

平成 26 年度採択
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「ニアネットシェイプ素材と高効率直彫り加工による
大型超硬金型の一貫体制製造技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成 29 年 3 月

担当局 中部経済産業局
補助事業者 公益財団法人 石川県産業創出支援機構

目 次（例）

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	3
1-2	研究体制	5
1-3	成果概要	7
1-4	当該研究開発の連絡窓口	9

第2章 本論

2-1	【1】ニアネットシェイプな超硬素材の製造方法を開発	10
2-2	【2】高効率な超硬合金直彫り切削工具の開発と 最適加工条件の抽出	22
2-3	【3】金型の試作と評価	37

第3章 全体総括

	ニアネットシェイプ超硬素材の開発	40
--	------------------	----

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) 研究開発の背景

複雑な形状の超硬合金金型の製造は、主に放電加工を利用して行われてきた。近年、金型の高耐久性とコストダウンのため、小型（ $\phi 20\text{mm}$ 以下程度）の超硬合金金型の一部は直彫り加工で製作されるようになってきている。しかし、比較的大型の冷間鍛造用超硬金型の直彫り加工については、高コストな工具費がネックとなり実用化がなされていない。

現在、型彫り放電加工では製作が困難な高精度の超硬合金金型を安価で製作するというニーズがある。このニーズはますます強くなってきており、超硬金型の大型・精細な直彫り加工の実用化に迫られている。同時に、この技術により冷間鍛造用超硬金型も同様に高耐久化、低コスト化することが可能となる。さらに、国際的な競争力を高めるためにも本研究での一貫体制で行う製造技術開発が必要となる。そこで、従来の型彫り放電加工による超硬合金金型の生産から、直彫り加工による生産への移行を視野に入れて、高耐久、高精度の超硬合金金型を市場に送り出すことにより、競争力を高めようとするものである。そのためには、超硬合金の素材焼結から、直彫り加工を見据えた生産工程を構築する必要がある。焼結状態が、最終製品形状に近ければ近いほど、加工が困難で、加工時間の長い直彫り加工の工数を低減させることが可能となる。一方、直彫り加工の加工条件を、現状の生産において最もコストの厳しい、工数と工具寿命を延長できれば、高精度化と低コスト化の相反する要件を満たすことが出来る可能性がある。

このように、素材から最終製品までの工程を改善することによって、直彫り超硬合金金型を、競争力のある製品として市場に送り出すことが目的である。

(2) 研究目標

研究開発最終年度までの目標は、ニアネットシェイプによる取り代減少により工具費を 50%削減し、工具寿命を従来工具比で 3 倍を目標とする。よって、工具費の削減はトータル 1/6 となる。リードタイムの目標として従来方法である型彫り放電加工 4 日に対して、直彫り加工を 3 日とする。（電極加工に要するリードタイムは超硬素材製作と同時進行するため含めない）面相度は従来の型彫り放電加工 Rz4 に対し、直彫り加工で Rz0.5。仕上げ面相度 Rz0.4 に対し直彫り加工で Rz0.2。また、直彫り加工時の面相度向上の効果により、磨き加工のリードタイムを 3 日から 0.5 日に削減することを目指す。

表 1.従来技術と新技術の比較

		コスト(万円)		リードタイム(日数)		品質		金型寿命(割合)				
		従来技術	新技術	従来技術	新技術	従来技術	新技術	従来技術	新技術			
		型彫り 放電加工	ニアネット シェイプ + 超硬直彫	型彫り 放電加工	ニアネット シェイプ + 超硬直彫	型彫り 放電加工	ニアネット シェイプ + 超硬直彫	型彫り 放電加工	ニアネット シェイプ + 超硬直彫			
超硬素材		焼結型素材		1		1	1%	0.20%	1	1.5		
		焼結型加工		7		2	—					
		焼結	10	12	7	3	—					
		小計	10	20	7	6						
金型加工	型彫放電	電極素材	12		0			1			1.5	
		電極加工	42		0							
	超硬直彫	型彫放電	22		4		Rz4.0					
		直彫り工具		47								
	その他加工	直彫り加工		17		3						Rz0.5
		研削	4	4	1	1						
		磨き	10	2	3	0.5	Rz0.4					Rz0.2
		小計	90	70	8	4.5						
合計		100	90	15	10.5							

(3) 研究開発の実施結果

(株)ノトアロイが担当するニアネットシェイプの目標は、コスト2倍以内、リードタイム 1 日短縮、加工取り代0. 2 %以内である。コスト、リードタイムは条件付きで達成、加工取り代は試作では達成していないが加工目標値を調整することで可能であることを確認した。今回の実績として、ベベルギアー型用素材、小判絞り型用素材の製作においてニアネットシェイプを実現した。

富山高等専門学校が担当する、高効率な超硬合金直彫り切削工具の開発と最適加工条件の抽出において、従来の工程を見直しつつ、高コストにより事業化が進んでいなかった、直彫り加工による超硬合金金型の製造に取り組んだ。そのために、加工工具の開発と加工条件について検討を行った。加工条件である回転数や送り速度、工具の形状であるすくい面高さ、刃数など効率よく超硬合金を切削するための機械工作条件を見出すことが出来た。さらに、刃物のコーティングの材質や厚さを検証し、工具の最終形状を決定した。開発した工具は、工具においては工具先端形状の工夫により垂直加工においても既存工具に近い寿命を達成している。工具角度を 30° 傾けた際には開発工具がどちらの材料に対しても安定して切削できている。試験後の工具先端の観察写真において、多少の磨耗は見受けられるものの欠けや破損は無く、本実験においては加工速度が 2 倍で既存工具の約 1.5 倍の工具寿命を達成した。従って、開発目標である加工効率が従来工具比 3 倍を達成することが出来た。これらの実施結果から、本事業申請時の目標を達成することが出来た。

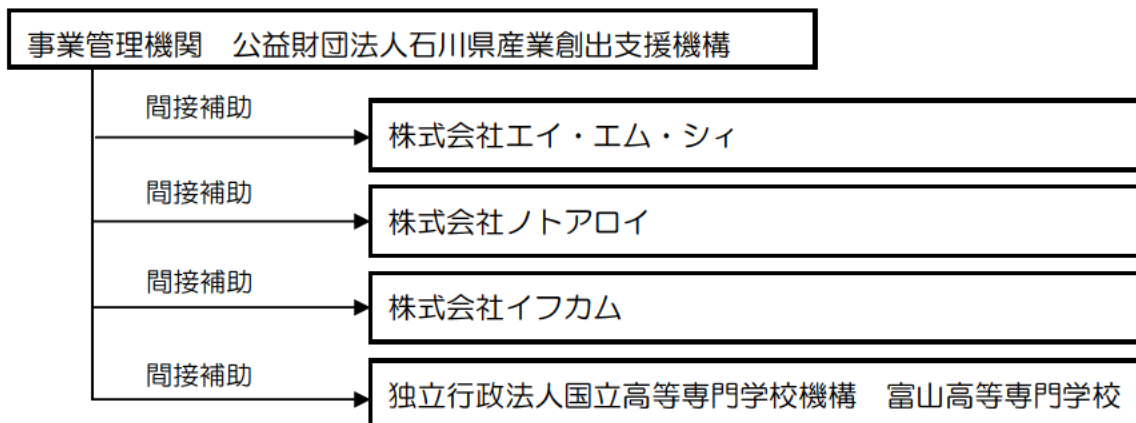
株式会社エイ・エム・シィが担当する、高効率な超硬合金直彫り切削工具の開発と最適加工条件の抽出において、様々な条件設定の試作工具の造形を行い、ダイヤモンドコーティングすることで実験用の工具を製作した。製作した工具により切削実験を行い、良いとされる組み合わせで、最終工具を製作・開発した。

金型の試作と評価において、開発した工具により試作金型 1 および試作金型 2 を製作し、開発工具実用性と今後の改善評価を行った。

試作した金型について、鍛造を行い寿命試験を実施。平均的な寿命をクリアし、耐久試験の実施中となっている。

1-2 研究体制

(1) 履行体制図



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 公益財団法人石川県産業創出支援機構

管理員

氏 名	所属・役職
平崎 直純	プロジェクト推進部長
畑 逸郎	プロジェクト推進部 技術開発支援課 主査

【間接補助事業者】

研究員

株式会社エイ・エム・シィ

氏 名	所属・役職
若宮 寛明	生産準備室 係長
堀 泰輔	技術課 係長

株式会社ノトアロイ

氏 名	所属・役職
林 憲一	技術部 課長
志田 穰太郎	技術部 係長
向出 保仁	技術部 主任

株式会社イフカム

氏 名	所属・役職
清野 信広	製造主担当

独立行政法人国立高等専門学校機構 富山高等専門学校

氏 名	所属・役職
山本 桂一郎	富山高等専門学校・教授
早川 幸弘	富山高等専門学校・技術長
飯田 祐也	富山高等専門学校・技術専門職員
高崎 雅志	富山高等専門学校・技術職員
梶谷 理香	富山高等専門学校・事務補佐員

1-3 成果概要

【1】ニアネットシェイプな超硬素材の製造方法を開発

総形型+固相焼結という工法でニアネットな超硬素材を製作した。課題は超硬と型との離型性であるが、完全に分離できる良い材料は得られなかった。そこで、切削が容易な材料を型材として用い、焼結後に削り取る工法によって目的を達成することができた。ここで選ばれた型に要求される特性は、焼結時の高温で変形しないだけの耐熱性、焼結時にバインダーと反応しない低反応性、超硬と近似の熱収縮率、焼結後除去のための快削性が求められる。これらの条件を満たす材料を調査し選定した。この工法では、焼結条件による影響が大きい
ため、パラメーター設計の手法によって最適な焼結条件を求めた。ただし、傾斜の急な形状部では充填密度が低く不安定な組織となったため、成形後に液相焼結の工程が必要となった。

コスト、納期、品質の目的に対する成果は以下の通り。

- 1) コスト 目標：2倍以内
 結果：2.2~2.7 倍
 ただし、型流用できれば 1.5~1.7 倍
 （リピート品の受注や生産実績増加によるバリエーション追加）
- 2) 納期 目標：6日（既存7日に対して1日短縮）
 結果：9日、形状によっては6日
 （凹凸の小さいものであれば一部の工程を削減可能）
- 3) 品質 目標：取り代 0.2%以内
 結果：達成可能
 ※期間内で製作した金型の実績は 0.27%であったが、加工取り代の
 量を多めに設定した目標値で加工したためであり、正しく目標値を
 設定すれば実現可能である。

最も達成できていないのが納期である。研究期間中に提案された改善案はまだ残されており、継続して研究を進めることで目標を達成したい。

【2】高効率な超硬合金直彫り切削工具の開発と最適加工条件の抽出

従来の工程を見直し、高コストにより事業化が進んでいなかった、直彫り加工による超硬合金金型の製造に取り組んだ。目標達成のためには、市販品ではない工具を新たに開発し、高効率化を目指す必要があった。工具メーカーではない企業体の研究において、自前で工具を設計、製作するということには、多くのハードルがあった。そのような中、本事業申請時の構想と、事業期間における研究開発の結果から、工具の形状を決めて実際に加工し実験を行った。その結果、思いのほか効率よく加工できる条件を見出すことが出来た。新規開発ということで、多数の加工条件の組み合わせをすべて行うことは、時間的、予算的に不可能である。パラメーター設計を用いて条件を絞り込んでいく手法は有効であった。加工条件である回転数や送り速度、工具の形状であるすくい面高さ、刃数など効率よく超硬合金を切削するための機械工作条件を見出すことが出来た。さらに、刃物のコーティングの材質や厚さを検証し、工具の最終形状を決定した。開発した工具を用いて、寿命試験を実施し、従来の市販工具に対して、有意な条件があることが分かった。すべての加工状況において、市販工具より優れていると言い切ることは出来ないが、それぞれの、得意な加工を組み合わせることによって既存の方法に対して、高効率化、低コスト化

を実現できる可能性を示唆した。加えて、すべての加工を研究開発した工具を用いて加工した金型を、実際の生産設備に適用し、試打ちを行った結果も良好であった。これらの結果から、本事業申請時の目標を達成することが出来た。そして、ニアネットシェイプのサブテーマの結果とあわせて、新しい超硬直彫り加工を含む超硬合金金型の製造工程を、生産コストと精度（品質）の関係より、あらゆる可能性を考慮しながら確立していく計画である。なお、平成 27 年度には、本年度実施した工具の形状については特許 1 件（特願 2016-16747）、平成 28 年度には 2 件（特願 2017-024870、特願 2017-026556）を出願し、本研究開発期間内に計 3 件の特許を出願した。今後は、研究開発実施機関の企業体において、事業化への準備を進めていく計画となっている。

【3】金型の試作と評価

1) 製作した最終形状の工具を用いて試作金型を 2 つ製作した。

試作金型 1（小判絞り型）

1) コスト	目標：83%	結果：183%
2) 納期	目標：3日	結果：2日
3) 品質	目標：Rz 0.5 μ m	結果：Rz 0.5 μ m
4) トータルコスト	目標：90%	結果：187%

ニアネット超硬素材の金型を荒加工から仕上げまでを製作した工具で直彫り加工した。納期は短く成ったが細長い内径加工のためエンドミルに側面からの力が多く発生し、びりによる工具寿命が著しく悪くコスト高となった。

試作金型 2（ベベルギアー型）

1) コスト	目標：83%	結果：80%
2) 納期	目標：3日	結果：3日
3) 品質	目標：Rz 0.5 μ m	結果：Rz 0.5 μ m
4) トータルコスト	目標：90%	結果：96%

ニアネット超硬素材の金型を荒加工から中仕上げまで、仕上げを精度の良い市販品で製作した工具で直彫り加工した。納期は目標通り、トータルコストは目標には至らなかったが従来よりも削減となり事業化が可能となった。手仕上げの 60% の削減により、形状精度が向上し旧 JIS 0 級を達成した。超硬直彫りは金型形状により得手不得手がある。条件は限定されるものの、今回開発した工具によりニアネット素材後の荒加工や中仕上げの効率が 3 倍となった。

2) 鍛造寿命テスト

試作金型を使い、鍛造寿命テストを実施している。金型寿命の目標は従来 1 年平均で 51,000（23,000～76,000）と示されていることから 1.5 倍の 79,500～100,000 クリアすれば目標達成といえる。現在は 23,000 個までクリア。この時点では金型に異常は見られなく継続中となっている。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人石川県産業創出支援機構

