

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業（平成23年度補正予算事業）

「歯面無切削ヘリカルギヤの冷間鍛造工法の開発」

研究開発成果等報告書

平成25年2月

委託者 中国経済産業局

委託先 公益財団法人ひろしま産業振興機構

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景及び目標	
1-1-1 研究開発の背景	1
1-1-2 研究開発の目標	1
1-2 研究体制	1
1-3 成果の概要	2
1-4 当該研究開発の連絡窓口	3

第2章 本論

2-1 材料歩留りを向上させることができる鍛造素材（スラグ）形状及び鍛造工法の決定	
2-1-1 工程設計	4
2-1-2 鍛造トライの実施	5
2-1-3 ツルーな歯筋精度を得られる鍛造条件の確立	6
2-1-4 歯筋精度からの材料歩留まり	10
2-2 良好な歯当り（狙い通りの歯形）を得るための金型形状、工具、鍛造工法の決定	
2-2-1 クラウニング鍛造工法の確立	11
2-3 ヘリカルギヤ鍛造品の軽量化パフォーマンスの推定（強度/材料重量）	
2-3-1 強度試験装置の仕様と試験方法	13
2-3-2 強度試験前調査	14
2-3-3 試験結果	17
2-3-4 試験終了品の調査	18
2-4 金型寿命を達成することができる金型構造及び鍛造条件の決定	
2-4-1 目標達成のための金型仕様	19
2-4-2 金型寿命の判定	19

第3章 研究成果のまとめ

3-1 本研究開発の成果	
3-1-1 材料歩留りを向上させることができる鍛造素材（スラグ）形状及び鍛造工法の決定	21
3-1-2 良好な歯当り（狙い通りの歯形）を得るための金型形状、工具、鍛造工法の決定	21
3-1-3 ツヘルカルギヤ鍛造品の軽量化パフォーマンスの推定（強度/材料重量）	21
3-1-4 歯金型寿命を達成することができる金型構造及び鍛造条件の決定	21

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景及び目標

1-1-1 研究開発の背景

現在、自動変速機の開発において、燃費をMIN化するため変速の多段化が進んでいるが、現設計ではピニオンの部品点数が増え変速機の全長及び外径が大きくなってしまい、車体設計(他部品とのスペース設計)が問題となっている。

また、中国・インドなど新興国を中心とした競合メーカーとの競争激化への対応のため、コスト削減のニーズも川下製造業者より高まっている。

1-1-2 研究開発の目標

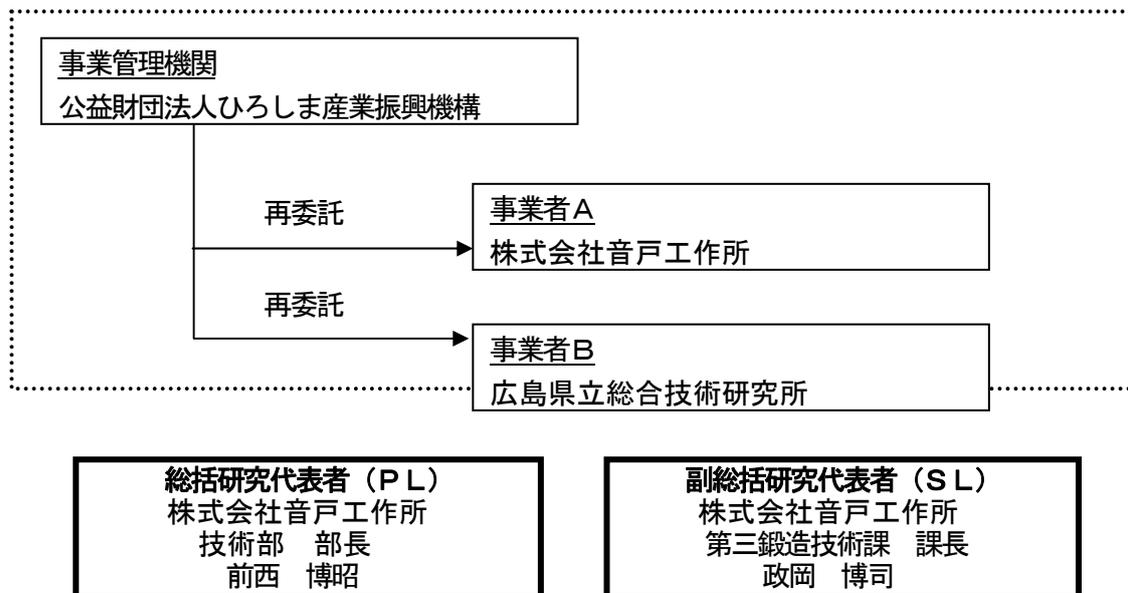
変速機構部内の中心に位置する遊星歯車機構に使われているヘリカルギヤの小型軽量化・コスト削減ができる新工法の開発を行う。

具体的には、従来から用いられている切削加工のホブ加工とシェービング加工を不要とし、高強度かつ1工程で歯面を成形可能な新しい冷間鍛造工法の技術開発と実用化を図る。

[イメージ図]

		従来技術=切削加工	新技术=冷間鍛造
加工法の概要		<p>ホブカッター + ホブ加工</p> <p>シェービングカッター + シェービング加工</p>	
製品の特徴		<ol style="list-style-type: none"> ① ホブ加工によるファイバーフローの切断の為、歯元曲げ疲労強度が低下。 ② シェービング加工による歯元部段差の残留により、歯元曲げ疲労強度が低下。 ③ シェービング加工による加工痕により歯面ピッチング強度が低下。 	<ol style="list-style-type: none"> ① ファイバーフローが連続化している為、高強度。 ② 冷間鍛造により歯元部段差が無く歯元曲げ疲労強度が高強度。 ③ 冷間鍛造により歯面にシェービング加工痕がなく歯面ピッチング強度が高強度。 ④ 冷間鍛造1工程にてクラウニング付き歯面を成形する為、 <ul style="list-style-type: none"> ・ 10%のコスト低減 ・ 材料歩留り 32% → 70% ・ 軽量化 18.5% ・ 切削品素材 479g → 鍛造品素材 220g

1-2 研究体制



1-3 成果の概要

本研究により、次のような成果を得ることが出来た。

① 材料歩留りの向上

① -1 工程設計

成形シミュレーションを活用し、材料歩留まり 70%の鍛造素材（以下「スラグ」という。）の形状を決定した。また、このスラグで歯成形が可能なことを確認した。

① -2 鍛造トライ実施結果

歯形精度は良好だが、歯筋は成形開始と終了部に不完全部が発生した。これを極小化する対策を実施したがゼロにはならず、目標の歩留まりは達成できなかった。

今後、目標の歩留まりを達成すべく、改善を継続する。

② 良好な歯当り（狙い通りの歯形）を得るための金型形状、工具、鍛造工法の決定への対応

② -1 クラウニング鍛造加工法の確立

歯成形と同時にギヤ中央部を拡径させ、1 工程で歯筋にクラウニングを付加する工法を考案、実用化した。

目標のクラウニング形状（ $3\pm 3\mu\text{m}$ ）を得ることができた。

③ ヘリカルギヤ鍛造品の軽量化パフォーマンスの推定（強度/材料重量）への対応

③ -1 ヘリカルギヤ鍛造品の強度試験

耐久試験機にて、トルクを 3 水準に分けて試験を実施した。

トルク—寿命線図から、疲労強度は歯切り品に対して強度アップが確認できた。

④ 金型寿命を達成することができる金型構造及び鍛造条件の決定への対応

④ -1 金型寿命トライ

歯成形部の表面粗さ、コーティングの状態の観察を実施した。

n 数を増やし、継続調査していく。

④ -2 金型構造及び鍛造条件の決定

金型の形状、材質、表面コーティングの仕様を仮決定した。
妥当性を上記寿命トライで検証する。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

