の知名度はさらに上がった。

多くの取り組みの中で有機材料等の分野における研究テーマの不足が気がかりである。金属材料技術研究所と無機材質研究所が統合された後はこの分野において、他の研究所や大学との共同研究に、より積極的に取り組むべきである。有機材料は将来のナノサイエンスやナノテクノロジーにおいて、ますます重要となるであろう。

コア研究と周到なサポーター研究間のバランスは良い。

マネージメントは熱心に絶えず努力を続けて来た。中間評価での助言を受け、共同研究を行い、成果を上げた。相乗効果を上げ、また金属材料技術研究所と日本の科学の国際的な地位を高めた。そして、効果的に低コストで、金属材料技術研究所を金属と無機システムを基盤にした将来のナノテクノロジーを研究する最新鋭の施設とすることに成功した。

外部から判断する限りでは、マネージメントは良かった。施設の平均的な質は顕著なものがある。しかし、人材不足には改善の余地がある。

設備はたいへん優れている。たぶん COE プロジェクトも金属材料技術研究所自体もこの優れた施設を利用する、より多くの若い研究者が必要なのではないだろうか。その点では、大学との共同研究が始まり、COE が研究者を短期招聘してきたことは高く評価したい。

研究支援システム：第 2 期から、増員されたとはいえ、技術支援者の人数がまだ十分とはいえない。

マネージメントが COE プロジェクトを成功に導く為に力を注いだことは高く評価される。無機材料研究所との統合など、将来の変化がこのプロセスに良い影響があることを祈る。COE フェローとして、研究者を招聘する予算を組み込んだことはすばらしい決定である。6 人という技術者の数は、少なすぎるようだ。

3 コア研究

3-1 単原子層・次元物質構造測定技術の研究

リーダー：古屋 一夫

本研究では、高分解能電子顕微鏡法を用いて、材料の内部および表面に形成されたナノ構造の原子レベルでの評価・解析を行っている。プロジェクトではデュアルイオン注入装置が組み込まれた 1000keV 超高压電子顕微鏡 (ION/HVTEM)、200keV 超高真空電界放射形電子顕微鏡(UHV-FE-TEM)、集束イオンビーム装置を組み込んだ 200keV 電子顕微鏡(FIB/TEM)の3台が用いられた。UHV-FE-TEM に関しては、金属や半導体などの UHV 蒸着装置と連結され、UHV 中で蒸着・形成されたPb,In,Ge ナノ粒子の構造が高分解能電子顕微鏡法(HRTEM)によって調べられた。その結果、ナノ粒子のサイズが 5nm 以下になると、fcc と bct 間の構造相転移がしばしば観察されることが明らかとなった。また、UHV-FE-TEM 内にて、SiO₂ 薄膜への高電流密度のナノメートルサイズの電子ビーム照射によって、SiO₂ 薄膜内に Si ナノ結晶を位置とサイズを制御して創製する技術を開発した。この技術を用いて Si ナノドットの配列構造の形成が行われ、量子デバイスへの応用の有用性を実証した。ION/HVTEM は Al 中へ注入された希ガスの構造や振る舞いの研究に用いられた。明瞭な HRTEM 像から、Al の中で Xe は{111}面と{100}面がファセット化した立方 8 面体形状のナノ結晶化となることがわかった。また、母相と内部ナノ粒子の原子の相対的位置関係を精度良く測定する方法を考案し、サブオングストロームの精度で Al と Xe の原子位置関係を明らかにした。FIB/TEM においては、25keV の Ga イオンによって Si や GaAs、SiC などの半導体材料を 200nm の分解能で加工することに成功し、同時に、加工による微細構造の変化を TEM 観察することができた。しかしながらイオンビームのサイズや微細構造の変化のため、FIB による加工分解能はサブミクロン程度である。

次元物質の創製および評価は、位置とサイズが制御されたナノ構造を創製するため、今も研究が進められている。この目的のため、UHV-FE-TEM と UHV-走査型トンネル顕微鏡との接続が行われつつある。また、ION/HVTEM においては、金属-金属ナノ構造を創製し評価する研究が遂行中である。

評点（得票数）

総合評価

評点 A (優) 10

評点 B (良) 0

評点 C (劣) 0

(a) 研究の独創性:

評点 A (優) 8

評点 B (良) 2

評価 C (劣) 0

(b) 科学的価値:

評点 A (優) 8

評点 B (良) 2

評点 C (劣) 0

(c) 達成度:

評価 A (優) 8

評価 B (良) 2

評価 C (劣) 0

(d) 論文の質:

評価 A (優) 10

評価 B (良) 0

評価 C (劣) 0

評価委員コメント

SiO₂ 中の Si ナノクリスタル、P_b:MTP、Ge:MTP、希ガス粒子が得られたことなどの特筆すべき業績があげられる。研究成果は素晴らしく、実用化も可能かもしれない。