プロジェクト推進部 技術開発支援課 畑 逸郎

TEL : 076-267-6291

FAX : 076-268-1322

E-mail : hztz@isico.or.jp

株式会社ノトアロイ

技術部 林 憲一

TEL : 0767-38-1041

FAX : 0767-38-1044

E-mail : k.hayashi@notoalloy.co.jp

株式会社エイ・エム・シィ

技術部 若宮 寛明

TEL : 0767-38-8008

FAX : 0767-38-1344

E-mail : wakamiya@amcnoto.jp

独立行政法人国立高等専門学校機構 富山高等専門学校

教授 山本 桂一郎

TEL : 0766-86-5100

FAX : 0766-86-5110

E-mail : keichiro@nc-toyama.ac.jp

第2章 本論

2-1 【1】ニアネットシェイプな超硬素材の製造方法を開発

従来工法と新工法の工程を図 2-1-1 に示す。

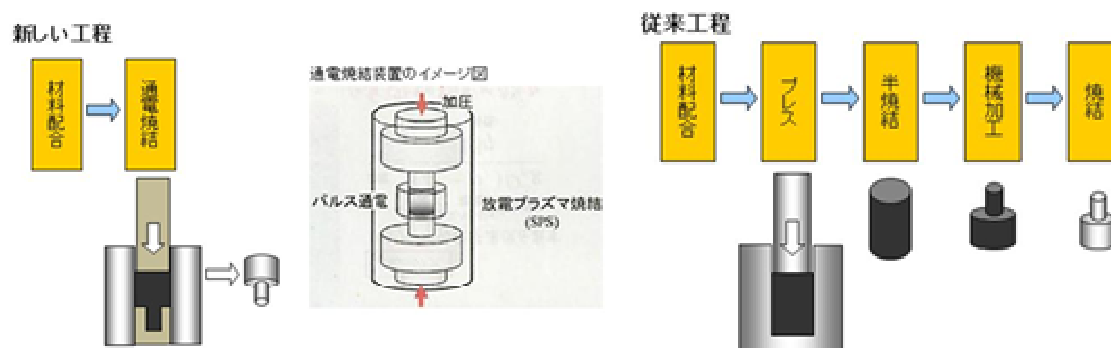


図 2-1-1 従来の工法と新しい工法

通電焼結による固相焼結の技術は従来からあるが、これに使われる金型は単純形状が使われてきた。金型に転写したい形状を加工して通電焼結することで、完成品（鍛造用金型）よりも0.1～0.2%肉付けしたニアネットシェイプな形状に超硬合金素材を製作することを狙う。このやり方で焼結することは理論的に可能であるが、どこまで寸法精度を追い込むことができるか、また弊害となる事象については未知数であった。

【実験1】

まずは単純に、既存の金型による転写でどのような症状が生じるかを確認した。金型に適当な彫り込み加工を施し、通電焼結の下型に当てて焼結を行った。実験の概要と型の彫り込み状態を図 2-1-2 に示す。

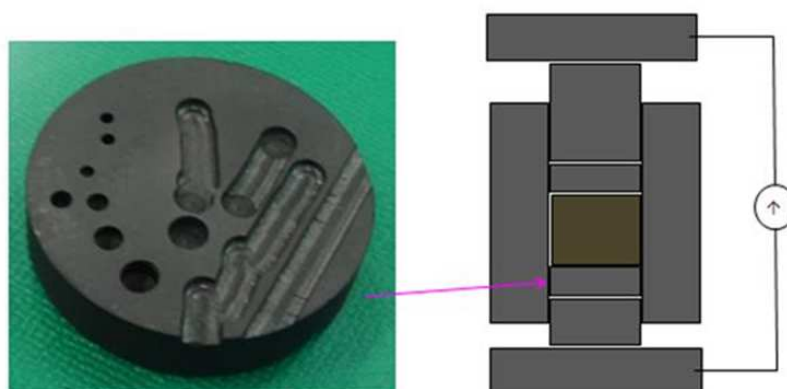


図 2-1-2 従来の工法と新しい工法

この実験では、型と超硬が完全に接合して分離できなかった。そこで、凹凸のある部分で切断し、断面を観察した写真を図 2-1-3 に示す。断面をみると、超硬合金は型形状が転写された形で焼結されていた。また、型が超硬に完全密着していることも確認された。

この実験によって、型に加工を施し通電焼結で転写するという手段によってニアネットシェイプな超硬合金を製造できる可能性に期待がもてることが示唆されたといえる。同時に、一番の課題は型と超硬合金が密着しない手段を見つけることであることもわかった。

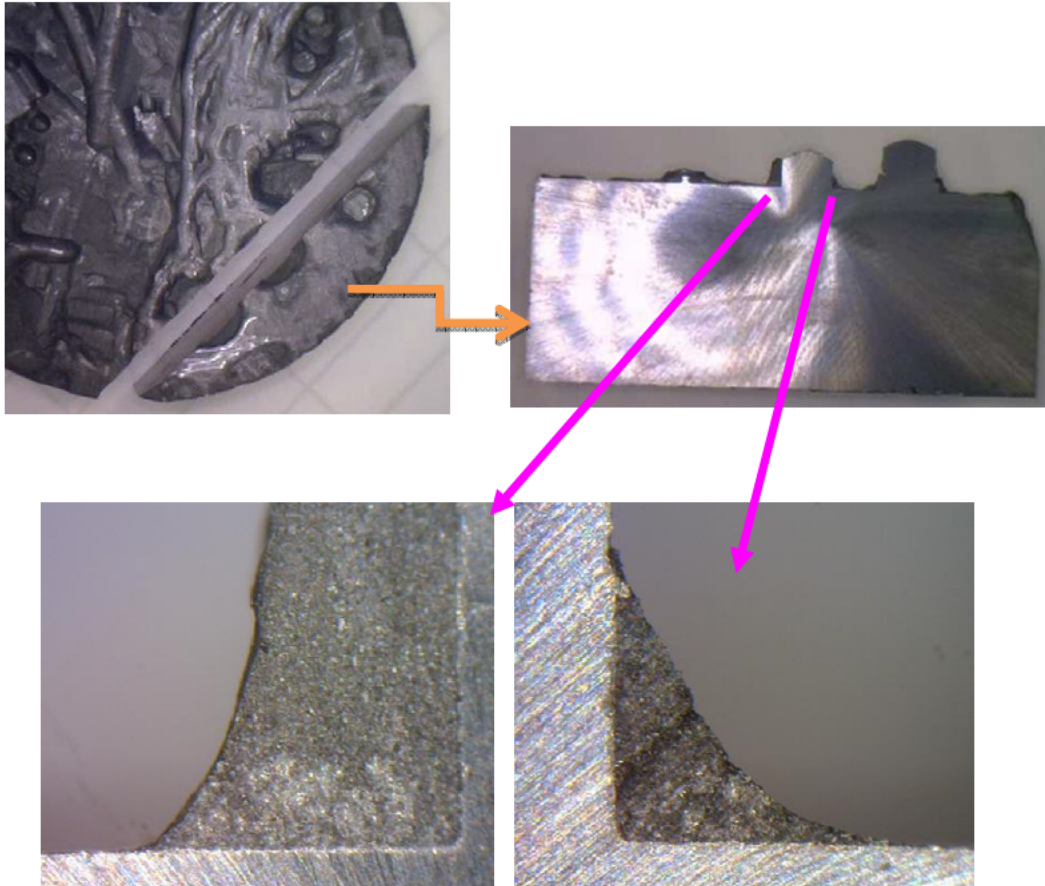


図 2-1-3 実験 1 サンプルの断面

【実験 2】

型と超硬合金を分離できるようにするため、型表面へのコーティングを 2 種類とりあげ、それぞれで焼結実験を行った結果は以下の通り。

- ① 金属膜コーティング . . . 型分離できなかった
- ② 粉体による表面塗装 . . . 型分離できた

②粉体による表面塗装で型分離できたため、凹凸を設けた型について②の条件でサンプルを製作し、転写性を評価した。実験の概要を図 2-1-4 に、結果を 2-1-5 に示す。

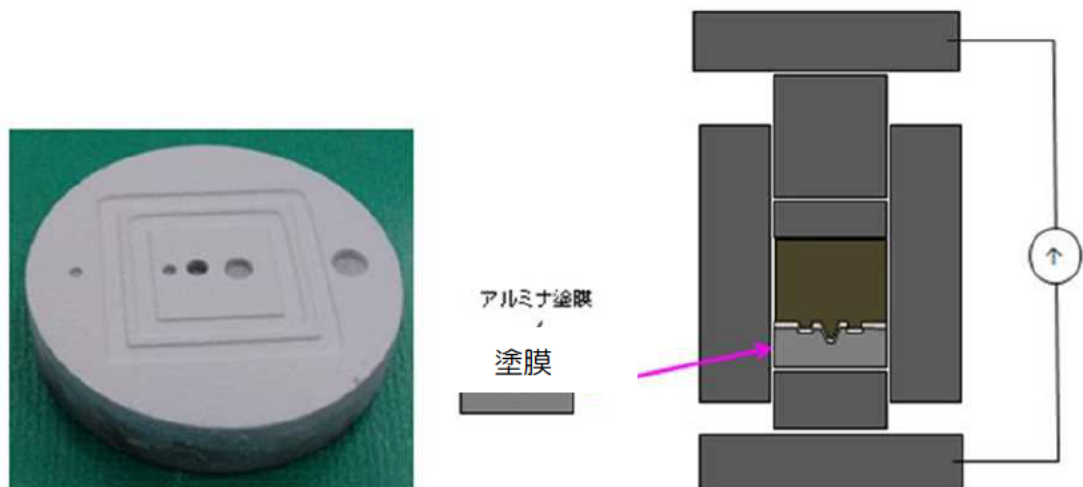


図 2-1-4 実験 2 の概要

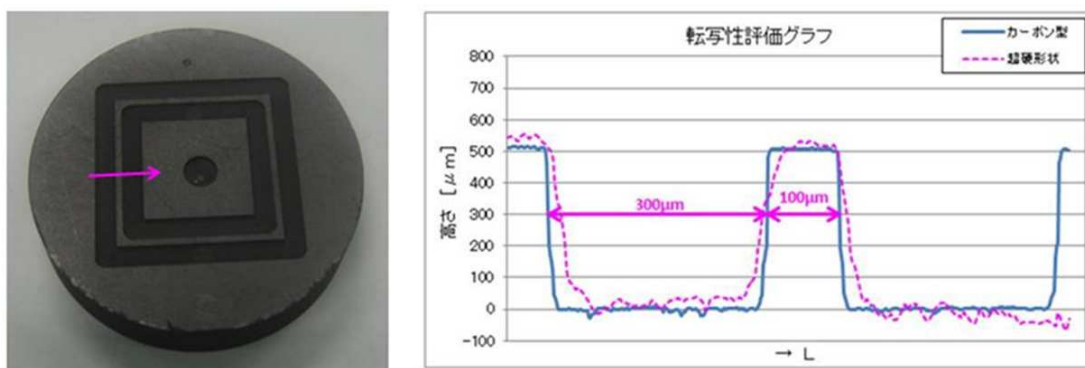


図 2-1-5 実験 2 サンプルの転写性

型表面に粉体を塗装することで、ニアネットな超合金を製作することができた。型と超合金との分離もできた。しかし、うまくいったのは深さ 0.5mm 程度の溝のみであり、深い穴部では側面の形状が乱れたり、型分離できなかった。ここまでの結論は、浅い溝やゆるい凹凸形状については、型に粉体塗装する方法でニアネットな兆候合金を製作可能であるといえる。次からは深い凹凸でも製作可能な条件を検討する。

【実験3】

ニアネット焼結に適した型材として求められる条件は、以下の通りである。

条件 1) 耐熱性 1500℃以上

条件 2) 超硬と反応しない(焼結後分離できる)

条件 3) 熱膨張係数が超硬と近い(焼結後の分離)

条件 4) 加工しやすい

これらの条件に近い材料として、アルミナとホウ素を選定した。このうち、アルミナについては加工によるツール摩耗が激しいため使えなかった。そこで、いくつか改善策を試してみたが、以下の結論となった。

① 快削性セラミック・・・非常に高額だったため、評価はしなかった

② アルミナ低密度焼結・・・切削性は改善されなかった

③ アルミナとカーボンのブレンド成形品・・・製作できなかった

これらの実験により、アルミナの選択肢を断念した。

次にホウ素について調査したところ、hBN焼結体が販売されており、それは高温特性に優れ切削性も良いとされている。どのメーカーにおいても通常純度品(BN97%)と高純度品(BN99.5%)を扱っている。そこで、その2種類の純度でサンプルを入手し評価した。実験概要を図 2-1-6 に示す。実験を効率化するために、上部と下部に別々の材質の型を配置して、1回の実験で2材質評価できるようにしている。

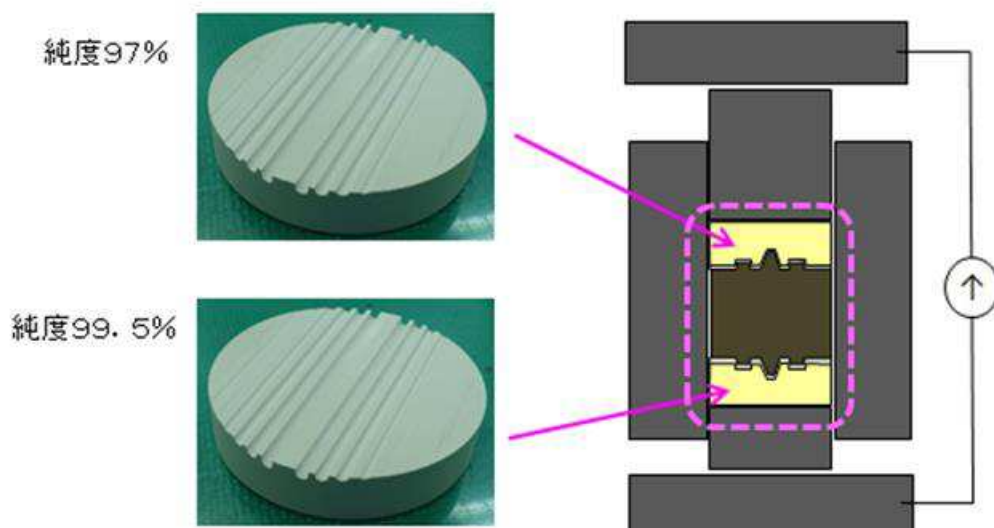


図 2-1-6 実験3の概要

HBN 焼結体は超硬と反応しないので型分離できることを期待したが、結果は分離できなかった。そこで、焼結したサンプルを中央で半分に切断し、断面を観察した。観察した写真を図 2-1-7 に示す。

高純度品（BN99.5%）側では、形状が崩れC oも溶出した。高純度品は型加工し易かったが、逆に結合強度が弱く脆い感触があったので、焼結時の圧力に対する保形性が弱いと思われる。

通常純度品（BN97%）側は、ほぼ形状転写しC o溶出も無かった。純度が低いほうが逆にC o溶出しなかったのは、融点の低い3%の不純物が流出することで超硬との間に膜を作ったものと考えられる。この不純物流出は好ましいものではない。

hBN材の最大の問題点は熱膨張係数である。図 2-1-7 右上に示す様に、熱膨張係数の差によりスキマが生じている。超硬の熱膨張係数 $6 \times 10^{-6}/K$ に対し、hBNは $0 \times 10^{-6}/K$ である。どのメーカーのものも、超硬に近い熱膨張係数の材料は無かった。焼結温度 $1200^{\circ}C$ において 100mm 当たり 0.7mm の計算となる。この分を見越した型設計をすることで、寸法は微調整できると思われるが、超硬に残留歪みが残る可能性が懸念される。

