

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「ニッケル基耐熱超合金大型ねじの
転造加工技術開発」

研究開発成果等報告書

平成22年3月

委託者 近畿経済産業局
委託先 財団法人新産業創造研究機構

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
1 - 2	研究体制	・・・	2
1 - 3	成果概要	・・・	3
1 - 4	当該プロジェクト連絡窓口	・・・	3

第2章 転造技術の最適化

2 - 1	転造プロセス最適化の探索	・・・	4
2 - 2	転造過程のシミュレーションの高度化	・・・	16
2 - 3	潤滑油の最適化探索	・・・	23
2 - 4	転造用ダイスの耐久性の評価	・・・	26

第3章 光学式探傷装置の実証試験

3 - 1	光学式探傷装置の改造の概要	・・・	30
3 - 2	解析ソフトの仕様詳細	・・・	30
3 - 3	実証試験結果	・・・	31
3 - 4	今後の課題	・・・	32

最終章	全体総括	・・・	33
-----	------	-----	----

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（高度化目標、技術的目標）

現在、小径ねじでのみ転造可能な加工硬化能の高いニッケル基耐熱超合金（インコネル718など：以下、ニッケル基合金という）の太径(M80以上)について、転造ねじ加工技術（転造速度、加圧速度などを制御）を開発する。従来、切削で仕上げていた太径ニッケル基超合金ねじは、さらに高強度化・高疲労寿命化を図るべく転造ねじへの進展が望まれている。これは、省エネルギー・高熱効率の高温複合サイクル発電プラントのタービンブレードを束ねる結合部材に供するためである。

これまでの太径転造加工は、ダイスの押し込み抵抗のため変位量が飽和値に達すると手動で加圧力を増加するのみで、加圧変動の時間制御は不可能である。さらに大型転造盤の変位精度が悪く、荷重や押し込み速度は極めて粗い制御しかできず、最適な転造加工が不可能であった。

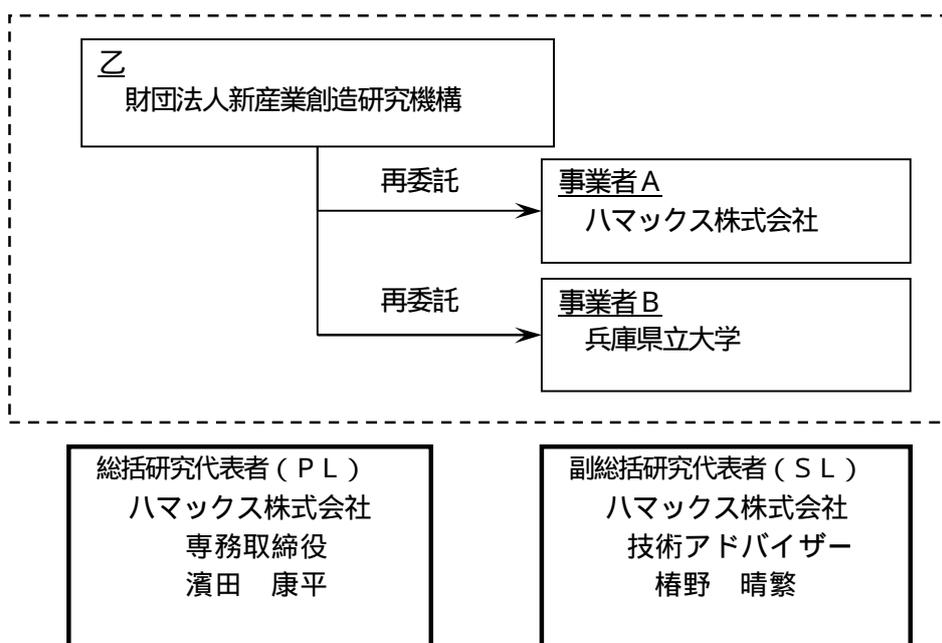
本研究開発では、3年間で以下の3つ大テーマを実施する計画である。

- () 高精度制御機器の開発：
ダイスの加圧押し込み速度、圧力、位置及び主軸の回転数の各要素を種々のパターンにて制御可能な高精度・制御機器を開発する。
- () 転造技術の最適化：
開発した高精度・制御機器を大型の現有100トン転造盤に付置して転造ねじ製造ラインの高度化を図る。これにより、3つの因子（新加工制御、潤滑、ダイス耐久性）を定量的に検討し、高強度のニッケル基合金（インコネル718）の太径転造ねじ製造技術の最適化を行う。
- () 品質保証技術の確立：
転造ねじの品質保証（表面疵の有無検査等）のため、肉眼観察ではなく精度と信頼性の高い新品質検査技術を開発する。

