

平成 2 1 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「温・熱間鍛造用高耐久性金型材料の開発」

研究開発成果等報告書

平成 2 2 年 3 月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人石川県産業創出支援機構

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
- 1－2 研究体制（研究組織・管理体制，研究者氏名，協力者）
- 1－3 成果概要
- 1－4 当該プロジェクト連絡窓口

第2章 機械特性に優れた合金素材の設計・開発

- 2－1 粉末調整技術
- 2－2 機械的特性の向上

第3章 大型成形体の作製および温・熱間鍛造性の評価

- 3－1 大型成形体用通電焼結技術
- 3－2 大型成形体の焼結再現性の確認
- 3－3 耐熱性評価
- 3－4 落錘式衝撃試験機による高温耐衝撃性評価
- 3－5 温・熱間鍛造試験

第4章 ニアネット焼結技術の開発と成形加工性の評価

- 4－1 中子材料の検討
- 4－2 長尺焼結体の作製
- 4－3 成型加工性の評価

第5章 全体総括

第1章 研究開発の概要

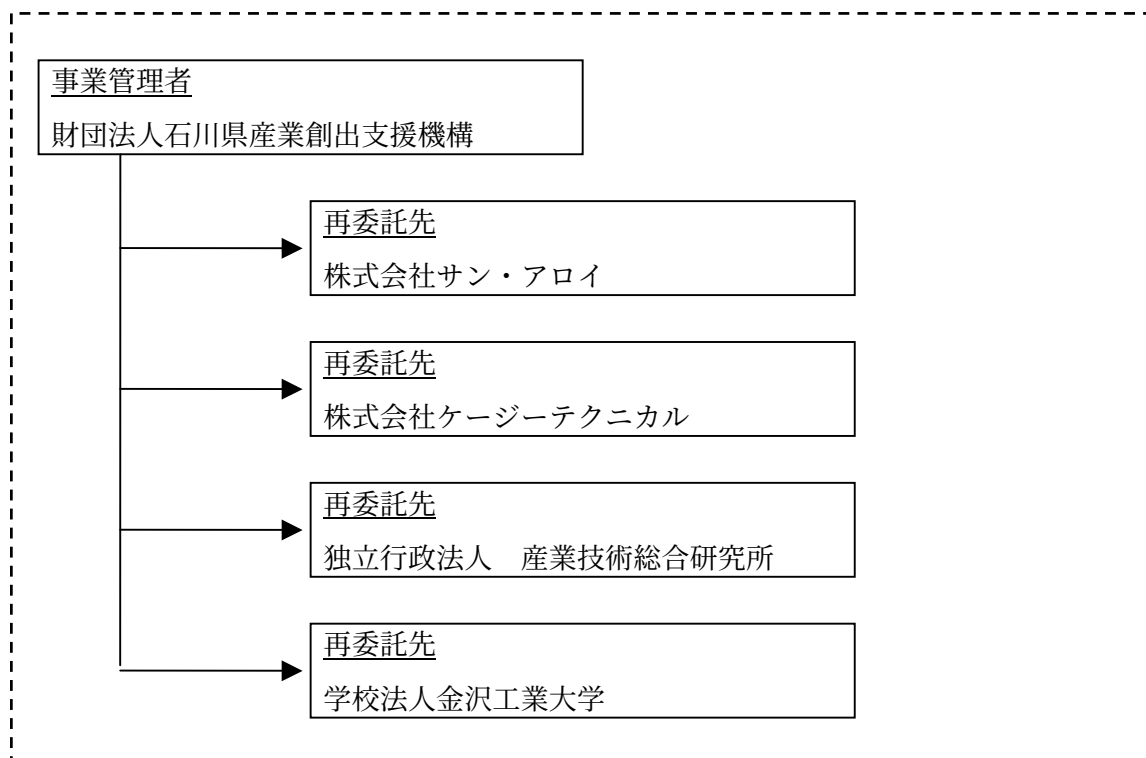
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

鍛造は生産性に優れるため、金属材料の成形技術として広く利用されている。特に熱間鍛造は、展延性に優れるアルミニウム合金や鉄合金に対して利用されているが、融点の高い鉄合金に対しては成形温度がさらに高くなるため、熱間鍛造用金型材料の寿命が短いという問題がある。冷間加工では高硬度で耐摩耗性に優れる超合金（WC-Co）が金型材料として広く利用されているが、500℃以上では結合相である Co の軟化のために使用することが難しい。また、ステンレス鋼などの鉄合金は 900℃近くの高温で加工されるため、熱間加工時の素材温度と冷却水との温度差で生じる熱応力の影響で亀裂が生じる。そのため、熱間鍛造用の金型には微細な炭化物、ほう化物、窒化物を析出させたハイス材料が利用されているが、超合金に比べて硬度が低いため摩耗量が大きくなっている。熱間鍛造の生産性を向上するためにはさらなる高速成形が要求されており、現在の材料での対応は限界になっている。

そこで、本研究開発事業においては、産総研で開発されたアルミナイド金属間化合物の低温合成成形技術と高硬度で耐酸化性に優れた WC-FeAl 超合金をベースとして、サン・アロイの超合金製造技術とケージーテクニカルの加工技術と連携して、温・熱間鍛造用金型に要求される特性を付与しながら新たな金型材料およびその製造に関する基盤技術を開発することを目指した。

1－2 研究体制（研究組織・管理体制，研究者氏名，協力者）

1）研究組織



総括研究代表者（P L）	
所属	株式会社サン・アロイ
役職	取締役技術部長
氏名	佐々木 賢

副総括研究代表者（S L）	
所属	産業技術総合研究所
役職	主任研究員
氏名	尾崎公洋

3) 管理員及び研究員

【事業管理者】※管理員のみ

財団法人石川県産業創出支援機構

氏 名	所属・役職
酒井 正二	プロジェクト推進部 部長
辻江 冬樹	プロジェクト推進部研究交流課 課長
中尾 一也	総務企画部総務企画課 課長

【再委託先】※研究員のみ

株式会社サン・アロイ

氏 名	所属・役職
佐々木 賢	取締役技術部長
潤張 光広	技術部技術課 係長
向出 保仁	技術部技術課

株式会社ケージーテクニカル

氏 名	所属・役職
片原 朗一	製造部 主任
松生 英之	製造部

独立行政法人産業技術総合研究所

氏 名	所属・役職
尾崎 公洋	サステナブルマテリアル研究部門 相制御材料研究グループ・主任研究員
多田 周二	同上
小林 慶三	サステナブルマテリアル研究部門 相制御材料研究グループ・グループ長

学校法人金沢工業大学

氏 名	所属・役職
岸 陽一	ものづくり研究所・准教授

1-3 成果概要

資源として豊富な鉄に耐熱性や耐酸化性を付与した金属間化合物等を結合相として硬質な WC 粒子を複合化した新しい硬質材料を量産化する技術及び 3 次元複雑形状にニアネット焼結する技術を開発し、ロックウェル硬さ (HRA) 80 以上の高硬度で従来の超硬合金(WC-Co)が軟化する 600℃以上でも使用可能な温間あるいは熱間鍛造用金型へ応用できる耐摩耗材料の製造に関する基盤技術を確立するため、以下のサブテーマについて、研究開発を行った。

