

平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

GCIB を用いた超精密金型加工法の開発

研究開発成果等報告書

平成 22 年 3 月

委託者 関東経済産業局
委託先 株式会社菊池製作所

目 次

第 1 章	研究開発の概要	・・・1
1.1	研究開発の背景・研究目的及び目標	
1.2	研究体制	
1.3	成果概要	
1.4	当該研究開発の連絡窓口	
第 2 章	金型加工用 GCIB 加工装置の設計	・・・6
第 3 章	金型加工用 GCIB 加工装置の製作と組立調整	・・・8
3.1	GCIB 照射装置	
3.2	真空チャンバ装置	
3.3	6 軸モーションベース装置	
第 4 章	平板金型材料への GCIB 照射試験	・・・12
4.1	NAK80、NAK55 への照射試験結果	
4.2	SKD 鋼への照射試験結果	
第 5 章	難加工形状金型材料への GCIB 照射試験	・・・24
第 6 章	全体総括	・・・26

第1章 研究開発の概要

金型技術は、様々な分野で大量にかつ安価に製品を作り出す為に欠く事の出来ない技術であり、日本の得意とする分野であったが、近年技術流出が激しく海外から追い上げられている現状がある。本提案は、高難度化する金型加工技術に新しい手法を取り込もうとするものであり、従来手仕上げを行っていた金型の超平滑仕上げを半導体産業で培ったガスクラスターイオンビーム技術を展開し、超平滑な加工技術を開発しようとするものである。

ここで提案する加工法は、従来の機械的な加工法と異なり、数千個程度のクラスター状の原子集団をイオン化して、加工に適したエネルギーで金型表面に照射し、ガスクラスターに特有のスパッタリング効果を用いて、金型表面を滑らかに加工しようとするものである。イオン化したガスクラスターによる加工法は(京都大学名誉教授)山田公氏の発明で、半導体分野の超平滑化工法として知られている。今回は本手法を超精密金型の加工法に適用しようとするもので、従来の機械的な加工法の限界に挑戦する極めて革新的で新規性に富むものである。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景

周知の様に、金型は様々な製品を創り出す為に欠く事の出来ない基盤技術の一つになっている。特に近年、電子部品の小型化や光学部品への応用の拡大に伴って、金型の微細化や高精度化が不可欠になって来ている。電子機器の実装に於いても端子ピッチが $100\mu\text{m}$ レベルになり、また電気信号と光信号混載が不可欠になり、微小光学素子を含む金型のサブミクロンレベルの高精度化と超平滑化が要求されている。

これまでは、この様な要求に関しては、形状加工後の金型を手作業で研磨剤を用いて、研磨加工等で行っていたが金型が微細化されるに従い、手作業が困難になっていた。近年京都大学名誉教授(現兵庫県立大学)の山田等により GCIB(ガスクラスターイオンビーム)の照射により形状を損なう事なく超平滑に加工出来る事が示された。同技術は、数千~数万の原子が集合したクラスター状の原子塊をイオン化し加工面に照射するもので、無損傷で超平滑な面を形成することが出来るものである。

本提案は、金型のさらなる高度化に際し、これまで主として半導体産業において開発されてきた GCIB 技術を金型の仕上げ加工に用いようとするもので、日本のものづくり技術を差別化する上で重要な開発である。

(2) 研究の目的

精密な形状を有する金型表面の鏡面仕上げを従来の手仕上げで行おうとすると、微細な凹凸形状を損なうことなく表面を超平滑化することは難しかった。その為金型によりその様な形状の製品を安価に大量に作る事が難しかった。

ここでは、 $100\mu\text{m}$ レベルの隙間を持つ金型の内側面を $Ra=10\text{nm}$ レベルに仕上げる技術の開発を行う。

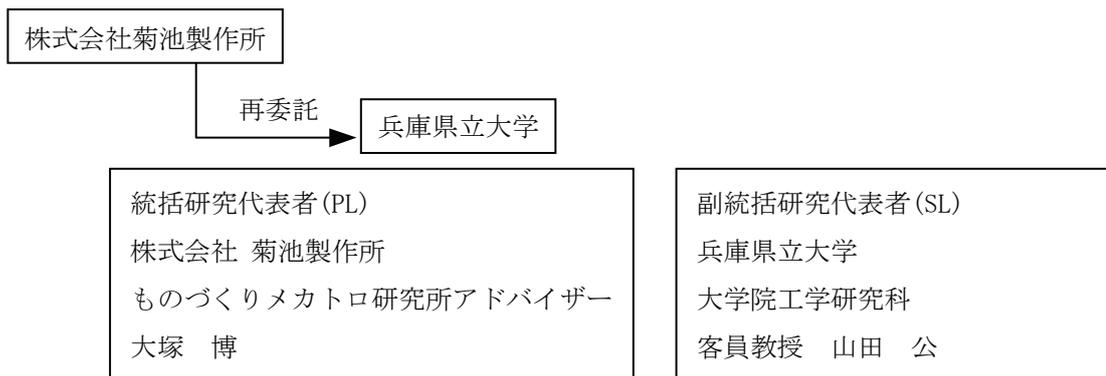
(3) 研究開発の高度化目標

- ① 金型加工用 GCIB 装置の開発
- ② 加工ステージの駆動ソフトの開発と評価
- ③ 金型に対する GCIB 照射技術の開発

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織(全体)

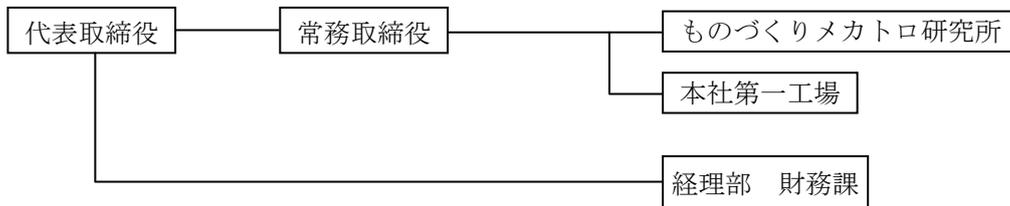


2) 管理体制

①事業管理者

株式会社菊池製作所

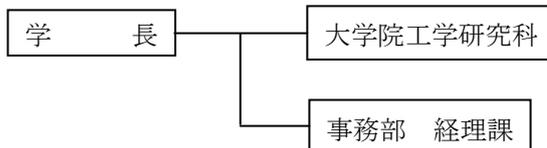
業務管理者：常務取締役 齋藤 弘己



②再委託先

兵庫県立大学

業務管理者：教授 内田 仁



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】株式会社菊池製作所

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
齋藤 弘己	常務取締役	④
吉澤 正英	ものづくりメカトロ研究所アドバイザー	④

②研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
大塚 博	ものづくりメカトロ研究所アドバイザー	①、②、③
小笠原 伸浩	ものづくりメカトロ研究所アドバイザー	①、②、③
好田 祥基	ものづくりメカトロ研究所	②
小山 裕司	ものづくりメカトロ研究所	②
荒井 英臣	本社第三工場	③
牧田 健一	本社第三工場	③
田口 譲	本社第一工場	②
土屋 隆史	本社第一工場	②
金子 重誠	本社第一工場	②

【再委託先】

(研究員)

兵庫県立大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
山田 公	大学院工学研究科 客員教授	①、③
豊田 紀章	大学院工学研究科 准教授	①、③

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

株式会社菊池製作所

(経理担当者)

経理部 財務課 課長 内田 光

(業務管理者)

常務取締役 齋藤 弘己

(再委託先)

兵庫県立大学

(経理担当者)

事務部 経理課 課長補佐 大西 加代子

(業務管理者)

大学院工学研究科 研究科長 教授 内田 仁

(4) 他からの指導・協力者

氏名	所属・役職	備考
土肥 俊郎	国立大学法人九州大学 工学研究院機械工学部門 教授	アドバイザー

1-3 成果概要

(1) 研究開発の具体的内容

①金型加工用 GCIB 装置の開発

従来の GCIB 装置は、主として半導体分野で使用されることを目的として開発されたもので、比較的大面積をエネルギーの分散をしぼり、且つ超高純度なガスで加工するものであった。それに対し、本研究開発の目的は、SKD 鋼等の金型材で作られた微細金型への照射であり、超高純度は不要であるが、細かな加工ツールの様にビームを小さくしぼって限定的な加工時間で処理する必要がある。その為従来の GCIB 装置に付加されていた質量分離装置やエネルギーフィルタを除去し、GCIB ガンに電界レンズを付加し、加工ビーム形状を操作出来る構造の GCIB 装置を試作する。

②加工ステージの制御ソフト開発、評価

複雑な形状の金型に GCIB を自由自在に照射出来るようにする為に 6 軸のサンプルホルダーを取り付け、それらを制御するソフトを開発し上記装置に組み込む。

③金型に対する GCIB 照射技術の開発

製作した装置によって、金型材として一般的な SKD 鋼、NAK 鋼、同加工ツールである WC 焼結体等を加工する。様々な条件で GCIB を照射し、ベースデータを作成する。

(2) 目標①～③に対する成果概要

① 金型加工用 GCIB 装置の開発

計画に対し金型加工用 GCIB 装置を試作・評価し目標の性能を達成している事を確認した。同真空系は凡そ 1 m^3 の内容積を持ち 3200L/sec のターボ分子ポンプ 2 台で排気し、到達真空度 $1 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 、加工作業時の真空度 $6.6 \times 10^{-2}\text{Pa}$ を目標とし、全て達成することが出来た。

また GCIB ガンは 10^{18} 個/ cm^2 のドーズ量を 10 分程度で照射出来るように $50\ \mu\text{A}$ 程度の電流値が取れる設計とした。また集中して加工出来る様にビーム径を $\phi 5\text{mm}$ 程度に絞り込める様アインツェルレンズを 2 段設置する構造とした。

加工に用いるガスクラスターのサイズは 5000 程度にピークを持つ様に配慮した。試作した GCIB ガンは何れも目標値を達成する事が出来た。今回の目標に対する結果をまとめたものを表 1-1 に示す。

表 1-1 目標性能・達成性能対比表

装置	目標性能	達成性能
ガスクラスターイオンガン	加速電圧 20keV 時ビーム電流 $50\ \mu\text{A}$ 以上 ビーム径 $\phi 5\text{mm}$ 以下 クラスターサイズ 5000 個以上	加速電圧 20keV 時ビーム電流 $100\ \mu\text{A}$ 以上 $\phi 5\text{mm}$ 以下 5000～10000 個
真空チャンバ装置	到達真空度 $1 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 以下 加工時の真空度 $6.6 \times 10^{-2}\text{Pa}$ 以下	$5 \times 10^{-5}\text{Pa}$ $7.3 \times 10^{-3}\text{Pa}$
3 軸ステージ	X(左右) $\pm 200\text{mm}$ Y(上下) $\pm 75\text{mm}$ Z(前後) $\pm 200\text{mm}$ 繰返し位置決め精度 $\pm 200\ \mu\text{m}$ 以下	$\pm 200\text{mm}$ $\pm 75\text{mm}$ $\pm 200\text{mm}$ $12\ \mu\text{m}(\text{Max})$ 、 $-9\ \mu\text{m}(\text{min})$
6 軸モーションベース	並進 $\pm 5\text{mm}$ 時位置決め精度 $\pm 0.1\text{mm}$ 以下 並進 $\pm 5\text{mm}$ 繰返し位置決め $\pm 0.01\text{mm}$ 以下 回転 ± 30 度時位置決め精度 $\pm 0.1^\circ$ 以下 回転 ± 30 度時繰返し位置決め $\pm 0.01^\circ$ 以下	$0.071\text{mm}(\text{Max})$ $\pm 0.005\text{mm}$ $\pm 0.00375^\circ$ $\pm 0.005^\circ$