〔事業管理機関〕

公益財団法人ひろしま産業振興機構

中小企業・ベンチャー総合支援センター 研究開発推進担当 課長（担当：坂本 博史）

[住所] 〒730-0052 広島市中区千田町3丁目7-47（広島県情報プラザ内）

[TEL] 082-240-7712

[FAX] 082-504-7317

[E-mail] h-sakamoto@hiwave.or.jp

〔再委託先〕

株式会社 音戸工作所 開発技術部 開発課（担当：塚本 真紀）

[住所] 〒739-0146 広島県東広島市八本松飯田1-1-1

[TEL] 082-428-2211

[FAX] 082-428-9338

[E-mail] m_tsukamoto@ondo.co.jp

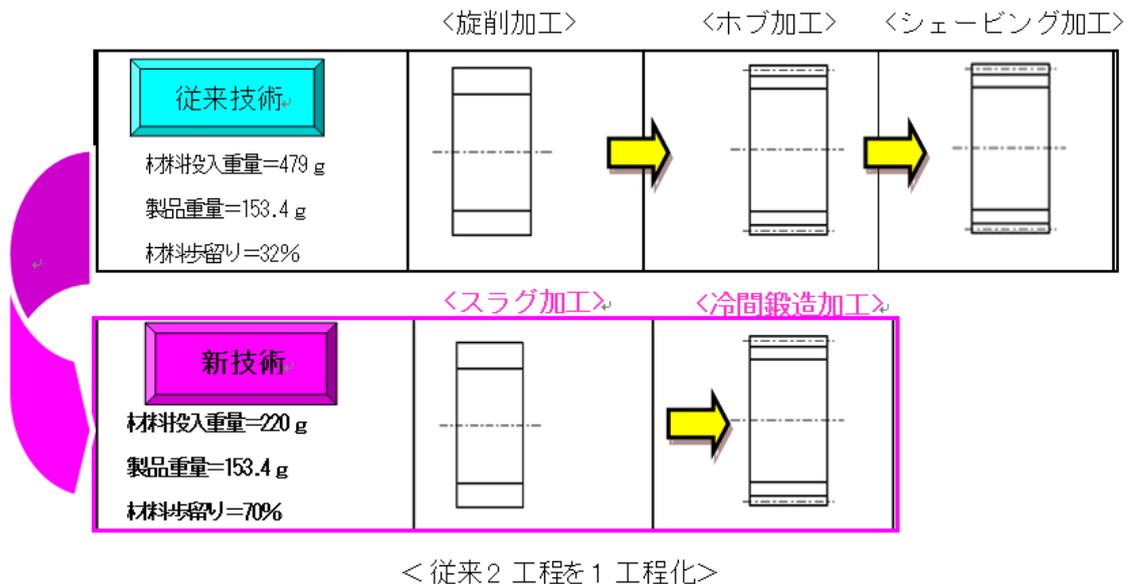
第2章 本論

2-1 材料歩留りを向上させることができる鍛造素材（スラグ）形状及び鍛造工法の決定

2-1-1 工程設計

従来技術による歯切り加工と今回新技術として開発する冷間鍛造加工の工程を下図に示す。

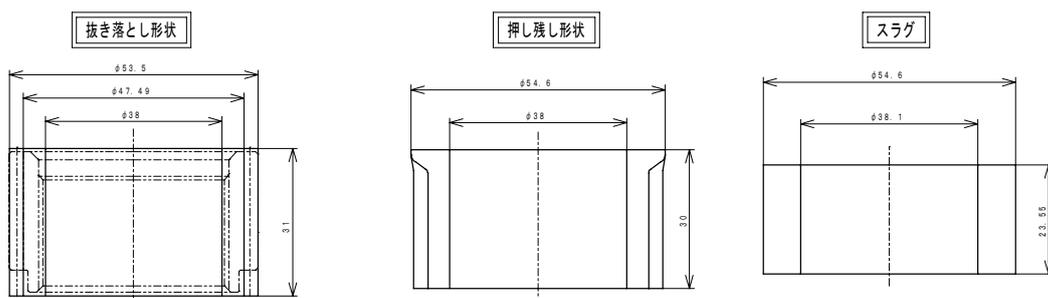
従来は、ホブ加工による歯切りの後にシェーピング加工で歯面を仕上げるため 2 工程必要であったが、開発する冷間鍛造工法では 1 工程で歯面精度の造り込みを行う。



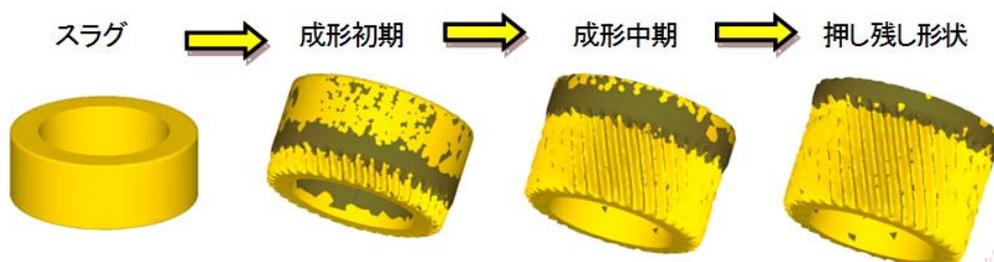
ヘリカルギヤの冷間鍛造工程を下図に示す。

スラグをプレス金型に投入しパンチで押し歯面を成形する。パンチと歯成形部の干渉防止のため、ワーク上部を押し残し形状として、次のワークで抜き落とす工程としている。

3Dでの成形シミュレーションにより、1工程での歯成形が可能であることを検証した。



＜鍛造加工工程＞



＜成形シミュレーションによる成形性の検証＞

2-1-2 鍛造トライの実施

シミュレーション結果に基づき、プレス金型とダイセットを製作し鍛造トライを行った。(計17回実施) プレス金型とダイセットの画像及び、成形手順を下図に示す。



<ダイセット>



<ダイセット+プレス金型一式>



<鍛造プレス機>



<鍛造トライ>

鍛造トライ結果を下図に示す。

写真で示すように1工程での歯成形はできた。その後、狙いの歯面精度が得られているか確認のため、歯形、歯筋精度測定を行った。



成形終了側

1工程

成形開始側

<スラグ>



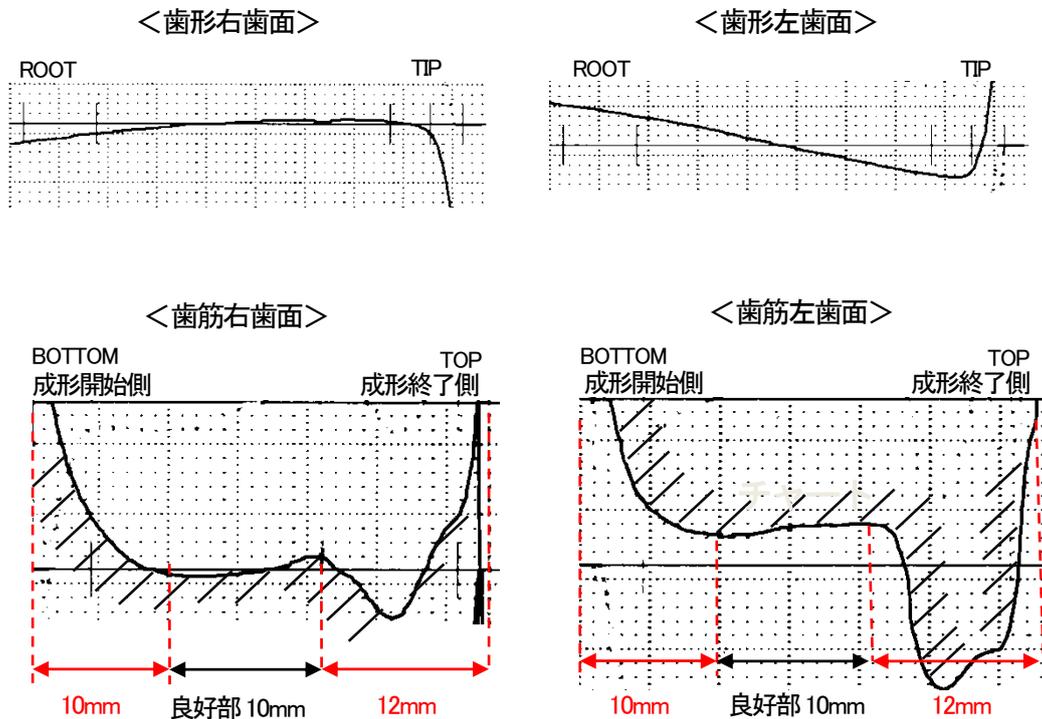
<鍛造ヘリカルギヤ>

BOTTOM

歯形、歯筋精度の測定結果を下図に示す。

歯形精度は、ほぼ直線形状をしており良好であった。

しかし、歯筋精度は歯の成形開始部 10mm にねじれ角が小さくなる方向の曲りと成形終了部 12mm に凹凸が発生し、良好（直線）部が 10mm しか取れないという結果であった。



<歯形・歯筋測定結果>

本研究開発の狙いは、まず歯形、歯筋をツールに造れる金型形状と鍛造条件を決定し、その後、クラウニング工法で $3 \pm 3 \mu\text{m}$ のクラウニングを付加するというものである。歯筋の不全部は製品として使用できないため、ツールの歯筋部分を製品の歯幅分確保することが課題となった。

2-1-3 ツールな歯筋精度を得られる鍛造条件の確立

上記のことから歯筋精度を造り込んで、目標の材料歩留まりを達成するための課題は、以下の 2 項目となった。

- ①成形開始部の歯筋の曲がり (10mm)
- ②成形終了部の歯筋の凹凸 (12mm)