① 機械特性に優れた合金素材の設計・開発

耐摩耗性に優れた超硬合金を基本として、結合相をさらに見直し、温・熱間鍛造に優れた材料開発を行った。結合相のFeAl金属間化合物への添加元素の検討、WC粒度分布、さらに、新規な結合相の検討も行った。この開発材料に関して温・熱間領域での鍛造用金型への適用の可能性を探るため、機械的特性について評価を行った。また、実際の温・熱間鍛造用金型を想定した熱衝撃性の評価を行った。得られたデータを解析し、材料開発へフィードバックし、さらなる特性の向上を行い、機械的特性はHRA80 以上、抗折強度 2.0GPa以上、破壊靱性値 20MN/m^{3/2}を共に満たす材料を開発できた。

② 大型成形体の作製および温・熱間鍛造性の評価

①で開発した材料を用いて、開発した粉末混合技術および成形技術を用い、均質な直径 140mm、高さ 50mm 大型成形体を作製した。作製した成形体は③の技術を用いて金型形状に加工し、川下ユーザーと連携しながら、熱間鍛造用の実機にて性能評価を行い、その温・熱間鍛造性を評価した。得られた情報を①にフィードバックし、鍛造試験に適切な素材の選定を検討した。

③ ニアネット焼結技術の開発と成形加工性の評価

ニアネット成形を行うにあたり、①で開発した材料との反応層が 1mm 未満の中子材料を開発し、トラベリングゾーンシンタリング法等も活用し、大型成形体へ適用した。また、②で作製した新規素材を用いた大型成形体に対して放電加工を行い、従来材と同等の加工性を持つことを確認した。

④ 事業化に向けた対応

本製品を市場に投入する準備として、量産化に向けて原料の混合、乾燥、焼結、加工の各工程で効率化を図り、1日に2個以上の焼結を可能にすることで、川下ユーザーへの安定供給のための検討を行った。また、新製品を導入するために必要不可欠な②で実施した実機での性能評価を行い、事業化への足がかりとした。

⑤ プロジェクトの管理・運営

年4回の委員会を開催し、目標を到達するための効率的な運営を行った。

1－4 当該プロジェクト連絡窓口

財団法人石川県産業創出支援機構

プロジェクト推進部研究交流課 課長

辻江 冬樹

Tel:076-267-6291 Fax:076-268-1322

E-mail:tsujie@isico.or.jp

第2章 機械特性に優れた合金素材の設計・開発

2-1 粉末調整技術

本研究で焼結されたWC-FeAl合金には図1に示すように組織中に極微小 Al_2O_3 が観察される。この Al_2O_3 はごく微小の状態のままであれば合金の強度には影響しないが、発生量が多くなる

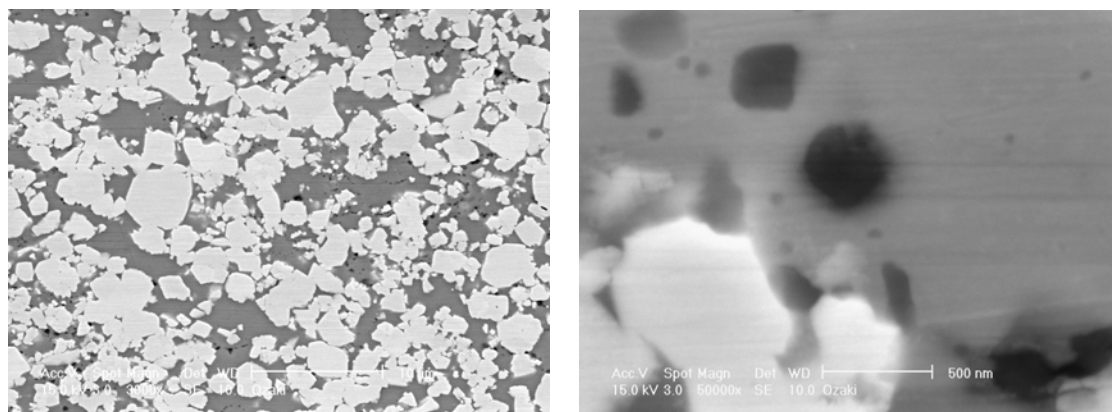


図1 WC-40vol%FeAl 焼結体の SEM 像

と粗大化あるいは連なることで強度が低下すると考えられる。実際に、開発したWC-FeAlのうち低強度材の抗折試験後の断面を観察すると、図2のように、 Al_2O_3 を基点として破壊していることがわかった。この Al_2O_3 の生成は、WC-FeAl超硬合金を形成するFeとAlの粉末が酸化することが原因である。図3はFeとAlとOの三元計算状態図であるが、これからもわかるように、Feが酸化しても、安定的に Al_2O_3 を形成することになる。すなわち、粉末の調整において、各粉末の酸化を防ぐ必要がある。

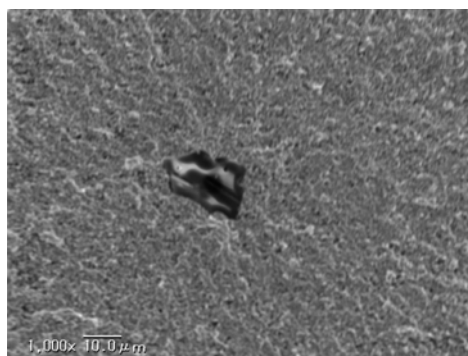


図2 破壊の基点となった Al_2O_3

そこでWC-FeAl合金製造工程中に各粉末が酸化しないように対策をとった。特に、粉末を混合する過程で使用するアトライタの改良を行い、WC、Fe、Al各粉末を調整した。

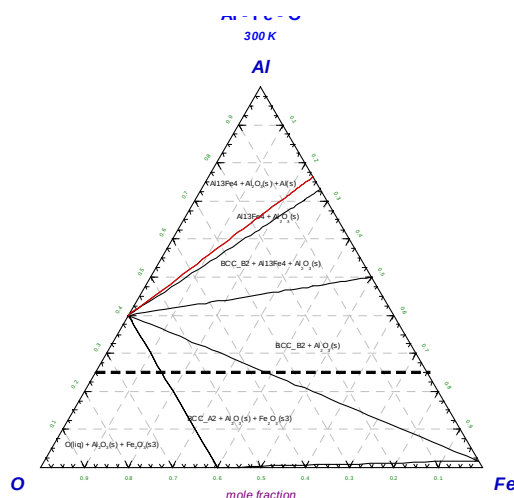


図3 Al-Fe-O 三元計算平衡状態図

2-2 機械的特性の向上

アトライタによって混合された WC-FeAl 粉末を後で述べる通電焼結法によって固化成形し、硬度、抗折強度、破壊靱性の各機械特性を測定した。

WC-FeAl 超硬合金において、HRA80 を越えるために、WC と FeAl の混合割合を検討した結果、FeAl 量が 25~45Vol%であれば、硬さの目標はクリアできることがわかった。