② 加工ステージの制御ソフト開発、評価

粗調整用 3 軸ステージと任意角度を自在に与える 6 軸モーションベースを製作しチャンバ内に設置した。同時に制御ソフトを開発し基本動作の確認を行い目標の性能が得られている事を確認した。動作は並進動作と回転動作についてそれぞれ、 $\pm X$ 軸、 $\pm Y$ 軸、 $\pm Z$ 軸及び $\pm \theta X$ 軸、 $\pm \theta Y$ 軸、 $\pm \theta Z$ 軸に対して評価を行ない、目標値を達成する事を確認した。

③ 金型に対する GCIB 照射技術の開発

射出成形金型材及びプレス金型材として一般的な NAK 鋼や SKD 鋼に対して目標の表面粗さ Ra で 10nm レベルを達成する GCIB の照射条件を見出した。それにより機械加工時の傷が消失し、一様な平滑面を形成している事が分かった。また、GCIB 照射後の表面粗さはいずれも 10nm レベルで空間波長の短い粗さの領域では 10nm 以下の粗さになった。

さらに微細ピッチ金型を想定し溝幅 100~150 μ m、深さ 6mm のサンプルを製作し同溝構造に対して GCIB を照射し、溝加工面の粗さを Ra で 13~15nm レベルにまで改善する事が出来た。手仕上げによる加工が難しい構造の金型に対し GCIB 照射が有効で有る事を示す事が出来た。

(3) 達成されなかった目標

WC を用いた金型、もしくは加工用ツールを本研究期間中に用意する事が出来ず同材料で出来た構造物に対する GCIB 照射効果を検証する事が出来ず今後の課題となった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(株)菊池製作所

常務取締役 ものづくりメカトロ研究所長 齋藤 弘己

TEL 042-650-5065 FAX 042-650-5070

E-mail h-saito@kikuchiseisakusho.co.jp

第 2 章 金型加工用 GCIB 装置の設計

本装置は、GCIB 照射装置、真空排気装置、6 軸モーションベース装置で構成される。GCIB 照射装置は、具体的には金型加工用のガスクラスタイオンビーム (GCIB) を発生、輸送するイオン源部とその排気系、電源類で構成される。真空排気装置は、加工部材の GCIB 処理を行う真空チャンバ装置、真空ポンプ装置、3 軸ベースステージ装置から構成される。さらに金型の特定部位に選択的にイオンビーム照射を精度良く行うための 6 軸パラレルリンク機構を含む 6 軸モーションベース装置で構成される。6 軸モーションベース装置は 3 軸ベースステージ装置に搭載される。これらにより、従来の半導体用の GCIB 装置に比べ小型コンパクトで金型処理加工に適した照射機能を持つ新しい金型加工用 GCIB 装置とした。全体の概念構成図を図 2-1 に示す。以下、設計仕様を各図と表に示す。

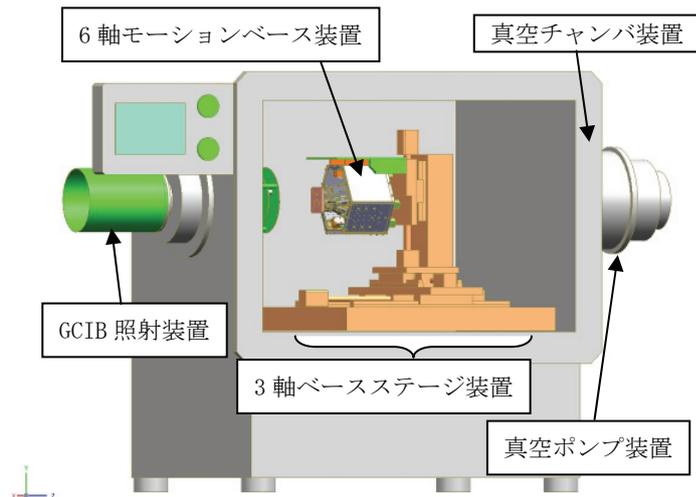


図 2-1 金型加工用 GCIB 装置の設計概念図

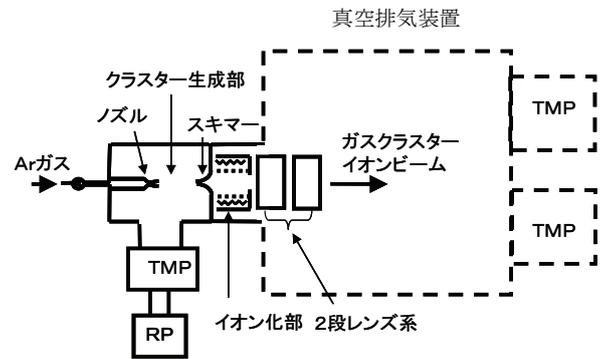


図 2-3 GCIB 照射装置の構成

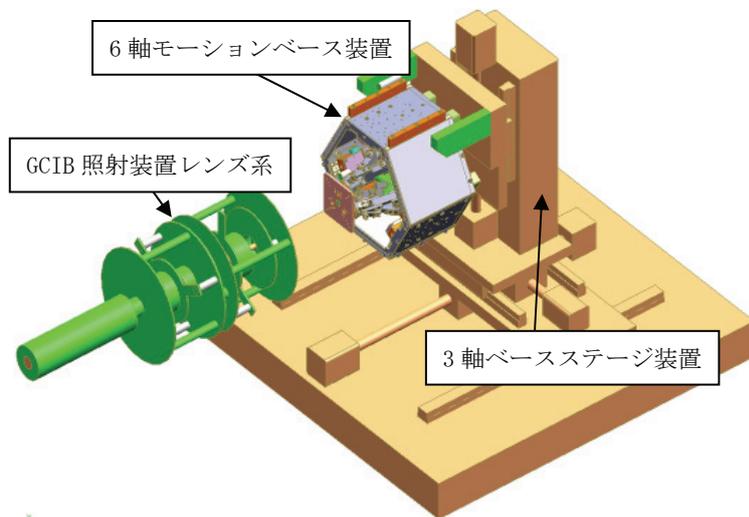


図 2-2 加工ステージの設計概念図

表 2-1 GCIB 照射装置の設計仕様

イオン化部	イオン化方式：電子衝撃法	イオン種：Ar クラスターイオン
	ビーム電流：レンズより 50mm の位置で $50 \mu\text{A}$ 以上	
	ビームエネルギー：最大 20keV	ノズル 1 次側 Ar 圧力：最大 6 気圧
	本体部外形寸法：約 $\phi 200\text{mm} \times 500\text{mm}$	
レンズ部	構成：2 段アインツェルレンズ	全長：約 300mm
	レンズ印加電圧：レンズ 1 最大 20kV	レンズ 2 最大 20kV
	ビームサイズ：レンズ出口より 50mm の位置で約 $\phi 5\text{mm}$	
真空排気部	ノズル部 TMP の排気速度：800L/sec	イオン化部圧力： $6.65 \times 10^{-2}\text{Pa}$ ($5 \times 10^{-4}\text{Torr}$)

表 2-2 真空排気装置の真空設計仕様

内容積：約 1m ³
加工時の真空度：6.6×10 ⁻² Pa(5×10 ⁻⁴ Torr)以下
粗引き時間：大気から 40Pa までの所要時間で 10 分以下
排気操作：自動もしくは手動での排気操作
TMP 排気系構成：3200L/sec のポンプ 2 台
RP 排気系構成：1000L/min のポンプ 2 台
真空チャンバ装置の到達真空度：1×10 ⁻⁴ Pa 以下

表 2-3 6 軸モーションベース装置要求仕様

動作環境：真空環境
動作自由度：XYZ 方向並進移動及び XYZ 軸回り回転動作
動作範囲(並進方向)：±5.0mm
動作範囲(回転方向)：±30°
位置決め精度(並進方向)：±0.1mm
位置決め精度(回転方向)：±0.1°
繰り返し位置決め精度(並進方向)：±0.01mm
繰り返し位置決め精度(回転方向)：±0.01°

第 3 章 金型加工用 GCIB 装置の製作と組立調整

3.1 GCIB 照射装置

(1) クラスターイオンの生成確認

クラスターイオンビーム生成確認試験として、イオン化部やレンズ系は全て接地電位とし、中性クラスタービームとして真空チャンバ内に導入する。一定の距離離れた位置に電離真空計を置き、シャッターを使い中性クラスタービームを遮蔽/通過の両条件に対して電離真空計の圧力を測定する。クラスター化されていれば、シャッター開閉前後で電離真空計の値は大きく違いが表れるが、クラスター化されていなければ大きな圧力増加が観測されないことが知られている。図 3-1 は、横軸をノズル 1 次側圧力、縦軸をシャッター開閉に伴う圧力増加分を測定した結果である。ノズルの Ar ガス圧力が 0.1MPa を越えるとシャッター閉→開に伴う大きな圧力増加が観測されており、クラスター生成が行われていることが確認された。このほかにも、中性ガスクラスターをイオン化して引出したビームの質量数を飛行時間測定法(Time of Flight:TOF)で計測する試験も行い、Ar の個数で 5000~10000 個に中心分布を持つクラスターサイズ分布が得られた。

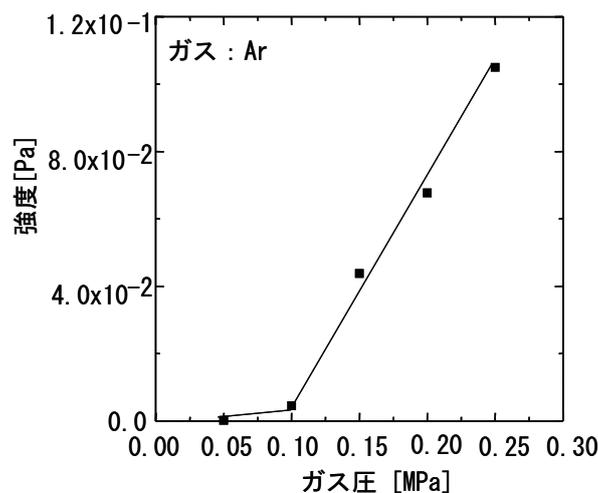


図 3-1 ノズル 1 次側 Ar ガス圧力と電離真空計による圧力増分の関係

(2)イオンビーム性能

金型加工用 GCIB 装置のビーム電流仕様である $50\mu\text{A}$ 以上の値が得られるかを調べた。ビーム電流値は、レンズ 2 の出口から 50mm 離れた位置に置かれたビームモニター (+20V のバイアス印加) で測定した。

