構造用非鉄合金の切削加工

岩手県工業技術センター　飯村　崇、　古川直樹

１．緒　言

近年、小径エンドミルの開発が進み、φ0.01mm のエンドミルが一般的に販売される様になった。これに伴い、従来は放電加工などで加工していた機械部品の微細部分をマシニングセンタで同時加工し、段取り作業による時間のロスと加工精度低下を防ぐことが可能となる。特に医療機器は生体への負荷の低減を目的に、また、航空機や自動車産業は部品の多機能化を目的に、今後さらに小型化が進むと考えられる。しかしこのような特殊用途に使用される Co 合金やベリリウム銅などの特殊な材料は、微細工具による加工実績がほとんど表に出ていないため、このような加工の注文を受ける際にも、実際にテストカットを行う必要があったり、そもそも得体の知れない材料であると断ってしまったりと、商機を逃がしてしまう可能性が高い。その為、小径工具による切削の実施例を公開することができれば、東北の企業のこのような加工への参入がスムーズになり、岩手県で製造される CCM 合金を使用した医療機器産業などへの進出のハードルを下げることも可能である。

そこで、生体材料として知られている CCM 合金（Co-Cr-Mo 合金）および、構造用の特殊材料として知られるベリリウム銅について、微細加工実験を行い、①加工条件と②その条件で加工した際の加工物表面、③工具表面を調査し、用途にあった加工ができる様にデータを提供する。

２．CCM 合金の切削加工

生体材料として、人工関節の骨頭や、義歯床などに使用されている Co-Cr-Mo 合金について、小径エンドミル（φ1mm）で加工を行い、工具寿命と被削材の表面粗さを比較する。

２．１　CCM 合金の特性

耐食性・耐摩耗性が高い材料であり、医療用の材料として、義歯床や人工関節のように強度と耐摩耗性が必要とされる部分に多く使用されている。岩手県の株式会社エイワでは、東北大千葉教授を中心に進められた CCM 合金開発事業の中で、CCM 合金を製造販売する体制が整い、股関節用の棒材や義歯用のディスク材が作られている。この合金は独自の結晶組織制御技術により、Ni レスにもかかわらず高延性で高加工性を有し、さらに高機械強度・高耐摩耗性・高耐食性を持ち合わせている。すなわち、アレルギーを引き起こす Ni をほとんど含まない高機能生体用コバルトクロム合金となっている。表に、主な医療用材料と Co-Cr-Mo 合金の機械的特性を示す。なお、CCM 合金は加工による組織の緻密化で硬度を出す材料であるが、今回の実験には硬さが HRC43 の合金を使用した。

表１　医療用材料の特性比較

	仕上げ方法	降伏点[MPa]	引張強度[MPa]	破断伸び[%]	絞り[%]	硬度[HRC]
SUS420	焼入,焼き戻し	664	900	23	59	29
Ti-6Al-4V	溶体化時効	1100	1170	10	-	38
Co-Cr-Mo 合金(ASTM)	熱間加工	≧700	≧1000	≧12	≧12	28
Co-Cr-Mo 合金(エイワ)	熱間加工	1197	1643	28.9	31.8	50.9

２．２　小径スクエアエンドミルによる切削加工

2.2.1　加工条件

市販のφ1mm スクエアエンドミルを用いて切削加工を行い、CCM 合金の加工に適した大まかな条件の選定 2.2.2 と工具の選定 2.2.3 を行う。被削材の CCM 合金は、断面が□10×17mm の棒材である。各条件について、1 面加工（除去体積 10×17×1.5mm）を 2 回行い、工具表面の観察（ミツトヨ　QV-HYPER404PRO）と被削材表面の観察（Zygo 社 NewVIEW100）を行った。

表 1　使用工具

番号	メーカ	刃の枚数	種類
1	A 社	2	仕上げ用
2	A 社	4	焼き入れ鋼用
3	B 社	2	仕上げ用１
4	B 社	3	仕上げ用２（Cr 系コーティング）
5	B 社	2	CrN コーティング(銅、アルミ用)
6	B 社	2	DLC コーティング(アルミ用)
7	B 社	2	DIA コーティング（アルミ用）
8	B 社	4	焼き入れ鋼用
9	C 社	3	Co 合金用

表 2　加工条件

	条件 1	条件 2	条件 3
スピンドル回転数（rpm）	5000	10000	20000
送り速度（mm/min）	22.5	45	90
切り込み （軸方向×径方向（mm））	1.5×0.05		
加工液	エマルジョンタイプ		
送り方向	アップ/ダウン交互		
加工機	DMG 社　HSC-55Liner		

2.2.2　加工条件の選定

表 1 の 1 番の工具を使用し、表 2 の 1～3 の加工条件で実験を行った。

加工後の刃物先端の拡大図を図 1 に示す。条件 1 及び 3 については、1 面目加工時の刃先端の状況はコーティング剥がれや欠けなど、それほど顕著ではなかったが、2 面目のアップカット時にいずれも折損している。それに対し、条件 2 は 2 面の加工ができたことから、今回実験した中では条件 2 が最も適している。ただし先端には欠けが見られ、CCM 合金を大きく除去する加工にはこの工具はあまり適していない可能性がある。また、工具の種類によっても適する加工条件が変わってくることから、今後さらに条件を絞り込んでいきたいと考えている。