強度および破壊靱性を向上させるために、WC の粒径、および粒度分布について検討した。その結果、適正な WC の粒径を見いだすことができ、強度、靱性ともバランスが取れた素材ができることがわかった。

結合相である、FeAl の強度を向上させることで、WC-FeAl 超硬合金の強度、破壊靱性を向上させることができる。そこで、FeAl 結合相の Fe-Al 割合および添加元素を検討した結果、HRA80、抗折強度 2.9GPa、破壊靱性値 $23.7\text{MN}/\text{m}^{3/2}$ を同時に満たす材料を開発できた。特性を整理すると図4のようになる。

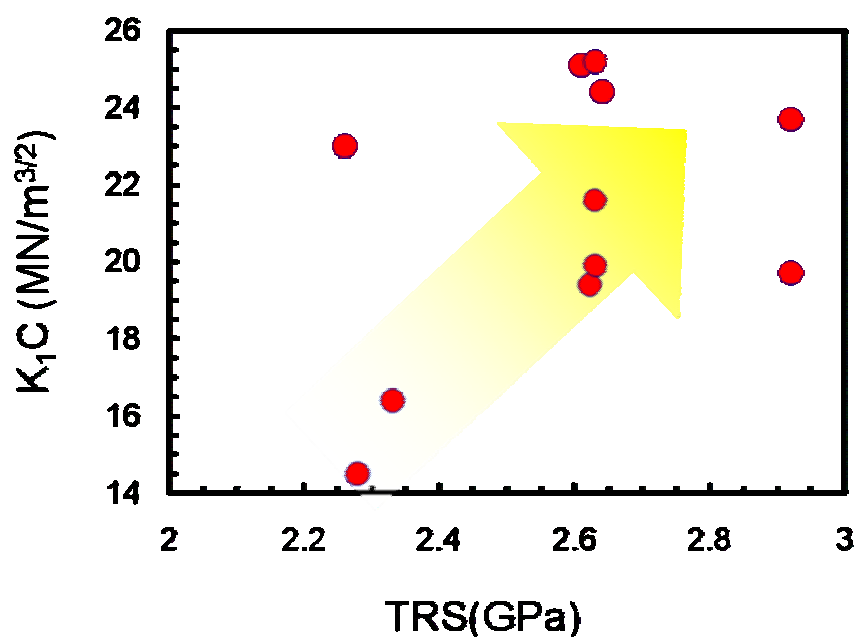


図4 開発した WC-FeAl の機械的特性図（すべて HRA80 以上）

第3章 大型成形体の作製および温・熱間鍛造性の評価

3-1 大型成形体用通電焼結技術

本研究では、大型成形体の作製のために、図5に示す通電焼結装置（エス・エス・アロイ製）を導入した。本装置は通常の通電焼結同様、黒鉛型に通電することにより粉末の加熱を行うと共に、ホットウォールと呼ばれるヒーターによって黒鉛型の外側からも加熱できるようになっている。これは黒鉛型からの輻射損失を低減させる特徴があり、大型で均質な焼結体を作製できるとされている。この装置を（株）サン・アロイに導入し大型成形体の焼結実験を行った。



図5 大型成形体用通電焼結装置

当初導入以降、図6のように、電源容量のアップ、放射温度計の設置、高温用外部ヒーターの設置など改良を加え、直径 140mm の WC-FeAl 超硬合金を作製することができた。作製例



(a) 増設電源



(b) 放射温度計



(c) 高温外部ヒーター

図6 通電焼結装置改造部分

を図7に示す。本装置は、焼結中の温度、加圧力、真空度、収縮量、電流、電圧などをモニターすることができる。そのため、それぞれのパラメータによる焼結体への影響を確認することができ、焼結条件を適正に修正することが可能である。

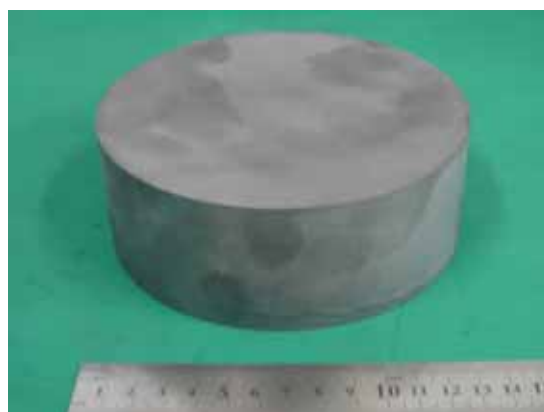


図7 大型成形体（直径 140mm 高さ 50mm）

3-2 大型成形体の焼結再現性の確認

現在、焼結時の電流、加圧操作は手動で行っておりほぼ同じように昇温し、同じタイミングでプレス圧力を上昇させているが多少のばらつきは発生している。そこで同じ組成で原料ロットや焼結サイズが異なる焼結体の特性のばらつきを調べた。その結果を表6に示す。これから、平均値に対し、硬さは最大0.4%、比重は最大0.09%、抗折強度は最大2.8%、破壊靱性は最大4.2%となり、非常に安定して作製できていることがわかった。

表6 WC-FeAl 合金特性の再現性

原料 No.	0905	0926	0927	0934	0941
焼結 No.	83	100	101	116	127
焼結サイズ	φ100×25	φ100×42	φ100×42	φ80×47	φ80×25
硬さ(HRA)	80.6	80.5	80.8	81.1	80.7
比重	11.26	11.27	11.28	11.27	11.27
抗折強度(GPa)	2.62	2.71	2.73	2.68	2.59
破壊靱性(MN/m ^{3/2})	19.4	18.9	18.2	—	19.5

3-3 耐熱性評価

WC-FeAl 超硬合金の高温耐酸化性を TG-DTA によって調べた。測定した試料は、MA により WC と Fe および Al を混合した後、通電焼結した WC-40vol%FeAl 試料、および比較材として、従来法による WC-37vol%Co 焼結体とした。それぞれの焼結体を、一辺約 3mm の立方体に切り出し、昇温速度 20°C/min、加熱雰囲気を大気として TG-DTA 測定を行った。

従来超硬合金である WC-37vol%Co 合金の TG-DTA 曲線を図8に示す。TG と DTA のいずれも、700°C程度から急激に増加していることがわかる。このことは、質量の増加と発熱反応をしていることを示しており、大気中の加熱であることから、酸化反応であることが推察される。