図 3-1 は、ビーム電流値の加速電圧変化である。レンズ 1、2 の電圧は最も標準的な値に設定した (20kV 引出しで最大電流が得られるレンズ電圧)。図から、加速電圧の増加によりビーム電流が増え、 20kV では最大 $90\mu\text{A}$ 程度までビーム電流が得られたため、設計仕様の $50\mu\text{A}$ の値が満たされていることが確認できた。

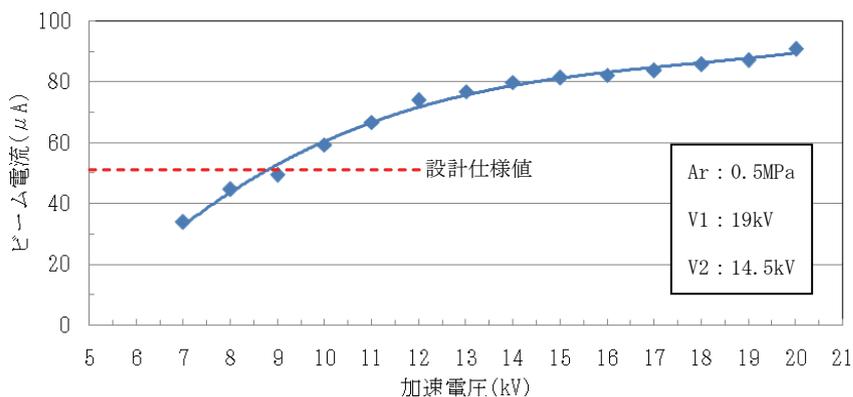


図 3-1 GCIB イオン電流のイオン源加速電圧変化

図 3-2 は Ar ガス圧力によるビーム電流の変化の測定結果、図 3-3 はレンズ 1 電圧によるビーム電流の変化を調べた結果である。両図ともビームモニターでビーム電流を測定している。図 3-2 から Ar ガス圧力で 0.25MPa 程度で設計仕様値のビーム電流が得られていることが確認できた。ビーム電流の調整が加速電圧や Ar ガス圧力により可能なことが分かった。

図 3-3 から、レンズ 2 を動作させていないとビームモニターで測定された値は $40\mu\text{A}$ 程度と少なくなった。レンズ 1 を動作させずレンズ 2 のみで同様なビーム電流変化の測定を行ったところ、図 3-3 と同様な傾向が得られた。レンズ 1、2 を動作させた場合、図 3-2 に見られるように $90\mu\text{A}$ の値が得られていることからレンズの 2 段使用による電流増加効果があることが確認できた。

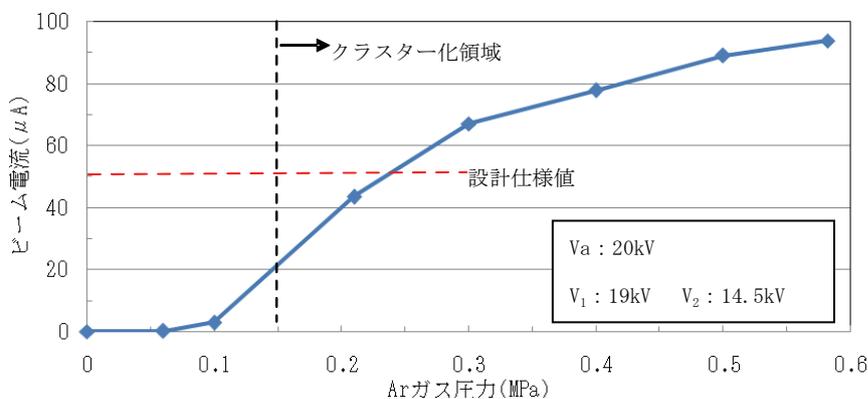


図 3-2 Ar ガス圧力によるビーム電流の変化

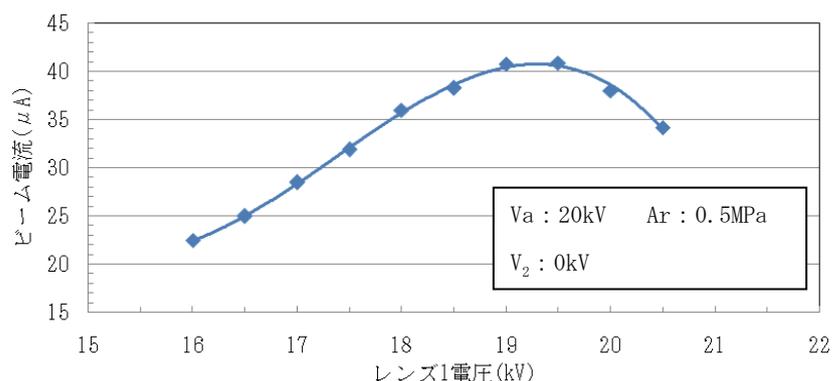


図 3-3 レンズ 1 電圧によるビーム電流の変化

(3)イオンビームサイズ

組み立てた GCIB 加工装置で Si 基板に銅(Cu)を成膜した試料にビームを一定時間照射し、その変色領域の寸法からビームサイズを評価した。図 3-4 に、照射痕の写真を実験条件と共に示した。①で示されるレンズ出口 50mm の位置でのビームサイズは直径約 5mm 程度で、設計仕様のサイズが得られていた。②のレンズ出口より 100mm の位置ではビームサイズは直径約 10mm と広がっている。上記の運転条件では 50mm の位置でビームサイズが集束し、クロスオーバーを経てビームが発散するため②でビーム口径が大きくなったと考えられる。以上のことから、組み立てた GCIB 装置で所定のビームサイズが得られることが確認され、試料位置やレンズ電圧の調整でビームサイズを変えることができることが示された

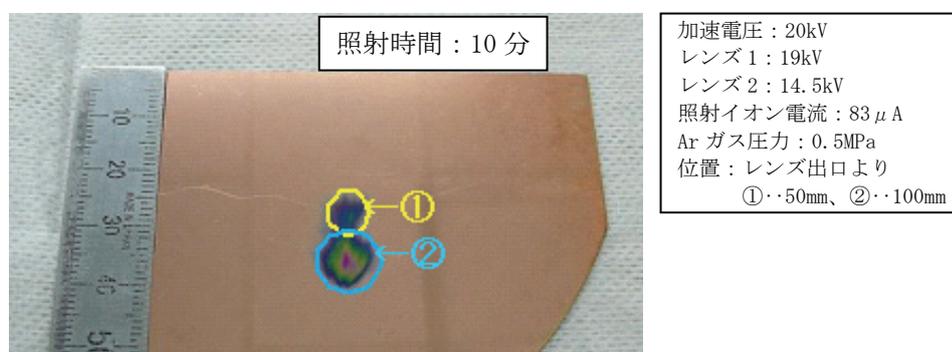


図 3-4 ビームサイズの測定写真とその運転条件

3.2 真空排気装置

(1)真空チャンバ装置・真空ポンプ装置の動作確認

組立後の真空チャンバ装置について排気系を動作させた時の真空測定の結果を表 3-1 に示す。ビーム照射時の真空チャンバ装置内圧力は設計仕様値の 6.65×10^{-2} Pa より小さな値になっているので仕様を満たした。図 3-5 は、真空チャンバ装置内を大気圧にしてからロータリーポンプで粗引きを行った時の圧力変化を示した結果である。設計で選んだロータリーポンプ (RP) を使った排気特性では、排気開始後 10 分未滿で TMP の動作開始圧の 40Pa に入っており、設計仕様を満たされていることが確認できた。

表 3-1 真空度の測定結果

最高到達圧力： 5×10^{-5} Pa(真空引き開始後、24 時間)
運転時の加工室圧力：約 7.8×10^{-3} Pa(但し、ノズル Ar ガス圧力が 0.58MPa の時)
TMP 動作開始後、ビーム出し可能な圧力 (10^{-4} Pa 台)になるまでの時間：約 0.5 時間

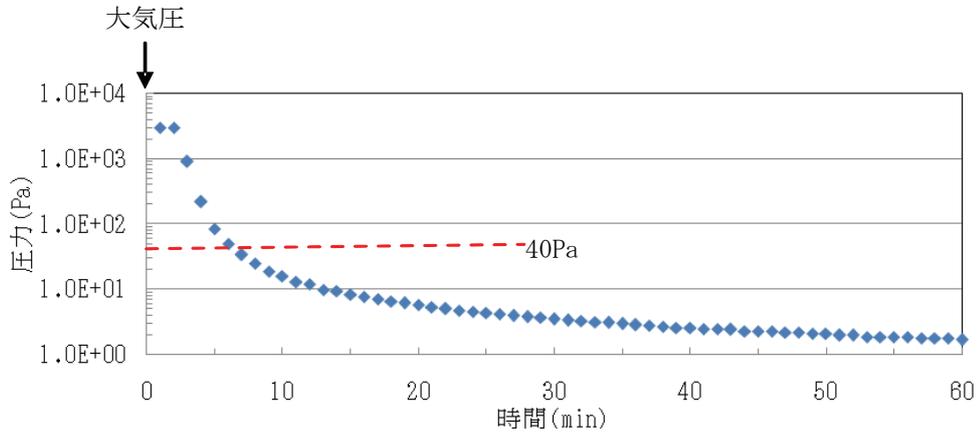


図 3-5 製作した真空チャンバ内の粗引き真空特性

(2) 3 軸ベースステージ装置の精度と動作の確認

3 軸ベースステージの動作領域の確認と位置決め精度の評価を行った。動作は各軸について 7 回行い、動作速度は 25mm/sec で行った。測定結果は表 3-2 に示すがいずれも目標値プラスマイナス 200 μ m 以内であったので仕様を満たしていることを確認できた。

表 3-2 3 軸ステージ評価結果

評価項目	目標性能	達成性能
X 軸	最大誤差幅 $\pm 200 \mu$ m 以内	原点 $\rightarrow +200$ -5μ m 原点 $\rightarrow -200$ -9μ m +200 \rightarrow 原点 1μ m -200 \rightarrow 原点 4μ m
Y 軸	最大誤差幅 $\pm 200 \mu$ m 以内	原点 $\rightarrow +75$ -2μ m 原点 $\rightarrow -75$ -6μ m +75 \rightarrow 原点 -9μ m -75 \rightarrow 原点 -7μ m
Z 軸	最大誤差幅 $\pm 200 \mu$ m 以内	原点 $\rightarrow +200$ 10μ m 原点 $\rightarrow -200$ 2μ m +200 \rightarrow 原点 6μ m -200 \rightarrow 原点 12μ m

3.3 6軸モーションベース装置の精度及び動作の確認

今回試作した6軸モーションベース装置について位置決め精度(JIS B 6192)、位置再現性の項目について測定・評価を行った。位置決め精度の測定結果を表3-3に、位置再現性の測定結果を表3-4に示す。