TEM はとても上手に使われているし、基礎研究では興味深い研究が行われている。次へのステップとして、研究成果の実用化も考慮に入れるべきであろう。

論文数は、適切である。

本研究が開発した素晴らしい設備は今後も重要な成果を上げるだろう。

本研究は以下の点で、上手に運営されているようだ。まず、1. 創製と解析のための世界第一級の設定開発、2. 外部チームとの共同研究、3. 解析とその解釈に重要なインパクトを与えたシミュレーション、そして、4. 解析の道具の一部としての TEM と STM を組込む計画であること、などである。

本研究は他のコア研究との緊密な共同研究を通して、より一層成果を上げら

れるであろう。

マネージメント、設備開発、研究姿勢は良好であるが、より多くの時間を将来への展望と目標を見据えることに費やすべきである。

古屋グループはナノエレクトロニクステスト機器用半導体のナノ創製の為の素晴らしい設備を確立した。熱心に、そして効果的に研究をして来ている。また、海外の研究機構との共同研究も積極的に行ってきた。これまで培って来たものはナノテクノロジー分野の将来の研究において、引き続き実を結んでいくことだろう。

プレゼンテーションは良かった。質・量ともに、論文数はコアグループの20%を占める。機器設備は素晴らしいし、新しい技術も開発されてきた。いくつかの課題はまだ完了したとは言えないが、さらなる進展の見こみはかなり高い。他チームとの共同研究の状況ははっきりしないが、改善の余地はあるだろう。

UHV-TEM-STM システムは、世界に誇れるものである。ナノ粒子製造と解析における研究はたいへん良い。将来の実用性を予見するにはより注意を要する。単電子トランジスターにとっては、ナノ粒子は最も簡単な部分である。同様に重要なのはトンネルバリアの解析である。

FIB は半導体に損傷を与えるし、ナノ構造の作製には最適なものとは言えない。

このグループはナノ構造を製作するのに良い技術を開発した。業績はたぶん世界的に見て素晴らしいと思う。本当に実用化を達成するには製造されたナノ構造の解析に関する研究がもっと必要であろう。

Si 上のナノ粒子の分野で得られた結果が面白い。次の段階として、この結果を実用開発につなげる努力をしたらいいと思う。

この COE プロジェクトで得られた興味深いものに、ION/HVEM 装置があるが、これはイオン・エレクトロン放射化効果の研究において、可能性がかなり高い。このグループの研究の方向がこのたいへん素晴らしいユニークな装置を利用した研究に向けられることを希望する。

このプロジェクトがつくった、物質のナノ解析のための設備機器は最先端を行くものである。STM、薄膜成長、UHV システムの中で統合したナノリソグラフィと FE-TEM の組み合わせは、ユニークな設備である。

いくつかのナノ構造の製造と解析の成果は素晴らしいものである。

他の COE サブプロジェクトとの協力が良い結果を生むことになった。

このグループは COE プロジェクトのこの 5 年間にとても成果を上げてきた。海外の研究グループとの協力体制確立に成功したことで、国際的にもたいへん認められ、高く評価される結果となった。論文には目を見張るものがある。APL, PRL, JAP, NIM-B 等の権威ある国際的な学会誌へのいくつかの重要な発表があり、そして、いくつもの重要な国際学会においての招待講演の共著者にもなっている。このグループの HVEM と UHV-TEM 研究施設は世界でも屈指のものである。

3-2 精密ビームプローブを用いた量子効果の測定：イオンビーム誘起の速度論的過程により制御された金属ナノ粒子構造とその線形及び非線形光学特性

リーダー：岸本 直樹

本テーマ研究は、ナノ粒子構造のユニークな空間的制御とそのナノ粒子系の物性に関するものである。すなわち、イオンビーム誘起の速度論的過程による金属ナノ粒子の2次元配列と、そのナノ粒子系の線形及び非線形光学特性に関する研究である。加速エネルギー60 keVの高線量率の負Cuイオン注入により、非晶質石英、結晶石英並びにスピネル酸化物結晶の絶縁体基板中に、Cuナノ結晶粒子が形成される。粒径はほぼ10 nmで、これは非線形光学デバイス応用に適したサイズである。形成されたナノ粒子系の構造及び注入基板表面の形態については、それぞれ断面TEM観察とタッピングAFM測定により評価を行い、また、イオン注入下のナノ粒子形成過程の光スペクトル及びX線スペクトル測定も行った。ナノ粒子構造及び基板表面形態はイオン線量率だけではなく、表面帯電や温度等、基板境界条件にも大きく依存する。絶縁体中のナノ粒子の自発成長はオストワルド成長過程に支配される。イオン線量率の増加と共に、イオン注入下でのナノ粒子の成長は促進され、粒子分布は基板表面側に向かって、浅くかつ狭くなる傾向を示す。これは深さ方向のイオンビーム誘起駆動力によるものであり、粒径だけではなく空間分布も制御可能であることが指摘される。ある特定の作製条件の下では、ナノ粒子は自己形成的に2次元配列を形成する。この2次元配列形成については、エネルギー勾配による駆動力とスパッタリング効果による自己形成機構を提案した。これらナノ粒子系の形態変化に対応して、線形並びに非線形光学特性もまた、線量率と境界条件に依存して変化する。線形光学特性については、特にそのプラズモンピークを主として、ナノ粒子の速度論的变化の評価を行い、さらにマックスウェル・ガーネット理論による誘電率スペクトルの解析評価も行った。非線形光学特性は縮退四光波混合法とポンプ・プローブ法により評価を行った。2次元的で極薄のナノ粒子系ながらも表面プラズモン共鳴により増大した非線形性とピコ秒レベルの超高速応答性を確認した。これは光デバイス応用において有望な特性である。一方、ナノ粒子の総量を得るという観点（厚膜化）での代替手段として、負イオン注入と基板材料の電子ビーム蒸着を同時に行うダイナミックミキシング法をも確立した。以上のように、絶縁体中に埋め込まれたナノ粒子の空間制御性に対する方法論を開拓し、そのナノ粒子系の大きな非線形光学特性と、その超高速応答性を実証した。

