

平成 2 1 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

(平成 2 1 年度補正予算事業)

「三次元内部構造顕微鏡を用いた高精度形状測定及び内部観察技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成 2 2 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 高島産業株式会社

目 次

第 1 章 研究開発の概要

1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2	研究体制	1
1-3	成果概要	6
1-4	当該研究開発の連絡窓口	7

第 2 章 研究開発の内容と成果

2-1	鏡面切削機構の開発	8
2-2	高分解画像取り込み機構の開発	11
2-3	装置全体の開発	12
2-4	鏡面切削加工用工具の開発	14
2-5	連続的鏡面切削加工の研究	19
2-6	連続的機上切削一画像取り込み技術の開発	20
2-7	取り込み画像の連続的三次元化技術の開発	21

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 背景

自動車産業では動力伝達装置の小型・軽量化、長寿命化の傾向が強まっている。部材自体の信頼性や耐久性の向上が求められているほか、動力伝達部材内部の状態について正確な形状を確実に把握するための測定精度の向上が求められ、部材の内部構造を観察して、巣なのか異物なのかの判定や、位置・形状の正確な把握が困難な、CT や超音波などの従来の測定方法に変わる高精度で信頼性のある内部欠陥の測定方法と小型卓上型測定装置が求められている。

1-1-2 研究開発目的

本研究開発の目的は、自動車部品等の動力伝達部材にて求められている、“巣・異物の識別が可能な高精度で信頼性のある内部構造の観察方法”と、“短時間で観察・測定が出来、実用価格の製造現場で活用できる小型卓上型測定装置”として、部品表面の微細切削／加工面（断面）の精密観察を繰り返す方法で、部品の精密測定を行う、三次元内部構造顕微鏡を開発することを目標とする。

1-1-3 目標

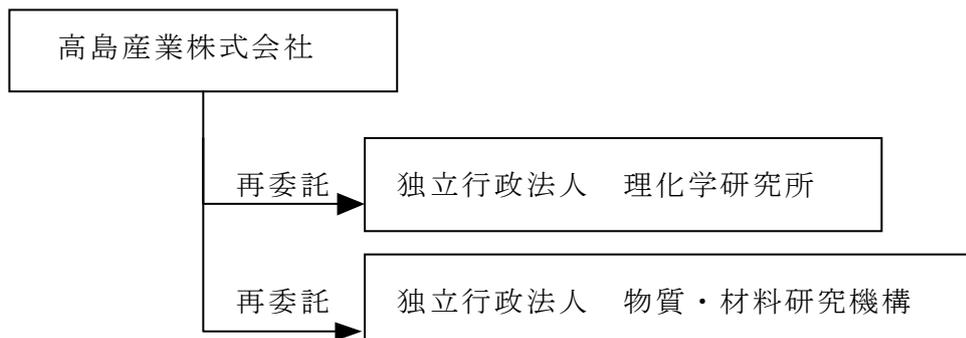
開発する三次元内部構造顕微鏡は、①機上で観察ワークを鏡面切削し、②表面画像を取り込み、③画像処理技術により内部構造を三次元化して表示する。

研究の目標として、表面粗さ $Ra=20nm$ 以下の鏡面切削の 1,000 回の繰り返し加工を可能とし、分解能 $0.1\mu m$ 以下の画像を安定して取得できる高分解画像取り込み装置を持ち、設置サイズ $60cm \times 60cm$ の卓上装置とする。また、画像取り込み処理時間は、1 秒/1 面とする。

この成果により、品質管理技術が飛躍的に向上し、部品の歩留まりが向上し、不良品の発生、不良部品の流動防止が可能となる。それにより、製造に係るコスト削減、省エネルギーの効果をj得ることを可能とする。

1-2 研究体制

1-2-1 研究組織



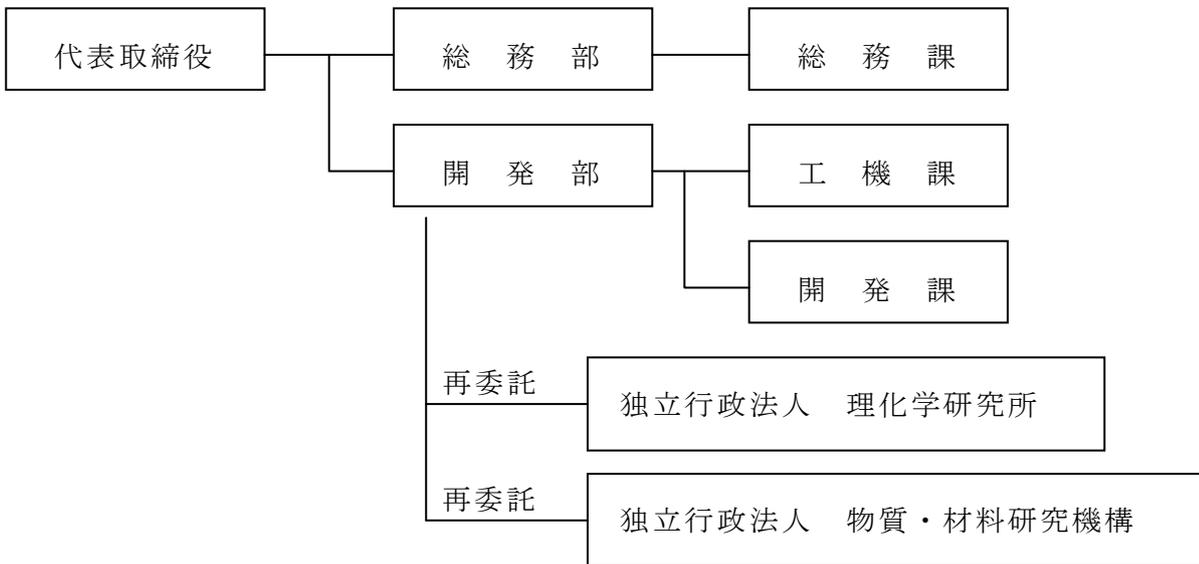
統括研究代表者（PL）
 所属：高島産業株式会社
 役職：常務取締役開発部長
 氏名：遠藤 千昭

副統括研究代表者（SL）
 所属：独立行政法人
 理化学研究所
 役職：知的財産戦略センター
 VCAD システム研究プログラム
 生物基盤構築チーム
 チームリーダー
 氏名：横田 秀夫

1-2-2 管理体制

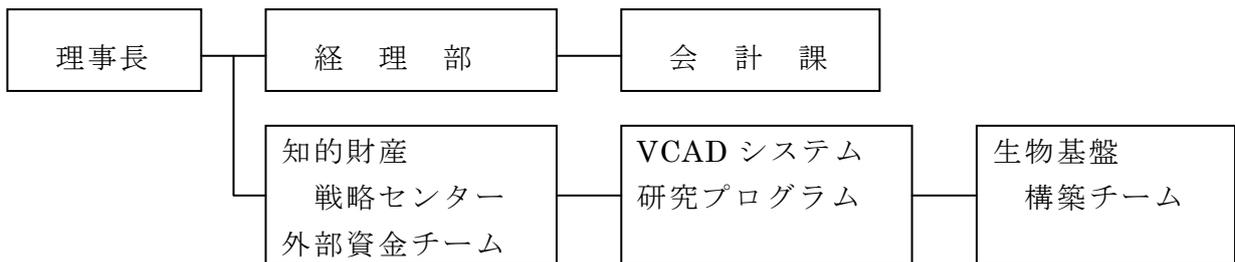
(1) 事業管理者

〔高島産業株式会社〕

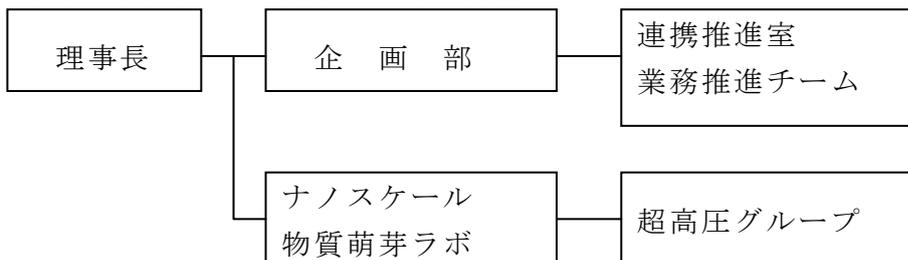


(2) 再委託先

〔独立行政法人 理化学研究所〕



〔独立行政法人 物質・材料研究機構〕



1-2-3 研究者氏名および研究項目

(1) 事業管理者

高島産業株式会社 管理員

氏名	所属・役職	研究項目
大和 淳司	開発部 開発課主任	<ul style="list-style-type: none"> ・プロジェクトの管理、運営 ・研究開発推進委員会の設置
永山 奈美	開発部 開発課員	
金井 勝	総務部 総務課員	

