

NACHI  
**TECHNICAL  
REPORT**  
Machining

Vol. **22**B2  
March/2011

マシニング事業

■ 新商品・適用事例紹介

「ガスクラスタージェットイオンビーム  
(GCIB)による表面超平坦化加工」

Super-smooth Surface Finishing with  
Gas Cluster Ion Beam (GCIB)

〈キーワード〉 ガスクラスタージェットイオンビーム・超平坦化加工  
原子レベルの表面粗さ・GCIB加工装置  
超硬合金・ニッケルメッキ・ダイヤモンド

開発本部／開発企画部

佐藤 嗣紀

Hideki SATO

## 要 旨

電子デバイスや光学、医療などの分野では、原子レベルの表面粗さが要求されている。このような原子レベルの超平坦面を実現する数少ない手段の一つが、ガスクラスターイオンビーム (GCIB) である。GCIB技術は、高圧ガスをノズルから噴出させ、断熱膨張により凝集したガス原子、分子の固まり(クラスター)をイオンビームとして用いる技術であり、通常のイオンビームには無い優れた点がある。NACHIは機械部品の超平坦化加工を行なうために、加工に特化したGCIB加工装置を開発した。NACHI-GCIB加工装置は高い排気能力を有し、独創的なイオン化電極と5軸のステージを搭載することにより、複雑形状物の高能率加工を目的としている。これまでに超合金、Niメッキ、ダイヤモンドなどの超平坦化加工を実証し、具体的な製品への適用に向けて開発をすすめている。

## Abstract

The atom-level of surface roughness is required for the parts of electronic devices, optical devices and medical devices/equipment. Gas Cluster Ion Beam (GCIB) is one of a few methods to achieve such super-smooth surface at the atomic level. In the GCIB technology, a high-pressure gas is jetted from a nozzle and a cluster of gas atoms and molecules that are aggregated with adiabatic expansion are used as ion beams. These ion beams have excellent characteristics that are not seen in a normal ion beam.

NACHI has developed the GCIB system that is exclusive to the super-smooth surface finishing of mechanical parts. This GCIB system has high exhaustion capability and is designed to achieve highly-efficient surface finishing of the parts with complicated shapes with the uniquely ionized electrodes and 5-axis stage. NACHI has proved the capability of the system by testing it with carbide, nickel-plated material and diamond for super-smooth surface finishing and is working on the specific application of the system.

## 1. 原子レベルの表面粗さの要求

電子デバイスや光学、医療などの分野でマイクロ加工のニーズが増加している。加工単位(切り屑の大きさ)が $1\mu\text{m}$ 以下となると、固体の工具を使用することは困難になることから、レーザー、イオンビーム、電子ビームなどエネルギービームを用いる加工法の適用が拡大している。

とくに精密レンズ金型の分野では、光学特性上の要求から表面粗さを $1\text{nm}$ 以下のサブナノメートルレベルにすることが求められている。固体材料を構成する原子と原子の間隔、つまり原子の大きさは数 $\text{\AA}$  ( $1\text{\AA}=0.1\text{nm}$ ) であるので、 $1\text{nm}$ 以下の表面粗さを実現するためには、その表面に原子数層分の高低差しか許されない。すなわち、サブナノメートルとは原子レベルの表面粗さであることを意味している。

NACHIは今後このようなサブナノメートルの加工が必要になると予見し、これを実現するための手段としてガスクラスターイオンビーム加工の開発を行ってきた。2007年より筆者が専門的にこの開発に携わり、NACHI独自の加工専用装置の製作と、これを用いての加工実証を行ってきた。



## 2. ガスクラスターイオンビームの発見とその特徴<sup>1)2)</sup>

ガスクラスターイオンビーム (Gas Cluster Ion Beam; GCIB) とは、希ガス原子や気体分子などガス状の原子や分子を数百から数千個の塊 (ガスクラスター) とし、これをイオン化・加速して用いる技術である。ガス状の原子や分子を細いノズルから真空中に噴出させると、ガスは断熱膨張によって急激に冷却されて凝集し、ガスクラスターとなる。この方法によるクラスタービームの発見は1950年のBeckerらによる超低温のノズルを用いた分子線の研究に始まったといわれている。1980年代後半に、京都大学の山田が室温のノズルから強力なガスクラスタービームを発生させることに成功し、引き続き豊田、松尾、瀬木、青木らとともに装置を開発し、クラスターイオンと固体表面との相互作用を解明したことで産業的な応用が広がった。