表 3-3 位置決め精度測定結果

Linear travel (mm)					
+X	-X	+Y	-Y	+Z	-Z
0.058	0.058	0.071	0.073	0.003	0.003
Rotation travel (deg)					
+ θ_x	- θ_x	+ θ_y	- θ_y	+ θ_z	- θ_z
0.084	0.084	0.375	0.375	0.138	0.136

表 3-4 繰返し位置決め精度測定結果

Linear travel (\pm mm)					
+X	-X	+Y	-Y	+Z	-Z
0.001	0.0005	0.0005	0.0005	0.001	0.0005
Rotation travel (\pm deg)					
+ θ_x	- θ_x	+ θ_y	- θ_y	+ θ_z	- θ_z
0.0035	0.0025	0.0005	0.002	0.002	0.003

以上の測定結果により、並進方向動作および回転方向動作の位置決め精度と並進方向動作および回転方向動作の繰返し位置決め精度が位置決めステージの要求仕様を満たしていることを確認した。

更に、6軸モーションベース装置を真空チャンバ内の3軸ベースステージに設置し真空環境下における動作確認を行い、真空度 10×10^{-5} Paの真空雰囲気下において6自由度方向の基本動作確認と10分間の連続動作を行い真空環境下での動作および脱ガス性に問題が無い事を確認した。

第4章 平板金型材料へのGCIB照射試験

4.1 NAK80、NAK55への照射試験結果

製作したGCIB装置を使い、実際の金型材料であるNAK鋼とSKD鋼についてGCIB照射効果の試験を行った。NAK鋼としては、組成により金型製作時の切削加工性に差があるNAK80とNAK55をサンプルとして選んだ。GCIB照射条件としては、ビームを試料に垂直に照射する場合と試料を 80° 程度傾けた場合の照射試験を行い、照射角度の違いによる加工性能を評価することを目的とした。試験に用いた標準的な照射条件を表4-1に示す。

表 4-1 標準的なGCIB照射試験条件

GCIB イオン源： ガス種：Ar ノズル1次側圧力：0.3~0.5MPa 加速電圧：20kV レンズ1電圧：19kV レンズ2電圧：14.5kV 照射ビーム電流：50~90 μ A ビームサイズ： ϕ 5mm程度	試料： 材質：NAK80、NAK55、SKD11 寸法：約10mm \times 約10mm \times 1mm厚 照射条件： 照射量：0.5~4 $\times 10^{17}$ ヶ/cm ² 照射角度： 0° および 80° その他： 照射中の真空チャンバ内真空度：5~7 $\times 10^{-3}$ Pa
---	---

(1) 垂直照射(照射角 0°)による加工試験

(a) 光学写真による観察

最初に NAK80 について GCIB 照射を行った後の光学写真に対する観察結果を述べる。図 4-1 は、NAK80 にイオン照射量(ドーズ量)で $0.5 \times 10^{17} \text{ケ/cm}^2$ と $1.0 \times 10^{17} \text{ケ/cm}^2$ を Ar クラスターイオンビームで照射した時の光学写真(50 倍)である。写真中心部はビームの照射、非照射の境界である。図から、照射されない部分には手仕上げ研磨に伴う直線状の傷が残っているが、GCIB 照射を行うことで研磨傷は減り平滑化される傾向が見られた。

ドーズ量の違いによる比較では、 $0.5 \times 10^{17} \text{ケ/cm}^2$ ではマクロな研磨傷は薄くなっているものの完全には取りきれていない。一方、 $1.0 \times 10^{17} \text{ケ/cm}^2$ では、研磨傷はほぼ完全に消失している。

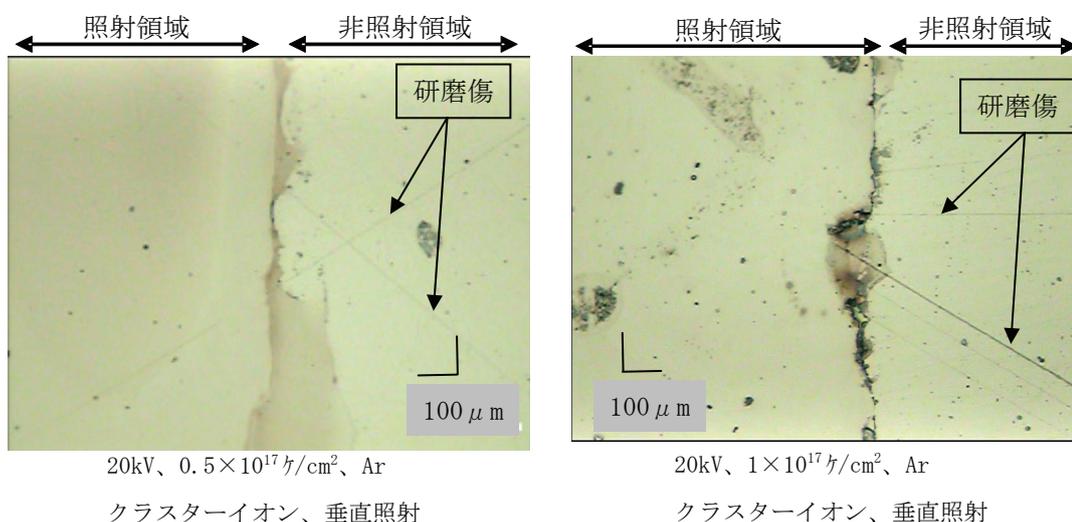


図 4-1 NAK80 への Ar-GCIB 照射前後の光学写真

図 4-2 は、NAK80 の垂直照射実験に対しドーズ量と表面の削り量の代表的な結果をグラフにまとめたものである。削り量は図 4-1 の照射部、非照射部の領域を段差計により測定して段差量を求めた。本図から製作、組み立てた金型加工用 GCIB 装置を使った Ar-GCIB 照射による NAK80 の加工レートは垂直ビーム照射で約 18nm/分 である。

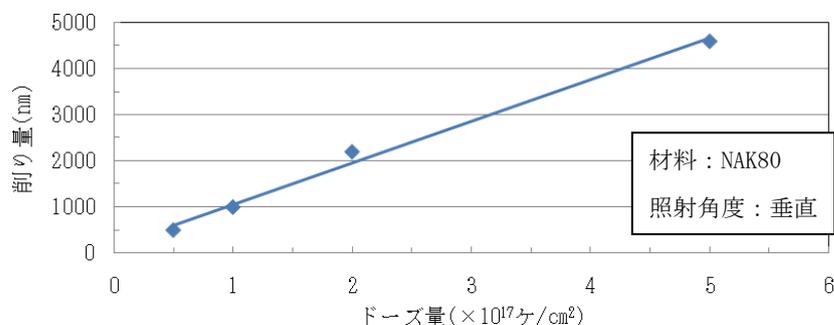


図 4-2 NAK80 に対する Ar-GCIB 照射による表面の削り量とドーズ量の関係

(b) AFM による観察

原子間力顕微鏡 (AFM) を使えば、一般に原子スケールでの表面状態を観察でき、観察領域に応じた面粗さを定量的に評価することができる。本報告では、表面粗さとして一般的に用いられている中心線平均粗さ (Ra) で評価した。本研究開発の目標は金型材料に対し GCIB 加工を施し、Ra で 10nm レベルを達成することである。

図 4-3 は、NAK80 に 0.5×10^{17} k/cm² の量だけ垂直照射した時の AFM 写真を示したものである。観察領域は 75、25、15、5 μ m 角と変えている。左側が未照射のもの、右が加工後のものである。図から、GCIB 加工により表面平坦化が図れていることが AFM 像から分かる。25、15、5 μ m 角の像では研磨傷が未照射試料では残っているが、照射後はいずれの AFM 像でも研磨傷が消え平坦な形になることが分かる。GCIB 照射で表面の細かい凹凸がなくなり、平坦化が改善されることが AFM 像から見てとれる。すなわち GCIB 加工は表面の原子レベルの相互作用であるため、測定領域が狭いデータほどその照射効果が明確に示される結果が得られた。

図 4-4 は、得られた Ra 値と AFM 観察領域サイズの関係をもとめた結果である。図から照射により Ra の改善が見られること、目標とする 10nm レベルの値が得られていることが分かる。また、照射前の試料の手仕上げ研磨を綿密に行い、その後、GCIB 照射をすることにより NAK80 の表面粗さは更に改善され(緑線)、5 μ m 角では Ra が 1nm 程度の値を示した。緑線のデータは、NAK80 平面試料に対し、本開発装置を使った現状での最大性能を調べる観点から求めたものである。手仕上げ研磨は長時間行い(半日程度)、これに GCIB 照射を施している。

図 4-5 には、GCIB 照射後で Ra=1nm 程度を示した NAK80 の AFM 平面像を示す。照射前は 5 μ m 角領域の微小領域に対しても手仕上げによる薄い研磨傷が見られるが、照射により極めて平坦な表面になっていることが分かる。このことから本開発装置を使った GCIB 照射で良好な表面平坦化効果があることが確かめられた。