図 2 は加工面を ZYGO 社の NewView100 にて、観察した結果である。条件 1 の 1 面目は加工が問題なく進んでいることが、送り方向に規則正しく残っているカッターマーク（刃先によってつけられたと考えられる）から判断できる。しかし、2 面目の大きい凹凸に着目すると傾斜していることが確認でき、アップカットで加工する際の負荷が大きく、刃物がたわんでいた可能性があると考えられる。次に、条件 2 はアップカット側のカッターマークがきれいに残っており、2 面目においても問題なく加工できている。条件 3 については、2 面目で刃物のビビリが原因と思われる大きな凹凸が見られることから、既に加工限界に達していたものと考えられる。

以上の結果から、今回の実験では、折損せずに 2 面を加工し、加工物の表面にもカッターマークがきちんと残っている条件 2 が適していることがわかった。

図 1　工具観察結果

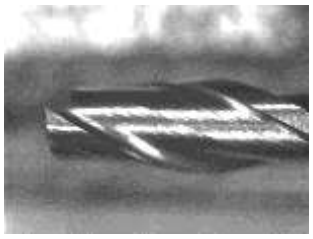
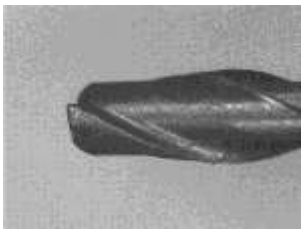
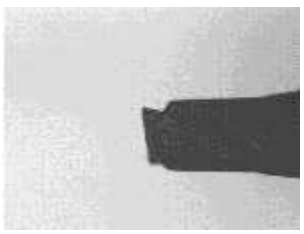
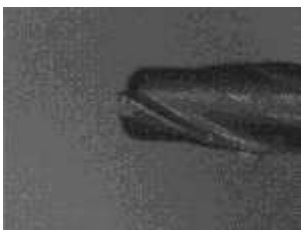
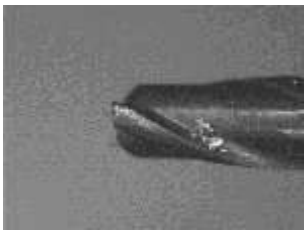
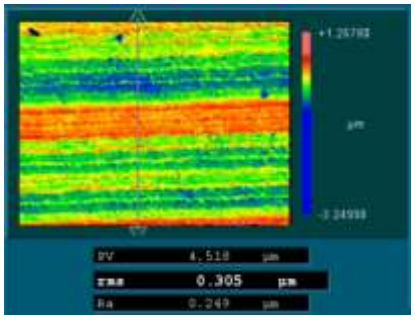
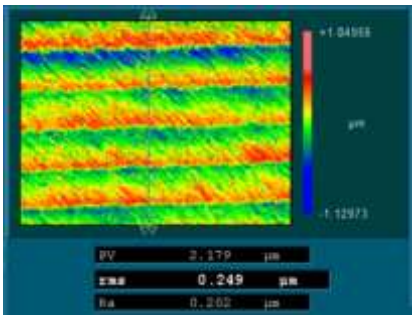
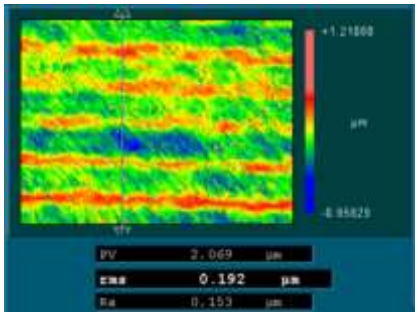
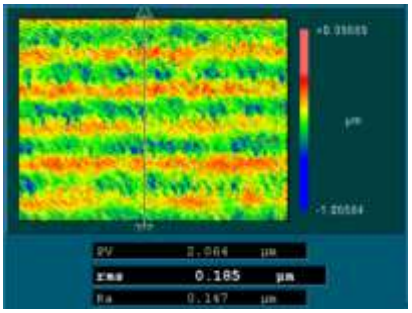
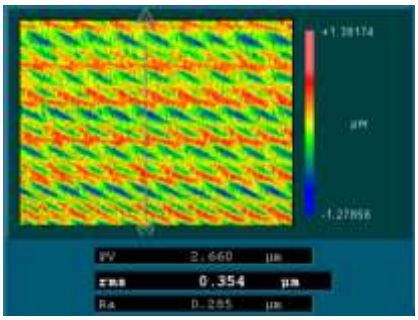
加工条件	工具初期	1 面目	2 面目	備考
条件 1			折損	アップカット時折損
条件 2				2 面加工完
条件 3			折損	アップカット時折損

図 2　被削材表面粗さ観察結果

加工条件	1 面目	2 面目	備考
条件 1			1 面目はカッターマークがきれいに残っている。ただし、所々大きく凹凸になっている。 2 面目は凹凸が傾斜になっており、アップカット時に刃がたわんでいたと思われる。
条件 2			カッターマークがきれいに残っている。