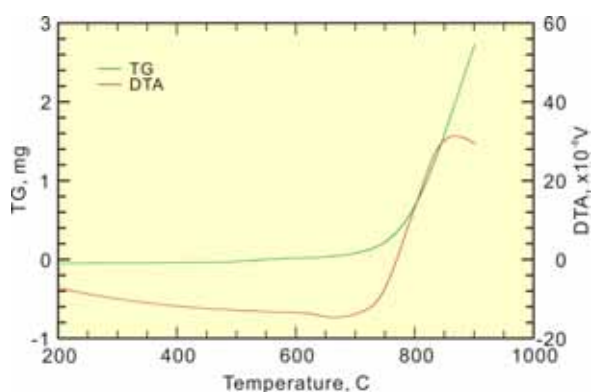


図8 WC-37vol%Co の TG-DTA 曲線



図9 TG-DTA 測定後の
WC-37vol%Co

測定後の試料外観は、図9に示すように、青みがかっており、Coの酸化であることがわかる。

次に WC-40vol%FeAl 合金の TG-DTA 曲線を図10に示す。従来超硬合金と比べ、明らかに質量増加および発熱量が少なくなっていることがわかる。さらに、発熱反応の開始温度が約800℃であり、従来超硬合金よりも高温で酸化することがわかる。すなわち、WC-FeAl 超硬合金は高温下での耐酸化性が従来超硬合金よりも優れていることがわかる。MA 試料の TG-DTA 測定後の試料外観を図11に示す。試料は薄く赤みがかったり。

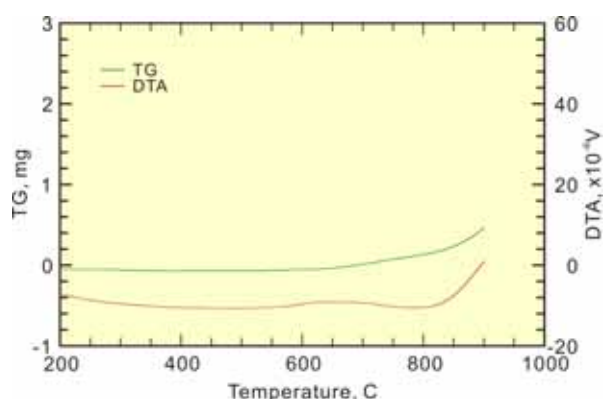


図10 MA 試料の TG-DTA 曲線



図11 TG-DTA 測定後の MA 試料の外観

TG曲線から、最大質量増加量を求め、各試料の表面積で除すことによって、単位面積あたりの質量増加量を求めた。その結果、従来超硬合金では、約 40g/m²の質量増加が見られたのに対し、開発したWC-FeAl超硬合金では、10g/m²以下となり、4 倍以上の高温耐酸化性が有ることがわかった。

さらに加熱条件を厳しくした、大気中で1000℃、30 分の加熱を行うと、図12のように、従来超硬合金では、著しい変化が現れた。一方、この条件においても、開発した WC-FeAl 合金は変色しただけで、変形は全く見られなかった。このことから、開発材の高耐熱性が示唆される。

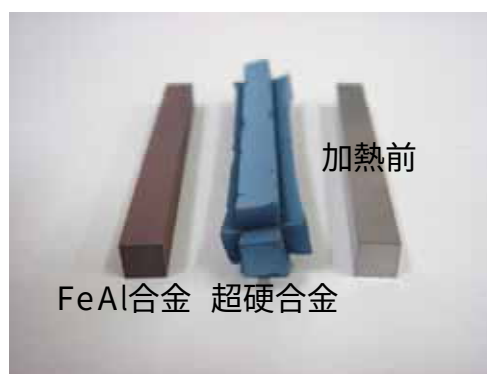


図12 1000℃で30分加熱後の試験片の外観

3-4 落錘式衝撃試験機による高温耐衝撃性評価

温・熱間鍛造用高耐久性金型材料の強度を的確に評価し、材料開発の指針を得ると同時に、金型設計時の強度データを提供できるようにするために、落錘式衝撃試験装置を設計・製作した。装置の模式図を図13に示す。支点間距離 40mm、支点先端 $r=2\text{mm}$ の試料台に長さ 50mm の 5mm 角棒を図のように梁状に設置し、0~200cm の高さから重量 1kg~7kg のハンマーを落下させ試験片への衝突時のハンマーへの荷重をロードセル（共和電業製）で測定し記録計（日置電機製）を用いてサンプリング周期 $1\mu\text{sec}$ で記録した。

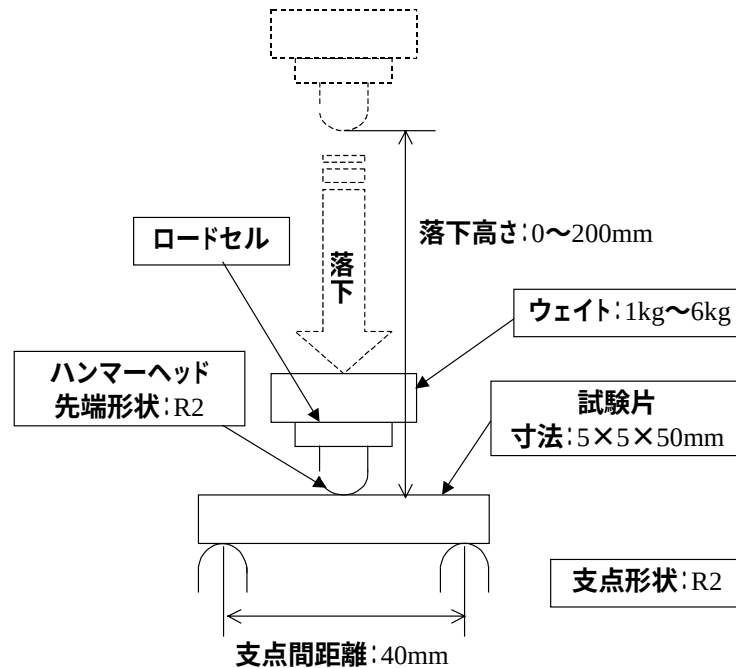


図13 落錘式衝撃試験機の模式図

図14に加えた荷重と検出値の関係を示す。検出値は加えた荷重とほぼ一致しており、また、図14右図に示すようにハンマーヘッドを付けた状態で荷重の負荷及び除荷時にヒステリシスがないことを確認した。