評点（得票数）

総合評価:

評点 A (優) 9

評点 B (良) 1

評点 C (劣) 0

(1名の評価委員は、ふたつに投票した。)

(a) 研究の独創性:

評点 A (優) 5

評点 B (良) 4

評点 C (劣) 0

(b) 科学的価値:

評点 A (優) 7

評点 B (良) 2

評点 C (劣) 0

(c) 達成度:

評点 A (優) 9

評点 B (良) 0

評点 C (劣) 0

(d) 論文の質:

評点 A (優) 5

評点 B (良) 4

評点 C (劣) 0

評価委員コメント

オリジナリティが高く、素晴らしい成果を上げた。

ナノ構造の2D空間的コントロールをするために、ユニークな方法が開発されたのはたいへん面白い。

この研究において新しい合成技術を開発したのみならず、金属材料技術研究所の他の研究や、COEの成果に貢献する解析の技術を発展させてきた。

岸本氏達は広範囲にわたる各種のテクニクを応用の可能性のある研究領域に適用して来た。研究者達は明らかに、創製法と機器の開発に役立つナノテクノロジーの直接的な応用を模索すると同時に、工業用としての可能性にも関連づけている。彼らが確立した最新鋭の機器と技術は将来の材料のナノテクノロジー

ジーに重要な役割を果たすであろう。

論文数はコアグループの約 9%。機器設備は良く、順調に作動しているようだ。科学的価値は私にはよくわからない。共同研究の体制は良いように見える。今後の発展に期待できる。

筑波大学（の学生たち）との共同研究は評価されるべきだ。チームと物質の相互作用は非常に重要である。パテントが 3 つ！ 国内・外との共同研究も良いと思う。

前回の評価委員会から、格段の進歩があったようだ。創製された物質を上手く解析している。非線型光学装置などの実用的な応用例をいくつか示してほしい。

次の段階として、 SiO_2 とスピネル内での Cu コロイド形成の背後にある原子メカニズムを明らかにしてほしい。

将来的に、現在のナノ構造物質をどのようにして実際に非線型光学機器に利用するかを構想を提案してくれると良い。

本研究はたいへん良く計画されている。多くの新しい機器が開発されてきた。日本国外の多くの研究所との共同研究は、特に注目すべき点であり、この研究の成功への鍵になったはずだ。

負銅イオン注入は役に立つ極微構造が得られるところまで進んだ。しかしながら、負イオンの利用が目標とする特性を得るのに重要かどうかははっきりしない。この研究の結果によって、パテント申請をすることになったということは良い兆候である。そして、これまでに始められた国内外の共同研究の数には注目すべきであり、業績として評価する。

3-3 ナノスケール構造で現れる量子効果 ナノ細線の作製とマクロ電極への接続

リーダー：根城 均

当グループでは、ナノ細線の作製とマクロ電極への接続を三通りの方法で達成した。

1) Si(111)表面上の鉛原子配列

Si(111)表面のダングリングボンドを水素原子で終端し、この上に鉛原子を堆積させた。次に走査トンネル顕微鏡(STM)を用いて、両端に電極を有するナノ細線の形状に表面を走査した。比較的高電圧を STM 探針とシリコン基板に印加することにより、水素原子を引き抜き、この領域に鉛原子で構成されるナノ細線を形成した。

2) 原子間力顕微鏡(AFM)のカンチレバーを接触させることによるナノ細線の形成

最初に AFM のカンチレバー先端の探針を金でコートしておく。次に Si(111) 基板上にスルーホールマスクを通して銀のマクロ電極を形成しておく。AFM カンチレバーを Si(111)表面に接触させ銀の電極の間を掃引することで、探針の金原子が Si(111)表面に移り電極間に金のナノ細線を形成した。超高真空中でカンチレバーから STM 探針に交換することで、この細線が途中で切断されていない細線であることを確認した。

3) 金クラスターの堆積によるナノ細線の形成

Si(111)基板上にスルーホールマスクを通して金のマクロ電極を形成しておく。また STM 探針を金でコートしたものをマクロ電極の間隙で Si(111)の上に保持し、探針と Si(111)基板の間に比較的高電圧を印加する。この高電界により金のクラスターが探針から引出され Si(111)基板上に堆積される。探針を電極の間で掃引しながら高電圧を印加することで一連のクラスターを電極間に並べナノ細線を形成した。このようなナノ細線を通る電子の伝導特性が低温・超高真空中で測定されている。

