戦略的創造研究推進事業 ナノテクノロジー分野別バーチャルラボ

研究領域「高度情報処理・通信の実現に向けた ナノファクトリーとプロセス観測」 研究課題「高機能ナノ立体構造デバイス・プロセス」

研究終了報告書

研究期間 平成14年11月~平成20年03月

研究代表者:松井真二 (兵庫県立大学高度産業科学技術研 究所·教授) 1 研究実施の概要

(1)研究の背景

半導体製造技術プロセスの研究開発の進展とともに、2次元超微細加工技術の発展はめ ざましく、ビーム径が数 nm の電子ビーム(EB: Electron Beam)を基板上に形成された感光 薄膜に照射、現像することにより、10nm レベルのパターン形成が可能となっている。この 電子ビームを用いたナノリソグラフィ技術により、単電子トランジスターやゲート長 10nm の MOS デバイス等の先端ナノデバイスの作製および特性評価が行われている。このように、 二次元での超微細加工技術は研究開発レベルではほぼ確立されてきている。今後の超微細 加工技術の研究開発方向は、2次元から3次元への多次元化であり、これに伴う多機能・ 高性能化さらにこれまで実現できなかった新機能デバイスの研究開発である。

我々は、2000年に集束イオンビームによる化学気相成長法を用いて、これまで実現でき なかった 100nm 以下の任意の3次元立体構造を実現する世界初のオリジナル技術を提案し た。ミクロンからナノメートルサイズの高精度かつ任意の材料で製造することができる3 次元ナノテクノロジー技術であり、ナノエレクトクトロメカニクス、ナノ光学、バイオナ ノ計測などへ、サイズおよび形状の任意性からみて、現状の技術を超えた、機能素子とし ての応用展開が可能である。

(2)研究構想および実施

本研究課題は、集束イオンビーム励起表面反応堆積技術(FIB-CVD)を用いて、「高機能ナ ノ立体構造デバイス・プロセス」の創生を目的としている。図 1.1 に研究構想および実施 体制を示す。高機能ナノ立体構造形成の立体造形技術を、任意のナノ立体構造形成を可能 にするために、FIB-CVD ナノ立体構造描画システムのソフト・ハードを開発した。これによ り、任意のナノ立体構造デバイス形状作製が可能となった。次に、(2)FIB-CVD は TEM 試料 作成、フォトマスク修正等で汎用されているが、その堆積薄膜の材料物性は未解明であり、 今回ラマン分光、XAFS、RBS、ERDA 等の分析手法を駆使して、堆積薄膜材料物性を明らかに した。さらに、(3)ナノ立体構造デバイスを設計・作製するために必要となるナノ立体構造 体の基礎物性評価として、ヤング率、導電性等の機械/電気特性評価を行った。(4)これら 基礎物性をもとに開発した描画システムを用いて、①ナノ立体構造エレクトロニクス、② ナノ立体構造メカニクス、③ ナノ立体構造バイオニクス、への応用展開を行った。



図 1.1 研究構想および実施体制

(3)研究成果の概要

①ナノ立体構造形成技術

ナノ立体構造描画システムの研究開発

これまでは、XおよびYの単純なビーム走査によりナノコイル等の対称系の立体ナノ構造を作製してきたが、自由立体ナノ造形を可能とする3次元描画システムを独自開発した。 3D-CAD で作成したサーフェースモデルからスキャンデータ(スライスデータおよびボクセルデータに分割)に変換させ、FIB-CVD で離散的に描画することでFIB-CVD により、任意の立体構造物を造形する立体ナノ構造描画システムのハードおよびソフトを独自開発した。

②材料構造物性評価

Ga FIB-CVD による堆積薄膜評価

フェナントレンをカーボンソースとして用いて FIB-CVD 法で作製した薄膜の基本構造が イオン源に用いた Ga を含むダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜であることを確認した。 これがアニールにより局所構造が変化するかを解明し、この変化が物性にどのように影響 するかを突き止めた。 微視的に Ga が DLC 膜中から脱離する過程を観測し、FIB-CVD DLC 膜中の Ga 原子は C=C 二重結合を開裂して炭素骨格に結合し、Ga 原子が脱離することで C=C 二重結合が再構成されることを突き止め、DLC 薄膜の成膜過程と熱処理による構造変化の 過程を明らかにすることに成功した。

AuSi FIB-CVD による堆積薄膜評価

Au または Si イオンを用いた FIB-CVD 法による堆積物形成の Ga を用いた場合との違いはどの ように現れるかを明らかにすることために、フェナントレンガス雰囲気下でのAuまたは SiFIB 照射に よる堆積物形成の確認と、イオン種による堆積物形成プロセスの違いや堆積物の物性の評価を行 った。

③立体ナノ構造特性評価

ナノ構造体のヤング率

FIB-CVDで合成されるナノ構造体の重要な応用分野がナノメカニクスに対応した構造体材料である。ナノピンセットによる細胞オルガネラの操作や、ナノ振動子による微量物質検出など、いずれの場合も機能の最適化には、ナノ構造体の硬さを充分に制御する必要がある。さらに研究の中で FIB-CVD構造体はタングステンカーバイドと同程度の硬さを有していることが判明した。

アモルファスカーボンピラーの固相反応によるグラファイト化

FIB/EB-CVD により形成したアモルファスカーボン中を動く鉄微粒子の移動に伴う固相カ ーボンナノチューブ形成を見出した。ビーム励起反応により形成したアモルファス炭素の結晶化 により、不完全ながらも多層ナノチューブを形成できる可能性を見出した。本技術を用いることによ り、任意の位置、方向、長さ、さらには直径をもつカーボンナノチューブを形成できる可能性があり、 電子デバイスやセンサーなどへの応用が期待できる。

④立体ナノ構造形成の応用

ナノ立体構造エレクトロニクス

・空中配線の作製と評価

集束イオンビーム装置に計算機制御パターン描画発生装置を付加してビームのスキャン方 向と速度、ブランキングを制御することにより、ナノスケールの空間内に堆積物を成長さ せる 3 次元ナノ配線作製を行った。さらに、各デバイス間を空中配線で相互接続すること で、3 次元情報ネットワーク実現の可能性を示した

・電子線バイプリズムの作製と評価

空中配線技術の応用として、電子線バイプリズムの作製を行った。FIB-CVD による空中配 線技術を用いることにより、これまでよりさらに細いワイヤー径 80nm の電子線バイプリズ ムの作成に成功した。このバイプリズムを用いてコントラスト、縞質共に良好な干渉像を 得ることができた。

・微小電子エミッターの作製と評価

2端子電極を有したガラスキャピラリー上にFIB-CVDを用いて微小電子エミッタの作製 を行った。冷陰極である DLC チップ先端の曲率半径は 50nm であり、DLC チップ先端と DLC アノードの距離は 500nm である。電界電子放出特性評価を行った結果、180V を閾値電圧と して電子放出が起こった。また、測定した I-V 曲線からの F-N プロットにより測定電流が 電界電子放出である事を確認した。

ナノ立体構造メカニクス

・静電アクチュエータの作製と評価

静電反発力を利用したナノピンセットを作製・評価した。電圧印加によってコイル構造 に蓄積した電荷が、コイル構造が周期的に重なっているため静電的に反発し、電圧を 0N/0FF することで伸縮するアクチュエータとして機能させることができる。このコイル型静電ア クチュエータの伸びを 0-500V の範囲で制御することができた。このアクチュエータの動作 確認を光学顕微鏡下で行った。その伸び率は約 1.7nm/V であり、ナノレベルでの制御が可 能であった。

・ナノコイルの機械的特性評価

FIB-CVD による独自の立体ナノ構造形成技術を用いて、3 次元ナノシステム(NEMS)の基本 構成部品として重要である、世界最小の DLC ナノスプリングの作製に成功した。DLC ナノス プリング特性は、横弾性係数 70GPa, ヤング率 184GPa と通常の鋼スプリングと同様の高強 度・高弾性およびマイクロメートルの伸縮特性を示し,その実用性を実証した。

ナノ立体構造バイオニクス

・バイオ・ナノインジェクターの作製と評価

バイオ・ナノインジェクターの先端を目的に合った形状にすることにより、細胞内の細胞 小器官などに直接、選択的に試薬などを注入することも可能になると考えられる。さらに、 バイオ・ナノインジェクターは注入、吸引プロセスを細胞小器官の大きさや形状に合わせ 精確に作製できるので、実験精度の向上が期待できる。これまでの市販のガラスキャピラ リー先端径は1-0.5µmであるが、FIB-CVDにより先端径100-30nmのバイオ・ナノインジ ェクター作製を可能にした。

・バイオナノツールによる単一葉緑体の操作と計測

一つの葉緑体内部やチラコイド膜の働きを調べることによって光合成のより詳細なメカ ニニズムをしることができれば、太陽電池やバイオハイブリッドデバイスなどへの工学的応 用が期待できる。本研究では、バイオナノツールとして、葉緑体の単一操作および計測を実 現するために、単一葉緑体の任意操作を目的としたフィルタリングツールおよび葉緑体局部 位の計測を目的とした生体ナノ計測電極に関する研究を行った。 2 研究構想及び実施体制

(1) 研究構想

①研究目標

立体ナノ構造形成技術をベースとして、従来の2次元積層構造体である機能デバイスとは異なる 「高機能立体ナノ構造デバイス」の創生、およびデバイス構築に必要となるプロセス技術の構築を 行う。

具体的研究テーマは以下の4テーマである。

- ・ 任意のナノ立体構造形成を可能にするために、FIB-CVD ナノ立体構造描画システムの ソフト・ハードを開発する。(兵庫県大)
- ・ 堆積薄膜の材料物性は未解明であり、ラマン分光、XAFS、RBS、ERDA 等の分析手法を 駆使して、堆積薄膜材料物性を明らかにする。(物材機構/大阪大)
- ・ ナノ立体構造デバイスを設計・作製するために必要となるナノ立体構造体の基礎物性 評価として、ヤング率、導電性等の機械/電気特性評価を行う。(NEC/筑波大)
- これら基礎物性をもとに、開発した描画システムを用いて、①ナノ立体構造エレクト ロニクス、② ナノ立体構造メカニクス、③ ナノ立体構造バイオニクス、への応用展 開を行う。(兵庫県大)

②5年間の研究計画概要および研究グループの役割分担 表 2-1 および表 2-2 に各研究グループの研究計画概要および役割分担を示す。

項目	平成 14 年度 (5 ヶ月)	平成 15 年度	平成 16 年度	平成 17 年度	平成 18 年度	平成 19 年度
FIB-CVD によるナ ノ立体構造作成装 置・描画システムの 設計・試作および性 能評価	•	装置・描画 システム 設計・試作	性能評価			
空中配線技術と特 性評価						
			空 中 配 線 形成	電気特性 評価	応用実験	
ナノエレクトロメ						
カニカルデバイス の作製と評価			コイル構 造特性評 価	電子エミ ッター作 製評価	応用実験	•
バイオツールの作 製と評価			ナノイン ジェクタ 一作製	ナノマニ ピュレー タ作製	応用実験	•

表 2-1 ナノ立体構造デバイス研究(兵庫県立大学グループ)

表 2-2 ナノ立体構造材料物性・特性研究(NEC/筑波大/物材機構/大阪大)

項目	平成 14 年度 (5ヶ月)	平成 15 年度	平成 16 年度	平成 17 年度	平成 18 年度	平成 19 年度
EB-CVD によるナノ 立体構造作成装置 の設計・試作 (筑波大)		★置シス テム設 計・試作	性能評価	立 体 ナ ノ 構造形成		
ナノ立体構造体の 材料物性評価 (筑波大/NEC)	•	ナノピラ ーのヤン グ率測定			ナノ構造 体材料特 性評価	•
FIB/EB-CVD による カーボンナノチュ ーブ成長メカニズ ム (NEC/筑波大)			 オーボン ナノチュ ーブ固相 成長 TEM 観 察 		成 長 メ カ ニ ズ ム 研 究	選択成長
Ga FIB-CVD による 堆積物性評価 (物材機構)	● ラ マ ン 分光	XAFS	RBS/ERDA	ТЕМ	ア ニー ル 効果	
Au-Si 共晶イオン 源からのAuおよび Si イオンビームに よる立体ナノ構造 形成と材料特性評価 価 (大阪大)					 ▲ 立 体 ナ ノ 構造形成 	材料特性 評価

③その後の展開により新しく生まれた目標

・ カーボンナノチューブの固相成長の発見(NEC/筑波大)により、その成長メカニズム研 究を新目標とした。



立体ナノ構造材料特性評価を担当

3 研究実施内容及び成果

3.1 ナノ立体構造デバイス研究グループ (兵庫県立大)

(1)研究実施内容及び成果

①立体ナノ構造形成技術

ナノ立体構造描画システムの研究開発

これまでは、XおよびYの単純なビーム走査によりナノコイル等の対称系の立体ナノ構造 を作製してきたが、図 3.1.1(a)に示す自由立体ナノ造形を可能とする3次元描画システム を独自開発した(特願 2003-54361 JST)。3D-CAD で作成したサーフェースモデルからスキ ャンデータ(スライスデータおよびボクセルデータに分割)に変換させ、FIB-CVD で離散的 に描画することで FIB-CVD により、任意の立体構造物を造形する立体ナノ構造描画システ ムのハードおよびソフトを開発した。基板上に照射するイオンビームの滞留時間、ビーム 電流量や描画間隔を変えることで堆積量の制御をする。自由な形状を描画するためには、 オーバーハングや逆テーパを有する形状の製作が不可欠である。ベクタスキャン方式では、 このような形状の製作が可能である。実験では、フェナントレンガス中の Si 基板上に Ga⁺ イオンビームを照射し、DLC の立体構造体を製作した。本システムを用いて、図 3.1.1(b) に示すように、全長 8.8 µ m の「Star Tree、spaceship Enterprise NCC-1701D の micro model」 を作製し、オーバーハング構造および逆テーパ構造の造形が FIB-CVD により可能であるこ とを実証した。立体構造物の表面粗さは、描画間隔によって nm レベルに制御できる。図 3-1-2 は、T4 バクテリオファージの CAD モデルを用いて FIB-CVD により作製した 3 次元構造体を 示す。



図 3.1.1 独自開発した FIB-CVD 三次元描画システム



図 3.1.2 T4 バクテリオファージの CAD モデルを用いて FIB-CVD により作製した 3 次元構造体

FIB-CVD の 3 次元構造形成における堆積課程を、その場観察することにより、堆積メカニ ズムを明らかにすることができる。実験装置構成図を図 3.1.3(a)に示す。FIB 装置に電子 顕微鏡(SEM)を付加した。図 3.1.3(b)は、SEM によりその場観察を行った FIB-CVD3 次元構 図形成の1分毎の連続写真である。



(a)

図 3.1.3 FIB-CVD によるナノ立体構造形成その場観察システムとその場観察例

②ナノ立体構造エレクトロニクス

空中配線の作製と評価

集束イオンビーム装置に計算機制御パターン描画発生装置を付加してビームのスキャン 方向と速度、ブランキングを制御することにより、ナノスケールの空間内に堆積物を成長 させる 3 次元ナノ配線作製(特願 2003-54362 JST)を行った。さらに、各デバイス間を空中 配線で相互接続することで、3次元情報ネットワークの実現が可能である。本実験では、ア モルファスカーボンの堆積ソースガスである、フェナントレンを用いて、クロスバー配線 や積層配線、任意方向に成長させた配線やリレースイッチ配線、LCR 回路配線(図 3.1.4) やフィルター回路配線等、様々な配線の作製を行った。作製した3次元ナノ配線の組成と 構造を調べるために、(1)TEM-EDX による観測を行った。TEM-EDX の測定結果から、配線部 のコア部がGa、クラッド部がアモルファスCで構成されており、3次元ナノ配線内部のGa と C の分布および位置を特定することができた。また Ga クラッド部の中心位置は配線中心 部より 20nm 下方に位置していることがわかった。20nm は作製に用いた 30keVG a のイオン レンジに対応している。さらに、(2) 作製した 3 次元ナノ配線の電気特性を調べる実験を 行った (図 3.1.5)。この際、ソースガスとして、配線の抵抗率を下げるためにフェナントレ ンガスと共に、有機金属ガスであるタングステンカルボニル(W(CO)。)ガスを同時供給した 混合ガスを用いた。フェナントレンガスのみで作製した配線の抵抗率は100 Ω cm であるの に対し、タングステンカルボニルガスを同時供給して作製した配線の抵抗率は 0.02 Ω cm まで下げることができた。つまり、タングステンカルボニルガスを供給することで、1/10000 まで抵抗率に可変範囲を持たせた配線の作製が可能である。さらに、その抵抗率変化が配 線内の構造変化と、どの様に対応しているのかを調べるために(3)SEM-EDX 電子線スポッ トビームにより、配線内部の元素含有量を調べる実験を行った。測定の結果、タングステ ンカルボニルのガス密度を高めることにより、金属元素である Ga と W の含有量が増加し、 3次元ナノ配線の抵抗率が減少することが明らかとなった。タングステンカルボニルガスの みでの抵抗率は $4x10^{-4}$ Ω cm であり、金属 W の約 100 倍の抵抗率である。





図3.1.4 FIB-CVDで作製したDLCのLCR回路

図 3.1.5 空中配線の抵抗測定結果

空中配線による電子線バイプリズムの作製と評価

空中配線技術の応用として、電子線バイプリズムの作製を行った。従来の電子線バイプリズムの作成は熟練者がフィラメントとなる石英棒をバーナで溶かして引き伸ばし、手作業でプリズムホルダーに張りつけていた。そのフィラメント直径は 500nm 程度である。良い干渉像を得るためにはできるだけ細いフィラメントが必要であり、FIB-CVD による空中配線技術を用いることにより、さらに細い電子線バイプリズムの作成に成功した。図 3.1.6 にFIB-CVD により作製した(a)ワイヤー径 80nm、長さ 10 μm の電子線バイプリズムと(b)印加電圧 193V で得られた干渉拡大像を示している。コントラスト、縞質共に良好な干渉像を得ることに成功した。



図 3.1.6 FIB-CVD により作製した(a)電子線バイプリズム(ビーム電流:1pA、 ワイヤ形成時間: 150 秒、ワイヤー径:80nm、長さ:10 µm)と得られた干渉拡大像(印加電圧:193V)

ナノコイルによる電磁誘導の評価

微小電磁石を隣接して並べ電磁誘導の検証を行った。まず、シリコン基板に四端子電極の作製を行った。左右の配線間の距離は6µm、向かい合う電極同士の距離は4µm。この左右の電極間に橋渡しするように FIB-CVD を用いて電磁石を作製した。同様に向かい合う電極側にも電磁石を作製した(図 3.1.7)。微小電磁石のコイルの直径は 2µm、コイルの高さは11µm、線径は200nmである。向かい合う電磁石の形状は同一とした。一方の電磁石に 1Hzの交流電圧をかけた時に、他方に生じた誘導電流を測定した。図 3-1-8 は正弦波を入力した場合の入力電圧と誘導電流のグラフである。この測定データから、入力電圧を時間微分した値が誘導電流の値と重なることが分る。これは磁束の変化に伴い電磁誘導によって生じた誘導電流であることを示している。



図 3.1.7 DLC ナノコイルによる電磁誘導実験



図 3.1.8 正弦波を入力した場合の入力電圧と 誘導電流

微小電子エミッターの作製と評価

2端子電極を有したガラスキャピラリー上にFIB-CVDを用いて微小電子エミッタの作製を 行った。まず、Al-Ni 電極上に冷陰極(カソード)構造を DLC で形成した。その後、DLC ア ノード構造を Au 電極上に作製した。図 3.1.9 に、2 端子電極を有したガラスキャピラリー 上に作製した微小電子源の SEM 像を示す。

冷陰極である DLC チップ先端の曲率半径は 50nm であり、DLC チップ先端と DLC アノードの 距離は 500nm である。電界電子放出特性評価を行った結果の I-V 特性を図 3.1.10 として示 す。180V を閾値電圧として電子放出が起こった。また、測定した I-V 曲線からの F-N プロ ットにより測定電流が電界電子放出である事を確認した。



図 3.1.9 微小 DLC 電子エミッター

図 3.1.10 微小 DLC 電子エミッターの I-V 特性

③ナノ立体構造メカニクス

静電アクチュエータの作製と評価(特願 2003-143099 JST)

静電反発力を利用したナノピンセットを作製・評価した(図3.1.11)。さらに、コイル型 静電アクチュエータを作製した(図3.1.12)。電圧印加によってコイル構造に蓄積した電荷 が、コイル構造が周期的に重なっているため静電的に反発し、電圧を 0N/0FF することで伸 縮するアクチュエータとして機能させることができる。このコイル型静電アクチュエータ の伸びを 0-500V の範囲で制御することができた。このアクチュエータの動作確認を光学顕 微鏡下で行った。その伸び率は約1.7mm/V であり、ナノレベルでの制御が可能であった。



図 3.1.11 ナノピンセット



図3.1.12 コイル型静電アクチュエータの(a) SIM 画像と(b)動作原理説明図

ナノコイルの機械的特性評価

FIB-CVD による独自の立体ナノ構造形成技術を用いて、3 次元ナノシステム(NEMS)の基本 構成部品として重要である、世界最小の DLC ナノスプリングの作製に成功した。DLC ナノス プリング特性は、横弾性係数 70GPa, ヤング率 184GPa と通常の鋼スプリングと同様の高強 度・高弾性およびマイクロメートルの伸縮特性(図 3.1.13)を示し,その実用性を実証した。 ナノスプリング特性を利用した一つの応用として、走査プローブ用 Si カンチレバー上へ DLC ナノスプリング付き AFM4 端針マルチプローブを作製(図 3.1.14)し、微小凹凸試料物性測定 のための特殊プローブとして実用展開の可能性を実証した。



図 3.1.13 ナノスプリングの伸縮特性評価 線径:110 nm 直径:380 nm



,ĥ,

図 3.1.14 ナノスプリグ付き4端子プローブ

④ナノ立体構造バイオニクス

バイオ・ナノインジェクターの作製と評価

バイオ・ナノインジェクターの先端を目的に合った形状にすることにより、細胞内の細胞 小器官などに直接、選択的に試薬などを注入することも可能になると考えられる。さらに、 バイオ・ナノインジェクターは注入、吸引プロセスを細胞小器官の大きさや形状に合わせ 精確に作製できるので、実験精度の向上が期待できる。これまでの市販のガラスキャピラ リー先端径は1-0.5µmであるが、FIB-CVDにより先端径100-30nmのバイオ・ナノインジ ェクターを作製した(特願 2003-317181 JST)(図 3.1.15)。カタユウレイボヤの卵母細胞 への注入実験によりその有効性を確認した(図 3.1.16)。





図3.1.15 ガラスキャピラリーの先端部に作製し たナノインジェクター (a)SIM像 (b) 断面SIM 像

図3.1.16 バイオナノインジェクターによる カタユウレイボヤ卵母細胞への注入

バイオナノツールによる単一葉緑体の操作と計測

一つの葉緑体内部やチラコイド膜の働きを調べることによって光合成のより詳細なメカ ニニズムを知ることができれば、太陽電池やバイオハイブリッドデバイスなどへの工学的応 用が期待できる。本研究では、バイオナノツールとして、図3.1.17に示す葉緑体の単一操 作および計測を実現するために、単一葉緑体の任意操作を目的としたフィルタリングツール および葉緑体局部位の計測を目的とした生体ナノ計測電極に関する研究を行った。



図 3.1.17 バイオナノツールによる単一葉緑体の操作と計測

(バイオフィルタリングツールによる単一葉緑体捕獲)

図 3.1.18(a)は、フィルタリングツールのオルガネラ捕獲メカニズムを示している。フィ ルタリングツールにより、毛細管現象を利用してオルガネラを吸引し、線径 200nm のネッ ト構造によりオルガネラのサイズによる選別を行うことができる。

図3.1.19(a)はFIB-CVDにより作製したナノネット構造を有するフィルタリングツールの SEM写真である。先端に細部壁に穴をあけるための微小針、捕獲したオルガネラを保持 するための保持台、そしてオルガネラをサイズにより選別するための線径 200nm のネット 構造を有している。本研究では、捕獲対象の葉緑体のサイズが5µmであるため、ネットが 張られたガラスキャピラリーの先端径は7µmに設計した。ネットに張られたガラスキャピ ラリー先端の内径は7µmであり、この部分に葉緑体が一つだけ収まると毛細管現象による 吸引が停止する。つまり、フィルタリングツール先端のサイズが、葉緑体捕獲に適したサ イズに設計することにより、葉緑体が一つだけフィルタリングツールに自動的に吸引され る仕組みになっている。

図 3.1.18(b)にオオカナダ藻の葉細胞からのフィルタリングツールによる単一葉緑体の 捕獲実験の様子を示している。図 3-1-19(b)は葉緑体捕獲後のフィルタリングツールのSE M写真を示している。このように、オオカナダ藻の細胞の中から単一の葉緑体捕獲に成功 した。



図 3.1.18 フィルタリングツールによる(a) 葉緑体捕獲原理図と(b) 葉緑体捕獲実験



図 3.1.19 フィルタリングツールの(a) SEM写真と(b)葉緑体を捕獲後のフィル タリングツール

(生体ナノ計測電極の作製と計測実験)

単一葉緑体の計測を行う際に、作成する計測プローブの高精度位置制御が行えることが 重要である。そのため、ガラスキャピラリーを基盤材料として用いて生体ナノ計測プロー ブに関する研究を行った。ガラスキャピラリーをベースとすることにより、水圧や油圧で 駆動するマニピュレータ及び高精度なPZTマニピュレータなどでの高精度な3次元的位 置制御が可能である。図3.1.20(a)に示すようにプローブ径100nmのDLCプローブ電極を膜 厚100nmのSiO2膜でプローブを覆った構造である。また、プローブ先端のみ、電極である DLCプローブを露出させている。これは、先端部のみで葉緑体内部のチラコイド膜局所エリ アの電位測定を行うためである。

生体ナノ計測プローブの機能性評価のために、膜電位により誘起される膜電流の測定実験を行った。膜の内外には様々なイオンが存在し、膜内外でのそれらのイオン濃度は異なる。そのため、膜には、イオンの濃度勾配に由来する膜電位が存在し、その膜電位を人工的に固定することにより、膜電位に誘起される膜電位の測定が可能である、この電圧固定法を用いて、膜電流測定を行った。図3.1.20(b)に実験模式図を示す。電圧固定法では、参照用電極が必要であり、細く引き伸ばしたガラスキャピラリー外壁をDCスパッタリングを用いてAuをコーティングすることにより参照電極を作製した。図3.1.21(a)は生体ナノ計測プローブによるオオカナダ葉細胞の膜電流計測実験の様子を示す光学顕微鏡写真である。図3.1.21(b)は、計測時間に対する計測電流はゆっくりと増加していき、ゆっくりと細胞内から抜き出すと電流もそれに伴い減少した。この計測における有電流差は0.8nA であった。細胞内の電位は負であることが知られている。そのため OV 固定の電圧固定法において膜電位により誘起される電流が計測される。本実験結果は、FIB-CVD により作製した生体ナノ計測プローブが計測電極として機能していることを示している。



図 3.1.21 ナノ計測プローブによる(a) 膜電流計測実験と (b) 生体ナノ計測プローブ刺入前後の計測電流

(2)研究成果の今後期待される効果

これまで実現できなかった空中配線、ナノアクチュエータ、バイオインジェクター、等 任意のナノ立体構造を実現することができ、ナノエレクトロメカニクスおよびバイオナノ ツール等の広範囲の分野でナノ計測・操作ツールとして活用が期待される。

3.2 ナノ立体構造材料物性研究グループ I (物質・材料研究機構) (1)研究実施内容及び成果

①FIB-CVD 法による DLC 薄膜構造評価

<u>はじめに</u>

フェナントレンを原料ガスとして FIB-CVD 法で成型した構造物の基本構造は DLC であ ることがラマン分光の結果からわかっており、また、ピラーの透過型電子顕微鏡観測やエ ネルギー分散蛍光 X 線 (EDX) からイオン源に用いた Ga がピラー中心に残留していること がわかっている。さらにピラー中の Ga が 600℃のアニールにより脱離することがわかって いたが、DLC 中の Ga の局所構造やアニールによる Ga の詳細な挙動についてはこれまで全 くわかっていなかった。FIB-CVD 法で作製した立体ナノ構造物の硬度・ヤング率・電気伝 導度などの物性がアニールによって大きく変化することが知られているため、アニール効 果を把握することは、FIB-CVD 法による立体ナノ構造物の作製において精確な物性制御を 行う実用化において基本的な要求事項となり、また様々なデバイス展開を図る上でも基盤 情報となる。