作製した衝撃試験機の外観を図15に示す。

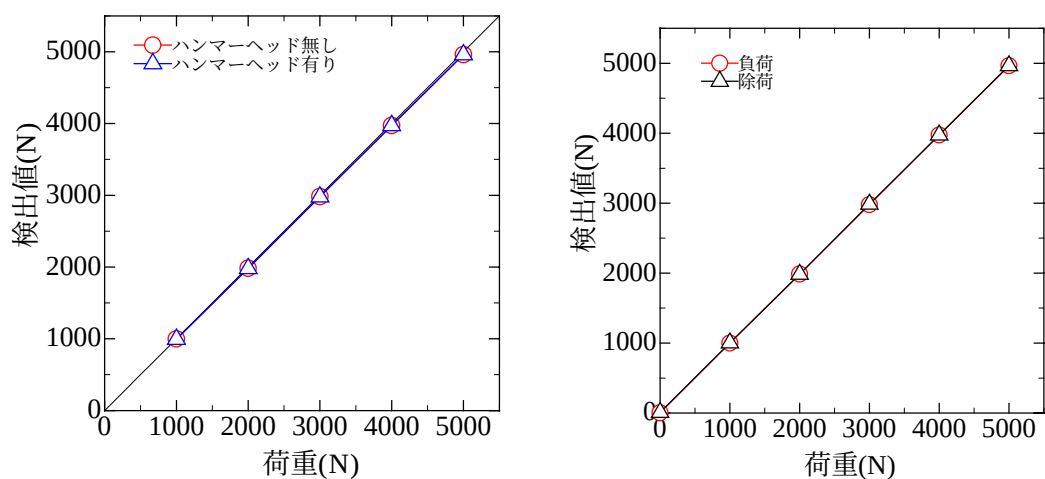


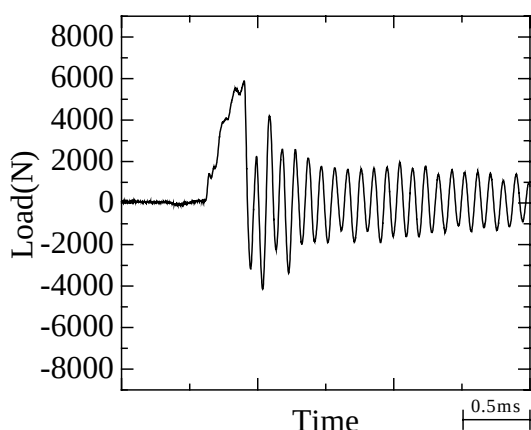
図 1 4 荷重値検証結果



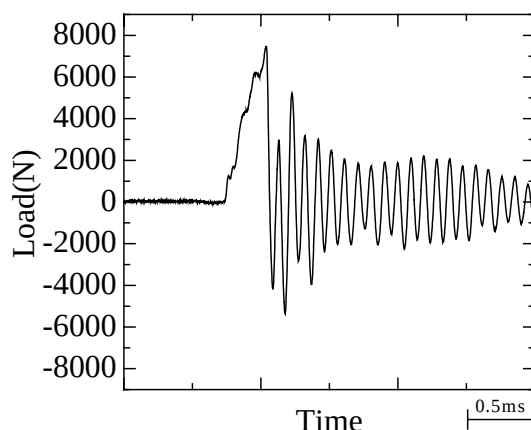
図 1 5 衝撃試験機の外観

室温において試験片の材質，ハンマーを落下させる高さを変えてハンマーを落下させ，衝撃試験を測定した．図 1 6 に得られた荷重－時間曲線を示す．なお，従来超硬合金とハイス鋼（YXR33）を比較材とした．荷重はハンマーが試験片に接触した直後に急激に上昇し荷重最大値に達した後一気に下降しその後 0 点を中心に激しく振動する波形となった．最大荷重値に達する前の荷重の瞬間的な低下は試験片の破壊過程を反映したものではなくハンマーと試験片の衝突によるハンマー，ロードセル，試験片，試料台の振動が複雑に影響していると考え

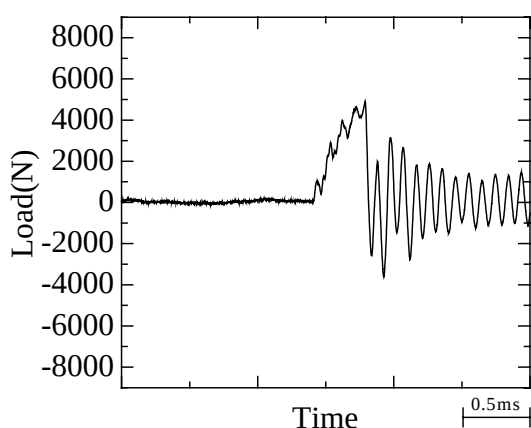
られる．なお、荷重値ゼロ近傍の振動はハンマーとロードセルの固有振動によるものである．また、この試験の再現性に問題はないことを確認している．これまでの結果から判断すると、試験によって得られる荷重－時間曲線を再検討する必要があるものの、検出される荷重値そのものは適切に得られていると判断でき、最大荷重値を用いることで試験片材質の違いを相対的に評価できると考えられる．



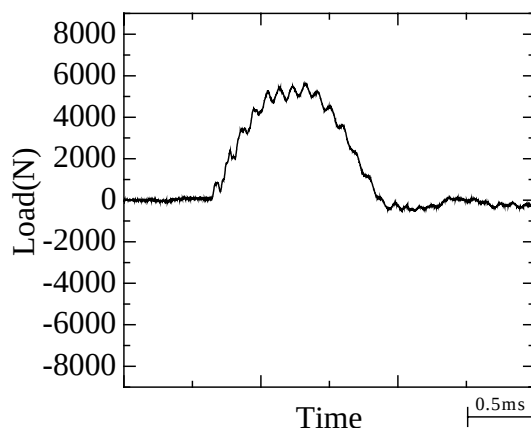
超合金 (RE75, 高さ 300mm)



超合金 (FD25, 高さ 300mm)



WC-60vol%FeAl (高さ 300mm)



ハイス鋼 (YXR33, 高さ 300mm)

図 1 6 落錘式衝撃試験機によって得られた波形データ

そこで、荷重－時間曲線の最大荷重値と抗折力試験で得られる抗折強度から算出した静的破断荷重値を比較した．結果を図 1 7 に示す．ただし、比較材として用いた YXR33 は衝撃破断試験では破断しなかったので静的荷重とは単純には比較ができなかった．衝撃破断荷重は静的破断荷重より小さくなる傾向が認められるが、静的破断荷重値と衝撃試験の最大荷重値との間には相関があることがわかる．このことから、最大荷重値を利用して試験片材質を評価できると考えられる．