評点（得票数）

総合評価:

評点 A (優) 8

評点 B (良) 2

評点 C (劣) 0

(a) 研究の独創性:

評点 A (優) 10

評点 B (良) 0

評点 C (劣) 0

(b) 科学的価値:

評点 A (優) 10

評点 B (良) 0

評点 C (劣) 0

(c) 達成度:

評点 A (優) 4

評点 B (良) 5

評点 C (劣) 1

(d) 論文の質:

評点 A (優) 6

評点 B (良) 4

評点 C (劣) 0

評価委員コメント

内容のある成果が得られているが、今後の進展により期待したい。

種々のナノ細線の導電率を異なる温度で測定するのはとても重要である。この目的の為にこのグループで開発した 4 点プローブシステムはたいへん利用価値がある。このシステムは早急に完成されるべきである。

新しい科学技術にインパクトを与える可能性の高い、実に興味深い研究をしてきた。

長い金属の鉛原子鎖創製開発は、超伝導性の基本的問題の研究にとって、たいへん重要である。

根城氏が金属材料技術研究所のメンバーとして加わったことは重要であると感じる。

成果の数々には、実に感銘を受けたし、重要な問題を解決する可能性も高い。解析がさらに進むにつれて、量子細線における量子効果などの基礎的科学の問

題解決に多くインパクトを与えるであろう。

根城氏のグループは新しいアイデアと概念の革新者たちである。金属材料技術研究所での研究に関して、新しいアプローチを促進してきたことで、COE プロジェクトにおいて重要な役割を果たしている。また、国外の研究所だけでなく、IBM チューリッヒ研究所などの企業の研究所などとも連携を深めて来た。彼らはナノ細線でナノ機器を接続するナノ技術と同様に、自己組織化による単原子線の超ナノ技術を成功させた。論文も素晴らしいし、国際交流も盛んに行われている。COE プロジェクトを通して、金属材料技術研究所は、コア研究と、創製と計測の究極の限界に必要な原子的なサイズの構造の創製技術に欠かせない、幅広い走査プローブ法を獲得した。素晴らしい。

コア研究の論文の約 18%を占める。発表は上出来ではなかったし、やや、混乱している。投資額を考慮に入れ、シンポジウムでの他グループの発表結果とを比べると、研究成果は今ひとつのように私には思える。結果は断片的で、写真の質が悪い。単電子トランジスターの開発にこの結果がどのように役に立つのかは今だ明らかではない。この点を改善するように、より一層の努力が望まれる。

根城氏はCOEの中で最もセミナー開催と海外よりの研究者と招聘するのに熱心である。ナノ線細(Pb 鎖)はナノエレクトロニクスの中でも、最も難しい問題のひとつであり、面白い物理的現象の可能性がたいへん高い。シンポジウムでの発表は最高の出来ではなかったようだ。

この研究はたいへん重要であり、興味深い。COE 全体の中でも重要な役割を担うべきである。この意味では、ひとつも著しい結果を生んでいないことは残念である。ことに、このグループの研究主題が「ナノスケール構造で現れる量子効果」であるので、形成されたデバイス上で、いくつかの新しい量子効果が研究・観察されるべきであった。

得られた結果はとても興味深い。この主題で基礎研究が続けられることを希

望する。この時点では応用を考える必要はなく、未知の現象を発見することに集中するべきであると思う。

このプロジェクトでは数種の技術を用いて、ナノ細線の形成にかなりの努力が費やされた。一定の成果はあったが、将来の「工業的な」実用化に向けて最も有望な方法はどれかという見通しに欠ける。同様に、結果の解析はまだ充分に進んでいない。

根城氏はたいへん難しい問題に取り組んだ。残念ながら、全力を傾けたものの、前回の評価委員会の時から目標に近づいたようには見えない。たぶん、あまりにもたくさんのシステムと技術を試しすぎたのではないだろうか。最も可能性のありそうなひとつかふたつの方法に的を絞った方がいいだろう。

3-4 先進基板用単層薄膜の作製： 先進表面改質のための六方晶窒化硼素膜 創製

リーダー：土佐 正弘

ナノサイズ構造の先進材料を原子操作で創製するためには、基板上で連続一貫して単原子操作ができる原子レベルで超清浄な環境のみならず、格子不整合のないナノ結晶成長促進ができる先進基板が基盤技術として劣欠である。したがって、本研究では、量子効果発現ナノ構造創製のための極高真空一貫プロセスの構築、および、単原子構造操作のための先進基板の開発を行った。

1) 六方晶窒化硼素層の偏析創製

ヘリコン誘導波励起コスパッタ法により成膜プロセス制御して銅基板上に銅と窒化硼素の混合膜を作製し真空中で加熱調整することによってほぼ全表面に窒化硼素層を均一・一様に創製することに成功した。この窒化硼素層は、電子線回折像から六方晶系結晶格子 c 面(0001)が優先成長していることが示され、表面原子間力計測から約 1nN と焼結体の値とほぼ同じ微小ファンデルワールス力を持つとともに、トンネル電流測定から 3eV まで良好な電気絶縁性があること等が示された。したがって、本研究で創製した偏析六方晶窒化硼素層はその低い垂直水平原子間力相互作用と高い電気絶縁性の点でナノ構造創製用膜基板として有望であるといえよう。