まず、アニールによる DLC 膜の基本変化を理解するために昇温脱離質量分析による薄膜 中の Ga の変化を観察した。DLC 膜の基本情報は DLC 膜中に存在する炭素原子の sp2 混成 原子と sp³混成原子の存在比と膜中に含まれる水素含有率であることから、アニールによる FIB-CVD DLC 中の Ga の挙動と物性との関連を理解するためにアニール条件を変えたサン プルを用意した。膜中の炭素原子の sp²/sp³比は放射光を用いて炭素原子の K 端近傍におい て X 線吸収端近傍微細構造 (NEXAFS) スペクトルを測定して決定し、さらに入射光角度 依存性を測定することで Ga 原子の深さ方向の分布に関する情報を得た。元素分析は特に水 素含有率を決定できる RBS/ERDA 法を用いて全元素分析を行った。また、Ga 原子の局所構 造の情報を得るために Ga の K 端で EXAFS の測定を行った。物性に関しては AFM ナノイ ンデンテーション法により、硬度の測定を行った。

昇温脱離質量分析と組成分析による熱処理過程の観測

室温で作製した DLC 薄膜を真空中(~5x10⁻⁸Torr.)で加熱しながら質量分析をおこなうこと で、DLC 薄膜からの脱離種の分析を行った。また EDX を用いた薄膜中の Ga の残量変化を 測定した。Gaの天然同位体には質量数 69 と 71 が主であり、その天然存在比は 3:2 である。 図 3.2.1.(a)に示したように FIB-CVD DLC の昇温脱離質量分析の結果、69 と 71 の質量ピー クがほぼ同じ温度依存性を持ち、その強度比も天然存在比に近いことから、Ga のピークと 確認できた。また Ga に由来するピークである質量数 84 (GaCH3⁺)、98 (GaC3H5⁺)についても 同様の解析を行いその結果を図 3.2.1(a)に示す。FIB-CVD 法による DLC 薄膜から Ga が脱離 する温度は大きく二つに分けられ 460℃と 610℃にピークが存在する。これに対して Ga 量 は300℃前後から減少し500℃近傍から大きく減少、600℃を境にしてその減少傾向は緩や かとなる。最初の 460℃にみられるピークは試料の表面状態の変化から説明される。アニー ル温度の上昇にあわせて薄膜中の Ga が薄膜表面に移動すると考えられる。熱処理温度 450℃前後から表面に Ga の析出が確認され、500℃以上になるとその変化が顕著となり、試 料表面全体が Ga により覆われる。 このことから 460℃にみられるピークは表面における Ga 濃度の急速な上昇により Ga の脱離が促進されたものと考えられる。これに対して 610℃に ピークをもつ脱離傾向は真空下での Ga の蒸気圧曲線(安定かつ純 Ga において 5x10[®]Torr.の ときに 650℃)から Ga の蒸発が起こりやすい温度であり、これに対応するように 600℃以上 では Ga 濃度の急激な減少とともに膜表面を覆っていた Ga が蒸発し観察されなくなった。 これら Ga 移動と脱離の傾向は FIBCVD により作製したピラー中の Ga が 600℃のアニール により脱離することに一致する。最後に 600℃以降の Ga の緩やかな脱離傾向は薄膜中に残 留していた Ga と、後述する TEM 観察により明らかとなった Si を取り込んだ DLC 層界面 付近の Ga が Si の結晶化(Si の固相反応における結晶化温度は 600℃以上)によりはき出され たことによると考えられる。

このように薄膜中の Ga はアニール温度の上昇ともに薄膜外に出て行くこととなり、薄膜の構造にも影響を与える。この結果として図 3.2.1(b)に熱処理前後のラマン分光の結果を示す。熱処理前後の両方において 1560 cm⁻¹付近に sp²結合に由来する graphite-peak(G-Peak)と、1360 cm⁻¹付近の desorder-peak (D-Peak)が確認される。D-Peak は sp²クラスターの無秩序に由来するとされる。本結果においては熱処理前の試料において G-Peak のピークシフトとブロード化がみられ熱処理温度の上昇とともに D-Peak の比率が高くなってくる。これは熱処理温度の上昇とともに構造の乱れが大きくなってきていることを示している。またこの変化は室温~680 ℃の範囲で顕著であり 680 ℃以上の温度ではその変化は大きく見られないことから Ga 移動と脱離によって DLC 膜中の構造が大きく変化していることが推察される。より詳細な DLC 薄膜の構造と温度変化を検討するために NEXAFS による構造解析を実施した。



図 3.2.1. (a)四重極質量分析による Ga 由来(m/e = 69: Ga⁺、84: GaCH₃⁺、98: GaC₂H₅⁺)のピーク 強度と薄膜の Ga 濃度の温度依存性。 (b)アニール処理前後におけるラマンスペクトル

<u>NEXAFS による構造解析</u>

NEXAFS は他の分析手段では決定が困難な炭素薄膜中の sp²結合、sp³結合の存在比を精度よく測定できるので、炭素薄膜の構造解析では重要な分析手段である。図 3.2.2.に温度 200℃、400℃、600℃でアニールした FIB-CVD DLC の C K 端 NEXAFS スペクトルの入射角 依存性を示す。全スペクトル強度に対する C=C 二重結合(π結合)に起因する 285.3eV の ピーク強度を解析して sp²/(sp²+sp³)存在比を決定した。市販のイオンプレーティング法で製 膜された DLC 膜に比べ、FIB-CVD DLC 膜の sp²/(sp²+sp³)存在比はおよそ 3/4 であり、sp2 存 在比が小さい。これは FIB-CVD DLC 膜が高い sp³構成比-ダイヤモンド構造を持っている ことが示している。FIB-CVD DLC 膜では上記のピークのほかに 289.0 eV に Ga に隣接した

炭素原子に帰属できるピークが観測される。200℃でアニールした FIB-CVD DLC では入射 角度依存性が見られないが、400℃のアニールでは非常に大きな入射角度依存性があり、入 射角度を増すと C-Ga のピーク強度が著しく増大する。これは400℃でのアニールにより、 FIB-CVD DLC 中の Ga が DLC の表面付近に上昇しているためと考えることができる。また、 C=C のピーク強度が減少していることから、表面付近に移動した Ga は C=C のπ 結合を開 裂して炭素骨格に結合していると考えられる。600℃アニールでは C-Ga のピーク強度が減 少して C=C のピークが再び現れ、入射角度依存性が消失している。これはアニールにより、 Ga が FIB-CVD DLC より脱離したことを示しており、Ga が抜けたことで再びπ電子が結び つき、C=C 結合が再構成したと考えられる。

また、Ga 近傍の局所構造を決定するために Ga のK吸収端近傍においてX線吸収端微細構造(XAFS)の測定を行った。測定は高エネルギー研究所のPF BL12Cにおいて9.9-11.4keV の領域で Ga の蛍光を測定する蛍光 XAFS 法で行った。Ga と再近接する炭素原子の核間距離は≈2.3Åと求まった。また、この値はアニールによっても変化せず、Ga-C の間隔は Ga の移動に拘わらず、一定であることがわかった。



図 3.2.2 FIB-CVD DLC の C K 端 NEXAFS スペクトルの入射角依存性と入射角の概略図

RBS/ERDA による絶対組成比の測定と AFM ナノインデンテーションによる硬度測定

DLC の様々な物性は水素含有率に大きく依存することが知られているが FIB-CVD DLC に関してはこれまで全く水素含有率に関する知見が得られていなかった。水素含有率を決定できる手法は少ないが、ラザフォード後方散乱分析法(RBS: Rutherford Backscattering Spectrometry)と組み合わせた弾性反跳粒子検出法(ERDA: Elastic Recoil Detection Analysis)の測定では標準物質を必要とせず、高い精度で水素の含有率を含めた元素組成の絶対値を決定できる。図 3.2.3(a)に FIB-CVD DLC 膜の RBS/ERDA 法により決定した Ga と H 濃度の アニール温度依存性を示す。0度に記載している値はアニールをしていない FIB-CVD DLC 膜を示す。製膜後の FIB-CVD DLC 膜の Ga 含有率は≈4%、水素の含有率は 10~15%である ことがわかった。通常の CVD 法で作製された DLC では水素含有率は 20~40%くらいなの で FIB-CVD 法ではやや水素含有率の少ない DLC が生成されていると結論される。この原 因の一つは通常の CVD 法で用いられているメタンやエチレン、ベンゼン、トルエンに比べ て本方法では H/C 存在比の小さいフェナントレン(C14H10)を炭素源に用いていることが上げ られる。アニール温度を上げるにしたがって Ga 濃度が減少する。これは Ga が DLC 膜から 素発することを意味しており、この程度の膜厚では 700℃付近で Ga は DLC 膜からほとんど

すべてが脱離する。一般的なDLC膜では700℃付近で水素が抜けることが知られているが、 FIB-CVD DLC 膜でも 500℃から 700℃にかけて水素が脱離することがわかった。ただし、 水素は Ga と異なり 1000℃でアニールを行っても完全には脱離しない。なお、本研究で決定 した Ga の含有率のアニール温度依存性は EDX で行った半定量解析の結果とも一致してい る。

これまでに測定した様々な構造因子やアニール依存性が FIB-CVD DLC の物性にどのように影響するかを確かめるために、ナノマイクロ領域の立体構造形成においてもっとも重要なファクターである硬度について AFM ナノインデンテーションにより測定を行った。荷重は 300 µN であり、圧子侵入深さは 20-30 nm であり、比較的表面近傍の情報が得られているとみなすことができる。

図 3.2.3(b)のように FIB-CVD DLC 膜はアニール温度 500℃から 700℃で急激にヤング率、 硬度が減少する。これは Ga、H が抜ける温度と一致する。すなわち、Ga が抜けることで密 度の低下が起こり、ヤング率が減少し、また水素が抜けて表面がグラファイト化すること で硬度が低下していると考えることができる。



図 3.2.3. FIB-CVD DLC 膜の元素組成(a)と硬度・ヤング率(b)のアニール温度依存性

TEM による断面構造の直接観察

図 3.2.4 に断面の透過電子顕微鏡(TEM)像(a)と EDX による組成分布(b)を示す。熱処理前の 試料においては大きく 5 つの領域が確認される。DLC 層の膜厚 320nm に対して Ga の投影 飛程に相当する領域が表面、界面ともに異なるコントラストを示している。EDX による組 成分析の結果、表面においては Ga 濃度の低い領域であり、界面においては Si が混在して いる領域であった。表面における結果は FIB-CVD によるピラーの Ga 分布と同様の結果と なった。これに対して界面においては FIB-CVD プロセスは FIB によるエッチングプロセス を含んでおり成長初期過程においては基板表面をエッチングして膜中に取り込むと考えら れる。また基板側 25nm 程度は非晶質化が確認される。これは、初期の段階においては Ga イオンが Si 基板内に打ち込まれるために Si 基板側の最表面層は非晶質化していると考えら れる。熱処理後の試料においては 3 つの領域が確認される。熱処理効果により薄膜中の Ga は移動し表面に析出した Ga は集まり Ga の液滴の状態となる(図 3.2.4(a-ii))。この結果、DLC 薄膜中の Ga 濃度の傾斜が緩和されるため DLC 層は均一な膜構造となっている(TEM 像にお いてコントラストが一定となる)。界面においては DLC 側の Si 取り込み層は 600℃以上の温 度で Si の結晶化とともにその厚みが薄くなるがすべての Ga が脱離せずにそのまま Si 中に 残留している。Si 基板側においても回復が起こっているが結晶の欠陥構造が確認される。



図 3.2.4 熱処理前と 490℃、850℃の熱処理後の断面 TEM 像(a)と EDX による薄膜中の Ga と Si の組成分布のグラフ(b)。最表面の層は TEM 試料作製時の保護層として利用した Pt 膜。 (b)における拡大図は 850℃熱処理試料の界面部分の拡大図。距離の軸は DLC と Si 基板の界 面を 0 としている。

これまでの各種アニール特性結果から FIB-CVD による薄膜成長過程(図 3.2.5)とそのアニ ールによる膜構造の変化(図 3.2.6)の過程が以下のモデルで進行すると考察した。



図 3.2.5 FIB-CVD 法による DLC 薄膜の成長過程の概略図

1) 初期のエッチングよる Si の拡散

2) DLC 層の Si 取り込み層の形成、打ち込みによるダメージ層の非晶質化(30~40nm)

3) DLC 膜の形成 Ga 組成は表面になるほど減少。投影飛程に対応する表面から 35nm は極端に減少する



図 3.2.6 FIB-CVD 法による DLC 薄膜のアニール過程の概略図

1) 熱処理初期、300℃前後で Ga の表面への移動が始まる

2) 薄膜中から Ga が膜表面に移動し脱離する。ダメージ層の回復は起こらない

3) 熱処理温度が Si の結晶化温度を超えている場合ダメージ層の回復が起こり、混合層のG a が脱離する。

4) 膜は均一な DLC 膜となる。界面は取り込み層(Ga が微量に残留する)と、ダメージ層の 2 層が分離する。

まとめ

以上のように本研究では FIB-CVD DLC で作製された薄膜について様々な測定を行った。 製膜後の FIB-CVD DLC 膜は市販の DLC に比べて高い sp³構成比と低い水素含有率を有して おり、これが高い硬度を生み出す原因となっている。また、FIB-CVD 法による立体構築物 の物性制御の要となるアニールによる Ga の挙動について検討を行った。FIB-CVD 法で製膜 した薄膜は、製膜直後は表面近傍に Ga はあまり分布しておらず、DLC に近い骨格を成して いる。200℃以上のアニールを行うと DLC 中の Ga の移動および脱離が開始され、400℃1 時間程度のアニールでは薄膜内部に存在していた Ga が表面近傍に移動して、DLC 中の C=C 二重結合を開裂して DLC 骨格に結合する。さらにアニールを続けると DLC 中の Ga のほと んどが脱離し、表面近傍も再び DLC 骨格に戻り、Ga により開裂した二重結合も再結合する (図 3.2.7)。このように FIB-CVD DLC 中の Ga が DLC の主に π 電子と結合して DLC 骨格 に取り込まれることを始めて明らかにした。



製膜後 400度アニール 600度アニール
 図 3.2.7 アニールによる FIB-CVD DLC 中の Ga の移動と DLC 構造の模式図

本研究により FIB-CVD 法による DLC アニールによる Ga の移動を動的に捕らえることに 成功し、その機構を明らかにした。

(2) 研究成果の今後期待される成果

本研究は高機能ナノ立体デバイスプロセスの基盤として、開発された高機能デバイスが なぜそのような機能・物性を有するかを理解するキーサイエンスとして重要であり、今後 新たなデバイスの開発に当たり、必要とされる物性を予測するためのデータベースとして 活用できる。また、本課題中には達成できなかったイオンソース・ガスソースを変えたデ バイスの作製に当たり、構造・物性の評価手順として適用が可能である。

また、本研究はヘテロ原子を有する DLC 素材の構造・物性評価としては類を見ない多種 多方面から総合的な評価を行った。(図 3.2.8)現在、我が国における DLC 膜産業は年 80 億 円の市場規模となっており、従来の a-C 膜・a-C:H 膜を越えて機能性を持たせるために不純 物のドープや、中間層や表面化学修飾といったヘテロ元素を有する高機能 DLC 膜の開発が 中心となっている。本研究はこのような高機能 DLC 膜の標準評価プロシジャとして展開が 可能である。



3.3 ナノ立体構造材料物性研究グループⅡ(大阪大学)

(1)研究実施内容及び成果

① AuSi 系 FIB-CVD の研究

これまでに研究が行なわれてきた FIB-CVD 法では、イオンとして Ga⁺が用いられてきた。フェナ ントレンガス雰囲気で GaFIB 照射・走査によって形成されたピラーなどのカーボン系 3 次元構造物 中には、Ga イオンの投影飛程程度以下の領域に Ga が含まれ、表層側には Ga を含まない、二重 構造が形成されることが透過型電子顕微鏡 (TEM) などにより明らかになった。また、Ga を含む領 域と含まない領域ではヤング率などの物性値が異なる。さらに、形成された構造物をアニール処理 した場合、堆積物はアモルファスカーボンの状態からダイヤモンド様カーボン (DLC) またはグラフ ァイト構造に変化するのと同時に、600℃を超えると中に含まれていた Ga が表面方向に移動して最 終的には構造物から Ga が抜け、残された構造物のヤング率などの物性値が大きく変わることが確 認されてきた。

アニールによりカーボン系堆積物の構造を制御することは応用の観点から重要であるが、Gaの 振る舞いが堆積物の物性に大きく影響することは構造制御を難しくしている。さらに、この手法で例 えば細胞メスなどの微小なバイオツールを作製し、生きたバイオ試料でこれらのツールを用いた場 合、ツール内部に含まれている Ga が浸み出すことが予想される。生体における Ga の影響はまだ 明らかにされていないが、少なくとも生体には毒性が強いことは容易に想像がつく。これらの観点 から、内部に Ga を含まない構造物の作製が望まれている。

照射しているイオンが堆積物中に取込まれるのは原理的に避けられないことであり、Gaを含まな いようにするためには Ga 以外のイオンを用いれば良い。AuSi 共晶合金イオン源を用いれば Au や Si イオンを用いることができる。これらのイオンは、少なくとも Ga に比べれば生体試料への毒性 は少なく、また、単体の金属としては融点も高いため、Ga のようにアニールによって外に抜け出す ことはないと考えられる。加えて、Au は安定な元素であり、カーボンとの化学的結合は形成しない ため、アニール処理した場合には単に堆積したカーボン系材料の構造変化だけに着目すれば良 いと思われる。一方、Si と C とは SiC のように非常に強固な結合状態があるため、アニール条件に よっては SiC を含むような大変固い材料の合成が期待できる。その意味で、AuSi イオン源を FIB-CVD に適用することは、大変魅力的なテーマである。

Au または Si イオンを用いた FIB-CVD 法による堆積物形成の報告はまだないため、これらのイ オンによる FIB-CVD 法が可能か、また、Ga を用いた場合との違いはどのように現れるかを明らか にすることが、本グループにおける研究課題である。本研究では、フェナントレンガス雰囲気下で の Au または SiFIB 照射による堆積物形成の確認と、堆積物が形成された場合、イオン種による堆 積物形成プロセスの違いや堆積物の物性の評価を行った。

実験条件

既存設備である低エネルギーFIB 装置に改造を行ない、試料交換サブチャンバを導入し、基板 ホルダーを水平に保ったまま試料室へ搬送できるようにした。また、試料表面にフェナントレンガス を供給するための可動式ガス導入系を自作した。フェナントレン粉末は細いガラス管に封入し、湯 煎により70~80℃に熱し、ガスが壁面で凝固しないように真空の内外でガス導入管をヒーターで加 熱している。導入管の先端は内径0.6mmのノズル2本に分岐させ、400µmの間隔で向かい合わせ てその中心付近を FIB が走査できるように配置した。フェナントレンガスの導入量は湯煎の温度だ けで制御したが、全ての実験を通じて同じ温度で行なった。

この FIB 装置は加速電圧 15kV で質量分離器を備えているため、AuSi 共晶合金イオン源から Au⁺と Si²⁺を分離し、それぞれ 15keV と 30keV のエネルギーで試料表面にイオン照射することがで きる。基板には、AuFIB 照射の場合は Si 基板を、また、SiFIB 照射の場合は入射イオンと区別する ため GaAs 基板を用いた。いずれの基板も、使用前に有機洗浄している。イオンビーム電流は 9~ 180pA、FIB 走査時のビーム滞在時間 (dwell time)は1、32、1024µs、の間でパラメータを調整し、イ オン照射を行なった。ラインパターンは FIB のライン状走査を 150µm の長さにわたって繰り替えし、 面パターンは 50µm 四方の領域に FIB 走査を繰り返すことで、それぞれ細線および薄膜試料を作 製した。 異なる FIB 照射(走査)条件で堆積されたパターンは、走査電子顕微鏡(SEM)および原子間力 顕微鏡(AFM)で形状の測定を行なった。堆積膜の組成分析はオージェ電子分光法(AES)および ラマン散乱分光で評価した。

結果と考察

堆積物の構造を調べるために、15keVAuFIB で形成した薄膜試料を作成した。試料の AFM 測 定結果を図 3.3.1 に示す。50µmx50µmn の領域に 7x10¹⁶cm⁻²のイオン照射量で 75nm の厚さの薄 膜が形成できたことが分かる。この試料に対してラマン測定を行なった結果を図 3.3.2 に示す。膜 厚が薄いために基板の Si のシグナルが見えているが、スペクトルの形状、ピーク位置は、GaFIB で 作製された薄膜の場合と同様の結果が得られた。GaFIB で形成した薄膜をアニールすると、スペク トルは D バンド成分と G バンド成分にきれいに分かれることが確かめられているが、AuFIB を用い た試料の場合にどのようになるか興味が持たれ、現在実験を進めている。



図 3.3.1 AuFIB 矩形走査で形成 した矩形堆積物の AFM イメージ(a) と断面形状(b)。



Wavenumber (cm⁻¹)

図 3.3.2 前図に示した矩形堆積物の Raman スペクトル。GaFIB で形成した膜の結果も参考 として示す。

GaFIB で堆積した構造物中には注入された Ga が含まれることが透過型電子顕微鏡観察などで 報告されているが、Au や SiFIB を用いた場合にどうなるか、ここではオージェ電子分光法による組 成分析で調べた。AESシグナルは表面付近の原子にしか感度を持たないため、薄膜を3keVのAr イオンでスパッタエッチングしながら深さ方向の組成を調べた。15keVAuFIB および 30keVSiFIB で 形成した薄膜に対する AES スペクトルを、それぞれ図 3.3.3 および図 3.3.4 に示す。いずれの試料 でも、表面付近にはほとんど C のシグナルしか観測されず、堆積物がカーボン系の物質でできて いることがわかる。表面を削りながら調べていくと、AuFIBの場合にはスパッタ時間が 5min (300s)の 時にはすでに Au のシグナルが、また、SiFIB の場合には 540s の時に Si のシグナルが顕著に観測 され始めた。このことから、堆積膜の内部には FIB 照射で用いられたイオンが注入されて存在する ことがわかった。 図 3.3.4 に示されているように、スパッタ時間が 660s の時に基板からの信号がメイ ンとなり、形勢された薄膜がほとんど無くなったことがわかる。このとき形成されていた薄膜の厚さは 約 50nm だったため、3keVAr イオンによる堆積膜のエッチングレートは 4.5nm/min 程度と見積もる ことができる。この値を用いて注入イオンが観測された深さを見積もると、AuFIB による堆積膜の場 合は22.5nmの深さではすでにかなりのAuが観測され、また、SiFIBによる堆積膜の場合は40.5nm あたりからSiが観測され始めることがわかった。ターゲットにグラファイトを仮定した場合の15keVAu イオンおよび 30keVSi イオンの投影飛程は、それぞれ 12nm および 36nm と計算され、これは観測 された注入イオンが観測されている深さと矛盾していない。GaFIBの場合でも、堆積物中に Ga が 観測されるのは Gaの投影飛程よりも深いところであったため、今回の Au および SiFIB を用いた結 果は、Gaの時に観測された事柄と本質的に同様のことが起こっていることが実験的に確認された。



図 3.3.3 AuFIB で堆積した薄膜の AES スペクトル。表記の時間は 3keVAr イオンによるスパッタ時間を示す。Si 基 板に対する測定結果も示す。縦の破線 は、表示の元素に対するシグナル位置 を示す。



図 3.3.4 SiFIB で堆積した薄膜の AES スペクトル。表記の時間、縦の 破線は図 3.3.3 と同じ。

まとめ

従来行なわれてきた GaFIB-CVD で堆積された構造物中に Ga が含まれないようにするため、新 たに Au および Si イオンを用いた FIB-CVD プロセスの検討を行ない、形成された薄膜の評価を行 なった。FIB の走査方法の違いにより、同じイオン照射量でも形成される堆積物の量が大きく変わり、 用いるイオン種によっても大きく異なることがわかった。これは、主にイオン照射時に表面から放出 される二次電子の量による違いで説明できる。また、形成された薄膜は GaFIB プロセスで形成され た場合と同様な傾向が見られ、FIB 照射で用いられたイオンが、Ga の時と同様に、投影飛程以下 の領域に含まれることが確認された。以上の結果から、Au および SiFIB-CVD プロセスにより Ga を 内部に含まない堆積物の形成が可能であることを実験的に明らかにすることができた。堆積物のア ニール処理による Au および Si の振る舞いは Ga の場合と大きく異なることが予想されるが、実験的 検証と、これらの振る舞いが堆積物の物性に与える影響については今後の研究が待たれる。

(2)研究成果の今後期待される効果

AuやSiイオンを用いてもFIB-CVDプロセスでカーボン系の堆積物が形成されることがわかったので、Gaの時に問題となっていたGaの滲みだしの問題は解決されることが期待できる。今後はAuやSiイオンの場合でも微細なFIBを用いることでナノ構造の作製が可能であることを実証し、バイオツールなどへの展開を期待したい。さらに、アニール処理により堆積物自体の変化(DLC化)やAuの残存、Siとの結合によるSiCの形成などにより、構造物の物性がGaの場合と異なり、多彩になることが期待できる。このことは、目的に応じて所望の物性を持った構造物の形成がイオン種を変えることで可能になることを意味し、応用面からも魅力があると思われる。

3.4 ナノ立体構造材料特性研究グループ I (日本電気(株)) (1)研究実施内容及び成果

ビーム蒸着による3次元ナノ構造体作製技術開発とその応用の一環として、(1)集束イオンビー ムデポジション(FIB-CVD(Focused Ion Beam Induced Chemical Vapor Deposition))によるカーボン およびタングステン構造体の形成技術と強度測定、(2)電子ビームデポジション(EB-CVD(Electron Beam Induced Chemical Vapor Deposition))によるナノカーボン構造体の形成技術、(3)3次元ナノ 構造体中の固相反応によるナノチューブ形成技術、(4)グラファイトチューブを用いた分子認識セン サーの作成と評価に関する研究を行った。

①集束イオンビームデポジションによるナノ構造体の形成技術と強度測定

FIB-CVDによるタングステン構造体の形成にはカーボン構造体形成よりも高いガス分圧を必要とすること、堆積させた構造体側壁に発生する樹枝構造(図 3.4.1(a))が問題となる。樹状構造の成長原因は成長中の構造体で散乱されたビームや1次イオンビームのガウシアンテールがピラー 側壁で樹枝突起を成長させるためであり、メインピラーの側壁に直角に成長する。ここに堆積直後にそのピラー直上から同じイオンビームでラスター走査することで、この水平に張り出した樹枝構造を図 3.4.1(b)のようにきれいに取り去ることができ、このトリミング技術を利用することにより、得られたタングステンピラーのヤング率は、共振法で同定する事が可能となる。図 3.4.1(c)にタングステン ピラーの成長条件とヤング率の関係と加熱処理による密度変化を示す。真空中 600℃の熱処理で ヤング率が 30%程度増大するが、カーボンピラーの場合と異なり、その密度の変化は極めて少ない。さらに 1500℃の熱処理でタングステンピラーは結晶化し、WO3となる事を見いだした。



図 3.4.1 (a)as-depo の W ピラー、(b)トリミング後のピラー、(c)タングステンピラーの成長 条件とヤング率の関係および熱処理による密度変化

② 電子ビームデポジションによるナノサイズ構造体形成

通常使われる電子ビーム環境である 10⁶Torr 程度の真空度の中でも、希薄なフェナントレン蒸 気で非常に効率よくカーボン堆積物を形成する事ができること、また、電子ビームのベクトル走査を CAD 制御で行う事で、図 3.4.2 に示すような任意形状の構造体を形成する事ができることを示し た。