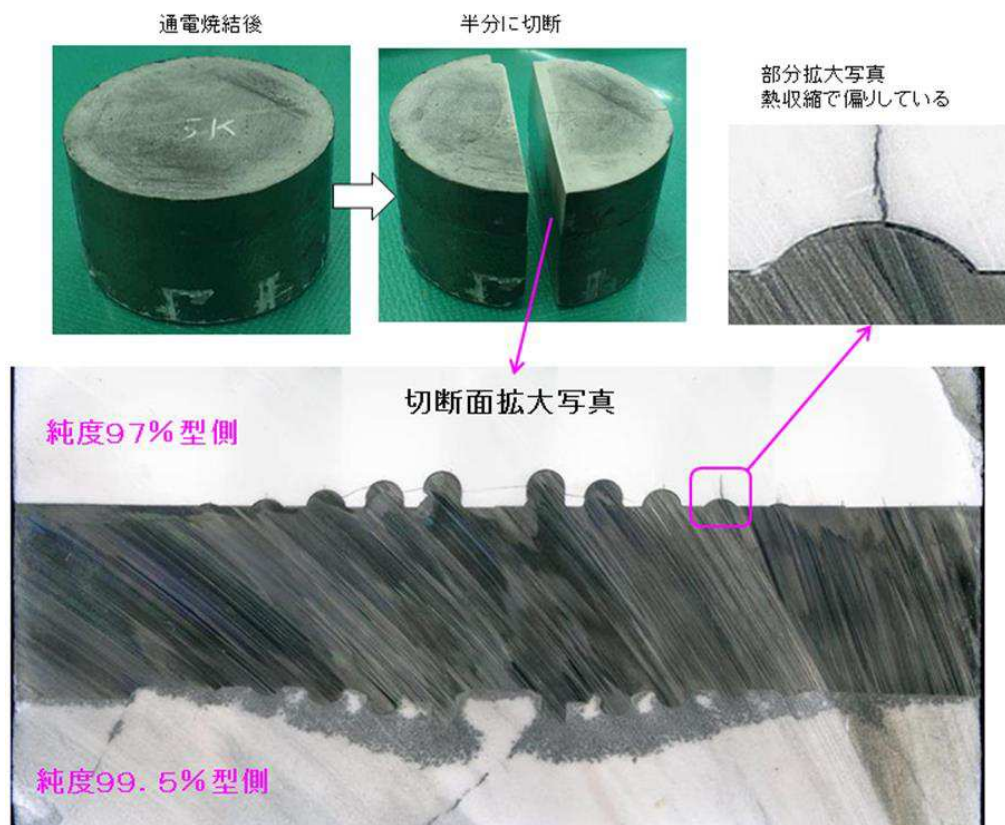


図 2-1-7 実験3サンプルの断面

【実験 4】

純粋なhBN焼結体では熱膨張係数の差により形状転写が困難であった。しかし、BNをベースとした複合材料が多数販売されており、有力な材料を複数入手した。全ての材質について通電焼結するのは手間がかかるため、簡易的に材料の上に超硬破材を載せて液相焼結雰囲気中で加熱した。予備実験で超硬材と反応しなかった①BN+AL₂O₃+SiO₂、②BN+AlNの2材質を評価することとした。実験の概要を図 2-1-8 に、焼結されたサンプルの断面写真を図2-1-9に示す。

- ・ BN+AlN材はCoが大きく流出した。
- ・ BN+AL₂O₃+SiO₂材はCoの溶出が無かったが、クラックが多数生じた。

このときの通電焼結条件は温度・圧力が高めに設定しており、条件の修正で調整できると考えられた。

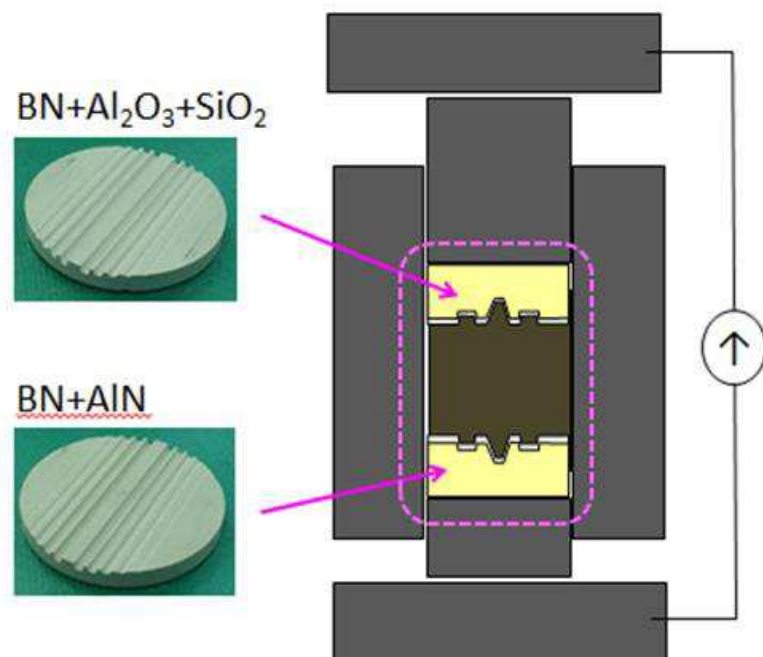


図 2-1-8 実験4の概要

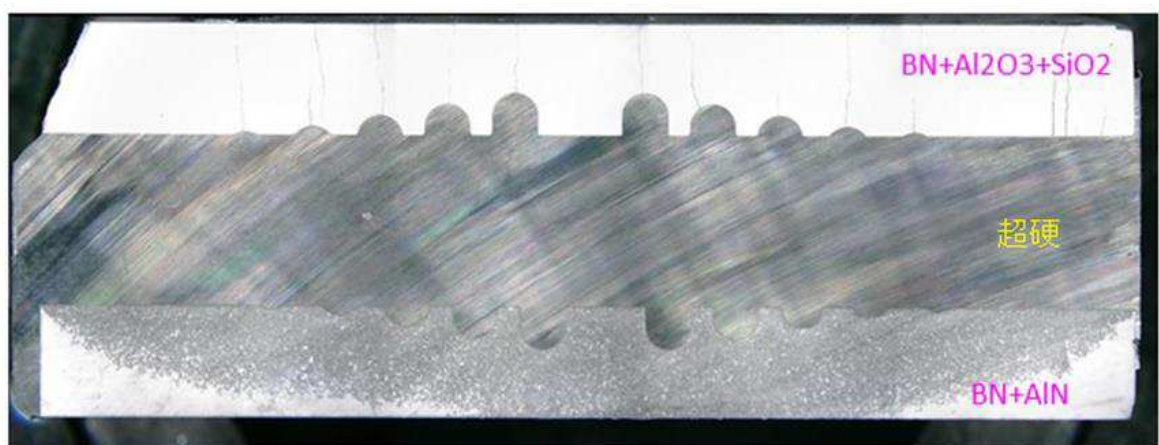


図 2-1-9 実験4サンプルの断面

【実験5】通電焼結条件のパラメーター設計

これまでの実験では、温度や圧力が高すぎるなど通電焼結の条件によって結果が大きく左右されてきた。焼結条件に対するCo溶出や充填性を正しく把握し最適な条件を得ることを目的とする。

基本機能は、目標形状になるよう均一充填し完成した超硬合金は直彫り加工後の形状が鍛造工程での摩耗劣化しにくいことである。この評価を行うべきであるが治具へのCo溶出の不安がある。そこで、品質特性ではあるが、Co溶出量の望小特性と充填性（充填できなかった空洞の望小特性）の2種類を評価した。テストピースは、極端に充填し難い形状を段階的に設けることで条件による充填性の差を評価し易くした。左右には四角柱の抗折試験片を切り出せる形状を設け、超硬合金としての一般的な品質特性も合わせて確認できるようにした。通電焼結装置の各制御条件を直交表L₁₈に割り付けた。（表 2-1-1）

表 2-1-1 制御因子と水準の割り付け

	1	2	3
A. 圧力解放タイミング	遅い	早い	
B. 収縮保持温度	なし	中温	高温
C. ピーク温度	中間	高い	低い
D. 昇温速度	遅い	中間	速い
E. 脈動焼結	なし	1回	2回
F. プレス圧力	弱い	中間	高い
G. 圧力開始タイミング	常温	中温	高温
H. e			

各評価の要因効果図と確認実験の結果を図 2-1-10 に示す。確認実験の結果、再現性が認められるため要因効果図は信用できるといえる。Co溶出ではピーク温度の影響が特に大きく、それ以外の因子の影響はほとんど無いとわかった。充填率では、やはりピーク温度の影響が大きいことが読みとれるが、それ以外の因子にも若干傾向があることも確認できた。ピーク温度についてはCo溶出と充填性は相反するという傾向はおおよそつかめていたが、今回の実験での水準2がバランスの良い位置であることがわかる。

品質特性の要因効果図を図 2-1-11 に示す。硬さの再現性はそれなりにあるが、抗折力は全く再現性が無かった。硬さの傾向はCo溶出による組織変化に依るものと思われる。抗折力に起因する要因は多くあるが、Co溶出や非充填など悪すぎるサンプルで評価したためと思われる。

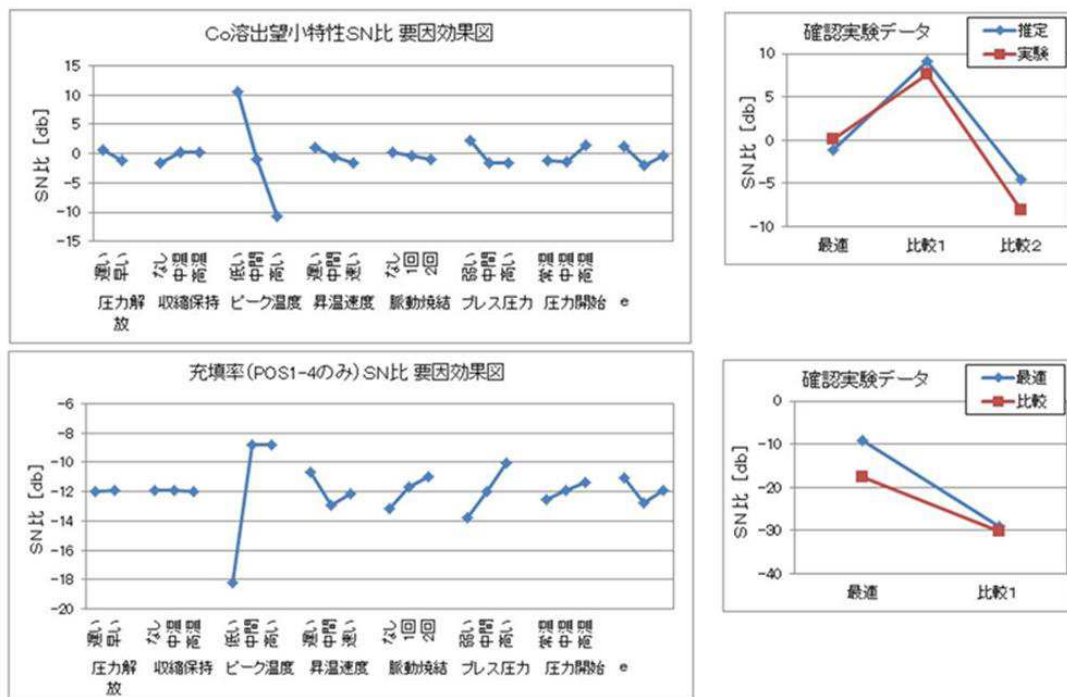


図 2-1-10 要因効果図と確認実験データグラフ

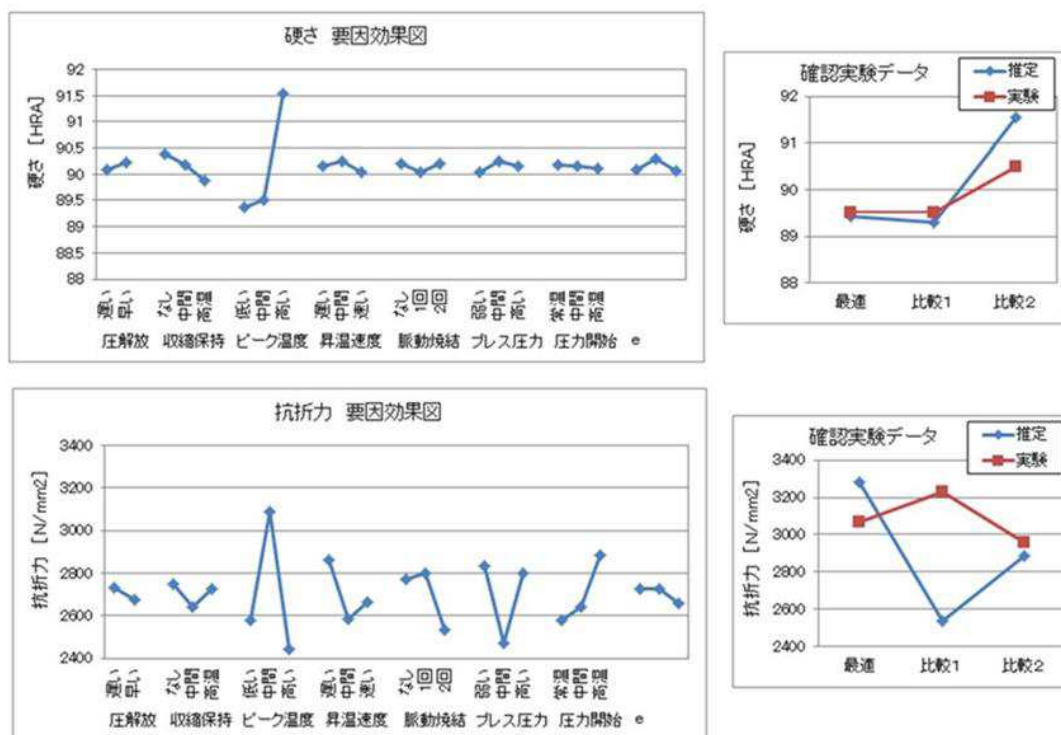


図 2-1-11 品質特性の要因効果図と再現性

パラメーター設計で通電焼結条件の最適条件を得ることができた。ここでいう最適条件とは、充填性が良く型への Co 溶出が発生しにくい条件である。

【実験6】

実験4で選定した型材（BN+AL₂O₃+SiO₂）を使い、実験5で得た通電焼結の最適条件でサンプルを製作した。型形状は、ペベルギア型とした。実験用の小さいφ50の材料をマシニングで加工して製作した。実験6の概要を図2-1-12に示す。

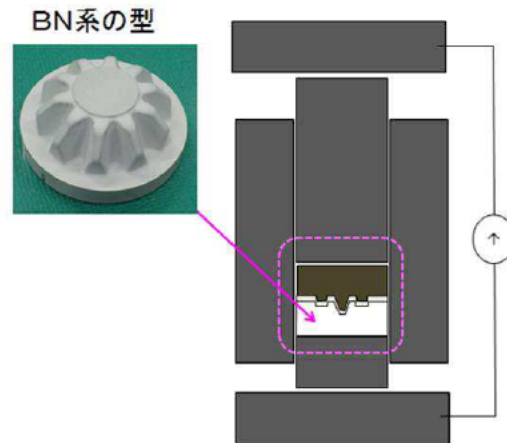


図 2-1-12 実験6の概要

焼結した超硬と型は分離できなかった。そこで、サンプルを半分に切断し、断面を観察した（図2-1-13）。大きなCo溶出は無かったが、若干の溶け出しが観察された。型分離できないのはこのためと思われる。左上部にクラックが生じていたが、Coの溶出はなく、収縮時に熱膨張係数の差で発生したと考えられる。傾斜部にはCoプールが観察された。