2) 六方晶窒化硼素層のナノ構造

コスパッタ成膜からの六方晶窒化硼素層偏析創製プロセスのナノ構造形態について 1MeV の超高压透過電子顕微鏡を用いて古屋グループと共に検討した。電子顕微鏡観察の結果、混合膜の作製時のアモルファス構造から六方晶窒化硼素結晶層が形成される様子が格子像として明確に観察されるとともに、混合膜作製により発生した歪みエネルギーを低減するために六方晶窒化硼素層の創製が促進されたものと考察することができた。

評点（得票数）

総合評価:

評点 A (優) 6

評点 B (良) 2

評点 C (劣) 0

(a)研究の独創性:

評点 A (優) 6

評点 B (良) 2

評点 C (劣) 0

(b)科学的価値:

評点 A (優) 6

評点 B (良) 2

評点 C (劣) 0

(c)達成度:

評点 A (優) 4

評点 B (良) 4

評点 C (劣) 0

(d)論文の質:

評点 A (優) 4

評点 B (良) 3

評点 C (劣) 1

評価委員コメント

ナノ構造創製用膜基板としての六方晶窒化硼素層はまだ作られていないが、原子レベルで、きれいで、平滑な六方晶窒化硼素層を創製するという目標に到達するようにこれからの展開に期待する。

異なる物質を基板にして、同じような研究を行うと面白いかもしれない。

この分野にはあまり詳しくない。グループは、生産性があり、注目すべき結果も出しているようだ。しかしながら、私は世界的な研究情勢を知らないので、この研究を適切に評価することができない。

極高真空一貫プロセスは世界に先駆けての成果で、金属材料研究所に独自のものだ。極高真空一貫プロセス技術のさらなる開発を進めるべきだと思う。これはナノエレクトロニクス機器の創製法に技術的に重要な役割を果たすかもし

れないからだ。克服しなければならなかった問題と、それらを解決してきた経験は重要なデータであり、将来のシステムにとっても貴重である。未来への構想があり、賞賛に値する。窒化硼素の研究は極高真空一貫プロセスの機器操作に重要であり、このグループはこの分野で広範囲の解析技術を駆使して、詳細に渡る研究をした。原子レベルでの超清浄な環境は最優先で研究されるべきである。装置を本当に評価し、その操作を十分に解析するには極高真空一貫プロセスのもっと厳しいテストが行われるべきである。研究の進展状況は素晴らしい。

論文は、コア研究の約 4%。UHV 浮遊輸送用の設置は素晴らしく、利用価値があるだろう。ただ、今のところ、テスト段階ではある。このグループは人手がかなり足りないようだ。この点は評価をする時に考慮に入れるべきである。装置の設置は COE プロジェクトがカバーする全般の研究に将来必ず役立つだろう。

窒化硼素はさまざまな応用にたいへん重要であるようだが、この研究の科学的価値と独創性を評価することができない。共通の主題である原子スケールの構造とどのような関係があるのか、明らかでない。

他のグループに比べて、予算は少ないが、良い結果を出している。

この研究プロジェクトの次の段階として、基板上にナノ構造を作るのに充分利用できる六方晶窒化硼素基板の不活性な特性に関して、研究テーマを見つけるのが良い。

有能なリーダー、最新の技術、独創性のあるアイデア、はっきりと定められた目標、きちんと定められたスケジュールによって、このプロジェクトに注目に値する成果がもたらされた。