この EB-CVD によるアモルファスナノカーボンピラーを FIB-CVD によるフェロセン構造体上に形成して熱処理を行うと、フェロセン構造体中に凝縮により形成される鉄微粒子がアモルファスナノカ ーボンピラー中に移動し、その中を動いていく。この動きにともない、その軌跡に多層グラファイトが形成されることを見いだした。鉄微粒子の侵入によって曲がりくねった侵入の軌跡がグラファイト化され、ナノチューブ化している(図 3.4.3)。



図 3.4.2 電子ビーム堆積で形成したナノ3次元構造体



図 3.4.3 鉄微粒子の侵入の状況

③ アモルファスカーボンピラーの固相反応によるグラファイト化

上記②において発見された鉄微粒子によるアモルファスカーボンのグラファイトチューブ化機構 を明らかにするため、TEM によるその場観察を行った。観察用試料は次の方法で作製した。まず、 モリブデンメッシュの側面にフェロセンガスを用いた FIB-CVD により、鉄を含むアモルファスカーボ ンの土台を形成する。この土台上に、フェナントレンを用いた EB-CVD により、アモルファスカーボ ンピラーを形成する(図 3.4.4)。観察手順を図 3.4.5 に示す。アモルファスカーボンピラーを形成し たモリブデンメッシュを TEM の試料加熱ホルダーにセットし、電子顕微鏡内にセットする。次に、試 料を 550℃まで加熱すると、土台中に鉄微粒子が析出する。試料のドリフトが TEM 観察に耐えるよ うになるまで放置した後、試料を 600℃まで加熱する。土台中に析出した鉄微粒子が、あたかも液体のように変形しながらアモルファスカーボンピラー中を移動し、その軌跡にグラファイトチューブが形成される。図 3.4.6 は、この過程を捉えたビデオから起こした一連の写真である。この一連の写真から、カーボンピラーは中空化しており、電子回折図形からグラファイト化していること、また、反応中の鉄微粒子が結晶性を有していること(TEM像の鉄微粒子に時々回折コントラストが見える(a、b、cに顕著))がわかる。

このグラファイト化過程で着目した点は、カーボンが鉄微粒子に取り込まれるのか、それとも表面 を拡散しているのかどうか。取り込まれたとすると、カーボンは微粒子の表面に集まっているのか、 微粒子内に均一に分布しているのか、という点と、鉄微粒子は結晶か否かという点である。図 3.4.7 は、試料を加熱して鉄微粒子によるグラファイト化を起こさせ、鉄微粒子がピラー先端まで移動した 後、室温に戻して観察した像とエネルギー分散型 X 線分析装置(EDX)による鉄とカーボンの組成 比を測定した結果を示している。STEM 像では、微粒子の中心部が暗く観察されているが、 HAADF 像では微粒子の中心が明るい。これは微粒子の中心に重い鉄原子が多く、周辺部は軽い カーボンが多いことを示している。EDX による分析結果からも、カーボンは微粒子に取り込まれて おり、その多くは微粒子の周辺に集積していることがわかる。しかし、この試料は冷却後であるため、 グラファイト化が生じている状態で in-situ で観測する必要がある。

さらに詳細にアモルファス炭素の結晶化のメカニズムを解明するために、グラファイト化反応が進行する温度である 600℃付近で、高角度散乱暗視野(HAADF)像と電子回折図形を同時に観察し、 微粒子の Z-contrast(原子量コントラスト)からカーボンの輸送パスを観察する試みと鉄触媒微粒子 の結晶性の評価を行った。図 3.4.8 は鉄微粒子の電子回折図形が鉄微粒子の移動と共に変化したことを示しており、反応中の鉄微粒子は結晶性を有し、ピラー内を回転しながら移動していることがわかる。これは、炭素の結晶がカーボンナノチューブの結晶構造でいわれているカイラリティを 反映して、結晶化を起こすときに微粒子が回転していることを示しているのかもしれない。この予想 が正しいとするとこの機構を用いて CNT のカイラリティを制御できる可能性がある。

鉄微粒子が移動するとき、その投影円筒内のアモルファス炭素もしくは微粒子の直径と等しいカ ーボンナノチューブの原子数を計算した結果を図 3.4.9 に示す。横軸は触媒微粒子の直径、縦軸 は、炭素の原子数の単位長さ(100nm)あたりの数である。アモルファス炭素の場合は赤線、単層も しくは多層のカーボンナノチューブの場合は、層数に応じて黒の実線の関係になる。これより、単 層ナノチューブが形成されるときに、アモルファス炭素の原子数と単層ナノチューブの原子数が過 不足ない場合は赤線と、単層ナノチューブ(SWNT)との交点一点のみが条件に合うことになる。実 験から観測しているチューブの層数は5層程度であり中抜きの丸で示しているが、おおよそ原子数 の過不足のない直径のチューブができていることがわかる。

グラファイトチューブの固相成長過程を TEM および STEM によって直接観察することで、アモルファスカーボンが鉄微粒子触媒を介してグラファイト化する現象を観察してきた。この現象は、カーボンナノチューブ成長を始め、種々の触媒を介したナノロッド、ナノワイヤが成長する場合に広く見られる現象であるが、反応中の触媒の状態や、金属触媒中に取り込まれた元素の動きなど、その詳細についてはよく分かっていない。特に元素の動きに関しては、Helvegら(Nature 427, 426 (2004))による密度汎関数計算の結果から、炭素原子は触媒粒子の表面を移動するモデルが提案されており、我々の STEM とEDX 観察の結果(図 3.4.7)も、鉄触媒表面に近い部分のカーボン濃度が高くなっていることを示唆する結果である。

ほぼ同じ時間に明視野、暗視野両方で観察した粒子の像(図 3.4.10)を見ると、明視野像の微 粒子の輪郭は、暗視野像のそれより若干大きく、透過強度と散乱強度の差分を取ってみると、微粒 子表面に数 nm 厚の軽元素が多く存在する領域があることが分かった。

Helveg らは、金属微粒子内での炭素の輸送については、いわゆる表面拡散モデルを提案して いたが、今回の実験から表面数 nm の厚みを持った領域にカーボンの輸送が集中していること、カ ーボンナノチューブ成長では、1nm φ 程度のナノチューブの成長速度が 1000nm/sec を超えること が知られており、このような高速成長は、触媒金属の表面数層の領域をカーボンが移動することに より実現していると考えられる。 以上の考察から、鉄微粒子との固相反応によるアモルファスカーボンピラーのグラファイトチュー ブ化についてTEMおよびSTEMによるその場観察と鉄ーカーボンの相図を検討し、次の結論を得 た。図 3.4.11 に示すように、600℃程度の鉄微粒子先端部と接したアモルファスカーボン原子は、 鉄微粒子に取り込まれ鉄微粒子先端部が液化する。取り込まれたカーボン原子は鉄微粒子の周 辺部を拡散しながら鉄微粒子後部へ移動し、鉄微粒子後部を液化する。これに伴い、鉄微粒子先 端部は固化する。鉄微粒子後部に達したカーボン原子は、グラファイト構造を持った状態で排出さ れる。カーボン原子が排出されたことにより、鉄微粒子後部は固化する。この過程が繰り返されるこ とにより、アモルファスカーボンピラーはグラファイトチューブ化していくと結論した。

ナノチューブの成長過程を TEM その場観察する試みは、先程名前を挙げた Helveg、Sharma、本間チーム・竹田グループ等の環境 TEM を用いた研究があるが、われわれの観察との違いは、ナノチューブ成長のためのカーボンの供給源が固体であるかガスであるかの違いであると理解している。

固相反応によるナノチューブ成長を研究する過程で、瞬間放電に伴うGaの触媒作用でナノチュ ーブが固相成長する新しい成長様式を見いだすことができた(筑波大学グループとの共同)。FIB を用いて作成されたアモルファスカーボンピラーは内部に Ga を含有する。このピラーに瞬間的に 電流を流すことで、Ga の瞬間的な動きが誘導され、同時にピラー内部にグラファイトチューブ構造 が形成されることを見出した。

ガリウムを含むアモルファスカーボンロッドに電圧を印加し、瞬間的に大電流を流すことにより、 ガリウムが液化、瞬間的に陰極側に移動する。このガリウムの移動過程において、カーボンロッドの グラファイトチューブ化が起きる。鉄の場合とは異なり、平衡状態ではガリウムとカーボンは固溶しな い。この現象を詳しく解析するために、STEM 用の STM ホルダーを購入し、その場観察を行った。 図 3.4.12 にこの観察結果を示す。ロッドに電流を流すことによりロッド内に含まれるガリウムが粒状 化する。ガリウムの粒状化に伴いカーボンはグラファイト的(sp² 結合)様相を示し始める。さらにロッ ドが断線するまで電圧を増加させていくと、陰極近傍のガリウムは、ほぼ抜けきってしまいチューブ 状となる。これらのことは、カーボンKエッジ、ガリウムLエッジの電子エネルギー損失分光からわか る。しかし、その場観察ができるように通電電流が抑えられているため、十分に高温にならない。そ れ故、明瞭なチューブ構造にはならない。

FIBで作製した中心部にGaを含むアモルファスカーボンロッドの、STEMによる電流印加その 場観察を通して、Gaの存在下におけるグラファイト化のメカニズムの考察を行った。その結果、電 流印加により加熱されたことにより、初期に孤立状態で存在したGaが凝集し始め、Gaの凝集体表 面では、Ga-C結合が形成される(FIBで作製したDLCの兵庫県立大のグループのEXAFSによる評 価を参考)。その後、更なる加熱のよりGa-C結合が壊れ、結合相手を失ったカーボンがC=C二重 結合を作ることによりグラファイト化が進行すると考えた。この反応の際、Ga凝集体は、カーボンロッ ド表面から、外へ蒸発していく。

29





図 3.4.4 試料作製方法. (a) Mo 製メッシュ端面にフェロセンを用いた FIB-CVD により Fe を含んだ土台を作製. (b)続いてフェナントレンを用いた EBCVD によりカーボンピラーを作製. (c) 作製した試料の SEM 像. ピラーの径は最小 10nm 程度である



図 3.4.5カーボンピラーの典型的な形状. (b)550℃に加熱すると、土台の部分に鉄微粒子が生成し 始める. (c)さらに650℃程度まで加熱すると、粒子の移動が活発となり、一部がカーボンピラーに侵 入する。



図 3.4.6 ピラー中を移動する鉄微粒子の TEM 像と電子回折図形. 電子回折図形から、ピラーが 鉄微粒子通過後グラファイト化していることがわかる. また、鉄微粒子に回折コントラストが顕著に見 えることから、鉄微粒子が結晶性を有していることを示している.



図 3.4.7 加熱して結晶化が生じた後に室温に冷却後観測した、結晶化した炭素ピラーと先端部の 鉄微粒子の TEM 像。HAADF: High Angular Annular Dark Field 固相成長後の触媒微粒子の高角 度散乱暗視野(HAADF-STEM)像と、微粒子からの EDX スペクトル。HAADF 像では、微粒子の中 心部が明るく見えている。これは中央部に重い元素が多く存在することを示している。EDX スペクト ルでは、中央部からの炭素ピークは小さく、鉄のピークは大きくなっており、同様に中央部に重い 元素(鉄)が集まっていることを示している。



図 3.4.8 HAADF-STEM 像(Z-contrast 像)と回折図形。鉄微粒子の周辺部が暗いことから、カーボンは、鉄微粒子の周辺部(表面から数 nm の厚みを持った領域)を通り、後方へ排出されるものと考えられる。また、鉄微粒子は固相と液相の中間状態と考えられる。



図 3.4.9 微粒子の直径と、それを見込む円筒内に含まれる炭素原子数との関係。赤線はアモルファス炭素、黒線は各層数のカーボンナノチューブの場合。



図 3.4.10 (a) 明視野(透過)像、(b) 暗視野(広角散乱)像、(c) 全散乱強度(1-透過強度)と広角 散乱強度の差分。



図 3.4.11 鉄微粒子によるアモルファスカーボンピラーのグラファイトチューブ化の模式図と鉄ーカーボンの相図の関係を示す.



図 3.4.12 ガリウムを含むカーボンロッドの通電前後のZ-コントラスト像とSTEM像(左上)とI-V曲線(右上).カーボンKエッジの電子線エネルギー損失スペクトルの変化(左下)およびガリウムLエッジの電子線エネルギー損失スペクトル(右下).通電により、ガリウム抜けならびにグラファイト化が起きている.①,②,③はそれぞれ通電前、100nA程度の通電後、通電による断線後に対応している。

④ グラファイトチューブを用いた分子認識センサーの作成と評価

分子認識センサーをガラスキャピラリーの先端に作製し、細胞中の特定の位置で、直接検出を 行うことによって、細胞中のミクロな現象観察を目指した。グラファイトと生体分子とは、親和性が高 いことが知られており、容易にグラファイト面に配向するような現象が観察され、実際に分子認識セ ンサーにも応用されているている。さらに、半金属的性質をもつグラファイトでもショットキー接合に よる ON/OFF 動作が可能で、非常に高い移動度が報告されていることから、FIB/EB-CVD により 選択成長したグラファイトナノチューブを使用した生体分子センサーを作成・評価に着手した。局 所サンプリング用のバイオセンサーとして、ターゲット分子捕獲による質量変化を検出する共振式 (図 3.4.13(a))および電気化学ポテンシャルの変化を検出する電気化学式(図 3.4.13(b))の二つの 方式について予備的な実験を行った。共振式については、キャピラリ上にピラーを作製し、水中で の共振を確認した。電気化学式については、デバイス作製プロセスの最適化の検討を行い、前項 のグラファイトチューブ化の手法の利用が可能であると判断した。



図 3.4.13(a)共振式センサー(ターゲット分子の捕獲による質量変化を測る)の測定系.キャピラリ王 に形成したピラーで、水中での共振を確認.(b)電気化学式センサー(ターゲット分子の捕獲によ る表面ポテンシャルの変化を観測)のセンサー部分.アモルファスカーボンのブリッジを固相反応、 通電加熱処理等でグラファイト化.

(1) 研究成果の今後期待される効果

・FIB-CVDにより形成されたタングステンナノ構造物は、トリミング技術を用いるこにより、強度 測定などの機械的特性を測定できるように整形された。本手法を用いることにより、先駆けてヤング 率測定など実施できた。

・EB-CVDによりナノメーターオーダーの構造物が形成できることを示した。この報告の後、電子顕微鏡内で種々の物質のナノ構造を作製し、新たな物質開発の試みが行われるようになった。

・ビーム励起反応により形成したアモルファス炭素の結晶化により、不完全ながらも多層ナノチュ ーブを形成できる可能性を見出した。本技術を用いることにより、任意の位置、方向、長さ、さらに は直径をもつカーボンナノチューブを形成できる可能性があり、電子デバイスやセンサーなどへの 応用が期待できる。これらを実現するためには、昇温、降温も含めた温度条件や、他の触媒金属を 用いるなどの条件を変え、欠陥の少ないナノチューブの形成や多層もしくは単層を選択的に成長 させる制御技術を開発することが必要である。また、本手法によるナノチューブ形成メカニズムの解 明は、CVDを用いたナノチューブ形成メカニズム解明にも大きな指針を与えたと考える。

・カーボンナノチューブを用いた分子のセンシングは、世界的にその開発が進められている。われわれの固相反応によるナノチューブ形成手法は、それらの素子開発に役立つものと思われる。
3.5 ナノ立体構造材料特性研究グループⅡ(筑波大学)

(1)研究実施内容及び成果

筑波大・NEC グループではナノ立体構造材料特性の研究として、①FIB-CVD 法で作成される 構造体のヤング率に注目した物性研究、②ナノ3次元構造を応用した超耐電流・超尖鋭プローブ の合成と局所電界可視化の研究、について綿密なグループ間連携を保ちつつプロジェクト研究を 推進した。

①ナノ構造体のヤング率

FIB-CVDで合成されるナノ構造体の重要な応用分野がナノメカニクスに対応した構造体材料で ある。ナノピンセットによる細胞オルガネラの操作や、ナノ振動子による微量物質検出など、いずれ の場合も機能の最適化には、ナノ構造体の硬さを充分に制御する必要がある。さらに研究の中で FIB-CVD構造体はタングステンカーバイドと同程度の硬さを有していることが判明したが、一般応 用のためには、この硬さの成因についても、科学的見地からその生成メカニズムを明らかにする必 要があった。FIB-CVDによる自由形状のナノ3次元構造体とい概念自体が、このプロジェクト研 究で始まった事でもあり、研究開始当初に類似する研究、論文とはほとんど無い状態であった。こ の意味で、当CREST研究によって、FIB-CVDによるナノ構造体とそのヤング率に関する技術と知 見の新しい領域を切り開くことができたと思われる。この意味で、以下の研究成果、論文は当分野 を世界的にリードする新規事項である。

イオンビームを用いたナノ3次元構造形成では、原料ガスとして炭化水素(フェナントレン)を用 いる。顕微鏡の筐体試料室に原料ガスを導入し電子ビームやイオンビームを照射すると基板表面 に吸着したガス分子が分解して、アモルファス炭素が堆積する。ガリウム(Ga⁺)の集束イオンビーム (FIB)を用いた立体構造物形成メカニズムを図3.5.1に示す。実験では最小ビーム径が約7 nmの 性能を持つSII社製集束イオンビーム装置(SMI2050)を用いている。Ga⁺のイオンエネルギーは30 keV、照射イオン電流は1 pA~1 nA程度である。このGa集束イオンビームを原料ガスの雰囲気中 で基板に照射すると、照射位置に吸着している原料ガス分子が分解し、アモルファスカーボンが成 長する。原料ガスとして用いるフェナントレン(C₁₄H₁₀) は融点99℃、沸点340℃の芳香族炭化水素 化合物である。これを約70~80℃に加熱し、得られる蒸気をガスノズル先端から基板に吹きつける。 装置のバックグランドは約3x10⁻⁵ Pa程度、アモルファスカーボン成長中の試料室平均ガス圧は 7x10⁻⁵ Pa程度である。



図 3.5.1 FIB-CVDの原理

イオン照射による化学気相成長は、基板や、成長中の構造体表面に吸着した原料ガス分子が 入射イオンや2次電子によって分解・堆積する事で進行する。一般に荷電ビームが照射されると、 基板や堆積物との相互作用過程で2次電子が放出される。カーボンに対する30keVのGa⁺イオン の進入長は約20nm程度である(図3.5.2)。つまり、ビーム照射位置からこの半径約20nmの範囲 に1次イオンが散乱され、さらにこの散乱領域から2次電子が放出される。基板表面に飛び出てき た比較的エネルギーの低い2次電子は、その反応断面積が大きいためにすぐに吸着ガス分子に 捕捉され、ガス分子を分解することでアモルファスカーボンが成長する。イオンビーム照射位置を

固定しておくと、直径約 100nm 程度の垂直に伸びたピラーが成長する。イオンビームを徐々に横 に動かしていくと、ビームの動きに応じて斜め方向に成長する。イオンビームを回転させれば、円 筒状の構造物が形成され、途中で回転の半径を調整すれば、ワイングラスができる。イオンビーム をゆっくり回転させればコイルができるし、小さい半径でゆっくり回転させるドリルができる(図 3.5. 3)。



図 3.5.2 イオンビームと電子ビームによる成長

FIBCVDで形成した構造体

EB-CVDピラーのヤング率

FIB-CVD法で合成したカーボンピラーに対して試料フォルダをピエゾ素子加振することにより、 ピラーの共振がSEM像として観測できる(図3.5.4)。この共振特性からピラーのヤング率が計算で き、約100GPaの硬さを持つことがわかっている。FIB-CVDピラーのヤング率は成長速度に強く依 存し、低速成長のものほど高いヤング率を示し最大で600GPaに達する。一方EB-CVD法によるピ ラーのヤング率は良く知られていない。今回はEV-CVD法で作製したカーボンピラーのヤング率を AFM用カンチレバーとの相互たわみにより計測した。EB-CVDピラーへの負荷を与えるために AFM用シリコンカンチレバーを用いるが、この共振周波数fとその形状(台形断面の寸法、長さ)お よび、シリコン結晶(100)方向のヤング率(140GPa)からカンチレバーのバネ定数が0.184N/mと決 定できる決定できる。このバネ定数をもとに、ピラーとの相互たわみ量をSEM像から求めることで、 ピラーのバネ定数が求まる(図3.5.5)。その結果、EB-CVDによるアモルファスカーボンピラーは約 30GPa程度の硬さを持つ事(図3.5.6)が判った。また、電子ビームによるピラーの場合は成長時の 電子加速電圧によってヤング率が変化し、低加速電子によるピラーほど高いヤング率をは持つ。イ オンビームでは、少ない電流量(lpA程度)で非常に堅いアモルファスカーボンが堆積されるのに 対して、電子ビームでは比較的大きな電流量(50pA程度)での堆積にもかかわらず、堆積するカー ボンのヤング率は低い。堆積させたカーボンピラー内へのエネルギー蓄積量は、ビームの侵入長、 2次電子収率などの要素を含めて見積っても、EB-CVDピラーの方がFIB-CVDピラーの10倍程度 大きい。つまり、イオンビームではビーム自体のエネルギー蓄積量は少ない割に堅いカーボンが 形成されていることになる。これは、イオンによる堆積物への衝撃などが堆積物の硬さに影響して いるのではないかと推察される。



図3.5.4 ピラーの共振





たわみ測定中のSEM画像 図3.5.5

図3.5.6 EB-CVDピラーの ヤング率

図 3.5.3

FIB-CVDピラーのヤング率

FIB-CVD 法を用いたアモルファスカーボンナノ構造体の合成では、イオンビームの走査を制御 することで自由な形状の3次元構造体を形成することができる。このようなナノ構造体の特徴の一つ が、非常に堅いことであり、合成したカーボンピラーは典型的に約100 GPa 程度のヤング率を示す。 さらに成長条件、特に極めて遅い成長速度で合成した場合には600 GPaにも達する高いヤング率 を示すようになる。一方で、電子ビームを用いた EB-CVD 法によるアモルファスカーボンは比較的 柔らかく、20~50 GPa 程度となる。このようなヤング率の測定では、自発振動をSEMを用いて計測 する方法[4]が簡便である。共振周波数fとヤング率Eの間には、

$$f = \frac{\alpha \beta^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{E}{16\rho}} \quad (1)$$

の関係がある。ここでβは共振のモード(次数)に依存する定数である。(1)式から求めるヤング率には材料密度の仮定が必要であり必然的に不確定要素を含む事になる。一方で、弾性定数既知のAFMカンチレバーを用いた相互たわみによる測定からは、試料の幾何学的形状とたわみ量とから次のようにヤング率を求める事ができる。

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (2)$$

こような相互たわみ測定には、図3.4.7に示すようなナノマニピュレータを用いたその場観察が非常に有効である。



図 3.5.7 相互たわみ法によるヤング率測定

EB法とFIB法との比較

測定に用いた試料形状は長さが5~20µm 程度、直径 200nm~500nm である。FIB および EB ピラーともに直径 100nm 以下のものでは、AFM カンチレバーとの接触時に、静電気力および van der Waals 力による物理吸着がおきて永久変形してしまうことが頻発する。このため本この実験では 比較的太い試料を用いて計測している。 試料のたわみ測定中のSEM像を図 3.5.8.に、また、求 めたヤング率の結果を図 3.5.9 に示す。イオンビームの場合にはイオン加速度が高くなるにつれて ピラーのヤング率が上昇するが、電子ビームの場合には電子加速度が下がるとピラーのヤング率 が増えるという、逆の傾向を見いだすことができた。





図 3.5.8 相互たわみ測定の SEM 像

FIB-CVD ピラーの場合、カーボンに対するイオンの進入長(投影飛程)は30keV の場合で約20nm 程度である。合成されるピラーの直径はこの飛程よりは遙かに大きく、照射されたイオンはアモルファスカーボン中にすべてトラップされる。このメカニズムがあるからイオンビームの走査でナノ3次元構造が形成可能となっている。この一次イオンの散乱過程で放出される2次電子によってさらに外側で吸着ガスの分解反応が促進されるから、結果として中心に Ga を含有するコア部分と外側にGa 含有の少ないアモルファスカーボン層形成された2重構造のピラーとなる。すなわち、照射イオンのエネルギーはすべてアモルファスカーボンピラーの形成に寄与すると考えられ、イオン加速エネルギーが大きいほどピラー内へのエネルギー蓄積密度が増えることになる。これがイオンビーム加速度にほぼ比例するピラーのヤング率の上昇をもたらしている原因と考えられる。

一方で電子の場合には、逆に電子エネルギーが低いほどピラーのヤング率が上昇する。電子の 場合はイオンと異なり、質量が軽い分だけ進入長は長くなる。典型的には 5keV の電子で約 400nm 程度、15keV の電子で約 2.5 µ m 程度である。電子は原子核による大角散乱 (弾性散乱)と内殻電 子との非弾性散乱を繰り返すから、鉛直方向からの電子照射に対して垂直にピラーが成長しなが ら、電子はピラーの側壁からすぐに真空中に飛び出してしまう。数keV 程度の電子が固体中で散 乱されると、おおよそ球状に散乱される(図 3.5.10)。固体内部での散乱ならば、この球状の領域に 電子エネルギーが蓄積されるはずだが、実際はピラーであるから、散乱球内のピラー体積程度の、 ごく一部のエネルギーがピラー中に蓄積されることになる。電子の飛程は加速度のべき乗(1.6 乗 程度)で増加するから、電子によるピラーへのエネルギー蓄積は加速エネルギーに対して指数関 数で減少することになる。さらに電子の散乱断面積も加速度に依存して減少するから単位体積あ たりへのエネルギー蓄積は高加速であるど少ない。この結果 EB-CVピラーでは電子ビーム加速度 に逆比例してヤング率が減少したと推測される。



図 3.5.10 EB-CVD におけるエネルギー蓄積モデル

図 3.5.9 電子およびイオン加速度とヤング率

FIB-CVD ピラーの弾性2重構造

FIB-CVD 時にビームを一定速度で横方向に走査することで傾斜したピラーが作成される。この 傾斜ピラーのヤング率を共振法により測定したところ、傾斜角 θ が小さく、径の細いピラーほど大き なヤング率を示す事が見いだされた。この原因は FIB-CVD により作成されるピラーは中心にガリウ ム密度の高いコアを持ち、外側をアモルファスカーボンで覆われている二重構造に起因することが 分かった。外側のアモルファス層は非常に低いヤング率~30GPa 程度であるが、一方で中心の Ga 含有コアは300GPa に達する高いヤング率を持つ。この2重構造のために、これまでの多くの試料 において見かけ上のヤング率はおおよそ100GPa と計測される。ところが、傾斜ピラーでは、走査 速度に依存して、外側のアモルファス層の厚さが変化する。非常に傾斜の大きなピラー、すなわち 早く横方向走査したピラーでは外側アモルファスカーボン層が薄くなり、この結果見かけのヤング 率が大きく観測されることになる。しかし、この研究の結果は、FIB-CVD で合成されるアモルファス カーボンの本質は、中心部では恒に300GPa におよぶ非常に高いヤング率が実現している点にあ る。FIB-CVD 法で合成されるナノ構造体は、供給ガス圧、ビーム電流、さらにはビームの絞れ具合 とった装置状態に依存して、外側アモルファスカーボン層の厚さに変化が生じ、FIB-CVD で合成 される様々な構造体のヤング率がおおきくばらつく結果をもたらしていた。

原料ガスはフェナントレン(C₁₄H₁₀)を使用し、イオンビーム電流量 1pA、加速電圧は 30kV の条件 で傾斜ピラーを作成した。作成したピラーの写真を図 3.5.11 示す。横方向走査速度はそれぞれ (a)0nm/sec (b)45nm/sec、(c)88nm/sec、(d)108nm/sec である。走査速度が速いほど基板とピラー の傾斜角 θ が小さくなり、同時にピラーの径も細くなっていく。傾斜角 θ は(b)に示すように定義し た。



図 3.5.11 作成した FIB-CVD 傾斜ピラーの SEM 像

傾斜ピラーのヤング率

作成した傾斜ピラーのヤング率を共振法により測定した結果を図 3.5.12(a)に示す。図中のエラー バーの上限は照射されたGaがすべてピラー内にトラップされたとして密度を仮定した場合であり、 加減はピラーすべてがアモルファスカーボン(密度=2.3g/cm³)を仮定した場合のヤング率である。 また、赤四角で示した密度は、相互たわみ法を用いて、密度を同定した結果である。