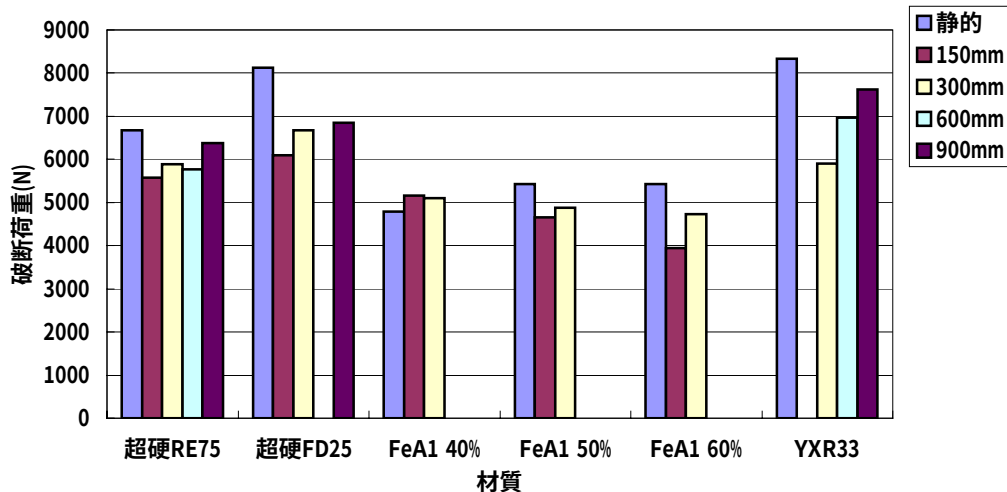


図 1 7 静的破断荷重と衝撃破断荷重の比較

次に、高温での耐衝撃性の評価をするため、電気炉（デンケン製）で加熱した試験片で衝撃試験を実施した。電気炉の設定温度を変化させ、また電気炉より取り出してから時間調整により試験片温度を変化させて、高温試験片の衝撃試験を行った。図 1 8 に試験片温度と最大荷重値の関係を示す。YXR33 は 800℃ においても破断しなかったが高温での軟化が激しく、最大荷重値が著しく低下した。また、従来超硬合金（サン・アロイ製 RE75）も高温で最大荷重値の低下が見られた。これらに対して、開発材の WC-FeAl 合金の場合は高温下でも最大荷重値はほとんど低下せず、高温時の最大荷重値は従来材よりも高い値が得られている。すなわち、開発した合金は高温時の衝撃強度が室温のそれと同等であり、従来材に比べ、高温特性が優れていることが明らかとなった。

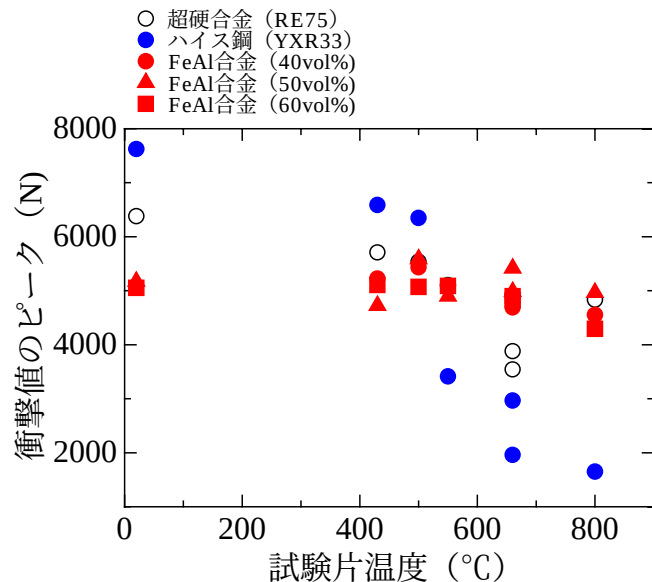


図 1 8 試験片温度と衝撃荷重ピークの関係

3-5 温・熱間鍛造試験

開発した WC-FeAl 超硬合金の焼結体を金型形状に加工し、川下ユーザーの協力の下、各ユーザー所有の温・熱間鍛造用の実機にて性能評価を行った。その結果を基にさらなる高性能化を図った。

第4章 ニアネット焼結技術の開発と成形加工性の評価

4-1 中子材料の検討

WC-FeAl 超合金のニアネット成形を行うために、中子材料の適正について検討した。中子材料に求められる適正として、①粉末の成形性、②成形体のハンドリング性、③中子の剥離性、④超硬材料との反応性、⑤寸法精度 を考慮する必要がある。この適正について、以下の様に検討した。

中子として使用するための材料として、六方晶窒化ホウ素 (hBN)、アルミナ (Al_2O_3)、イットリア (Y_2O_3)、グラファイト (C) の各種粉末を使用した。各粉末を型に充填し、プレス装置により直径 6mmの圧粉成形体を作製した。この成形体の外観を図19に示す。hBNおよび Al_2O_3 は良好な成形性を示し、ハンドリングも可能であった。一方、Cは成形はできるが、層状に割れることが認められた。ただし、注意深く扱うことでハンドリングは可能であった。 Y_2O_3 は成形はできるものの、非常に壊れやすくハンドリングすることができなかった。以上のことから、これらの材料の内、①成形性と②ハンドリング性の両方可能なhBN、 Al_2O_3 、Cを、中子材料として、焼結実験に使用した。

焼結実験は図20のような方法により行った。中子を内径 15φの黒鉛型内に設置し、そこに所定量のWC-FeAl粉末を挿入し、通電焼結法により焼結体を作製

した。焼結体表面を研削した後の外観を図21に示す。hBNおよび Al_2O_3 は中子が研削後も中子が残っていた。一方、Cは研削中に中子がバラバラになり、底にのみ残留していた。中子を取り出すため、中子の破壊を試みた。その結果を図22に示す。hBNおよびCは簡単に破壊され、粉末に戻った。一方、 Al_2O_3 はしっかり焼結されており、破壊することができなかった。従って、③中子の剥離性を考慮すると、中子として使用できるのは、hBNおよびCであった。これらいずれも、今回の焼結条件では④WC-FeAl合金との反応性は認められなかった。

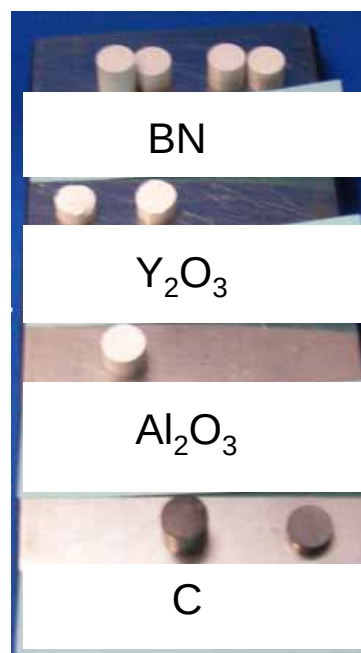


図19 各種粉末のプレス成形体の外観

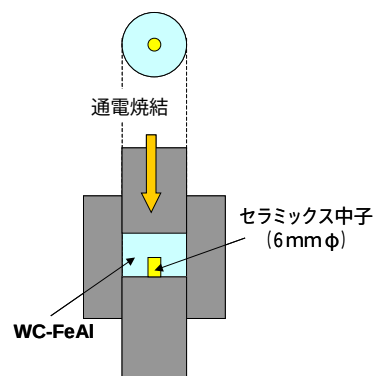


図20 焼結実験概要図

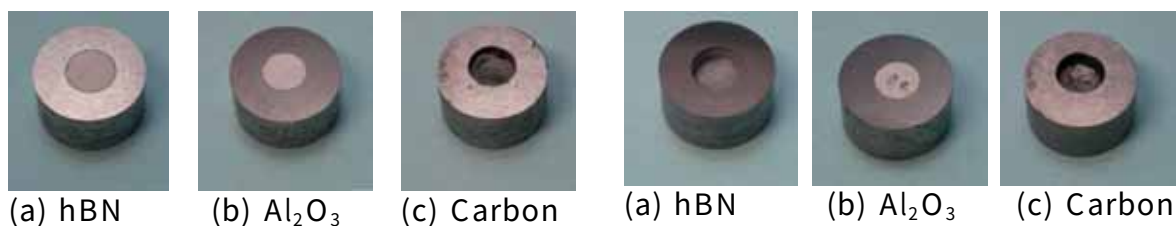


図 2 1 中子入り焼結体の外観

図 2 2 中子の破壊後の外観

図 2 3 に示すように、中子を破壊した後の穴の形状を確認すると、hBN を使用した場合は穴の直径が 13% 大きくなっていた、これは、通電焼結時にプレスされることにより、径方向に変形したためであると考えられる。一方、C を使用