平成21年度は、平成19年度に実施した()高精度油圧・制御機器の開発、により製作した転造制御装置を用い、()転造条件の最適化、を継続実施した。また、平成20年度に実施した()光学式探傷装置の開発、により製作した疵の画像処理ソフトを改良、使用して、ねじ転造加工後の探傷検査の実証試験を実施した。

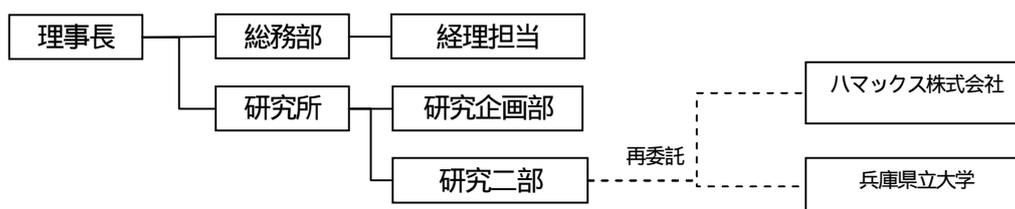
1 - 2 研究体制

1) 研究組織



2) 管理体制

2 - 1) プロジェクト管理法人「財団法人 新産業創造研究機構」

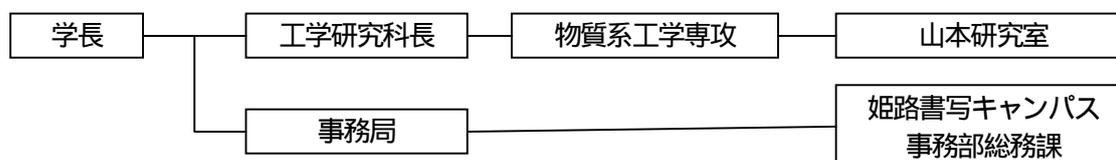


2 - 2) 再委託先

ハマックス株式会社



兵庫県立大学



1 - 3 成果概要

以下に、平成21年度の各課題に関する成果の概要を示す。

1) 転造技術の最適化

1 - 1) 転造プロセス最適化の探索

平成19年度及び平成20年度の研究成果を基に、ハマックス㈱が、制御装置を設置した100トン転造盤にて、ダイスの押込み速度、圧力、位置及び回転数等のプロセス条件を変えて、実機サイズの太径転造加工試験を行った。

また、制御装置を使用しない従来法による転造加工との比較評価のため、(財)新産業創造研究機構より提供を受けて、従来法による転造加工技術によるM80以上の大径の転造加工した比較評価用の転造ねじを試作した。

両者の比較検討により、転造プロセスの最適化の効果を確認した。

転造加工試験により製作した転造ねじについては、ハマックス㈱にて表面疵の有無のマクロ観察を行い、兵庫県立大学にて断面微細組織、特に転造ねじ底の局部域ミクロ組織観察を行い、それらの試験結果に基づき最適転造条件を明らかにし、転造加工条件の最適化へ反映させた。

1 - 2) 転造過程のシミュレーションの高度化

転造過程を、有限要素法(FEM)を用いたシミュレーションモデル化を行い、シミュレーションを行った(計算は計算専門業者外注)。

摩擦係数、ダイス回転数、送り速度などのパラメーターを変えて転造ねじ加工過程の弾塑性接触大変形FEM解析結果を検討し、実体での転造加工との比較を行い、大型転造条件の絞込みを行った。

1 - 3) 潤滑油の最適化探索

平成20年度に評価した潤滑油をもとに改良潤滑油(極圧添加剤等の調整)を製作した。ハマックス㈱にて、転造盤の主軸トルク値の比較、及び表面マクロ観察(ねじ底の剥離、焼付き状況等の潤滑の影響観察)を行い、兵庫県立大学にて、内部ミクロ組織におけるき裂の有無を観察した。それらの評価から総合的に、最適な潤滑油を選定した。