条件 3			1 面目はアップ側と見られるカッターマークが残っているがやや不規則。 2 面目は、規則的だが大きな凹凸が見える。工具の振動によるものと考えられる。

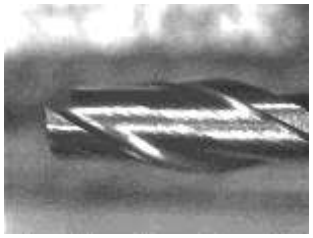
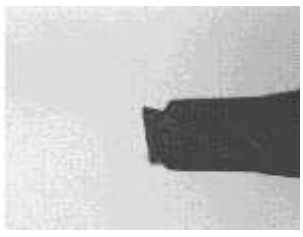
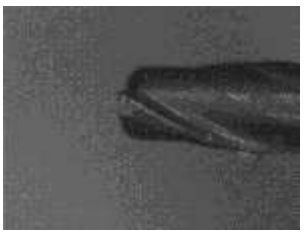
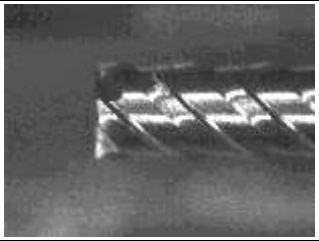
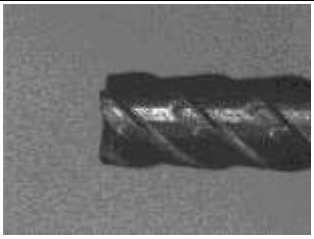
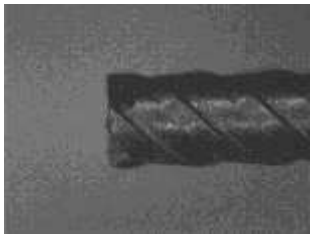
2.2.3　工具の違いによる加工能力の比較

2.2.2 で得られた結果を基に、加工条件 2 で表 1 に示す工具を用いて加工を行った際の、工具表面及び被削材表面の観察結果を比較する。図 3 に工具表面、図 4 に被削材表面の観察結果を示す。

今回の実験では、2 面を加工できたのは、焼き入れ鋼用の高強度高耐摩耗性の工具と汎用工具の一部のコーティングのみであった。このことから、いわて発 CCM 合金加工には、焼き入れ鋼用の高硬度なエンドミルの使用が最も適していると考えられる。汎用工具の中では、A 社のエンドミルと B 社の CrN コーティングを施したエンドミルのみが 2 面加工できている。CrN のコーティングは他のコーティングと比較し、硬さ、耐熱性、摩擦係数などの数値はそれほど高くない。特徴としては、非鉄金属の耐凝着性を高めてあるコーティングであることから、CCM 合金加工の加工には、耐凝着性を高めたコーティングが有効であると考えられる。同様に耐凝着性を高めたコーティングとして、ダイヤ及び DLC があるが、過去に研削砥石の試験を行った際、ダイヤモンド砥石による CCM 合金の加工では砥石の摩耗が激しく、加工が進まなかったのと同様に、工具がすぐに折損してしまった。原因としては、CCM 合金に含まれる Cr とダイヤや DLC の炭素が結合し Cr 炭化物を作るために、コーティングがすぐに効果を失ってしまったためと考えられる。また C 社の CCM 合金用エンドミルであるが、いわて発合金は通常の CCM 合金と比べ硬度が高く、工具への負荷が大きいために十分にその能力を発揮できなかったものと考えられる。図 4 を見ても、焼き入れ鋼用の刃物 2 本による切削面が規則正しい凹凸と、刃先によってつけられたと考えられる細かいカッターマークで構成されており、安定した切れ味が続いていることが確認できた。