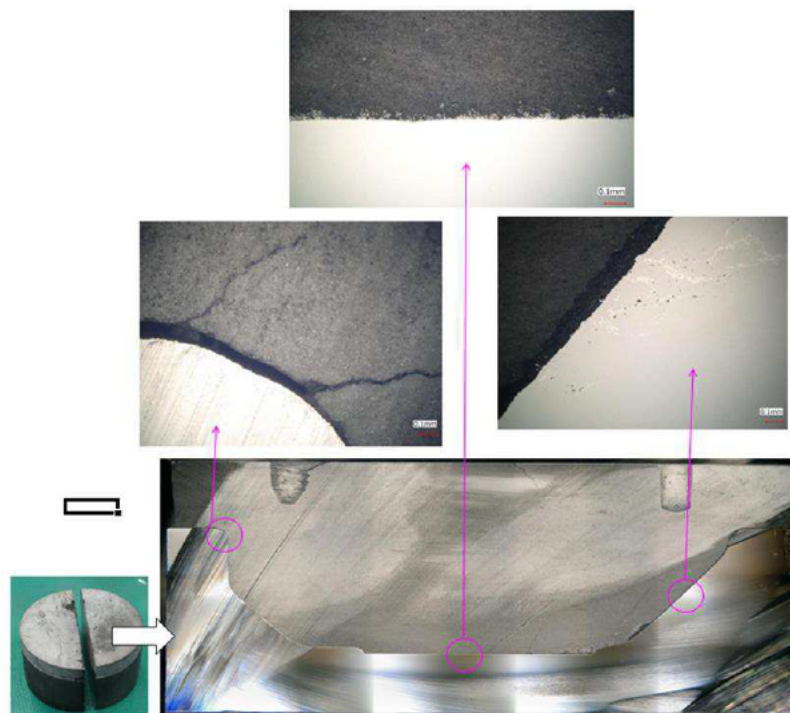


図 2-1-13 実験6サンプルの断面

【実験7】

BN系の型材で型分離できなかった。つまり、型材は焼結後に切削で除去しなければならない。とすれば、高額な材料を使わず従来材に金属コーティングしたもので可能である。ただし、Co溶出対策は必要であるので、密度の高いタイプの従来材を形状加工後に金属コーティングを施したものを型材として通電焼結してみた。

実験サンプルの断面写真を図 2-1-14に示す。大きなCo溶出は無かったが、若干の溶け出しが観察された。これは問題の無い範囲と考える。傾斜部にはCoプールが観察された。ベベルギア型の傾斜部におけるCoプールの発生は実験6でも発生していたので、急な傾斜がある場合には生じてしまうとわかった。

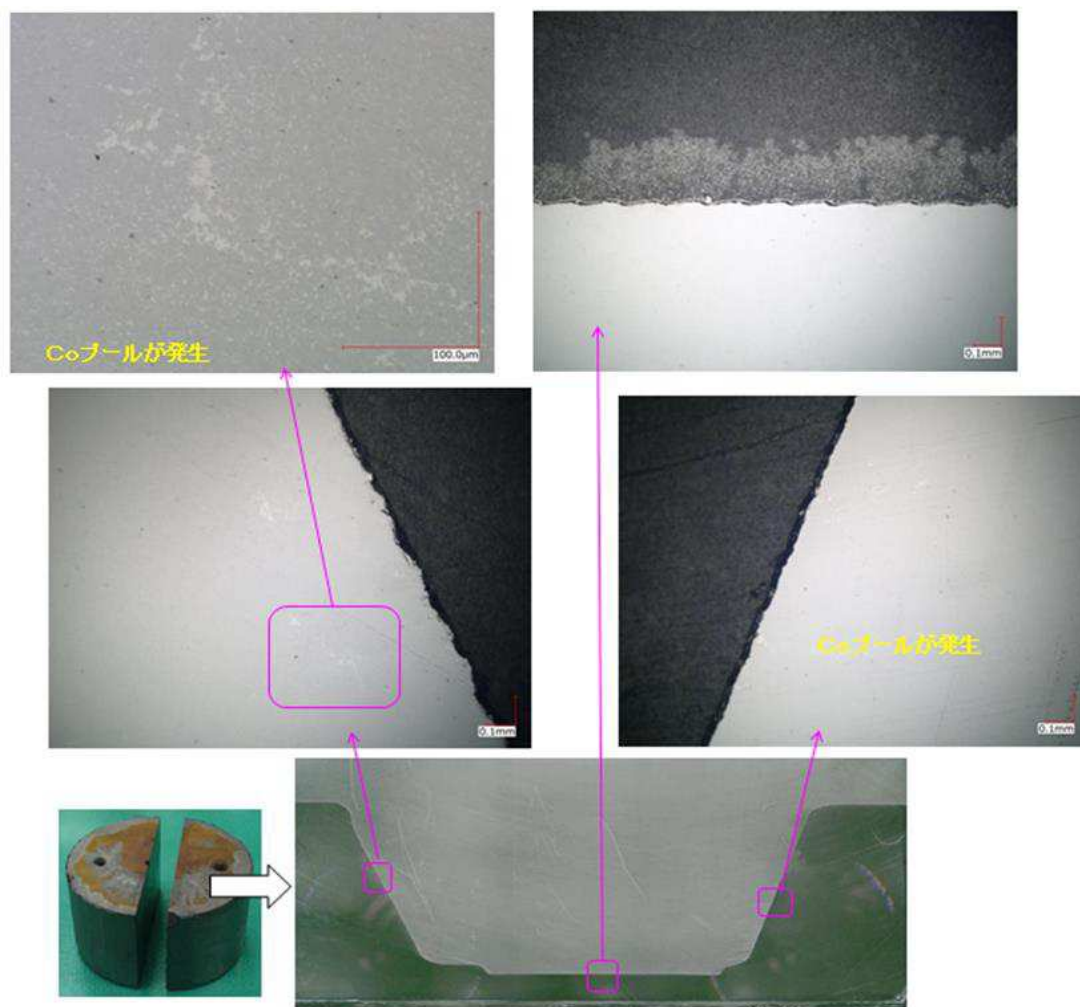


図 2-1-14 実験7サンプルの断面

【実験8】

C o プールは鍛造寿命に対して悪影響がある。通電焼結条件は最適条件を変えられないため、液相焼結工程を追加することを考えた（図 2-1-15）。通電焼結したサンプルを液相焼結し、C o プールが消えるか確認した。結果、C o プールを消すことができた（図 2-1-16）。

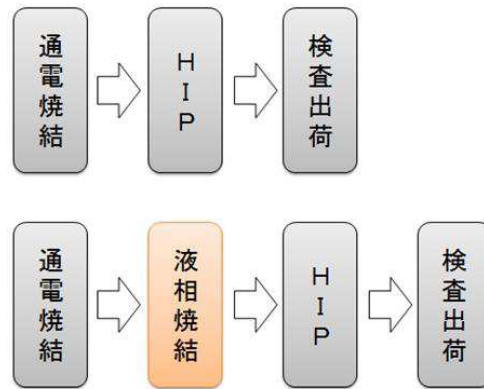


図 2-1-15 工程の追加

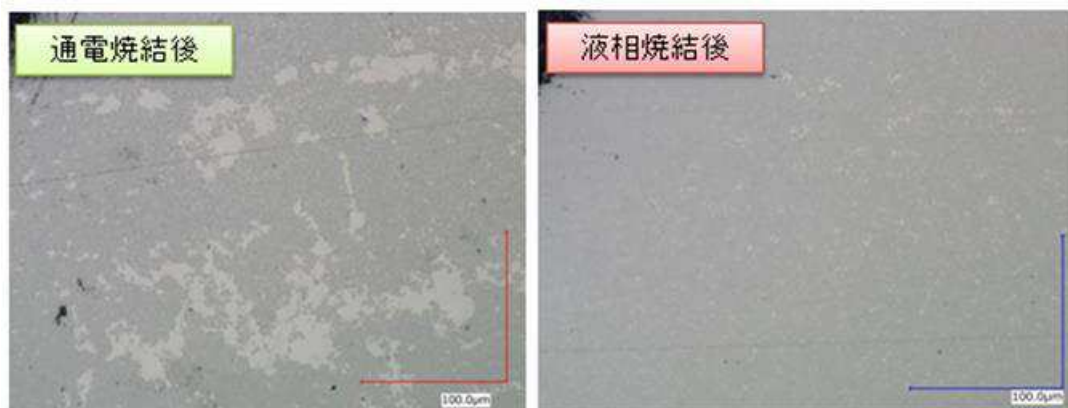


図 2-1-16 工程の追加によるC o プールの比較

最終的な工程は、以下の通りとなる。

1. 高密度の型材をマシニングセンターで型形状に加工する。
2. 型に金属コーティングを施す。
3. パラメーター設計で得られた最適条件で通電焼結する。
4. マシニングセンターで型を切削除去加工する。
5. 液相焼結する。
6. H I P 処理する。
7. 検査・出荷。

【金型用ニアネット超硬の製作】

最終的な製造手順で、実際の金型におけるニアネットシェイプ超硬素材を製作した。

1) ベベルギアー型

製作したサンプルの外観写真とギヤ部の測定データを図 2-1-17 に示す。

今回は安全をみて加工代を $150\text{ }\mu\text{m}$ になるように型加工した。寸法計測は歯面の両側寸法で計測しているため、 $300\text{ }\mu\text{m}$ がネライ値である。ばらつきはあるものの、ほぼネライ通りの寸法になった。平均値は調整可能である。

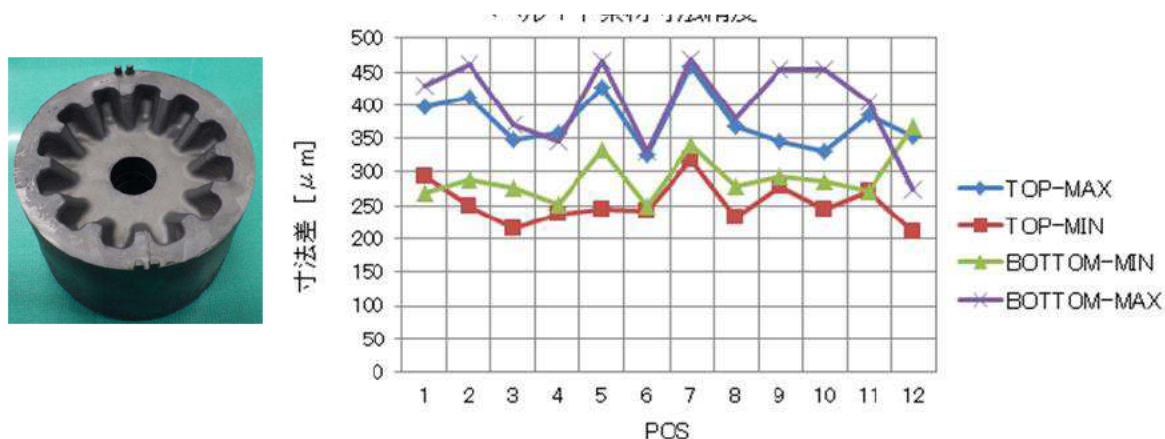


図 2-1-17 ベベルギアー型用超硬素材の外観写真と寸法データ

2) 小判絞り型

製作したサンプルの外観写真とギヤ部の測定データを図 2-1-18 に示す。

今回は安全をみて加工代を $150\text{ }\mu\text{m}$ になるように型加工した。寸法計測は内径部であり、径寸法なので $300\text{ }\mu\text{m}$ がネライ値である。ばらつきはあるものの、ほぼネライ通りの寸法になった。平均値は調整可能である。

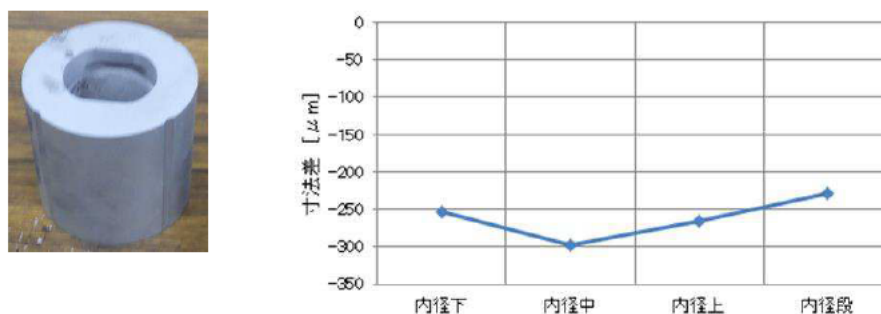


図 2-1-18 小判絞り型用超硬素材の外観写真と寸法データ

2-2 【2】高効率な超硬合金直彫り切削工具の開発と最適加工条件の抽出

本事業の事業化に向けて、超硬合金金型直彫り加工に適する工具を開発することを目標として実験を実施してきた。

2.5 年間という短期間で、工具形状や加工条件をすべて網羅して実験を行うことは困難である。一方、いくつかの条件のみを選択して実験を実施したとしても、無数にある要因を網羅することは不可能である。そこで、開発工具の設計条件と加工条件について、品質工学の手法の一つであるパラメーター設計を用いて組み合わせ実験を行った。この方法は、各種条件の組み合わせによる交互作用から、ばらつきの少ない条件を見出す方法で、JIS Z 9061:2016 (ISO16336:2014)「新技術及び新製品開発プロセスのための統計的方法の応用—ロバストパラメーター設計 (RPD)」として、規格化されている手法である。先にも述べたように、従来からの品質特性に頼った評価方法では、時間がかかりすぎるうえ、生産工程に展開していくためには、あらゆる条件を想定する必要がある。そこで、超硬合金金型の直彫り加工条件の評価方法を、従来の品質規格である、寸法、表面粗さ、欠けの有無、光沢、工具の磨耗などの品質特性ではなく、電力測定による加工エネルギーと加工体積でその良し悪しを評価する。さらに、加工距離と加工断面積の変化でその良し悪しを評価する。この手法を用いて、加工条件を統計的に処理して最適化を行う。研究開発実施機関の間で協議を重ね、新規工具の設計を行った。評価を、加工した除去体積と加工に要したエネルギー（電力）の関係で行った。パラメーター設計において、特徴的である、設計において制御できない誤差要因を加えるが、その誤差条件として、新品の状態工具と、ある程度加工を行った劣化後工具のデータを計測することによって評価した。この差が小さければ、加工が安定しかつ劣化が小さい、すなわち、工具寿命を延ばす加工条件といえる。得られたデータの傾きは、材料除去そのものに要したエネルギーで、加工が全く出来ていない場合を除いて、傾きが小さい場合は効率が良いことを示している。効率が良いことは、損失が少ないということであり、切れ味の良い加工が出来ていることを表す。さらに、もう一つの評価方法として、加工断面積と加工距離の関係を用いて評価した。加工距離が長くなっても、加工断面積が変化しないということは、新品時の刃物が磨耗せずに加工が進んでいるということになる。

実験を効率的に実施するために、実際の金型での加工ではなく、金型加工を想定したテストブロックを使用して、効率的に多くの実験ができるように工夫した。今年度使用した超硬合金材料の材種は、昨年度の実験において最も形状が出にくかった材料に加え、冷間鍛造ダイスによく用いられる材料を使用した。これら加工がうまくいけば、他の材料の加工条件を選定しやすくなることを狙って選定した。この、テストブロックを研究開発実施機関と十分な協議を重ね、評価する加工条件を選定し、それぞれの因子の交互作用の効果を見るために直交表に割り付けて実験を行った。