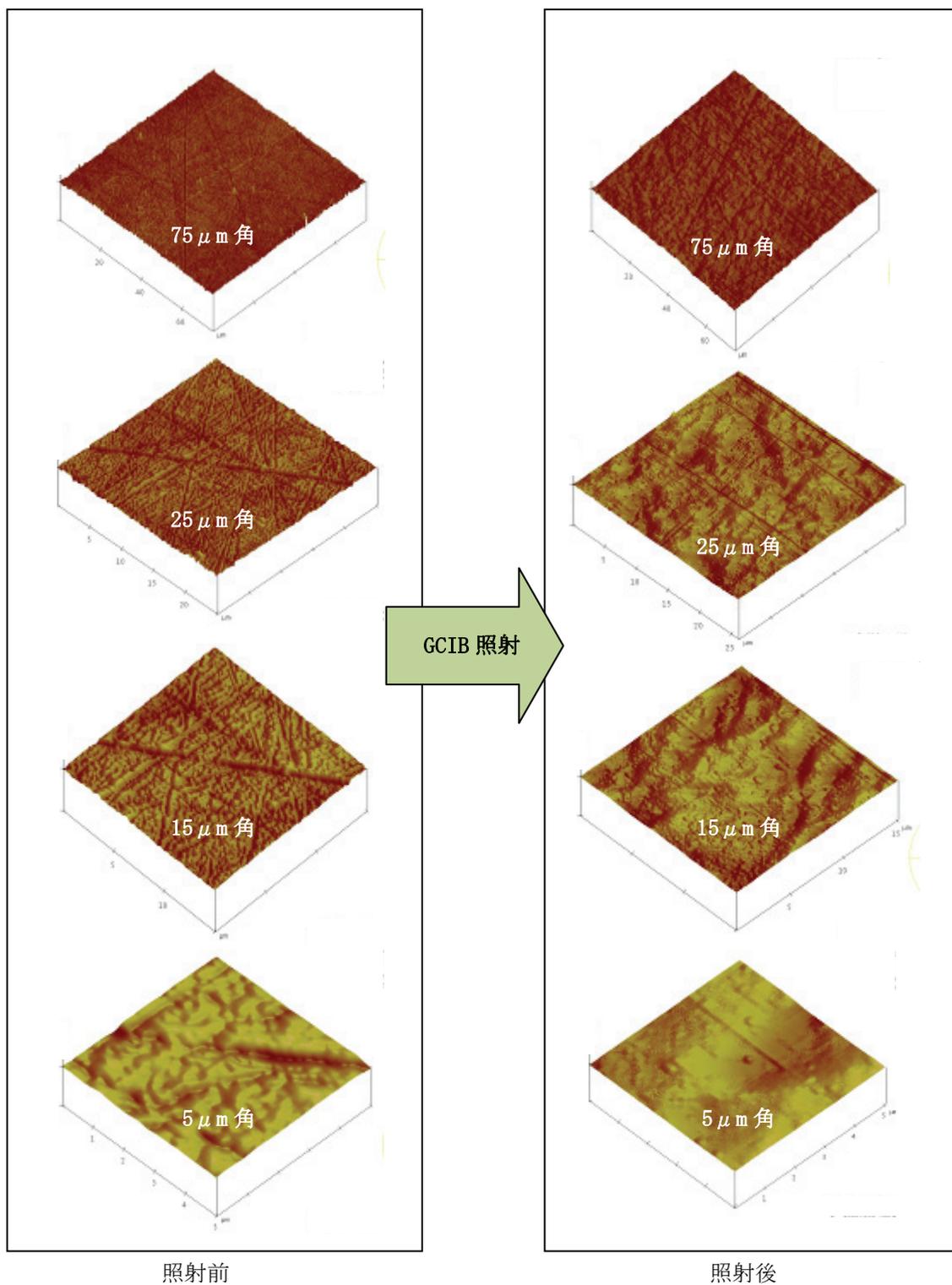


図 4-3 GCIB 照射前後の AFM3 次元像の変化
 照射量： 0.5×10^{17} ヶ/cm²、加工材：NAK80、垂直照射

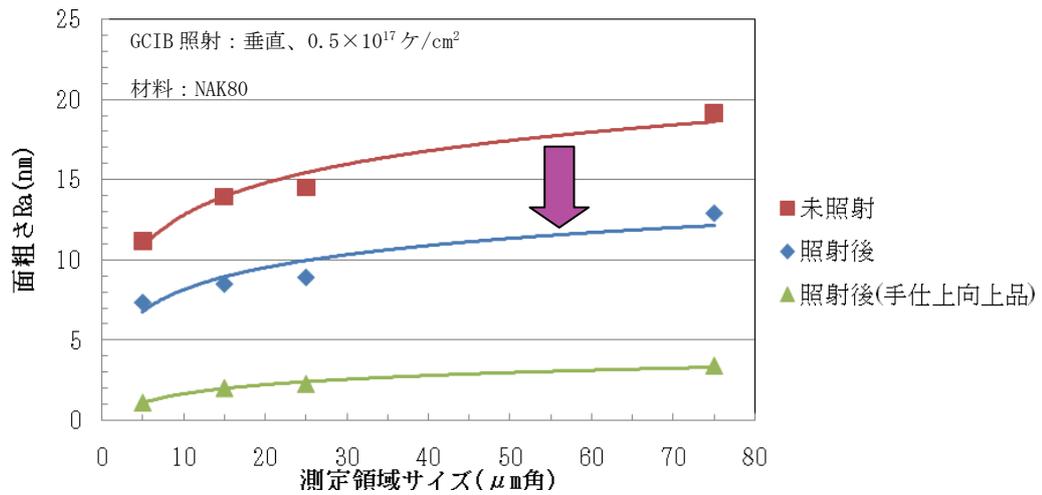


図 4-4 NAK80 照射試料の AFM 測定領域サイズと表面粗さの変化

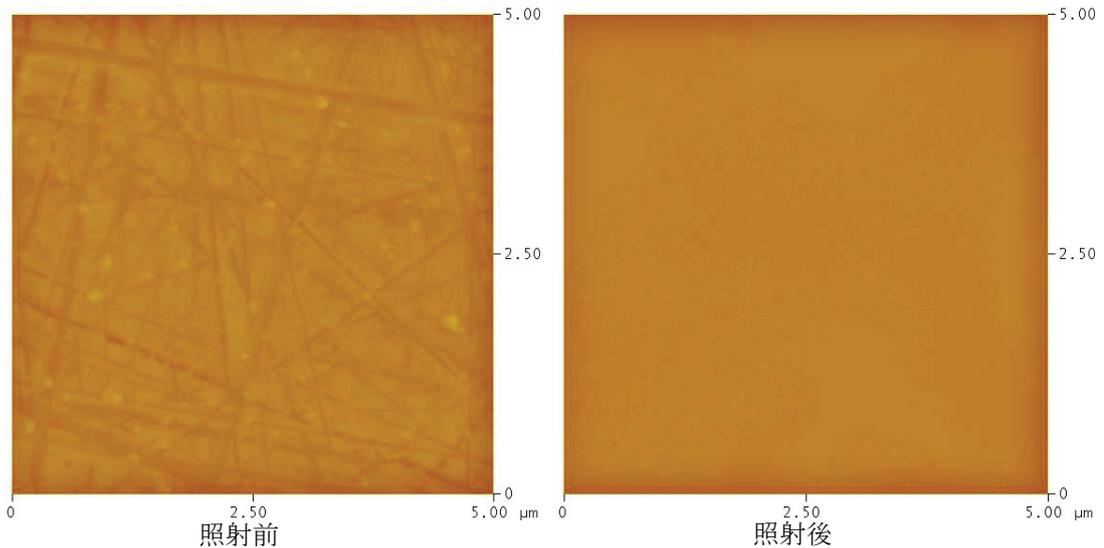


図 4-5 手仕上げ研磨向上品を使った GCIB 照射による表面平坦化効果
 照射量： 0.5×10^{17} ケ/cm²、加速電圧：20kV、垂直照射
 試料：NAK80、測定範囲：5 μm 角

次に、ドーズ量を 1×10^{17} ケ/cm² に上げた場合の結果を図 4-6 に示す。図では手仕上げ研磨向上品の NAK80 についての GCIB 照射効果を比較している。図から、表面粗さ Ra は今回の装置では 0.5×10^{17} ケ/cm² の方が良いことが分かる。Ra はクラスターサイズ分布やドーズ量により変わると予想されるので、更なる照射条件の最適化で、より小さな Ra 値が得られる可能性もある。図 4-7 は、上記グラフの 5 μm 角でそれぞれの AFM3 次元像を示す。研磨傷の低減が見られ GCIB 照射効果の有用性(表面平坦化効果)が分かる。

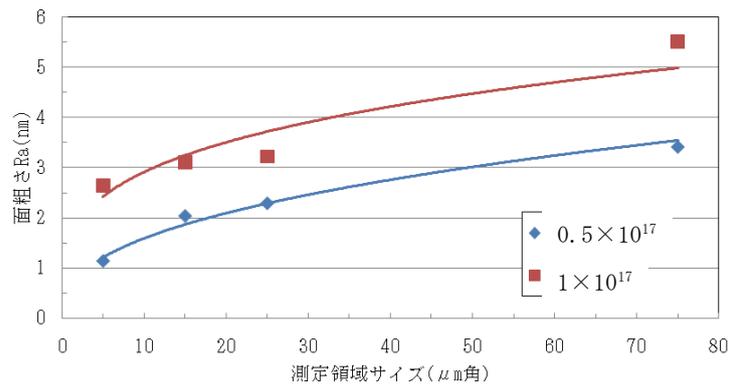


図 4-6 ドーズ量をパラメータにした
観測領域サイズと表面粗さ Ra の関係

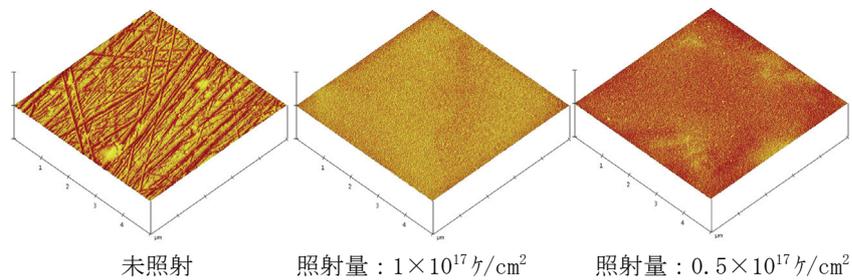


図 4-7 GCIB ドーズ量を変えた時の AFM3 次元像の変化
材料：NAK80、垂直照射

次に NAK55 についての AFM 測定結果を述べる。測定領域 75 μm 角と 25 μm 角について、照射量と表面粗さ Ra の関係を調べた結果を図 4-8 に示す。図から、NAK55 についても照射量により表面粗さ Ra が変わり、本開発装置では 1 × 10¹⁷ ㏑/cm² で最小の値が得られている。また平面試料では目標とする Ra が 10nm レベルの値も達成されていることが分かる。

NAK80 及び NAK55 の GCIB 照射効果の試験結果から、材料が目的とする表面粗さを得るには、クラスターサイズ等により最適なドーズ量を選ぶ必要があることが明らかにされた。

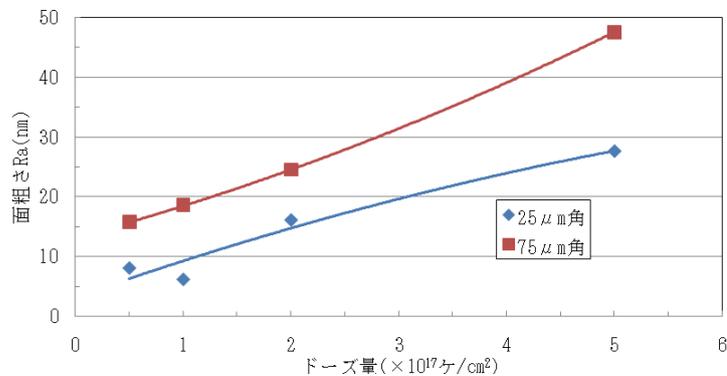


図 4-8 NAK55 での Ra とドーズ量の関係

(2)斜め照射(照射角 80°)による加工試験

GCIB 加工でのビーム照射角の変化に伴う NAK80 の加工効果を調べた。80° の角度は、GCIB 照射により基板表面の突起や凹凸があたかもカンナを掛けたように削られると期待されるからである[1]。図 4-9 は、80° 照射を行った NAK80 の平面試料の光学写真および AFM による 3 次元像を示したものである。実効ドーズ量(面に垂直方向のドーズ量)は $0.5 \times 10^{17} \text{ヶ/cm}^2$ である。図から 80° 傾けた GCIB 照射でも手仕上げ研磨傷は消失していることが分かる。このことは狭い溝の内部等への GCIB 斜め照射により表面平坦化が可能であることを示している。