以上のことから、いわて発の CCM 合金加工には、焼き入れ鋼用のエンドミルを使用するのが望ましいと考えられる。

図 3　工具表面観察結果

工具番号	工具初期	1 面目	2 面目	備考
1				2 面加工完 一部欠け有り
2				2 面加工完

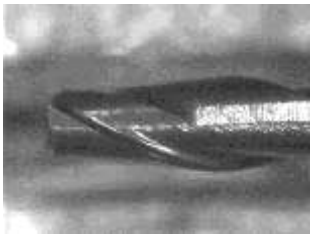
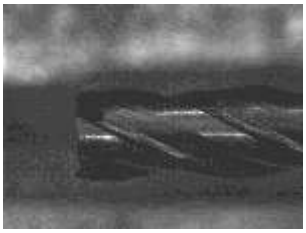
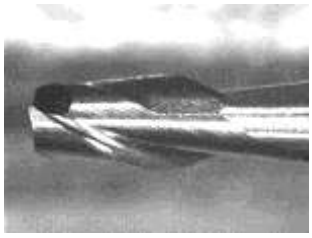
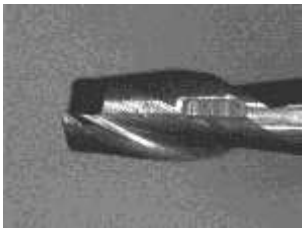
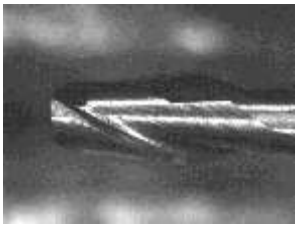
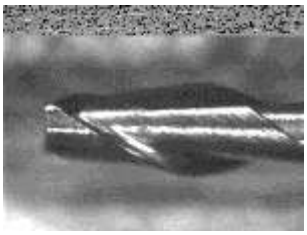
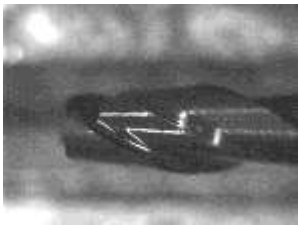
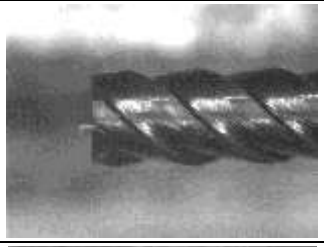
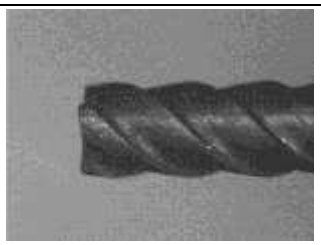
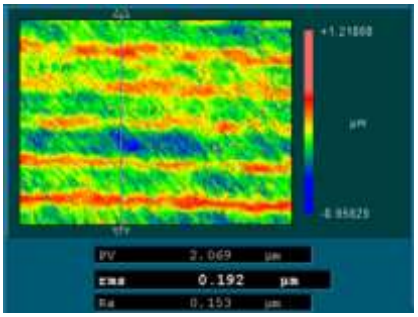
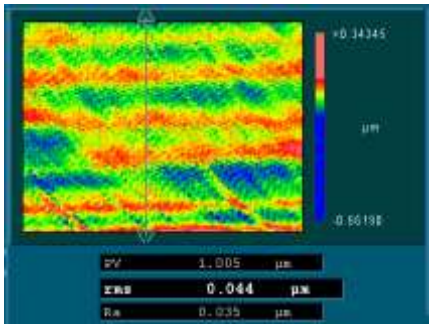
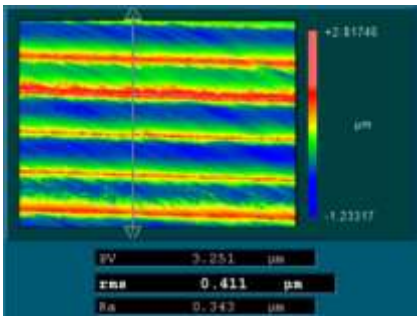
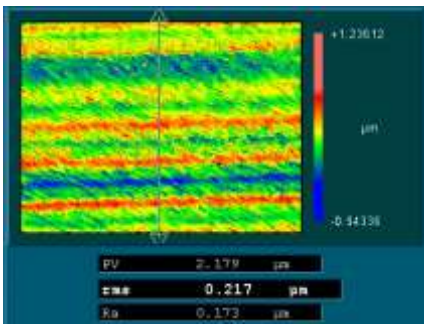
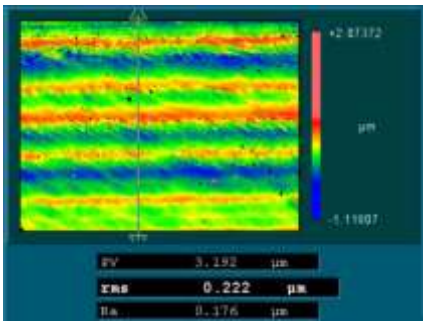
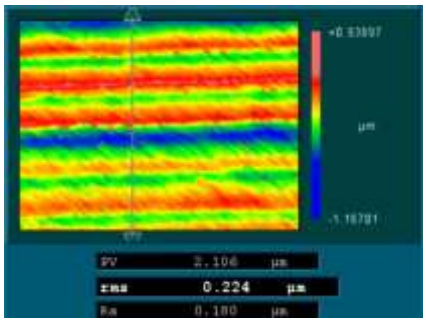
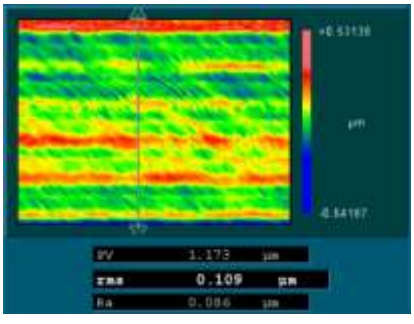
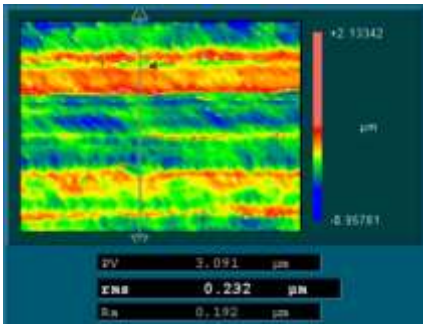
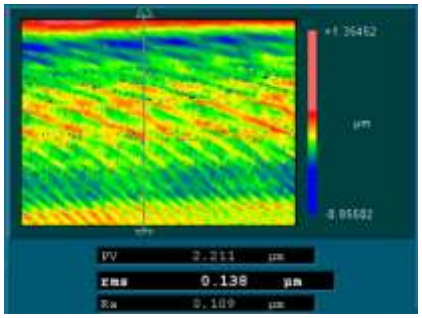
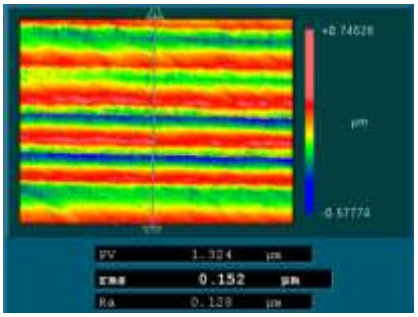
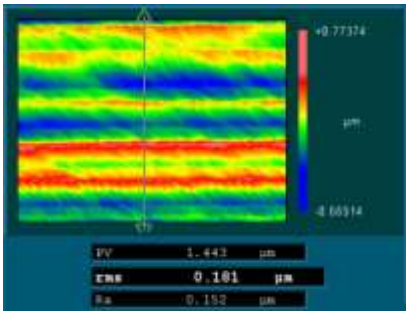
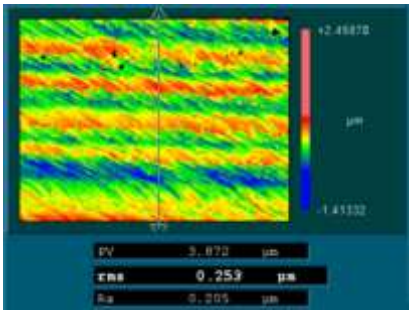
工具番号	工具初期	1面目	2面目	備考
3		折損	ー	アップカット時 折損
4		折損	ー	アップカット時 折損
5				2面加工完 一部欠け有り
6		折損	ー	アップカット時 折損
7		折損	ー	アップカット時 折損
8				2面加工完
9		折損	ー	アップカット時 折損