それぞれの実験から、加工条件によって大きく加工状態が変わることがわかった。例えば、電力の計測においては、新品時の電力波形では、少しずつ電力量が増大し負荷が増していることがわかり、劣化後では、電力波形が不安定になっているといった現象が見られた。このことは、コーティングの剥離や工具磨耗によつての現象と推察される。また、加工距離-加工断面積を用いた評価においても、加工痕の状態や加工断面積の変化度合などから、加工条件によって大きく加工状態が異なることがわかった。加工条件と工具形状を追い込むために、 L_{18} 直交表を用いた実験を、平成 27 年

度は加工条件を中心に 4 回，平成 28 年度は，工具の形状を中心に 2 回の合計 6 回の直交表実験を実施した。一回のパラメーター設計実験で 18 条件と確認実験の組み合わせを行い，8 加工条件の有意差を判定することが出来る。

超硬合金を加工するためのエンドミルを新規に設計することを目的として実験を行った。本実験で把握できたことを以下に示す。

- ・ 工具先端形状について，周速を確保できるような形状を見出した。
- ・ 5 種類の厚みと種類の異なるコーティングを実施し，その効果を確認した。
- ・ すくい面の角度と，すくい面のエッジ加工についての条件を見出した。
- ・ 最適な刃数を決定した。
- ・ すくい面の高さを決定した。

i) 実験計画

超硬合金の切削実験を行うにあたり，実験条件を決定していく必要がある。パラメーター設計は以下に示す手順で実験を行う。

- 目的を決める。
- 機能（働き）はなにかを決める
- 制御可能な因子を決める（制御因子）
- 制御不能の因子の整理（誤差因子）
- 必要であれば誤差の調合
- 直交表に割り付けて実験
- SN 比と感度を求め，要因効果図を作成
- 最適条件と比較条件を決めて推定の SN 比と感度を求める
- 得られた条件で再び実験（確認実験）
- 推定と実際を比較
- 考察

機械加工の最終出力としては，加工時間や単位時間当りの加工量によって表される加工能率，寸法精度および形状精度で表される加工精度，仕上げ面あらさや加工面表層部に存在する加工変質層などによって表される表面特性および作業環境があり，これらによって機械加工は評価される。この評価関数が最適となるように入力条件をコントロールすれば，機械加工は最適な状態で行われる。しかし，これらの多岐にわたる条件を一つ一つ解決していくことは，現実問題として困難である。そこで，それらすべての条件を含む評価関数として切削除去体積に対して，その加工に要したエネルギーを評価する。図 2-2-1 に本研究における目的機能①を示す。

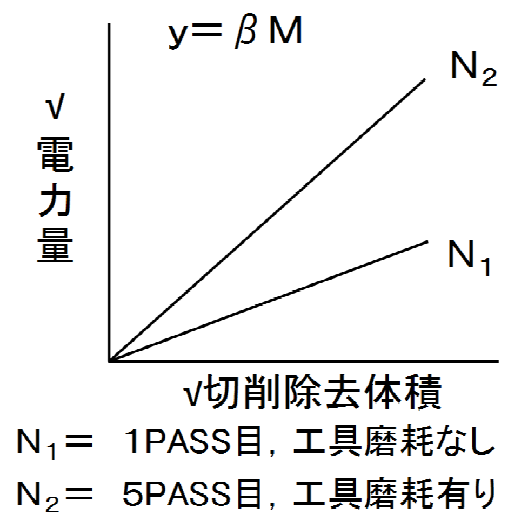


図 2-2-1 目的機能①

この関数においては、切削除去体積が大きく、加工で消費された電力量が小さいことが理想となる。もし、加工がなされていない場合は、電力量も小さくなるが除去体積も小さくなる。効率の悪い加工の場合には、電力量が大きく、除去体積が小さくなる。この入出力の関係が良好なものが良い加工条件となる。機械加工の評価関数は複雑であるため、設計者や工程管理者が制御できない要因も加工結果に現れる。金型製作においては、あらゆる条件で高精度が要求される。昨年度は、被削材として、WC 粒径と Co 含有量を変えたもの 8 種で評価を行った。その結果を踏まえ、テストピースとその材質を図 2-2-1 のように選んだ。図左の写真は、加工実験後のテスト

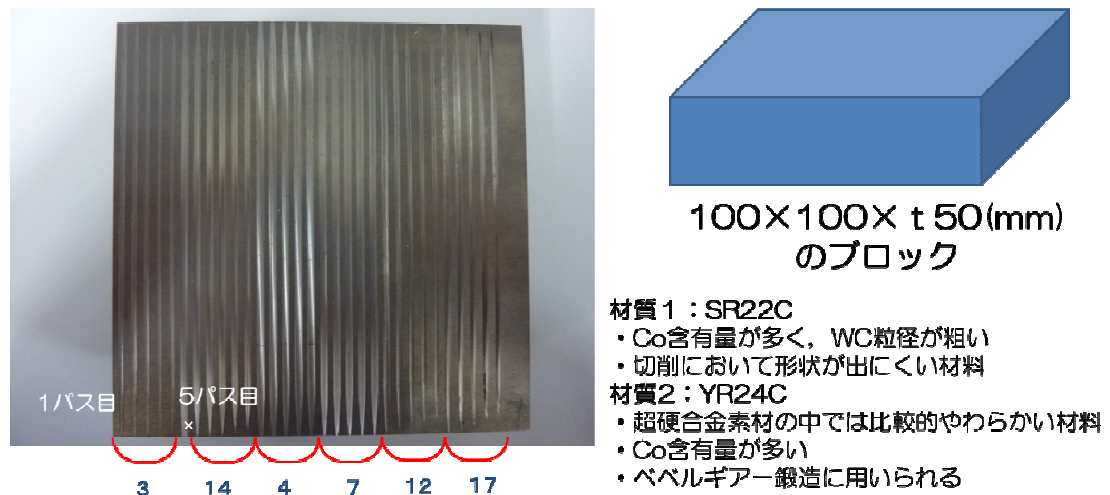


図 2-2-2 テストピースの形状と材質

ピースの写真である。金型を加工することを想定してブロックに直線的な加工を行い、工具の劣化状態を制御不能な因子（誤差因子）として、図 2-2-1 に示す N_1 、 N_2 を加工 1 パス目、5 パス目とした。このテストピースを実際に加工することにより評価を行う。実験を実施していくなかで、特に、SN 比の再現性が良好でない結果があった。このことは、計測において、電力波形は加工全域について取得可能であるが、切削除去体積については、切り込み量（切り込み深さ）が数十 μm ときわめて小さいにも関わらず、超合金の比重が大きく、また、テストピースを切り出す際にも形状を崩さないためには、相応の厚みを持たせて切断する必要がある、必然的に重量が重くなり、精密な天秤を使用できないという問題があった。従って、加工したテストピースを、マイクロSCOPEで断面形状を等間隔で 9 箇所取得し、それを幾何学的に結び、それを除去体積として、1 水準の入出力として計算をしたため、計測誤差をどうしても取り去ることが出来ないという問題があった。そこで、もう一つの評価方法として、加工断面積と加工距離の関係を用いて評価した。加工距離が長くなっても、加工断面積が変化しないということは、新品時の刃物が摩耗せずに加工が進んでいるということになる。図 2-2-3 に本研究における目的機能②を示す。なお、使用したテストピースは図 2-2-2 と同様である。

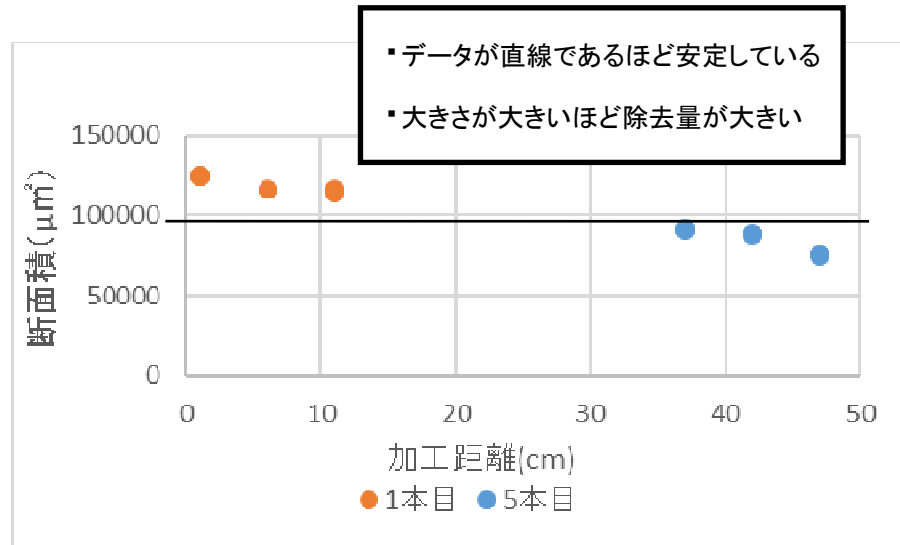
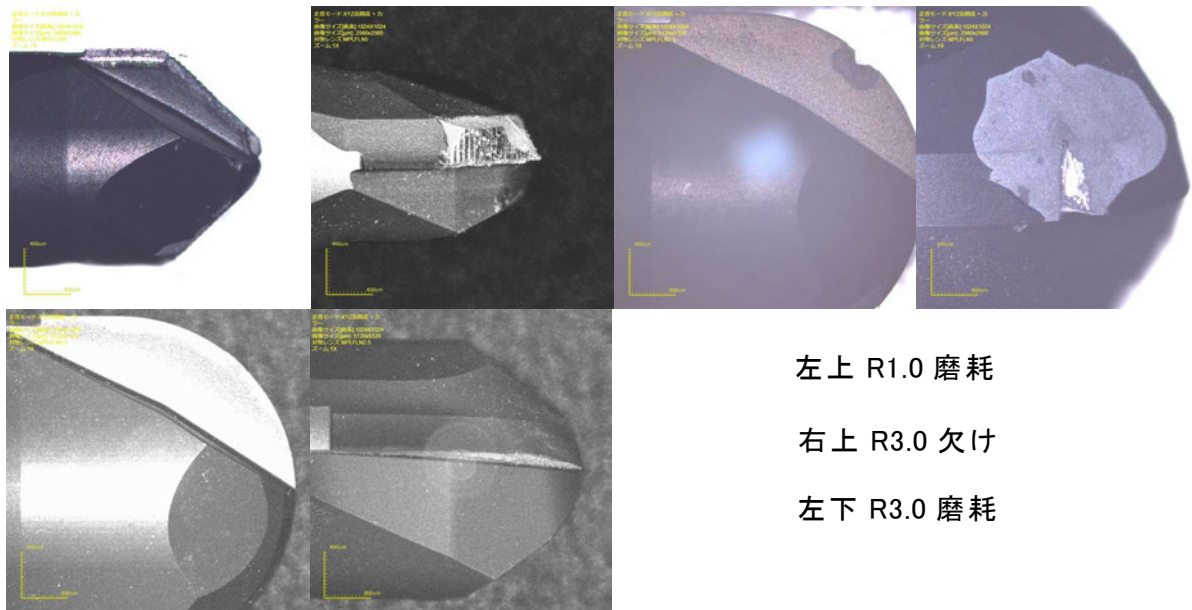


図 2-2-3 目的機能②

ii) 実験結果 (5 回目の実験を例として)

加工条件を決定するにあたって、現状では、どの程度の加工が出来るかを研究実施事業者間で条件を協議し試加工を行った。工具に負担のかからないような条件では、ある程度の加工ができる目処がたった。しかし、少しでも難しい角度等で加工を進めるとすぐに、チッピングや割れを生じることがわかった。切削理論は加工対象よりも刃物が 2 倍程度以上硬いもので定義するため、本研究での実験は難しい課題であり、少しでも条件が悪いと刃物が加工対象によって加工されることが予想された。切削理論がそもそも成り立つのかという問題もあり、実験計画には十分な時間をかけて立案を進めた。刃物の欠陥について図 2-2-4 に示す。この図に示す写真は、導入されたマシニングセンターでの試加工と実験に供するテストピースの加工に用いたものである。写真は、工具の撮影方向を変えて、左側はすくい面を、右側は逃げ面を観察できるように示してある。左上に示す工具先端径 R1.0 の工具の場合、先端形状が円形のボールエンドミルが、加工した材料の形に磨耗した様子を表している。

右上に示す工具先端径 R3.0 欠けの写真は、先端が欠けている様子がわかる。すくい面側からは一部の欠けのみ見受けられ、また、コーティングが剥離している様子がわかるが、逃げ面側からは大きく欠けていることがわかり、使用不能の状態になっていることが観察される。さらに、左下に示す工具先端径 R3.0 磨耗の写真から、すくい面側からの観察においては工具に異常が無いように見受けられるが、逃げ面側からの観察では刃先全体にわたって磨耗があり、それに伴って、コーティングが剥離している様子が観察できる。以上のように、超硬合金直彫り加工で金型を製作する際には、十分に議論を重ねた実験計画を立案する必要があることがわかった。研究開発計画に基づいて、研究実施事業者間で議論を重ね、工具形状を改善させて実験を行った。実際に製作した工具をこれまで製作した工具も含めてまとめて図 2-2-5 に示す。1 回目から 4 回目の工具は、昨年度まで実験を行ってきた形状である。5 回目からの実験にて開発設計製作した工具の特徴は、これまでの実験結果をもとに、最終的な形状を考慮して、確認したい実験条件を網羅するものとした。昨年度、最も効果が高かった 4 枚刃に固定して、さらに検証をすべき条件である、



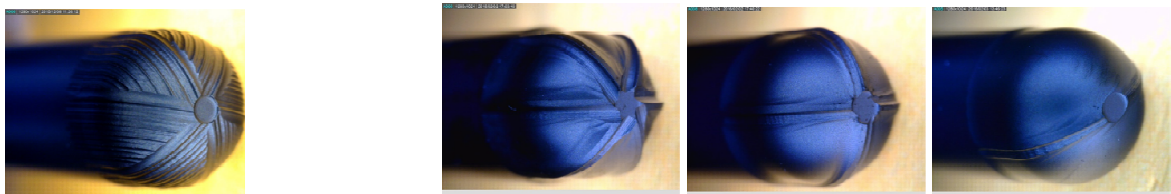
左上 R1.0 磨耗

右上 R3.0 欠け

左下 R3.0 磨耗

図 2-2-4 テストピース加工後のボールエンドミル先端形状の例

コーティング条件，刃の形状，すくい面の高さ，工具先端を用いることとする形状の工夫を条件とした。そのために，研究実施事業者間で協議を行い，実験条件である制御因子を決めた。本実験で評価した実験条件である制御因子と水準を表 2-2-1 に示す。本実験では，工具の傾きを 30° 傾けて実施しており，5 軸マシニングセンターにて使用することを想定している。また，切り込み量を 0.1mm と，超硬合金の切削加工としては，かなり大きな切り込み量としている。これらの因子を L_{18} 直交表に割り付けて実験を行う。実験の割付は表 2-2-2 に示した。表 2-2-2 に示すとおり，制御因子を定められた条件で組み合わせの実験を行った。各制御因子を L_{18} 直交表に割り付けた後，18 回の実験を行った。図 2-2-6 に加工後のテストピースの写真を示す。写真の下にある番号は，表 2-2-2 で示した行番号である。加工は，左から順に行っており，例えば，4 行目や 11 行目の加工結果からは，少しずつ加工の長さが減少していく様子がわかる。同様に，6 行目ではあまり加工長の変化が無いことがわかる。

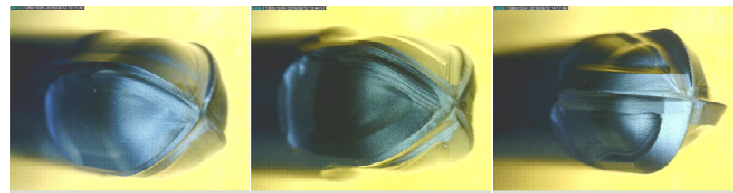


● 1 回目実験工具

● 2, 3 回目実験工具



● 4 回目実験工具



● 5, 6 回目実験工具

図 2-2-5 各実験の工具の形状

表 2-2-1 制御因子とその水準(5回目)

		1	2	3
A.	制御因子とした実験条件	制御因子の水準		
C.				
D.				
E.				
F.				
G.				
H.				