高島産業株式会社 研究員

氏名	所属・役職	研究項目
遠藤 千昭	常務取締役 開発部長	(PL)・研究総括 <ul style="list-style-type: none"> ・鏡面切削機構の開発 ・高分解画像取り込み機構の開発 ・装置全体の開発 ・連続的機上切削－画像取り込み技術の開発 ・取り込み画像の連続的三次元化技術の開発 ・鏡面切削加工用工具の開発 ・連続的鏡面切削加工の研究 ・連続的鏡面切削加工の研究 ・鏡面切削加工用工具の開発
市川 一雄	開発部 工機課 課長	
鈴木 秀峰	開発部 工機課 係長	
佐藤 尊史	開発部 工機課 課員	
花岡 和則	開発部 工機課 係長	
田桐 英敏	開発部 工機課 課員	
大島 英美	〃	
内山 一秀	〃	
小林 清幸	開発部 工機課 係長	
明松 浩継	開発部 工機課 課員	
平出 敏章	〃	

(2) 再委託先

独立行政法人 理化学研究所

氏名	所属・役職	研究項目
横田 秀夫	生物基盤構築チーム チームリーダー	(SL)・研究副総括 <ul style="list-style-type: none"> ・高分解画像取り込み技術の開発 ・装置全体の開発 ・連続的鏡面切削加工の研究 ・連続的機上切削－画像取り込み技術の開発 ・取り込み画像の連続的三次元化技術の開発
藤崎 和弘	生物基盤構築チーム	

独立行政法人 物質・材料研究機構

氏名	所属・役職	研究項目
谷口 尚	ナノスケール物質萌芽ラボ 超高压グループ	<ul style="list-style-type: none"> ・鏡面切削加工用工具の研究 ・連続的鏡面切削加工の研究

1-2-4 指導・協力者および指導・協力事項

(1) アドバイザー (2名)

氏名	所属・役職	指導・協力内容
山形 豊	独立行政法人 理化学研究所 VCAD システム研究プログラム 加工応用チームチームリーダー	・装置全体の開発に係る指導 ・鏡面切削加工技術に係る指導
樋口 俊郎	国立大学法人 東京大学大学院 工学系研究科精密機械工学専攻 教授	・画像取り込み技術に係る指導 ・制御技術に係る指導

(2) 研究開発推進委員会

氏名	所属・役職	備考
遠藤 千昭	高島産業株式会社 常務取締役開発部長	PL
横田 秀夫	独立行政法人 理化学研究所 生物基盤構築チーム チームリーダー	SL
谷口 尚	独立行政法人 物質・材料研究機構 ナノスケール物質萌芽ラボ 超高压グループ	
市川 一雄	高島産業株式会社 開発部 工機課課長	
鈴木 秀峰	高島産業株式会社 開発部 工機課係長	
花岡 和則	高島産業株式会社 開発部 工機課係長	
小林 清幸	高島産業株式会社 開発部 工機課係長	
山形 豊	独立行政法人 理化学研究所 VCAD システム研究プログラム 加工応用チーム チームリーダー	アドバイザー
樋口 俊郎	国立大学法人 東京大学大学院工学系研究科 精密機械工学専攻 教授	アドバイザー
伊藤 忠彦	高島産業株式会社 開発部 開発課課長	
大和 淳司	高島産業株式会社 開発部 開発課主任	
永山 奈美	高島産業株式会社 開発部 開発課課員	

1 - 2 - 5 研究実施場所

場 所	住 所	主な研究内容
高島産業株式会社	長野県茅野市金沢 5695-6	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鏡面切削機構の開発 ・ 高分解画像取り込み機構の開発 ・ 装置全体の開発 ・ 鏡面切削加工用工具の開発 ・ 連続的鏡面切削加工の研究 ・ 連続的機上切削一画像取り込み技術の開発 ・ 取り込み画像の連続的三次元化技術の開発
独立行政法人 理化学研究所	埼玉県和光市広沢 2-1	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高分解画像取り込み機構の開発 ・ 装置全体の開発 ・ 連続的鏡面切削加工の研究 ・ 連続的機上切削一画像取り込み技術の開発 ・ 取り込み画像の連続的三次元化技術の開発
独立行政法人 物質・材料研究機構	茨城県つくば市並木 1-1	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鏡面切削加工用工具の開発 ・ 連続的鏡面切削加工の研究

1-3 成果概要

1-3-1 鏡面切削機構の開発

加工に悪影響を及ぼす振動やうねりの影響を低減し、高精度の真直度、送り精度を確保するために、空気静圧案内形式のスライドテーブルと空気静圧軸受けのスピンドルを使用した装置構成とした。これにより、スライドテーブルの真直度 $0.2\ \mu\text{m}/100\text{mm}$ 以下、スピンドル振れ $1\ \mu\text{m}$ 以下の鏡面切削機構を開発した。

1-3-2 高分解画像取り込み機構の開発

高分解能 CCD カメラを搭載し、50 倍対物レンズによる撮影にて分解能 $0.04\times 0.04\ \mu\text{m}$ の組織画像の取得に成功した。画像取り込みに要する時間は露光時間が 30msec 以上（任意に選択可能）、画像転送速度は 1171msec である。NC 装置からの出力をトリガとした撮影機能を実現し、加工装置制御プログラムのシーケンスに沿った撮影が可能である。

1-3-3 装置全体の開発

高島産業株式会社にて市販の卓上型工作機械を基にし、リニアスケールによる高精度位置決め機構、空気静圧案内の Y 軸スライドテーブル、空気静圧軸受のスピンドルを搭載した鏡面切削機構と、分解能 $0.04\ \mu\text{m}$ の高分解画像取り込み機構を搭載した設置サイズ W476mmD661mm の三次元内部構造顕微鏡を開発した。

1-3-4 鏡面切削加工用工具の開発

焼結助剤を一切含まない、立方晶窒化ホウ素 (cBN) の微粒焼結体を高压合成した。原料として低密度相の六方晶窒化ホウ素 (hBN) を用い、8 万気圧 2000~2400°C、及び 10 万気圧 1600-1800°C 領域で焼結時間を吟味して高压処理することにより、cBN 焼結体への転換を行った。回収試料の構造解析により、cBN 単相への合成条件(圧力、温度、保持時間)を明らかにし、100nm 以下の構成粒子径からなる高強度の cBN 焼結体を合成した。

高強度 cBN 焼結体へ研磨加工及びラッピング研磨加工の応用により、刃先先端にチップングの無い鏡面切削加工に理想的な刃先をもつ、鏡面切削加工用工具を開発した。

1-3-5 連続的鏡面切削加工の研究

(独)物質・材料研究機構で開発した超微粒子バイナダレス cBN 切削工具を三次元内部構造顕微鏡の切削機構に搭載し、精密切削条件下で加工することで、鉄系材料を含む金属材料の鏡面生成が実現し、連続多断面に渡る顕微鏡観察が可能となった。

