

平成 27 年度
革新的ものづくり産業創出連携促進事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

軸方向に傾斜特性を有する超硬材料の開発と各種ギヤの
複合鍛造技術の開発

研究開発成果等報告書概要版

平成 28 年 3 月

委託者 中部経済産業局
委託先 鍛造技術開発協同組合

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（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	2
1-3 成果概要	4
1-4 当該研究開発の連絡窓口	6
第2章 本論	
①金型材料開発	7
②鍛造試作研究	12
③低温間温度での温度制御鍛造の研究	14
④試作品の精度確認と川下製造業者による外部評価	14
⑤CAE解析手法の構築	16
第3章 全体総括	19

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

自動車関連産業では環境とエネルギー問題を克服するために、燃費効率の良いシステムが要請されている。本研究の目的は、自動車駆動部の動力伝達用に多く使われているヘリカルギヤの高機能化を図るために、新しい鍛造技術を確立することである。

現状では、国内の自動車メーカーが製造するヘリカルギヤの95%以上が切削加工によるもので、鍛造加工のプロセスによるものは5%以下に過ぎない状況にある。本研究では、鍛造加工によってヘリカルギヤの歯形を創成する際に歯面のクラウニング加工も同時に行う新しい成形方法を開発し、そのための金型材料の開発も行った。

この新規な金型と鍛造に係る複合成形技術によって、クラウニング付ヘリカルギヤの高精度化と高機能化及び工程数の削減を達成し、鍛造加工によるギヤ製品の用途拡大を図ることを目標とした。本研究で行う開発目標値は、以下の通りである。

- ・鋼のヤング率に対して2.5～3.0倍、従来の超硬材料（超硬合金）に対しても1.2倍以上のヤング率を持つ新しい超硬材料を開発する。
- ・新しく開発した高ヤング率の超硬材料と従来の超硬材料を組み合わせ、軸方向にヤング率が変化する傾斜特性超硬材料を新規に開発する。
- ・開発する傾斜特性を持った金型を使用し、鍛造加工中にギヤ歯面に求められているクラウニング（0.005～0.010mm）を同時加工するための技術を確立する。
- ・切削での生産性（4～5 pcs/min）に対して2倍（9～11 pcs/min）の生産性を持つ加工技術を開発する。
- ・切削加工による部品生産に比べてコストを20～25%低減する。

傾斜特性を持った超硬材料の開発とヘリカルギヤ等の複合鍛造技術の開発により、品質・コスト面での国内・外の競争力が強化され、現在ではヘリカルギヤ鍛造化率4%に対して2020年には2倍以上の11%に増加させることを目指す。

本研究の概要

ギヤの歯形鍛造と同時にクラウニング付与を可能とするために、超硬合金金型の軸方向にヤング率の傾斜特性を有するものを開発し、その開発金型を使用した低温間鍛造によってクラウニングの付いたスパーギヤとヘリカルギヤを成形した。

研究の実施項目は、次の通りである。

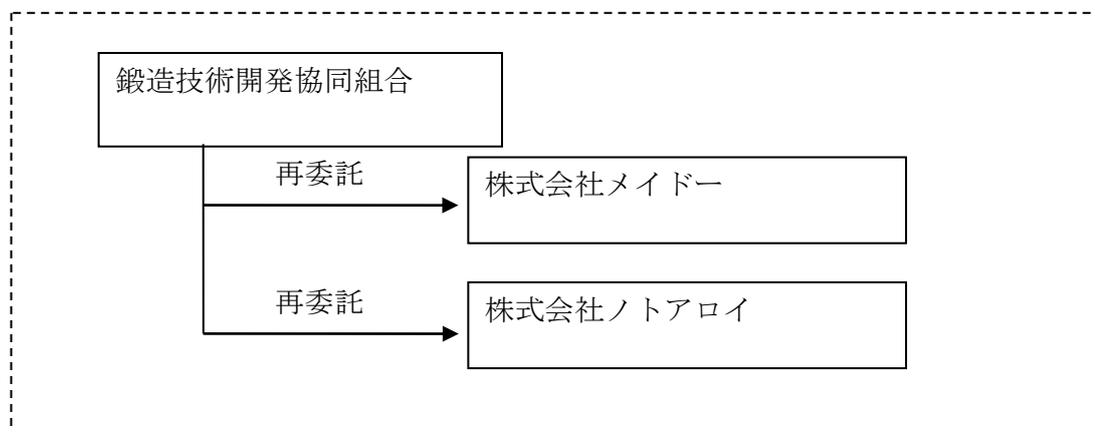
- ① 金型材料開発
- ①-1 高ヤング率の超硬材料開発
- ①-2 軸方向に傾斜特性を持った超硬材料の鍛造型への利用

- ② 鍛造試作研究
- ③ 低温間温度での温度制御鍛造の研究
- ④ 試作品の精度確認と川下製造業者による外部評価
- ⑤ C A E 解析手法の構築

1 - 2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織 (全体)



総括研究代表者 (P L)

所属：株式会社メイドー

役職：技術部設計技術課 主幹

氏名：佐藤 晃司

副総括研究代表者 (S L)