表 2-2-2 実験割付表(5回目)

実験割付表										A	C	D	E	F	G	H
	A	B	C	D	E	F	G	H		制御因子とした実験条件と水準の割付						
1	1		1	1	1	1	1	1								
2	1		2	2	2	2	2	2								
3	1		3	3	3	3	3	3								
4	2		1	1	2	2	3	3								
5	2		2	2	3	3	1	1								
6	2		3	3	1	1	2	2								
7	3		1	2	1	3	2	3								
8	3		2	3	2	1	3	1								
9	3		3	1	3	2	1	2								
10	4		1	3	3	2	2	1								
11	4		2	1	1	3	3	2								
12	4		3	2	2	1	1	3								
13	5		1	2	3	1	3	2								
14	5		2	3	1	2	1	3								
15	5		3	1	2	3	2	1								
16	6		1	3	2	3	1	2								
17	6		2	1	3	1	2	3								
18	6		3	2	1	2	3	1								

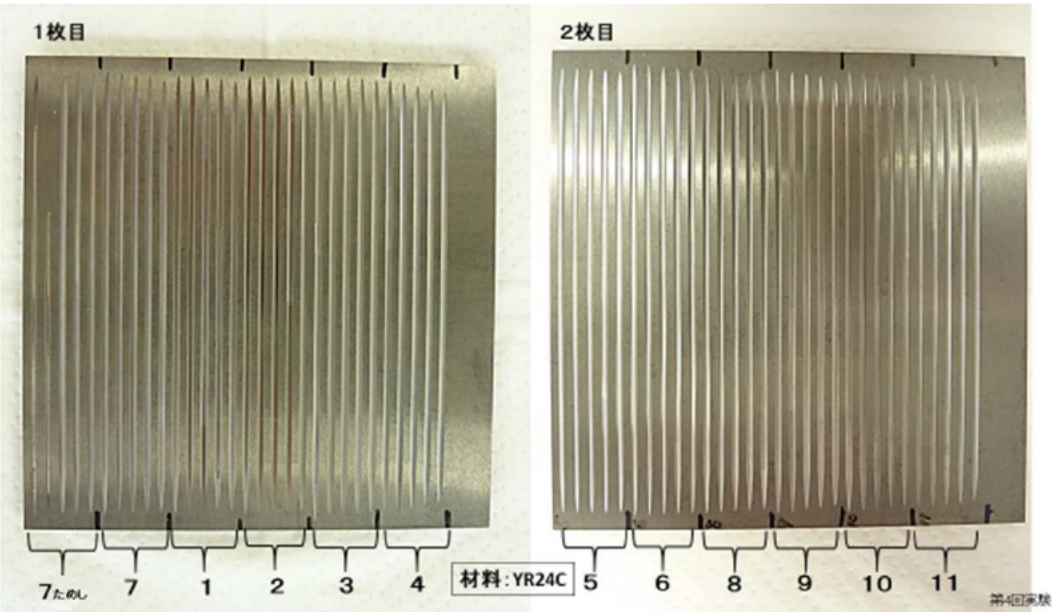
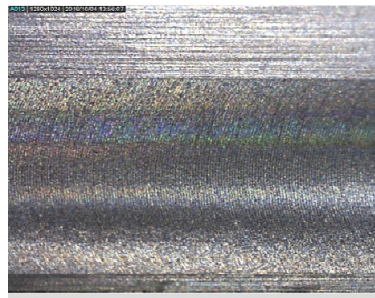
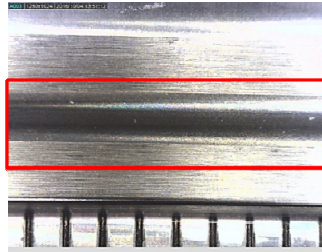


図 2-2-6 加工後のテストピース (5回目)

(8行目)

【1本目】



【5本目】

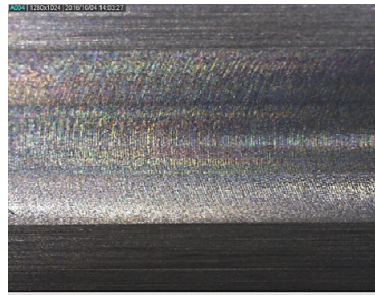
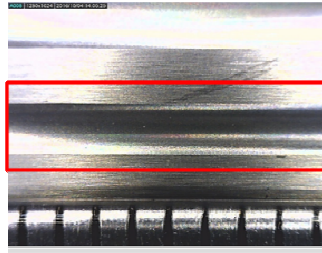


図 2-2-7 8 行目の実験結果（5 回目）

このことは、刃物の劣化度合いを示しており、良い加工条件では加工長の変化が少ない。さらに加工に要した電力と加工除去体積の関係、加工面の観察から最適な条件を選定していく。

実験データとして、図 2-2-7 に 8 行目の実験結果を示す。図は、上が 1 パス目の加工状態とその拡大写真，下が 5 パス目の加工状態と拡大写真を示す。評価方法は実験計画で示したとおりに実施した。切削除去体積は、加工後のテストピースをデジタルマイクロスコープで計測し 3 次元形状のデータから加工はじめ，加工中心，加工終わりの断面積を求め，幾何学的にそれぞれが接続されていると仮定して，除去体積データとした。それぞれの実験から，加工条件によって大きく加工状態が変わることがわかった。これまでの実験結果と同様に，力の計測においては，新品時の電力波形では，少しずつ電力量が増大し負荷が増していることがわかり，劣化後では，電力波形が不安定になっているといった現象が見られた。このことは，コーティングの剥離や工具磨耗によつての現象と推察される。加工後の工具の写真からもそのことがうかがえる。図 2-2-6 についての説明にもあるように，実験条件の組み合わせによつて，マシニングセンターの Z 軸の切り込み量を固定して加工を実施しているにもかかわらず，加工長さが変化していることがわかり，工具の劣化状態が異なることがわかった。加工除去体積の評価においても，加工痕の状態や加工断面積の大きさなどから，加工条件によって大きく加工状態が異なることがわかった。

iii) SN 比の計算結果と超硬合金加工条件の設計（5 回目の実験の例）

実験結果で得られたデータをもとにして SN 比と感度の計算を行った。表 2-2-3 に SN 比と感度の計算結果 18 行分をまとめて示す。また、この SN 比より算出した要因効果図と感度の要因効果図を図 2-2-8 に示す。図 2-2-8 は、SN 比が高い条件は工具の劣化が小さい（寿命が長い傾向）ことを示し、感度が高い場合は除去体積が大きいことを示し、両方とも高い条件がよい条件であることを示す。図 2-2-8 に示してある○と△は、確認実験にて使用した条件を示し、比較条件 1 を○、比較条件 2 を△で示してある。コーティング条件については、厚みが $10\mu\text{m}$ 以上でないと、加工が安定しないことがこの実験の確認として、確認実験を行った。表 2-2-4 に確認実験の条件で推定した SN 比と感度の値、実際にその条件で実験を行なった際の SN 比と感度の値を示す。表 2-2-4 の結果から、SN 比を感度の再現性が概ね得られた。このことから、この実験の結果については、信頼して加工条件と設定することが可能であることがわかった。5 回目の実験で得られた結果から、工具設計条件 1、工

表 2-2-3 18 行分の SN 比と感度の計算結果（5 回目）

行	SN 比(db)	感度(db)	行	SN 比(db)	感度(db)
1	20.37	96.34	10	34.74	98.11
2	34.23	97.43	11	14.72	95.94
3	27.38	98.90	12	14.17	97.13
4	12.15	96.05	13	7.97	94.66
5	25.59	97.37	14	24.78	97.55
6	31.90	98.46	15	18.94	97.16
7	17.54	96.80	16	16.55	96.74
8	31.35	98.02	17	13.38	96.50
9	12.55	96.16	18	3.71	91.39

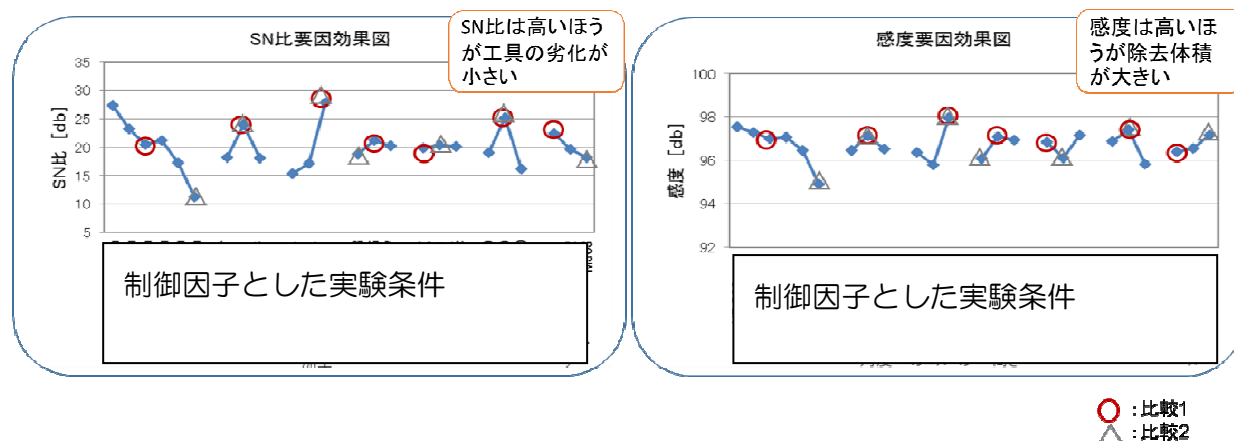


図 2-2-8 SN 比と感度の要因効果図（5 回目）

表 2-2-4 確認実験結果（5 回目）

	SN 比 (db)		感度 (db)	
	推定	確認	推定	確認
比較条件1	40.25	30.84	99.61	97.32
比較条件2	30.90	24.61	98.08	96.27
利得	9.36	6.23	1.53	1.05

具設計条件2，工具設計条件3，加工条件1の傾向が明らかとなった。ただし，刃物を傾けて加工したものであるため，周速の取れない先端での加工状態を把握する必要がある。この実験を6回目実験として実施した。

これまで，高効率な超硬合金直彫り切削工具の開発と最適加工条件の抽出のために，トータル6回の実験を実施してきた。これまでの実験で把握できたことを以下に示す。

- 本事業申請時の構想に基づいて工具の形状を決めて工具を製作し，実際に加工して実験を行った。
- 刃物形状については，先端を除いて確定することが出来た。
- 先端形状の工夫が必要であることが明確となった。（当初は，先端を使用しないことも考えたが，汎用性を高めるためにはどうしても必要）
- 刃物を量産するためには，作りやすさも重要な要素であり，それも考慮した先端形状とする必要がある
- 実験の中で加工能率が高かった刃先形状について特許申請を計画している
- 既製品を同様の条件で加工した。
- 既製品の刃数が2枚ということもあり，開発した4枚刃の刃物に対して，一刃あたりの除去量を同一とすると送り速度が1/2となるため，効率が2倍となる。加工品質についてもSN比で同程度であることから，開発した工具は，効果があるといえる。
- コーティングについては，最終的に寿命試験を実施して判断する必要がある。3Dモデルでの検証も実施する予定である。
- これらの結果より，最終的な工具の設計思想を決定した。
- 最終形状で，コーティング条件による寿命試験を実施する。

vi) 開発した工具の寿命試験結果

これまで実施してきた実験の結果より、開発工具の最終形状を決定した。すくい面形状、逃げ面形状、先端形状について工夫を施したものである。開発した工具が、既存工具に対してどの程度の寿命を確保できたかを確認するために、寿命試験を行った。コーティング条件については、明確な条件を得ることが出来ていなかったため、それを含めた条件とした。寿命試験は、金型を加工することを想定した連続経路で実施した。連続加工における曲線部分は、矩形にすると加工速度が一時的に 0 になるため、角部分に R1.5 を持たせ加工ピッチは 3mm となるように設定した。寿命試験加工方法を図 2-2-10 に示す。これまでの実験に用いたテストピースを用いて、1 枚

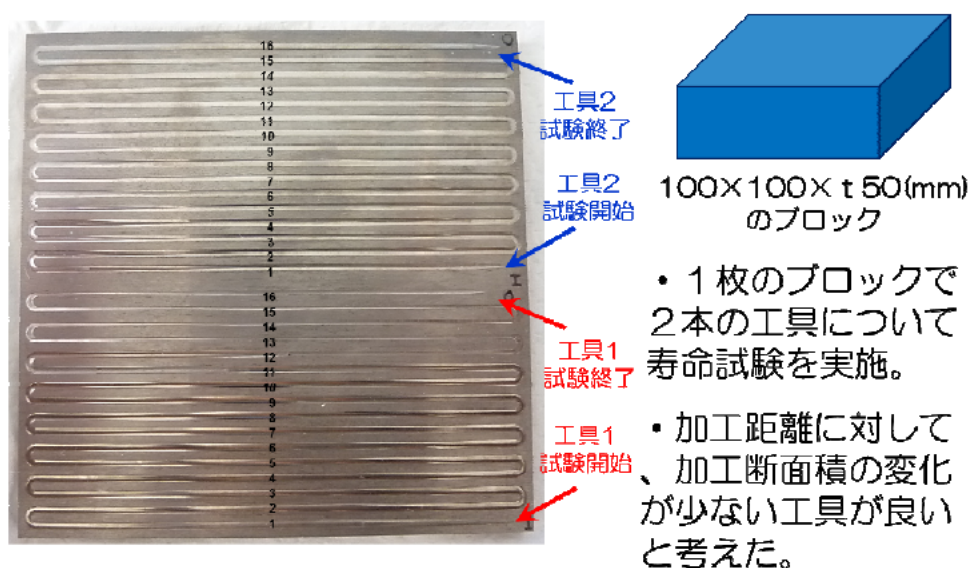


図 2-2-10 寿命試験加工方法

のブロックで 2 本の工具について実験を行えるものとした。加工距離はおおよそ 1550mm が最大となる。加工距離に対して加工断面積の変化が少ない工具をよい工具と考えて評価を行った。表 2-2-5 に、寿命試験の実験の実験条件を示す。表 2-2-5 は、コーティング条件と加工条件を比較するものとなっている。なお、実験番号は便宜的に固有の番号に割り振った。寿命試験

の測定方法を図 2-2-11 に示す。すべての断面形状を取得することは困難であったため、加工経路全体のおおよそ等分した、1, 6, 11, 16 本目の断面積を計測した。測定点はアプローチの影響を受けないように、ブロックの端から 20mm の位置で計測を行った。