イオンビームはその加速電圧により運動エネルギーを容易に制御することができるため、イオン注入、微細加工、薄膜形成など様々な用途に利用することができる。とくに微細加工においては非接触、ドライ、常温という優れた特徴がある。クラスターイオンビームにはこうした特長のほかに、通常のモノマー (単原子あるいは分子) イオンビームにはない超低エネルギー照射効果、ラテラルスパッタ効果、超高密度照射効果という3つの特徴がある (図1)。

クラスターイオンビームの超低エネルギー照射効果は計算機シミュレーションによって明らかにされている。図2にモノマーイオンとクラスターイオンの衝突の模式図を示す。イオンを固体材料に衝突させると、モノマーイオンは多数の欠陥を生成しながら固体内部に注入されていく。これに対してクラスターイオンの1原子あたりのエネルギーは、クラスターを構成す

る原子の数に反比例するので、等価的に低エネルギーのイオンビームである。従ってイオン照射の影響深さ、すなわち固体表面のダメージはモノマーイオンと比較して小さく、またクラスター構成原子数が多いほど小さくなる。

イオンによる固体原子のスパッタリング (叩き出し) 現象においても、モノマーイオンとクラスターイオンの場合では大きく異なる。モノマーイオンではスパッタされた固体原子が全方位に等方的に離脱するのに対し、クラスターイオンの衝突では基板表面に対して水平方向に離脱する原子の割合が多い。この現象はラテラルスパッタリングと呼ばれ、クラスターイオン衝突に特有のスパッタリング現象であり、クラスターイオンによる表面平坦化と密接に関係している。

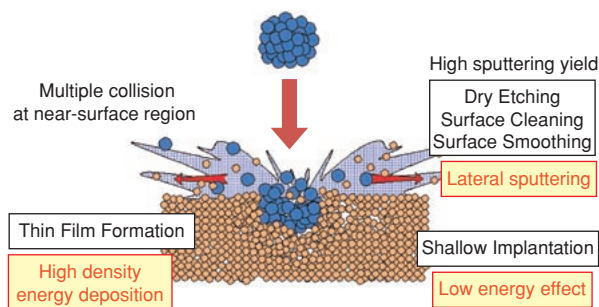


図1 クラスターイオンビーム照射効果の特徴<sup>1)</sup>

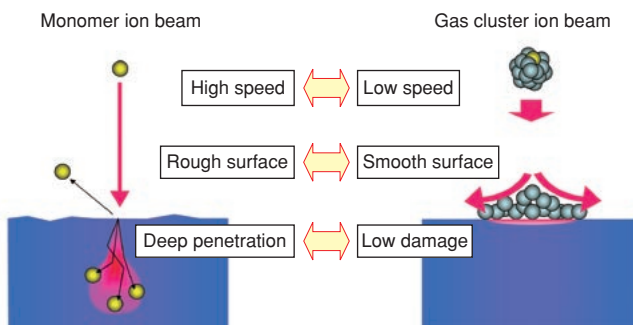


図2 モノマー、クラスターイオン衝突の模式図

### 3. GCIB装置と動作原理

図3にGCIB装置の概略を示す。GCIB装置はソースチャンバー (Source chamber)、イオンチャンバー (Ionization chamber)、プロセスチャンバー (Process chamber) の3つチャンバーからなり、それぞれ個別に真空ポンプ (Vacuum pump) で排気されている。

ソースチャンバーにはガラス製のノズル (Nozzle) が設置されている。高圧ガスをノズルから真空中に噴出すると、急激な断熱膨張によりガスが冷却されてガスクラスタを生じる。ソースチャンバーとイオンチャンバー間の壁面には穴径約1mmのスキマー (Skimmer) が設けられており、中心部のクラスタと周辺部のモノマーに分離され、クラスタのみがイオンチャンバーに入る。

イオンチャンバーではフィラメントから出た熱電子を数百Vの電圧で加速し、ガスクラスタに衝突させてイオン化する。イオン化されたガスクラスタイオンは数十kVの電圧で加速され、イオンビームとなってプロセスチャンバーに入射する。

プロセスチャンバーには加工対象のワークにガスクラスタイオンを照射するための機構が備えられている。ワークに入射したガスクラスタイオンの量は、ワークに流れる電流を計測することで求めることができる。