1-3-6 連続的機上切削—画像取り込み技術の開発

三次元内部構造顕微鏡の高分解画像取り込み機構を用いて、機上で切削加工及び軸の制御を行う制御系と、画像取り込み信号を受け、高分解画像取り込み機構から画像を取り込む画像処理装置を構築した。制御系と画像処理装置を連動させ、多断面・長距離に渡る切削・観察を自動的に実施するための NC プログラムのシーケンスを作成した。

1-3-7 取り込み画像の連続的三次元化技術の開発

複数の2次元断面画像から内部の介在物や欠陥、空隙などを三次元表現する処理技術を開発した。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

事業管理者	高島産業株式会社
代表者	代表取締役社長 小口武男
住所	〒391-0012 長野県茅野市金沢 5695-6
担当者	開発部 開発課 伊藤忠彦
連絡先	電話：0266-72-8825
	Fax：0266-72-1286
	e-mail：titou@takashima.co.jp

第2章 研究開発の内容と成果

2-1 鏡面切削機構の開発

2-1-1 研究開発の内容

鏡面切削加工とは、刃先形状を精密に成形した切削工具を使用し、数 μm 程度の切込みで延性モード下の切削を行うことで加工面に鏡面を得る加工方法である。

一般的に切削加工では、工作機械で生じる微小な振動やテーブル移動での微小なうねりなどが、加工面の品質に悪影響を及ぼす大きな要因である。鏡面切削加工を実現するには、これらの影響を極力排除した高精度な精密工作機械を使用することが重要である。

工作機械の運動部を構成する要素の一つとして、加工テーブルの案内機構がある。加工テーブル案内機構は工具や加工物の運動部に影響を及ぼすため重要である。加工テーブル案内機構の形式には空気静圧案内、油静圧案内、転がり案内、すべり案内などがある。これらの案内の特性を表2-1-1に示す。

表2-1-1 テーブル案内機構の形式による特性比較

項目／軸受け種類	空気静圧案内	油静圧案内	転がり案内	すべり案内
真直度	◎	△	△	○
送り精度	○	○	△	×
振動減衰性	◎	◎	△	△

本研究課題である鏡面切削加工においては、表2-1-1に示した真直度、送り精度、振動減衰性が求められ、最も評価の高い空気静圧案内がスライドテーブルに適していると考えられる。

また、鏡面切削加工用スピンドルとしては回転精度、振動減衰能とさらに冷却性能も必要である。一般的にスピンドルの軸受けとしては表2-1-2に挙げる空気静圧軸受けか転がり軸受けの2択となる。表2-1-2よりスピンドルの軸受けには空気静圧軸受けが最適であることが分かる。そこで、スピンドルには空気静圧軸受け、スライドテーブルの案内方式には空気静圧案内を使用した機構とし、測定室などで使用するために機械サイズを卓上型とした鏡面切削装置を開発する。

表2-1-2 テーブル案内機構の形式による特性比較

項目／軸受け種類	空気静圧案内	転がり案内
回転精度	◎	△
冷却性能	◎	△
振動減衰性	◎	△

2-1-2 研究成果

(1) 開発した鏡面切削機構

鏡面切削機構は高分解画像取り込み機構のカメラユニットの搭載と、フライカットにより鏡面切削加工を行うためのステージ構成として、X、Y、Z軸の3軸構成とした門型構造とし、Z軸上にスピンドルユニットとカメラユニットを搭載することとした。図2-1-1にステージ構成を示す。

フライカット時に作用するのは、Y軸とスピンドルである。加工物の送りに使用するY

軸は静圧案内とし、スピンドルは静圧軸受けとした。また、Y軸のアクチュエータには運動精度や振動の影響を最小限にし、空気静圧案内の優れた性能を十分に発揮するためにリニアモータを採用した。

スピンドルとカメラの移動に使用するX軸および切り込み量の送りに使用するZ軸は、加工には直接作用しないためリニアガイドステージとし、ボールネジ+サーボモータにより駆動する。

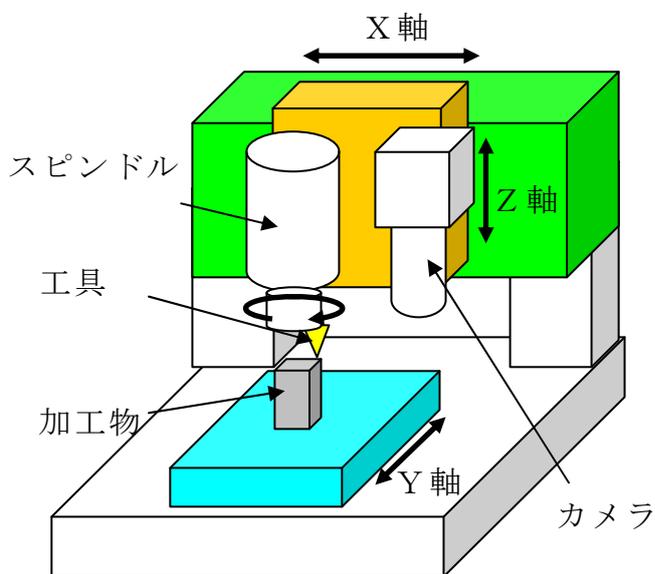


図 2-1-1 ステージ構成

加工において、切り込み量は数 μm 程度である。この位置決めを精度よく行うため、また観察においても位置決め精度を要求されるため3軸ともにリニアスケールを使用したフルクロズドループによる制御を行うこととした。制御分解能を $0.1\mu\text{m}$ とすることで、精密位置決めが行える装置である。

スピンドルには空気静圧軸受けを使用するが、工具の振動が加工に悪影響を及ぼす為、カッターを取り付けた状態で動的バランスをとることが不可欠である。そこで、スピンドルに装着するカッターホルダーの外周部にバランス調整用のタップ穴を儲け、必要な錘を取り付けることで対応した。

装置の大きさを卓上型とするために、必要なストロークを保ちつつ出来る限りの小型化を行った。必要な剛性や振動対策を考慮して土台となるベース部には石定盤を使用し、X軸コラム部は鋳鉄を使用した。これにより、幅476mm、奥行き661mm、高さ705mmの卓上サイズの装置とすることが出来た。図2-1-2に装置概観図を示す。

(2) 鏡面切削方式

本研究では切削加工により鏡面を得るために最適な加工法といわれているフライカット(一枚刃工具を使用した超精密なフライス加工法)により対象資料の切削加工を行う。

フライカット加工において、カッター径は被削材の幅より30~50%位大きめの径を使用したほうがよい結果が得られると言われている。これは、被削材に対してカッター径が小さいと被削材食付時にカッター刃先より当たる為寿命が短くなるためである。そこで、対象加工物の大きさを20~30mm角に対して、カッター径は50mmとすることとした。