表 2-2-5 寿命試験実験条件

材料	実験番号	寿命試験条件	工具	寿命試験実験条件	角度
YR24C	170071	寿命試験条件	S		垂直
	170072		既存工具		垂直
	170075		S		垂直
	170076		A		垂直
	170261		S		垂直
	170262		A1		垂直
	170263		A2		垂直
	170264		S		垂直
	170265		S		30°
	170266		A1		30°
	170267		A2		30°
	170268		S		30°
材料	実験番号	寿命試験条件	工具		角度
SR22C	170073		S		垂直
	170074		既存工具		垂直
	170311		S		垂直
	170312		A1		垂直
	170313		既存工具		垂直
	170314		S		垂直
	170315		S		30°
	170316		A1		30°
	170317		既存工具		30°
	170318		S		30°

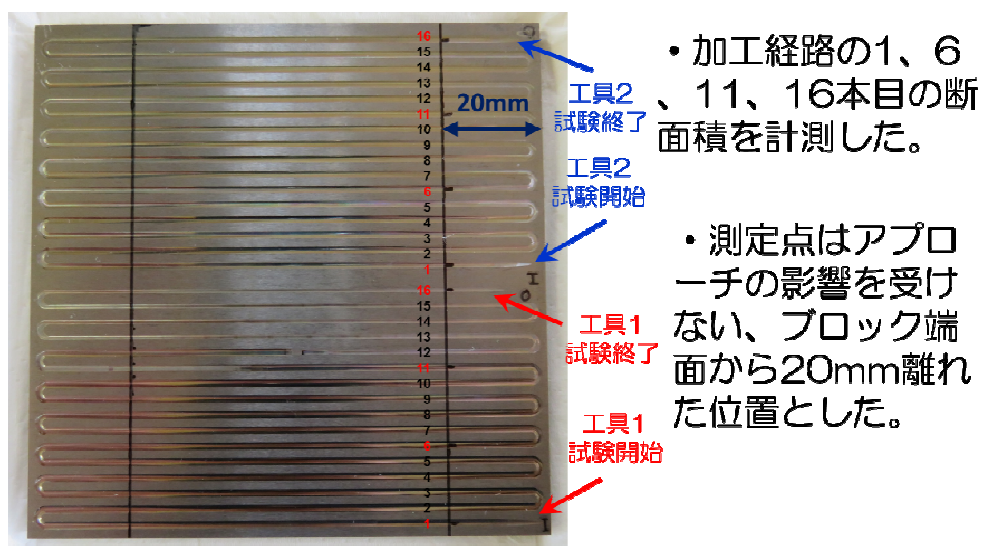


図 2-2-11 寿命試験測定方法

実験結果を、図2-2-12から2-2-15に示す。図2-2-12は、材質 YR24C について寿命評価実験を行った。工具角度を垂直にして、切り込み量を 0.05mm として実験を行った結果である。図2-2-12より、実験番号 170261 に示されるように、急激に断面積の変化が現れ、工具が激しく損耗し寿命となっている様子がわか

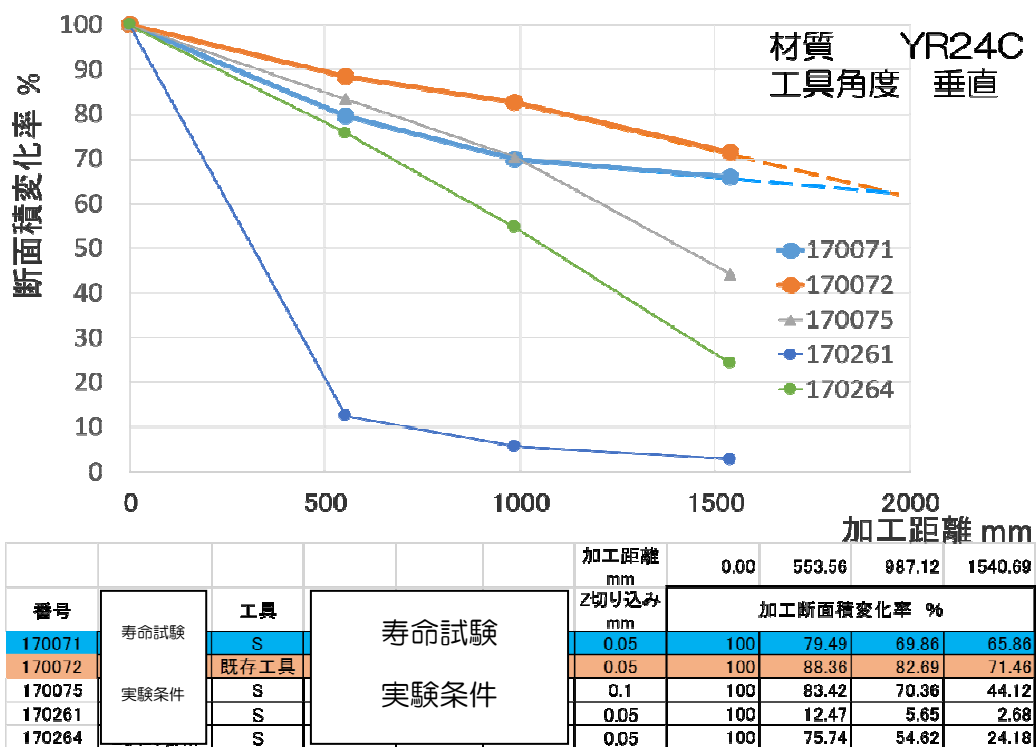


図 2-2-12 寿命試験結果 (YR24C, 垂直)

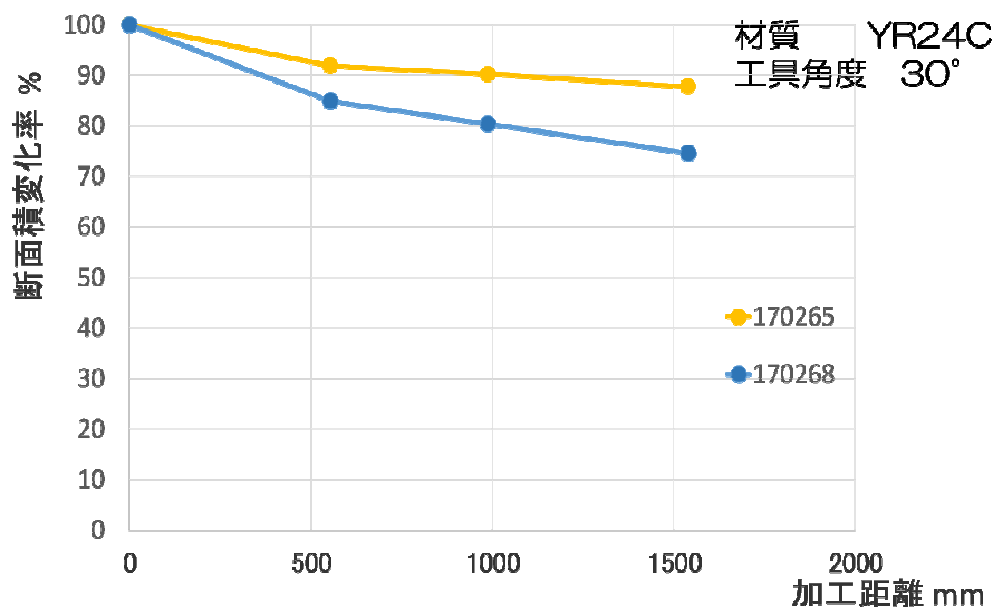


図 2-2-13 寿命試験結果 (YR24C, 30°)

る。一方、条件によっては、新規開発した工具が、既存工具に近い結果を得られるものがあった。送り速度については、2 枚刃の既存工具に対して、4 枚刃であるため 2 倍としている。

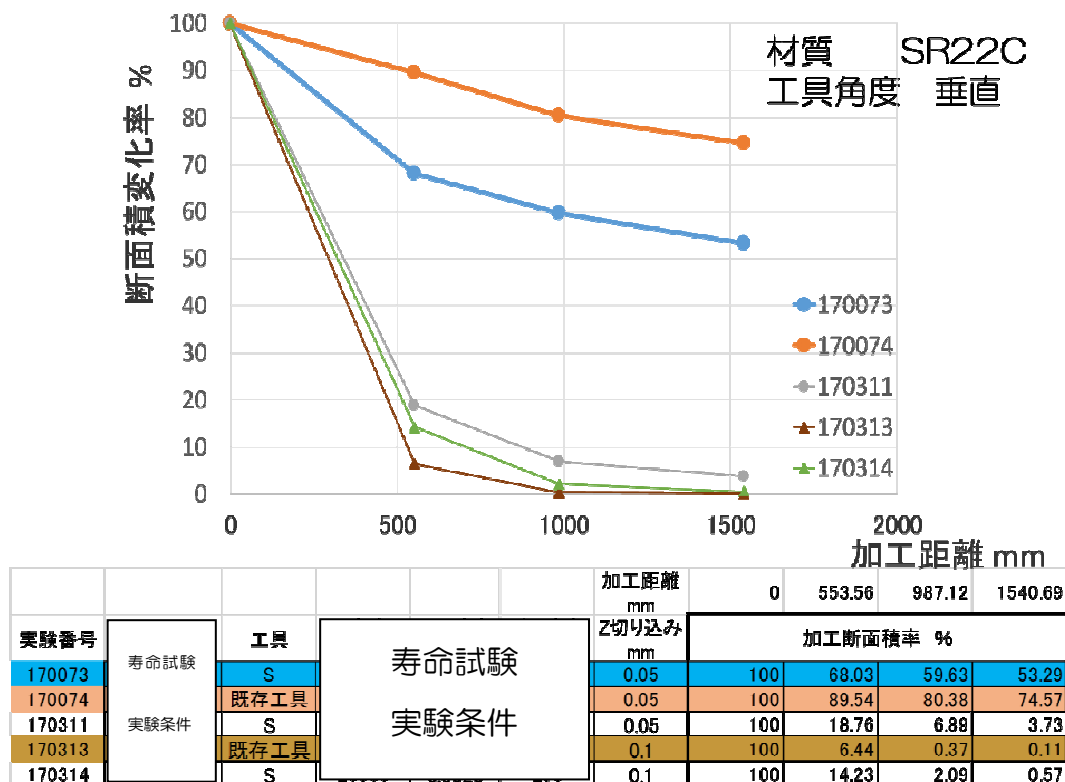


図 2-2-14 寿命試験結果 (SR22C, 垂直)

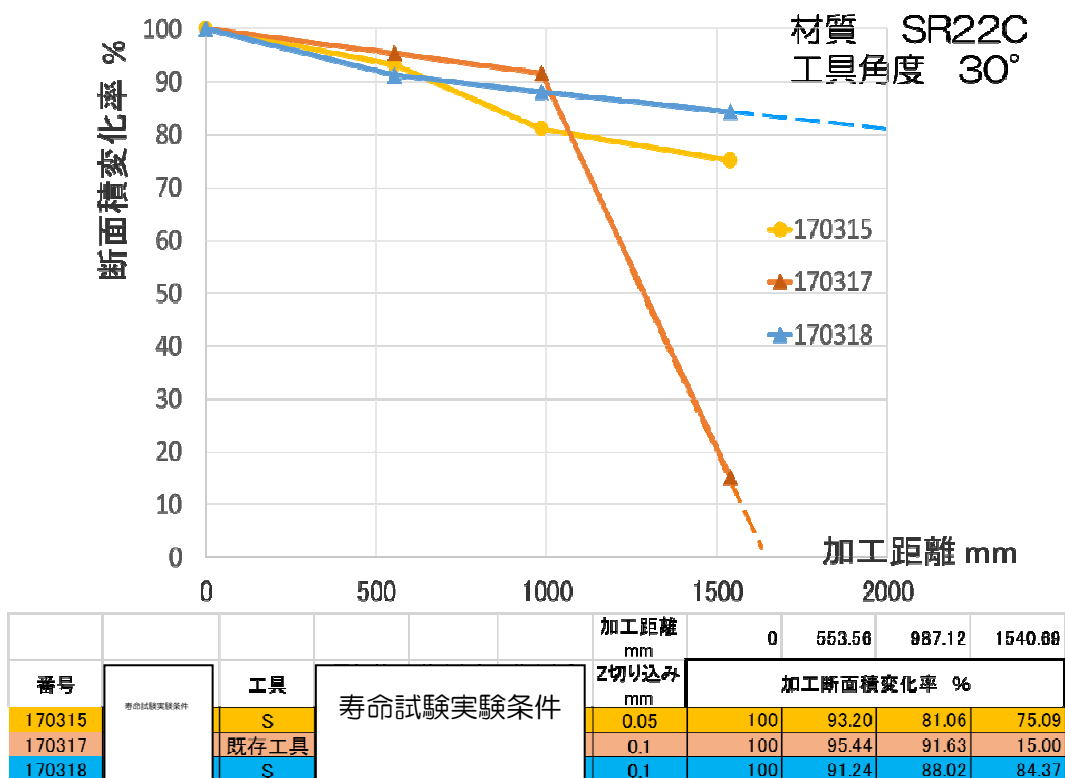


図 2-2-15 寿命試験結果 (SR22C, 30°)

実験番号 170071 既存工具と 170072 開発工具の結果の断面積変化率から予測される断面積変化率を点線で示した場合、本条件にて加工を行った場合には、開発した工具が既存工具とほぼ同等の寿命を得られていることがわかった。

図2-2-13は、工具を 30° 傾けて、切り込み量を 0.05mm として実験を行った結果である。図2-2-12と同様に、今回の寿命試験にて実施した加工距離では、寿命に達するま

で至らなかった。良好に加工が進行したと考えられる。

図2-2-14は、材質 SR22C について、工具角度を垂直にして、切り込み量を 0.05mm, 0.1mm として実験を行った結果である。図2-2-14より、実験番号 170313 に示されるように、既存工具においても急激に断面積の変化が現れ、工具が激しく損耗し寿命となっている様子がわかる。一方、条件によっては、図2-2-12の結果と同様に、新規開発した工具が既存工具に近い結果を得られるものがあった。この場合も送り速度については、2 枚刃の既存工具に対して、4 枚刃であるため 2 倍としている。

図2-2-15は、工具を 30° 傾けて、切り込み量を 0.05mm, 0.1mm として実験を行った結果である。実験結果 170317 より、既存工具において切り込み量を 0.1mm とした場合、ある程度加工が進行した後、急激に断面積変化率が増大し寿命となった様子がわかる。この場合、新規開発工具のほうが優れた寿命を有することがわかった。既存工具の優れた点をすべて凌駕することは出来なかったが、加工条件によっては新規に開発した工具が有効である場合があることがわかった。これらの結果から、加工速度が 2 倍になり、切り込み量を 0.1mm という、超合金の直彫り加工としては、かなり大きな量を除去できることがわかった。さらに、条件によっては寿命も長いということがわかり、加えて、開発工具の生産コストが、既存品に対して 2/3 程度で製作可能であることから、超合金の直彫り金型のコストダウンの一助となることがわかった。

図2-2-16には、寿命試験で使用した、新規開発工具の写真を示す。番号は実験番号に対応している。若干のコーティングのはがれが見受けられるが、刃先の破損や破壊、大きな磨耗の様子が見られず、安定して加工できていることがわかった。