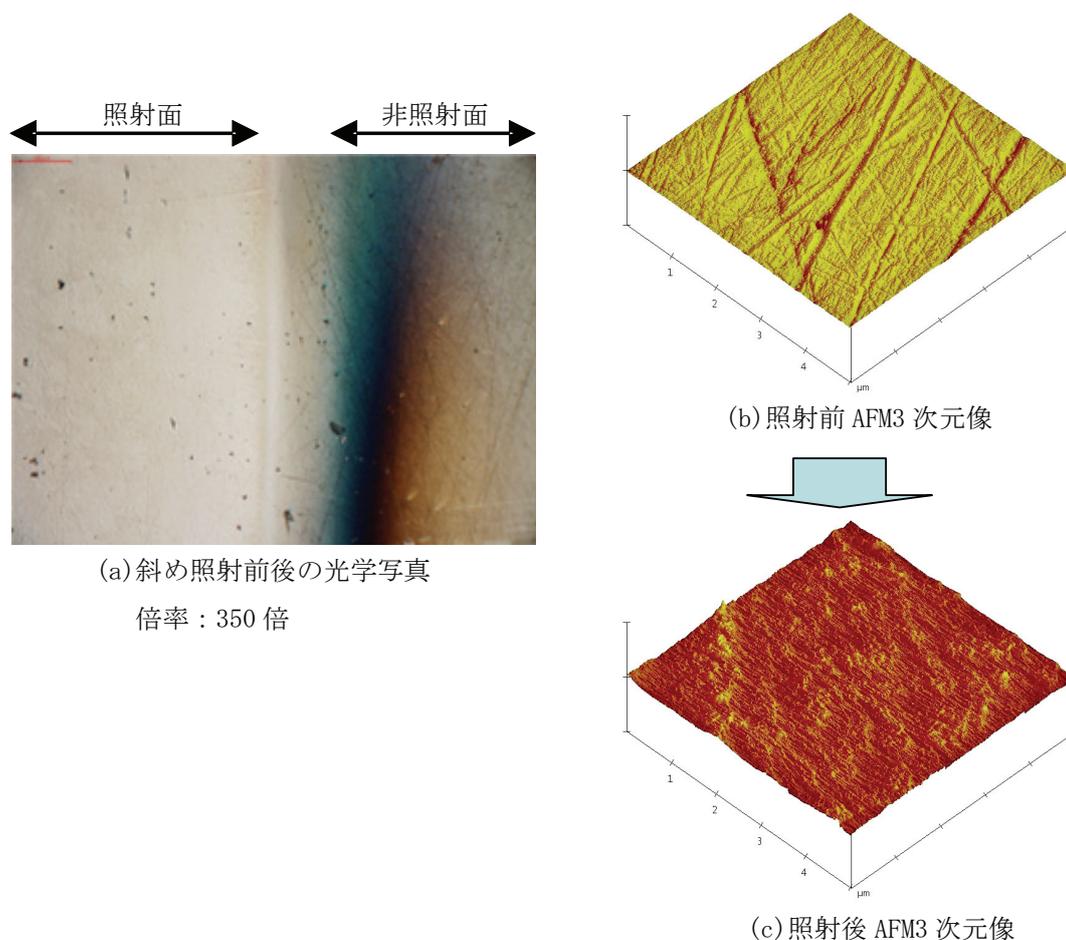


図 4-9 斜め照射による NAK80 の表面形状(実効ドーズ量： $0.5 \times 10^{17} \text{ヶ/cm}^2$)

図 4-10 は、手仕上げ向上品の NAK80 について、80° 照射したときの表面粗さ Ra の AFM 測定領域サイズ依存性を調べた結果である。Ra は AFM 測定領域サイズに無関係に一定で、領域サイズに対する変化は見られない。照射前に比べて Ra が劣化している場合も見られた。Ra が領域サイズに無関係に一定になっていることは、同じ表面状態がサイズに関係なく一様になっていることを表わしている。

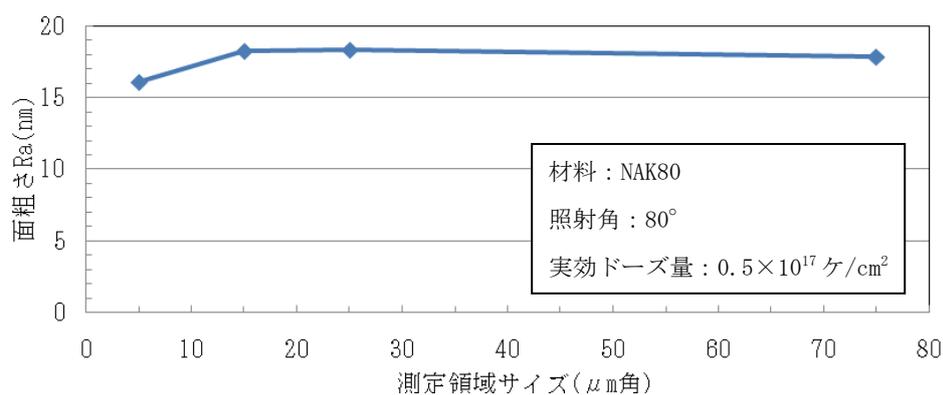


図 4-10 NAK80 斜め照射試料の AFM 測定領域サイズと表面粗さの変化

図 4-11 は、 $5\mu\text{m}$ 角の AFM 平面像を示したものである。本図および前の図 4-9 の 3 次元像からもわかるようにビーム照射方向に向いて波頭状の小さい凹凸が見られる。このような凹凸は、斜め照射の GCIB で観察される場合があることが知られている。このような波頭状の形態を作らずに原子レベルで平坦な面を形成するには、クラスターを形成する原子一個当たりの衝突後の平均エネルギーとスパッタリング閾値エネルギーの関係も考慮した照射条件の最適化が必要と考えられ、その基礎実験は今後の課題である [2]。

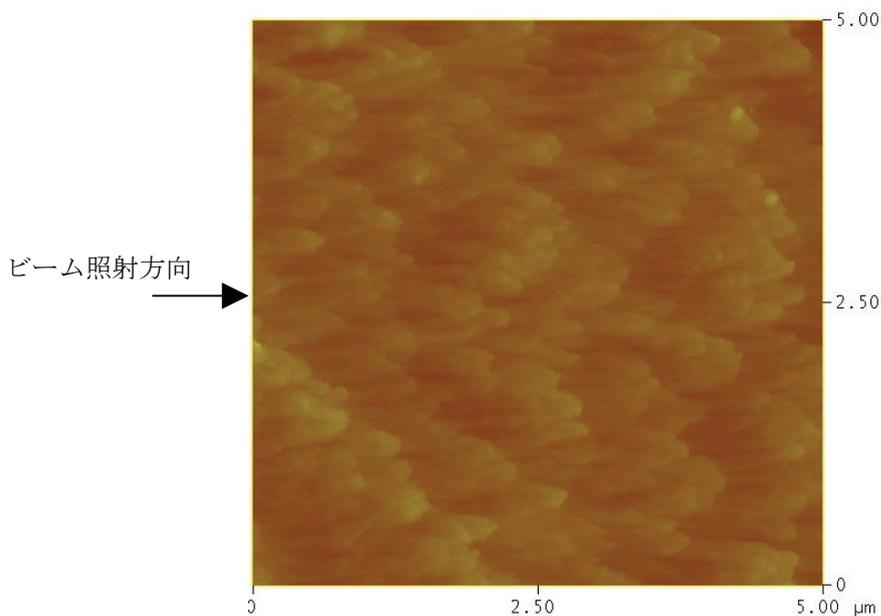


図 4-11 80° 照射後の NAK80 の AFM 平面像

次に、実効ドーズ量を $1 \times 10^{17} \text{ k/cm}^2$ に上げた場合の光学写真(350倍)と AFM3次元像(25 μm 角)を図4-12に示す。光学写真からは、いわゆる金属顕微鏡で見られる金属組織(粒界により分けられたもの)が観察されている。この試料に対する金属顕微鏡の明視野像も同図(C)に示した。金属顕微鏡像でも金属組織を示す形状が明瞭に現われている。但し、各小領域の組成の違いや凹凸、結晶構造の違いは見ることはできないが、未照射のものでは金属組織は観察されていないので NAK80 への本装置による Ar-GCIB 斜め照射では、特異な表面平滑化現象が起きていると言える。

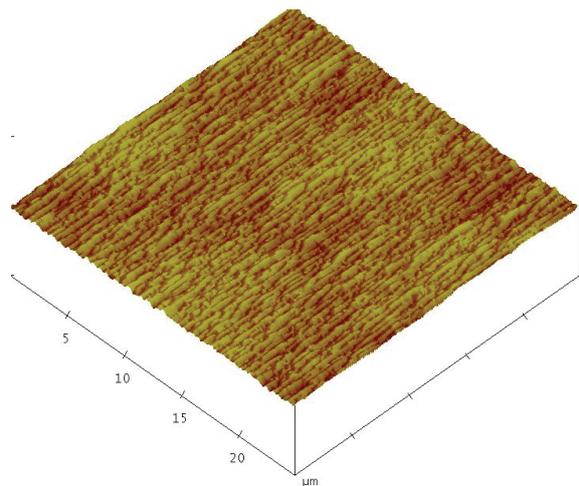
次に(B)図からは、ドーズ量が $1 \times 10^{17} \text{ k/cm}^2$ と多くなったため $0.5 \times 10^{17} \text{ k/cm}^2$ で見られた波頭状のもののが更に進んで、それらが一列に並んだ形状に成長しているように観察される。照射量の増大によるこのような成長をなくすには、NAK80の斜め照射ではクラスターサイズや照射エネルギーを最適化することが原子レベルでの表面平坦化に特に重要であると考えられる。



(A) 光学写真(350倍)



(C) 金属顕微鏡明視野像(500倍)



(B) AFM3次元像(25 μm 角)

図4-12 斜め照射で $1 \times 10^{17} \text{ k/cm}^2$ の照射をした NAK80 表面形状

4.2 SKD 鋼への照射試験結果

(1) 垂直照射(照射角 0°) による加工試験

SKD 鋼の平面試料に 1×10^{17} t/cm^2 の垂直照射をした前後の光学写真及び AFM 平面像とその対角線に沿った凹凸測定曲線(ラインスキャン曲線)の結果を図 4-13 に示す。(A) 図から、手仕上げ研磨による研磨傷が消失していることが分かる。一方、垂直照射前の光学写真に比べて照射部には島状の隆起物が見られ、その並びに方向性があることが分かる。AFM 平面像からも島状隆起物が図中には白い色で現われている。AFM 平面像の対角線にそって凹凸の大きさを見るラインスキャン曲線を求め、それを未照射部と比較した。(B) 図、(C) 図のラインスキャン曲線から分かるように、未照射部に現われている表面の短周期の凹凸(細かい凹凸)は GCIB 照射でほとんどなくなっていることが分かる。GCIB 照射効果による平面平坦化効果が表れている。一方、(B) 図で大きな隆起物の位置に対応して凸のピークが現われており、ラインスキャン曲線から島状のものは突起物であると言える。島状部分の組成分析は行っていないが、SKD 鋼の金属内の析出物でスパッタリング率の低い元素を多く含む組織が GCIB 照射で削り残ったものと考えられる。平坦化効果は確認できており、今後は元素の種類によるスパッタリング率の違いが大きく現われないようにするための照射条件の探索が必要である。