図 4　被削材表面粗さ観察結果

工具番号	1 面目	2 面目	備考
1			カッターマークが残っている。
2			全体的にカッターマークが見られ、安定して加工できている。
3		折損	刃先で切っている様な細いカッターマークが見られないことから、既に刃先が傷んでいると考えられる。
4		折損	刃先で切っているカッターマークが一部にしか見られないことから、既に刃先が傷んでいると考えられる。
5			全体的にカッターマークが見られ、安定して加工できている。

工具番号	1 面目	2 面目	備考
6		折損	刃先で切っている様な細いカッターマークが見られないことから、既に刃先が傷んでいると考えられる。
7		折損	刃先で切っている様な細いカッターマークが見られないことから、既に刃先が傷んでいると考えられる。
8			全体的にカッターマークが見られ、安定して加工できている。
9		折損	刃先で切っている様な細いカッターマークが見られないことから、既に刃先が傷んでいると考えられる。

２．３　ボールエンドミルによる仕上げ加工（粗さ）

微細な部品の切削加工においては、加工物の表面粗さを低くする仕上げ加工が必要となる。そこで、ボールエンドミルによる仕上げ加工を想定し、エンドミルの径と粗さとの関係を調査した。使用した工具は表 3 に示す 5 種類である。加工条件は表 4 に示す通りで、マシニングセンタによる被削材上面の仕上げ加工（取り代 0.2mm、スキャロップ値 2.5μm)を想定している。径方向の送りは、目的のスキャロップ値となる送り量を計算により求めた。

図 5 に、実験結果を示す。R0.5mm の場合、目視での評価では、加工面に若干のうねりが見られる。これは工

具径φ1mm に対し、軸方向の切り込み 0.2mm が大きく、工具の強度が不十分であったことが原因であると考えられる。また、粗さの測定値を見ると PV が 5.4μm と目標の 2.5μm よりも大きな値となってしまっており、表面粗さからも条件が適していないことがわかる。R1.0mm、R2.0mm については、目視での評価において良好な加工面が得られている。粗さについては R1.0mm の場合 PV4.0μm と大きな値であるが、R2.0mm については、PV1.1μm と目標値よりも低い値となっている。また加工表面にはカッターマークが確認できることから、加工については特に問題はないと考えられる。R4.0mm、R5.0mm については、目視においても送り目がはっきり確認できるため、用途によっては問題がある。粗さについては狙い通り PV2.0～2.5μm に収まっており、カッターマークも確認できることから、こちらも良好な加工が行われていると考えられる。

以上のことから、工具径が大きくなるほど加工自体は安定し、R4.0mm や R5.0mm になれば粗さも狙い通りの数値を出せる様になるが、目視による判断では R1.0mm や R2.0mm が良好である。また、R0.5mm についても、軸方向の切り込みをかえてバランスを取ることで、うねりのない良好な加工面を得られる可能性がある。