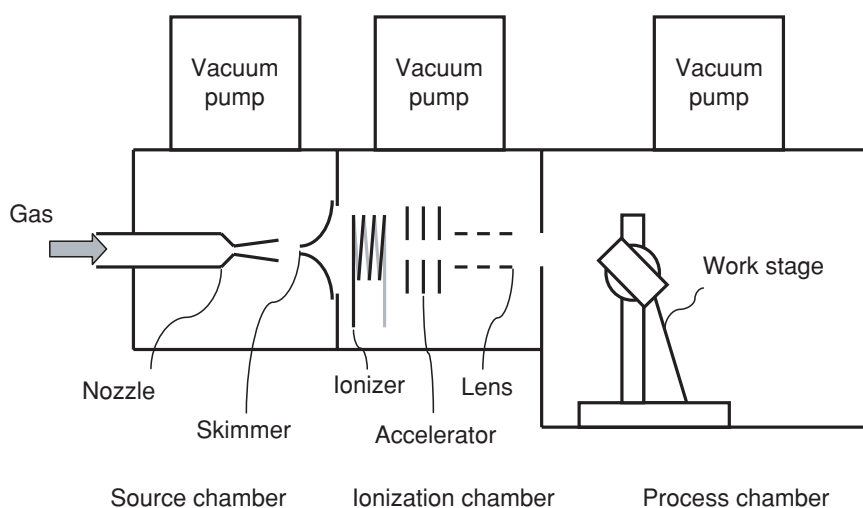


図3 GCIB装置概略図

## 4. NACHI-GCIB加工装置の特長

NACHIは機械部品の超平坦化加工を行なうため、加工に特化した独自のGCIB加工装置を2008年に製作した(図4)。NACHI-GCIB加工装置には以下の特長がある。

- ・ 2,400L/min.のターボ分子ポンプを6基搭載し、真空排気能力を大きくしたことで、ガス導入量を増やして大量のガスクラスターを発生させることが可能である。このことでビーム電流が増加するので、加工速度が大きい。
- ・ 独創的なイオン化電極を使用しており、低いエネルギーで効率よくイオン化することができる。このことはクラスターを破壊せずに高いイオン化率を達成できることを示し、加工の安定性が向上する。
- ・ プロセスチャンバーには5軸の精密ステージが設置されており、複雑形状物の任意面にGCIB加工を行なうことができる。X、Z軸のストロークは100mmあり、直径100mmまでのワークを加工することが可能である。



図4 NACHI-GCIB加工装置

## 5. GCIB加工装置による加工事例

### 1) 超合金での事例

ガラスレンズの光学金型は、超合金を材料とし、精密研削で成形された後、研磨仕上げされる。このようなレンズ金型用超合金表面のGCIB加工事例を図5に示す。図は未加工のサンプル表面とGCIB加工を行なったサンプル表面の走査型プローブ顕微鏡 (Scanning Probe Microscope; SPM) 像である。3000番の砥石で精密研削された超合金表面には周期的な研削痕が残っており、 $1\mu\text{m}$ 四方の微小エリアにおける平均表面粗さ (Ra) は $2\text{nm}$ である。この試料にGCIB加工を行なうことでRaは $0.4\text{nm}$ に低減しており、超合金の超平坦化加工が可能である。

### 2) Niメッキ表面での事例

プラスチックレンズの光学金型は、成形したダイス鋼にNiメッキを行ない、これを精密鏡面切削して仕上げる。Niメッキ切削面へのGCIB加工事例を図6に示す。精密鏡面切削したNiメッキ表面には周期的な切削痕ができており、 $10\mu\text{m}$ 四方のRaは $2\text{nm}$ である。GCIB加工によって切削痕が除去され、Raは $0.7\text{nm}$ まで低減できた。