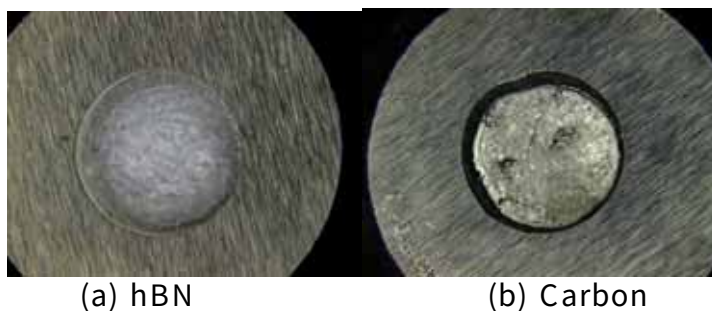


図 2 3 中子破壊後の穴形状

した場合、直径はほぼ元と同じ 6mm であったが、若干の変形が見られた。これは、C の圧粉成形体の強度が弱いために、変形したと考えられる。以上のことより、⑤形状が維持されていた hBN が中子として最も有効であることがわかった。

4-2 長尺焼結体の作製

トラベリングゾーンシンタリング法を用いて、WC-FeAl 超硬合金の長尺、あるいはパイプ状の成形体のニアネット成形を試みた。本成形手法の概略を図 2 4 に示す。この手法は通電焼結法的一种であるが、従来の通電焼結法とは異なり電極を横に配置し、加圧方向と電流が流れる方向を垂直に配置している。これにより、焼結体を移動させることができ、通電されている領域を長手方向に移動させることが可能となる。高温部を移動させることにより長手方向に連続的に焼結させていくことが可能であるため、長尺の成形体が作製できる。さらに、中心部に中子を入れることによ

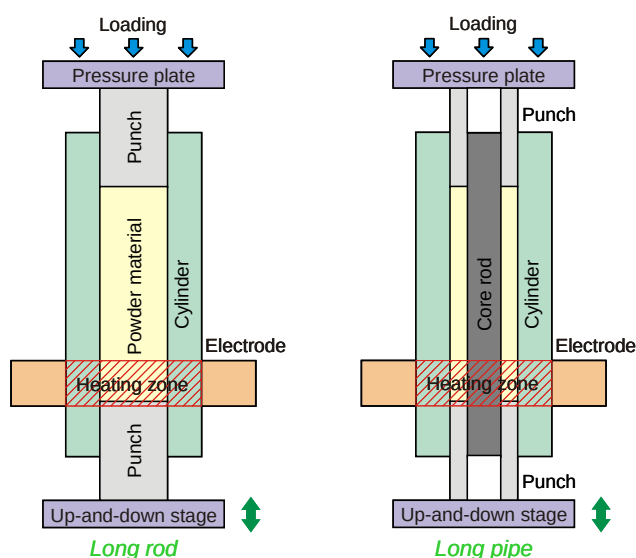


図 2 4 トラベリングゾーンシンタリング法の概略

て、パイプ形状の成形体を作製できる。この手法で、WC-FeAl 超硬合金を焼結する条件を確認した。

WC-40vol%FeAl 組成の粉末を用いて、昇温速度 30℃とし、焼結温度を 1280℃～1350℃まで変えた時の焼結体の密度を求めた。結果を図 2 5 に示す。1300℃でほぼ緻密化されていると考えることができる。1300℃を

超えると、合金の溶融が認められた。合金が溶融すると黒鉛型からのしみ出しや黒鉛型との反応が起こるため不適当である。従って、WC-40vol%FeAl の本手法による焼結最適温度は 1300℃であることがわかった。

1300℃で作製した焼結体の外観を図 2 6、図 2 7 に示す。焼結直後は成形体表面に黒鉛が付着しているため、切削除去している。本手法により、WC-FeAl 超硬合金の長尺試料のニアネット成形が可能となった。

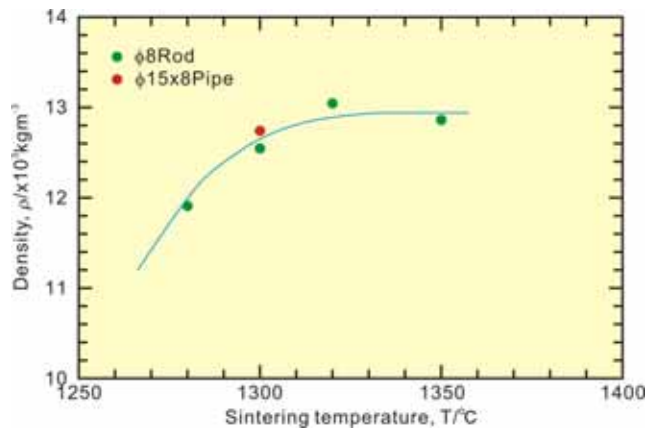


図 2 5 焼結温度と試料密度の関係。



図 2 6 棒状成形体

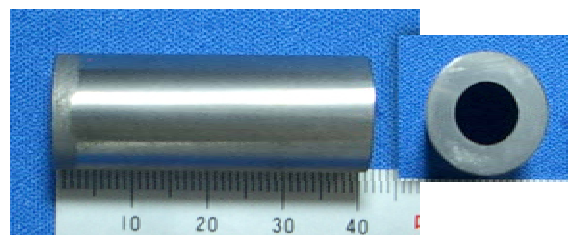


図 2 7 パイプ状成形体

4-3 成型加工性の評価

ケージーテクニカルが有するワイヤー放電加工機（ソディック製 A325）で加工し、加工面の観察および電流・電圧の測定を行った。比較のため、従来の超硬合金で同様の加工を行い、加工面の観察および電流・電圧の測定を行った。開発材は WC-40vol%FeAl，比較材は WC-37Vol%Co（サン・アロイ製 EA90 材）とした。両者の加工面の観察結果を図 2 8 に示す。表面の状態に若干の違いが観察され、Co を有する従来超硬では、微小な気孔が観察されるのに対して、FeAl を有する開発材ではそのような気孔は見られない。また、放電加工面の断面の観察結果を図 2 9 に示すが、放電加工痕の深さは開発材の方が浅い。放電加工痕は合金の強度を低下させ金型として使用する際取り除かなければならないため、気孔がなく放電加工痕が浅いことは後工程で優位である。