創製した表面を金属材料技術研究所の誰が利用するのか、私には明らかでは

ない。次の段階としてはすでにナノ構造を作り、解析しているほかのグループと共同で研究すべきである。

3-5 2次元物質と強相関物質の量子効果

リーダー：木戸義勇

種々の先進材料の量子効果が金材研強磁場マグネットを用いて研究されているが、研究遂行に当たっては、多数の試料の作製技術開発と多彩な計測技術開発が行われた。

- 1) 光学特性と輸送特性についてGaAs/AlGaAs系で集中的な研究が行われた。そして、量子ホール効果状態で光ルミネッセンス・スペクトルが著しく変化することを見いだした。
- 2) CdTe/CdMgTe および CdMnTe/CdMgTe 量子井戸系では光ルミネッセンス・スペクトルとサイクロトロンを測定し、量子占有数が整数に等しくなった時特徴的な現象が現れるのを発見した。
- 3) 有機伝導体BEDT-TTF塩については磁気輸送効果が極低温強磁場を研究され、高速振動現象、塊状試料による量子ホール効果などの新量子現象が見いだされた。
- 4) 無機物のスピン・パイエルス物質CuGeO₃と其の関連物質が遠赤外領域の磁気光学的手段で測定され、新しい特徴的な音響線を見いだした。さらにこの線は磁場誘起された不整合相で磁化に比例して分裂する事を発見した。
- 5) 結晶量子計算機材料として注目されているセリウム化合物半導体CePについて低温強磁場輸送特性及び核磁気共鳴の手法で詳細に実験した。磁気共鳴線幅についての知見を得ると共に、正確な磁気相図を初めて作製した。
- 6) その他、多くの希土類化合物について強磁場磁化課程、ドハース・ファンアルフェン効果、比熱更に中性子回折実験が行われ様々な知見が得られた。
- 7) 大きな帯間エネルギーを持つ半導体GaN, ZnS, ZnOについて帯間エネルギーを第一原理計算であるGW法帯構造計算手法で求めた。同法の実用化により、従来、大きくかけ離れていた計算値が実験値をほぼ再現する事に成功した。
- 8) 温度可変走査プローブ顕微鏡と伝導冷却・室温大空間超伝導マグネットと組み合わせることで、磁気ドメインの磁場依存性を撮影することに成功した。
- 9) 比熱測定を200mKに至る超低温と20T強磁場の2重極限状態で測定できる装置の開発を行った。複合極限環境でドハース・ファンアルフェン効果に伴う比熱の振動を捉えるのに初めて成功した。

評点 (得票数)

総合評価:

評点 A (優) 10

評点 B (良) 0

評点 C (劣) 0

(a) 研究の独創性:

評点 A (優) 10

評点 B (良) 0

評点 C (劣) 0

(b) 科学的価値:

評点 A (優) 10

評点 B (良) 0

評点 C (劣) 0

(c) 達成度:

評点 A (優) 10

評点 B (良) 0

評点 C (劣) 0

(d) 論文の質:

評点 A (優) 10

評点 B (良) 0

評点 C (劣) 0

評価委員コメント

材料科学にとって重要な多くの興味深い現象が明らかになった。それらは、基礎材料科学に貢献するだろう。

2年前、このグループは強磁場しかなく、サンプルの測定に必要な実験装置を持たなかった。この2年の間に数種の実験装置が開発され、これらの装置はいくつもの興味深い結果を生み出してきている。このグループの今後に期待する。このグループの論文の量は賞賛に値する。

Cu-Ag などの材料開発は世界中に顕著な影響を与えた。金属材料技術研究所のあげた成果は他の磁場センターでの成功に劣質なものである。

このグループの種々の研究はよくバランスがとれている。研究計画には強相関システムにおける最も難しい研究なども含めている。例えば、遠赤外線、CuGeO₃ (不整合相) のフォノン研究、無機導体の研究はたいへん素晴らしい。

木戸氏が外部の研究グループとの協力体制を持ち、学生を研究に参加させて

きたことはたいへん意義のあることである。

青木氏が転出したことは本当に残念である。

計測技術と設備の開発は最上級のものであり、それらがバランスのよく取れた材料開発を生んでいる。木戸氏は磁場研究施設の設備の開発において、原動力となっており、これらの設備は施設の成功に劣欠である。

特に単結晶に見られるような材料の成長の強調は世界に先駆ける磁場研究所の将来を決定するものである。

この研究所は走査プローブ顕微鏡などの磁場研究において、とてもユニークな機器を開発した。

900MHz/1GHz マグネットの開発は全く素晴らしい成果である。

質・量ともに論文等の生産性は実に優れている。

プログラムが外部に対して開放的であることも、評価される。

高温超伝導物質と、マグネットの開発は世界で指折りのものである。多岐に渡る成果は他に類を見ない。900MHzの実績は世界に誇れるものである。オックスフォードと米国 NHMFL はこの技術の開発に 6 年以上も費やしている。金属材料技術研究所は、900MHz NMR を記録的な早さで完成させ、次の 1GHz NMR 研究をする段階に到達した。

木戸氏は強磁場操作の為に LT STM を作った。このことは彼の強磁場における経験とともに、彼の研究活動に重要で新しい方向付けをすることと思う。彼の研究グループはたいへんプロダクティブで、国際的にもこの分野のエキスパートとして認められている。

中核グループの 49% を占める論文数には圧倒される。これは COE プロジェクトが始まって以来、2/3 の増加である。

いろいろな測定技術が開発され、この中のいくつかはとても革新的であり、ユニークである。

国際的に見ても競争できる多くの実験が行われ、なかには新しいアイデアもある。

このグループの最大の強みは第一級の実験には欠くことのできない、サンプル準備用の素晴らしい設備である。サンプル準備技術(MBE、イオンビームリソグラフィ)と、分析から判断する限りでは、この研究はナノサイズ材料の方向に向かっているように見える。炉の種類の高さは素晴らしい。マグネット上の SPM とはユニークである。

ユニークな機器を備えた世界第一級の研究施設である。すばらしい論文を出しているたいへん活動的なグループである。以下の3点は特に評価できる。

- a) 大学からの多くの学生
- b) 結晶成長の使用は研究所全体の将来にとって、たいへん重要である。
- c) クローズドサイクル超電動マグネット(NMR マグネット)のついた走査型顕微鏡などの新しいシステム開発