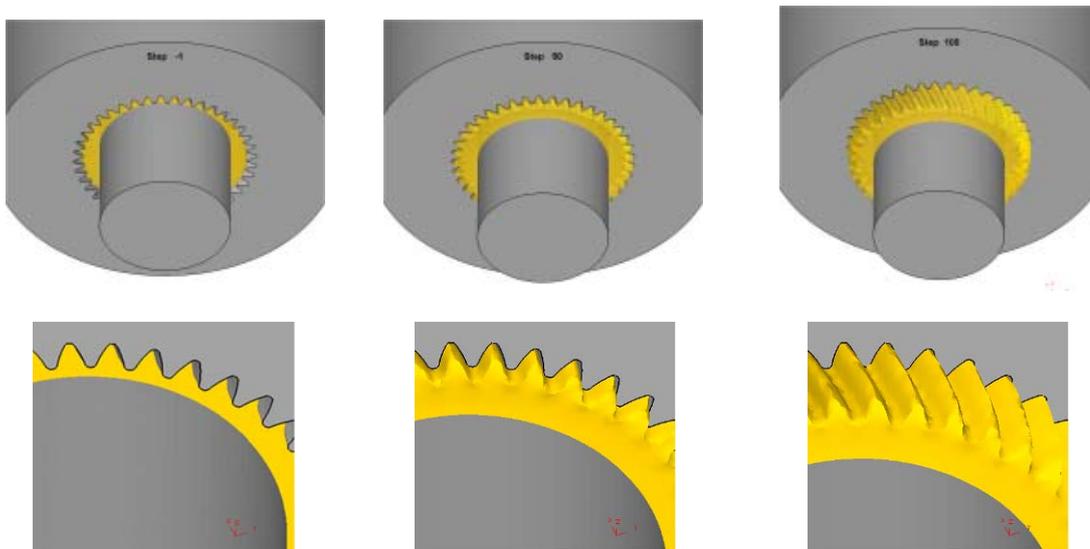
・課題が生じた原因とその対応方法及び対策結果

- ①成形開始部の歯筋の曲がり (10mm)

[原因]

成形開始時にスラッグの歯形ダイス充填が遅いことが挙げられる。これにより歯筋のダレが発生していると考察した。

成形シミュレーション結果からも、成形開始時にスラッグが歯形ダイスに充填されていないことが分かった。



<成形シミュレーションによる原因調査>

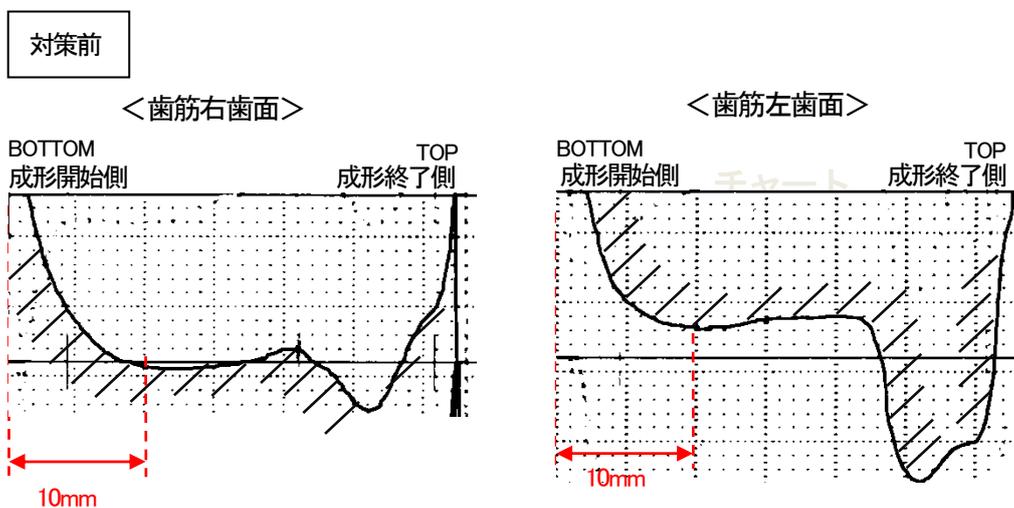
[対策]

スラグ充填の改善をするため、次の改善点を施した新たな歯形ダイス（補正金型）を製作することとした。

- ・より多くのスラグが歯面に流入することを狙い、歯成形部の導入R部のR拡大を行った。
- ・よりスラグが流入しやすい形状とするため、歯先端部のランド幅拡大を行った。

[対策結果]

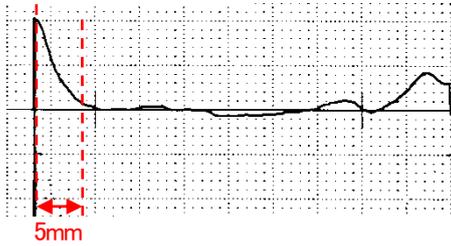
金型への材料充填の向上対策により、成形開始部の歯筋の折れ曲りは12mmから5mmに短縮したがゼロにはならなかった。対策前後の歯筋精度を下図に示す。



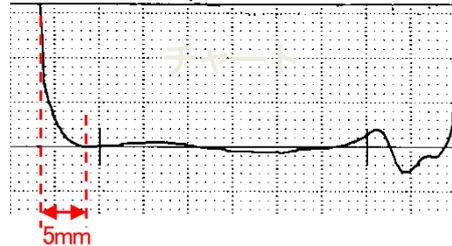
<対策前歯筋測定結果>

対策後

< 歯筋右歯面 >



< 歯筋左歯面 >



< 成形開始部 対策後歯筋測定結果(ねじれ角補正測定) >

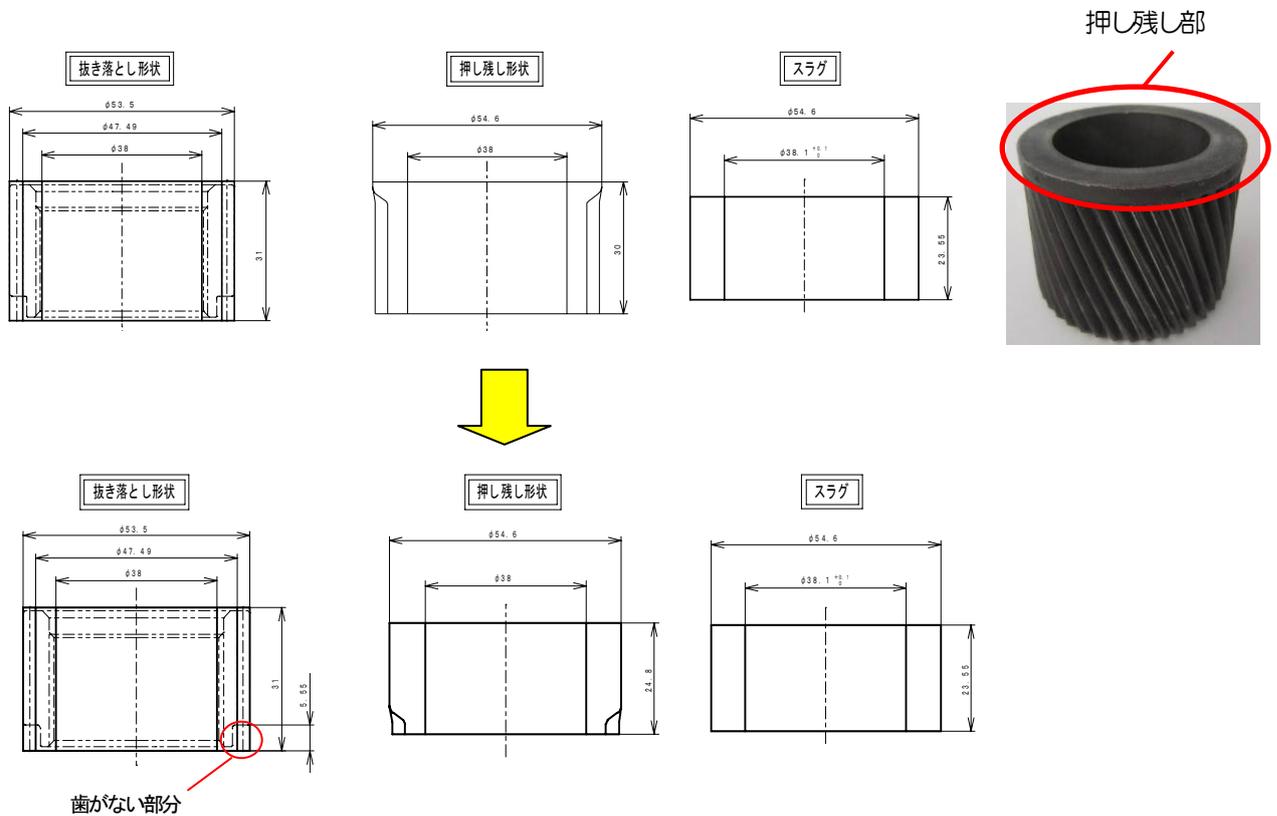
②成形終了部の歯筋の凹凸 (12mm)