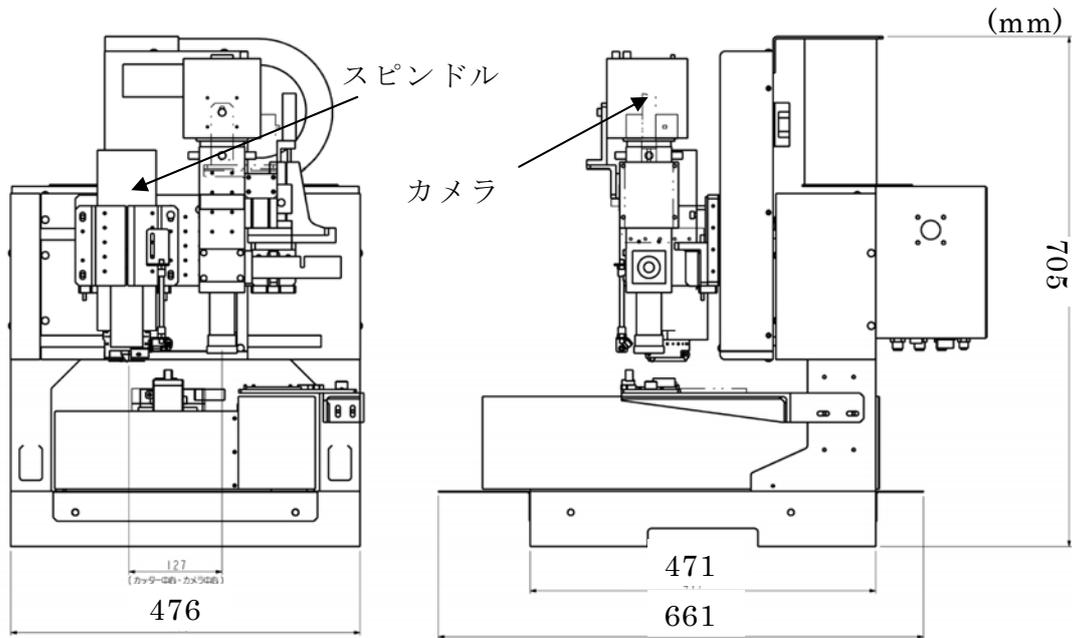


図 2 - 1 - 2 装置概観図

(3) 開発した鏡面切削機構の性能評価

開発した鏡面切削機構の性能を確認するために、精度測定を行った。空気静圧案内を採用した Y 軸の垂直方向真直度の測定結果を図 2 - 1 - 3 に示す。また、各軸の繰り返し位置決め精度の測定結果を表 2 - 1 - 3 に示す。スピンドルの振れ精度は $1\mu\text{m}$ であった。測定結果より、本機構は精密な運動精度をもつ装置であることが確認できた。

以上のことから、空気静圧案内のライドテーブル及び空気静圧軸受けのスピンドルを用いた卓上型の鏡面切削機構を開発することが出来た。

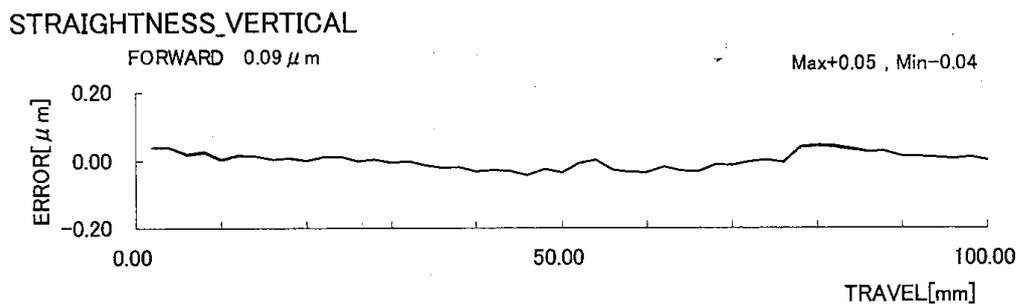


図 2 - 1 - 3 Y 軸真直度測定結果

表 2 - 1 - 3 繰り返し位置決め精度測定結果 (単位: μm)

	X 軸	Y 軸	Z 軸
繰り返し位置決め精度	± 0.22	± 0.08	± 0.23

2-1-3 技術課題と今後の取り組み

今年度の目標である鏡面切削機構は完成した。しかしながら、製造現場で実用化する為にはコスト、耐久性、操作性を向上させた鏡面切削機構とする事が必要であり、今後、案内形式や今回使用した部材などを改良設計し、低コスト、高耐久性、良好な操作性の鏡面切削機構を開発する。

また、カッターの付け替えの際に生じるスピンドルにおける動的バランスの調整に時間がかかる。この調整方法について、より短時間に行える方法を検討する。

2-2 高分解画像取り込み機構の開発

2-2-1 研究開発の内容

分解能 $0.1\mu\text{m}$ 以下の能力を持つカメラと顕微鏡光学系を高剛性・高精度で位置再現性のあるステージ上に設置する設計開発を行い、画像データを1面/1秒の速度で処理する技術を開発する。開発した機構を組み合わせ、双方の機構が連続・連携して機能する装置を開発する。

2-2-2 研究成果

(1) 高分解能デジタル画像取得システム

CCDカメラユニット（フローベル社製 AKZ-4400BV：4400万画素）および専用鏡筒（清和光学社製オーダー品）からなる撮影機構を製作した。図2-2-1に撮影機構の外観を示す。対物レンズとして長作動距離レンズ（Mitutoyo社製 M Plan Apoシリーズ）が搭載できる。1倍レンズで分解能が $2.2\times 2.2\mu\text{m}$ 、10倍で $0.22\times 0.22\mu\text{m}$ 、20倍で $0.11\times 0.11\mu\text{m}$ 、50倍で $0.04\times 0.04\mu\text{m}$ ($< 0.1\mu\text{m}$) となる。この撮影機構を加工機 Z 軸に搭載することで、レンズ焦点位置が常に刃先高さ（切込高さ）と一致することから、断面加工が深部まで進んでも焦点位置補正をすることなく迅速に撮影プロセスを実施できる。

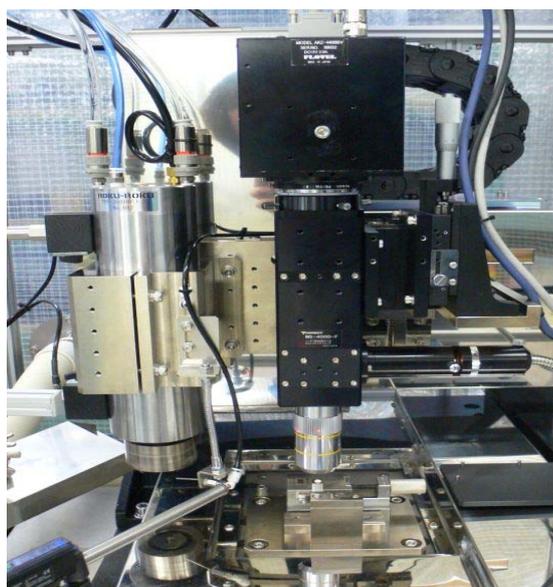


図2-2-1 高分解能撮影機構の外観

(2) 撮影タイミングの制御

本撮影機構では外部トリガによる撮影機能を有しており、加工機の NC 装置からの出力を元に撮影が行われる。1 枚の画像取り込みに要する時間は露光時間を 30msec 以上として任意に選択可能であり、画像転送速度は 1171msec である。加工機を制御する NC プログラムのシーケンスにて、テーブルの位置決めと撮影タイミングの制御、撮影・転送時間の設定を行うことで、加工機と撮影機構が連続・連携して機能する。また、この制御システムを利用することで、視野の狭い高分解能撮影時に多領域撮影（タイリング）の実施が可能となった。撮影位置をずらしながら繰り返し撮影することで、広領域の観察が可能である。タイリング撮影後の画像連結処理は専用ソフトウェアの機能の一部として利用可能である。

(3) 結論

撮影機構と制御システムの搭載により、加工機上で位置決め精度の高い、高分解能撮影が実現した。また、タイリング機能により広視野の撮影が実現し、高分解能かつ広域の観察が可能となった。

2-2-3 技術課題と今後の取り組み

本研究で視野の狭い高分解能撮影時に多領域撮影（タイリング）の実施が可能となった。画像連結処理は撮像位置をずらしながら撮像するため、画像の連結精度は軸の位置決め精度で決まる。画像の連結精度をより高めるために、各画像につなぎ合わせるための重複箇所を持たせ、つなぎ目部分の画像データを補正処理する技術を開発することが今後の課題である。

2-3 装置全体の開発

2-3-1 研究開発の内容

製造現場で実用化する事を念頭に、鏡面切削機構と、高分解画像取り込み機構を組み合わせ、かつ、高剛性・高振動減衰性で有りながらサイズを小型卓上型とし、製造コストを意識した開発を行う。