1 - 4) 転造用ダイスの耐久性の評価

制御装置を設置した100トン転造盤にて、実機サイズの製品を用い粉末工具鋼を使用したダイスの耐久性の評価を行った。また、今年度はダイスにWPC処理(ショットピーニング)を施し加工性・耐久性の評価を行った。破損したダイスについては調査(クラック形状、破面観察、内部組織観察等)を行った。

2) 光学式探傷装置の実証試験

平成20年度に開発した光学式探傷装置を用いて、試験材の地合と疵の判別を行う画像処理の実証試験を実施して、検査データを蓄積するとともにソフト改良を行い、実用性の高い検査装置として完成させた。

3) 工業所有権及び対外発表

なし

1 - 4 当該プロジェクト連絡窓口

〒650-0047 神戸市中央区港島南町1丁目5番2 神戸キメックセンタービル 6階

(財)新産業創造研究機構 高谷 芳明

Tel : 078-306-6803 、 Fax : 078-306-6812 、 E-mail : takatani@niro.or.jp

第2章 転造技術の最適化

2-1 転造プロセス最適化の探索

2-1-1) 転造実験による最適化の検討

1) H19年度、H20年度の成果概要

本研究開発では、転造技術の最適化の検討に当たり、H19年度はハマックス(株)が所有していた汎用100tf転造盤に、ダイス送り速度、圧力、位置及び主軸の回転を検知し任意にコントロール可能な図2-1-1の高精度油圧制御機器を設計開発し設置した。また、動作確認実験により、初期の目標性能を発揮することを確認し、本格的な転造を可能にした。

一方、制御装置が完成しない間は、既存100tf転造盤にて、ダイスの押込み速度、圧力、回転数等の加工プロセス条件を変えて、予備の転造加工試験を行った。

これらの結果を整理すると¹転造前の表面粗度Raは細かいほうがよい。²回転数は16rpm。³押込み速度は1mm/sが好ましい条件と判明した。

開発された高精度制御機器を用いて、インコネル718の転造加工が上記予備実験を考慮した条件で転造加工が可能であることが確認できた。図2-1-2はがその加工写真である。

H20年度は懸案であるM80相当インコネル718材の入手遅れ対策として中径ねじサイズM56×P5.5のSCM435(H)材を用いて、ダイス送り速度、ワーク回転数等のプロセス条件を3種類のパターンで実験を行い、転造荷

重及び主軸トルクの推移、ねじ底の表面観察結果から条件の絞り込みを行い、パターン(a)が最も好ましいことが判った。図2-1-3は3種類パターンの変位

ワーク回転数線図である。

この試験結果に基づきM56×P5.5のインコネル718材を用いて2種類のパターンにてSCM435材との材質の違いによる

成形性及び機械的能力の限界などの分析を行い、インコネル718材においてもこのパターンが好ましいことが実証された。表2-1-1はその速度パターン表である。

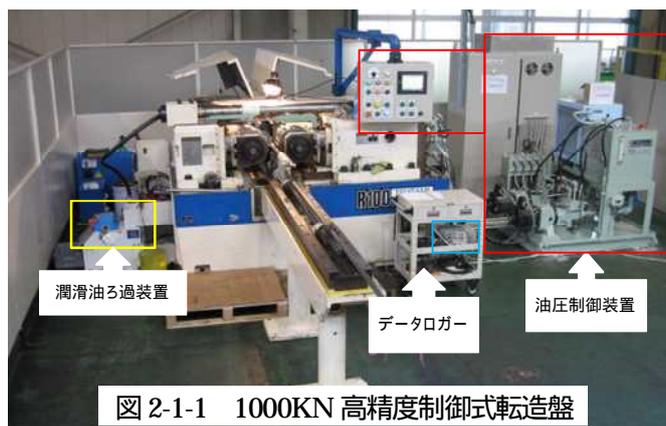


図2-1-1 1000KN 高精度制御式転造盤

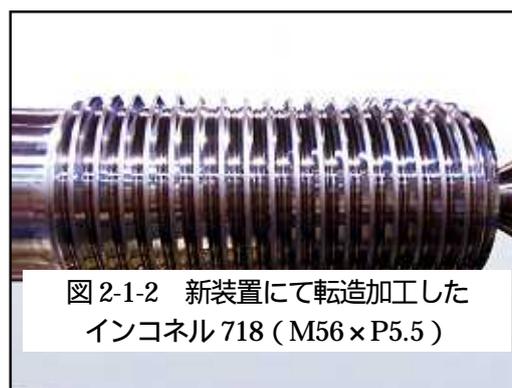


図2-1-2 新装置にて転造加工した
インコネル718 (M56×P5.5)