図 3.5.12 (a)傾斜ピラーのヤング率、直径、密度 (b)弾性2重構造モデル

図 3.5.12(a)に示すように、傾斜角度が変化すると、測定されるピラーのヤング率が大きく変化する事が分かる。しかし、Gaイオンの侵入長はアモルファスカーボン中でせいぜい20nm程度であり、 アモルファスカーボン内に侵入した Ga イオンは 0.1psec で停止する。この間のビーム走査によるビ ーム位置移動はほとんと無視できる量であり、イオンとアモルファスカーボンの相互作用に大きな 変化が起きるとは考え難い。このような状況において、図 3.5.12(b)に示すような弾性2重構造を想 定することでビームを走査して成長させたピラーにおいて、大きなヤング率の変化が観測される理 由が良く理解できる。ここで、FIB-CVD により作成されるピラーの二重構造を考える。30KeV の Ga イオンの飛程はおおよそ 20nm であり、アモルファスカーボン内での飛程はピラーの傾斜角度や径 によらず一定のはずである。従って、6が小さく径の細いピラーでも6が大きいピラーでもガリウム 密度の高いコア部分の径は一定であり、外皮のアモルファスカーボン層だけが薄くなっていると考 えられる。ここで FIB-CVD ピラーが弾性的な二重構造を持つとし、中心のガリウム含有コア部分 は径 d, ヤング率 E₀を持ち、外皮のアモルファスカーボン層がヤング率径 d₁、ヤング率 E₁を持つ場 合、ピラー全体のヤング率は式(3)の様に表される。

$$\mathsf{E} = \frac{\mathsf{E}_{0}\mathsf{d}_{0}^{4} + \mathsf{E}_{1}(\mathsf{d}_{1}^{4} - \mathsf{d}_{0}^{4})}{\mathsf{d}_{1}^{4}} \tag{3}$$

ここで、中心コアを d=85nm、E=280GPa とし、さらに外側アモルファスカーボン層のヤング率を E1=30GPaと、実測のピラー直径を用いて計算した結果が図 3.5.12(a)中に実線になり、実際の計測 結果と良く一致する。

酸素プラズマエッチングによる検証

もしFIB-CVDピラーが先に述べたような弾性2重構造をもっているなら、垂直成長のFIB-CVDピ ラーに対してし、酸素プラズマアッシング処理を行うことで外側のアモルファスカーボン層のみを削 り取ることで、ピラーのヤング率は大幅に上昇するはずである。用いた酸素プラズマリアクター(ヤマ ト化学 PR301)の条件は RF 出力が 50W、酸素流量が 30ccm、アッシング時間は一回 5 分とし、こ れを数回繰り返し行った。アッシング回数ごとにピラーの SEM 像を撮影したものを図 3.5.13 に示 す。



図 3.5.13 アッシング回数ごとのピラーの SEM 像

回数を重ねる事にピラーの直径が細くなっていくことが分かる。このようなアッシング処理を行った 垂直成長ピラーについても弾性二重構造を仮定して計算を行った結果を図 3.5.14 に示す。このと きも同様に、*E*₆=280GPa、*E*₁=30Gpa、*d*₀=85nm、*d*₁=実測値として計算を行った。アッシングを重ねる たびにピラーの径は細くなり、同時に高いヤング率が測定された。また、実測値と理論値がよい一 致を示した。つまりモデル通りに FIB ピラーはヤング率の大きいガリウムコアとヤング率の小さいア モルファスカーボン層との二重構造になっている事が示された。

同一ビーム条件での作成にもかかわらず FIB-CVD ピラーのヤング率は大きくばらつくことが知られている。これらのばらつきの原因は FIB-CVD ピラーに特有の弾性二重構造を仮定する事で容易に理解できる。外側のアモルファスカーボン層は非常に低いヤング率(30GPa)であるため、そのアモルファスカーボン層のわずかの量の変化でも全体のみかけのヤング率は大きく変化する。今回の測定結果では、30kV で作成した直径 109nm のピラーの外側のアモルファスカーボン層を約

23nm 削るだけでヤング率 140GPa から 280GPa にまで増加した事から、外皮の厚みがピラー全体 のヤング率に大きく影響していると考えられる。さらに、コア部分のヤング率は、主に2次電子によっ て形成される外皮のアモルファスカーボンに対して1桁近く大きなヤング率を持つ。つまり、成長の 際の一次イオンとの衝突がピラーコアのヤング率に影響を及ぼすと考えられる。



図3.5.14 ピラー外皮のエッチングによるヤング率の上昇

②超尖鋭タングステンプローブ作成技術

最先端科学の研究現場におけるキーワードの一つが可視化である。特にナノ領域での物質の 振る舞いは、物質の硬さも、電気伝導も、また反応のメカニズムも、室温バルクの材料からは想像も できないような現象が頻繁に見いだされる。本研究では日立S4800をベースとした低加速STEM 機能と3次元ナノマニピュレータを組み合わせた装置を用いている。S4800型はセミインレンズ型 の走査電子顕微鏡であるが、低倍率モードでは、試料直上の対物レンズは励磁されず、磁場の少 ない環境での観察が可能である。試料室内にピエゾマニピュレータ(Kleindiek-MM3A)2機を配置 し、様々な試料操作・計測がin-situに行える事が特徴となっている。

我々は、ナノチューブ先端からの電界放出特性を研究する中で、ナノチューブを取り付けたタン グステンプローブ先端が溶融し、クーロン力で引きちぎられて超尖鋭プローブが形成されることを 見いだした(特願 2006-322924)。超尖鋭化プローブを作成するための第一段階として、多層ナノ チューブ(MWNT)を先端に固定したタングステンプローブを準備する。このために、まず MWNT がエッジに垂直に並んだカートリッジを作成する必要がある。シリコン基板の劈開面を対向させて つくったギャップに1MHz程度の交流電圧を加え、MWNT をアルコール中に分散させた溶液を滴 下すると、MWNT がシリコンエッジから突き出たようなカートリッジを作成する事ができる。このカート リッジを用いて、電子線照射によるカーボンコンタミで MWNT とプローブ先端をしっかり固定した後 に、プローブをそっとカートリッジから引き離す。MWNT はアルコール中の不純物やファン・デア・ワ ールス力で物理吸着しているだけなので、比較的容易にカートリッジからはずれ、MWNT 付きプロ ーブが完成する。



図 3.5.15 超尖鋭タングステンプローブの形成プロセス

この MWNT 付きタングステンプローブからの電界放射を制御すると、図 3.5.15 に示すようなプロ セスで超尖鋭タングステンプローブが形成される。この作成プロセスのポイントは、電界放射による プローブ先端の温度上昇でタングステンプローブ先端が柔らかくなり、またクーロン引力で MWNT が引っ張られるのでプローブ先端も細く絞られていく。しかし MWNT は溶けず、基部の軟化したプ ローブ先端を引っ張るために、最終的に MWNT に接合された部分が引きちぎられ、超尖鋭なプロ ーブが形成される。

図 3.5.16 に作成したプローブ先端のSEM像を示す。(a)は MWNT を接合したタングステンプロ ーブ、(b)は先鋭化したタングステンプローブ先端であり、この先端曲率は5nm以下と推定される。 (c)は電界放射によって先端が丸まってしまったプローブであり、(d)は電界研磨直後のプローブ 先端である。一般的に電界研磨で得られる先端曲率は50nm程度であるが、条件を最適化し、ま た研磨に熟練すると(d)に示すような先端曲率が 20nm程度のものも作成可能である。しかし、 (b)のように数ナノメートルの先端曲率を得ることは電解研磨ではほとんど不可能である。



図 3.5.16 作成されたプローブ先端のSEM像

この MWNT 付きのタングステンプローブの電界放射特性を図 3.5.17 に示す。対向電極(陽極) と、MWNT 先端の距離は5µmである。 対向電極に120V 程度印加されたあたりから MWNT 先端 より電界放出が始まる。印加電圧の上昇とともに電界放出電流が増え、約10nA 程度の放出で、通 常の SEM 像は見えなくなる。これはタングステンプローブ先端(MWNTとその接合部分)での温度 が上昇に伴って熱電子が放出され、SEMの2次電子検出器が飽和するからである。しかし、STEM では熱電子の影響を受けずに観察を継続する事ができる。このまま放射を増やしていくと、1µA 程度でタングステンプローブ先端が軟化し、さらに放射電流を増やすと MWNT が陽極に引っ張ら れてプローブ先端が破断する。このときに非常に尖鋭なプローブ先端が形成される。 この先鋭化 タングステンプローブ先端からの電界放出は、尖鋭な先端部で局所的に強電界が形成されている ので非常に低い閾値から放出が始まる。一方で、Tip(c)は先端が丸まってしまったタングステンプロ ーブからの電界放出特性を示した物である。Tip(b)と Tip(c)は同じタングステンであるから、表面の 仕事関数は同じである。両者放電開始の閾値の違いは局所電界集中の違いを反映してると考えら れ、この電界集中を表すパラメータは増強係数と呼ばれる。

図 3.5.18 には、この Tip(b)と Tip(c)の FN プロットを示す。FN プロットにおける傾き β は電界強度をF[V/m]、仕事関数 ϕ [eV]とすると

$$\beta = -6.83 \times 10^9 \phi^{3/2} \,/\,\mathsf{F} \tag{4}$$

である。しかし、通常、チップ先端の電界強度 Fは局所的な形状による増強因子 γ があり、F= γ F_M となる。ただし F_M=V/d で表される陽極とプローブ先端のあいだの平均の電界強度である。 尖鋭 化したプローブ(b)と先端がラウンドしたプローブ(c)との傾きの違いが局所電界強度の違いである。 Tip(b)の電界放射の立ち上がりは FN プロットにおいて傾きが緩い、つまり局所電界増強係数が大 きい事がわかる。ところが、電流の増加とともに、その傾きは(c)と同程度に、つまり丸まってしまっ たプローブと同じ傾きに変わっている。実は、Tip(b)と Tip(c)は同一のもので、先鋭化したプローブ 先端が放射電流測定途中でジュール加熱され、先端が溶けて丸まった結果が Tip(c)である。この ために、Tip(b)の FN プロット中の曲線は印加電圧約140Vあたりから Tip(c)と同じ傾きとなっている。 しかし、一度冷やした後の、先端が溶けて丸まったプローブ Tip(c)では電圧約140V ではエミッショ ンは起こらない。Tip(b)からの電界放射では、丸まった後も、先端が加熱されているために熱電子 によって放射が継続していると考えられる。

さらに、この超尖鋭チップの最大許容放射電流は、通常の電界研磨タングステンチップに比べ て約1000倍大きな値を示すことが分かった(図 3.5.18)。チップ先端の TEM から、先端は曲率半 径で 4nm 程度であり、チップ先端はアモルファスのタングステンであり相当量のカーボンが混入し ていることが分かっている。





図 3.5.17 超尖鋭チップ電界放出特性とFN プロット

図 3.5.18 電界放出の I-V 特性

低加速STEMによる局所電場の可視化

尖鋭なエミッタチップの先端では局所電界が非常に強く増強される事が知られており、先端形状、 特に先端曲率が電界放出特性に敏感に影響する。このような先端形状に異存する局所電界増強 効果に対して、例えば"Hemisphere on a post model"などの幾つかの特殊な近似モデルでは解析 解を得ることができ、電場増強係数を予測する事が可能であるし、また有限要素法などの手法を用 いて、電極周囲の空間でラプラス方程式を解くことである程度予測する事も可能である。しかし、や はり実際の電界集中の様子をリアルタイムに可視化し、ナノ領域での物質の変化を観測できる事 は非常に有利である。本報告では、多層ナノチューブ(MWNT)先端からの電界放射の研究過程 で、非常に尖鋭なタングステンプローブを作成し得る事、さらに、その先端におけて極端に増強さ れた局所電場が低加速STEM像のなかで可視化できることを見いだした。

このような電界放射中の画像は通常の SEM では熱電子のために画面が白く飛んでしまい観察 できない。しかし、STEM モードでは、2次電子に影響されることなく、観察が可能である。我々は低 加速の STEM において、プローブ先端に形成される局所高電界を直接に可視化し得ることを見い だした。実験に用いているのは透過電子検出器を装備した日立 S-4800 である。この S4800 の電子 光学系はセミインレンズタイプの対物レンズで構成されており、通常の高倍率モードでは試料は対 物レンスのつくる磁場の中に入っている。しかし、低倍率モードでは対物レンズは励磁されず、対 物レンズ直下の磁場漏洩は少ない。ここで報告する局所電場の可視化では、この低倍率モード、 低加速の STEM を用いている。

図 3.5.19 において陽極とチップ先端から 1mm 離れた左側に設置してある。1次電子の加速を5 keV にして、STEM 像を観測するプローブチップへのバイアスを印加するとともに、STEM像中の チップ先端に黒い影が現れる。図 3.5.19(a)バイアス電位が無いときで、電線はプローブを通過でき ないからプローブ全体が黒く映っている。(b)145V 印加するとチップ先端に小さな黒い円盤状の影 が出現し、、さらに(c)150V、(d)155V と印加バイアスを増やすと影は大きく成長していく。しかし、 これ以上のバイアスでは急激に影は大きく成長し、画面全体がブラックアウトしてしまう。



STEM Detector

図 3.5.19 チップ先端での局所電界の可視化

図 3.5.20 局所電場による電子軌道の偏向

この電圧を印加したプローブチップ先端を取り巻く黒い陰は、図 3.5.20 に示すように、局所的に 形成された極端に強い電場近傍を1次電子が通過するときにその軌道が偏向されることで現れる。 STEM モードでは、試料直下に設置された検出器によって試料を透過した1次電子の強度を用い て画像化している。実際にはプローブ下流30mm の位置に直径1.5mm のオリフィスを設置し、電 子の偏向角度を制限している。図 3.5.21 に示す低倍率での STEM 像から見て取れるように、オリフ ィスの中央にプローブの先端が配置してある。この状態でプローブはグランド接地されている。ここ で、アノードに電位を与えると、アノードとプローブ間の電場によって一次電子の軌道がアノード側 に偏向され、従って、STEM 画像中のオリフィス位置が右側にシフトしていく。同時にプローブの位 置も右側にシフトするが、そのシフト量は僅かである。なぜかというと、プローブの位置は対物レン ズ直下であり、WD=5mm 程度の位置である。このため、対物レンズから出てプローブに到達するま でにアノード電場による偏向量は少ないが、プローブからオリフィス位置までの飛程中では大きな 偏向を受けるからである。さらにアノードはオリフィスの左側に設置してあるから、オリフィス左側エッ ジ近傍のほうが陽極電場が強く、その分オリフィス左側は大きく歪む。ここで、プローブ先端の局所 電場で偏向された電子がオリフィスエッジに到達すると、その部分には影が形成されることになる。 つまり、図 3.5.21(b)の距離 d とオリフィスまでの距離 30mm とのタンジェントが図 3.5.20 のプローブ 先端に形成された局所電場による偏向角度 θ を与える。



図 3.5.21 オリフィス像の変化

このようなプローブ先端の局所電場の形成はおおよそ次のように考えると理解しやすい。プローブは全体が導電性であるから、プローブが電場中に置かれた時、すなわち空間に電位勾配が存在するときでも、プローブの電位は全体が同一電位である。このために、プローブ先端に電荷が誘導され、プローブ全体が同一電位になるように調整される。さらに対向電極には、プローブ先端の電荷に対する鏡像電荷が誘起される。このような効果をモデル近似すると、局所電場の増強因子 γ は $\gamma = (1+d/r)$ と表される。ここで、dは対向電極(アノード)とチープ先端との距離であり、rは チップ先端の曲率半径である。すなわち、先端曲率の小さな、尖鋭なチップほど、先端での電界は極率半径に逆比例して強くなる。このように見かけの電荷がプローブ先端に存在すると仮定すると、電子軌道の偏向は図 3.4.32 に示すようなプローブ先端の点電荷とのクーロン力(中心力)によって電子軌道が偏向された散乱、すなわち Rutherford 散乱と考えることができる。

Rutherford 散乱では、電子は双曲線軌道を描く。無限遠からの軌道は点電荷に対し一定の距離 b(衝突径数)をもって近づく。その後点電荷とのクーロン相互力で軌道が曲げられ、偏向する。 ここで衝突径数 bは、

$$\mathbf{b} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{\mathbf{z}_{\mathrm{I}} \mathbf{e}^2}{\mathbf{m} \mathbf{v}^2} \cot \frac{\theta}{2}$$
(5)

と表され、eは素電荷、 z_1e はチップ先端に見かけ上誘起された点電荷、mは電子質量、 ε_0 は真空の誘電率、vは電子速度、 θ は散乱角である。この散乱の結果、1次電子はSTEM検出器の外に 軌道がそれて、黒い影が形成される。画像の完全に黒い部分、つまりプローブや電極の黒さを与 える輝度と同じレベルの黒さの部分を抽出すれば、走査電子が完全にオリフィスの外側にずれる ほどに偏向を受けた領域が特定される。もちろん SEM にはコントラストと輝度の調整が任意に可 能であり、明視野像中の最暗部が飽和してしていない事が前提となる。図 3.5.19(c)の、150V の電 位を与えた時に観測されるプローブ先端の黒い領域から、プローブと同じレベルの輝度を抽出し た結果が図 3.5.19(e)に示す白い円領域である。この円領域内に入射した1次電子はすべて検出 器の外に逸れているわけで、このときの円領域の半径 2.0 μ m が衝突径数となる。 散乱角 θ は検 出器の半径とオリフィスの距離で決まり、この場合 $\tan \theta = 0.0023$ である。しかし、実際のオリフィス は30mm 下流であるから、ワーク距離に対応する拡大率 1.25 倍を考慮しなくてはならず、実際のオ

衝突径数 b はなれた円領域の境界上での電場 E は $\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{\mathbf{Z}_1 \mathbf{e}}{\mathbf{b}^2}$ である。 Rutherford 散乱式と

組み合わせて、さらに一次電子は 5keV の低加速であることを考慮すると非相対論的に $eV = mv^2/2$ であると近似でき、

$$\mathsf{E} = \frac{\mathsf{m}\mathsf{v}^2}{\mathsf{e}\mathsf{b}}\tan\frac{\theta}{2} = \frac{\mathsf{V}}{\mathsf{b}}\tan\theta \tag{6}$$

となる。このことから、チップ先端から2ミクロンの境界上での電場が約7.3x10⁶ V/m と算出される。 ただし、画像の抽出方法、電子ビームの光軸、プローブとSTEM 検出器または、ビームアパーチャ との相互位置関係などの多くの因子に強く影響されるから、実際にはもっと複雑であり、慎重に推 定しなくてはならない。ところで、電極やプローブのエッジはシャープに見えるが、局所電界による 偏向はグレーのグラデーションとなる。電子ビームは試料上では細く絞られているものの、距離を 置けば有限の広がりがあり、検出器境界での逸れ具合で階調が付く。一方で、電極エッジの強電 界の無い部分では、1次電子は検出器の中に収まっている。つまり、電子ビームの走査で1次電子 が電極エッジを横切った瞬間に検出器信号が急激に変化するからシャープなエッジになる。また、 このような観測が可能であるのは低加速 STEM であることにも強く依存している。一般的な200keV の STEM になると、散乱角度は速度の2乗に比例して小さくなるから観測しづらくなる。もちろん検 出器を小さくすればよいのだが、S/N の問題が生じる。さらに高感度の局所電場観測をしようとす れば、より低加速のSTEMが有利となるが、こちらは周囲の電場の乱れに非常に敏感になってくる ので別の困難が生じる。5~10keV 程度がこの観測には都合が良さそうであるが今後の詳細な検 討が必要である。

(2)研究成果の今後期待される効果

・FIB-CVD 成長で得られたアモルファスカーボン構造体は、その本質として、中心コア部のヤン グ率は Ga 含有状態でありながら、タングステンカーバイド並の300GPa におよぶ高い値であること が分かった。さらに外側アモルファスカーボン層をエッチングで削り落とすことも可能であることが分 かった。これは、ナノマシンの構造材料として用いる場合に、弾性2重構造を制御する事で、非常 に幅広い範囲で構造材料の硬さを制御できることを示している。松井グループで開発したナノ3次 元構造体成長制御プログラムと連携して、様々な形状および機械的特性に対する要望に応える事 が可能となった。

・ナノチューブの固相成長では、FIB-CVD 法で得られるナノ3次元構造を利用する事によって、 ナノ実際に成長状態を高分解能顕微鏡の視野の中で観測するという、今までにない研究手法・計 測概念を打ち出す事ができた。ナノチューブの成長制御、特に太さとカイラリティの制御は誰しも願 う究極の成長制御技術である。しかし、通常のナノチューブ成長が気相で行われるが故に、in-situ の電顕観測が非常に困難となっている。一方で、我々の固相ナノチューブ成長では、固相である が故に、触媒粒子への充分な材料の供給がなされ、かつ、TEM 観察に耐え得る真空度を確保し ながら触媒反応を可視化することが可能となった。今後の研究で、ナノチューブ成長メカニズムの 研究が進展する事と期待されると同時に、同様の手法が、他の無機・有機材料の触媒反応にも適 応可能であると考えられる。特に、次に述べる、超尖鋭プローブと局所電界可視化技術との組み合 わせで、新材料創成技術に対する新しい方向性を与え、大きなブレークスルーをもたらす事が期 待される。

・当研究グループでは先端曲率が 5nm 以下の超尖鋭金属プローブが合成できることを見いだした (JST特許 特願 2006-322924)。多層ナノチューブを反応トリガー材料として、その電界放出プロセスを制御する事でタングステンプローブの先端を先端曲率を5nm 程度以下に尖らせることが可能である事を見いだした。このプローブ先端はカーボンが固溶したアモルファス状タングステンであり、プローブ先端からの電界放射電流は 1.5mA 以上の非常に高い放射電流許容値を有する。 一般的な走査トンネル顕微鏡 (STM) 用のタングステン電界研磨プローブは先端曲率がせいぜい約20nm であり、1µA のトンネル電流で破壊(溶解)する事に比べると3桁以上の高い許容電流量である。

・低加速電子を用いた電子励起反応は、その大きな反応断面積を用いて局所的酸化や解離反応を励起する事ができ、デバイス作成や新材料合成の新たな手法として注目されている。従来のSTM装置を用いた局所陽極酸化では酸化チタン単電子トランジスタが作成され、またグラフェン解離反応など興味深い反応も観測されている。しかし、電流量の上昇に伴うプローブ先端の溶融や、プローブ原子の飛散による表面汚染が問題であり、また注入できる電流も少なく、局所溶解には至らない。しかし、我々の超尖鋭プローブでは、局所電界強度および局所電流密度ともに数桁の改善が見込まれ、ナノ領域での局所場操作プロセスのブレークスルーになると期待される。従来の電子素子の製造プロセスでは材料の接合形成では、結晶膜を連続エピタキシャル成長させ、あとから接合部分をエッチングで削り出す方法が用いられる。これに対して、超尖鋭先端からの電界放出と電子励起反応を用いれば、カーボン系材料や酸化物系ナノ結晶同士をナノ溶接したり、ナノ切断するいった、基本的な物作り技術をナノ領域に持ち込む事が可能となり、3次元構造機能性素子の合成・組み立てといった新概念の材料合成・加工技術の創出が可能である。また本技術で合成されるプローブ先端はカーボンの混入したアモルファス状構造であり、非常に硬い事が特徴である。つまり、非平衡合成プロセスを用いる事で様々な高融点材料による炭化物超尖鋭プローブが形成でき、ナノ加工ツールとしての応用も期待できる。

・さらに我々は、超尖鋭プローブ先端に誘起される局所電界分布が、低加速 STEM(走査透過

電子顕微鏡) 画像中に可視化されることも見いだした。プローブ先端には周囲の電場勾配に応じ た見かけの電荷が誘起され、この電荷によってプローブ先端には局所的な高電界領域が形成され る。低加速の走査透過電子顕微鏡の一次電子は、プローブ先端に誘起された電荷によって散乱 される。つまりラザフォード散乱であり、散乱された電子は検出器に到達できずに散乱領域が STEM 画像中に明瞭な影として可視化される。このような電子ラザフォード散乱による可視化は5~ 10keV の低加速だからこそ実現しうるものであり、局所電界と電流に依存する様々なナノ領域での 反応過程を実時間で観測できる特徴を持つ。つまり、超尖鋭プローブと電界可視化技術、さらに固 相ナノチューブなどの固相触媒成長を用いて、カーボン系材料および酸化物系材料など様々な 材料において電子励起型ナノ加工形成技術が発展していくと予測される。

4 研究参加者

①ナノ立体構造デバイス研究グループ(ナノ立体構造形成技術と応用デバイスの研究)

氏名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
松井 真二	兵庫県立大学 高度産業科学 技術研究所	教授	立体ナノ構造形成技術 開発	平成 14 年 11 月~ 平成 20 年 3 月
神田 一浩	兵庫県立大学 高度産業科学 技術研究所	准教授	立体ナノ構造形成ビー ム励起プロセスシュミレ ーション	平成 14 年 11 月~ 平成 20 年 3 月
春山 雄一	兵庫県立大学 高度産業科学 技術研究所	助教	ビーム励起プロセス堆 席材料の物性評価	平成 14 年 11 月~ 平成 20 年 3 月
米谷 玲皇	兵庫県立大学 大学院理学研 究科	D3	ガラスキャピラリー上の バイオナノツール研究 開発	平成 14 年 11 月~ 平成 19 年 9 月
西窪 明彦	兵庫県立大学 大学院理学研 究科	D3	堆積材料評価	平成 18 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
森田 貴彦	兵庫県立大学 大学院理学研 究科	M2	空中配線技術の開発	平成 14 年 11 月~ 平成 17 年 3 月
渡辺 啓一郎	兵庫県立大学 大学院理学研 究科	M2	空中配線技術の開発	平成 14 年 11 月~ 平成 17 年 3 月
中松 健一郎	兵庫県立大学 大学院理学研 究科	D2	空中配線技術の研究開 発	平成 15 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
河守 将典	兵庫県立大学 大学院理学研 究科	M2	立体ナノ構造形成技術 研究開発	平成 15 年 4 月~ 平成 18 年 3 月
加藤 有理	兵庫県立大学 大学院理学研 究科	M2	立体ナノ構造形成技術 研究開発	平成 15 年 10 月~ 平成 18 年 3 月
小笹 明賀	兵庫県立大学 大学院理学研 究科	M2	ナノマイクロシステム研 究開発	平成 16 年 4 月~ 平成 19 年 3 月
井垣 潤也	兵庫県立大学 大学院理学研 究科	M2	材料物性評価研究	平成 16 年 4 月~ 平成 19 年 3 月
星野隆行	東京大学大学 院情報理工学 系研究科	D3	立体ナノ構造形成技術 研究開発	平成 15 年 10 月~ 平成 18 年 3 月
三成 千明	兵庫県立大学 大学院理学研	M2	立体ナノ構造形成技術 研究開発	平成 18 年 4 月~ 平成 20 年 3 月

		究科			
山田	倫子	兵庫県立大学 大学院理学研 究科	M2	立体ナノ構造形成技術 研究開発	平成 18 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
岡田	真	兵庫県立大学 大学院理学研 究科	M1	立体ナノ構造形成技術 研究開発	平成 18 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
小池	裕幸	兵庫県立大学 大学院生命理 学研究会	准教授	ガラスキャピラリー上の バイオナノツール	平成 18 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
船曳	涼子	兵庫県立大学 高度産業科学 技術研究所	研究補助 員		平成 16 年 4 月~ 平成 18 年 3 月
山田	未来	兵庫県立大学 高度産業科学 技術研究所	チーム事 務員		平成 15 年 4 月~ 平成 20 年 3 月

② ナノ立体構造デバイス研究グループ II (金シリコン FIB による堆積材料特性評価の研究)

氏名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
柳沢 淳一	大阪大学大学 院基礎工学研 究科	准教授	AuSi イオン源による FIB-CVD 技術研究開 発	平成 18 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
田中 秀明	大阪大学大学 院基礎工学研 究科	M2	SiFIB-CVD による細線・ 薄膜形成と評価	平成 19 年 4 月~ 平成 20 年 3 月
揚 卓真	大阪大学大学 院基礎工学研 究科	M1	AuFIB-CVD による細 線・薄膜形成と評価	平成 19 年 4 月~ 平成 20 年 3 月