2-3-2 研究成果

(1) 鏡面切削機構への高分解画像取り込み機構の搭載

高島産業株式会社にて開発した小型卓上加工装置をベースにリニアスケールによる高精度位置決め機構、空気静圧案内の Y 軸、空気静圧軸受けによるスピンドルを搭載した高精度な卓上型の鏡面切削機構を製作した。

ここで、鏡面切削機構に高分解画像取り込み機構を搭載して、鏡面切削加工後に観察対象物を取り外すことなく加工面の撮影を行う事を可能にした。さらに NC プログラムでシーケンスを組みことにより、自動で加工と撮影を繰り返して行う事を可能にした。本装置の外観を図 2-3-1 に示す。

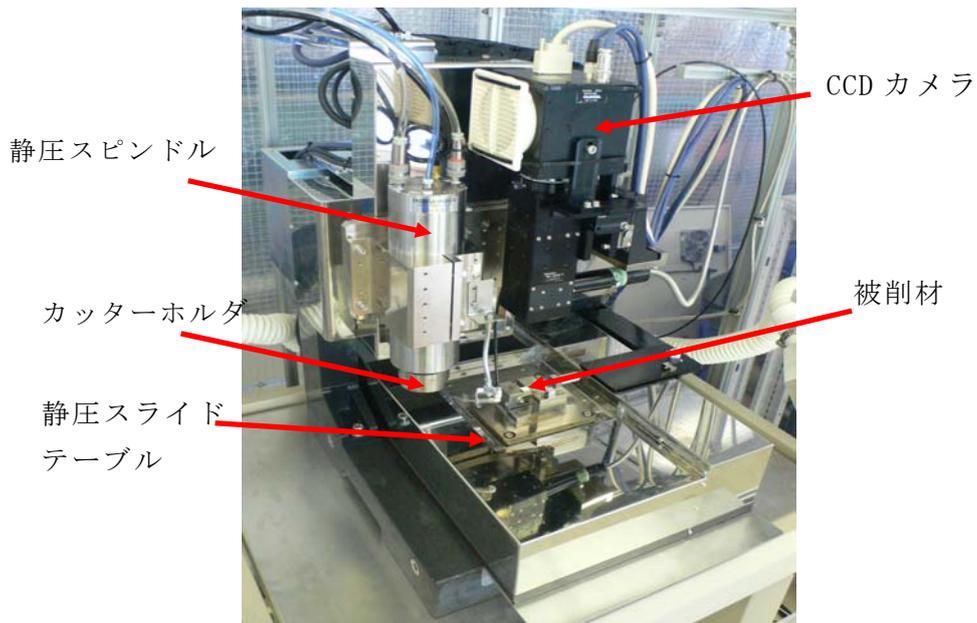


図 2 - 3 - 1 鏡面切削加工装置の外観

(2) 装置全体構成

三次元内部構造顕微鏡は、電装 BOX 内に搭載される NC 制御装置により鏡面切削機構、高分解画像取り込み機構を一括制御する。NC プログラムのシーケンスにて、鏡面切削機構のテーブル位置決め、高分解画像取り込み機構の撮影タイミングの制御を行うことで、鏡面切削加工と撮影を連続して機能させ、一連の動作の自動化を達成している。

操作パネルにはタッチパネルを採用し、必要なパラメータを入力してスタートボタンを押すことで加工から観察まで自動で行うことができる。その他に、本装置は卓上型装置であるため、装置の設置方法により外部振動の影響を受ける可能性がある。そこで、除振台上に加工機を設置して外部振動の影響を排除している。また、装置カバーを設け集塵機により吸引することで、加工時に発生する微細な切粉が外部に飛散しないように考慮した。

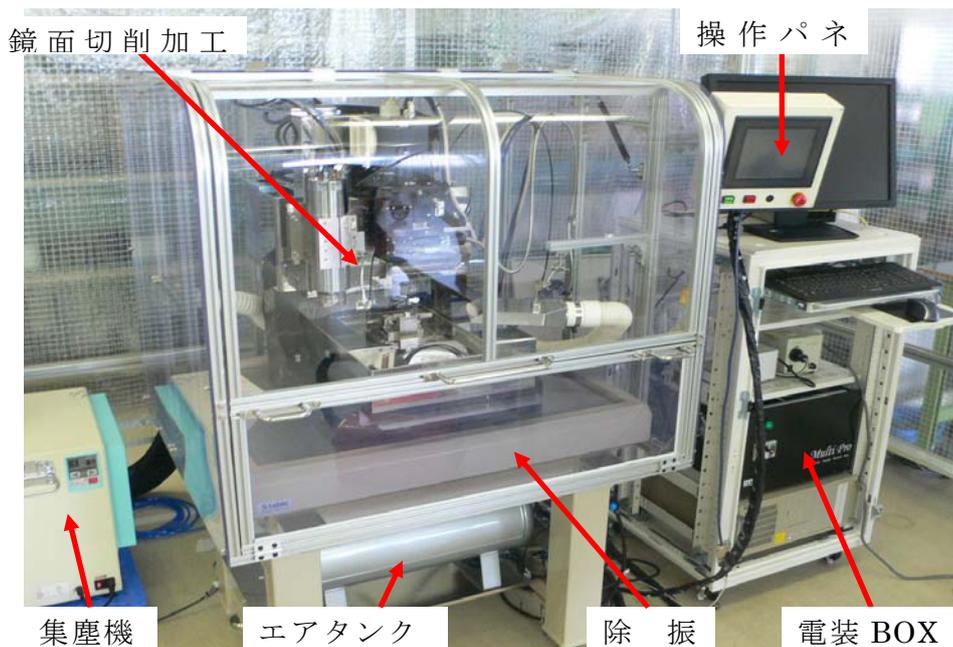


図 2 - 3 - 2 装置全体の概観

本装置では空気静圧機器を使用しているが、装置の稼働中に停電や配管からの漏れなどによる圧縮空気の断絶が起こると、空気静圧機器が接触による磨耗や焼付きを起こすといった致命的な損傷を受ける。そこで、圧力センサによる元圧の監視やエアタンクを設置することで、非常時でも装置が緊急停止するまでエアタンクから供給されるエアにより空気静圧機器が浮上を続けられるようにした。装置全体の外観を図 2-3-2 に示す。

(3) 結論

卓上型の鏡面切削機構へ高分解画像取り込み機構を搭載し、各機構を NC プログラムのシーケンスにより連携した制御を可能とした三次元内部構造顕微鏡が完成した。

2-3-3 技術課題と今後の取り組み

鏡面切削加工機本体は卓上型とすることが出来た。しかし、除振台やカバーといった部分で大きくせざるを得なかった。外部機器を小型化して、システム全体としての小型化を検討する必要がある。

本装置では、高精度加工を行うためにスライドステージおよびスピンドルに静圧機器を使用している。しかし、これらの機器は非常に高価であり装置のコスト増になる。静圧機器の最適設計を行い、このシステムに適した性能の機器を設計開発することで、必要以上のコストをかけない機構の装置を検討する。

2-4 鏡面切削加工用工具の開発

2-4-1 研究開発の内容

立方晶窒化ホウ素 (cBN) はダイヤモンドと類似の結晶構造を持つ、天然に産しない物質である。硬度はダイヤモンドの半分程度であるが、耐熱性、化学的安定性に優れ、とりわけ鉄系金属材料との反応性がダイヤモンドと比較して著しく少ないという特徴を持つ。