MBE が最適な方法で機能させられるかどうかは人手が充分とは言えないので、疑わしい。

このグループはたいへん多くの素晴らしい結果を生み出し、そのレベルは世界第一級である。論文の数の多さはCOE プロジェクトの約半数を占めることは、特筆に値する。このグループがすばらしい各種の強磁場施設と提携をしており、外部の利用者との相互活動により、将来的には研究活動がさらに進展するであろう。

このプロジェクトで開発された立派な機器が国内の研究者誰にでも利用できる施設になるといいと思う。

リーダーが教授であることで、東京とつくばの大学生が研究に参加することができるのは際立った特徴である。このことはプロジェクトにもっと必要な人手を得るにはどうしたらいいかの良い参考になると思う。

たいへん生産性の高いグループである。

4 サポート研究

4.1 強磁場

(1) 強磁場ステーションにおけるマグネット開発

リーダー：木吉 司

金属材料技術研究所で実施されている COE プロジェクトに対して、世界最高レベルの強磁場環境を提供することが強磁場ステーションの重要な役割である。このために強磁場ステーションでは新しいマグネットの開発と付帯設備の改良を行っている。この結果として、現在室温ボア径 52mm で 30 T の磁場をユーザに定常的に提供するに至っている。また、1999 年 9 月には室温ボア径 32mm で当時の定常磁場の世界記録となる 37.3 T を発生しており、2000 年 6 月からユーザに提供する予定である。さらに、新しく開発した超伝導線材を用いることによりプロトンの共鳴周波数が 900MHz を越える NMR マグネットを開発した。

(2) COE サポート研究における磁場クロマトグラフィーの開発

リーダー：小原 健司

極限環境関連技術の整備の一環として、磁気クロマトグラフィー技術を開発するとともに、その分離メカニズムをコンピューターシミュレーションにより明らかにした。本研究で開発した計算機シミュレーターを用いて、対流（液体の流れと磁気力）と拡散による微粒子の移動過程を精密に模擬できることを示した。すなわち、このシミュレーターを道具として使用することにより、磁気クロマトグラフィーの設計とその動作条件を詳しく求めることができるだけでなく、もっと一般的な問題である強磁場高勾配磁界下の流体中での粒子の挙動予測ができるようになった。

4.2 表面解析

表面解析のためのスピン偏極された準安定ヘリウム原子線の発生

リーダー：山内 泰

表面に作られたナノ構造は、電子の局在化のためにバルクより強い磁性を示すことが予測される。山内らはスピン偏極・準安定脱励起分光法を開発することにより、表面における電子スピンを計測し、本方法がスピン量子デバイスのビット情報検出法につながることを示した。

4.3 表面改質

(1) 化合物半導体のナノ構造の創製と評価

リーダー：小口 信行

本研究は主にコア研究の一つである木戸博士グループの研究を支援することにある。サポータリング研究において開発した新しい製造方法により作製された GaAs/AlAs と InGaAs/GaAs 量子ドットの量子サイズ効果を強磁場中におけるフォトルミネッセンススペクトル測定により観測した。これらの共同研究で3つの論文を発表した。

(2) 薄膜の表面組成の自己制御法とその電界電子放出源への応用

リーダー：吉武 道子

自己組成制御性を有する原子スケールの構造を作製することができる表面偏析現象について、偏析表面生成の熱力学と速度論に関して研究を実施し、蒸着薄膜の表面への基板金属の偏析挙動を吸着エネルギーから予測する汎用的方法確立した。さらに、自己組成制御性を有するこの原子スケール構造を表面に作製し、仕事関数が小さくかつ自己安定性を有する表面を作製することに応用した。

評点（得票数）

サポーター研究が COE のコア研究に十分に貢献したと思うか？

思う 10

思わない 0

評価委員コメント

多くの重要な成果が得られた。金属材料技術研究所が強磁場 NMR プログラムをどうするつもりなのかは明らかではない。金属材料技術研究所は媒体分析 NMR に焦点を合わせるべきであろう。なぜならば、それが材料とナノ技術の研究により直結するからである。

支援研究メンバーはすばらしい仕事をした。評価委員会の忠告に従い、支援研究は大幅に改善された。このような数々の素晴らしい機器が設置された今、各研究グループのそれぞれの研究者が機器設備を共用し、共同研究を強化していったほしいと思う。過去 5 年間の変化には目を見張るものがある。もし、これからも必要な予算を使うことが許されるならば、ナノ技術の分野で世界 10 位以内に数えられる研究所になるだろう。そうなるためにはこれからも生産性や、開発も指数関数的に伸ばしつづけなければならない。

強磁場研究施設は金属材料技術研究所の中で最も貴重な財産である。特に、超伝導磁石の開発は傑出している。これが今後格段の進歩につながるだろう。ハイブリッドマグネットはもう間もなく限界に達するだろう。しかし、金属材料技術研究所のパルスマグネットの開発はかなり有望である。このプログラムは近年縮小されてきたようだが、再びこの開発に目をむけてもいいのではないかと。木戸氏のグループも、このプロジェクトに取りかかっているようだ。