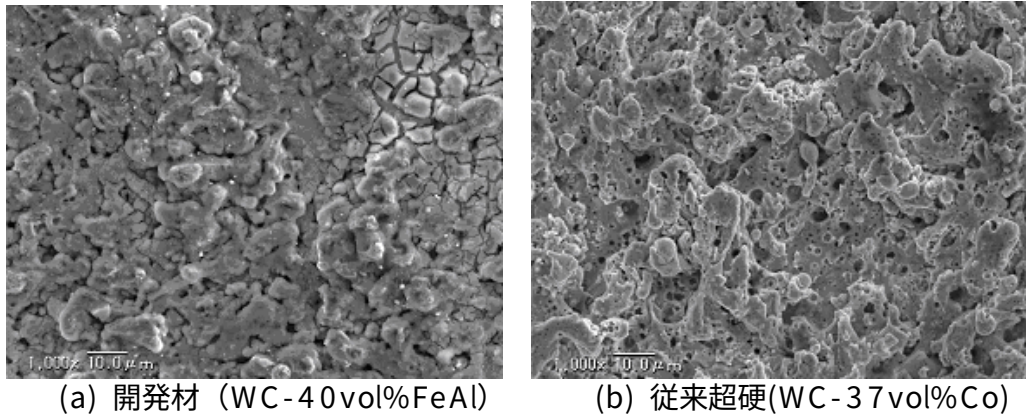


図 2 8 放電加工面観察結果

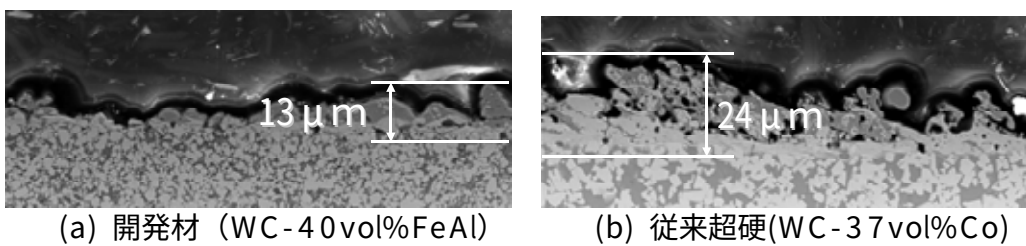


図 2 9 放電加工段面観察結果

次に、放電加工中の電流・電圧測定結果を図 3 0 に示す。放電加工条件は両者で差が無く、電流・電圧にも両者に差異は無かった。すなわち、開発材においても従来超硬合金と同等の放電加工条件で、良好な加工が可能であった。

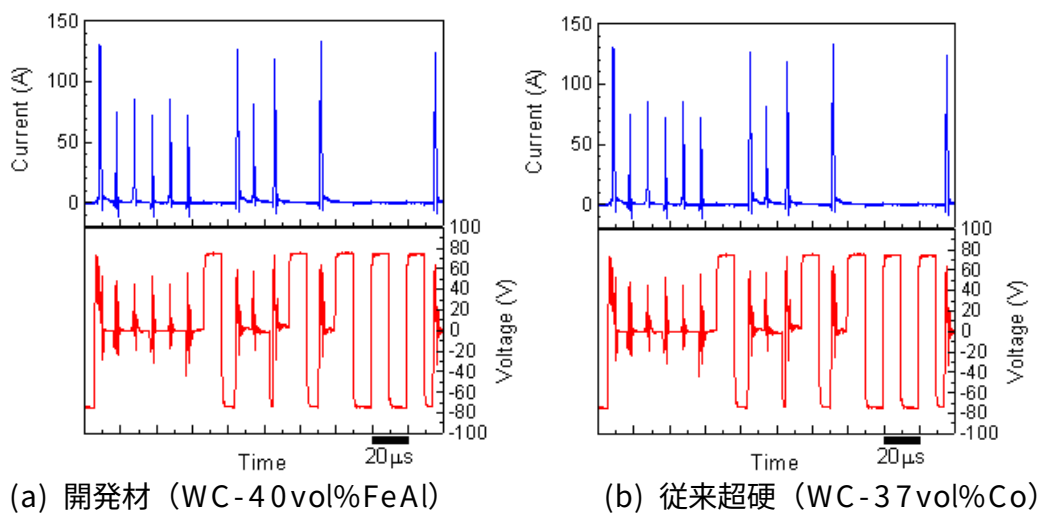


図 3 0 電流・電圧測定結果

第5章 全体総括

温・熱間鍛造用金型に適した超硬合金素材として、WC-FeAl 系超硬合金を選定し、実用化可能な金型を作製することを目的として、研究開発を行った。その結果を以下にまとめる。

耐摩耗性に優れた超硬合金を基本として、結合相をさらに見直し、温・熱間鍛造に優れた材料開発を行った。結合相のFeAl金属間化合物への添加元素の検討、WC粒度分布、さらに、新規な結合相の検討も行った。この開発材料に関して温・熱間領域での鍛造用金型への適用の可能性を探るため、機械特性について評価を行った。また、実際の温・熱間鍛造用金型を想定した熱衝撃性の評価を行った。得られたデータを解析し、材料開発へフィードバックし、さらなる特性の向上を行い、機械的特性はHRA80、抗折強度 2.9GPa、破壊靱性値 $23.7\text{MN}/\text{m}^{3/2}$ を同時に満たす材料を開発できた。

開発した粉末混合技術および成形技術を用い、均質な直径 140mm、高さ 50mm の大型成形体を作製することができた。作製した成形体は金型形状に加工し、川下ユーザーと連携しながら、熱間鍛造用の実機にて性能評価を行い、その温・熱間鍛造性を評価し、その結果を基にさらなる高性能化を図った。

ニアネット成形を行うにあたり、開発した材料との反応層が 1mm 未満の中子材料を開発し、大型成形体へ適用した。また、新規素材を用いた大型成形体に対して放電加工を行い、従来材と同等の加工性を持つことを確認した。

これらは、年4回の技術開発委員会での議論を踏まえ、さらに各事業者間での議論を踏まえて達成することができた。

さらに、本製品を市場に投入する準備として、量産化に向けて原料の混合、乾燥、焼結、加工の各工程で効率化を図り、1日に2個以上の焼結を可能にすることで、川下ユーザーへの安定供給のための検討を行った。また、新製品を導入するために必要不可欠な実機での性能評価を行い、事業化への足がかりとした。

事業化のためには、金型材料のさらなる特性向上のための最適設計に加えて、開発材料でないと鍛造ができない分野および対象材料の選別が必要となる。そのためにも、材料開発と強度試験を綿密に行える体制を組むと供に、加工対象材料を広くリサーチし、開発金型に適した鍛造分野を見つけることにより、市場への投入が可能となると考えている。