所属：株式会社メイドー

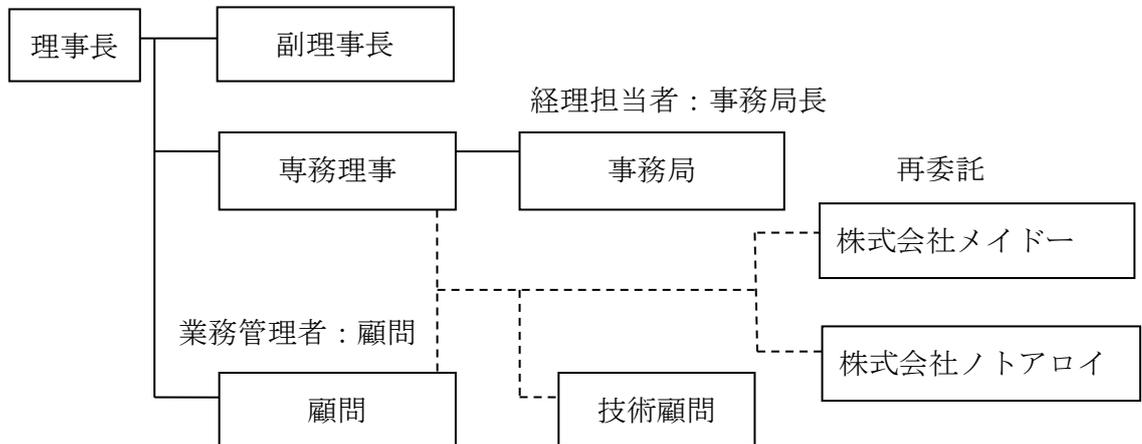
役職：技術顧問

氏名：安藤 弘行

2) 管理体制

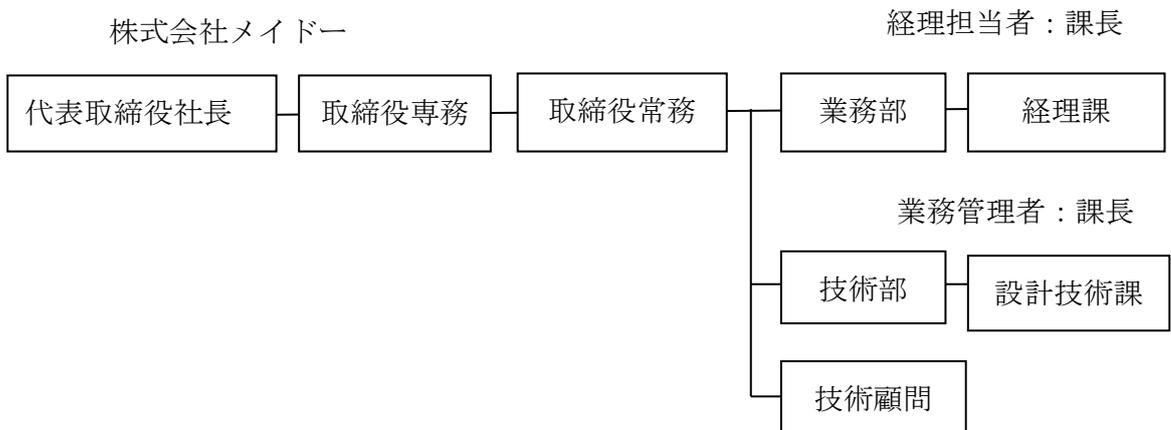
① 事業管理機関

鍛造技術開発協同組合

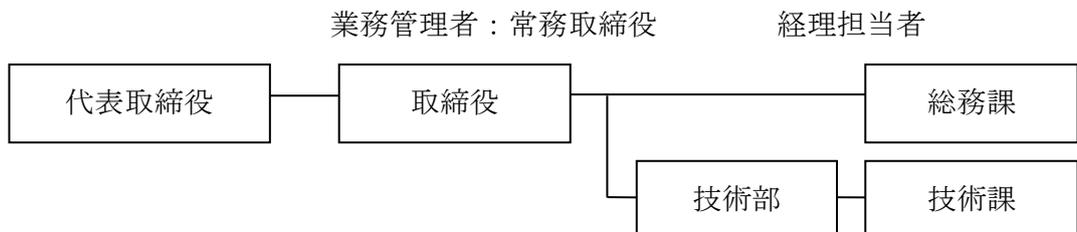


② (再委託先)

株式会社メイドー



株式会社ノトアロイ



(2) 研究員

鍛造技術開発協同組合

氏 名	所属・役職
沖本 邦郎	技術顧問

株式会社メイドー

氏 名	所属・役職
中村 壮爾	技術部 設計技術課 課長
佐藤 晃司	技術部 設計技術課 主幹 (P L)
野口 敬之	技術部 設計技術課 係長代理
北村 裕輝	技術部 設計技術課
安藤 弘行	技術顧問 (S L)

株式会社ノトアロイ

氏 名	所属・役職
佐々木 賢	常務取締役
林 憲一	技術課 課長
志田 穰太郎	技術課 主任
伊勢 大成	技術課

1-3 成果概要

① 金型材料開発

①-1 高ヤング率の超硬材料開発

超硬合金素材で上下方向から中央部に向けてヤング率差が付いた傾斜特性超硬金型を開発するためには、先ずヤング率そのものが大きい超硬材料が必要である。そこで、WC粉末の組成と粒度を調整して鋼の約3倍のヤング率を持つ超硬材料を開発し、開発目標値を上回ることができた。

①-2 軸方向に傾斜特性を持った超硬材料の鍛造型への利用

傾斜特性超硬素材は金型加工時の放電加工でクラックが生じることがあり、その発生はヤング率が大きく、且つ、組み合わせる高ヤング率超硬材料と低ヤング率超硬材料のヤング率差が大きいほど顕著である。鋭意検討を重ねて、初年度の実施計画書に掲げたヤング率差の開発目標値100GPaを大幅に上回る傾斜特性超硬金型を開発した。

② 鍛造試作研究

傾斜特性金型によるスパークギヤとヘリカルギヤの分流方式鍛造により、鍛造ダレの無い歯形が成形できた。スパークギヤとヘリカルギヤにおいてはクラウニングと判断される形状が見られた。しかし、ヘリカルギヤでは歯面の両側でクラウニングの付き方が相違していた。これはロックアウト工程における鍛造品と金型の摩擦によるのではなく、鍛造成形時に付与される左歯面のクラウニング量が右歯面よりも少ないためであることがわかった。

③ 低温間温度での温度制御鍛造の研究

低温間鍛造の目的は、鍛造直後と製品取り出し時における製品の温度差を活用して成形品の熱収縮量を制御し、ロックアウト荷重を低減させることによって歯形精度の低下を抑えることにある。スパークギヤの低温間鍛造ではロックアウト荷重が約20%低減した。ヘリカルギヤの低温間鍛造においては、加熱温度の適正化を図ることによってロックアウト荷重を更に低減させることができた。

④ 試作品の精度確認と川下製造業者による外部評価

スパークギヤとヘリカルギヤの歯すじ誤差の測定においてクラウニング形状と思われる高低差(膨らみ)が確認でき、そのクラウニングは開発目標値に到達した。しかし、ヘリカルギヤでは鍛造方向から見た右側の歯面と左側の歯面でクラウニングの付き方が相違しているため、今後、付与量が均等になるように改善する余地がある。

⑤ CAE解析手法の構築

CAE解析ソフトの開発を専門とする外部機関の協力により、単一超硬金型によるヘリカルギヤの分流鍛造における成形解析及び傾斜特性金型によるヘリカルギヤ鍛造の金型応力解析を行った。その結果、CAE解析はヘリカルギヤ鍛造の実験結果を解釈するのに有効で、鍛造加工の未知情報の予測に対して有益なツールとして役立つことがわか

った。

上記の研究実施項目の他に、ヘリカルギヤの研究開発目標値として・生産性・コスト・鍛造化率の向上を挙げていた。生産性とコストに関しては、今後の補完研究を通じてデータを集積する予定である。ヘリカルギヤの鍛造化率向上に関しては、その一翼を担うために本技術の確立に今後とも努める方針である。

1 - 4 当該研究開発の連絡窓口

鍛造技術開発協同組合 顧問 岩田健二

TEL : 042-384-3540 FAX : 042-384-3540

E-mail : k_iwata@tanzo-kumiai.or.jp

第2章 本論

①金型材料開発

①-1 高ヤング率の超硬材料開発

(1) 研究内容

ギヤ鍛造を行う際にクラウニングも同時に付与するために、鍛造用金型でギヤを転写する部位の弾性変形量をクラウニング量に対応して変化させる。その手段として、組成が異なる超硬粉末を段階的に層状に組み合わせてヤング率が大きいものから小さいものに変化する傾斜特性超硬素材を開発する。この場合、高ヤング率の超硬材料が必要であるので、焼結技術を含めてそれを開発する。なお、超硬合金の焼結は一般に液相焼結で行われるが、本研究では固相加圧焼結（通電焼結）を用いた。

(2) 研究の成果

開発目標として、従来からの超硬材料のヤング率は鋼の2.0～2.5倍であるが、これを2.5～3.0倍とすることを目指していた。C_o量配合量や加圧焼結条件の最適化を図ることによって約3倍の高ヤング率超硬材料を開発した。