[原因]

連続的に行われていた成形が一旦ストップ (押し残り形状) することにより、材料流動に微小な変化が生じて歯筋に10~20 μ mの凹凸が発生すると考察された。

[対策]

歯の成形開始部の曲り部分と重ねさせて正常な歯筋をより多くとれるようにすることを狙い成形終了側で抜き落とす工程から成形開始側で抜き落とす工程に変更した。

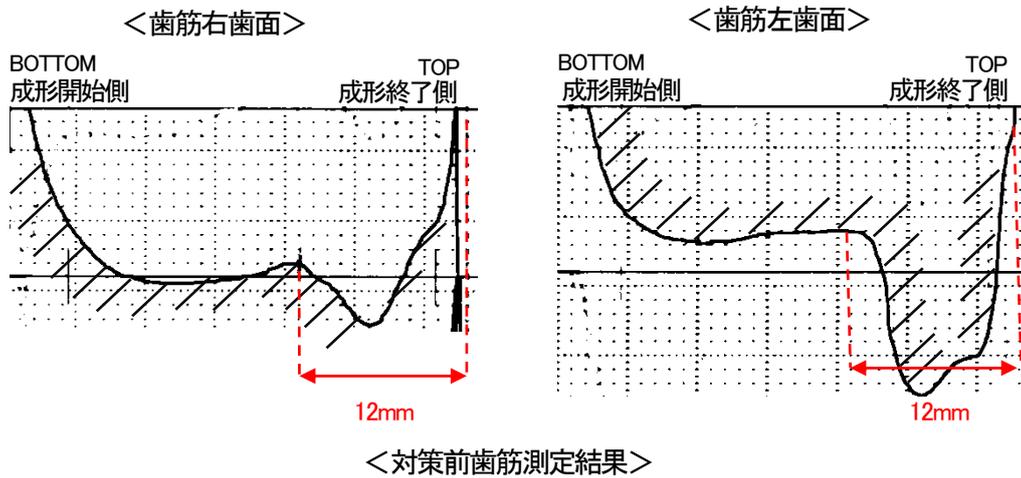


< 成形開始側で抜き落とす工程 >

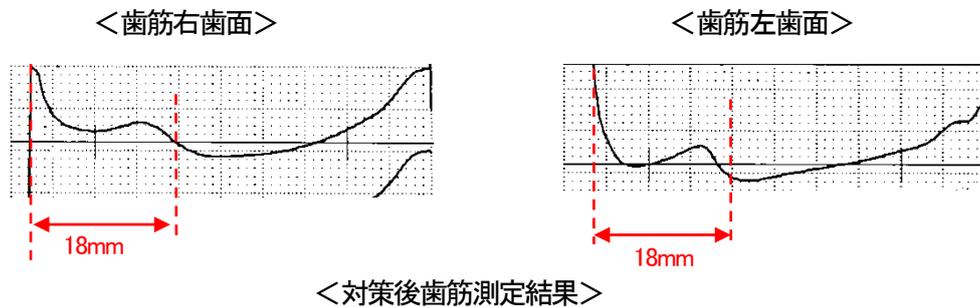
[対策結果]

変更した事により、成形終了側にあった凹凸部は無くならず、そのまま成形開始部へ移動した。さらに、成形開始部の歯筋の曲りが凹凸部の後から始まり歯筋の不全部の長さの合計は縮小しなかった。抜き落とし工程の変更前後の歯筋精度を下図に示す。

対策前



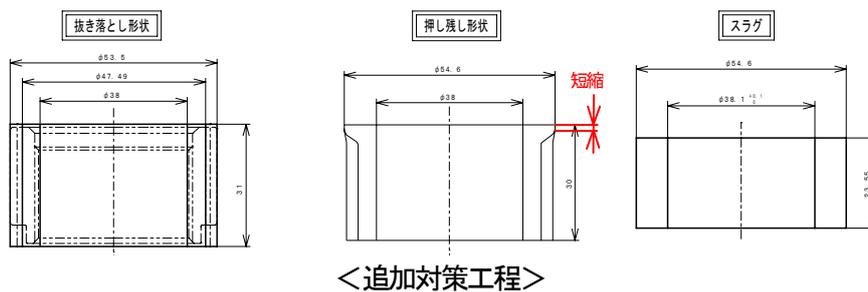
対策後



[追加対策結果]

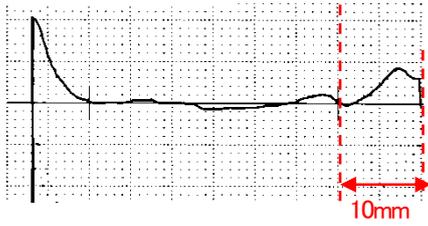
抜き落とし工程の変更による効果は認められなかったので、成形終了側で抜き落とす工程での追加改善を行った。

パンチを歯形ダイスに当たる寸前まで押すことにより、押し残し部の寸法を短縮して歯筋の凹凸を12mmから10mmに短縮した。

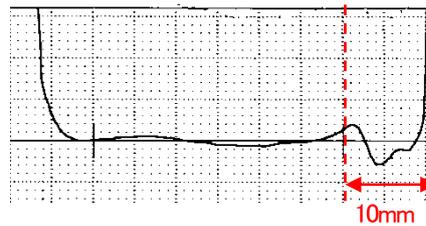


追加対策後

< 歯筋右歯面 >



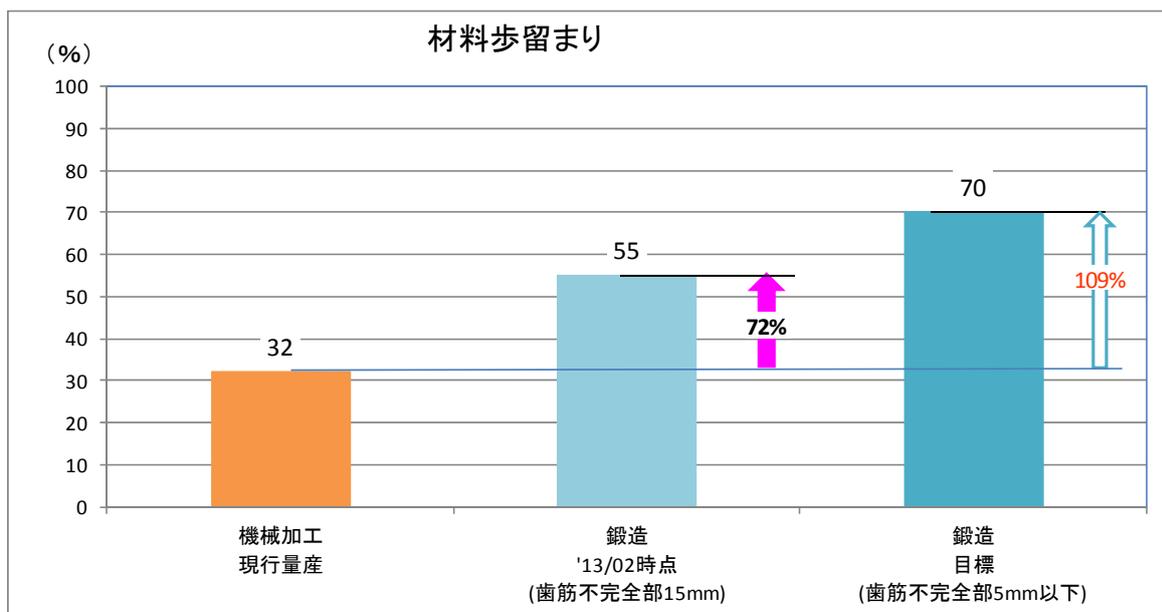
< 歯筋左歯面 >



< 歯成形終了部 対策後歯筋測定結果(ねじれ角補正測定) >

2-1-4 歯筋精度からの材料歩留まり

先に述べた歯筋精度を改善する対応を行ったが、歯筋の不全部（曲り、凹凸部）をゼロにすることはできなかった。（材料歩留まりは下図のように当初目標 70%に対して現状 55%となっている。）今後、目標達成に向けてさらなる改善を実施していく。