そこで、近年は金属材料の機械加工において、これまでの超硬合金 (炭化タングステン (WC)) 製の切削工具から、より高硬度の cBN 焼結体をベースとした切削工具の需要が増大している。工業的に量産されている cBN 工具は、cBN 粒子を助剤と共に高压焼結した複合焼結体である。近年では加工対象となる鋼材の硬度の増加や、機械加工効率の増大が求められるのに応じて、cBN 焼結体工具の性能向上は重要な研究課題となっている。優れた切削性能を有する加工工具の開発は、砥粒による研削工程を高効率の切削工程に置き換える上で重要であり、このような切削プロセスにおける技術革新は、大量の砥粒や潤滑油の廃棄を伴う研削工程が内包する環境負荷を低減する上でも大きな意義がある。

cBN 焼結体工具の特性は構成元素である cBN と焼結助剤の割合やその結合様式に依存するが、当然のことながら、焼結助剤を全く含まない cBN 焼結体の特性が最も優れている。焼結助剤を含まない高純度焼結体は通常複合焼結体と比較して 30% 程度硬度に優れ、切削性能も優れた特性を示している。

高純度 cBN 焼結体の合成は、通常脱酸素処理を施した六方晶窒化ホウ素 (hBN) 等を原料として 7.7GPa (1GPa=1 万気圧)、2000℃ の圧力、温度領域で、低压相から高压相への相転換を伴う固相反応焼結を進行させることにより実現される。この際、①合成温度が 1800℃ 程度では cBN への転換が進行しつつも、低压相の残留によりその強度は十分ではなく、②

2000℃程度以上で透光性の緻密な焼結体を得られ、③焼結温度が高すぎると粒成長により焼結体の強度が低下すること。そして④最適な焼結条件で得られた焼結体の粒子径はサブミクロン程度で、鉄系金属材料の切削工具として優れた耐摩耗性を示すことが明らかとなっている。このように、hBN等を原料とした高純度cBN焼結体の合成では、その焼結温度には最適な条件が存在し、8万気圧領域では、2000℃が必要であり、この際に得られる焼結体の粒子径は500nm程度となる。

一方、鉄系金属の超精密切削プロセスとしては、被削材の加工面の表面粗さが平均で50nm以下、最大で120nm以下であることが大まかな目安といえる。このような切削加工を実現する上では、粒子径を100nm以下に抑えた上で強固な組織を有する高純度cBN焼結体を合成することが必要となる。

本研究課題の目的は、鉄系金属の精密切削プロセスを実現することであり、高強度の微粒cBN焼結体による、金属材料向け鏡面切削用工具を開発することである。

2-4-2 研究成果

粒成長を抑制した、緻密なcBN焼結体を合成するためには低密度相であるhBNが高圧・高温下でcBNに転換する際の、圧力、温度、保持時間の適切な制御が必要である。これまで、筆者は焼結条件の最適化を主として、圧力・温度条件の制御を中心として進めてきたが、焼結時間の効果については明らかにしてこなかった。焼結保持時間の最適化は、合成される焼結体の粒成長を抑制する上では重要な要因であり、これを明らかにすることで、焼結体の特性の更なる向上が期待できる。本研究開発では、これまでの焼結保持時間を20分間から5分間まで変化させた効果を中心に検証し、高品位のcBN焼結体の合成に取り組んだ。

図2-4-1に本研究で用いた、ベルト型高圧装置による高圧焼結用試料構成の概略図を示す。脱酸素処理（窒素中2000℃で処理）した原料hBNをタンタル製のカプセルに充填した試料セルをシリンダー内に設置し、上下のアンビルで加圧する構成となっている。圧力はアンビルの駆動油圧により制御し、温度は試料セル内の黒鉛発熱体への投入電力により制御する。

はじめにhBNを高圧高温処理した際のcBNへの転換率と焼結温度、その際に転換したcBNの粒子径の関係を明らかにした。hBNを原料とした場合、7万気圧以下ではいかなる温度条件でもcBNへの100%の転換はなされず、8万気圧領域、2000℃付近で粒子径500nm程度のcBN単相の焼結体となる。更に高い圧力である10万気圧領域では合成(焼結温度)が1700℃程度まで低減し。これによりcBN単相のまま粒子径をこれより微細化(100nm以下)することができる。

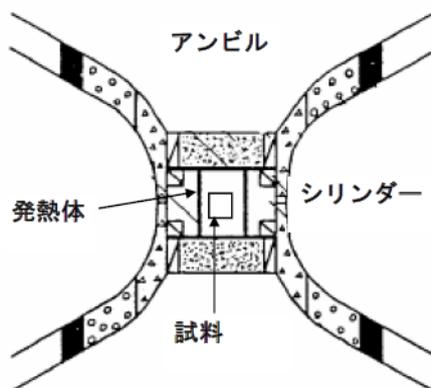


図 2 - 4 - 1 ベルト型高圧装置による試料構成

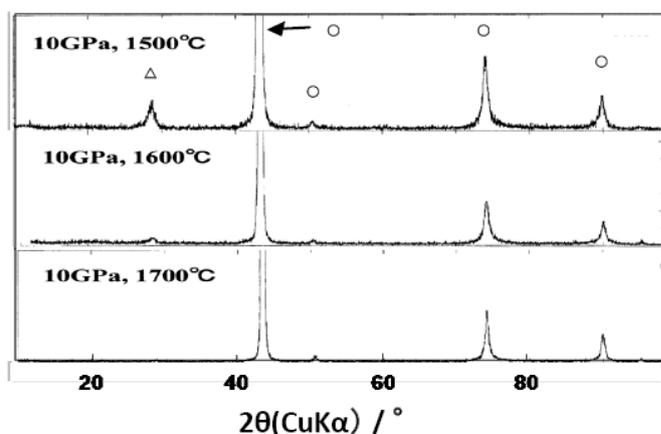


図 2 - 4 - 2 焼結体の X 線回折図形

○: cBN △: hBN

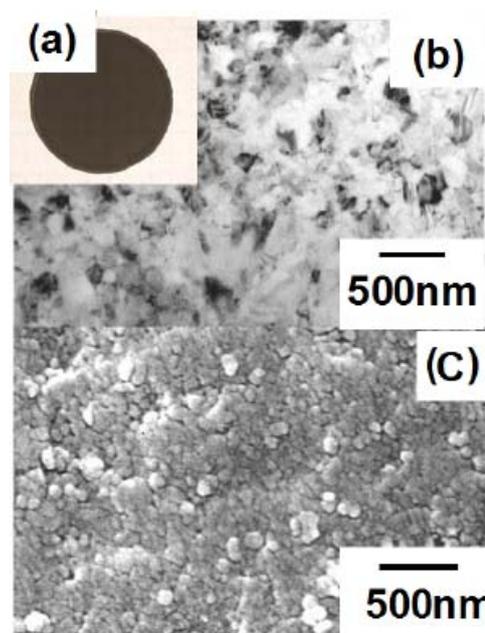


図 2 - 4 - 3 (a) cBN 焼結体, (b) 透過電子顕微鏡写真 (c) 走査型電子顕微鏡写真

図 2 - 4 - 2 に 10 万気圧領域で 20 分間の焼結時間で得られた cBN 焼結体の X 線回折図形を示す。1600°C 付近までわずかに低密度相が残留するが、1700°C で cBN への単相化がなされている。焼結体の光学顕微鏡写真、透過型および走査型電子顕微鏡写真を図 2 - 4 - 3 に示す。焼結体は僅かに透光性を呈した上で、約 100nm 以下の微細組織が観察される。別の評価によれば、試験荷重 10kg においてビッカース硬度 50GPa が得られている。

本研究において、5 分間に焼結時間を短縮した場合、上記とほぼ同様の傾向が得られているが、焼結温度は僅かに高温側に移行する傾向が見られた。この温度差は数十°C 以下であり、高圧下における 1700°C 領域の圧力、温度制御技術の誤差の範疇に含まれる範囲である。一般に超高压焼結では焼結温度の絶対値を厳密に制御することが容易ではないが、焼結時間の制御であれば比較的容易である。焼結体の構成粒子の不必要な粒成長を抑制す

る為には焼結温度を短時間に設定することが有効である可能性が高く、これにより、従来よりも高強度の焼結体が得られる可能性がある。今回の合成条件(圧力、温度)はこれまでの評価において優れた特性を呈した焼結体とほぼ同様であるが、今回の取り組みにより、その構成粒子径は更に微細化されていることが期待される。