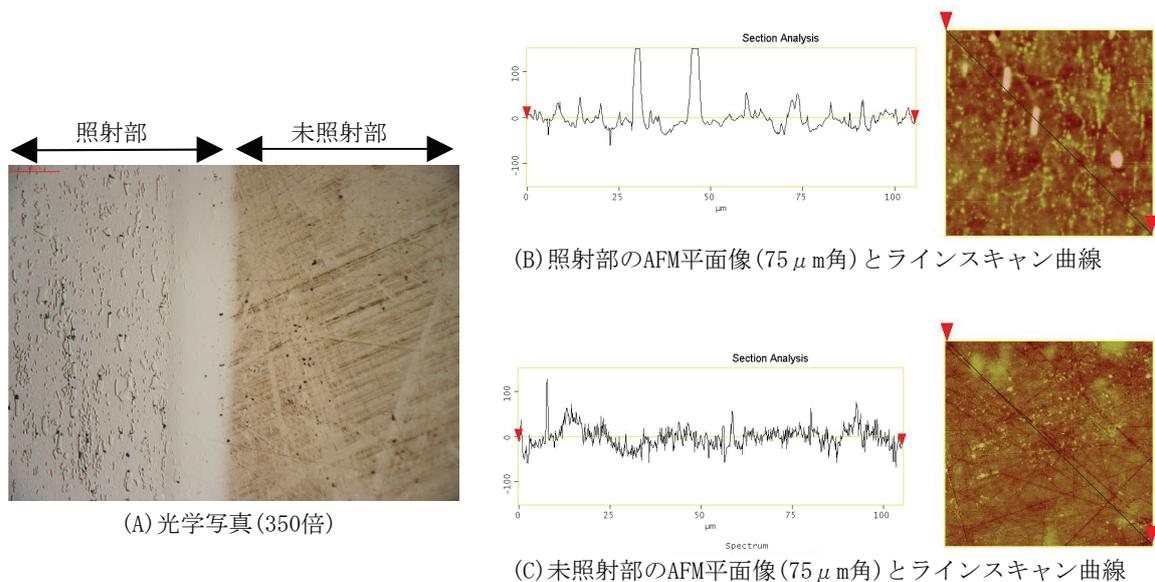


図4-13 SKD鋼のGCIB照射前後の光学写真、ラインスキャン曲線及びAFM像
(照射量： 1×10^{17} t/cm^2 、垂直照射)

次に、AFM 測定領域サイズと表面粗さ Ra の関係を調べた結果を図 4-14 に示す。図から、未照射部は $5\mu\text{m}$ 角の領域でも Ra は 10nm である。一方、垂直照射した部分は $5\mu\text{m}$ 角では Ra で 5nm の平坦表面になっており目標値を達成している。しかし $15\sim 75\mu\text{m}$ 角の範囲では未照射部より大きな Ra を示している。これは、島状突起部分の粗さが全体平均を表わす Ra の値を押し上げていることを示している。突起部を除けば、照射後の Ra は $15\sim 75\mu\text{m}$ 角領域でも未照射部より小さな値になっていると予測される。

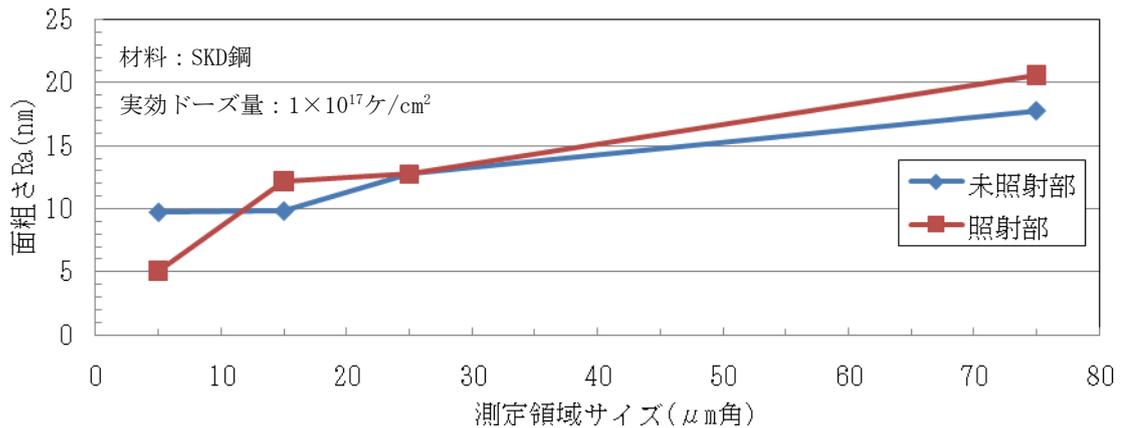


図4-14 SKD鋼照射試料のAFM測定領域サイズと表面粗さの変化

図 4-15 は、 $1\times 10^{17}\text{ケ/cm}^2$ の垂直照射を行った SKD 鋼について、非照射/照射の境界に対する段差測定を行った結果である。図から平均段差は約 700nm である。照射時間で除して求められる削れ速度は、開発した本装置では約 13.4nm/分 であり、NAK80 のそれと同じ桁である。

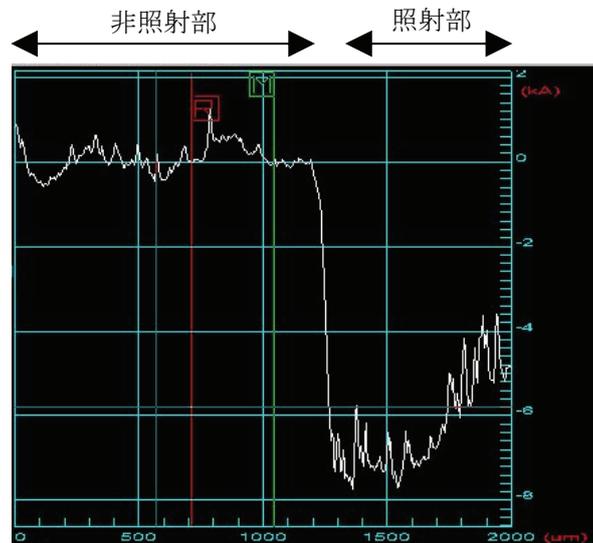


図4-15 斜め照射したSKD鋼の段差計測定データ
ドーズ量： $1\times 10^{17}\text{ケ/cm}^2$

(2)斜め照射(照射角 80°)による加工試験

80° の角度で SKD 鋼に GCIB 照射した時の表面光学写真を図 4-16 に示す。図から手仕上げ研磨傷はビーム照射により消失し、平坦化が図れていることが分かる。またドーズ量を上げた 1×10^{17} ヶ/cm² の試料では、表面に薄い隆起物の点在がより顕著になっていることが分かる。黒い異物は試料に起因するものか測定時の外部からの汚れかは不明であるが、未照射部でも似た異物が見られることから外部導入されたものと考えられる。隆起物の点在は、垂直照射でも見られたようにスパッタリング率の違う元素を含む組織が現われたことを示している。しかし、その隆起の度合いは垂直照射に比べれば小さくなっている。イオンによるスパッタリング率は角度照射により変わることは知られており、その差が現われた結果とも考えられる。平坦化には角度依存性の詳細試験が今後重要である。

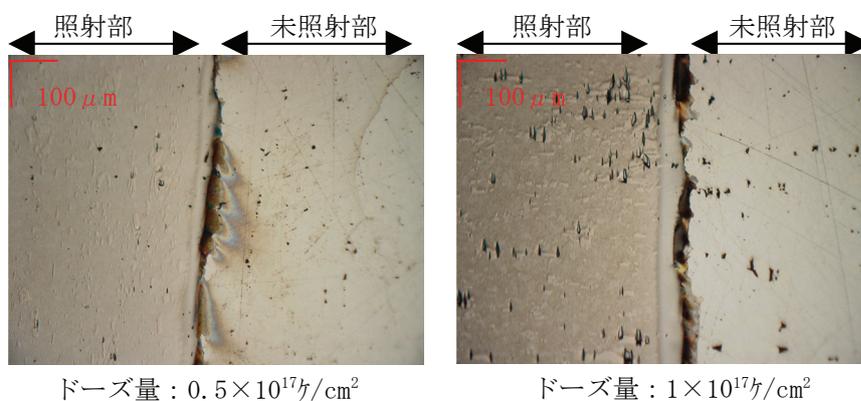


図4-16 斜め照射したSKD鋼の光学写真

表 4-2 は、80° 斜め照射による Ra の変化をまとめたものである。表から、SKD 鋼の斜め照射により Ra は低下する傾向にあることが分かる。また、 0.5×10^{17} ヶ/cm² の照射で 25 μm 角の測定領域では目標の 10nm レベルの Ra を得ている。このことから、SKD 鋼に対しては斜め照射により表面平坦化効果があると言える。表では、同一の測定領域サイズに対しては、ドーズ量が低いと Ra 値が下がる方向になっており、SKD 鋼への 80° 照射では 0.5×10^{17} ヶ/cm² より低いドーズ量で Ra 値がさらに小さくなることが予想される。低いドーズ量であれば処理時間も短縮され加工処理枚数のスループットも増加するので、低ドーズ量での平坦度評価の試験は今後、実施が必要な課題である。

表4-2 斜め照射したSKD鋼平面試料のドーズ量とRaの関係

	面粗さ Ra (nm)		
	未照射	照射	
ドーズ量(ヶ/cm ²)	75 μm 角	75 μm 角	25 μm 角
0.5×10^{17}	16.995	12.722	8.969
1×10^{17}	20.927	20.74	14.545

第5章 難加工形状金型材料へのGCIB照射試験

表面の手仕上げ作業が困難な加工形状として図5-1に示すサンプルを用いた。材質はNAK80である。溝は幅 $100\sim 150\mu\text{m}$ 、高さ 10mm 、奥行き 6mm で別のNAK80板と合わせて取り付けた。ビームが溝部の手仕上げ面に対して角度 80° で照射されるようにした。照射後、合わせ板を取り外して手仕上げ面の表面変化を計測、評価した。得られたSEM観察及びAFM像の結果を以下に述べる。

(1)SEM観察結果

図5-2に、GCIB照射面および未照射面のSEM像を示す。図から $100\mu\text{m}$ 幅程度の狭い溝部でも手仕上げ研磨傷は消失しており、照射面の形状は、平板のNAK80に 80° 照射した時と同じ表面形態(モルフォロジー)になっており、波頭状の凹凸があることが分かる。手作業では困難な $100\mu\text{m}$ レベルの溝の仕上げ加工にGCIB照射が極めて有効であることが明らかになった。