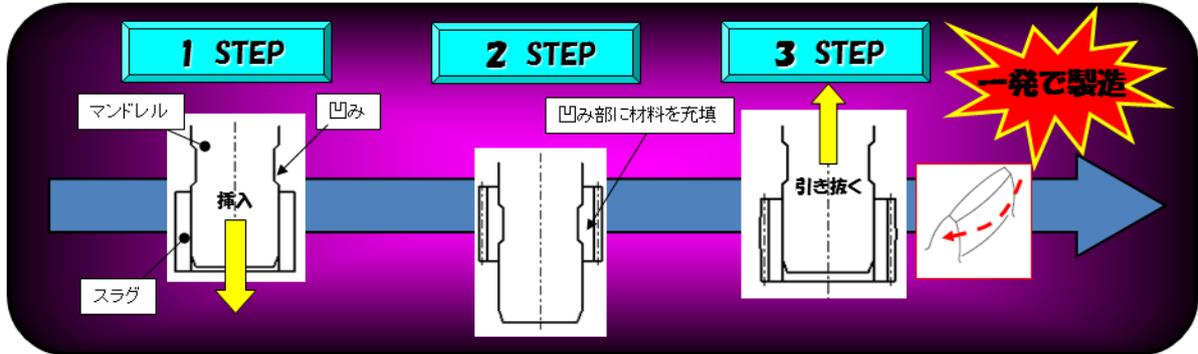


2-2 良好な歯当り（狙い通りの歯形）を得るための金型形状、工具、鍛造工法の決定

2-2-1 クラウニング鍛造工法の確立

・クラウニング鍛造工法の概要

ワークの内径に入るマンドレルに凹みを設けておき、歯成形時に凹み部に材料を充填させてワーク内径に凸部を成形する。その後、マンドレルでワークの凸部をしごくことにより、ギヤ中央部を拡径させ、1工程で歯筋にクラウニングを付加する。



<クラウニング鍛造工法概要>

・凹み（形、体積、幅）の最適化

成形シミュレーションによる事前検証

しごき形状の最適化のため、台形形状にて体積としごき幅を変化させてクラウニング形状の解析を行った結果、以下の事が分かった。

- しごき幅が広いほどクラウニング形状が安定する
- しごき体積が少ないほどクラウニング量は減少する
- しごき幅が長いほどクラウニング量は減少する



しごき幅が長い程クラウニング形状が安定

幅 (mm)	8	8	8	10	11	13	15
体積 (mm ³)	814.7	441.9	209.6	326.5	304.8	261.4	218
クラウニング量 (μm)	32	16	6	8	5	6	2
クワニク形状	歯圧 2.1 2.2						
軸方向変形量	×	△	×	×	×	△	○
径方向変形量	×	△	×	×	×	△	○

・最適クラウニング条件の検証

実ワークでしごき量と形状を振ってテストを行い、クラウニング規格が $3 \pm 3 \mu\text{m}$ であることから、これに適合する最適クラウニング条件を決定した。

2-3 ヘリカルギヤ鍛造品の軽量化パフォーマンスの推定（強度/材料重量）

2-3-1 強度試験装置の仕様と試験方法

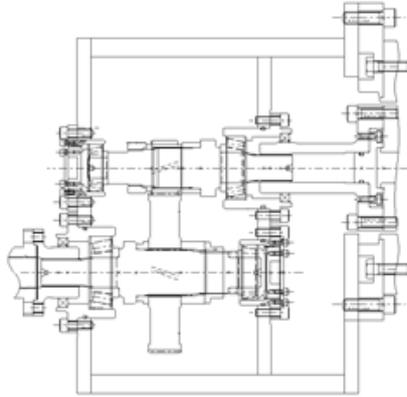
・強度試験の流れ

試験装置の流れを下図に示す。

強度試験用の治具の設計製作を行い耐久試験機により実験を実施する。

試験終了後、調査を実施して軽量化パフォーマンスを推定する。

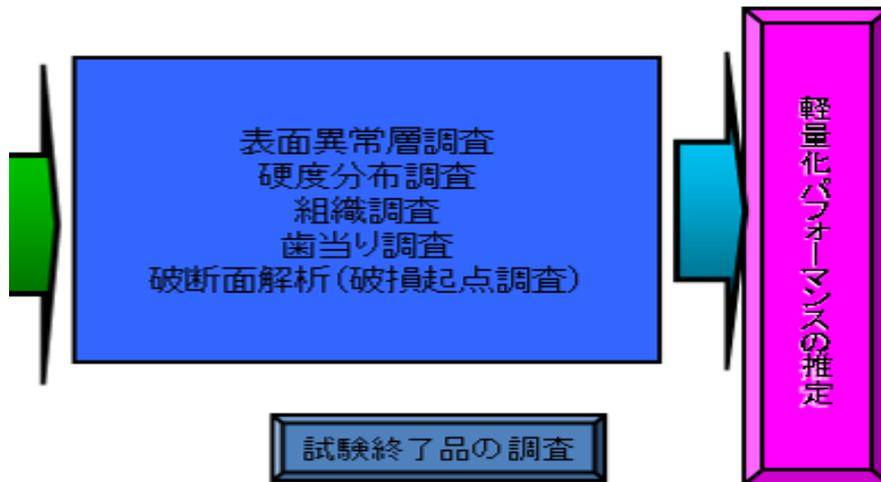
達成目標としては疲労強度 20%向上である。



強度試験用の治具設計製作



耐久試験機による実験



設備	
駆動側：	150kW直流機 422N・m / 3150rpm
吸収側：	150kW直流機 2664N・m / 500rpm
治具	
駆動側：	500N・m / 8000rpm
吸収側：	1500N・m / 7500rpm

試験時間短縮のため、試験機の最大能力時の応力を計算し、机上検討により試験時間を算出。

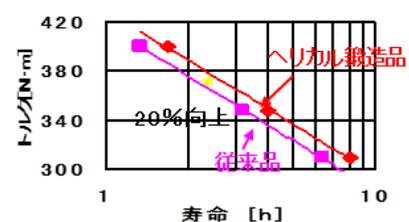
試験実施日数……2日

トルク-寿命線図を作成するため、トルクを3水準に振分け試験を実施。

試験数内訳……3水準×3ヶ=9ヶ

実験前確認テスト…3ヶ

試験実施日数……2日×12回=24日

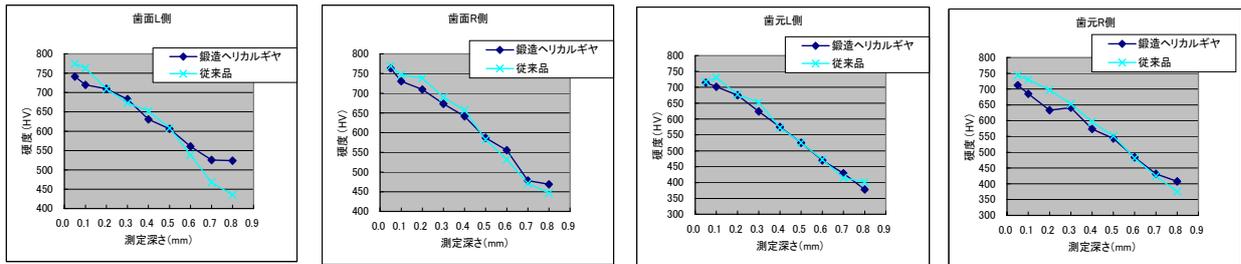


2-3-2 強度試験前調査

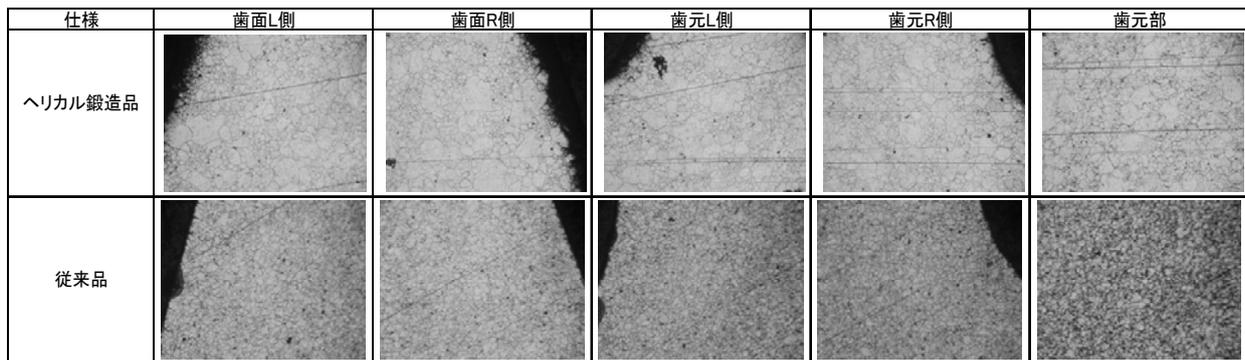
強度試験前に鍛造ヘリカルギヤと従来品の硬度分布、結晶粒度、表面硬さ内部硬さ、応力を調査し、比較調査を実施した。またファイバーフローの確認を実施した。

硬度分布、表面硬度内部硬さについては、ほぼ同等の値であったが、結晶粒は鍛造ヘリカルギヤの方が大きかった。なお応力については4つのヘリカルギヤで比較調査し、切削対策である焼鈍をした鍛造ヘリカルギヤが一番低い値であった。この結果が試験にどのように影響するのかを試験後にも調査する必要がある。