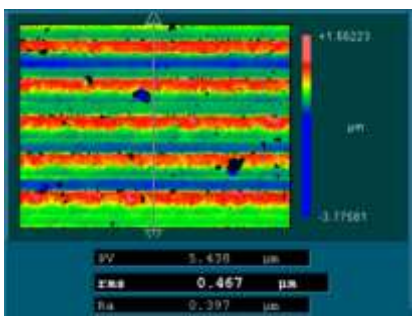
表 3　使用工具

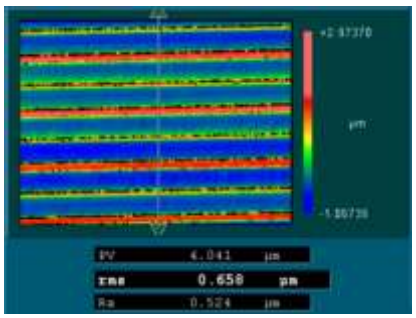
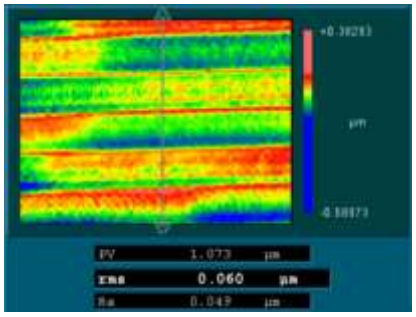
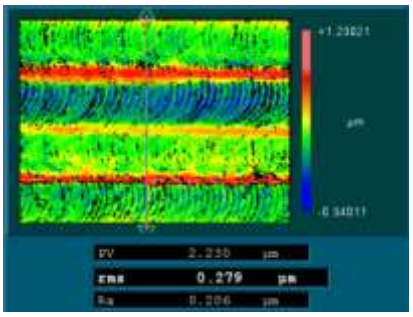
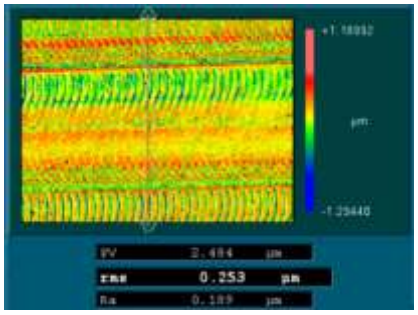
番号	メーカ	径	刃の枚数	種類
1	B 社	R0.5	2	仕上げ用コーティング ボールエンドミル
2	B 社	R1		
3	B 社	R2		
4	B 社	R4		
5	B 社	R5		

表 4　仕上げ加工条件

	R0.5	R1.0	R2.0	R4.0	R5.0
スピンドル回転数（rpm）	10000				
送り速度（mm/min）	45				
切り込み（Z 方向(mm)）	0.2				
切り込み（径方向(mm)）	0.05	0.07	0.10	0.14	0.16
加工液	エマルジョンタイプ				
送り方向	アップ/ダウン交互				
加工機	DMG 社　HSC-55Liner				

図 5　被削材表面粗さ観察結果

工具番号	粗さ	表面写真	備考
1			目視：表面に若干うねりが見える。 粗さ：数値が大きい。

工具番号	粗さ	表面写真	備考
2			目視：良好 粗さ：数値が大きい。
3			目視：良好 粗さ：数値良好
4			目視:工具送りによる凹凸がはっきり見える 粗さ：数値良好
5			目視:工具送りによる凹凸がはっきり見える 粗さ：数値良好

３．ベリリウム銅の切削加工

３．１　ベリリウム銅の特性

導電性の高い銅合金の中で、合金鋼に匹敵する強度とバネ性を持つ特殊材料で、古くからコネクタやスイッチ等に使用されており、現在でも携帯電話・パソコン・自動車・航空機などを中心に広く使用されている。東北でも多くの企業がプレス、曲げなどの加工を行っているものと考えられる。切削加工により発生する粉塵に毒性があるので、加工には注意が必要である。表 5 に他の金属材料とベリリウム銅の物性値の比較を示す。

表 5　ベリリウム銅の物性値

	密度 (g/cm^3)	ヤング率 (GPa)	降伏強さ (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び(%)
SUS304	8	197	205	520	40
黄銅	8.5	110	―	280	50
ベリリウム銅	8.2	130	―	900	―

３．２　工具の違いによる加工能力の比較

国内でも良く使用されている材料であるが、その用途の多くはコネクタであり、切削加工に関する事例は少ない。そこで、このベリリウム銅について、表 6 に示す 6 種類のエンドミルを用いて切削加工実験を行い、ベリリウム銅の加工に適した工具の選定を行うこととする。加工条件は表 2 に示す条件 2 を用いる。被削材のサイズは、断面が□10×30mm の棒材である。CCM 合金と同様に 1 面加工（除去体積 10×30×1.5mm）を 2 回行い、その際の工具表面および被削材表面の観察を行った。

表 6　使用工具

番号	メーカ	刃の枚数	種類
1	B 社	2	コーティング無し
2	B 社	3	仕上げ用
3	B 社	2	CrN コーティング(銅、アルミ用)
4	B 社	2	DLC コーティング
5	B 社	2	DIA コーティング
6	B 社	4	焼き入れ鋼用

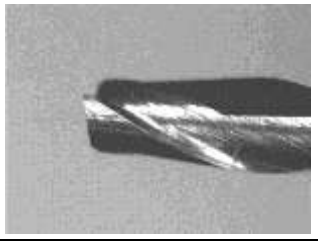
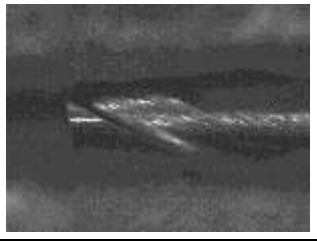
図 6 には加工後の工具表面を観察した結果を、図 7 には被削材の表面を観察した結果を示す。

工具については、今回の加工量ではコーティングのはげや刃の欠けの様な大きな変化が無く、コーティングのないタイプも含めて、いずれの工具においても問題なく加工できている。

加工物表面を見ると DLC コーティングの工具において、1 面目と 2 面目の表面状態が変化しているが、工具表面に変化は見られないことから、今のところ変化の原因はわからない。

今回の実験では、コーティングの違いによるベリリウム銅の付着性などについてはほとんど判別できないレベルであることから、コーティングによる差を確認するため、今後さらに時間をかけて調査を行っていく。