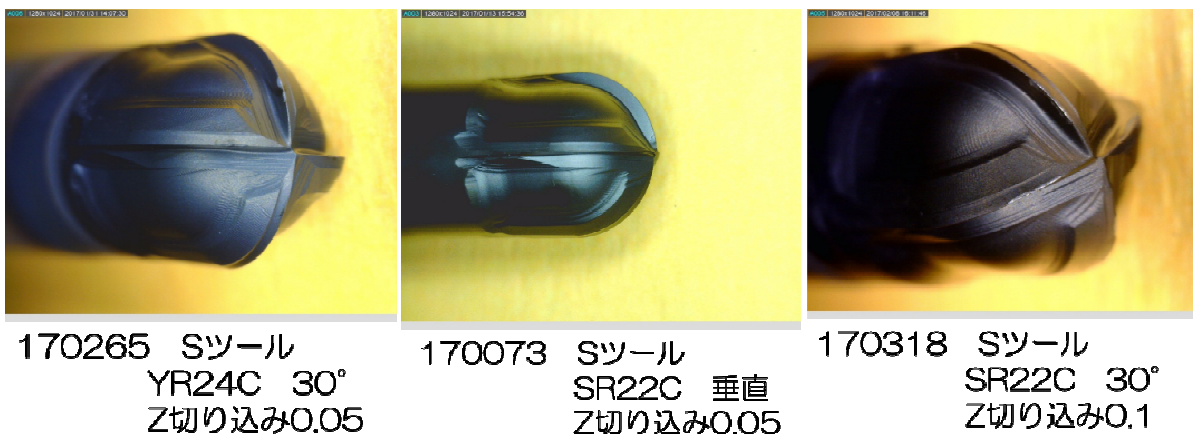
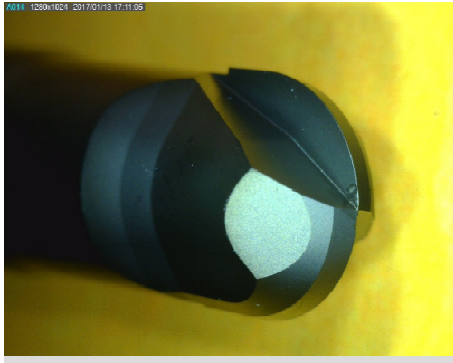


図2-2-16 新規開発工具の寿命試験後工具写真

図2-2-17には、寿命試験で使用した、既存工具の写真を示す。番号は実験番号に対応している。工具の傾きを 0° として、工具先端を使用した加工においても、良好な結果を得られた条件では、刃先の大きな磨耗など、欠陥となる状況は観察されておらず、2枚刃による工具先端のすくい面の確保の効果があったものと考えられる。一方、既存工具においても、刃先が大きく破損しているものもあり、これまで実験を重ねて開発した工具と既存工具の関係について、研究開発実施機関内において、貴重なデータとして整理することが出来た。



170073 既存工具
SR22C 垂直
Z切り込み0.05



170317 既存工具
SR22C 30°
Z切り込み0.1

図2-2-17 既存工具の寿命試験後工具写真

2-3 【3】金型の試作と評価

金型製作を次の2つの内容について行った。

(i) 試作金型 1 小判絞り型

ニアネット素材をケースに組付け金型を準備し、大型5軸マシニングセンターで直彫り加工を行った（図2-3-1）。この金型は細長い内径切削であることから、実験条件と実際の金型で行う条件が合っていないためと思われる切削条件を見直しを行っている。荒加工から仕上げまでを制作した工具で行っている。



図2-3-1 試作金型1の直彫り加工

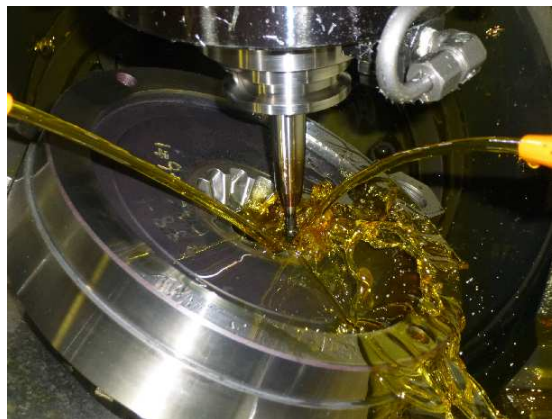


図2-3-2 試作金型2の直彫り加工

(ii) 試作金型２ ベベルギア一型

ニアネット素材をケースに組付け金型を準備し、大型5軸マシニングセンターへ取付けて加工を行った(図2-3-2)。荒加工の工具は部分的にコーティングが剥がれているが母材に大きな破壊は無い。同様に中仕上げ加工の工具は全体的にコーティングが剥がれているが大きな破壊は無い。どちらも先端に剥離と摩耗が見られた。仕上げについては精度上の理由で、市販の工具を使用している。

三次元座標測定機(図2-3-3)により測定を行い(図2-3-4)旧JIS 0級が得られた。



図 2-3-3 三次元座標測定

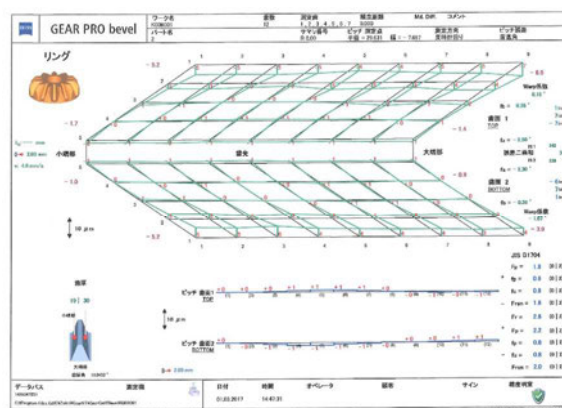


図2-3-4 試作金型2の測定結果

試作金型1を表2-3-1に試作金型2を表2-3-2に目標達成状況をまとめる。

①切削加工180%、⑤素材を考慮したトータルコスト187%となり、切削加工が主として未達成となった。現状での事業化は難しく、さらなる改善が必要。

表2-3-1 試作金型1 小判絞り型の直彫り加工評価

試作金型1	従来	目標	試作金型	評価
加工方法	型彫り放電加工	直彫加工	直彫加工	達成
①工具費の削減 (工数含む)	100%	83% (1/6の削減)	180%	未達成
②リードタイム 《電極作成》	4日(電極含まず) 《2日》	3日 《0日》	2日 《0日》	達成
③表面荒さ 《手仕上げ》	Rz4. μ m 《Rz0.4》	Rz0.5 μ m 《Rz0.2》	Rz0.5 μ m 《Rz0.2》	達成
④磨きリードタイム	3日	0.1日	0.1日	達成
⑤トータルコスト (素材費を含む)	100%	90%	187%	未達成

①切削加工80%、⑤素材を考慮したトータルコスト96%となり、素材が主として未達成となったが、現状よりもコストの削減となり、比較的大型の超硬直彫り金型の事業化が可能となった。

表2-3-2 試作金型2 ベベルギア型の直彫り加工評価

試作金型2	従来	目標	試作金型	評価
加工方法	型彫り放電加工	直彫加工	直彫加工	達成
①工具費の削減 (工数含む)	100%	83% (1/6の削減)	80%	達成
②リードタイム 《電極作成》	4日(電極含まず) 《2日》	3日 《0日》	3日 《0日》	達成
③表面荒さ 《手仕上げ》	Rz4. μ m 《Rz0.4》	Rz0.5 μ m 《Rz0.2》	Rz0.5 μ m 《Rz0.2》	達成
④磨きリードタイム	3日	0.5日	0.5日	達成
⑤トータルコスト (素材費を含む)	100%	90%	96%	未達成

(3-3) 製造された試作金型を鍛造（試し打ち）評価

①試作金型1 小判絞り型

製造した試作金型1（図2-3-5）を5連フォーマーへ取り付け鍛造した（図2-3-6）。メンバーで鍛造の立ち会いを行った（図2-3-7）。試作金型で鍛造した品物を示す（図2-3-8）。

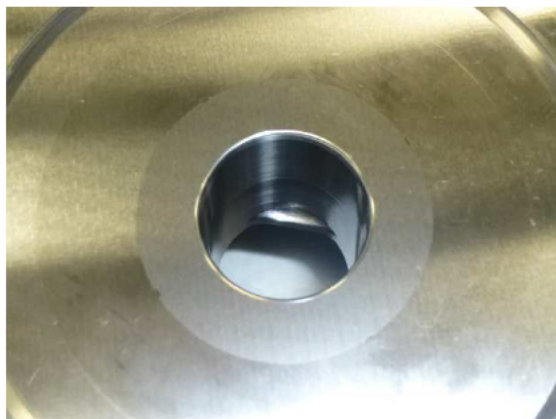


図2-3-5 直彫り後の試作金型1



図2-3-6 試作金型1の取付け



図2-3-7 試作金型1の鍛造立ち会い



図2-3-8 試作金型1の鍛造品

試作金型1の目標と実績まとめを表2-3-3に示す。金型寿命の目標は従来1年平均で51,000（23,000～76,000）ショットとのことで1.5倍の100,000ショット以上の寿命を確保できれば、おおよそ目標は達成されたといえる。現在47,000ショットまでクリア。この時点では金型に異常は見られなく継続確認中となっている。

表2-3-3 試作金型1の目標と実績まとめ

	従来	目標	試作金型1	
加工方法	型彫り放電加工	直彫加工	直彫加工	
金型寿命 （1年平均）	1(51,000) (23,000～76,000)	1.5(76,500) (34,500～114,000)	47,000 クリア 継続確認中	

最終章 全体総括

1) 複数年の研究開発成果

(1) ニアネットシェイプな超硬素材の製造方法を開発

平成26年度には総形型+固相焼結という工法でニアネットな超硬素材を製作し、開発課題を明確にした。また、型に粉体塗装することで、浅い溝や小さい凹凸形状については良好な型分離出来るニアネット超硬を製作できることまで確認した。

平成27年度は、大きな凹凸に対応できる型材の調査、既存型材の表面コーティングする工法をいくつか試みた。結果、BN系の複合材料が良いと思われたが、通電焼結後に型分離できなかった。この材料は高額であったため、既存型に金属コーティングするものでも充分であると判断した。尚、既存型では通電焼結時にCoが溶出するため密度の高いタイプを選定した。

平成28年度は、通電焼結のパラメーター設計を行った。これまでの実験結果が通電焼結条件のばらつきに左右されてきたこと、Co溶出と充填性に相反する傾向があったことなどから、各因子の水準傾向を把握し最適な条件を選定する必要があるためである。最適条件で製作したベベルギア型サンプルにはCoプールの発生したため、液相焼結工程を追加して組織を健全化する必要があることも確認された。実際の金型としてベベルギア型、小判絞り型を製作し、今回の工法が有効であることを確認した。

(2) 高効率な超硬合金直彫り切削工具の開発と最適加工条件の抽出

超硬合金を加工するためのエンドミルを新規に設計することを目的として実験を行った。工具形状や加工条件をすべて網羅して実験を行うことは困難である。一方、いくつかの条件のみを選択して実験を実施したとしても、無数にある要因を網羅することは不可能である。そこで、開発工具の設計条件と加工条件について、品質工学の手法の一つであるパラメーター設計を用いて組み合わせ実験を行った。この方法は、各種条件の組み合わせによる交互作用から、ばらつきの少ない条件を見出す方法で、JIS Z 9061:2016 (ISO16336:2014)「新技術及び新製品開発プロセスのための統計的方法の応用—ロバストパラメーター設計 (RPD)」として、規格化されている手法である。先にも述べたように、従来からの品質特性に頼った評価方法では、時間がかかりすぎるうえ、生産工程に展開していくためには、あらゆる条件を想定する必要がある。そこで、超硬合金金型の直彫り加工条件の評価方法を、従来の品質規格である、寸法、表面粗さ、欠けの有無、光沢、工具の磨耗などの品質特性ではなく、電力測定による加工エネルギーと加工体積でその良し悪しを評価する。さらに、加工距離と加工断面積の変化でその良し悪しを評価する。この手法を用いて、加工条件を統計的に処理して最適化を行う。研究開発実施機関の間で協議を重ね、新規工具の設計を行った。今年度の実験で把握できたことを以下に示す。そして、開発した工具の検証のために寿命試験を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 既存工具では垂直加工時に加工距離に対する断面積変化が少ない。これは、2枚刃によって工具中心のすくい面を確保できるためと考えられる。
- 開発工具においては工具先端形状の工夫（特願 2017-024870）により垂直加工においても既存工具に近い寿命を達成している。
- 工具角度を 30° 傾けた際には開発工具がどちらの材料に対しても安定して切削できている。
- 試験後の工具先端の観察写真において、多少の磨耗は見受けられるものの欠けや破損は無く、本実験においては加工速度が 2 倍で既存工具の約 1.5 倍の工具寿命を達成した。従って、開発目標である加工効率が従来工具比 3 倍を達成したといえる。
- 事業化の際には細かな改善により、寿命の更なる向上の可能性が考えられる。

(3) 金型の試作と評価

①金型製造後の最終製作工具の評価

●超硬素材を利用した大型金型向けとして多刃化の効果を確認。エンドミルの側面加工がびびりを発生してダイヤモンドコーティング工具寿命を著しく破損させることから、6枚刃などのより刃数の多い場合は同時に接触する部が増えることにより抵抗増加・びびりが増加すると思われ、ボールエンドミル3R程度の多刃化においては4枚刃を妥当とした。ボールエンドミル5Rなど、より大きな工具においては刃数を増やすことも有効とする。

●ワークと工具先端の接触が多い加工条件下に限定する場合は抵抗が少ない2枚刃が有利と考えられる。先端を少しずらすなど、刃数が増えることによる切削抵抗の増加が無い条件化においては4枚刃などの多刃化が効果として得られる。よって5軸マシニングセンターでは加工効率を得易い。これらを両立させるため、先端形状のさらなる改善も考慮すべき。

●側面加工はラジアル力によりびびりが発生しやすい状態となる。先端を0から40°程度までは“直刃”でそれ以降は“ねじれ刃”といった改善も考慮すべき。

●ベベルギア型などの仕上げを行うには工具造形の高精度化が必要となるが、ライセンス販売などにより工具メーカーが製造すれば問題ないと考えられる。5軸マシニングセンターを利用するなど、傾斜を行う条件化での荒や中仕上げは現状でも効率を得られた。

●放電加工が無くなることにより手仕上げ工程の6割を削減した。特にベベルギア型においては、形状精度の向上により旧JIS O級の精度を達成することができた。

②試作金型の鍛造評価

今年度得られた結果から、研究開発実施企業により、試作の金型を製作し、実際の製品製造を実行し、寿命試験を実施する。アドバイザー企業からは、既存の製造方法による金型の寿命が、昨年度1年間の実績として、最小23000ショット最大で76000ショット平均で51000ショットであるとのデータを示された。本事業にて開発した製造工程によって製作された金型が、100000ショット以上の寿命を確保できれば、おおよそ目標は達成されたといえる。もちろん、N数を増やしての検証は今後も引き続き実施していく必要がある。これらを踏まえて事業化へのロードマップを進めていく。

2) 研究開発後の課題・事業化展開

品質は目標を達成できるが、納期とコストについては制約条件がつく。凹凸の大きい形状では目標をクリアできない。研究開発を進める中で未だ試していない案がいくつか残されているので、継続して研究を進め、どのような形状に対しても目標を達成できるような技術を確立していく予定である。

事業化展開が可能な技術レベルには達している。直彫り金型の需要があれば、AMCで受注しノトアロイからニアネット超硬素材を供給する。ノトアロイからも「ニアネットな超硬素材」として単独で販売していく予定である。