・硬度分布



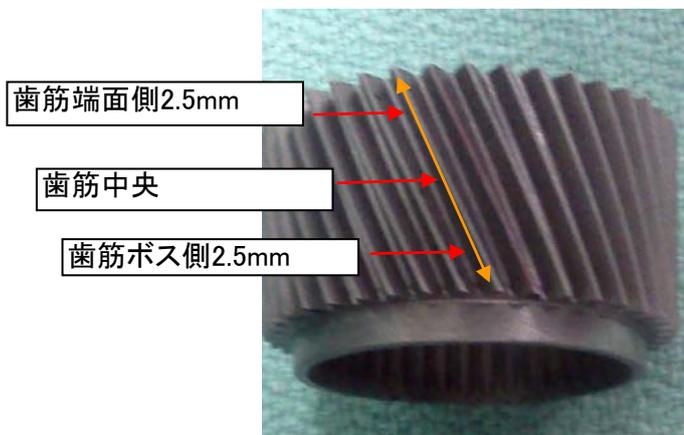
・結晶粒度



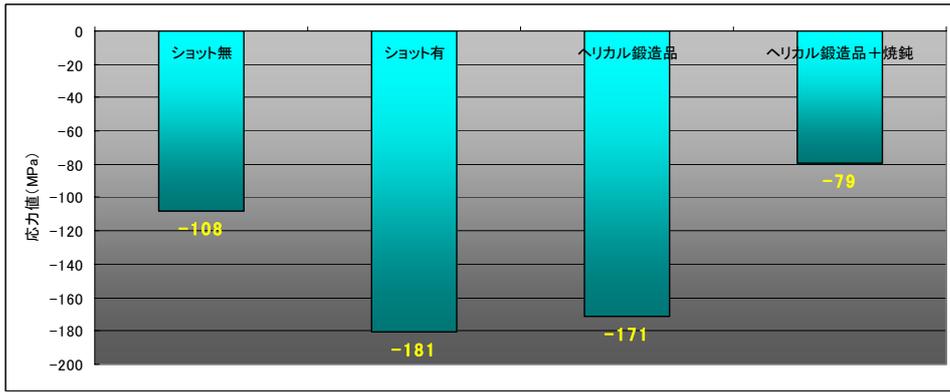
・表面硬さ、内部硬さ

仕様	有効硬化層深さ[mm]				表面硬度 HRC	歯元硬さ[Hv]				結晶粒度				
	歯面L側	歯面R側	歯元L側	歯元R側		0.25mm	0.38mm	0.5mm	1.0mm	歯面L側	歯面R側	歯元L側	歯元R側	歯元部
ヘリカル鍛造品	0.63	0.61	0.45	0.48	59.6	366	367	347	333	6.1	5.9	6.0	6.5	6.9
従来品	0.58	0.56	0.45	0.50	61.5	345	355	307	312	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
規格	0.4~0.8mm 判定硬度:550Hv				58~65	HRC28~45 (Hv286~448)				規定なし				

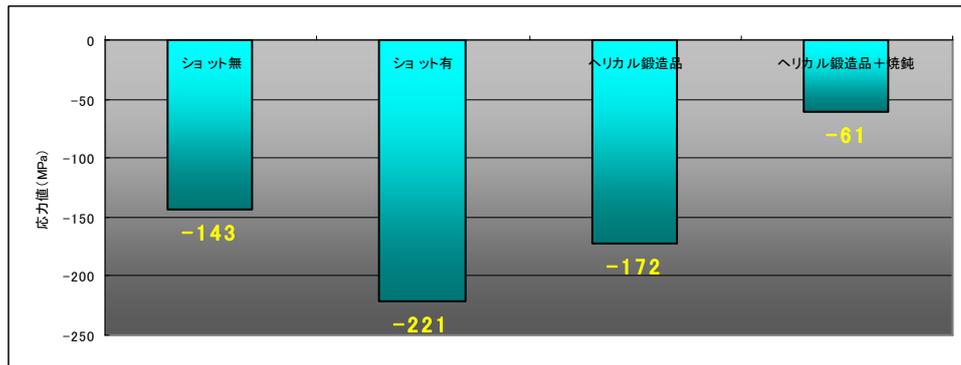
・応力測定



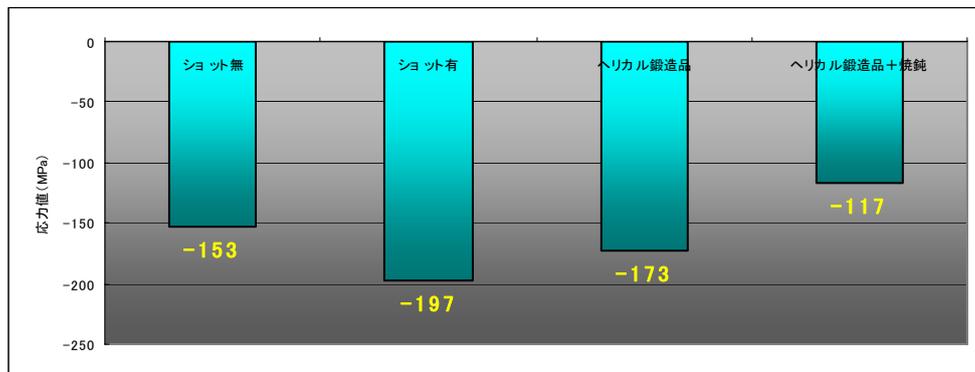
<測定位置>



<歯筋端面側 2.5mm>

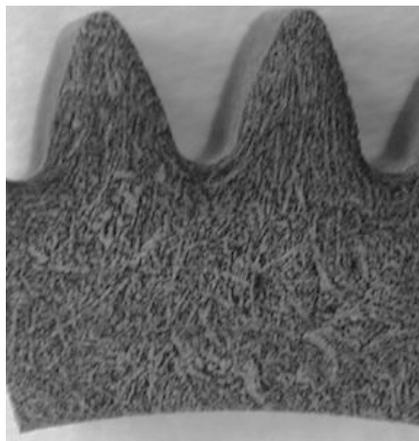


<歯筋中央>

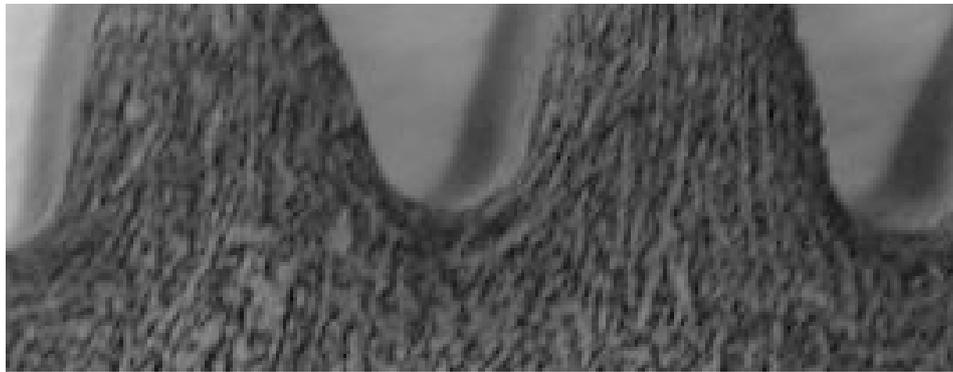


<歯筋ボス側 2.5mm>

・ファイバーフロー（冷間鍛造品）



<ファイバーフロー>

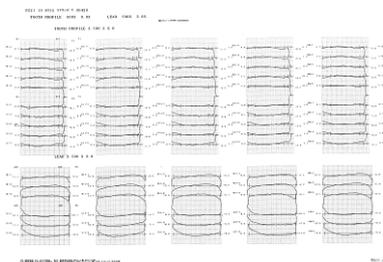


＜歯元ファイバーフロー＞

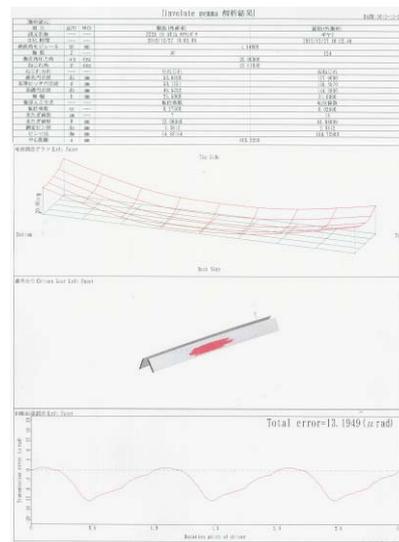
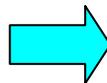
・歯当たりの確認と耐久試験