図 6　工具表面観察結果

工具番号	工具初期	1 面目	2 面目	備考
1				

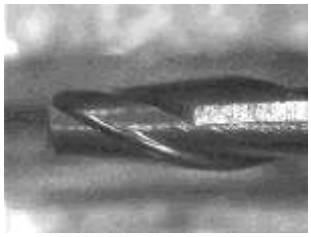
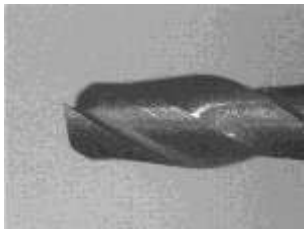
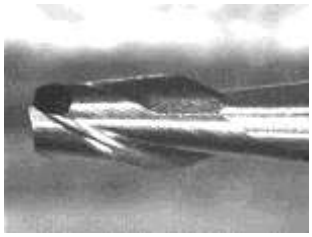
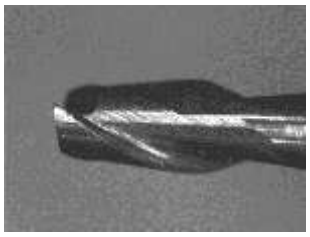
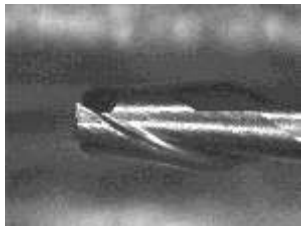
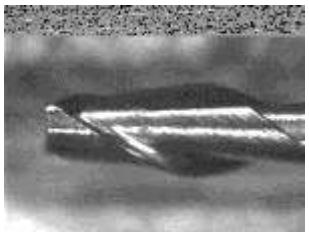
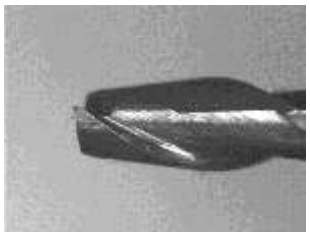
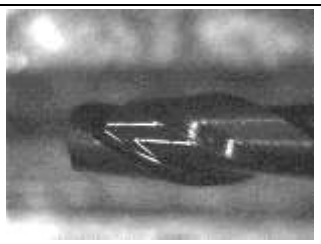
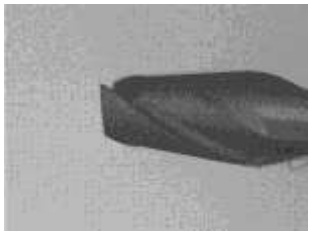
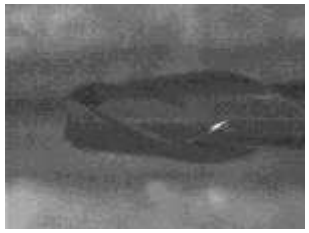
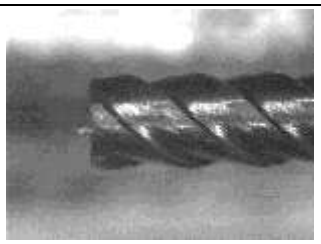
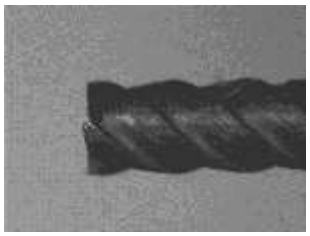
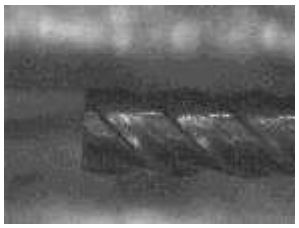
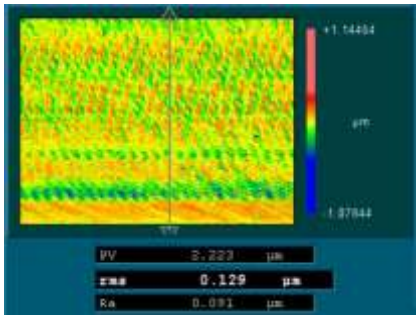
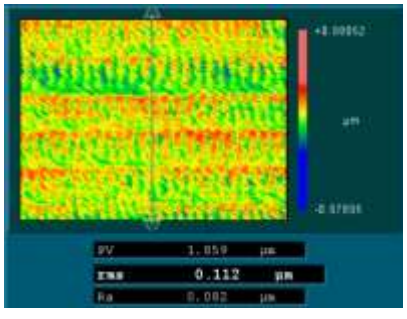
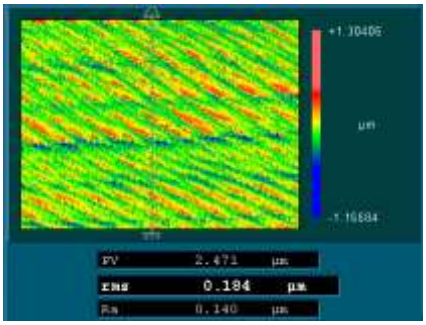
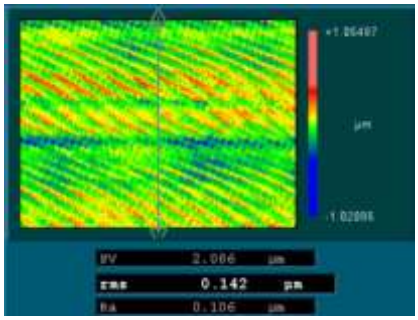
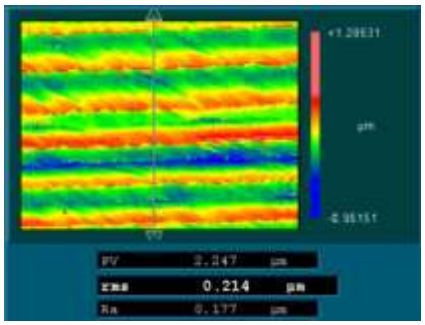
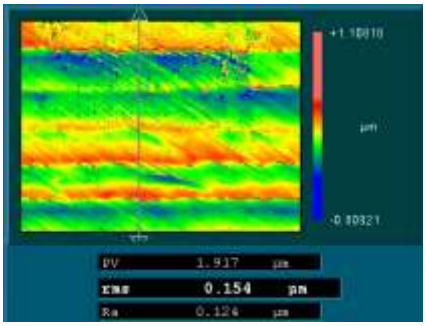
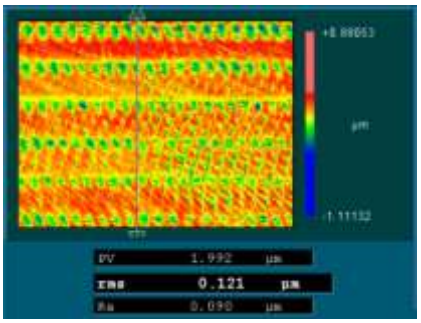
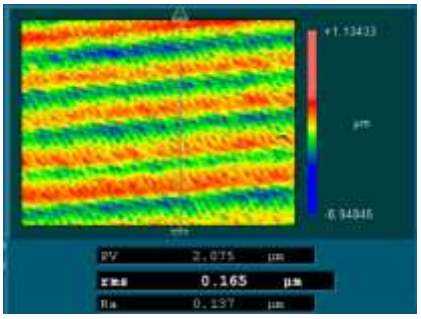
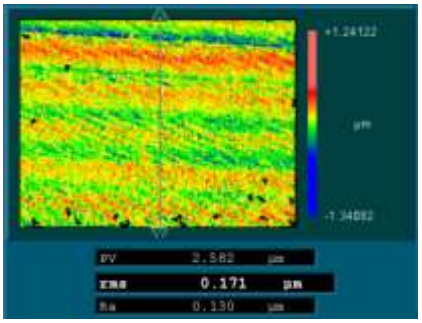
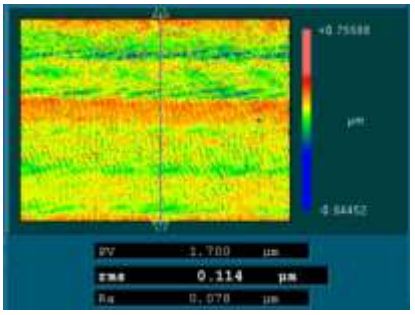
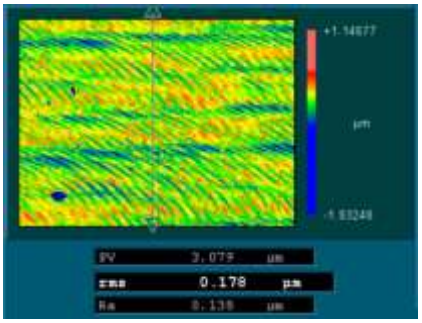
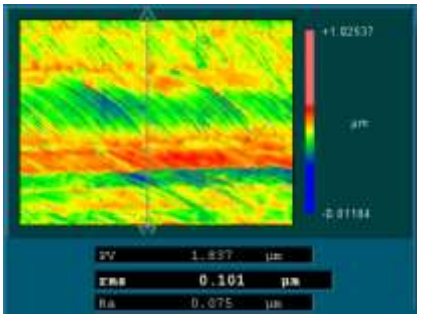
工具番号	工具初期	1 面目	2 面目	備考
2				
3				
4				
5				
6				