①-2 軸方向に傾斜特性を持った超硬材料の鍛造型への利用

(1) 研究内容

鍛造用金型に適用するために、高ヤング率超硬粉末と従来からの超硬粉末を段階的に混合割合を変えて層状に組み合わせ、その成形体を通電焼結して金型の軸方向にヤング率の差で100GPa、硬度差で4HRA以上の傾斜特性超硬素材を開発する。通電焼結を用いたのは、WCとC_oの混合割合が異なる2種類以上の粉末成形体を層状に重ねて液相焼結すると、液相焼結時にC_oが流動・拡散して各層の中間的な組織に均一化されてしまうので、これを防止するためである。

(2) 研究の成果

図1は開発した傾斜特性超硬材料の配合状態と金属組織の一例で、図2はその焼結体の硬度分布である。図1の写真より、C_oの流動・拡散が抑制されて金属組織が均一化していないことがわかる。このことは、採用した通電焼結方式とその焼結条件が目的とした金属組織の形成に活かされ、層数の多さと相成って図2の硬度分布の創製に役立ったことを示唆している。材料Aを変えて傾斜比率を変更した別のサンプルの硬度分布も併せて図2に示した。図2はヤング率差が100GPaと45GPaの場合であるが、このように自在にチューニングすることが可能となった。

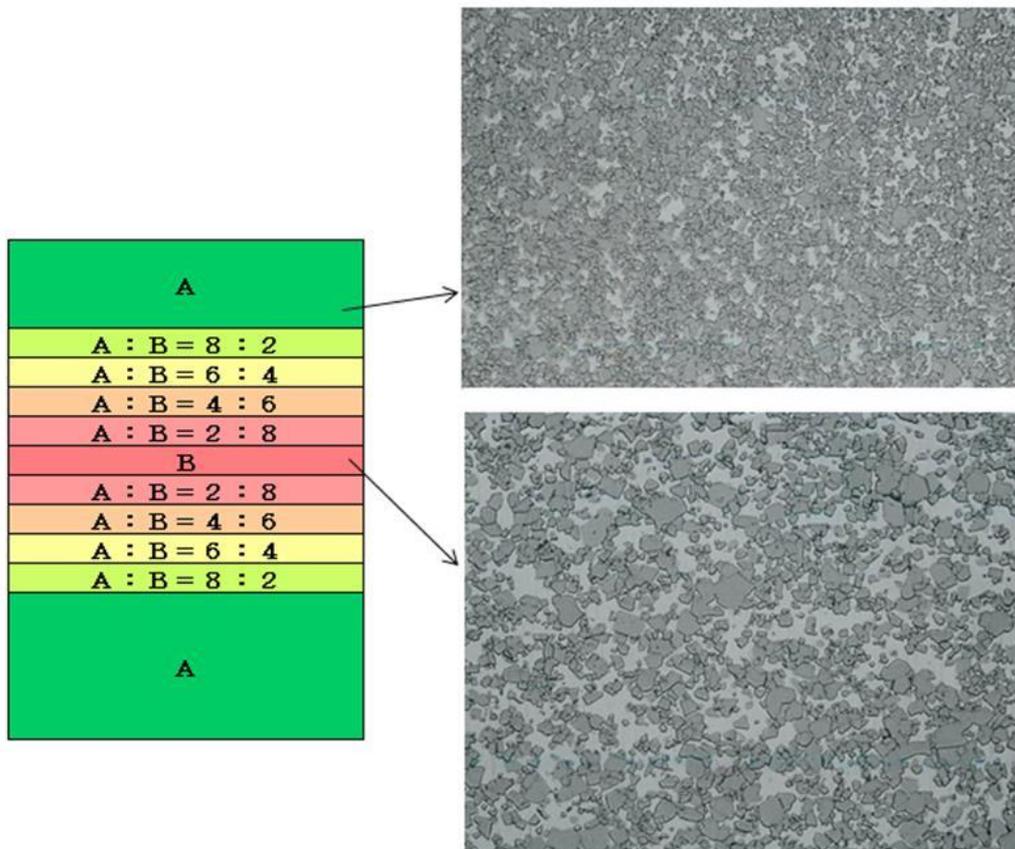


図1 傾斜部の金属組織

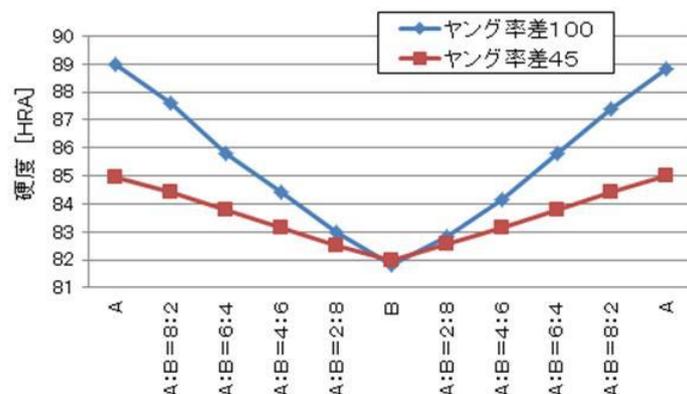


図2 軸方向の硬度分布 (ヤング率差45 GPaと100 GPa)

傾斜特性超硬素材を鍛造型に適用するに際して、当初、ワイヤー放電加工時にクラックが発生することがあった。そのクラックの発生はヤング率が大きく、且つ、組み合わせる高ヤング率超硬材料と低ヤング率超硬材料のヤング率差が大きいほど顕著である。そのため、傾斜特性金型の開発においては、①組み合わせる高ヤング率超硬と低ヤング率超硬の選定、②ヤング率差を付与するための傾斜層の数量とその勾配及び各層の厚さ、③傾斜特性超硬素材の形状寸法、④金型高さ方向の傾斜層の適正配置 (プレスのダイセット

に組み込んだ傾斜特性金型と金型に挿入した鍛造用素材との位置決め適切に対応)、などを考慮する必要がある。

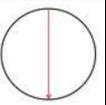
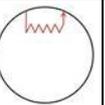
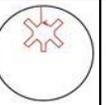
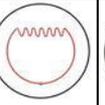
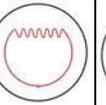
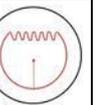
クラックが傾斜部のみに発生していることから、以下の対策を講じてクラック発生傾向を調査した。

- 1) 熱なまし処理で内部応力を緩和してから放電加工を行う。
- 2) 傾斜層の厚み、数、素材の大きさ、ワイヤー放電加工の加工形状を変える。
- 3) WC粒径を大きいサイズで統一し、冷却速度を遅く(徐冷)する。
- 4) ヤング率差を小さくする(100MPa→45MPa)。

これらの検討事項について調べた実験における実験項目の一覧表を表1に示す。表1のように各種条件を変えてクラック防止について検討したところ、以下の結果が得られた。

- 1) 熱なまし処理で内部応力を緩和しても改善効果はなかった(表の試作2)。
- 2) ワイヤー加工を外側から入れるとクラックは発生しにくく、内側を起点として加工するとクラックが入りやすい(再現試験1~4)。