③ ナノ立体構造材料特性研究グループ I (ナノ立体構造電気・光的特性評価の研究)

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
落合 幸徳	NEC 基礎・環境 研究所ナノテク ノロジーTG	主任研究 員	ナノ立体構造形成技術 開発	平成 14 年 11 月~ 平成 17 年 9 月
市橋 鋭也	NEC 基礎・環境 研究所エネルギ ーデバイス TG	主任研究 員	TEM による立体ナノ構 造評価・解析	平成 14 年 11 月~ 平成 20 年 3 月
石田真彦	NEC 基礎・環境 研究所ナノテク ノロジーTG	主任	ナノ立体構造バイオ素 子作製のための立体構 造物製造研究	平成 18 年 11 月~ 平成 19 年 3 月

	4	ナノ立体構造材料特性研究グルー	-プⅡ(ナ	ノ立体構造電気	•光的特性評価(の研究
--	---	-----------------	-------	---------	----------	-----

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
-----	-----	-----	------	------

藤田 湾	享一	筑波大学	准教授	ナノ立体構造形成とバイ	平成 14 年 11 月~
				オ素子応用	平成 20 年 3 月
小林 勇	亮太	筑波大学	M2	μ TAS・バイオ素子形成	平成 16 年 4 月~
				と計測	平成 20 年 3 月
岡田 耶	窓	筑波大学	M2	EB-CVD 成長メカニズム	平成 16 年 4 月~
				と構造制御	平成 19 年 3 月
武川 貴	責仁	筑波大学	M2	ナノ構造の結晶化技術	平成 16 年 4 月~
				およびデバイス応用	平成 19 年 3 月
石野 豊	豊彦	筑波大学	M2	ナノサージェリー素子形	平成 16 年 4 月~
				成と X 線光学系への応	平成 20 年 3 月
				用	
宮崎 浴	告史	筑波大学	M2	ナノ構造の結晶化技術	平成 17 年 4 月~
				およびデバイス応用	平成 19 年 3 月
東 広ナ	大	筑波大学	M2	EB-CVD 成長メカニズム	平成 17 年 4 月~
				と構造制御	平成 20 年 3 月
中澤 养	翎太郎	筑波大学	M2	ナノ構造の結晶化技術	平成 17 年 4 月~
				およびデバイス応用	平成 20 年 3 月
池田 褚	谷太	筑波大学	M1	EB-CVD 成長メカニズム	平成 18 年 4 月~
				と構造制御	平成 20 年 3 月
近藤 牙	雀人	筑波大学	4年生	ナノ構造の結晶化技術	平成 18 年 4 月~
				およびデバイス応用	平成 19 年 3 月
鈴木 音	竜一	筑波大学	M1	μ TAS・バイオ素子形成	平成 18 年 4 月~
				と計測	平成 19 年 3 月

(5) ナノ立体構む	置材料特性研究グルー	プⅢ(ガリウム FIB	ら による堆積特性	:評価の研究)
------------	-------------------	-------------	-----------	---------

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
知京豊裕	物質材料研究	センター	ナノ立体構造形成技術	平成 14 年 11 月~
	機構	長	開発およびデバイス応	平成 20 年 3 月
			用	
長田 貴弘	物質材料研究	研究員	ナノ立体構造形成およ	平成 15 年 4 月~
	機構		び構造評価	平成 20 年 3 月
佐久間 芳樹	物質材料研究	主幹研究	光学測定によるナノ立	平成 14 年 11 月~
	機構	員	体構造の含有元素分析	平成 20 年 3 月
関口 隆史	物質材料研究	主席研究	光学測定によるナノ立	平成 14 年 11 月~
	機構	員	体構造の含有元素分析	平成 20 年 3 月
山内 泰	物質材料研究	主席研究	中性ビームを使った立	平成 14 年 11 月~
	機構	員	体ナノ構造物性評価	平成 20 年 3 月
倉橋 光紀	物質材料研究	主任研究	材料物性評価研究	平成 14 年 11 月~
	機構	員		平成 20 年 3 月
鈴木 拓	物質材料研究	研究員	中性ビームを使った立	平成 14 年 11 月~
	機構		体ナノ構造物性評価	平成 20 年 3 月

5 招聘した研究者等

氏 名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
------------	-------	-----	------

6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内誌4件、国際誌56件)

- 1. 長田貴弘、佐久間芳樹、関口隆史、知京豊裕、"集束イオンビーム CVD 法による GaN 立 体構造の作製と評価"、日本電子材料技術協会会報 Vol. 37, pp. 37-39 (2006)
- 2. 米谷玲皇、神田一浩、春山雄一、皆藤孝、松井真二「集束イオンビーム励起表面反応 による化学気相成長法を用いた単一オルガネラ操作のためのバイオナノツールの作製 と評価」、電子情報通信学会論文誌、Vol. J90-C, pp. 88-95, Jan, 2007
- 市橋鋭也、藤田淳一、石田真彦、落合幸徳、"鉄触媒を用いた固相成長反応による非結 質カーボンピラーのチューブ化その場観察"表面科学(日本表面科学学会誌) Vol. 26, No. 6, pp. 357-361 (2005)
- 市橋鋭也、藤田淳一、石田真彦、落合幸徳、"鉄触媒を用いた固相成長反応による非結 質カーボンピラーのチューブ化その場観察"顕微鏡(日本顕微鏡学会誌) Vol. 40, No. 2, pp. 81-84 (2005)

<国際>

- R. Okada, T. Yo, J. Yanagisawa, and S. Matsui, "Deposition of carbonaceous structures using focused Au and Si ion-beam-induced chemical vapor deposition methods", J. Vac. Sci. Technol. B 25, pp.2180-2183, 2007.
- 2. Jun-Ichi Fujita, Y. Ikeda, S. Okada, K. Higashi, S. Nakasawa, M. Ishida, and S. Matsui "In situ visualization of local electric field in an ultrasharp tungsten emitter under a low voltage scanning transmission electron microscope", J.Vac.Sci.Technol. B25,pp. 2624-2627 (2007).
- J. Igaki, A. Saikubo, R. Kometani, K. Kanda, T. Suzuki, K. Niihara, and S. Matsui, "Elementary Analysis of Diamond- Like Carbon Film Formed by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", Jpn. J. Appl. Phys. Vo.46.No.12, pp.8003-8004,2007.
- R. Kometani, Y. Haruyama, K. Kanda, T. Kaito, and S. Matsui, "Relationship between Field Emission Properties and Material Characteristics of Diamond-Like Carbon Fabrication by Focused Ion Beam Chemical Vapor Deposition", Jpn. J. Appl. Phys. Vo.46. No.12, pp7987-7990, 2007.
- R. Kometani, H. Koike, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Kaito, and S. Matsui, "Evaluation of Bio nano-Sensing Probe Fabricated by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition for Single organelle Analysis", Jpn. J. Appl. Phys. Vo.46. No.12, pp.7963-7965, 2007.
- J. Fujita, Y. Ikeda, S. Okada, K. Higashi, S. Nakazawa, M. Ishida, and S. Matsui, "In-situ Visualization of Local Field Enhancement in an Ultra Sharp Tungsten Emitternder Low Voltage Sccaning Transmission Elestron Microscope", Jpn. J. Appl. Phys. Vo.46. 498,2007.
- 7. R. Kometani, H. Komike, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Kaito, and S. Matsui, "Evaluation of

Vacuum Microcapsule fabricated using Focused-ion-Beam Chemical-Vapor-Deposition", Jpn. J. Appl. Phys. Vo.46.(8), pp.L180-183,2007.

- 8. J. Fujita, S. Nakazawa, T. Ichiahshi, M. Ishida, T. Kaito, and S. Matsui, "Graphitic tube transformation of FIB-CVD pillar by joule heating with flash discharge", Microelectronic Engineering 84, pp.1507, 2007.
- 9. J. Yanagisawa, H. Matsumoto, T. Fukuyama, Y. Shiraishi, T. Yodo, and Y. Akasaka, "Effects of Ga ion irradiation on growth of GaN on SiN substrates by electron cynclotron resonance-assisted molecular beam epitaxy", Nucl. Instr. and Meth. B257, pp.348-351,2007.
- K. Nakamatsu, M. Nagase, T. Ichihashi, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Kaito, and S. Matsui, "Fabrication of Diamond-Like Carbon Nanosprings by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition and Evaluation of Their Mechanical Characteristics", IEICE TRANCE. ELECTRON, vol.E90-c,pp.41-45,2007.
- 11. S.Matsui, R. Kometani, "Three-Dimentional Nanostructure Fabricated by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition and Its Applications", IEICE TRANCE. ELECTRON., vol.E90-c, pp.25-35,2007.
- 12. T. Nagata, P. Ahmet, Y. Yamauschi, Y. Sakuma, T. Sekiguchi, and T. Chikyow, "Psition controlled GaN nano-structure fabricated by low energy focused ion beam system", Nuclear instruments and methods in Physics Research Section B, Vol.242,pp. 250-252, 2006.
- 13. T. Ichihashi, M. Ishida, Y. Ochiai and J. Fujita, "Carbon-nanopillar tubulization caused by liquidlike iron catalyst nanoparticles", E-J. Surf. Sci. Nanotech. Vol.4, pp.401-405, Apr.29,2006
- S. Okada, T. Mukawa, R. Kobayashi, M. Ishida, Y. Ochiai, T. Kaito, S. Masui and J. Fujita, "Comparison of Youngs Modulus Dependency on Beam Accelerating Voltage between Electron-Beam-and Focused-ion-beam-Induced Chemical Vapor Deposition Pillars", J. Appl. Phys., Vol.45, No.6Bpp.5556-5559,June,20,2006.
- T, Hoshino, A. Ozasa, R. Kometani, S. Matsui, and K. Mabuchi, "Development of regeneration-type neural interface: A microtube guide for axon growth of neuronal cells fabricated using focused-ion-beam chemical vapor deposition", J. Vac. Sci. Technol., B24(6),pp.2538-2543,2006.
- J. Igaki, K. Nakamatsu, R. Kometani, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Kaito, and S. Matsui, "Mechanical characteristics and applications of diamondlike-carbon cantilevers fabricated by focused-ion-beam chemical vapor deposition", J. Vac. Sci. Technol., B24(6),pp.2911-2914,2006.
- K. Nakamatsu, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Ichiahshi, T. Kaito, and S. Matsui, "Mechanical property evaluation of Au-coated nanospring fabricated by combination of focused-ion-beam chemical vapor deposition and sputter coating", J. Vac. Sci. Technol., B24(6), pp. 3169-3172, 2006.
- J. Fujita, T. Ichihashi, S. Nakazawa, S. Okada, M. Ishida, Y. Ochiai, T. Kaito, and S. Matsui, "Inducing graphite tube transformation with liquid gallium and flash discharge", Appl. Phys. Lett., 88, pp.093109-383111, 2006.
- 19. K. Kanda, J. Igaki, Y. Kato, R. Kometani, A. Saikubo, and S. Matsui, "NEXAFS study on carbon-based material formed by Focused-ion-beam chemical-vapor-deposition", Radiation Physics and Chemistry 75, pp.1850-1854,2006.

- J.Igaki, K.Kanda, Y. Haruyama, M. Ishida, Y. Ochiai, J. Fujita, T. Kaito, and S. Matsui, "Comparison of FIB-CVD growth chearacteristics", Microelectronic Engineering 83, pp.1225-1228, 2006.
- R. Kometani, R. Funabiki, T. Hoshino, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Kaito, J. Fujita, Y. Ochiai, and S. Matsui, "Cell wall cutting tool and nano-net fabrication by FIB-CVD for subcelluler operations and analysis", Microelectronic Engineering 83, pp.1642-1645, 2006.
- K. Nakamatsu, J. Igaki, M. Nagase, T. Ichihashi, and S. Matsui, "Mechanical characteristics of tungsten-containing carbon nanosprings grown by FIB-CVD", Microelectronic Engineering 83, pp.808-810, 2006.
- J. Igaki, R. Kometani, K. Nakamatsu, K. Kanda, Y. Haruyama, Y. Ochiai, J. Fujita, T. Kaito, and S. Matsui, "Three-dimentional rotor fabrication by focused-ion-beam chemical-vapor-deposition", Microelectronic Engineering 83, pp.1221-1224, 2006.
- 24. R. Kometani, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Kaito, and S. Matsui, "Evaluation of Field Electron Emitter Fabricated Using Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", Jpn. J. Appl. Phys.,vol.44, No.39, pp.L711-713, 2006.
- 25. T. Nagata, P. Ahmet, Y. Yoo, K. Yamda, K. Tsutsui, Y. Wada, and T. Chikyow, "Schottky metal library for ZnO based UV photodiode fabricated by the combinatorial ion beam assisted deposition", Appl. Sur. Sci, Vol.252, pp.2503-2506,2005.
- 26. K. Watanabe, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Kaito and S. Matsui, "Nanoimprint Mold Repair by Ga⁺ Focused Ion- Beam", Jpn. J. Appl. Phys., vol.43, No.1, pp.7769-7772, Jan.2005.
- 27. T. Ichihashi, J. Fujita, M. Ishida and Y. Ochiai, "In situ Observation of Carbon-Nanopillar Tublization Caused by Liquidlike Iron Particles", Phys. Rev. Lett., vol.92, No.21, pp. 215702-1-215702-4, 2005.
- 28. R. Kometani, T. Hoshino, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Kaito, J. Fujita, M. Ishida, Y. Ochiai, and S. Matsui, "Three-dimentional high-performance nano-tools fabricated using focused-ion-beam chemical-vapor-deposition", Nucl. Instr. and Meth. Res, B232 pp.362-366, 2005.
- R. Kometani, T. Hoshino, K. Kondo, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Kaito, J. Fujita, M. Ishida, Y. Ochiai and S. Matsui, "Fabrication on Nanomanipulator with SiO₂/DLC Heterostructure by Focused-Ion-Beam Chemical-Vapor-Depsition", Jpn. J. Appl. Phys., vol.44, No.7B, pp.5725-5731,2005.
- K. Nakamatsu, M. Nagase, J. Igaki, H. Namatsu, and S. Matsui, "Mechanical characteristics of Diamond-like-Carbon Nano-Springs Fabricated by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", Jpn. J. Appl. Phys., vol.44, No.39, pp.L1228-1230, 2005.
- 31. T. Nagata Y. Yoo, P. Ahmet and T. Chikyow, "Effect of Single-Crystalline GaN Thin Films in Paulsed Laser Deposition Process", Jpn. J. Appl. Phys., pp.7896-7900, 2005.
- 32. T. Mukawa, S. Okada, R. Ochiai, T. Kaito and S. Matsui, "Position-Controlled Carbon Fiber Growth Catalyzed Using Electron beam-induced Chemical Vapor Deposition Ferrocene Nanopillars", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.44.No.11. pp.5639-5641,2005.
- S. Okada, T. Mukawa, R. Kobayashi, J. Fujita, M. Ishida, T. Ichihashi, Y. Ochiai, T. Kaito and S. Matsui, "Growth Manner and mechanical Characteristics of amorphous Carbon nanopillars Grown by Electron-Beam-Induced Chemical Vapor Deposition", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.44, No.11, pp.5646-5650,2005.

- 34. T. Nagata, P. Ahmet, Y. Sakuma, T. Sekiguchi and T. Chikyow, "Low temperature growth of GaN micro crystal from position controlled Ga droplets arrayed by low energy focused ion beam system", Journal of Crystal Growth, Vol.283,pp.328-331,2005.
- 35. K. Watanabe T. Hoshino, K. Kanda, Y. Haruyama and S. Matsui, "Brilliant blue observation from a Morpho-butterfly-scale quasi-structure", Jpn. J. Appl. Phys., vol.44, No.1, pp.L48-50, 2005.
- T. Nagata, P. Ahmet, Y. Yamauchi, Y. Sakuma, T. Sekiguchi, and T. Chikyow, "Position controlled gaN Nano-Structures fabrication by Foocused Ion Beam Assisted Methods", Proceedings of the 10th International Symposiumu on Adovanced Physical Fiels, pp.123-125,2005.
- T. Nagata, P. Ahmet, Y. Sakuma, T. Sekiguchi and T. Chikyow, "GaN nanostructure fabrication by focused-ion-beam-assisted chemical vapor deposition", Appl.Phys.Lett,vol.87, pp.013103-1-013103-3, 2005.
- 38. T. Morita, K. Kanda, Y. Haruyama, and S. Matsui, "Nanomechanical Switch formed by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", Jpn. J. Appl. Phys., 44, pp.3341-3343, 2004.
- K. Watanabe, T. Morita, R. Kometani, T. Hoshino, K. Kondo, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Kaito, J. Fujita, M. Ishida, Y. Ochiai, t. Tajima and S. Matsui, "Nanoimprint using Three-dimentional Microlens Mold made by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", J. Vac. Sci. Technol., B22, pp.22-26, 2004.
- 40. T. Ichihashi, M. Ishida and Y. Ochiai, "In-situ observation of carbon-nanopillar tubulization process", J. Vac. Sci. Technol., B22(6), pp.3221-3223, 2004.
- T. Morita, K. Watanabe, K. Kondo, T. Hoshino, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Kaito, J. Fujita, T. Ichiahshi, M. Ishida, Y. Ochiai, T. Tajima, and S. Matsui, "Nanomechanical Switch fabrication by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", J. Vac. Sci. Technol., B22(6), pp.3137-3142, Dec.2004.
- 42. T. Morita, K. Kanda, Y. Haruyama, K. Kondo, T. Hoshino, T. Kaito, J. Fujita, T. Ichihashi, M. Ishida, Y. Ochiai, T. Tajima, and S. Matsui, "Elastical Resistivity Elvaluation of Free-Spase-Nano-Wiring formed by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", Jpn. J. Appl. Phys., pp. 2004.
- 43. R. Kometani, T. Hoshino, K. Kondo, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Kaito, J. Fujita, M. Ishida, Y. Ochiai and S. Matsui, "Performance of nanomanipulator fabricated on glass capillary by focused-ion-beam chemical-vapor-deposition", J.Vac. Sci. Technol., B23.pp.298-301, Dec.2004.
- 44. T. Hoshino, M. Kawamori, T Suzuki, S. Matsui and K Mabuchi "Three-dimentional and Multimaterial Microfabrication using Focused-ion-beam Chemical-vapor-deposition and its Application to Processing Nerve Electrodes", J. Vac. Sci. Technol., B22, pp.3158-3162, 2004.
- 45. J. Fujita, M. Ishida, T. Ichihashi, Y. Ochiai, T. Kaito, and S. Matsui, "Graphitized Wavy Traces of Iron Particles Observed in amorphous Carbon Nano-Pillars", Jpn. J. Appl. Phys., vol.43, pp.3799-3802, 2004.
- R. Kometani, T.Hoshino, K. Kondo, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Kaito, J. Fujita, M. Ishida, Y. Ochiai and S. Matsui, "Characteristics of Nano-Electrostatic Actuator Fabricated by FIB-CVD", Jpn. J. Appl. Phys., vol.43, No.11A, pp.7187-7191,2004.

- 47. T. Ichihashi, J. Fujita, M. Ishida, and Y. Ochiai, "In situ Observation of Carbon-Nanopillar Tubulization Caused by Liquidlike iron Particles", Phys. Rev. Let. 92, pp.25702-1-25702-4, 2004.
- 48. K.Watanabe, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Kaito, and S. Matsui, "Nanoimprint Mold Repair by Ga+ Focused-Ion-Beam Direct Etching", Jpn. J. Appl. Phys.43 ,pp.7769-7772, 2004.
- 49. M. Ishida, J. Fujita, T. Ichihashi, Y. Ochiai, T. Kaito, S. Matsui, ""Focused ion beam fabrication of tungsten structures", J.Vac. Sci. Technol., B21.pp.2728-2731, 2003.
- T. Morita, K. Watanabe, R. Kometani, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Kaito, J. Fujita, M. Ishida, Y. Ochiai, T. Tajima and S. Matsui, "Three-dimensional nanoimprint Mold Fabrication by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", Jpn. J. Appl. Phys., vol.42, pp.3874-3876,2003.
- R. Kometani, T. Morita, K. Watanabe, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Kaito, J. Fujita, M. Ishida, Y. Ochiai, and S. Matsui, "Nozzle-Nanostructure fabrication on Glass Capillary by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition and Etching", Jpn. J. Appl. Phys., vol.42, pp.4107-4110, 2003.
- R. Kometani, T. Morita, K. Watanabe, T. Hoshino, K. Kanda, K. Kondo, Y. Haruyama, T. Kaito, J. Fujita, T. Ichihahshi, M. Ishida, Y. Ochiai, T. Tajima and S. Matsui, "Nano-Manipulator and Acutuator fabrication on Glass Capillary by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition" J. Vac. Sci. Technol., B22, pp.257-263, 2003.
- T. Morita, R. Kometani, K. Watanabe, T. Hoshino, K. Kanda, K. Kondo, Y. Haruyama, T. Kaito, J. Fujita, T. Ichihahshi, M. Ishida, Y. Ochiai, T. Tajima and S. Matsui, "Air-Wiring in Nano-Space by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", J. Vac. Sci.Technol., B21, pp.2737-2741, 2003.
- 54. T. Suzuki, M. Kurahashi, X. Ju, and Y. Yamauchi, "Electronic Structure of Pentacene Adsorbates on Au(111)Surfaces", Apl.Phys.Lett. pp.2003.
- T. Hoshino, K. Watanabe, R. Kometani, T. Morita, K. Kanda, Y. Haruyama, T.Kaito, J. Fujita, M. Ishida, Y.Ochiai and S. Matsui, "Development of Three-Dimentional Pattern-Generating system for Focused-Ion-beam Chemical Vapor Deposition", J. Vac. Sci.Technol., B21, pp.2732-2736, 2003.
- J.Fujita, M. Ishida, T. Ichihashi, Y. Ochiai, T. Kaito and S. Matsui, "Carbon nanopillar Laterally Grown with Electron Beam-Induced Chemical Vapor Deposition", J. Vac. Sci.Technol., B21, pp.2990-2993, 2003.

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

- 1. 松井真二"集束イオンビーム CVD 法によるモルフォ蝶構造の再現"、O PLUS E、 pp.163-168,2007.1.25.
- 2. 松井真二"集束イオンビームによる立体ナノ構造形成技術とその応用"、DLSS2007. DLC の 応用技術、pp.293-304、2007.12.17.
- 3. 松井真二"動く3次元ナノ構造体"、O PLUS E、2007.10.25.

- S. Matsui, "Three-Dimentional Nanostructure Fabrication by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", Springer Handbook of Nano-Technology 2nd Edition, pp. 179-195, Dec. 2006.
- 5. 松井真二"集束イオンビーム化学気相蒸着法"、エコマテリアルハンドブック、 pp. 390-392, 2006. 12. 30.
- 6. 松井真二、ナノ空間であらゆる形をつくりだす!, Newton スーパーテクノロジー・ビジ ュアル報告 明日を一新する「値千金」の技術 32, pp. 72-77, 2006. 6. 20.
- 7. 松井真二、"集束イオンビームによる立体ナノ構造形成技術とその応用"DLC ハンドブ ック第7章 DLC の将来展望・研究の最前線、pp. 575-584, 2006. 6. 20.
- 8. 松井真二、"ナノテクノロジー加工分野の動向=電子および集束イオンビームによるナノ構造形成とナノインプリント技術="、光アライアンス、Vol. 16, No. 5, pp. 10-16, 2006. 5. 1.
- 9. 松井真二、"ナノ空間であらゆる形をつくりだす!"、Newton 決定版, 第 26 巻第 4 号, pp92-97, 2006.4.7.
- 10. 松井真二、"集束イオンビームを利用した立体ナノ構造形成技術とその応用"、放射線 と産業、第109号、2006.3.1.
- 11. 松井真二、"集束イオンビームによる立体ナノ構造形成技術とその応用"、DLC利用の新 展開-成膜法から分析法・新領域への利用まで-、pp. 2006.3.
- 12. 松井真二、"ナノテクノロジー"、imidas2006 最新キーワード事典、pp. 861, 2006.1.1.
- 13. 松井真二、"集束イオンビームによる立体ナノ構造形成技術とその応用"、表面技術、 Vol. 56, No. 7 pp. 361-366、2005. 7. 1.
- 14. 松井真二、"イオンビームが拓くナノテクノロジー"、化学工業第 57 巻第 6 号、pp1-6、 2005. 6. 16.
- 15. 松井真二、"三次元ナノテクノロジーが再現したモルフォ蝶の輝き"、バイオニクス、 pp. 54-59, 2005. 4.
- 16. 松井真二、「3次元ナノ構造技術の開発で覇競う」、日経ナノビジネス、 No. 10, pp. 20-22, 2005.
- 17. 松井真二、"集束イオンビームによる三次元ナノテクノロジーの展開"、応用物理 73 巻 第4号、pp. 445-454, 2004. 4.
- 18. 松井真二、"三次元ナノテクノロジー"、明日が見えるビジネス情報誌 ACT Vol. 10, pp. 2004. 5.
- 19. 松井真二、"立体ナノ構造形成技術とその応用"、SEMI NEWS12 月号、pp. 20-21、2004.12.
- 20. 松井真二、"集束イオンビームによる立体ナノ構造形成技術"、光技術コンタクト、

pp. 2003. 7. 10

21. 松井真二、"集束イオンビームを用いた3次元ナノ構造形成技術"、電子顕微鏡学会誌, pp. 60, 2003.4.

(3)学会発表(国際学会発表及び主要な国内学会発表)

1) 招待講演
 (国内会議 17件、国際会議 18件)

- <国内>
- 1. 松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビーム励起表面反応による立体ナノ構造形成技術"、第 35 回研究会、東京理科大学、2007.6.8.
- 2. 松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビームを利用した立体ナノ構造形成技術とデバ イス応用"、日本 MRS シンポジウム、日本大学、2006.12.9.
- 3. 松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビームを利用した立体ナノ構造形成技術とその応用"、 微細加工計測研究会、 青森大学、2006.11.1.
- 4. 藤田淳一(筑波大) "S4800 抵加速 STEM を用いたその場観察の可能性"、第6回ナノテ クパーク 21 (ビームテクノロジーが切り開く最新ナノエリア分析)、筑波、2006.7.13.
- 5. 松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビームを利用した立体ナノ構造形成技術とデバ イス応用"放射線専門部会、つくば、2006.2.28.
- 6. 松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビームによる三次元ナノテクノロジーの展開" 産学総合研究所セミナー、つくば、2006.2.10.
- 7. 藤田淳一(筑波大)"ビーム励起反応を用いた鉄触媒の形成とナノチューブ制御"、触媒 学会精密表面材料研究会、2006.1.31.
- 8. 松井真二 (兵庫県立大)、"集束イオンビームを利用した立体ナノ形成技術とその応用"、 第11回放射光プロセスシンポジウム、日本未来科学館、2005.12.2.
- 9. 松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビームによる立体ナノ構造形成とそのデバイス 応用"、「ナノテクシンポジウム」~MEMS 創出を目指して~、立命館大学、2005.7.8.
- 10. 松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビームによる三次元ナノテクノロジーの展開"、 放射光利用ナノテク最前線 2005、京都、2005. 6.13.
- S. Matsui(Univ of Hyogo), "Three-dimentional Nanotechnology by FIB-CVD"、新 事業創造の先端技術セミナー~イオンビームによる革新的材料創製の可能性~、 2004.12.13.
- 12. 松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビームを利用したナノテクノロジーと産業利用 -立体ナノ構造形成技術"、放射線利用セミナー、金沢、2004.10.5.
- 13. 松井真二(兵庫県立大)、"集東イオンビームによる立体ナノ構造形成とその応用"、日本学術振興会 材料の微細組織と機能性 第 133 委員会「材料の材料組織と機能性」 第 183 委員会、JFE スチール㈱、2004. 10. 8.