強度試験前に使用するギヤの歯面を測定し、シミュレーションにて最適な歯当たりを得られることを確認した。また組立てによる、かみ合い誤差にも配慮するため、組立て後に端面振れ、歯振れを0.04mm以下に管理して強度試験を実施した。

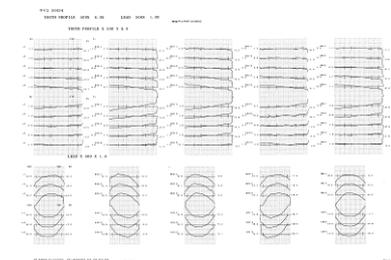
強度試験に使用したヘリカル鍛造品の歯形、歯筋測定結果を下図に示す。



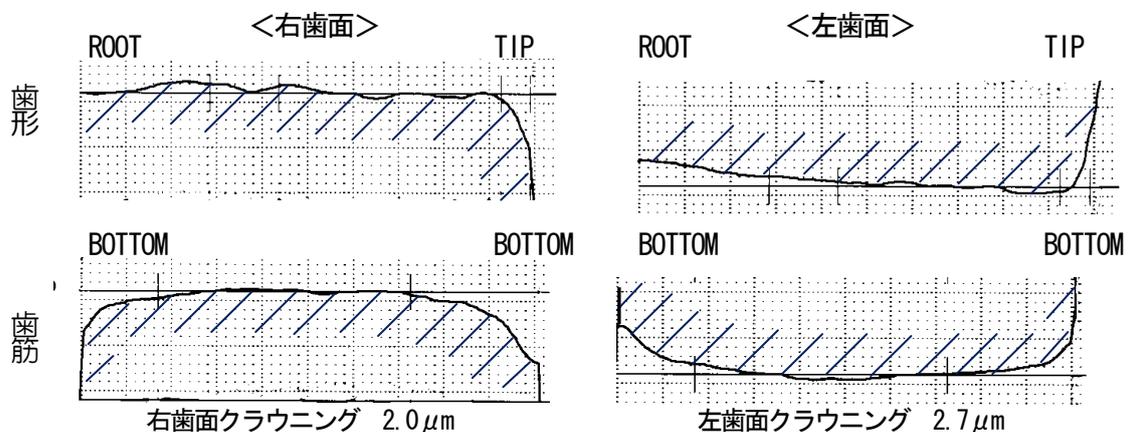
＜耐久試験用ギヤの歯面精度＞



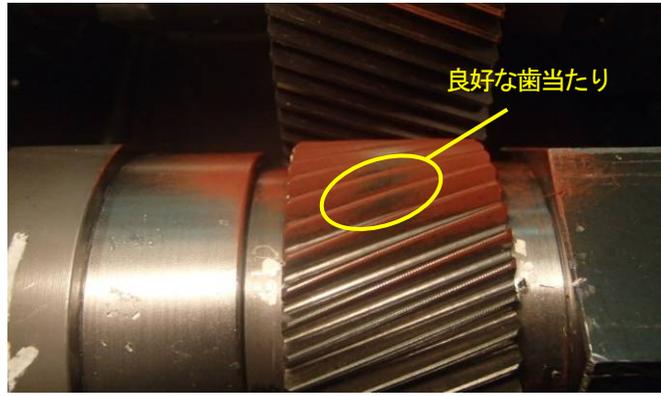
＜歯当たりシミュレーション＞



＜相手ギヤ（研削品）の歯面精度＞



＜試験用鍛造ヘリカルギヤ歯面測定結果＞



<ギヤ対にての歯当たり結果>

耐久試験の様子を下図に示す。試験は歯切り品、冷間鍛造品それぞれ3サンプルで入力トルクを3水準取り、破損するまでの寿命時間を調査した。

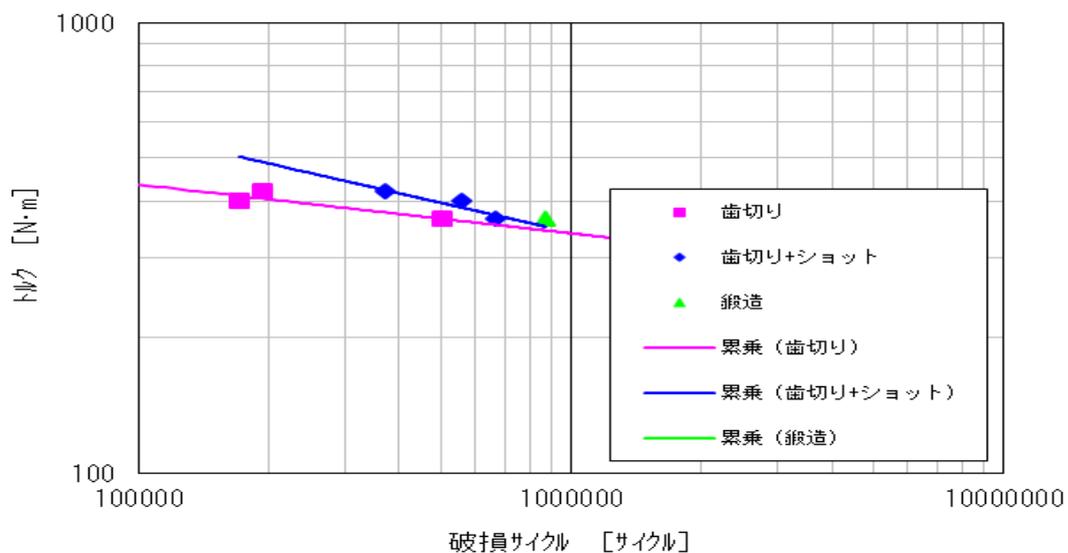


<耐久試験の様子>

2-3-3 試験結果

試験結果を下図に示す。

鍛造ヘリカルギヤは疲労強度が歯切り品に対してアップしており、鍛造ギヤの強度が高いことが検証できた。



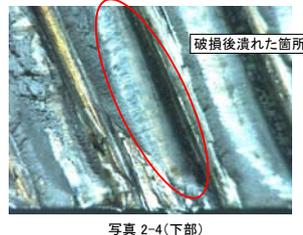
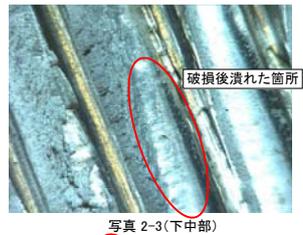
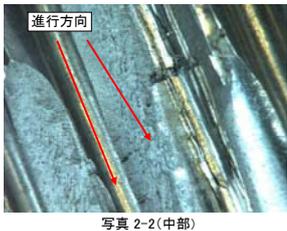
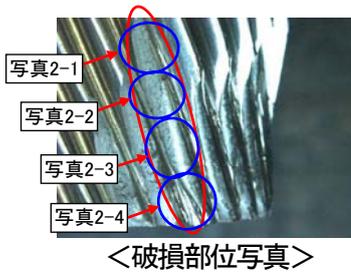
<耐久試験結果 トルク—寿命 線図>

2-3-4 試験終了品の調査

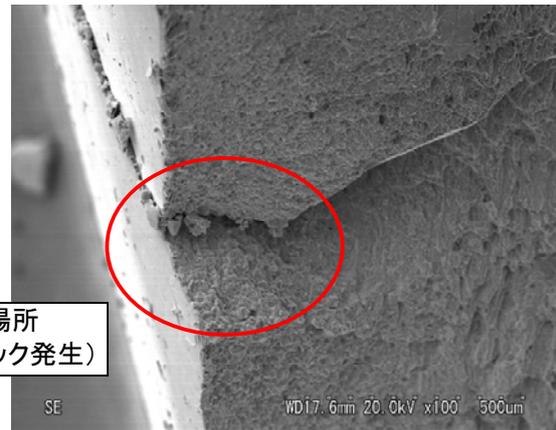
試験での回転方向により、応力は左側(右歯面)から右側(左歯面)に発生する。破損部位拡大写真の破断面をマクロ観察した結果、向かって左側領域より段差模様が徐々に間隔が広がっている。これは破損のスピードが徐々に速くなっていることを示しており、左側領域から左側領域に破損が進行していることがいえる。

破損起点は、下図の電子顕微鏡によるフラクトグラフィの結果、歯筋中央の右歯面歯底であることが分かった。(写真2-5)

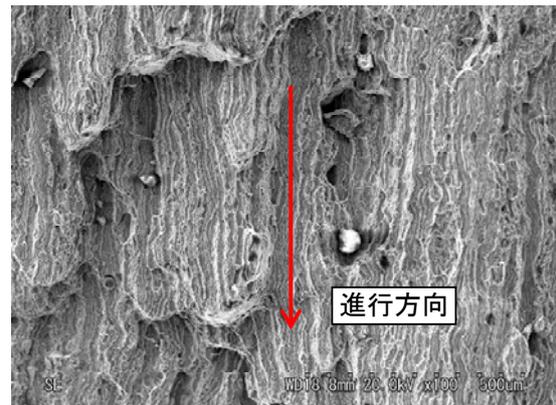
起点近傍は延性破壊で見られる粒界破壊のデンプルが広く観察された。進行方向は亀裂の進展速度が速い場合に観察される脆性ストライエーション、最終破損近傍は破断面がつぶれており判断ができなかった。