図 7　被削材表面粗さ観察結果

工具番号	1 面目	2 面目	備考
1			表面の状態がやや変化

工具番号	1面目	2面目	備考
2			
3			
4			表面状態が変化
5			表面状態がやや変化
6			表面状態がやや変化

４．結　言

本研究により以下のことが明らかとなった

（１）株式会社エイワ製のいわて発 CCM 合金の加工には、焼き入れ鋼用のエンドミルを使用する必要がある。これは、従来の CCM 合金と比べ高い硬度を有するためであると考えられる。また、あえて汎用工具で加工する場合には、CrN のコーティングの様に、耐凝着性を高めたエンドミルを選択すると良い。ただし、ダイヤや DLC は Cr との化学反応が原因と思われる摩耗が進むため適さない。

　折損は全てアップカットの際に起こっており、取り代が大きい場合は CCM 合金加工における工具寿命を考えると、アップカットを極力避けた方が良いと考えられる。

（２）CCM 合金の表面をボールエンドミルで仕上げる場合、目視では R1.0mm～2.0mm が、粗さの数値では R2.0mm 以上が適しており、必要とされる機能に応じて使い分けると良い。

（３）ベリリウム銅の加工においては、今回の実験では加工量が少なくコーティングの違いによる差を確認するには至らなかった。今後追加で確認を行っていく予定である。

また、今回は触れていないが、工具への被削材の凝着の様子や、カッターマークと工具形状の関係、バリの発生など多くの評価項目が考えられることから、今後も継続して実験を行っていく予定である。