この焼結体を切り出して切削試験用の刃先に加工することで、鉄系金属材料の鏡面加工が実現できることが期待される。

高圧合成された、焼結助剤を一切含まない立方晶窒化ホウ素(cBN)の微粒焼結体を、切削試験用の刃先にするために、ダイヤモンド工具を用いた。この焼結体は円盤状であるため、切り出しは焼結体中心を基準に等角6分割とし、切り出した後は焼結体中心部分を切削試験用の刃先として使用する。切り出し時の条件(ダイヤモンド工具の回転、速度、切込み量)を明らかにし、切断面にチップング或いはクラック等の発生の少ない、先端角度60度の切り出しができた。

切削試験用工具の台座に固定したcBN焼結体の刃先部分を研磨加工し、切削刃先としての機能を持たせた。研磨加工には研磨専用の装置を用い、刃先ノーズR=0.5mm、スクイ角=0°、ウラ逃げ角=3°とした。刃先ノーズRの形状は、加工時の発熱を抑えると共に切削加工面の表面粗さを向上させる事を目的として設定し、荒取り加工は#500番、中仕上げ加工は#1200番の砥石を使用した。さらに刃先先端部分の微少なチップング部分を除去し、鏡面切削加工が可能な刃先面を確保するためにラッピング研磨加工を応用し、粒度1 μ m、0.5 μ m、0.25 μ mの夫々のダイヤモンドコンパウンド(ペースト)に研削油を混合させた研削剤を用いる事で刃先先端にチップングの無い鏡面切削加工に理想的な刃先の成形ができた。このような刃先面を持つ工具であれば、鏡面切削加工が可能になる。研磨加工後の刃先の表面状態を観察した結果を図2-4-4に示す。

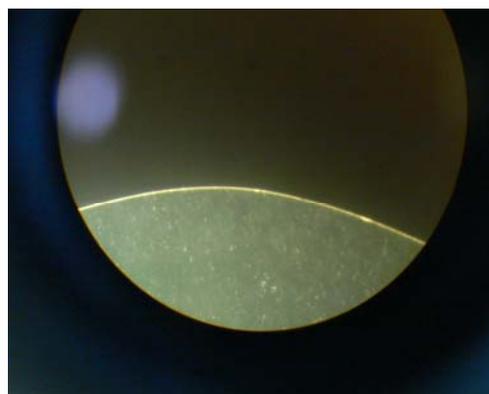


図2-4-4 刃先の表面状態

2-4-3 技術課題と今後の取り組み

本研究で適用した 10 万気圧領域の高圧合成条件は、汎用の大型生産機械でカバーできる圧力領域よりも 4 万気圧程度高い。現実的な生産性の向上のためには、量産化が可能な 6 万気圧領域まで合成条件を緩和することが当面の技術的課題である。

今回取り組んだ微粒子系の焼結の場合には粒成長を抑制しつつ、緻密な焼結体を得るための焼結条件の最適化は容易ではないが、適当な条件を整えることができれば、微細な構造を有する高純度 cBN 焼結体の合成を低い圧力、温度領域で実現できる可能性がある。図 2-4-5 は 10 万気圧領域における hBN 原料からの反応焼結と、5 万気圧領域における cBN 微粒子の固相焼結により得た試料の高分解能透過型電子顕微鏡観察による、粒界における酸素不純物のマッピング像 (EELS*) である。両者はほぼ同様の粒子径であるが、硬度は前者が 2 割程度高い。2 種類の、焼結助剤を含まない cBN 焼結体の特性の差異には、粒界の酸素不純物による影響が大きい。このことは、焼結原料としての cBN 微粒子表面の清浄化が重要であることを示している。

今後の取り組みとして、cBN 焼結体粒界における不純物酸素元素等の影響とその制御手法を明らかにし、量産化が可能な 6 万気圧領域で高品位の cBN 焼結条件を確立することが重要であり、これは機械加工分野の技術革新における今後の重要な課題である。

また、切削工具として汎用性を持たせる為に、切り出しの形状も含めた更なる検討が不可欠である。切り出し時に発生する僅かなクラックや研磨加工時のチップングは、鏡面切削用の刃先としては致命的な欠陥であり、それらを抑制する条件の確立が急務である。

*EELS: 透過型電子顕微鏡における元素分析技術の一つで、構成元素に反射した電子の状態を解析することにより、個々の元素の種類、分布を識別することができる。

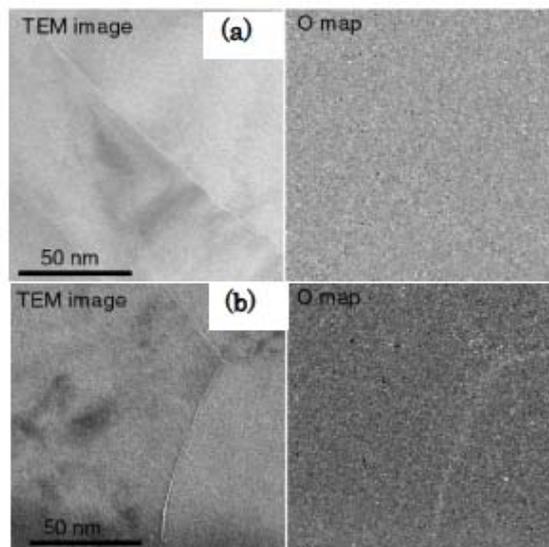


図 2-4-5 cBN 焼結体粒界の TEM 像と EELS スペクトルによる酸素マッピング像

(a) 10GPa, 1800°C で焼結

(b) 5.5GPa, 1500°C で焼結

左下図中、白く光っているのが酸素不純物の分布を示す。

2-5 連続的鏡面切削加工の研究

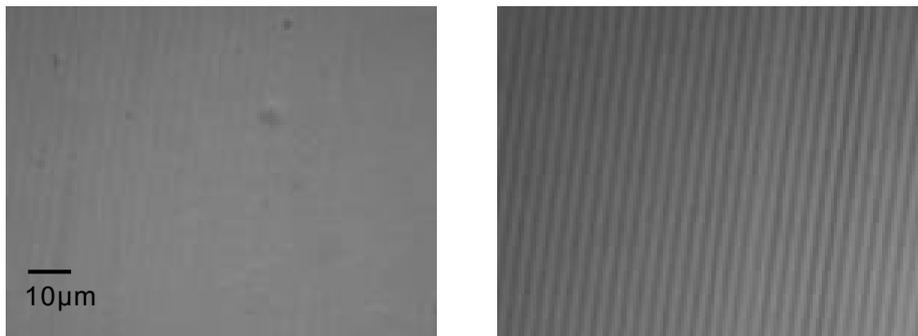
2-5-1 研究開発の内容

開発、作成した三次元内部構造顕微鏡の鏡面切削機構と鏡面切削加工用工具にて、被検査ワークを繰り返し（内部構造観察を行う画像データの採取間隔での 1000 回程度）鏡面切削加工する技術を研究開発する。

2-5-2 研究成果

(1) cBN 工具による鏡面加工

精密切削で通常用いられるダイヤモンド工具を鉄系材料の切削に用いると、化学的、熱的反応により工具磨耗が著しく、長距離にわたる鏡面加工を実現することは難しい。そこで、(独)物質・材料研究機構で開発された焼結助剤を一切含まない立方晶窒化ホウ素(cBN)の微粒焼結体を工具に利用した。本工具にて鏡面加工されたステンレス鋼の表面画像を図 2-5-1 に示す。切削初期は工具パスもなく内部構造観察可能な鏡面を示した a)。切削距離 1km 後は加工パスが目立つが、表面にムシレなどは見られず、画像処理などにより加工パスを除去できれば組織観察可能である b)。なお、3×3mm の試験片断面を 10 μm 送りで切削する場合、切削距離 1km に達するのは 1111 断面の加工時となる。



a) 初期断面画像

b) 切削距離 1km 後の表面

図 2-5-1 cBN 工具によるステンレス鋼切削面

(2) 工具寿命の検討

本工具の耐久性を調査するため、本工具（超微粒子 cBN）と市販のバインダレス cBN 工具と同等の条件で焼結された工具（微粒子 cBN）ならびに、単結晶ダイヤモンド工具（単結晶ダイヤモンド）について磨耗試験を実施した。実験にはステンレス鋼（ロックウェル硬さ：HRC>50）を利用し、切込 2 μm にて多断面に渡り切削した。図 2-5-2 に切削距離と磨耗量の関係を示す。5km の切削を実施した時点で、本工具の磨耗量はダイヤモンド工具の 1/10、市販と同等の cBN の 1/3 となり、優れた耐摩耗性を有することがわかった。