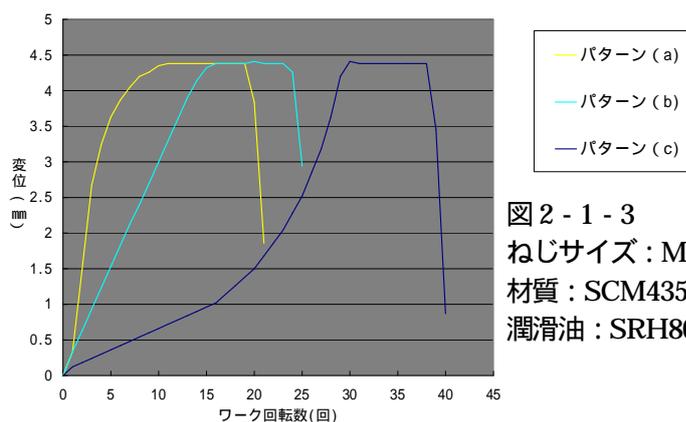


図2-1-3
ねじサイズ：M56×P5.5
材質：SCM435(H)
潤滑油：SRH80-3

表2-1-1 変位速度パターン

パターン(a-1)	変位	0.0	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2	4.4
	速度		0.5	1.5	2.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.1
パターン(a-2)	変位	0.0	0.3	2.5	2.8	3.0	3.3	3.6	3.9	4.2	4.4	
	速度		0.5	2.0	1.8	1.5	1.2	1.0	0.5	0.3	0.1	

次に、懸案である太径ねじ 3.25 - 8 UNJ(82)、インコネル材による転造実験を行い荷重 900 KN にて所定値に近いところまで転造できた。図 2 - 1 - 4 は荷重・主軸トルクワーク回転数線図で、図 2 - 1 - 5 はインコネル 718 材、3.25 - 8 UNJ 転造ねじである。

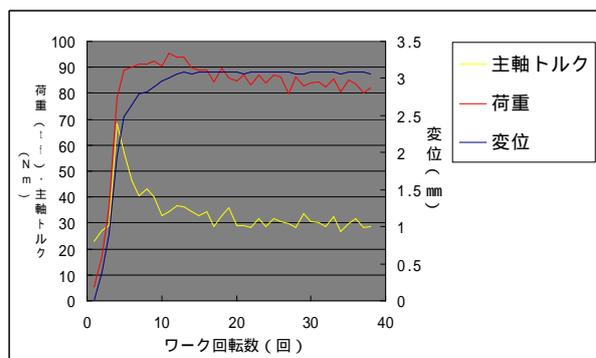


図 2-1-4 荷重・主軸トルク・ワーク回転数線図
(インコネル 718,3.25-8UNJ)

2) 太径ねじ 3.25 - 8 UNJ,インコネル材と SNCM 439 (H)材による転造性について

H20年度では、M56にてインコネル材と SNCM 材との比較検討試験を報告したが、まず、太径ねじ 3.25 - 8 UNJ においてもインコネル材と SNCM 材との比較をテストをした。

図 2 - 1 - 6 はその荷重、トルクワーク回転数線図であるが、

- (a) ピークトルクは同程度であるが、ピークトルク後のトルクは SNCM のほうがインコネルより高い数値を示した。
- (b) 荷重はインコネル材が大きい。
- (c) ワーク回転数は設定位置まで加工されるのにインコネル材が多く、SNCM 材が少ない回転数であった。
- (d) ねじ部充満率は SNCM 材 100%に対し、インコネル材は 69%であった。