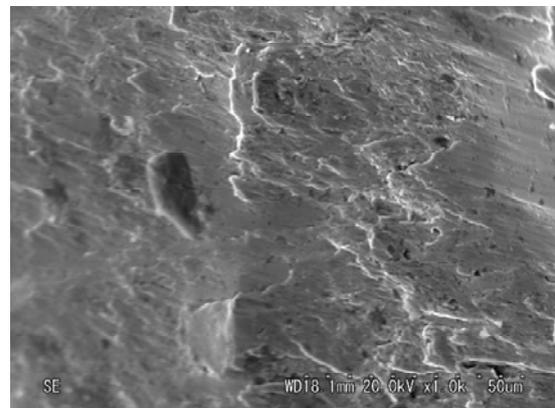
<破損部位拡大>



上クラック部(起点場所)



中部



下部

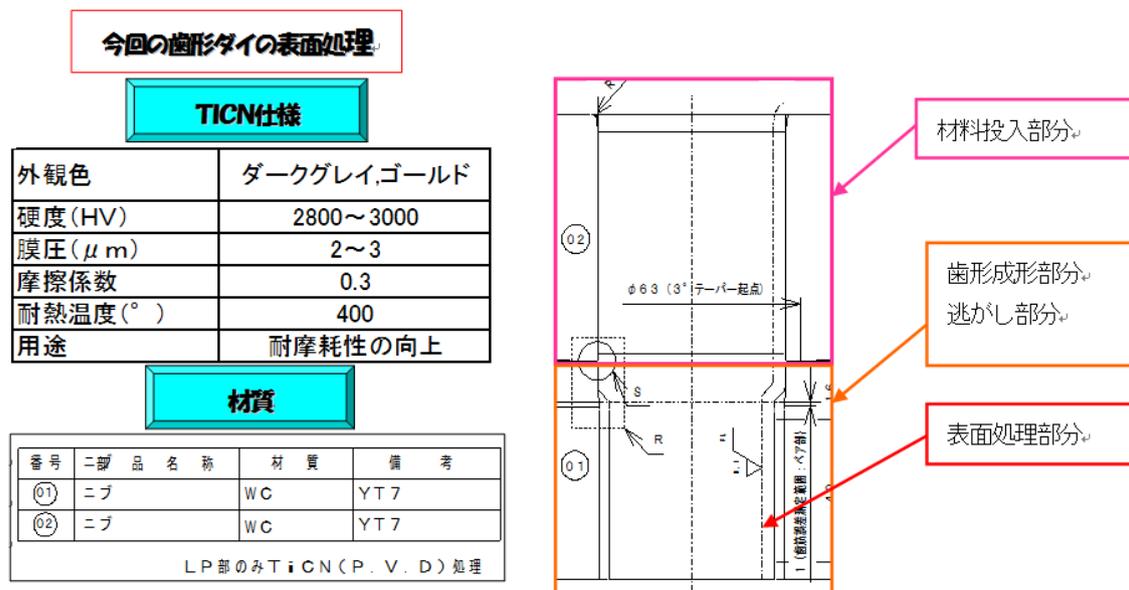
<電子顕微鏡による歯損部位拡大>

2-4 金型寿命を達成することができる金型構造及び鍛造条件の決定

2-4-1 目標達成のための金型仕様

ヘリカルギヤの冷間鍛造に最も適した金型材料として、硬度が高く耐摩耗性に優れた超硬合金を材料投入部と歯成形部、逃がし部に採用した。材料投入部にも採用したのは歯成形時に材料が圧縮応力により座屈して、この部分の内面に高い面圧が生じるためである。

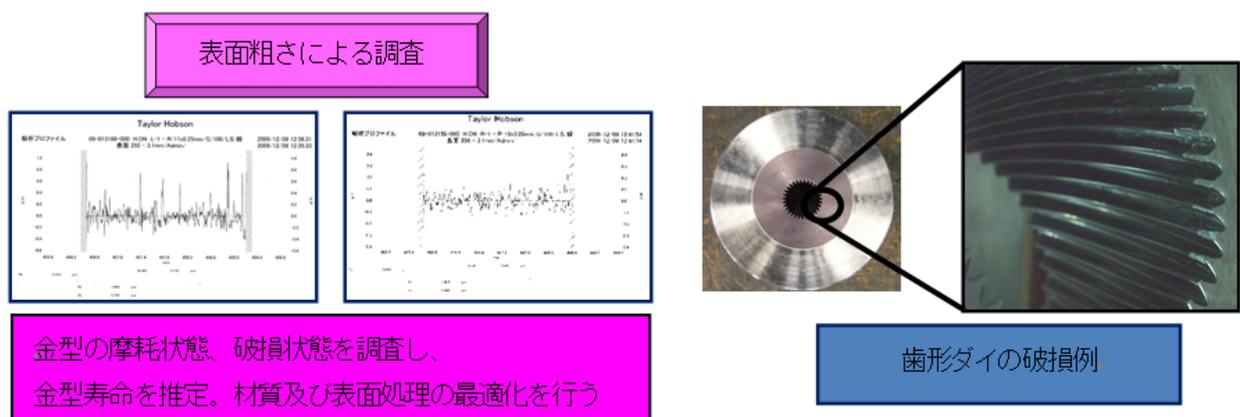
表面処理については、ミクロンオーダーの歯形精度を確保するため、比較的処理温度が低く金型の変形のない PVD (物理蒸着) 処理でコーティングが可能なものの中から、硬度が高く耐摩耗性に優れた TiCN コーティングを選択した。

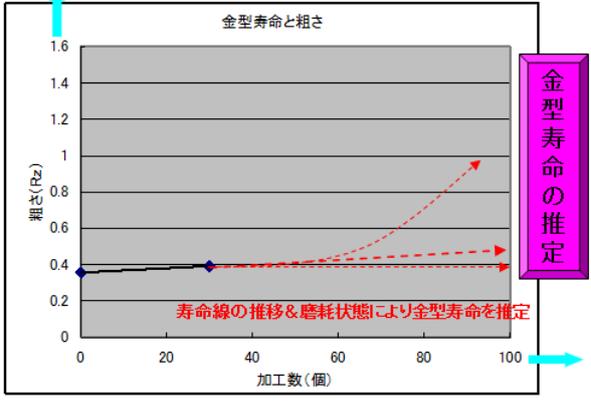


2-4-2 金型寿命の判定

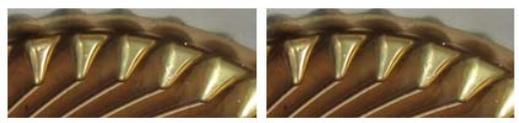
金型寿命の検証は、金型の歯成形部の面粗さによる調査を行い、金型の磨耗状態、破損形態を調査し金型寿命を推定する。

目標寿命を達成できる材質と表面処理を決定するため、現在加工数ごとに粗さを測定している。また、摩耗状態を次頁に示すように観察しており、今後もデータの蓄積を継続して行い材質及び表面処理の改善を行う。





金型の摩耗状態、破損形態を調査し
金型寿命を推定、材質及び表面処理の最適化を行う



<金型表面粗さの測定と摩耗状態の観察>

第3章 研究成果のまとめ

3-1 本研究開発の成果

3-1-1 材料歩留りを向上させることができる鍛造素材（スラグ）形状及び鍛造工法の決定

成形シミュレーションを活用し、材料歩留まり 70%の鍛造素材の形状を決定し、その鍛造素材で歯成形が可能であることを確認した。

3-1-2 良好な歯当たり（狙い通りの歯形）を得るための金型形状、工具、鍛造工法の決定

歯成形と同時にギヤ中央部を拡径させ、1工程で歯筋にクラウニングを付加する工法を考案し、実用化することに成功した。本研究開発で目標としたクラウニング形状 ($3\pm 3\mu\text{m}$) を得ることができた。

3-1-3 ヘリカルギヤ鍛造品の軽量化パフォーマンスの推定（強度/材料重量）

耐久試験機にて、入力トルクを 3 水準に分けて耐久試験を実施した。その結果、トルク-寿命線図から、ヘリカルギヤ鍛造品は、歯切り品に対して疲労強度が向上していることが確認できた。

3-1-4 金型寿命を達成することができる金型構造及び鍛造条件の決定

金型寿命トライにて、歯成形部の表面粗さ、コーティングの状態の観察を実施し、金型の形状、材質、表面コーティングの仕様を仮決定した。その妥当性を引き続き、金型寿命トライで検証する。