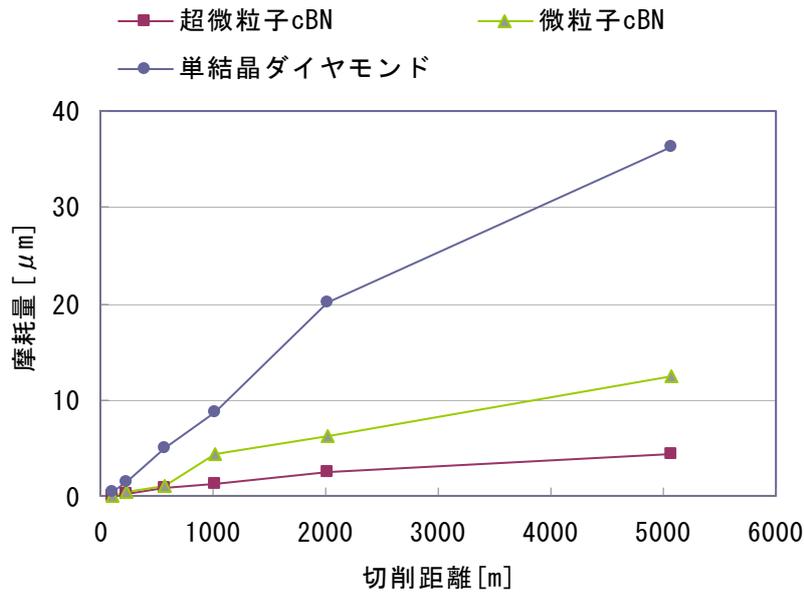


図 2-5-2 各工具における工具刃先消耗量の比較

(3) 結論

(独)物質・材料研究機構で開発した焼結助剤を一切含まない立方晶窒化ホウ素(cBN)の微粒焼結体を切削工具に利用することで、鉄系材料を含む金属材料の鏡面生成が実現し、連続多断面に渡る顕微鏡観察が可能となった。

2-5-3 技術課題と今後の取り組み

多断面に渡る鏡面切削加工を行なう中で加工時間の経過とともに加工表面に加工パスが発生してくる。この加工パスを画像処理等により除去する事が出来ればより精密な観察が可能となるが、それはあくまでも補助的処理として考え、加工パスは切削加工において抑制しなければならない。1回の切削にかかる切削抵抗や切削距離と工具寿命との相関関係を明らかにし、加工パスの抑制をする事でより詳細な表面観察の可能性が出てくる。そのためには工具刃先の形状検討をはじめ、切削加工条件の最適化を行なっていく。

2-6 連続的機上切削—画像取り込み技術の開発

2-6-1 研究開発の内容

三次元内部構造顕微鏡の高分解画像取り込み機構を用いて、機上で鏡面切削加工を行い、画像を取り込む作業を自動的に繰り返し連続的に行う技術を開発する。作成した三次元内部構造顕微鏡を用いて加工テストを行いながら開発・改良する。

2-6-2 研究成果

(1) 逐次断面切削（シリアルセクショニング）観察システム

切削観察システムの概要を図2-6-1に示す。高速切削にて試料表面を鏡面加工した後、高精度位置決めを利用し、試料を撮影場所まで移動する。この切削、移動、撮影のプロセスをNCコマンドにて制御することで断面観察を連続的かつ全自動的に行うシステムを作成した。

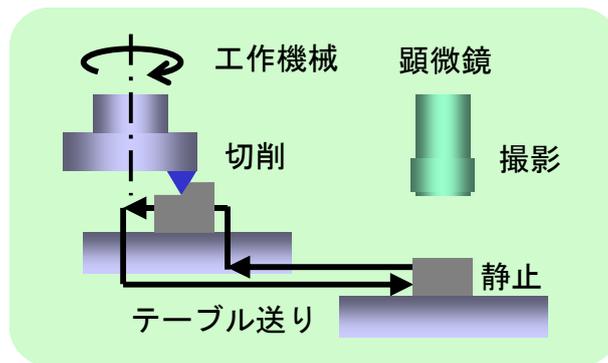


図2-6-1 シリアルセクショニング観察システムの概要

(2) 連続加工による動作検証

作成した切削観察システムを用いて、被検査ワークを切削加工し、画像を取り込む作業を連続1000回繰り返し行い、多断面・長距離に渡る切削・観察が可能か動作検証を行った。検証した結果、正常に1000回連続動作をすることを確認した。この結果から、断面観察を連続的かつ全自動的に行うことが可能となった。

(3) 結論

被検査ワークを切削加工し画像を取り込む作業を自動的に連続的に行うシーケンスを作成し、正常に動作することを確認した。

2-6-3 技術課題と今後の取り組み

本研究において以下の点が課題となる。

切削、撮影の連続加工において、工具に欠損や異常磨耗が生じることがある。この工具の異常状態を検出し、鏡面生成不能となる前に観察を停止する技術を開発する。

さらにNC操作と画像操作の統合及び、操作性の向上を図り操作性の向上を目指す。また、段取り時間の短縮のためにさらなる自動化を進める。

2-7 取り込み画像の連続的三次元化技術の開発

2-7-1 研究開発の内容

取得した画像データを逐次CADデータに変換して三次元表現とする処理技術を開発する。

2-7-2 研究成果

(1) 三次元可視化

内部構造の三次元可視化には（独）理化学研究所「ものづくり情報技術統合化システム（VCAD システム）開発プログラム」の一環として開発されたレンダリングソフトウェア V-Cat の三次元可視化機能を利用した。撮影された断面画像ファイルを入力し、ソフトウェア内部にて画像処理や領域抽出を行い、内部構造の可視化や、注目要素のみの抽出、ボリュームを持った三次元構造データへの変換が可能である。得られた三次元データは有限要素法等の力学解析のための入力データとして利用できる。

(2) 三次元可視化の一例

断面観察データから材料内部に存在する介在物構造の三次元可視化を実施した。図 2-7-1 にステンレス鋼内部介在物の三次元モデルの一例を示す。介在物の数ミクロンの形状が正確に再現されている。

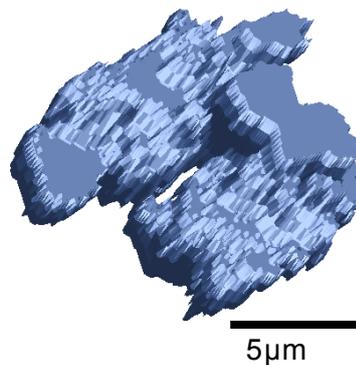


図 2-7-1 材料内部の介在物の三次元形状

(3) 結論

2次元データである観察画像を多断面に取得し、三次元モデルを構築することで、材料内部の三次元形状の観察が可能となった。

2-7-3 技術課題と今後の取り組み

本研究で作成した高分解能デジタル画像取得システムと（独）理化学研究所の VCAD システムとの間での取得画像データの連動性を高めることが、今後の課題である。

この報告書には、委託業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産権等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通例の取扱いにおいて非公開とする。ただし、行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成11年法律第42号）に基づく情報開示請求の対象の文章となります。