表1 クラック調査の実験条件表

	試作1	試作2	再現試験1	再現試験2	再現試験3	再現試験4	対策品1	対策品2
粒度差	広い	広い	広い	広い	広い	広い	狭い	狭い
WC粒径	小さい	小さい	小さい	小さい	小さい	小さい	大きい	大きい
サイズ	φ100×55	φ100×55	φ100×25	φ100×25	φ100×25	φ100×25	φ100×55	φ100×55
断面分布	A	A					A	A:B=5:5
	A:B=8:2	A:B=8:2	A	A	A	A	A:B=8:2	A:B=4:6
	A:B=6:4	A:B=6:4					A:B=6:4	A:B=3:7
	A:B=4:6	A:B=4:6	A:B=5:5	A:B=5:5	A:B=5:5	A:B=5:5	A:B=4:6	A:B=2:8
	A:B=2:8	A:B=2:8					A:B=2:8	A:B=1:9
	B	B	B	B	B	B	B	B
	A:B=2:8	A:B=2:8					A:B=2:8	A:B=1:9
	A:B=4:6	A:B=4:6	A:B=5:5	A:B=5:5	A:B=5:5	A:B=5:5	A:B=4:6	A:B=2:8
	A:B=6:4	A:B=6:4					A:B=6:4	A:B=3:7
	A:B=8:2	A:B=8:2	A	A	A	A	A:B=8:2	A:B=4:6
B	B					B	A:B=5:5	
焼結時の冷却	通常	通常	通常	通常	通常	通常	徐冷	徐冷
焼きなまし処理	無し	有り	無し	無し	無し	無し	無し	無し
ワイヤー加工形状								
中央部ヤング率	440	440	440	440	440	440	440	440
非傾斜部ヤング率	540	540	540	540	540	540	540	485
ヤング率差	100	100	100	100	100	100	100	45
硬度差	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	4.5	3
結果 (クラックの有無)	7カ所	? 1カ所以上	クラックなし	クラックなし	クラックなし	1カ所	5カ所	クラックなし

注) ヤング率は推定値、硬度は実測値

- 3) WC粒径を大きくし、焼結時に徐冷しても改善効果なし(対策品1)。

4) ヤング率差を小さくするとクラックは生じなかった（対策品2）。

上記の結果を基にして実際の傾斜特性金型の製作に着手したが、次に問題となったのが傾斜特性超硬素材の形状である。ヤング率差100MPaの円柱形状超硬素材ではワイヤー放電加工時にクラックが生じたので、素材形状を円筒形状にしたものについても検討した。その製作条件を表2のように変化させて調べた。表における金型の呼称順（V0～V4）に結果を示すと、次のようである。

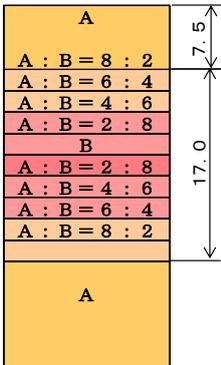
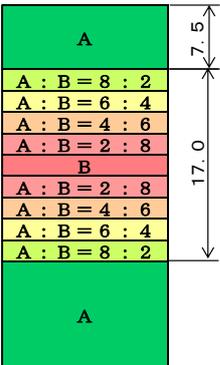
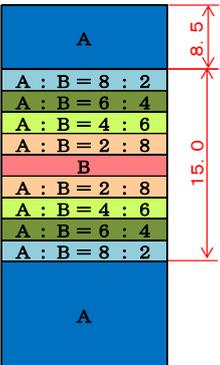
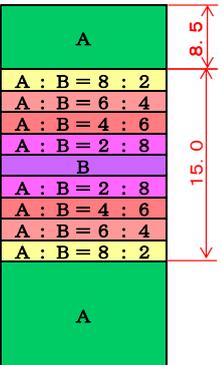
【V0】ヤング率差が45MPaではクラックは生じない。

【V1】ヤング率差100MPaを達成したいために円筒形状で行ったところ、クラックの発生無しで金型を製作できた。

【V2】円筒形状でヤング率差180MPaにトライしたが、クラックが生じた。

【V3】V2の対策として、ヤング率差180MPaは維持してヤング率の絶対値が小さいものでトライしたところ、クラックが生じなかった。

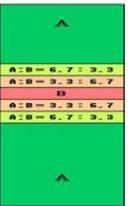
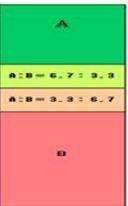
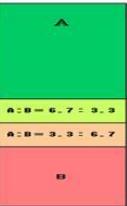
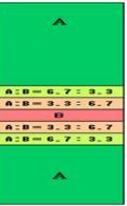
表2 金型試作の条件表

開発時期	平成25年度		平成26年度	
	V0	V1	V2	V3
ヤング率(高)	485	540	620	540
ヤング率(低)	440	440	440	360
ヤング率差	45	100	180	180
断面図				
	超硬素材形状	円柱	円筒	円筒
結果 (クラック)	クラックなし	クラックなし	クラック有り	クラックなし

以下に、V2とV3の詳細について述べる。V2に生じたクラックは傾斜層に対して縦に伝播し、内径の全周に広がっていた。この破断面の状況より、クラックはワイヤー放電加工の初期段階で発生したと考えられた。クラックが生じた理由としては、今回、A部には高ヤング率620GPaのものを用いたので、加工発熱に対する材料の靱性不足が考えられる。そこで、ヤング率差の180GPaはそのままにしてA部とB部の組み合わせ方を見直した条件（V3）で製作した。ヤング率差はそのままでもヤング率の絶対値を下げることで材料としての靱性を高めて耐クラック性を向上させたことで、クラック発生を防ぐことができた。このように、V3によりヤング率差180GPaの傾斜特性超硬金型を製作することができ、平成25年度委託業務実施計

画書に掲げた開発目標値のヤング率差100GPaを大幅に上回る成果が得られた。この結果を基にして、表2と表3の金型を製作した。

表3 製作した鍛造試作金型の一覧表

	V3	①	②	③	④	⑤	⑥
ヤング率(高)	540	540	540	540	540	540	540
ヤング率(低)	360	540	440	360	360	440	440
ヤング率差	180	0	100	180	180	100	100
傾斜層数	9層	0層	5層	2層	2層	5層	5層
断面図							
超硬素材形状	円筒	円筒	円筒	円筒	円筒	円筒	円筒
金型形状	ヘリカル	円筒	円筒	円筒	円筒	ヘリカル	ヘリカル
鍛造品形状	ヘリカルギヤ	円盤	円盤	円盤	円盤	ヘリカルギヤ	ヘリカルギヤ
結果 (クラック)	クラックなし	クラックなし	クラックなし	クラックなし	クラックなし	クラックなし	クラックなし

傾斜特性超硬素材は、放電加工時にクラックが生じやすいという欠点があった。クラック発生傾向は、傾斜率（ヤング率差）が大きく、超硬材料のヤング率の絶対値が大きいほど顕著である。クラック発生を防止するために鋭意努力して、以下の結論を得た。

- 1) ヤング率差45GPa以内であればクラックが生じない。
- 2) 100GPa程度の高いヤング率差を達成する場合には、製造工法を工夫して円柱形状でなく円筒形状の素材を製作してから放電加工することで、放電加工時にクラック発生を抑えることができた。
- 3) 180GPa程度の更に高いヤング率差を達成するには、2)の条件に加えて素材の靱性を調整する（ヤング率の絶対値を下げる）必要がある。