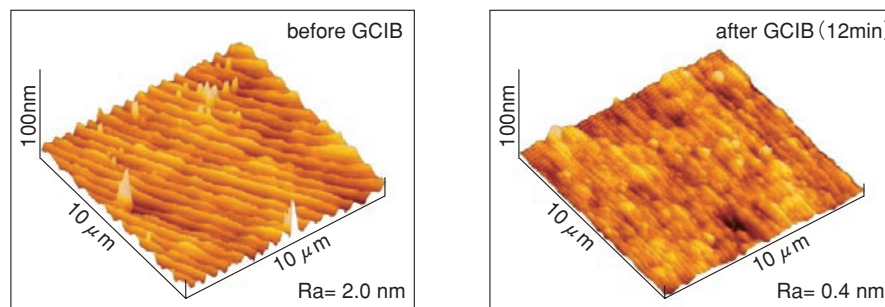


図5 GCIBによる超合金の加工事例

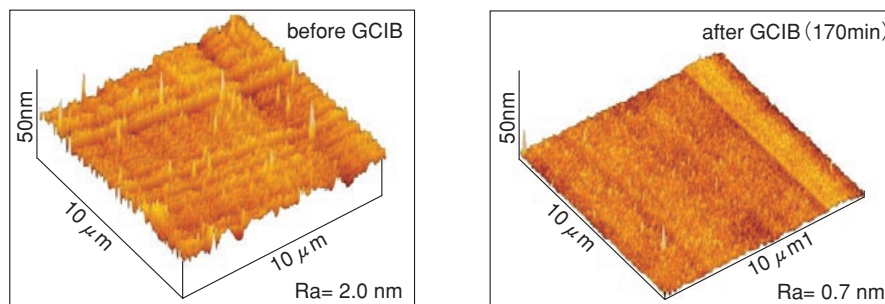


図6 GCIBによるNiメッキ面の加工事例

### 3) ダイヤモンドコーティング工具での事例

図7はダイヤモンドコーティング工具のGCIBによる加工事例である。GCIB加工はイオンビームにより原子の結合を直接分断する加工方法であるので、マクロな変形のし難さ、すなわち被加工物の硬さの影響を受けにくい。よって切削や研削では困難な超高硬度材料の加工を比較的容易に行なうことができる。図7に示す走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope; SEM) 像から、GCIB加工によってコーティングダイヤモンド表面が平坦になり、刃先のエッジも先鋭化されていることがわかる<sup>3)</sup>。

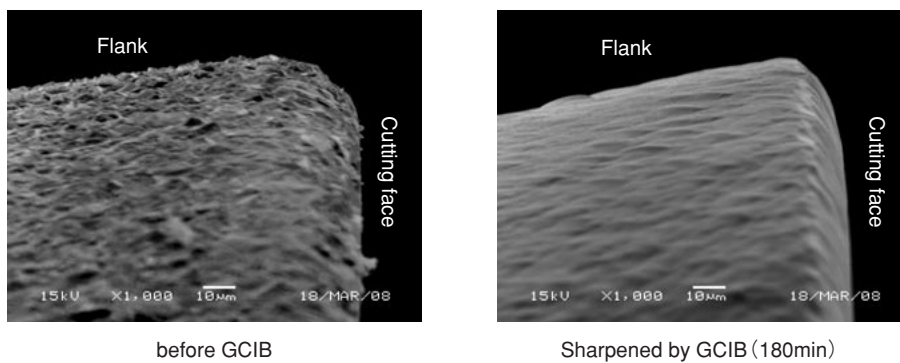


図7 GCIBによるダイヤモンドコーティング工具の加工事例

## 6. GCIB加工のさらなる展開をめざして

超精密加工分野での表面の超平坦化要求に応えるため、GCIB技術の機械加工分野への応用をめざして開発をすすめてきた。現在、様々な材料にGCIB加工を行なってその効果を確認中であり、一部では具体的なユーザーからのテスト加工も実施し始めている。

GCIB技術は他の方法にはない画期的な特長があり、原子レベルの平坦化法として数少ない有用な方法の一つである。現状、先行してとり組んでいる数社より半導体製造、超精密部品の表面加工、有機材料の分析などに関しいくつかの報告がなされているが、用途は限定的であり、広く普及しているとはいえない。これはGCIB加工装置の価格が非常に高く、かつ加工時間が長いこと、加工コストが下がらないことに起因する。もうひとつの原因は、イ

オンビーム装置の製造から機械加工分野へのアプリケーションまで一貫して手がけることのできる総合機械メーカーがこれまで開発に携わっていなかったことであり、GCIB技術を広く世の中にも広めることが、この技術における筆者およびNACHIの役割である。そのためには、受託加工によるGCIB加工ニーズの掘り起こし、GCIB加工装置の簡素化による装置コストの低減、そして加工能率の向上による加工コストの低減が不可欠である。

GCIB加工の能率と安定性の向上には、数多くあるパラメーターの加工への影響を一つ一つ解明することが必要である。それと同時に、光学メーカー、電子デバイスメーカーをはじめとした具体的な用途、ユーザーを開拓し、新世代のナチビジネスにおける柱として確立させていく。

### 参考文献

- 1) I. Yamada, J. Matsuo, N. Toyoda, and A. Kirkpatrick: Materials processing by gas cluster ion beams, Materials Science and Engineering R34, (2001) 231
- 2) 山田 公: クラスタイオンビーム基礎と応用一次世代ナノ加工プロセス技術、日刊工業新聞社 (2006)
- 3) 佐藤・関口・森田・豊田・山田: ガスクラスタイオンビームによるダイヤモンドコーティング工具の平滑化、2010年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集 (2010) 51