- 14. 藤田淳一(筑波大)、"固相成長反応によるナノチューブ成長制御技術"、日本学術振興 会第 158 委員会、東北大学、2004.8.31.
- 15. 藤田淳一(筑波大)"カーボンナノチューブの固相成長のその場観察と成長制御"、第9 回次世代レーザプロセシングとその産業応用調査専門委員会、東京、2004.7.28.
- 16. 松井真二(兵庫県立大)、"集東イオンビームによる三次元ナノテクノロジーの展開"、 理研シンポジウム「スリービーム技術による表面改質と解析Ⅱ」、早稲田大学、 2004.7.21.
- 17. 松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビーム励起表面反応による立体ナノ構造形成技術とその応用"、2003年日本物理学会シンポジウム、宮崎、2003.9.20.

<国際>

- S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Three-Dimentional Nanostructure Fabrication by FIB-CVD and Its Application", International Workshop Micro/Nano Science and Engineering for the 21st Century, Univ. of Ritsumei, Boston USA, 2006.10.13.
- 2. S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Three-Dimentional Nanostructure Fabrication by FIB-CVD Chemical Vapor Deposition", The International Society for Optical Engineering, 2006.10.3-7.
- 3. S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Focused-Ion-Beam deposition for 3D nanostructure fabrication", 15th International Conference on Ion Beam Modification of Materials, Taormina Italy, 2006.9.18-22.
- 4. J. Yanagisawa(Univ. of Osaka), H. Matsumoto, T. Fukuyama, Y. Shiraishi, T. Yodo, Y. Akasaka, "Growth of Ga ion implanted SiN substrates using ECR-MBE", 15th International Conference on Ion Beam Modification of Materials, Taormina Italy, 2006.9.18-22.
- J. Fujita(Univ. of Tsukuba), S. Nakazawa(Univ of Tsukuba), T. Ichihashi(NEC), M. Ishida(NEC), Y. Ochiai(JST), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ of Hyogo), "Graphitic Tube Transformation induced by a flush discharge with Ga", 15th International Conference on Ion Beam Modification of Materials, Taormina Italy, 2006.9.18-22.
- S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Three-Dimentional Nanostructure Fabrication by Focused-ion-Beam Chemical Vapor Deposition", Microscopy & Microanalysis 2006 Meeting, Cicago USA, 2006.7.30-8.3.
- S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Three-Dimentional Nanostructure Fabrication by Focused-ion-Beam Chemical Vapor Deposition", 14th international Conference on Composites/ Nano Engineering, Boulder USA, 2006.7.2-8.
- 8. S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Room temperature Nanoimprint Technology and Mold repair Focused ion Beam", 5th New England International Nanomanufacturing Workshop, Boston USA, 2006.6.18-22.
- 9. T. Ichihashi(NEC), "Carbon -Nanopillar tubulization caused by liquidlike iron catalyst nanoparticles", 5th Intr. Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials, Big Island, Hawaii, USA, 2005.12.8.
- 10. S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Three-Dimentional Nanostructure Fabrication by

Focusede-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition and Its Application", Nanoengineering Symposium, Korea, 2005.10.27.

- 11. S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Mechanical Characteristics of Nano-Spring fabricated by using Focused-Ion- Beam Chemical Vapor Deposition", 3rd New England International Nanomanufacturing Workshop,Boston USA, 2005.6.21-22.
- S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Three-Dimentional Nanostructure Fabrication by Focused-ion-Beam CVD and Its Application", International for 21st Century COE Program Quantum Nanoelectronics for meme-media-Based Information TechnologiesIII,2005.2.8-10.
- 13. S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Three-Dimentional Nanotechnology by Focused-Ion-Beam Chemical- Vapor- Deposition", ULTIMATE LITHOGRAPHY AND NANODEVICE ENGINEERING, Agelond France, 2004.6.16.
- 14. S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Three-dimentional nanostructure fabrication by Focused-ion-beam Chemical Vapor Deposition", The International Conference on Metallurgical Coating And Thin Films, San Diego Japan, 2004.4.19-23.
- 15. S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Nanotechnology Research IN JAPAN", Micro and Nano Engineering Conference 2003, Hawaii USA, 2003.9.22-25.
- Y. Yamauchi(NIMS), M. Kurahashi(NIMS), T. Suzuki(NIMS), and X. Ju(NIMS), "Spinpolarized helium atom beam for Multimately surface-sensitive probing", Korean, Vacuum Society Meeting, Korea, 2003.8.20.
- 17. S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Three-Dimentional nanostructure Fabrication by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", New England International nanomanufacturing Workshop, Boston USA, 2003.6.17.
- 18. S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Three-Dimentional nanostructure Fabrication by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", The 12th International Conference on Solid-State sensors, Actuator and Microsystems, Boston USA, 2003.6.10.
 - ② 口頭発表 (国内会議 59 件、国際会議 46 件)

<国内>

- 長田貴弘(物材機構)、佐久間芳樹(物材機構)、南風盛将光(物材機構)、中島清美(物材機構)、米谷玲皇(兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、松井真二(兵庫県立大)知京 豊裕(物材機構)、"FIB-CVD法により堆積した DLC 薄膜の熱処理による構造変化"、2008 年(平成20年)春季第54回応用物理学関係連合講演会、千葉大学、2008.3.
- 米谷玲皇(兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝 (SII-NT)、松井真二(兵庫県立大)"電子顕微鏡を用いた FIB-CVD における3次元ナノ 構造成長のその場観察"、2007年(平成19年)秋季第68回応用物理学会学術講演会、 北海道工業大学、2007.9.7.
- 3. 中松健一郎(兵庫県立大)、山本和生(JFCC)、平山司(JFCC)、松井真二(兵庫県立大)、 "集東イオンビーム化学気相成長法による空中配線技術を用いた電子線プリズムの作 成"、2007 年(平成19年)秋季第68回応用物理学会学術講演会、北海道工業大学、 2007.9.7.

- 池田悠太(筑波大)、中澤翔太郎(筑波大)、東広大(筑波大)、市橋鋭也(NEC)、松井 真二(兵庫県立大)、藤田淳一(筑波大)、"超先端タングステンプローブの構造と放射特性"、 2007 年(平成19年)秋季第68回応用物理学会学術講演会、北海道工業大学、2007.9.6.
- 5. 東広大(筑波大)、池田悠太(筑波大)、中澤翔太郎(筑波大)、市橋鋭也(NEC)、松井 真二(兵庫県立大)、藤田淳一(筑波大)、"アモルファスカーボン中における鉄微粒子 の拡散係数"、2007 年(平成19年)秋季第68回応用物理学会学術講演会、北海道工 業大学、2007.9.5.
- 市橋鋭也 (NEC), Lourie Oleg, 藤田淳一 (Univ. of Tsukuba), 中松健一郎 (Univ. of Hyogo), 米谷玲皇 (Univ. of Hyogo), 松井真二 (Univ. of Hyogo)"ガリウムを含む非晶質カー ボンロッドの直接通電によるチューブ化その場観察"、2007年(平成19年)秋季第 68 回応用物理学会学術講演会、北海道工業大学、2007.9.7.
- 中澤翔太郎(筑波大),石田真彦(NEC),市橋敏也(NEC),皆藤 孝(SII-NT),松井真二 (兵庫県立大),藤田淳(筑波大), "瞬間放電に伴う FIB-CVD ピラー内でのグラファ イトチューブ固相成長反応",2007年(平成19年)秋季第68回応用物理学会学術講 演会、北海道工業大学、2007.9.7.
- 楊卓真(阪大),田中秀明(阪大),是山覚然(阪大),柳沢淳一(阪大),酒井朗(阪大) "Siイオンを用いた FIB-CVD 法で形成した薄膜の評価"、2007 年(平成 19 年)秋季第 68 回応用物理学会学術講演会、北海道工業大学、2007.9.4-8.
- 9. 市橋鋭也(NEC)、01eg Lourie(Gatan),中松健一郎(兵庫県立大)、松井真二(兵庫県 立大)、"ガリウムを含む非晶質カーボンロッドの直接通電によるチューブ化その場観 察"、日本顕微鏡学会第 63 回学術講演会、新潟、2007. 5. 20-22.
- 10. 岡田真(兵庫県立大)、井垣潤也(兵庫県立大)、中松健一郎(兵庫県立大)、米谷玲皇 (兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、松井真二(兵庫県 立大)、"集東イオンビームエッチングとデポジションによる光ナノインプリントモー ルドの修正"、2007年(平成19年)春季第54回応用物理学関係連合講演会、青山学 院大学、2007.3.27.
- 岡田遼(阪大),柳沢淳一(阪大),松井真二(兵庫県立大)、"Auイオンを用いた FIB-CVD 法による細線の形成"2007年(平成19年)春季第54回応用物理学関係連合講演会、 青山学院大学、2007.3.28.
- 12. 武川貴仁(筑波大)、岡田聡(筑波大)、小林亮太(筑波大)、石田真彦(NEC)、松井真 二(兵庫県立大)、藤田淳一(筑波大)、"EB-CVD を用いたドットからの CNT 成長におけ る水素還元による影響" 2006 年(平成 18 年)秋季第 67 回応用物理学会学術講演会、 立命館大学、2006.8.31.
- 13. 三成千明(兵庫県立大)、中松健一郎(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、松井真二(兵庫県立大)、"HSQ液晶塗布法を用いたナノインプリントによるマイクロレンズアレイの作製"、2006年(平成18年)秋季第67回応用物理学会学術講演会、立命館大学、2006.8.30.
- 14. 三成千明(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、中松健一郎(兵庫県立大)、皆藤孝

(SII-NT)、藤田淳一(筑波大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、松 井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVD における分解能評価"、第53回応用物理学関係連合講 演会、立命館大学、2006.8.30.

- R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), J. Fujita(Univ of Tsukuba), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Single organelle operation using bio nano-tools fabrication by FIB-CVD", 25th Electronic materials Symposium, Sizuoka Japan, 2006.7.5.
- K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), T. Ichihashi(NEC), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), andS. Matsui(Univ. of Hyogo), "Evaluation of Electrical Properties in High-Temperature Region of Nanowires Fabricated by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition",25th Electronic materials symposium, Shizuoka Japan,2006.7.4-6.
- R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Single organelle operation using bio nano-tools fabricated by FIB-CVD", 25th Electronic materials symposium, Shiga Japan,2006.7.4-6.
- 小笹明賀(兵庫県立大)、中松健一郎(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝(SII-NT)、松井真二(兵庫県立大)、 "FIB/EB-CVD による配線の電機特性評価"2006年(平成18年)春季 第53回応用物 理学関係連合講演会、武蔵工業大学、2006.3.22.
- 19. 神田一浩(兵庫県立大)、井垣潤也(兵庫県立大)、加藤有理(兵庫県立大)、米谷玲皇 (兵庫県立大)、松井真二(兵庫県立大)、伊藤治彦(長岡技大)、"プラズマ CVD 法によ り作製された a-CNx 薄膜の局所構造評価"、2006 年(平成 18 年)春季 第 53 回応用物 理学関係連合講演会、武蔵工業大学、2006.3.24.
- 米谷玲皇(兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、藤田淳一 (筑波大)、皆藤孝(SII-NT)、松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVD による真空マイクロ カプセルの作製と評価"、第53回応用物理学関係連合講演会、2006年(平成18年)春 季 第53回応用物理学関係連合講演会、武蔵工業大学、2006.3.25.
- 井垣潤也(兵庫県立大)、中松健一郎(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、石田真彦(NEC)、落合幸徳(NEC)、市橋鋭也(NEC)、藤田淳一(筑波大)、皆藤孝(SII-NT)、松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVDによる DLC 片持板の作製とその機械特性"、2006 年(平成 18 年)春季 第 53 回応用物理学関係連合講演会、武蔵工業大学、2006.3.22.
- 22. 中松健一郎(兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、市橋鋭 也(NEC)、皆藤孝(SII-NT)、松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVD ナノスプリングへの金 属スパッタコーティングによる機械特性コントロール"、2006 年(平成 18 年) 春季 第 53 回応用物理学関係連合講演会、武蔵工業大学、2006. 3. 22.
- 23. 西窪明彦(兵庫県立大)、加藤有理(兵庫県立大)、井垣潤也(兵庫県立大)、米谷玲皇 (兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVD DLC 中の ガリウムー炭素結合に関するアニール効果"、2006 年(平成 18 年)春季 第 53 回応用 物理学関係連合講演会、武蔵工業大学、2006.3.22.

- 24. 西窪明彦(兵庫県立大)、井垣潤也(兵庫県立大)、加藤有理(兵庫県立大)、米谷玲皇 (兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVD 法で成膜 した炭素系薄膜の電子状態"、第 19 回ダイヤモンドシンポジウム、大阪大学、 2005.11.24.
- 25. 長田貴弘(物質・材料研究機構)、"集束イオンビーム CVD 法による GaN 立体構造の作製 と評価"、日本電子材料技術協会 第42回秋期講演大会、日立金属㈱ 高輪和彊館、 2005.10.27.
- 長田貴弘(物質・材料研究機構)、"コンビナトリアル手法による Pt-Ru 系 Schottky 電極の作製"、第66回秋季応用物理学会学術講演会、徳島大学、2005.9.8.
- 27. 武川貴仁(筑波大)、岡田聡(筑波大)、小林亮太(筑波大)、落合幸徳(NEC)、石田真 彦(NEC)、市橋鋭也、藤田淳一(筑波大)、松井真二(兵庫県立大)、"EB-CVD を用いた フェロセンドットによる位置制御カーボンナノチューブ成長"、2005 年(平成 17 年) 第 66 回応用物理学会学術講演会、徳島大学、2005. 9. 10.
- 28. 市橋鋭也 (NEC)、藤田淳一(筑波大)、石田真彦 (NEC)、落合幸徳 (JST)、"透過電子顕微 鏡によるカーボンナノピラーのチューブ化その場観察(Ⅱ)、2005 年(平成 17 年)第 66 回応用物理学会学術講演会、徳島大学 2005.9.9.
- 29. 星野隆行(東大)、"カーボンマイクロチューブを用いた神経再生電極の開発-デバイスの試作と神経系培養細胞を用いた検討-"、第44回日本エムイー学会大会、2005.4.25.
- 30. 市橋鋭也(NEC)、藤田淳一(筑波大)、石田真彦(NEC)、落合幸徳(JST)、"鉄触媒を用いた非晶質カーボンのチューブ化その場観察"、日本顕微鏡学学会第61回学術講演会、つくば国際会議場、2005.6.1-3.
- 31. 岡田聡(筑波大)、小林亮太(筑波大)、武川貴仁(筑波大)、石田真彦(NEC)、落合幸 徳(NEC)、松井真二(兵庫県立大)、"EB-CVDによるナノ三次元立体構造の形成技術とそ の機械特性"、2005年(平成17年)春季 第52回応用物理学関経連合講演会、埼玉大 学、2005.3.29-4.1.
- 武川貴仁(筑波大)、岡田聡(筑波大)、小林亮太(筑波大)、落合幸徳(NEC)、石田真 彦(NEC)、市橋鋭也(NEC)、松井真二(兵庫県立大)、"フェロセンを用いた EB-CVD 位置 制御カーボンナノチューブ成長"、2005 年(平成 17 年)春季 第 52 回応用物理学関経 連合講演会、埼玉大学、2005. 3. 29-4. 1.
- 33. 長田貴弘(物質・材料研究機構)、"光デバイス用 GaN 立体構造の作製と評価"、第52回 応用物理学関係連合講演会、埼玉大学、2005.3.29.
- 34. 小笹明賀(兵庫県立大)、松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビーム化学気相成長法を用いたナノ電磁石の作製"マイクロマシンセンサシステム研究会、京都、2005.3.10.
- 35. 米谷玲皇(兵庫県立大)、松井真二(兵庫県立大)、"細胞内操作のための FIB-CVD によ る細胞壁切断ツール及びナノネットの開発"、マイクロマシンセンサシステム研究会、 京都、2005.3.10.

- 36. 河守将典(兵庫県立大)、松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビーム化学気相成長法 (FIB-CVD)を用いた3端子ナノマニピュレータ"、マイクロマシンセンサシステム研 究会、京都、2005.3.10.
- 37. 中松健一郎(兵庫県立大)、松井真二(兵庫県立大)、"集東イオンビーム励起化学気相成長法を用いて作製したダイヤモンドライクカーボンナノスプリングの機械特性"、マイクロマシンセンサシステム研究会、京都、2005.3.10.
- 38. 井垣潤也(兵庫県立大)、松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVD によるピラーを用いた多 種材料のヤング率測定"、マイクロマシンセンサシステム研究会、京都、2005.3.10.
- 神田一浩(兵庫県立大)、井垣潤也(兵庫県立大)、加藤有理(兵庫県立大)、米谷玲皇 (兵庫県立大)、松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVD 法により生成した DLC 薄膜の NEXAFS による評価"、第 18 回ダイヤモンドシンポジウム、2004. 11. 18-19.
- 40. 市橋鋭也(NEC)、藤田淳一(筑波大)、石田真彦(NEC)、落合幸徳(NEC) "固相反応によ る鉄触媒からのカーボンナノチューブ形成過程その場観察"、日本物理学会 2004 年秋 季大会、青森、2004.9.12-15.
- 41. 長田貴弘(物材機構)、パールハット アヘメト(物材機構)、劉泳祚(物材機構)、山田 啓作(物材機構)、筒井謙(物材機構)、和田恭雄(物材機構)、知京豊裕(物材機構)、"コ ンビナトリアル手法による ZnO-Schottky 素子の作製"、2004 年(平成 16 年)秋季第 65 回応用物理学会学術連合講演会、東北学院大学、2004.9.2.
- 42. 井垣潤也(兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、藤田淳一 (筑波大)、皆藤孝(SII-NT)、多嶋勉(クレステック)、松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVD によるガラスキャピラリー上先端光学素子の作製"、2004 年(平成 16 年)秋季第 65 回 応用物理学会学術連合講演会、東北学院大学、2004.9.1.
- 43. 森田貴彦(兵庫県立大)、近藤和茂(JST)、星野隆行(東大)、神田一浩(兵庫県立大)、 春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝(SII-NT)、藤田淳一(筑波大)、市橋鋭也(NEC)、石田 真彦(NEC)、落合幸徳(NEC)、多嶋勉(クレステック)、松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVD で作製した空中配線の電機抵抗温度依存性"、2004 年(平成 16 年)秋季第 65 回応用物 理学会学術連合講演会、東北学院大学、2004.9.1.
- 44. 中松健一郎(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、森田貴彦(兵庫県立大)、落合幸徳(NEC)、石田真彦(NEC)、市橋鋭也(NEC)、藤田淳一(筑波大)、皆藤孝(SII-NT)、 多嶋勉(クレステック)、松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVDによるSi02空中配線の作製と評価"、2004年(平成16年)秋季第65回応用物理学会学術連合講演会、東北学院大学、2004.9.1.
- 45. 河守将典(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、近藤和茂(JST)、星野隆行(東大)、 神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝(SII-NT)、藤田淳一(筑波大)、 石田真彦(NEC)、落合幸徳(NEC)、松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビーム CVD を 用いた3端子ナノマニピュレータの作製と評価"、2004年(平成16年)秋季第65回応 用物理学会学術連合講演会、東北学院大学、2004.9.1.
- 46. 米谷玲皇(兵庫県立大)、星野隆行(東大)、近藤和茂(JST)、神田一浩(兵庫県立大)、 春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝(SII-NT)、藤田淳一(筑波大)、石田真彦(NEC)、落合

幸徳 (NEC)、松井真二 (兵庫県立大)、"FIB-CVD によるヘテロ構造型静電ナノマニピュ レータの作製"、2004 年 (平成 16 年) 秋季第 65 回応用物理学会学術連合講演会、東北 学院大学、2004.9.1.

- 47. 渡辺啓一郎(兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝 (SII-NT)、松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビーム化学気相成長法により作製し た DLC 膜の光学特性"、2004 年(平成 16 年)秋季第 65 回応用物理学会学術連合講演会、 東北学院大学、2004.9.1.
- 48. 小笹明賀(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、森田貴彦(兵庫県立大)、近藤和茂 (JST)、春山雄一(兵庫県立大)、藤田淳一(筑波大)、皆藤孝(SII)、松井真二(兵庫 県立大)、"集東イオンビームを用いたナノ温度センサーの作製と評価"、2004年(平成 16年)秋季第65回応用物理学会学術連合講演会、東北学院大学、2004.9.1.
- 49. 市橋鋭也(NEC)、藤田淳一(筑波大)、石田真彦(NEC)、落合幸徳(NEC)、"透過電子顕微 鏡によるカーボンナノピラーのチューブ化その場観察"、2004 年(平成 16 年)秋季 第 65 回応用物理学会学術連合講演会、東北学院大学、2004.9.1-4.
- 50. T. Ichihashi (NEC), J. Fujita (Univ. of Tsukuba), M. Ishida (NEC), Y. Ochiai (NEC), "In-situ observation of carbon-nanopillar tubulization process", 第 27 回フ ラーレンナノチューブシンポジウム、東京大学武田先端知ビル、2004.7.28-30.
- 51. 星野隆行(東大)、鈴木隆文(東大)、松井真二(兵庫県立大)、満渕邦彦(東大)、"集 束イオンビームを用いた3次元造形法による神経再生電極の試作"、日本エム・イー学 会大会、2004.5.19-21.
- 52. 長田貴弘(物材機構)、劉泳祚(物材機構)、パールハットアヘメト(物材機構)、栄政 桓(物材機構)、鯉沼秀臣(物材機構)、知京豊裕(物材機構)、"単結晶ターゲットを用い た堆積法による GaN 薄膜の作製"、2004 年(平成 16 年)春季第 51 回応用物理学関連連 合講演会、東京工科大学、2004. 3. 29.
- 53. 米谷玲皇(兵庫県立大)、森田貴彦(兵庫県立大)、渡辺啓一郎(兵庫県立大)、星野隆 行(東大)、近藤和茂(JST)、神田一浩(兵庫県立大)、皆藤孝(SII)、藤田淳一(NEC)、 石田真彦(NEC)、落合幸徳(NEC)、松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビームを用い た静電ナノアクチュエーターの作製"、2003 年(平成 15 年) 秋季 第 64 回応用物理学 会関係連合講演会、福岡大学、2003. 8. 30.
- 54. 長田貴弘(物材機構)、パールハットアへメト(物材機構)、鯉田崇(物材機構)、秩父重英(物材機構)、知京豊裕(物材機構)、"Low-Enegy-FIBによる GaN ナノ構造の作製"、2003
 年(平成 15 年)秋季 第 64 回応用物理学会関係連合講演会、福岡大学、2003. 8. 30.
- 55. 森田貴彦(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、渡辺啓一郎(兵庫県立大)、星野隆 行、近藤和茂、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝(SII)、藤田 淳一(NEC)、市橋鋭也(NEC)、落合幸徳(NEC)、多嶋勉(クレステック)、松井真二(兵庫 県立大)、"集束イオンビームを用いた空中配線の構築とその評価"、2003 年(平成 15 年)秋季 第 64 回応用物理学会関係連合講演会、福岡大学、2003.8.30.
- 56. 藤田淳一(NEC)、市橋鋭也(NEC)、石田真彦(NEC)、落合幸徳(NEC)、松井真二(兵庫県 立大)、皆藤孝、"EB-CVD による 5nm カーボンナノウィスカーの成長"、2003 年(平成

15年) 春季 第50回応用物理学関連連合講演会、神奈川大学、2003.3.27-30.

- 57. 石田真彦 (NEC)、藤田淳一 (NEC)、市橋鋭也 (NEC)、落合幸徳 (NEC)、皆藤孝 (SII-NT) 松 井真二 (兵庫県立大)、"FIB-CVD による炭化タングステン立体構造物の作製" 2003 年 (平 成 15 年) 春季 第 50 回応用物理学関連連合講演会、神奈川大学、2003. 3. 27.
- 58. 森田貴彦(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、渡辺啓一郎(兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝(SII-NT)、藤田淳一(NEC)、石田真彦(NEC)、落合幸徳(NEC)、多嶋勉(クレステック)、松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビームを用いたナノ空間配線の構築"、2003 年(平成 15 年)春季 第 50 回応用物理学関連連合講演会、神奈川大学、2003. 3. 27-30.
- 59. 米谷玲皇(兵庫県立大)、松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビームを用いた立体ナ ノメカニカルデバイスの作製"、マイクロマシン・センサシステム研究会、京都、 2003.2.27.

<国際>

- R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ of Hyogo), Y. Haruyama(Univ of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ of Hyogo), "in-situ observation of 3-D nano-structure growth on focused-ion-beam chemical-vapor-deposition by scanning electron microscope", 33rd International Conference Micro-and Nano-Engineering, Copenhagen Denmark, 2007.9.23-26.
- R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Relation between field emission properties and material characteristics of DLC fabricated by focused-ion-beam chemical-vapor-deposition", The 15th Internaitional Conference on Electron, Ion, and Photon Beaqms and Nanolithography, Denver USA, 2007.6.1.
- K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Mechanical Property Evaluation of Nanospring Using Scanning Electron Microscopy with Micromanipulator", The 15th Internaitional Conference on Electron, Ion, and Photon Beams and Nanolithography, Denver USA, 2007.6.1.
- 4. J. Fujita(Univ. of Tsukuba), S. Okada(Univ. of Tsukuba). R. Ueki(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Elastic double structure of amorphous carbon pillars grown by FIB-CVD", The 15th Internaitional Conference on Electron, Ion, and Photon Beams and Nanolithography, Denver USA, 2007.6.1.
- 5. Y. Ikeda(Univ. of Tsukuba), S. Okada(Univ. of Tsukuba), K. Higashi(Univ. of Tsukuba), S. Nakazawa(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), S. Matsui(Univ. of Hyogo), and J. Fujita(Univ. of Tsukuba), "In-situ visualization of local electric field at ultra sharp tungsten emitter under low voltage scanning transmission electron microscop", The 15th Internaitional Conference on Electron, Ion, and Photon Beams and Nanolithography, Denver USA, 2007.6.1.
- M. Okada(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Substrate temperature dependence of carbon pillar growth by FIB-CVD", 2006 International Microprocesses and nanotechnology Conference, Kamakura Japan,2006.10.25-27.
- 7. Ozasa(Univ. of Hyogo), K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo). T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ.

of Hyogo), "Fabrication and verification of micro electrostatic acutuator by Focused-ion-beam Chemical-vapor-deposition", 2006 International Microprocesses and nanotechnology Conference, Kamakura Japan, 2006.10.25-27.

- J. Igaki(Univ. of Hyogo), K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII), and S. Matsui(Univ of Hyogo), "Mechanical characteristics of Fe and SiOx based pillars deposited by FIB-CVD", 2006 International Microprocesses and nanotechnology Conference, Kamakura Japan,2006.10.25-27.
- 9. Y. Ikeda(Univ. of Tsukuba), S. Okada(Univ. of Tsukuba), K. Higashi(Univ. of Tsukuba), S. Nakazawa(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), S. Matsui(Univ. of Hyogo), and J. Fujita(Univ. of Tsukuba), "In-situ visualization of local field enhancement at an ultra sharp tungsten emitter-under low voltage scanning transmission electron microscope", 2006 International Microprocesses and nanotechnology Conference, Kamakura Japan,2006.10.25-27.
- K. Higashi(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), S. Matsui(Univ. of Hyogo), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), "Driving Force of the iron Particle's Movemant in Solid Phase Graphitization", 2006 International Microprocesses and nanotechnology Conference, Kamakura Japan, 2006.10.25-27.
- 11. S. Nakazawa(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), T. Ichihashi(NEC), T. Kaito(SII-NT), S. Matsui(Univ. of Hyogo), and J. Fujita(Univ. of Tsukuba), "Non-destructive graphitization of FIB-CVD structures by Joule heating with flash discharge", 2006 International Microprocesses and nanotechnology Conference, Kamakura Japan, 2006.10.25-27.
- J. Fujita(Univ. of Tsukuba), S. Okada(Univ. of Tsukuba), R. Ueki(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), T. Kaito(SII), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Elastic double structure of amorphous carbon pillar grown by FIB-CVD", 2006 International Microprocesses and nanotechnology Conference, Kamakura Japan,2006.10.25-27.
- 13. K. Higashi(Univ. of Tsukuba), S. Nakazawa(Univ. of Tsukuba), T. Maeda(Univ. of Tsukuba), S. Okada(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), Y. Ochiai(NEC), T. Kaito(SII), S. Matsui(Univ. of Hyogo), and J. Fujita(Univ. of Tsukuba), "In-situ Obsevation of Iron Nanoproperticles Movement and Graphitization Control by Joule Heating at Local Current Injection", The 16th International Microscopy Congress, Hokkaido Japan, 2006.9.3-8.
- S. Nakazawa(Univ. of Tsukuba), S. Okada(Univ. of Tsukuba), Y. Ochiai(JST), M. Ishida(NEC), T. Ichihashi(NEC), T. Kaito(SII-NT), S. Matsui(Univ. of Hyogo), and J. Fujita(Univ. of Tsukuba), "Flush Discharge Induced graphitic Tube Transformation Catalyzed by Gallium", The 16th International Microscopy Congress, Hokkaido Japan, 2006.9.3-8.
- 15. T. Ichihashi(NEC), M. Ishida(NEC), Y. Ochiai(JST), and J. Fujita(Univ. of Tsukuba), "In Situ Observation of Carbon-Nanopillar Tubulization Process", The 16th International Microscopy Congress, Hokkaido Japan, 2006.9.3-8.
- K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), M. Nagase(NTT), H. Namatsu(NTT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Mechanical Characteristics of Nano-Spring Fabricated by using Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", The 50th International Conference on electron, ion, photon beam technology and fabrication, Maryland, USA, 2006.5.31-6.1.
- R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito, J. Fujita(Univ. of Tsukuba), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Evaluation of vacuum microcapsule fabricated by FIB-CVD", The 50th International Conference on electron, ion, photon beam technology and fabrication, Maryland USA, 2006.5.31-6.1.