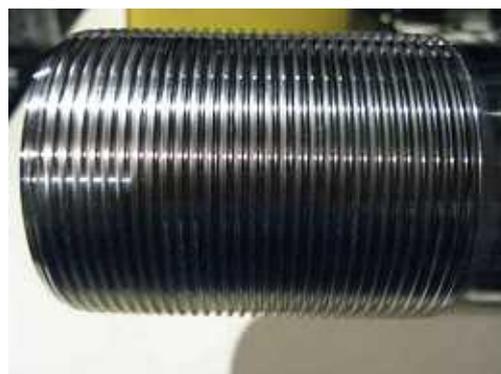


図 2-1-5 インコネル 718 太径(82)転造ねじ

これは SNCM 材の加工性が良く、インコネル材が難加工材であることを示すと同時に、転造盤自体の剛性を含む機械的な要素も影響していることを示していると思われる。従って、インコネル材の加工試験に当たってはダイス押込み設定位置の変更を含め、条件設定を変化させ以下の試験を行った。

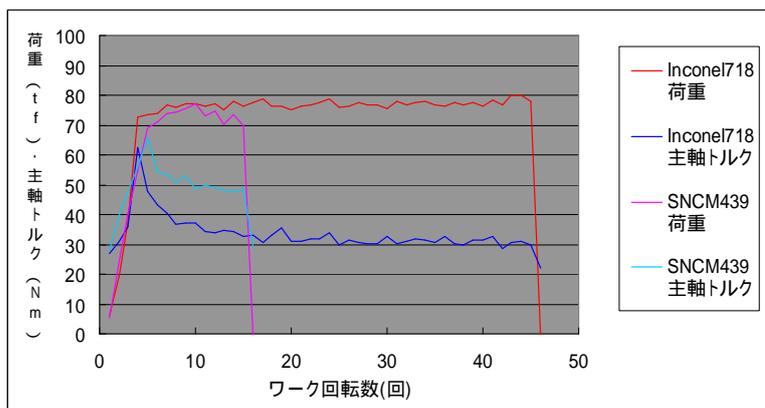


図 2-1-6 インコネル 718 と SNCM439 での比較線図

3) 太径ねじ 3.25 - 8 UNJ、インコネル材によるダイス押込み位置変更による転造試験

図 2 - 1 - 7 は上記インコネル材よりダイス押込み位置設定を 0.35 mm 増加変更したものととの比較線図で、荷重が約 800 KN が 900 KN に増加した。また、ねじ部充満率も 69% から 79%へと向上したがねじ部端部と軸部では荷重が大きく違っており偏荷重が加わっている。

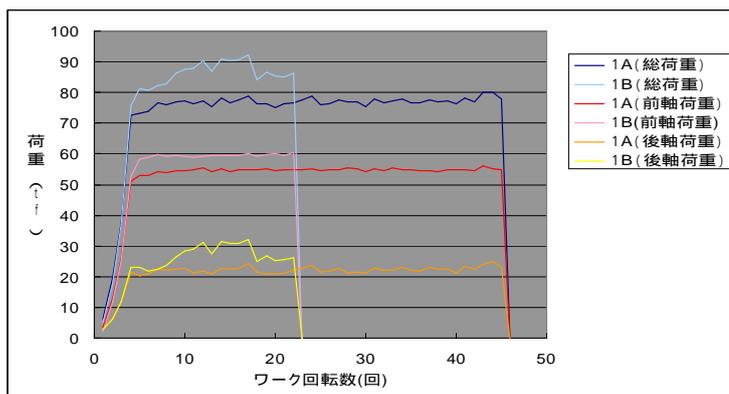


図 2-1-7 荷重・変位 ワーク回転数線図
(押込み変位を 0.35mm 増加変更の比較)

4) 太径ねじ 3.25 - 8 UNJ、インコネル材による圧力制御パターンによる転造試験

本機は1000KN高精度制御転造造盤であり、平行制御、位置制御、圧力制御の選択が可能であり、今までは平行制御「入」にて試験をしてきたが、ねじ部端部と軸部ではかなり偏荷重となり、一部機械性能をオーバーしているため圧力制御パターンで、且つダイス軸受部を変更し転造試験を試みた。

図2-1-8は平行制御を「切」、圧力制御パターンで行った荷重、変位 ワーク回転数線図で前軸と後軸で大きく変位差が出ている。また、充填率は端部100%、軸部86%であった。