上記の結果を得たことで、今後新しい形状の傾斜特性超硬合金型を要求された場合、どのような工法で対処すべきか判断できる技術態勢を確立することができた。

②鍛造試作研究

研究対象の歯車としてスパークギヤとヘリカルギヤを取り上げ、ヤング率差が異なる傾斜特性金型を用いた分流方式鍛造により歯面にクラウニングを付ける。比較対照用として、従来からの一体ものの超硬材料製の金型（単一超硬金型）による実験も行った。

ここで、分流成形による鍛造とは図3に示すように1サイクルの中で2モーシヨンの金型の動きにより素材の流動を行いやすくする方法である。スパークギヤとヘリカルギヤの鍛造の場合、歯先部まで素材を充満させて鍛造ダレを残さないことを目的としている。

モーシヨン1：予備据込み（図3の左側）

外パンチ（ピンク色）と内パンチ（黄色）が同時に下降して素材を一定の高さ、外径まで押し潰す。歯形外径に鍛造ダレを残した状態で、モーシヨン2へ切り替わる。

モーシヨン2：分流成形（図3の右側）

モーシヨン1の予備据込みが完了した時点で、内パンチ（黄色）の圧力が開放されて素材が分流して金型に充満しやすくなり、鍛造ダレの無い歯車形状が成形される。

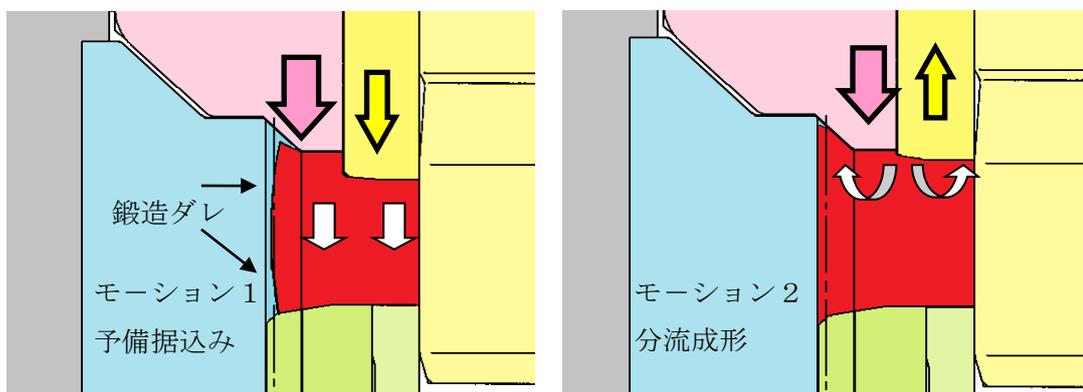


図3 分流成形

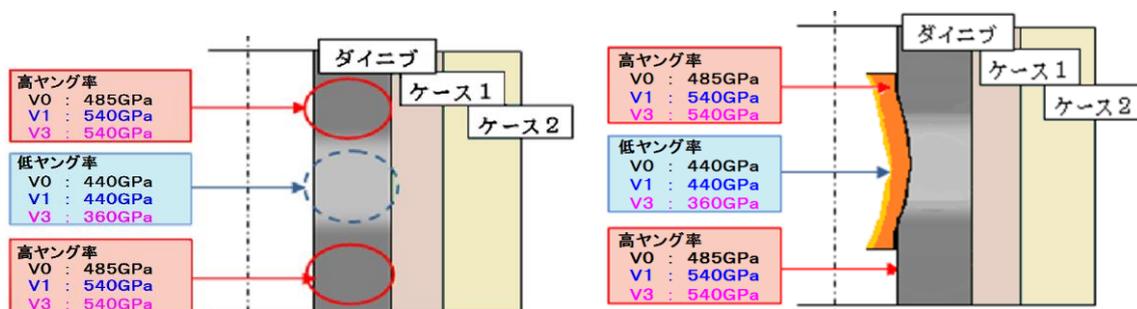


図4 傾斜特性超硬金型（無荷重）

図5 傾斜特性超硬金型（成形時）

次に傾斜特性金型であるが、図4は鍛造前のその金型の概念図である。鍛造荷重が作用した図5の成形時には、金型の上・下部の高ヤング率超硬の部位に比べて、中央部の低ヤング率超硬部の弾性変形量を増やすことで歯車の中央部を太鼓形に変形させ、それに付随して歯面へのクラウニングの付与を図る。

(1) 研究内容

単一超硬金型とヤング率差が異なる傾斜特性金型を用いて分流方式の常温鍛造を行い、金型への材料の流動状態を調べた。ヘリカルギヤ鍛造において歯面の変形状況に及ぼすロックアウトの影響を調べるために、鍛造品をロックアウトさせずに金型から取り出して歯面の変形状況を精査し、ロックアウトした製品と比較した。また、ヘリカルギヤ鍛造の基礎データを得るために円盤形状素材の鍛造も行った。

(2) 研究の成果

ヘリカルギヤ鍛造におけるサンプル写真を図6と図7に示す。スパークギヤとヘリカルギヤの分流方式鍛造において、モーション1の予備据込みの状態では鍛造ダレが生じていたが、モーション2の分流成形により鍛造ダレの無い製品が得られ、歯形精度の向上と加工荷重の低減を図ることができた。ダイセットに組み込んだ傾斜特性金型と鍛造用素材の位置決め最適化を図るために傾斜層深さを変更した金型での実験も行



図6 ヘリカルギヤの予備据込み (荷重390t)



図7 ヘリカルギヤの分流成形鍛造品 (荷重220t)

ったが、この場合においても分流成形によって鍛造ダレのない歯形を成形できることを確認した。また、成形後にロックアウトさせずに金型を切断してサンプルを取り出す実験より、ロックアウト時におけるサンプルと金型の摩擦が歯面の形状精度に及ぼす影響は少ないことがわかった。円盤形状鍛造品の実験においては、鍛造品外径の上面側と下面側を結んだ線を基準として、鍛造品の高さ（厚さ）方向の外直径の輪郭を調べたところ、傾斜特性金型による鍛造品は太鼓状に膨らんでいた。この膨らみは傾斜特性金型の弾性変形に基づくもので、この膨らみがクラウニング付与に効いていると解釈した。

③低温間温度での温度制御鍛造の研究

(1) 研究内容

温度制御鍛造（加熱鍛造）の目的は、鍛造直後と製品取り出し時における製品の温度差を活用して成形品の熱収縮量を制御し、加工荷重を低減させ歯形精度の低下を抑えることである。低温間温度100℃～250℃の場合について実験を行い、適切な加熱温度を選定した。適切な温度の評価基準としてはメイン荷重とロックアウト荷重を用いた。

(2) 研究の成果

傾斜特性金型による100～150℃のスパーク加熱鍛造の場合、常温鍛造に比べてメイン荷重は4%、ロックアウト荷重は21%低減した。荷重の低減率は単一超硬金型の場合よりも優っていた。一方、ヘリカルギヤ加熱鍛造の場合には100～150℃でメイン荷重1%、ロックアウト荷重15%が低下した。加熱温度を200～250℃に変化させるとメイン荷重は3%、ロックアウト荷重は25%低減した。そのため、加熱温度は200℃近傍が適当であると判断された。