- J. Fujita(Univ. of Tsukuba), T. Mukawa(Univ. of Tsukuba), S. Okada(Univ. of Tsukuba), R. Kobayashi(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), T. Ichihashi(NEC), Y. Ochiai(JST)), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Position controlled growth in carbon nanotubes catalyzed by an iron nano-dot array", 2005 Materials Research Society(MRS) Fall Meeting, Boston USA, 2005.11.29.
- R. Kometani(Univ. of Hyogo), T. Hoshino(Univ. of Tokyo), K. Kanda(Univ. of Hyogo). Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), Y. Ochiai(JST), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Manipulation using 3-D Nano-Manipulator fabricated by FIB-CVD in the Nano-Factory", 2005 International Microprocess and Nanotechnology Conference, Tokyo Japan,2005.10.28.
- S. Okada(Univ. of Tsukuba), T. Mukawa(Univ. of Tsukuba), R. Kobayshi(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), Y. Ochiai(NEC), T. Kaito, S. Matsui(Univ of Hyogo), and J. Fujita(Univ. of Tsukuba), "Comparison of Young's modulus dependency on beam accelerating voltage between EB- and FIB-CVD pillars", 2005 International Microprocess and Nanotechnology Conference, Tokyo Japan,2005.10.28.
- 21. A. Saikubo(Univ. of Hyogo), J. Igaki(Univ. of Hyogo), Y. Kato, (Univ. of Hyogo) R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ of Hyogo), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Soft x-ray emission and absorption spectra of DLC film formed by FIB-CVD method", 2005 International Microprocess and Nanotechnology Conference, Tokyo Japan,2005.10.27.
- 22. K. Higash(Univ. of Tsukuba)i, S. Nakazawa(Univ. of Tsukuba), T. Maeda(Univ. of Tsukuba), S. Okada(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), Y. Ochiai)JST), T. Kaito(SII-NT), S. Matsui(Univ. of Hyogo), and J. Fujita(Unic. Of Tsukuba), "In-situ monitoring of iron nanoparticle movement and graphitization control bu Joule heating at local current injection", 2005 International Microprocess and Nanotechnology Conference, Tokyo Japan, 2005.10.27.
- T. Mukawa(Univ. of Tsukuba), S. Okada(Univ. of Tsukuba), R. Kobayashi(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), T. Ichihashi(NEC), Y. Ochiai(NEC), S. Matsui(Univ. of Hyogo), and J. Fujita(Univ. of Tsukuba), "Position-controlled carbon nanotube growth on single iron nanoparticles prepaired by electron beam-induced chemical vapor deposition", 2005 International Microprocess and Nanotechnology Conference, Tokyo Japan, 2005.10.26.
- 24. R. Kometani(Univ. of Hyogo), R. Funabiki(Univ. of Hyogo), T. Hoshino(Univ. of Tokyo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), Y. Ochiai(NEC), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Cell Wall Cutting Tool and Nano-Net Fabrication by FIB-CVD for Subcellular Operation and Analysis", 31st International Conference on Micro-and Nano-Engineering 2005, Viena Austria, 2005.9.19-22.
- 25. J. Igaki(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Nakamatsu(Univ of Hyogo), K. Kanda(Univ of Hyogo), Y. Haruyama(Univ of Hyogo), Y. Ochiai(NEC), J. Fujita(Univ of Tsukuba), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ of Hyogo), "Three-Dimentional Roter Fabrication by FIB-CVD", 31st International Conference on Micro-and Nano-Engineering 2005, Viena Austria, 2005.9.19-22.
- K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), M. Nagase(NTT), J. Igaki(Univ. of Hyogo), H. Namatsu(NTT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Mechanical characteristics of WC spring grown by FIB-CVD", 31st International Conference on Micro-and Nano-Engineering 2005, Viena Austria, 2005.9.19-22.
- T. Mukawa(Univ. of Tsukuba), S. Okada(Univ. of Tsukuba), R. Kobayashi(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), T. Ichiahshi(NEC), Y. Ochiai(JST), S. Matsui(Univ. of Hyogo), and J. Fujita(Univ. of Tsukuba), "Position-controlled carbon nanotubes growth catalyzed by nano-dot

pattern using by electron beam induced chemical vapor deposition", The 49th International Conference on electron, ion, photon beam technology and fabrication, Orland USA, 2005.5.31-6.1.

- 28. T. Hoshino(Univ. of Tokyo), A. Ozasa(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), S. Matsui(Univ. of Hyogo), and K. Mabuchi(Univ. of Tokyo), "Development of Regenelation Type Neural Interface:Micro-tube Guide for Axon Growth of Neuronal Cells Fabricated Using focused-ion-beam Chemical Vapor Deposition", The 49th International Conference on electron, ion, photon beam technology and fabrication, Orland USA, 2005.5.31-6.1.
- 29. R. Kometani(Univ. of Hyogo), T. Hoshino(Univ. of Tokyo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ of Hyogo), T. Kaito(SII), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), Y.Ochiai(NEC), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Field emitter Fabrication on the Glass Capillary by Focused-Ion-Beam Chemical- Vapor -Deposition", The 49th International Conference on electron, ion, photon beam technology and fabrication, Orland USA, 2005.5.31-6.1.
- M. Kawamori(Univ of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), T. Hoshino(Univ. of Tokyo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Hauyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), Y. Ochiai(JST), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Three-Terminal Nano-Manipulator Fabrication by Focused-Ion-Beam Chemical- Vapor-Deposition", The 49th International Conference on electron, ion, photon beam technology and fabrication, Orland USA, 2005.5.31-6.1.
- 31. K. Nakamatsu(Univ of Hyogo), M. Nagase(NTT) H. Namatsu(NTT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Mechanical Characteristics of Nano- Spring Fabricated by using Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", The 49th International Conference on electron, ion, photon beam technology and fabrication, Orland USA, 2005.5.31-6.1.
- 32. T. Mukawa(Univ. of Tsukuba), S. Okada(Univ. of Tsukuba), R.Kobayashi(Univ. of Tsukuba), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), T. Ichihashi(NEC), Y. Ochiai(NEC), T. Kaito, and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Position Controlled Carbon Fiber Growth Catalyzed by EB-CVD Ferrocene-Nanopillar", 2004 International Microprocess and Nanotechnology Conference, Osaka Japan, 2004.10.29.
- 33. R. Kometani(Univ. of Hyogo), T. Hoshino(Univ. of Tokyo), K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), K. Kondo(JST), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), T. Ichiahi(NEC), Y. Ochia0i(NEC), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Fabrication of Nano-Manipulator with SiO₂/DLC Hetero-Structure by Focused-Ion-Beam Chemical-Vapor-Deposition", 2004 International Microprocess and Nanotechnology Conference, Osaka Japan, 2004.10.29.
- 34. S. Okada(Univ. of Tsukuba), T. Mukawa(Univ. of Tsukuba), R.Kobayashi(Univ. of Tsukuba), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), T. Ichihashi(NEC), Y. Ochiai(JST), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Growth manner and mechanical characteristics of amorphous carbon nanopillar grown by EB-CVD", 2004 International Microprocess and Nanotechnology Conference, Osaka Japan, 2004.10.28.
- 35. K. Watanabe(Univ. of Hyogo), T. Hoshino(Univ. of Tokyo), K. Kondo(SII-NT), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Optical Measurement and simulation of Morpho-butterfly-scales quiai-structure using Focused-Ion-Bea Chemical-Vapor-Deposition", 2004 International Microprocess and Nanotechnology Conference, Osaka Japan, 2004.10.26-29.
- 36. T. Morita(Univ. of Hyogo), K. Kondo(SII-NT), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ.of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), T. Ichihashi(NEC), Y.

Ochiai(NEC), T. Tajima(Crestec), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Temperature dependence of electrical properties for free-space-nanowiring fabricated by FIB-CVD", 2004 International Microprocess and Nanotechnology Conference, Osaka Japan, 2004.10.26-29.

- R. Kometani(Univ. of Hyogo), T. Hoshino(Univ. of Tokyo), K. Kondo(SII-NT), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), Y. Ochiai(NEC). and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Three-Dimentional High-Performance Nano-Tools Fabrication by Focused- Ion-Beam Chemical Vapor-Deposition", 15th International Workshop on Inelastic Ion Surfece Collisions, Mie Japan, 2004.10.20.
- T. Nagata(NIMS), P. Ahmet(NIMS), Y. Yamauchi(NIMS), Y. Sakuma(NIMS), T. Sekiguchi(NIMS), and T. Chikyow(NIMS), "Three-Dimentional GaN Nano Structure Fabrication by Focused Ion Beam Chemical Vapor Deposition", 14th International Conference on Ion Beam Modification of Materials, 2004.9.6.
- T. Ichihashi(NEC), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), and Y. Ochiai(NEC), "In-situ observation of carbon nanopillar tubulization process" 8th Asia-Pacific Conference on Electron Microscopy, Kanazawa, Japan, 2004.6.7-11.
- 40. T. Hoshino(Univ. of Tokyo), T. Suzuki(NIMS), S. Matsui(Univ. of Hyogo), and K. Mabuchi(Univ. of Tokyo), "Three-Dimentional and Multimaterial Microfabrication Using Focused-Ion-Beam Chemical-Vapor-Deposition and its Application for Processing nerve Electrodes", The 48th International conference on electron, ion, photon beam technology and nanofabrication, San Diego USA, 2004.6.1-6.
- 41. J. Fujita(Univ. of Hyogo), T. Ichihashi(NEC), Y. Ochiai(NEC), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Graphitization Wavy Traces of Iron Particles Observation in Amorphous Carbon Nano-Pillars", 2003 International Microscopy and Nanotechnology Conference, Tokyo Japan, 2003.10.28-31.
- 42. T. Nagata(NIMS), P. Ahmet(NIMS), Y. Yamauchi(NIMS), T. Sekiguchi(NIMS), and T. Chikyow(NIMS), "GaN Three-Dimentional Structures Fabricated by Focused Ion Beam System", 2003 International Microscopy and Nanotechnology Conference, Tokyo Japan, 2003.10.28-31.
- 43. T. Morita(Univ. of Hyogo), K. Watanabe(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), K. Kondo(JST), T. Hoshino(Univ. of Tokyo), T. Kaito(SII-NT), T. Ichihashi(NEC), M. Ishida(NEC), Y. Ochiai(NEC), T. Tajima(Crestec), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Electrical resistivity Evaluation of Air-Wiring formed in Nano-Space by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", 2003 International Microscopy and Nanotechnology Conference, Tokyo Japan,2003.10.28-31.
- 44. R. Kometani(Univ. of Hyogo), T, Morita(Univ. of Hyogo), K. Watanabe(Univ. of Hyogo), T. Hoshino(Univ. of Hyogo), K. Kondo(JST), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), Y. Ochiai(NEC), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Characteristics of nano-Electrostatic Actuator Fabricated by FIB-CVD", 2003 International Microscopy and Nanotechnology Conference, Tokyo Japan, 2003.10.28-31.
- 45. T. Morita(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Watanabe(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), Y. Ochiai(NEC), T. Tajima(Crestec), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Air –Wiring in Nano-Space by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", The 47th International conference on electron, ion, photon beam technology and nanofabrication, Tampa

USA, 2003.5.30.

46. J. Fujita(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), T. Ichihashi(NEC), Y. Ochiai(NEC), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Laterally grown Nano-carbon Whiskers using EB-CVD", The 47th International conference on electron, ion, photon beam technology and nanofabrication, Tampa USA, 2003.5.30.

③ ポスター発表 (国内会議 39件、国際会議 53件)

国内

- 植木竜一(筑波大)、藤田淳一(筑波大)、岡田聡(筑波大)、市橋鋭也(NEC)、松井真二(兵庫県立大)"アニール処理と電子線照射による FIB-CVD ピラーのヤング率変化"、2007 年(平成19年)秋季第68回応用物理学会学術講演会、北海道工業大学、2007.9.4.
- 2. 池田悠太(筑波大)、藤田淳一(筑波大)、松井真二(兵庫県立大)、"STEM を用いたプ ローフ^{*}先端局所電場強度の可視化とマッピング"、2007 年(平成19年)秋季第68回応 用物理学会学術講演会、北海道工業大学、2007.9.4.
- 3. 藤田淳一(筑波大)、岡田 聡(筑波大)、植木竜一(筑波大)、石田真彦(NEC)、皆藤 孝(SII)、松井真二(兵庫県立大)"FIB-CVD アモルファスカーボンピラー中に形成され る弾性2重構造"、2007年(平成19年)春季第54回応用物理学関係連合講演会、青 山学院大学、2007.3.27-30.
- 4. 池田悠太(筑波大)、中澤翔太郎(筑波大)、東 広大(筑波大)、石田真彦(NEC)、松 井真二(兵庫県立大)、藤田淳一(筑波大)"NWNTを用いた超先端タングステンプローブ製作と 特性"、2007年(平成19年)春季第54回応用物理学関係連合講演会、青山学院大学、 2007.3.27-30.
- 5. 米谷玲皇(兵庫県立大)、小池裕幸(兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一 (兵庫県立大)、皆藤孝(SII)、松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVD により作製した生体 ナノ計測電極の評価"、2007年(平成19年)春季第54回応用物理学関係連合講演会、 青山学院大学、2007.3.27-30.
- 西窪明彦(兵庫県立大)、井垣潤也(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、神田一浩 (兵庫県立大)、松井真二(兵庫県立大)、"GaK 吸収端 XAFS による FIB-CVD DLC 薄 膜の局所構造解析"、2007 年(平成19年)春季第54回応用物理学関係連合講演会、 青山学院大学、2007.3.27-30.
- 7. 中松健一郎(兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝 (SII)、松井真二(兵庫県立大)、"マイクロマニピュレータを用いた SEM によるナノス プリングの機械特性評価"、2007 年(平成19年)春季第54回応用物理学関係連合講 演会、青山学院大学、2007.3.27-30.
- 宮崎浩史(筑波大)、武川貴仁(筑波大)、東広大(筑波大)、中澤翔太郎(筑波大)、 岡田聡(筑波大)、石田真彦(NEC)、藤田淳一(筑波大)、"Zn0ナノワイヤ成長における 基板と温度の依存性"、2006年(平成18年)秋季第67回応用物理学会学術講演会、立 命館大学、2006.8.29-9.1.
- 9. 中澤翔太郎(筑波大)、石田真彦(NEC)、市橋鋭也(NEC)、皆藤孝(SII)、松井真二(兵 庫県立大)、藤田淳一(筑波大)、"瞬間放電に伴う Ga 移動によるグラファイトチュー
ブ固相成長反応(II)"、2006年(平成18年)秋季第67回応用物理学会学術講演会、 立命館大学、2006.8.29-9.1.

- 10. 東広大(筑波大)、石田真彦、松井真二(兵庫県立大)、藤田淳一、"アモルファスカー ボンウォール中の鉄微粒子の挙動解析" 2006 年(平成 18 年)秋季第 67 回応用物理学 会学術講演会、立命館大学、2007.8.30.
- 11. 岡田真 (兵庫県立大)、米谷玲皇 (兵庫県立大)、中松健一郎 (兵庫県立大)、皆藤孝 (SII)、 神田一浩 (兵庫県立大)、春山雄一 (兵庫県立大)、松井真二 (兵庫県立大)、"FIB-CVD における堆積成長率の基板温度依存性"、2006 年 (平成 18 年) 秋季第 67 回応用物理学 会学術講演会、立命館大学、2006.8.29-9.1.
- 小笹明賀(兵庫県立大)、中松健一(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、神田一浩 (兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝(SII)、松井真二(兵庫県立大)、 "FIB/EB-CVDにより作製した配線のアニール温度依存性評価"、2006年(平成18年) 秋季第67回応用物理学会学術講演会、立命館大学、2006.8.29-9.1.
- 13. 井垣潤也(兵庫県立大)、中松健一郎(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝(SII)、松井真二(兵庫県立大)、 "FIB-CVDにより作製した SiOx 系材料の機械物性評価"、2006年(平成18年)秋季第 67回応用物理学会学術講演会、立命館大学、2006.8.29-9.1.
- 14. 中松健一郎(兵庫県立大)、市橋鋭也(NEC)、皆藤孝(SII)、神田一浩(兵庫県立大)、 春山雄一(兵庫県立大)、松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビーム励起化学気相成 長(FIB-CVD)により作製されたナノスプリングの素線構造分析"2006年(平成18年) 秋季第67回応用物理学会学術講演会、立命館大学、2006.8.29-9.1.
- 15. 西窪明彦(兵庫県立大)、井垣潤也(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、神田一浩 (兵庫県立大)、松井真二(兵庫県立大)、"アニールした FIB-CVD DLC 中のガリウムの 定量分析"、2006 年(平成 18 年)秋季第 67 回応用物理学会学術講演会、立命館大学、 2006.8.29-9.1.
- 米谷玲皇(兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝(SII)、 松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVD により形成した DLC エミッタからの電界電子放出の アニール効果"2006 年(平成 18 年)秋季第 67 回応用物理学会学術講演会、立命館大 学、2006.8.29-9.1.
- 17. 松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビームによるナノプロセス"、2006 年(平成 18年)春季第53回応用物理学関係連合講演会、武蔵工業大学、2006.3.22-26.
- 18. 長田貴弘(物材機構)、パールハット アヘメト(物材機構)、山田啓作(物材機構)、 筒井謙(物材機構)、和田恭雄(物材機構)、知京豊裕(物材機構)、"コンビナトリア ル手法による Pt-Ru 系 Schottky 電極の作製" 2005 年(平成 17 年)第66回応用物理 学会学術講演会、徳島大学、2005.9.7-11.
- 19. 西窪明彦(兵庫県立大)、井垣潤也(兵庫県立大)、加藤有理(兵庫県立大)、米谷玲皇 (兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVD 法で成膜 された炭素系薄膜の電子状態解析"、2005 年(平成 17 年)第66回応用物理学会学術講 演会、徳島大学、2005.9.7-11.

- 20. 井垣潤也(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、中松健一郎(兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、落合幸徳(NEC)、藤田淳一(筑波大)、皆藤孝(SII)、松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVD によるナノロータの作製"、2005 年(平成17年)第66回応用物理学会学術講演会、徳島大学、2005.9.7-11.
- 21. 井垣潤也(兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、石田真彦 (NEC)、落合幸徳(NEC)、藤田淳一(筑波大)、皆藤孝(SII)、松井真二(兵庫県立大)、 "FIB-CVDとEB-CVDの同一環境でのピラーの成長評価"、2005年(平成17年)第66 回応用物理学会学術講演会、徳島大学、2005.9.7-11.
- 小笹明賀(兵庫県立大)、中松健一郎(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、星野隆 行(東大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、藤田淳一(筑波大)、 皆藤孝(SII)、松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVD を用いて作製したナノコイルの電磁 誘導操作"、2005 年(平成 17 年)第 66 回応用物理学会学術講演会、徳島大学、 2005.9.7-11.
- 23. 中松健一郎(兵庫県立大)、永瀬雅夫(NTT)、井垣潤也(兵庫県立大)、生津英夫(NTT) 松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVD で作製した DLC ナノスプリングのアニール評価"、 2005 年(平成17年)第66回応用物理学会学術講演会、徳島大学、2005.9.7-11.
- 24. 米谷玲皇(兵庫県立大)、星野隆行(東大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫 県立大)、皆藤孝(SII)、藤田淳一(筑波大)、落合幸徳(NEC)、松井真二(兵庫県立大)、 "FIB-CVD によるガラスキャピラリー上での電子エミッタの作製"、2005 年(平成 17 年)第66回応用物理学会学術講演会、徳島大学 2005.9.7-11.
- 25. 三成千明(兵庫県立大)、中松健一郎(兵庫県立大)、皆藤孝(SII)、神田一浩(兵庫県 立大)、春山雄一(兵庫県立大)、松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビーム化学気 相成長法を用いた高アスペクト比パターンの作製"、2005年(平成17年)第66回応用 物理学会学術講演会、徳島大学、2005.9.7-11.
- 26. 岡田聡(筑波大)、小林亮太(筑波大)、武川貴仁(筑波大)、石田真彦(NEC)、落合幸 徳(NEC)、松井真二兵庫県立大)、皆藤孝(SII)、藤田淳一(筑波大)、"EB-CVD によるア モルファスカーボンピラーのヤング率のビーム加速度依存性"、2005 年(平成 17 年) 第 66 回応用物理学会学術講演会、徳島大学、2005.9.7-11.
- 27. 神田一浩(兵庫県立大)、井垣潤也(兵庫県立大)、加藤有理(兵庫県立大)、米谷玲皇 (兵庫県立大)、松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVD 法で形成された炭素系構造物の構 造解析"、2005 年(平成 17 年)春季 第 52 回応用物理学関経連合講演会、埼玉大学、 2005. 3. 29-4. 1.
- 28. 小笹明賀(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、中松健一郎(兵庫県立大)、星野隆 行(東大)、神田一浩(兵庫県立大)、藤田淳一(筑波大)、皆藤孝(SII)、松井真二(兵 庫県立大)、"集束イオンビームを用いたナノ電磁石の作製"、2005 年(平成 17 年)春 季 第 52 回応用物理学関経連合講演会、埼玉大学、2005. 3. 29-4. 1.
- 29. 井垣潤也(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一 (兵庫県立大)、石田真彦(NEC)、落合幸徳(NEC)、藤田淳一(筑波大)、皆藤孝(SII)、 松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVD によるピラーを用いた多種材料のヤング率特性"、

2005 年(平成 17 年)春季 第 52 回応用物理学関経連合講演会、埼玉大学、 2005.3.29-4.1.

- 30. 中松健一郎(兵庫県立大)、永瀬雅夫(NTT)、生津英夫(NTT)、松井真二(兵庫県立大)、
 "FIB-CVD により作製した DLC ナノスプリングの機械特性"、2005 年(平成 17 年)春季 第 52 回応用物理学関経連合講演会、埼玉大学、2005. 3. 29-4. 1.
- 31. 米谷玲皇(兵庫県立大)、船曳涼子(JST)、星野隆行(東大)、神田一浩(兵庫県立大)、 春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝(SII)、藤田淳一(筑波大)、石田真彦(NEC)、落合幸 徳(NEC)、松井真二(兵庫県立大)、"FIB-CVD による細胞内操作のための細胞壁切断ツ ール及びナノネットの作製"、第2005年(平成17年)春季 第52回応用物理学関経 連合講演会、埼玉大学、2005.3.29-4.1.
- 32. 河守将典(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、星野隆行(東大)、神田一浩(兵庫 県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝(SII)、藤田淳一(筑波大)、石田真彦(NEC)、 落合幸徳(NEC)、松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビーム化学気相成長法による3 端子ナノマニピュレータ"、2005年(平成17年)春季 第52回応用物理学関経連合講 演会、埼玉大学、2005.3.29-4.1.
- 33. 市橋鋭也(NEC)、透過電子顕微鏡によるカーボンナノピラーのチューブ化その場観察、 2004 年(平成 16 年)秋季 第 65 回応用物理学会学術連合講演会、東北学院大学、 2004.9.1-4.
- 34. 渡辺啓一郎(兵庫県立大)、星野隆行(東大)、近藤和茂(JST)、神田一浩(兵庫県立 大)、春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝(SII)、松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビ ームを用いたモルフォ蝶鱗粉疑似構造の作製"、2004年(平成16年)春季第51回応用 物理学関連連合講演会、東京工科大学、2004.3.28-30.
- 35. 河守将典(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、近藤和茂(JST)、星野隆行(東大)、 神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝(SII)、藤田淳一(筑波大)、 石田真彦(NEC)、落合幸徳(NEC)、松井真二(兵庫県立大)、"集束イオンビーム CVD を 用いた3端子ナノマニピュレータの作製"、2004年(平成16年)春季 第51回応用物 理学関連連合講演会、東京工科大学、2004.3.28-30.
- 36. 米谷玲皇(兵庫県立大)、近藤和茂(JST)、星野隆行(東大)、神田一浩(兵庫県立大)、 春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝(SII)、藤田淳一(NEC)、石田真彦(NEC)、落合幸徳(NEC)、 松井真二(兵庫県立大)、"集東イオンビームを用いた3次元ナノマニピュレータの作 製"、2004 年(平成 16 年)春季第 51 回応用物理学関連連合講演会、東京工科大学、 2004.3.28-30.
- 37. 森田貴彦(兵庫県立大)、近藤和茂(兵庫県立大)、星野隆行(東大)、神田一浩(兵庫 県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝(SII)、藤田淳一(筑波大)、市橋鋭也(NEC)、 石田真彦(NEC)、落合幸徳(NEC)、多嶋勉(クレステック)、松井真二(兵庫県立大)、 "FIB-CVDによるナノメカニカルスイッチの作製"、2004 年(平成16年)春季第51回 応用物理学関連連合講演会、東京工科大学、2004.3.28-30.
- 38. 長田貴弘(物質・材料研究機構)、"単結晶ターゲットを用いたパルスレーザー堆積法に よる GaN 薄膜の作製"、東京工科大学、2004. 3. 29.

39. 渡辺啓一郎(兵庫県立大)、森田貴彦(兵庫県立大)、米谷玲皇(兵庫県立大)、神田一浩(兵庫県立大)、春山雄一(兵庫県立大)、皆藤孝(SII)、多嶋勉(クレステック)、松井真二(兵庫県立大)、"Ga+集束イオンビーム直接描画パターン GaN に対する熱処理時における Ga の析出"、2003 年(平成 15 年)秋季 第 64 回応用物理学会関係連合講演会、福岡大学、2003.8.30-9.2.