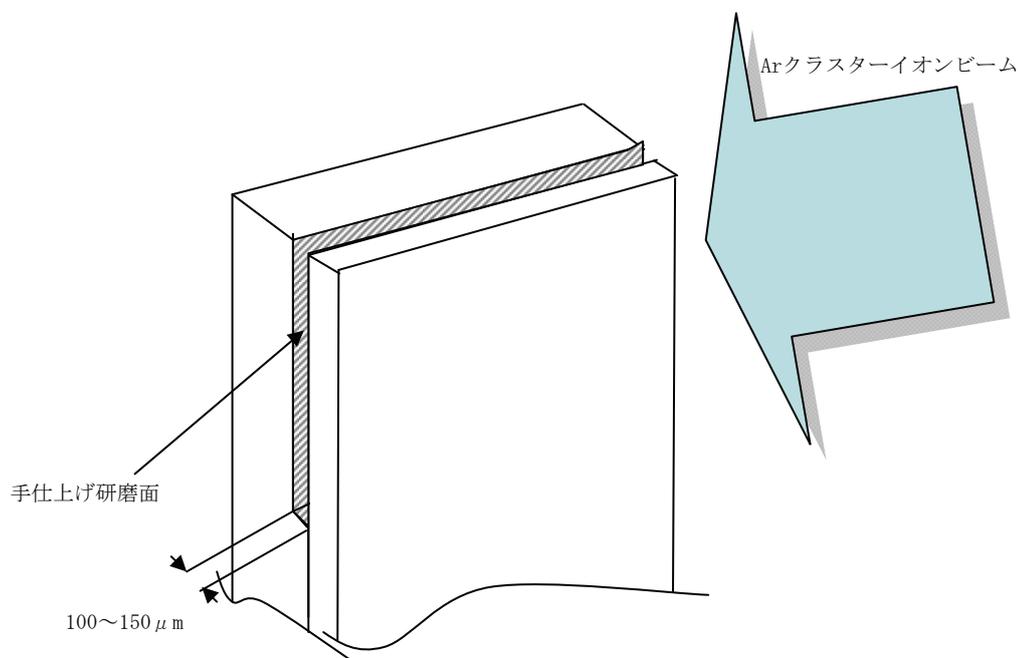
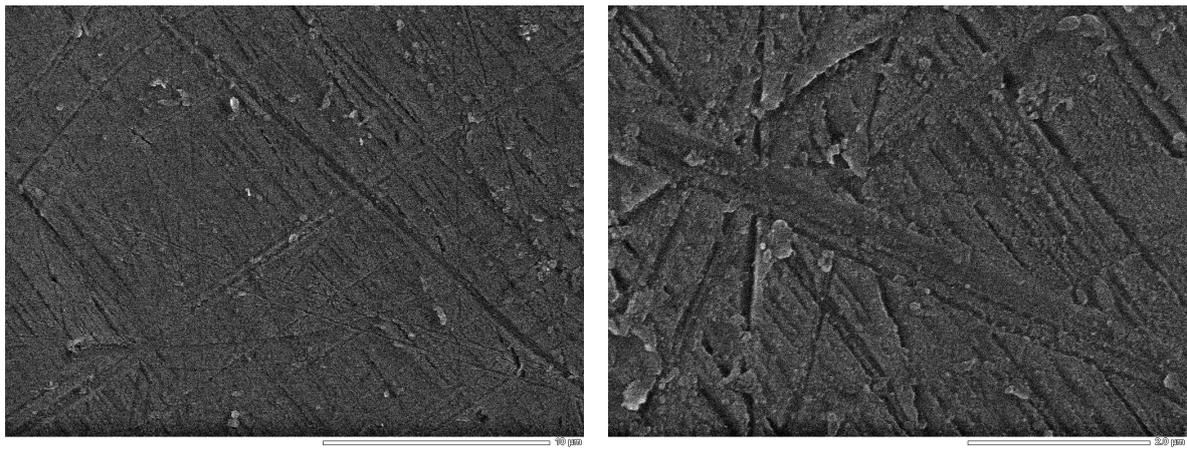


図5-1 難加工形状評価用サンプルの形状



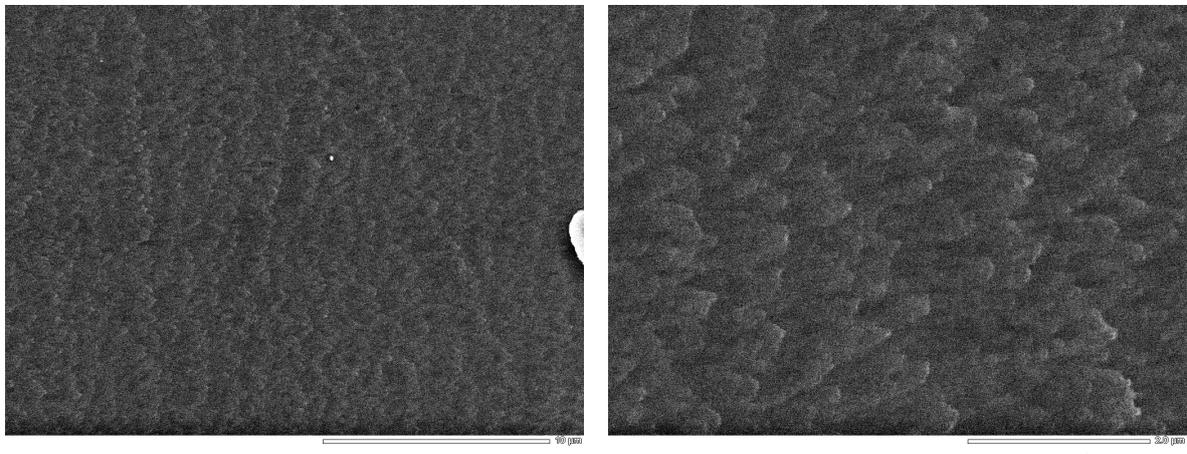
5000倍

10 μ m

20000倍

2 μ m

(A) 溝のビーム未照射部分のSEM像



5000倍

10 μ m

20000倍

2 μ m

(B) 溝のビーム照射部分のSEM像

図5-2 溝部のGCIB加工前後のSEM像

ドーズ量 : $0.5 \times 10^{17} \text{ e/cm}^2$ 、NAK80

(2) AFM 観察

SEM 像から、NAK80 平面試料に 80° で GCIB 加工したと同じモルフォロジーが溝部について示された。ビーム照射された溝面について AFM 測定を行った。図 5-3 は AFM 平面像での測定領域サイズと表面粗さ Ra の関係を求めた結果である。平面サンプルでの結果と同様に、領域サイズの大きさに関係なく 13~15nm の Ra 値を示しており、目標の 10nm レベルになっている。また、溝形状への照射に対して平面サンプルの結果が再現されていると言える。NAK80 を使った溝構造でさらなる小さい値の Ra を得るにはクラスターサイズや照射エネルギーの最適化を行う必要がある。今回の試験では実験期間の制約から溝形状の材料として NAK80 のみで行ったが、前述した SKD 鋼平面試料の 80° 照射の試験で Ra が 10nm レベルが得られており、溝形状材質に SKD 鋼を使っても良好な平滑化が十分行えると考えられる。以上の結果から溝形状に対して目標とする 10nm レベルの平坦化加工が達成されたと言える。

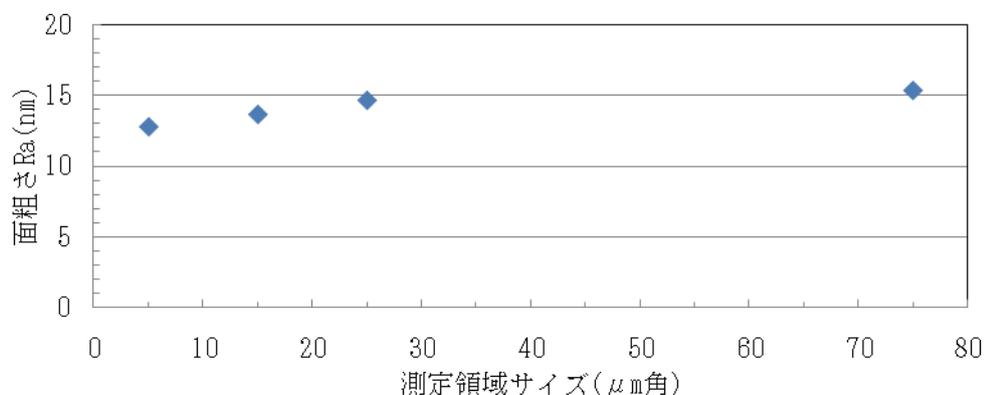


図5-3 溝照射試料のAFM測定領域サイズと表面粗さの変化

第6章 全体総括

(1) 開発成果と課題

従来半導体プロセス向けに開発されてきたガスクラスターイオンビーム技術を金型の表面平滑化処理に適用し、その効果を検証した。金型表面としては最も平滑度が要求される光学素子モールドを念頭において表面粗度 10nm レベルという目標値をかかげてその達成にチャレンジした。その結果樹脂モールド用金型材やプレス用金型として一般的な NAK 鋼や SKD 鋼の加工面に対し GCIB 照射を行い同目標値を達成する事が出来た。また幅 $100\mu\text{m}$ レベルの深溝の内側の加工処理においても GCIB 照射が平滑化に有効である事を示し、立体的構造物の表面処理においても本技術が有効である事を示した。これらの成果は本技術が現在使用されている金型のさらなる高度化、高付加価値化に繋がる技術である事を示している。

一方 WC 等、より硬度の高い複合材に対する展開が本期間内で着手出来なかった事は今後の課題である。適応材料が広がる事は対応する市場の広がり意味着るので、事業化の観点から重要である。

(2) 実用化の展開

近年、パソコンや携帯電話をはじめ、デジカメ、その他ハンディな電子機器の小型化、複合化の流れは極めて旺盛で、さらに電気信号と光信号の融合が進んでいる。特にデジタルカメラなどは、光学機器と電子機器が融合したもので、それらを形成する金型の精度や仕上げ面の平滑度の要求は高度なものになって来ている。これらの要求に答えて、川下製造事業者の競争力強化に貢献して行こうとするのが、本開発の目的である。

従って本技術が開発され、プロセスの効率の向上をはかり、コストメリットに見込みが付き次第実需要に対応する。

まずは本開発を超微細金型加工に適用させ、平成 23 年にはサンプル提供から始めて、年間 5 億円程度の売上高にしたい。

また社内には戦略的基盤技術高度化支援事業の「金属材料による微小電子機器(MEMS)の一体成形技術に関する研究」により開発した、金属材料による安価に供給出来るマイクロポンプ等の製品が有り、その構成部品の表面をより平滑化する事でシール性を高めると言う内部需要が有る。マイクロポンプの構成部品は極めて小さく、従来の機械的研磨による平滑化処理が難しく、新たな平滑化技術を開発する事が期待されていた。従って上記外部からの依頼加工以外にも社内製品の競争力強化を図って行く計画である。

また今後は光 MEMS やナノインプリント等の分野の表面加工にも進出したいと考えている。

参考文献

- [1]山田 公
「クラスターイオンビームの基礎と応用」
日刊工業新聞社 2006 年 10 月
- [2]頼實 一全、山村 泰道
「計算機シミュレーションによる FCC 金属のはじき出しエネルギーの評価」
岡山理科大学紀要第 29 号 A 自然科学(1993)PP. 89-96.