④試作品の精度確認と川下製造業者による外部評価

(1) 研究内容

鍛造したスパークギヤとヘリカルギヤの歯形誤差、歯すじ誤差、累積ピッチ誤



図8 スパークギヤ鍛造品で示した右歯面・左歯面の定義

差、歯溝の振れ、大径、小径、オーバール径、クラウニング量の8項目について精密測定を行ったが、それらの内でクラウニング形状の判別ができる歯すじ誤差の測定を重要視した。なお、ここで述べる歯面の定義は図8のようであり、写真における歯車の上面側は鍛造加圧における素材の上側に相当し、鍛造方向から（紙面の上から下に）見た歯車の右側を右歯面、左側を左歯面とする。

(2) 研究の成果

傾斜特性金型によるスパークギヤの加熱鍛造品の歯すじ誤差を測定したところ、左側歯面でクラウニングと見られる高低差の形状が確認でき、その高低差はクラウニングの開発目標値（0.005～0.010mm）に達していた。一方、傾斜特性金型を用いたヘリカルギヤ鍛造においても開発目標値に到達したクラウニング形状が認められ、その高低差はヤング率差の大きい傾斜特性金型において増える傾向にあった。また、図9に示すように右側の200℃の加熱鍛造品の右歯面の歯すじ誤差の傾向が、実用化されているシェービング加工サンプルのクラウニング形状に近いことも確認できた。加熱することによる変形抵抗の低下が影響しているものと推測された。そのサンプルを量産品と同様の熱処理工程に入れて熱処理ひずみや誤差の拡大を調べたところ、歯すじ誤差は約2倍に拡大した。しかし、川下製造業者による外部評価では量産品と同レベルの誤差拡大であり、別段問題ないとされた。

ロックアウト時に金型がブランクに擦れることによってクラウニング形状に影響することが危惧されたので、成形後のサンプルをロックアウトさせずに金型を切断して取り出し、三次元測定機により歯すじ誤差を測定した。その結果、右歯面のクラウニング形状はロックアウトの前後でほとんど変化しておらず、ロックアウトの有無が歯面に及ぼす影響は少ないと判断された。

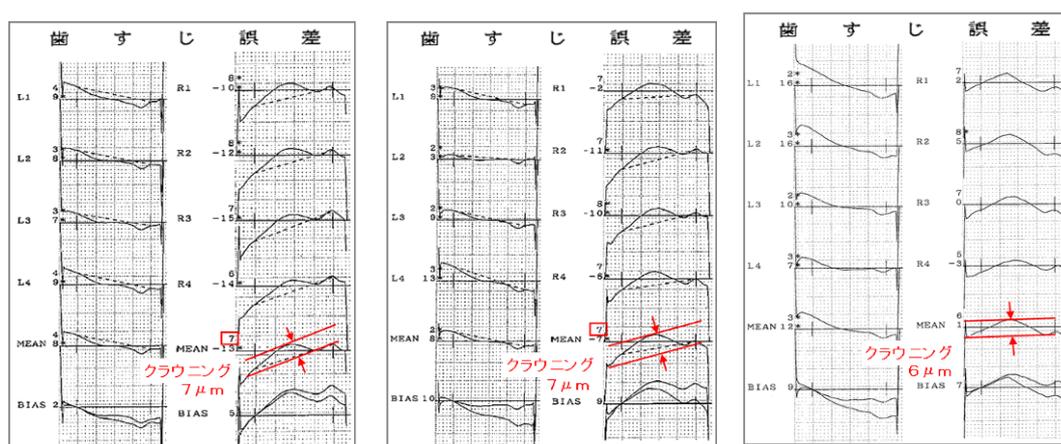


図9 常温・加熱サンプルの歯すじ誤差の測定 (V3)

(左側/常温鍛造、 中心/100℃加熱、 右側/200℃加熱)

ダイセットに組み込んだ傾斜特性金型と鍛造用素材との位置決めを最適化させる目的で、傾斜層深さ位置を変化させた金型による実験も行った。鍛造品を三次元測定機で精密測定したところ、右歯面にクラウニング形状は見られたが、傾斜層深さ部位の変化がクラウニングに及ぼす影響を明らかにするまでには至らなかった。

⑤ CAE解析手法の構築

(1) 研究内容

CAE解析専門メーカーの協力を得て、(1) 単一超硬金型を用いたヘリカルギヤの分流方式常温鍛造における成形解析、(2) 傾斜特性金型によるヘリカルギヤ鍛造の金型応力解析、を行った。

(2) 研究の成果

項目	設定
使用FEMコード	DEFORM-3D Version 11.0SP2
モデル定義	3次元 1/1モデル
モデルタイプ	ワーク：剛塑性体 金型：剛体
材質	SCM420
温度	20[°C](一定)
摩擦条件	せん断摩擦 0.1

図10 成形解析における基本設定

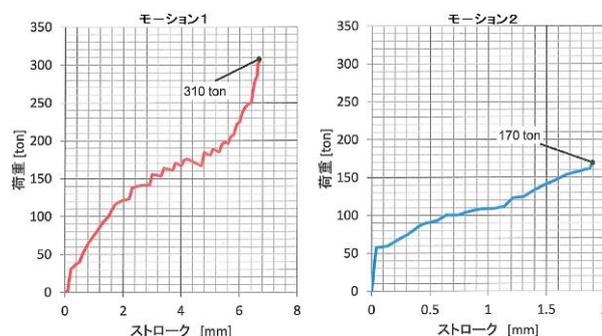


図11 成形解析における荷重線図

(1) の成形解析の場合には、図10の基本設定条件のように単一超硬金型を剛体と仮定して材質がSCM420のヘリカルギヤの冷間鍛造を具体例とした。2モーシオンで成形する分流成形が再現でき、製品歯面にかかる負荷も図11のように数値として確認できた。図12で示すようにモーシオン1の予備据込みでは製品の左歯面にかかる面圧が高いのに対して、図13のモーシオン2の分流成形では右歯面の面圧が高い結果となった。傾斜特性超硬金型による鍛造試作において、接触面圧の高い製品の右歯面にクラウニング付与が大きい実験結果との整合性が確認できた。

一方、金型応力解析も行ったが、その基本設定と応力解析モデルを図14に示す。また、ヤング率差100GPaの傾斜超硬材料の定義・評価対象を図15に示す。解析による左右歯面の変位量を図16に示す。ここで、図16における左右の金型歯面は、製品の歯面でいえば左右が逆の関係にあり、例えば金型の左歯面は製品の右歯面に接触(転写)する部位を表わす。図16において金型の左歯面の変形量が金型の右歯面よりも大きいことは、製品の右歯面の変形量が左歯面よりも大きいことを指している。この解析結果は、製品の右歯面の面圧が大きいために変形量が増えたものと解釈できる。このようにコンピュータシミュレーション解析は、傾斜特性金型によるヘリカルギヤ鍛造の変形挙動や金型応力解析のツールとして役立つことが判明した。