<国際>

- T. Ichihashi(NEC), Oleg Lourie, J. Fujita(Univ. of Tsukuba), K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Current Induced Graphitization of Amorphous Carbon Pillar Contained Gallium Nanoparticles", 2007 MRS Fall, Meeting, Boston, USA, 2007.11.26-1130.
- T. Yo(Osaka Univ.), H. Tanaka(Osaka Univ.), K. Koreyama(Osaka Univ.), T. Nagata(NIMS), Y. Sakuma(NIMS), K. Nakajima(NIMS), T. Chikyow(NIMS), J. Yanagisawa(Osaka Univ.), and A. Sakai(Osaka Univ.), "Characterization of deposited materials formed by focused ion beam-induced chemical vapor deposition using an AuSi alloyed metal source", 20th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Kyoto, Japan, 2007.11.6-8.
- K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), K. Yamamoto (JFCC), T. Haruyama(Univ. of Hyogo), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Electron Bioprism Fabrication by Focused-Ion-Beam etching and Chemical-Vapor-Deposition", 33rd International Conference Micro-and Nano-Engineering, Copenhagen Denmark, 2007.9.23-26.
- 4. R. Kometani(Univ. of Hyogo), H. Koike(Univ. of Tsukuba), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Evaluation of the bio nano-sensing probe fabricated by FIB-CVD for the single organelle analysing", The 15th Internaitional Conference on Electron, Ion, and Photon Beams and Nanolithography, Denver USA, 2007.6.1.
- M. Okada(Univ. of Hyogo), J. Igaki(Univ. of Hyogo), K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "UV–Nanoimprint Mold Repair by Ga+ Focused-Ion-Beam CVD", The 15th Internaitional Conference on Electron, Ion, and Photon Beams and Nanolithography, Denver USA, 2007.6.1.
- R. Okada((Osaka Univ.), T. Yo(Osaka Univ.), J. Yanagisawa(Osaka Univ.), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Formation of narrow wires deposited by focused Au or Si ion beam-induced chemical vapor deposition method", The 51th Intern. Conf. on Electron, Ion, and Photon Beam Technology and Nanofabrication, Denver, Colorado, USA, 2007.5.30.
- 7. T. Ichihashi(NEC), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), and M. Ishida(NEC), "Tubulization mechanism of amorphous carbon-nanopillar", 2006 MRS Fall Meeting, Boston, USA, 2006.11.27-12.1.
- R. Kometani(Univ of Hyogo), K. Kanda(Univ of Hyogo), Y. Haruyama(Univ of Hyogo), T. Kaito(SII), and S. Matsui(Univ of Hyogo), "Development of the integrated manipulation system 3-D nano-manipulator fabricated by the focused-ion-beam chemical-vapor-deposition", AVS 53rd International Symposium & Exhibition, San Francisco, USA2006.11.12-17.
- K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Ichihashi(NEC), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Mechanical Charactetristics of Metal-Containing Nanosprings Fabricated by Combination of FIB-CVD and Sputter Coating", AVS 53rd International Symposium & Exhibition, San

Francisco,2006.11.12-17.

- J. Igaki(Univ. of Hyogo), K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), K. Tone(Meisyo), T. Nishimura (Tore), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Evaluation of Pattern Profiles Replicated by Nanoimprint Using AFM with Carbon Nanotube Tip", AVS 53rd International Symposium & Exhibition, San Francisco, 2006.11.12-17.
- Ozasa(Univ. of Hyogo), K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Annealing Effect of Electronic Properties for Tungsten Wires Fabricated by FIB and EB-CVD", AVS 53rd International Symposium & Exhibition, San Francisco, 2006.11.12-17.
- M. Okada(Univ. of Hyogo), K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Nanoimprint Mold Repair by Focused-Ion-Beam Etching and Deposition", AVS 53rd International Symposium & Exhibition, San Francisco,2006.11.12-17.
- Minari(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Evaluation of Resolution for free-space-wiring fabricated by FIB-CVD", AVS 53rd International Symposium & Exhibition, San francisco, 2006.11.12-17.
- C. Minari(Univ. of Hyogo), K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Bakable Lamellar Grating Fabrication by Room-temperature Nanoimprint Using Hydrogen Silssesquioxane(HSQ)", 2006 International Microprocesses and nanotechnology Conference, Kamakura Japan, 2006.10.25-27.
- K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), M. Kawamori(Univ. of Hyogo), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "O₂ Plasma Irradiation Effect on HSQ nanospatterns Fabricated by Room-Temperature Nanoimprint Lithography", 2006 International Microprocesses and nanotechnology Conference, Kamakura Japan, 2006.10.25-27.
- R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ of Hyogo), "Annealing effect of the field emission from DLC emitter fabricated by FIB-CVD", 2006 International Microprocesses and nanotechnology Conference, Kamakura Japan, 2006.10.25-27.
- R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Nano-factory with the integrated manipulation system having the 3-D fingers fabricated by focused-ion-bem chemical-vapor-deposition", 32nd International Conference on Micro-and Nano-Engineering 2006, Barcelona Spain, 2006.9.17-22.
- Ozasa(Univ. of Hyogo), K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Annealing Effect of Electronic properties for Wires Fabricated by FIB and EB-CVD", 32nd International Conference on Micro-and Nano-Engineering 2006, Barcelona Spain, 2006.9.17-22.
- K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), T. Ichihashi(NEC), T. Kaito(SII-NT), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Structure Analysis of Wire Rod of Nanosprings fabricated by FIB-CVD "32nd International Conference on Micro-and Nano-Engineering 2006, Barcelona Spain, 2006.9.17-22.

- K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Ichihashi(NEC), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Mechanical Property Control by Metal Sputtering onto DLC Nanosprings Fabricated Using Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", The 16th International Microscopy Congress, Hokkaido Japan, 2006.9.3-8.
- R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama, (Univ. of Hyogo) T. Kaito(SII-NT), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), and S. Mastui(Univ. of Hyogo), "Vacuum microcapsule fabrication by FIB-CVD and its characteristics", The 16th International Microscopy Congress, Hokkaido Japan, 2006.9.3-8.
- K. Higashi(Univ. of Tsukuba), S. Nakazawa(Univ. of Tsukuba), T. Maeda(Univ. of Tsukuba), S. Okada(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), Y. Ochiai(JST), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), "In-situ monitoring of iron nanoparticles movement in amorphous carbon wall", Nanotube2006, Nagano Japan, 2006.6.19-22.
- S. Nakazawa(Univ. of Tsukuba), S. Okada(Univ. of Tsukuba), Y. Ochiai(NEC), M. Ishida(NEC), T. Ichihashi, T. Kaito(SII-NT), S. Matsui(Univ of Hyogo), and J. Fujita, "Graphitic tube formation induced by a flush discharge with Ga", Nanotube2006, Nagano Japan, 2006.6.19-22.
- Saikubo(Univ. of Hyogo) Y. Kato(Univ. of Hyogo), J. Igaki(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "NEXAFS study of the annealing effect on the local structure of FIB-CVD DLC", The 9th International Conference on Synchrotron Radiation, Daegu Korea, 2006.5.28-6.2.
- 25. Minari(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Evaluation of Pattern Resolution by FIB Process", The 50th International Conference on electron, ion, photon beam technology and fabrication, Maryland USA, 2006.5.31-6.1.
- 26. C. Minari(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo). Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "W/SiO₂ Thermal Bimorph Nano-Acutuator Fabrication by Focused-Ion-Beam Chemical-Vapor-Deposition", The 50th International Conference on electron, ion, photon beam technology and fabrication, Maryland USA, 2006.5.31-6.1.
- 27. K. Nakamastu(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Ichihashi(NEC), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Mechanical Property Control by Metal Spputtering onto DLC Nanosprings fabricated using Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", The 50th International Conference on electron, ion, photon beam technology and fabrication, Maryland USA, 2006.5.31-6.1.
- T. Hoshino, R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), T. Suzuki(NIMS), S. Matsui(Univ. of Hyogo), and K. Mabuchi(Univ. of Tokyo), "Three-dimentional Fabrication using Focused-ion-beam Chemical-vapor-deposition: Overhang Deposition Mechanism and Its Simulation", The 50th International Conference on electron, ion, photon beam technology and fabrication, Maryland USA, 2006.5.31-6.1.
- M. Ozasa(Univ. of Hyogo), K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), T.Hoshino, K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Electromagnetic Induction Phenomena of Nano-coil Fabricated by FIB-CVD", 2005 International Microprocess and Nanotechnology Conference, Tokyo, Japan,2005.10.25-28.

- K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), T. Ichihashi(NEC), Y. Ochiai(NEC), J. Fujita(Univ.of Tsukuba), and S Matsui(Univ. of Hyogo), "Electrical Transport in High-Temperature Region of Nanowiring Grown by Focused-Ion-Beam Chemical-Vapor-Deposition", 2005 International Microprocess and Nanotechnology Conference, Tokyo Japan,2005.10.25-28.
- 31. J. Igaki(Univ. of Hyogo), K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), M. Ishida(NEC), Y. Ochiai(NEC), J. Fujita(Univ of Tsukuba), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Comparison of Growth Characteristics between FIB and EB-CVD", 31st International Conference on Micro-and Nano-Engineering 2005, 2005.9.19-22.
- R. Kometani(Univ. of Hyogo), T. Hoshino, K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), J.Fujita(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), Y. Ochiai(NEC), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Nano-Net fabrication on the Glass Capillary by Focused-Ion-beam Chemical-Vapor-Deposition", Transducers, Korea, 2005,2005.6.5-9.
- 33. K. Kanda(Univ. of Hyogo), J. Igaki(Univ. of Hyogo), Y. Kato(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "NEXAFS study on carbon-based material formed by focused-ion-beam chemical-vapor-deposition", 20th International Conference on X-ray and Innner-shell Processes, Australlia, 2005.7.4-8.
- 34. Ozasa(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Nakamatsu(Univ. of Hyogo), T. Hoshino, K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), J. Fujita, T. Kaito, and S. Matsui(Univ of Hyogo), "Nano-Electromagnet Fabrication by Focused-Ion-Beam Chemical-Vapor-Deposition", The 49th International Conference on electron, ion, photon beam technology and fabrication, Orland USA, 2005.5.31-6.1.
- 35. T. Nagata(NIMS), P. Ahmet(NIMS), Y. Yamauchi(NIMS), Y. Sakuma(NIMS), T. Sekiguchi(NIMS), and T. Chikyow(NIMS), "Position Controlled GaN Nano-Structures Fabrication by Focused Ion Beam Assisted Methods", The 10th International Symposium on Advanced Physical Fields, Tsukuba, Japan, 2005.3.10.
- 36. T. Nagata(NIMS), P. Ahmet(NIMS), Y. Yamauchi(NIMS), Y. Sakuma(NIMS), T. Sekiguchi(NIMS) and T. Chikyow(NIMS), "Position Controlled GaN Nano-Structures Fabrication by Focused Ion Beam System", The 1st International Symposium on the Functionality of Organized Nanostructures, Tsukuba, Japan, 2004.12.1.
- 37. T. Nagata(NIMS), P. Ahmet(NIMS), Y. Z. Yoo(NIMS), K. Yamada(Waseda Univ), K. Tsutsui(Waseda Univ), Y. Wada(Waseda Univ), S. Miyazaki(Univ. of Hiroshima) and T. Chikyow(NIMS), "Schottky Metal Library for ZnO Based UV Photodiode Fabricated by the Combinatorial Ion Beam Assisted Deposition", The Third Japan U.S. Workshop on Combinatorial Materials Science, Naha, Japan, 2004.12.8-10.
- Ozasa(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), T.Morita(Univ. of Hyogo), K. Kondo(SII-NT), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), T. Kaito(SII-NT), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Fabrication and Evaluation of Thermal Nano-Sensor by Focused- Ion- Beam Chemical-Vapor-Deposition",2004 International Microprocess and Nanotechnology Conference, 2004.10.26-29.
- J. Igaki(Univ. of Hyogo), K. Watanabe(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), J. Fujita(Univ. of Tsukub), T. Kaito(SII), T. Tajima(Crestec), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Optical microdevice fabrication on optical fiber by FIB-CVD", 2004 International Microprocess and Nanotechnology Conference, 2004.10.26-29.

- M. Kawamori(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kondo(SII), T. Hoshino(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), J. Fujita(Univ. of Tukuba), Y. Ochiai(NEC), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Three-Thermal Nano-Manipulator Fabricated by Focused-Ion-Bea Chemical-Vapor-Deposition", 2004 International Microprocess and Nanotechnology Conference, 2004.10.26-29.
- 41. T. Nagata(NIMS), P. Ahmet(NIMS), Y. Z. Yoo(NIMS), K. Yamada(Waseda Univ), K.Tsutsui(Waseda Univ), Y. Wada(Waseda Univ) and T. Chikyow(NIMS), "Schottky Metal Library Fabrication for ZnO Based UV Photodetector by Combinatorial Method", The 3rd International Workshop on ZnO and Related Materals, Sendai, Japan, 2004.10.7.
- 42. T. Chikyow(NIMS), T. Nagata(NIMS), P. Ahmet(NIMS), Y. Yamauchi(NIMS), Y. Sakuma(NIMS), T. Sekiguchi(NIMS) and N. Koguchi(NIMSS), "GaAs micro crystal growth and its position control by low energy forcused ion beam"14th International Conference on Ion Beam Modification of Materials, Monterey, USA, 2004.9.6.
- 43. M. Ishida(NEC), T. Ichihashi(NEC), J.Fujita(Univ. of Tsukuba), and Y. Ochiai(NEC), "Catalytic nanotube formation from amorphous carbon rod prototyped using beam-induced deposition", International Conference on the Science and Application of Nanotubes, Mexico,2004.7.19-24.
- 44. J. Fujita(Univ of Tsukuba), M. Ishida(NEC), T. Ichiahshi(NEC), Y. Ochiai(NEC), T. Kaito(SII), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Solid Phase Nanotube Growth Observed Behind Wavy Traces of iron Particles in Amorphous Carbon nano-Pillars", The 48th International conference on electron, ion, photon beam technology and nanofabrication, San Diego USA, 2004.6.1-6.
- 45. T. Morita(Univ. of Hyogo), K. Kondo(SII), T. Hoshino(Univ. of Tokyo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), T. Ichihashi(NEC), M. Ishida(NEC), Y. Ochiai(NEC), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Nanomechanical Switch Fabrication by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", The 48th International conference on electron, ion, photon beam technology and nanofabrication, San Diego USA, 2004.6.1-6.
- 46. R. Kometani(Univ. of Hyogo), T. Hoshino(Univ. of Tokyo), K. Kondo(SII), K. Kanda(Univ of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), and Y. Ochiai(NEC), "Development of 3-D Nano- Manipulator by FIB-CVD", The 48th International conference on electron, ion, photon beam technology and nanofabrication, San Diego USA, 2004.6.1-6.
- 47. T. Ichihashi(NEC), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), and Y. Ochiai(NEC), "In-situ observation of carbon-nanopillar tubulization process", The 48th International conference on electron, ion, photon beam technology and nanofabrication, San Diego USA, 2004.6.1-6.
- 48. K. Watanabe(Univ. of Hyogo), T. Hoshino(Univ. of Tokyo), K. Kondo(SII-NT), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Optical Measurement and fabrication of Morpho-butterfly-scales quasi-structure using Focused-Ion-Beam Chemical-Vapor-Deposition", The 48th International conference on electron, ion, photon beam technology and nanofabrication, San Diego USA, 2004.6.1-6.
- 49. T. Nagata(NIMS), P. Ahmet(NIMS), T. Koida(Univ. of Tsukuba), S. F. Chichibu(Univ. of Tsukuba), and T. Chikyow(NIMS), "Position Controlled GaN Nano-Structures Fabricated by Low Energy Focused Ion Beam System", 2003 Materials Research Society Fall Meeting, Boston. USA. 2003.12.5.

- 50. K. Watanabe(Univ. of Hyogo), T. Morita(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ of Hyogo), T. Kaito(SII-NT), T. Tajima(Crestec), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Ga grain appearance from nanoimprint mold fabricated by Ga+ Focused- Ion-Beam Direct Etching", 2003 International Microscopy and Nanotechnology Conference, Tokyo Japan, 2003.10.28-31.
- M. Ishida(NEC), J. Fujita(Univ of Tsukuba), T. Ichihashi(NEC), Y. Ochiai(NEC), T. Kaito(SII), and S. Matsui(Univ of Hyogo), "Focused- Ion-Beam-Induced Fabrication of Tungsten Carbide Structures", The 47th International conference on electron, ion, photon beam technology and nanofabrication, Tampa USA, 2003.5.30.
- 52. K. Watanabe(Univ. of Hyogo), R. Kometani(Univ. of Hyogo), T. Morita(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kaito(SII), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), Y. Ochiai(NEC), T. Tajima(Crestec), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Nanoimprint using 3-D Mold made by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", The 47th International conference on electron, ion, photon beam technology and nanofabrication, Tampa USA, 2003.5.30.
- 53. R. Kometani(Univ. of Hyogo), K. Wwatanabe(Univ. of Hyogo), K. Kanda(Univ. of Hyogo), Y. Haruyama(Univ. of Hyogo), T. Kait(SII), J. Fujita(Univ. of Tsukuba), M. Ishida(NEC), Y. Ochiai(NEC), and S. Matsui(Univ. of Hyogo), "Nano-Manipulator Fabrication on Glass Capillary by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition", The 47th International conference on electron, ion, photon beam technology and nanofabrication, Tampa USA, 2003.5.30.

<国内>

(4)特許出願①国内出願(12件)

- 発明の名称:微小立体構造マニピュレータ 発明者:松井真二・米谷玲皇 出願人:独立行政法人科学技術振興機構 出願日 2003.5.21 出願番号:特願 2003-143099
- 発明の名称:微小立体構造バイオナノツールの製造方法及びその微小立体構造バ イオナノツール
 発明者:松井真二・米谷玲皇
 出願人:独立行政法人科学技術振興機構
 出願日:2003.9.9
 出願番号:特願 2003-317181
- 発明の名称:集束イオンビーム CVD を用いたナノ被覆ワイヤの形成方法 発明者:松井真二・藤田淳一 出願人:独立行政法人科学技術振興機 出願日:2004.4.19 出願番号:特願 2004-122640
- 発明の名称:神経細胞電極装置の作製方法及び神経再生電極装置 発明者:松井真二・星野隆行・満渕邦彦 出願人:独立法人科学技術振興機構 出願日:2004.11.4

出願番号: 特願 2004-320293

- 発明の名称:微小立体構造操作具の作成方法及びそれによって作製される微微小 立体操作具
 発明者:松井真二・米谷玲皇
 出願人:独立行政法人科学技術振興機構
 出願日:2005.9.8
 出願番号:特願 2005-260673
- 発明の名称:微小電磁装置の作製方法及びそれによって作製される微小電磁装置 発明者:松井真二・小笹明賀 出願人:独立行政法人科学技術振興機構 出願日:2005.9.8 出願番号:2005-260588
- 発明の名称:カーボンナノチューブの製造方法およびカーボンナノチューブ 発明者:市橋鋭也・藤田淳一・石田真彦・落合幸徳 出願人:日本電気株式会社・筑波大学 出願日:2005.10.20、 出願番号:特願 2005-305757
- 発明の名称:半導体装置及び半導体装置の製造方法 発明者:石田真彦・藤田淳一 出願人:日本電気株式会社・筑波大学 出願日:2005.10.20 出願番号:特願2005-305955
- 発明の名称:微小電子エミッタの作成方法及びそれを用いて作製される微小電子 エミッタ
 発明者:松井真二・米谷・玲皇・
 出願人:独立行政法人科学技術振興機構
 出願日:2005.11.29
 出願番号:特願 2005-343356
- 発明の名称:金属プローブ形成方法その金属プローブおよびその形成装置 発明者:藤田淳一、
 出願人:独立行政法人科学技術振興機構
 出願日:2005.11.30
 出願番号:特願 2006-322924
- 発明の名称:空中配線の製造方法及びその空中配線の製造処置 発明者:松井真二、星野隆行、近藤和茂 出願人:独立行政法人科学技術振興機構 出願日:2003.2.28、 出願番号:特願 2003-048659
- 発明の名称: FIB-CVD による微小立体構造物の製造方法及び微少立体構造物の描画 システム
 発明者:松井真二、星野隆行、近藤和茂、

出願人:独立行政法人科学技術振興機構、 出願日:2003.2.28、 出願番号:特願 2003-54361

海外出願(1件)

 発明の名称:カーボンナノチューブの製造方法およびカーボンナノチューブ構造体 発明者:石田真彦・市橋鋭也・落合幸徳・藤田淳一 出願人:日本電気株式会社、 出願日:2006.2.16 出願番号:特願 2005-514399

(5)受賞等

①受賞

- 1. 長田貴弘日本電子材料技術協会 第42回秋季講演大会 優秀発表賞「集束イオンビーム CVD 法による GaN 立体構造の作製と評価」、2005.10.28
- J. Fujita(Univ of Tsukuba), M. Ishida(NEC), T. Ichihashi(NEC), Y. Ochiai(NEC), T. Kaito(SII-NT), S. Matsui, MNC 2003 Award for Outstanding Paper, "Graphitization Wavy Traces of Iron Particles Observed in Amorphous Carbon Nano-Pillars", 2004.10.27
- K. Watanabe, T. Morita, R. Kometani, K. Kanda, Y. Haruyama, T. Kaito(SII-NT), S. Matsui, MNC 2003 Award for Most Impressive Poster, "Nanoimprint Mold Repair by Ga+ Focused-Ion-Beam", 2003.10.3
- 4. 松井真二、木下修一(大阪大学)第7回ロレアル色の化学と芸術賞金賞、「モルフォ蝶ブルーの原理解明」、2004.9.8

②新聞報道

こんナノアート?!、朝日新聞、207.12.3 ナノ立体自在に造形、毎日新聞、2007.10.13 応用物理学会、科学新聞、2007.9.7 動く3次元ナノ構造体、日刊工業新聞、2007.8.30 ナノ立体構造物 観察しながら作製、日経産業新聞、2007.8.30 兵庫発世界ー「ナノネット」、神戸新聞、2005.1.1 モルフォブルー発色の謎、読売新聞、2004.12.25 ナノピンセット、読売新聞、2004.12.2 ロレアル色の化学と芸術賞、日刊工業新聞、2004.9.9 三次元ナノ配線に成功、日刊工業新聞、2003.8.29 炭素で立体構造電子線使い制御、日経新聞、2003.5.26

④ その他

"これは来る!超ハヤミミ情報局イッツア極小ワールド"、つながるテレビ@ヒューマン、NHK 総合、 2007.11.18

"アラマタストック・世界一ちっちゃなピラミッド?"、地球ジオグラ TV、TBS テレビ、2007.11.3

"カメラがとらえた超ミクロの世界"、未知の世界を撮りたい驚き(秘)映像ハンタードリームビジョン、

日本テレビ、2007.8.14

"集束イオンビームを使ったナノ空間の自由な立体加工"、AXIS, pp.142-146, 2007.6.1

"ナノ精度メカの探求者", design news japan, pp.68, 2007.1.1

文部科学省 Nanonet Bulletin ナノネットインタビュー第 106 号 2006.2.8 米谷玲皇 http://www.nanonet.go.jp/japanese/mailmag/2005/106b.html

文部科学省 Nanonet Bulletin ナノネットインタビュー第 98 号 2005.10.5 松井真二 http://www.nanonet.go.jp/japanese/mailmag/2005/098a.html

世界一美しい「モルフォ蝶」の色を人工的に再現、JST 基礎研究最前線、No.8, pp.4-5,2005.1

"モルフォ蝶の不思議な青色を再現する"、日経サイエンス第35巻第1号、2005.1.1

LASF、第7回「ロレアル 色の科学と芸術賞」受賞者を発表、週刊ナノテク第 1179 号、2004.10.4,11 合併号

"南米のモルフォチョウの「青色」を再現-FIB 技術で立体ナノ構造試作-衣類、塗装など広範囲に応用可能"、日経先端技術 64、pp. 2-3, 2004. 5. 24

"集束イオンビームを使って実現する立体ナノ構造形成技術 超微細3次元構造体で振デバイスの未来を拓く"、週刊ナノテク第1141号、2003.12.8

"3次元ナノ構造物の CAD/CAM を完成 解像度 10nm、立体の形成自在に NEMS システムで実用化目指す"日経先端技術 51、pp. 2-3, 2003. 12.8

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2003. 4. 14	CREST 研究会	日本電気㈱	10 名	研究進捗状況の 報告 装置見学
2003. 7. 17	CREST 研究会	物質•材料研究 機構	9名	研究進捗状況の 報告 装置見学
2003. 10. 17	CREST 研究会	日本電気㈱	9名	研究進捗状況の 報告 装置見学
2004. 1. 29	CREST 研究会	物質·材料研究 機構	9名	研究進捗状況の 報告 装置見学
2004. 4. 9	ナノファクトリ領 域松井・木下チーム 合同オンサイトミ ーティング	姫路工業大学 高度産業科学 技術研究所	20 名	研究進捗状況の 報告、今後の研 究計画 領域研究代表者 の講演 装置見学

7 研究期間中の主な活動(ワークショップ・シンポジウム等)

2004. 8. 20	CREST 研究会	筑波大学	9名	研究進捗状況の 報告 装置見学
2004. 11. 26	CREST 研究会	物質·材料研究 機構	9名	研究進捗状況の 報告 装置見学
2005. 3. 18	CREST 研究会	日本電気㈱	9名	研究進捗状況の 報告 装置見学
2005. 5. 17	ナノファクトリ領 域オンサイトミー ティング	物質•材料研究 機構		研究進捗状況の 報告 装置見学
2005. 7. 19	CREST 研究会	筑波大学	9名	研究進捗状況の 報告
2005. 10. 14	CREST 研究会	日本電気㈱	8名	中間評価に向け た今後の研究打 ち合わせ
2006. 4. 21	CREST 研究会	兵庫県立大学 高度産業科学 技術研究所	12 名	研究進捗状況の 報告
2006. 7. 18	CREST 研究会	エスアイアイ・ナノテクノロ シ [゙] ー㈱小山事業 所	12名	研究進捗状況の 報告 FIB 装置 見学
2006. 11. 24	ナノファクトリ領 域木下・松井・大門 チーム合同オンサ イトミーティング	兵庫県立大学 高度産業科学 技術研究所	24 名	研究進捗状況の 報告 装置見学
2006. 2. 6	応用物理学会関西 支部セミナー「励起 ナノプロセッシン グの展望」	和歌山大学		
2007. 7. 6	CREST 研究会	物質•材料研究 機構	8名	研究進捗状況の 報告 研究終了報告に 向けた研究計画
2007. 8. 27	CREST 研究会	物質•材料研究 機構	9名	研究終了報告に 向けた研究計画

8 研究成果の展開

(1)他の研究事業への展開

・ 平成19年度 JST「さきがけ研究」採択 筑波大 藤田淳一 「超尖鋭プローブによる局在場制御と新材料創成」

(2)実用化に向けた展開

- ・ 細胞マミュピュレータ市販装置へのバイオナノインジェクターの試供(企業との共同研究)
- ・ ナノマニュピュレータによる表面付着物の基板との吸着力測定(企業との共同研究)

- 9 他チーム、他領域との活動とその効果
 - (1)領域内の活動とその効果

・ナノチューブの形成メカニズム解明について、領域内のナノチューブ研究グループと連携。

(2)領域横断的活動とその効果

・ナノチューブの領域横断ワークショップ参加により、ナノチューブ成長メカニズムに関する研究 交流を行い新たな知見を得た。

- 10 研究成果の今後の貢献について
 - (1)科学技術の進歩が期待される成果

・ FIB-CVD によるバイオナノツール作製と応用技術は、今後の細胞内小器官の単一操作および機能計測のための重要なナノツールになると確信している。

・ビーム励起反応により形成したアモルファスカーボンピラーの結晶化により、不完全ながらも 多層ナノチューブ形成ができる可能性を見出した。固相反応によるナノチューブ形成メカニズム 解明とともに、本技術を用いることにより、任意の位置、方向、長さ、さらには直径制御の可能性 もあり、電子デバイやヤセンサーへの応用が期待される。

・ 超尖鋭タングステンプローブ作製技術の発明および電界可視化技術は、新研究分野へと展開が期待できる。

(2)社会・経済の発展が期待される成果

・集束イオンビームCVDは、TEM試料作成、フォトマスク修正等、企業等で使用されているが、 その堆積材料特性等について、未解明のままで実用化されてきた。本研究成果により、堆積材 料特性の詳細が明らかになり、集束イオビーム技術の更なる実用化に貢献する。

11 結び

研究の目標達成度

目標とした、(1)FIB-CVD による自由造形の実現、(2)堆積材料の物性評価、(3)立体ナノ構造形成のナノメカニカル特性等の評価、(4)立体ナノ構造形成技術のデバイス応用、について、(1)、(2)、(3)についてはほぼ目標を達成した。(4)のデバイス応用については、さらなる応用展開が必要である。

今後の研究展開

これまでの研究成果をベースにして、FIB-CVD の特徴を生かしたナノ立体構造デバイス研究を継続推進する。

プロジェクト運営について

研究リーダとして、チーム研究を推進してきたが、チームとしての成果をあげるために年4回の定期ミーテイングを開催し、各グループの進捗・討議、共同研究推進を行うことにより、チーム全体の研究整合性を維持できたのが良かったと思う。さらに、10人以上の修士および博士課程学生が本プロジェクトに参加し、若手研究者育成につながった。これまでに2人の博士課程学生が本CREST テーマにより博士号を取得した。