世界第一級の施設開発と最新の機器は、本当に素晴らしい。

5 全体評価

「コア研究」の研究グループは、およそ 315 の論文を発表し、国際会議では 239 回研究結果を発表した。この 5 年間に発表された論文数は飛躍的に増えてきた。各研究グループ間の協力も推進され、多くの招聘研究者及び COE フェローが、金属材料技術研究所以外の他の研究機関との研究協力に貢献してきた。COE プロジェクトにより、金属材料技術研究所はナノテクノロジー研究センターの設立に成功したが、同時に金属材料技術研究所全体の研究にとっても本プロジェクトは良い刺激となった。金属材料技術研究所はこの COE プロジェクトの枠組に従った研究を続けるべきである。

評点 (得票数)

評点 A (優) 10

評点 B (良) 0

評点 C (劣) 0

評価委員コメント

COE プロジェクトは金属材料技術研究所でのナノ構造と新材料のような新しい重要な研究方向に向かって順調にスタートを切ったようだ。仕事のレベルは、たいへん高い。一般の人々 (納税者) に科学的・技術的成功をもっと理解してもらう努力をすると良い。

(私は、APF-5 会議の第 1 日と第 2 日に出席できなかった為、私の評価は、成果報告書と、3 月 10 日のプレゼンテーションに基づいたものである。)

コアグループのほとんどについていえることだが、たいへん興味深い研究を行っている。特に、STM、TEM 及び、強磁場を利用した研究はすばらしい結果を生みだしている。しかし、もしできることなら、この類の研究プロジェクトにおいては、研究成果の実用についてもっと考慮されるべきである。

研究成果の論文発表はなかなか良いと思う。

COE プロジェクトは顕著な成功を収め、世界における科学界での金属材料技術研究所の地位を高めた。

COE の本当の強みのひとつには、フェローシップとセミナー開催が挙げられる。

これらは金属材料技術研究所の中で、研究活動を促進する重要な役割を担ってきただろう。金属材料技術研究所がその研究と施設を次世代の日本人科学者の教育により一層役立ててほしい。コア研究とサポーター研究における学生数は気落ちするほど少ない。この問題は科学技術庁と文部省が統合されれば、改良されるかもしれない。

COE プロジェクトが始まって以来、日本のナノテクノロジー研究分野の将来にとって、科学的または社会的評価に関連のある多岐にわたる前向きな変化にはめざましいものがある。また、これらの前向きな変化は COE に関連した国内の提携研究施設と同様、全体としての金属材料技術研究所における科学的生産性の目を見張るような向上をも示唆している。ことに、科学的発表に関しては質量ともに、すばらしいレベルに急成長してきている。今後の研究の構造基盤は最新の技術の確立によって到達されてきた。数多くの海外よりの招聘研究者やポスドクなどがこのことに貢献してきているし、また若い日本人研究者と接することで、教育や経験を通して、コミュニケーション技術の向上に役立ってきた。英語でのコミュニケーション能力や、研究発表のテクニックの質は非常に改善された。COE プロジェクトのメンバーは評価委員会のアドバイスを従って、懸命に努力をしてきた。たいへん、すばらしい。

研究はプロジェクトの中で、とても向上してきたと思われるし、全体として良かった。国際的な共同研究体制は著しく進歩したが、所内的にはさらなる改善が望ましい。評価委員会のアドバイスを従ってよくやったと思う。

研究施設は、大変良い。COE プロジェクトは金属材料技術研究所のイメージアップと、科学的論文の増加に貢献してきた。

このプロジェクトは全体として、成功に終わったと思う。多くの立派な結果が生まれてきた。金属材料技術研究所からの論文等の発表数はこの 5 年間に驚く程増加した。2 年前の中間評価でのアドバイスは次の 2 年間にプロジェクトに反映されている。例えば、それぞれの研究グループ間や、外部の研究グループとの協力も強化されてきた。この研究プロジェクトが新しい方向づけをするにあたって、これからの数年間は実際の装置応用実現に向かってこれからも努

力を続けて行ってほしい。このプロジェクトからひとつふたつ新しい材料が生まれ出されることを熱望するものである。また、同時に、物理学上の新しいコンセプトが創り出されるといいと思う。

全体として、COE プロジェクトの研究者たちはその分野では有能であり、それぞれのプロジェクトを注目に値する成功へと導いた。このプロジェクトではいくつかのユニークな装置が作られた。これらの装置はいずれ最先端に行くことになるであろう。

COE プロジェクトの分野での活動をさらに強化するために、プロジェクトリーダーたちをこれからの同様の研究体制において、支援していくことを薦める。より効率良い開発と施設の利用の為には特に1-2年という期間での、目的を明確にした国際協力が良いのではないだろうか。

COE プロジェクトの過去5年間の進歩には感心する。論文の増加の勢いはこの進歩の良い例である。別の例は多くのCOEメンバーがサブプロジェクト間の協力にはっきりとわかる興味を示したことである。最後に、COE プロジェクトによって触発された結果として、COE グループの国際的な名声が飛躍的に高まったことがある。この記録的な進歩を続けるために、今後、新しく予算が組まれることを祈るものである。