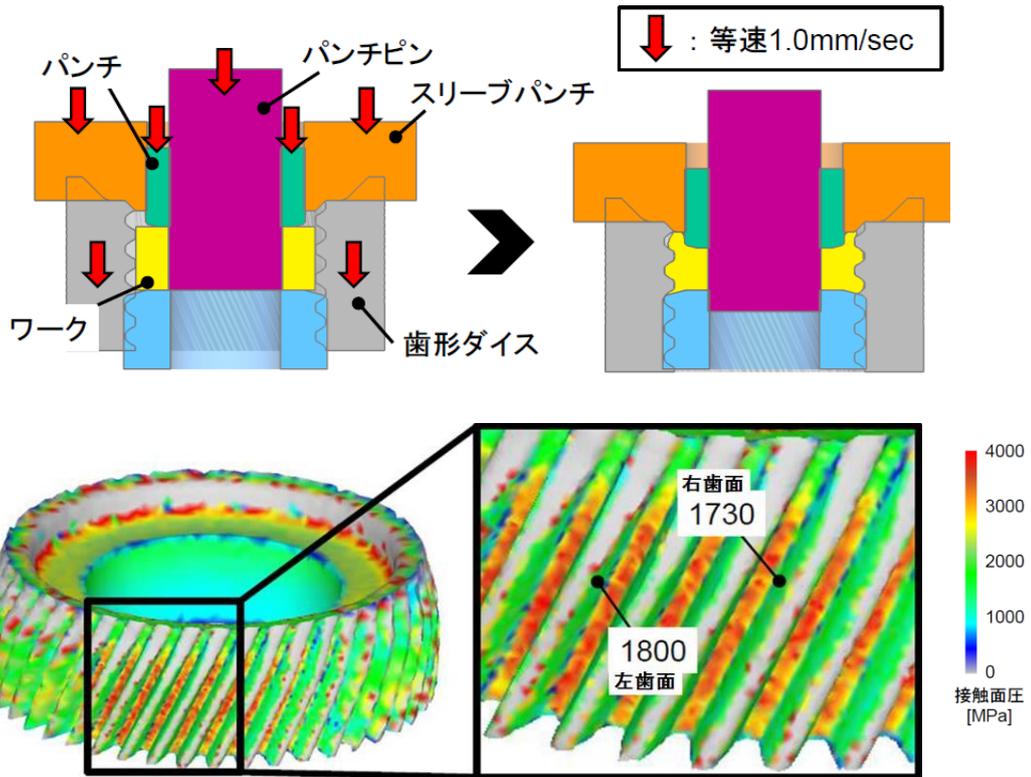


図 1 2 モーション 1 予備据込み

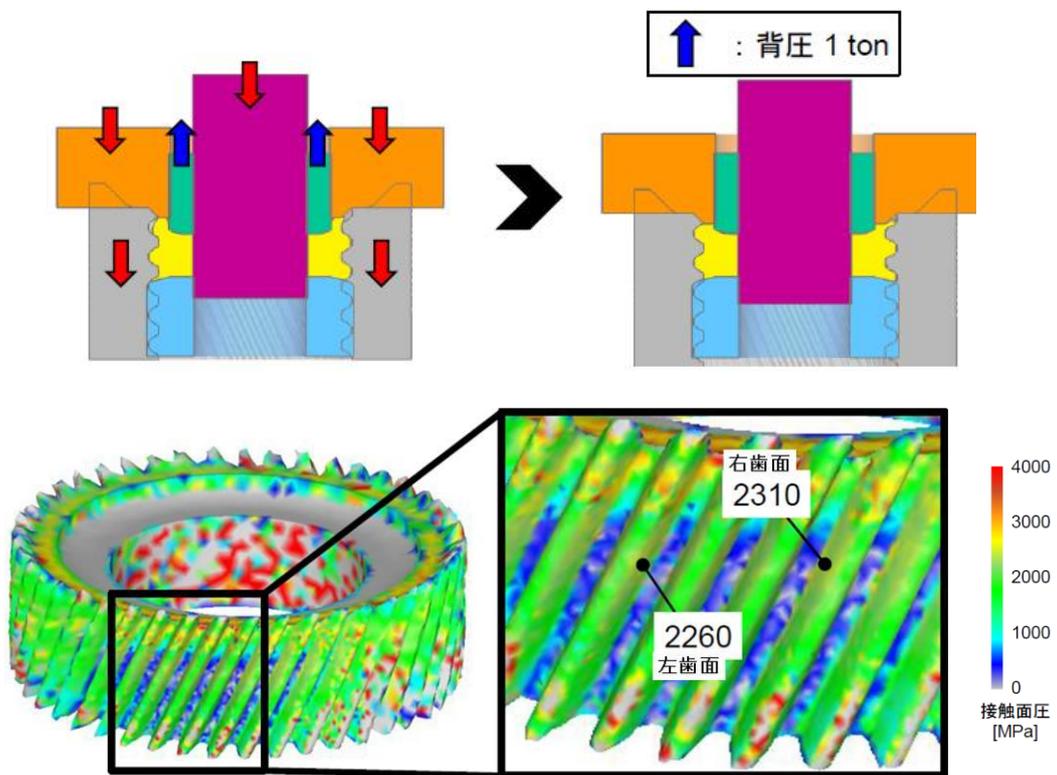


図 1 3 モーション 2 分流成形

オブジェクト	項目	内容
歯形ダイス	オブジェクトタイプ	弾性体
	材料データ	・ヤング率 : 440~540 ・ポアソン比 : 0.23
内ケース	オブジェクトタイプ	弾性体
	材料データ	・ヤング率 : 206GPa ・ポアソン比 : 0.30
外ケース	オブジェクトタイプ	弾性体
	材料データ	・ヤング率 : 206GPa ・ポアソン比 : 0.30
その他設定条件	摩擦係数	クーロン摩擦 0.3

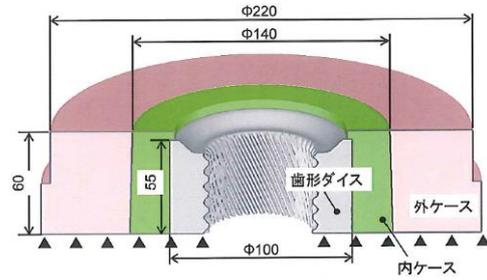


図 1 4 金型応力解析基本設定・応力解析モデル

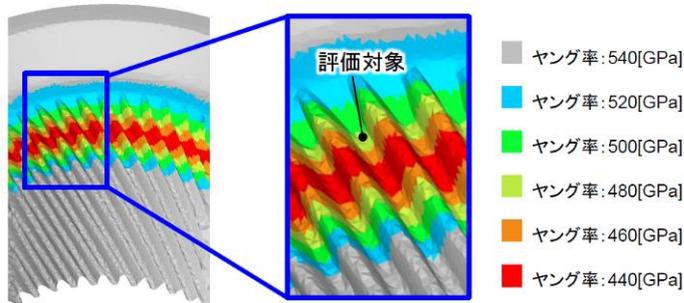


図 1 5 傾斜材料の定義・評価対象

ダイス下面からの距離 [mm]	ヤング率 [GPa]	変位量 [mm]	
		左歯面	右歯面
42.4~44.1	480	0.058	0.009
40.7~42.4	460	0.053	0.003
37.3~40.7	440	0.055	0.001
35.6~37.3	460	0.056	0.005
33.9~35.6	480	0.057	0.005
32.2~33.9	500	0.058	0.010
30.5~32.2	520	0.065	0.007

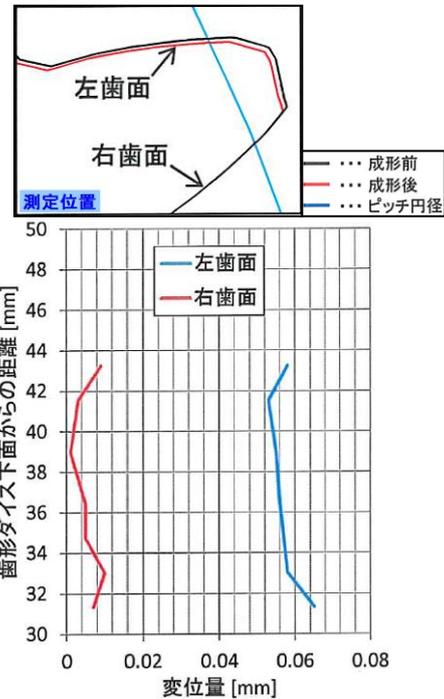


図 1 6 金型歯面の変位量と測定位置

【注 1 : 図 1 6 における左歯面は製品の右歯面に接触する部位、右歯面は製品の左歯面に接触する部位である。 注 2 : 右上の歯車図において、測定位置と記入されている側が金型で、右側が製品】

第3章 全体総括

国内における鍛造業の主要な需要先は自動車産業であるが、その自動車産業ではグローバル化の中で一段と高機能化・低コスト化が要求されており、また省エネ・環境問題への対応が要請されている。その具体例として、ハイブリッド車や電気自動車、燃料電池車に対する期待が急激に増大し、それを支えるハイブリッド車用モータやトランスミッションの更なる高機能化が喫緊の課題である。

本研究は、自動車駆動部の動力伝達用に多く使われているヘリカルギヤを高機能化させるために、新規な機能性鍛造金型と新鍛造技術の開発を目標として行ったものである。具体的には、軸方向にヤング率が変化する傾斜特性超硬合金製の金型を開発し、その金型を用いた低温間鍛造によって歯面の成形とクラウニング付与加工を一工程で行う成形技術の開発である。この技術開発によって、鍛造加工におけるニアネットシェイプ化、複合一体化、組織微細化コントロール技術の向上、高精度化による後処理工程の簡略化、製品のコスト削減と高機能化の達成を目指した。

以下に、研究の実施項目ごとに総括する。

① 金型材料開発

傾斜特性金型の素材として使用する超硬合金に関しては、WC粉末の組成や粒度などを調整することによって、初年度の平成25年度に鋼のヤング率の約2.8倍のものを開発した。その後、鋭意改良を重ねて鋼の約3倍の高ヤング率超硬材料を開発し、開発目標値を上回った。

一方、傾斜特性金型については、当初、金型加工する際の放電加工でクラックが生じることがあり、平成25年度はヤング率差が45GPaのものに留まっていた。平成26年度は傾斜特性超硬素材の形状を円柱状から円筒状に変更すると同時に、WC粒径・傾斜特性条件・熱処理条件・放電加工条件などを見直した。その結果、クラックの発生を抑えることができるようになり、初年度の実施計画書で掲げたヤング率差100GPaの開発目標値を大幅に上回る傾斜特性金型が製造できた。最終年度の平成27年度はダイセットに組み込んだ傾斜特性金型と鍛造用素材との位置決めについて検討した。金型高さ方向の傾斜層の配置と層深さを変化させてクラウニングを付与することができたが、最適な配置条件を見出すまでには至らなかった。

② 鍛造試作研究

平成25年度は他所の既存設備でヤング率差45GPaの傾斜特性金型によるスパーク鍛造、単一超硬金型によるスパークとヘリカルギヤの鍛造を実施した。スパークとヘリカルギヤの鍛造品は、外観形状では鍛造ダレが無く、分流成形により歯形形成が十分に行われたことを示唆するものであった。平成26年度の鍛造試作研究においては、傾斜特性金型によりスパークとヘリカルギヤの分流成形を行い、鍛造ダレの無い歯形を鍛造することができた。

これらの実験により、スパークとヘリカルギヤにおいてはクラウニングと判断さ

れる形状が見られたが、ヘリカルギヤでは歯面の両側でクラウニングの付き方が相違しており、鍛造加圧方向からみて右側歯面のクラウニングが左側歯面よりも大きかった。平成27年度にこれを詳細に調べたところ、ロックアウト時にクラウニングが低減するのではなく、鍛造成形時に付与されるクラウニングが左右歯面で異なることがわかった。

③ 低温間鍛造での温度制御鍛造

初年度の平成25年度に行った傾斜特性金型を用いたスパーギヤの低温間鍛造実験により、ロックアウト荷重が低減することがわかった。平成26年度はヤング率差の大きい傾斜特性金型を用いてヘリカルギヤの低温間鍛造を行ったが、スパーギヤと同様にロックアウト荷重が低減して低温間鍛造の有効性が確認できた。最終年度である平成27年度の実験において低温間温度は200℃近辺が最適であることが判明し、この温度でロックアウト荷重を更に減らすことができた。

④ 試作品の精度確認と外部評価

鍛造したスパーギヤとヘリカルギヤについて、精密測定機（三次元測定機、歯車測定機）を用いて歯形の精密測定を行い、その中で歯すじ変形とクラウニング形状の測定を重点的に行った。その結果、クラウニングの精度に課題が残るが、スパーギヤとヘリカルギヤにおいて開発目標値（0.005～0.010mm）に収まるクラウニング（膨らみ）形状が得られた。

⑤ CAE解析手法の構築

CAE解析専門メーカーの協力を得て、（1）単一超硬金型を用いたヘリカルギヤの分流方式常温鍛造における成形解析、（2）傾斜特性金型によるヘリカルギヤ鍛造の金型応力解析、を行った。CAE解析の結果によれば、右歯面の面圧が大きくなっており、右歯面でクラウニングが付きやすい実験結果と対応していた。また、製品の右側歯面に接触する金型の部位の変形量が、製品の左側歯面に接触する部位のそれよりも大きいことが判明した。この解析結果は、製品の右歯面の面圧が大きいことに対応している。このように、傾斜特性金型によるコンピュータシミュレーションによれば実験結果の解釈が可能で、ヘリカルギヤ鍛造における適正条件の解明に対して有益なツールであることが明らかになった。

今後の課題：

クラウニング転写部位における傾斜特性金型の弾性変形量を増やすことでクラウニングに相当する形状が得られたが、右歯面と左歯面でクラウニングの付与量が異なった。実用的な製造技術として確立するためには、傾斜特性金型を意図した膨らみの形状となるように弾性変形させ、この変形量を鍛造素材に転写することによってクラウニングを精密に付与しなければならない。このための傾斜特性金型の製造技術及び鍛造技術の確立は、事業化展開を図るための克服すべき課題として残されており、今後の補完研究を通じてこの解決に取り組む予定である。