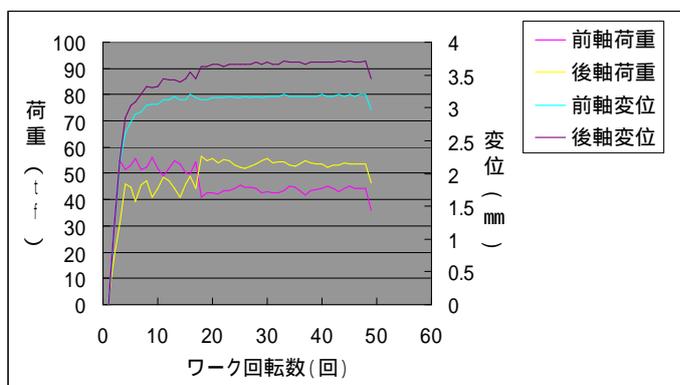


図 2-1-8 平行制御を解除した時の荷重・変位線図

5) 太径ねじ3.25 - 8 UNJ、インコネル材による軸受部変更による転造試験

上記試験にて充填率は向上したが、軸受部変更による効果が大とみて、軸受部を変更したまま、位置制御で転造試験を行った。図2-1-9はその荷重、変位 ワーク回転数線図であるが、圧力制御時同様、充填率は、端部95%、軸部83%と向上した。

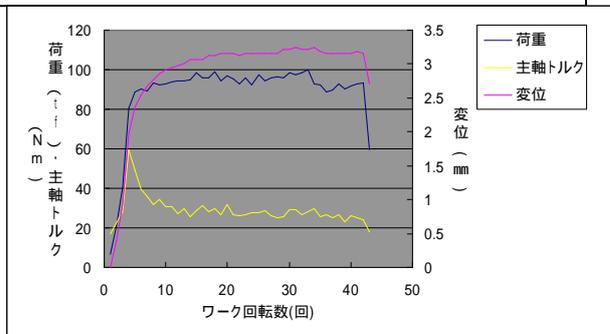


図 2-1-9 軸受部変更時の荷重・主軸トルク・変位 ワーク回転数線図

6) 太径ねじ3.25 - 8 UNJ、インコネル材による多段押し転造試験

転造加工において2回押し加工を行うと押し込み荷重の低減されるとの通説があるが、この場合、ダイスとワークとが一度離れるため、ひげ等が発生し易く、疲労限の低下が想定されるため、ダイスとワークを常に接触状態にて加工する多段押し転造を試みた。図2-1-10は3回の多段加工を行った荷重、変位 ワーク回転数線図である。荷重が振幅する度に加工が進行していることが確認できた。しかし、通常の1回押し転造の場合も一定荷重の状態加工が進行することが知られており、この度の試験では荷重及び変位に顕著な差異は認められなかったが、今後条件を種々変更して試験する価値はあると思われる。

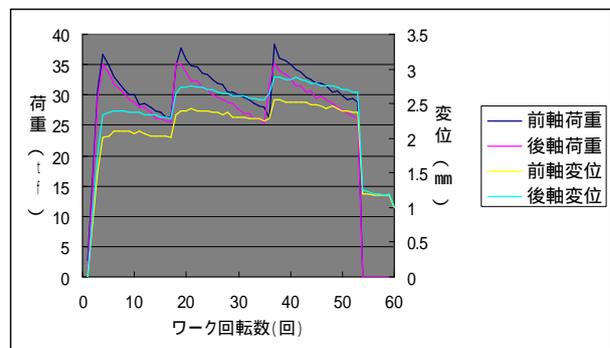


図 2-1-10 荷重・変位 ワーク回転数線図 (3回押し)

7) 中径ねじ2.625 - 12 UNJ、インコネル材の転造試験

H21年度は実用化に向けた転造の最適化の検討がテーマにあり、中径ねじ2.625 - 12 SUNJ、インコネル材による転造試験を行った。転造プロセスについては太径3.25 - 8 SUNJ、インコネル材にて転造できたのでそのプロセスを採用することとし、太径ねじ試験にて顕在化した、偏荷重、軸受部剛性について転造試験を行った。

軸受間距離は同じでダイス位置を変更した試験も行ったが、顕著な改善は見られず、軸受間距離を短くすると大幅にねじ部充填率が向上することが

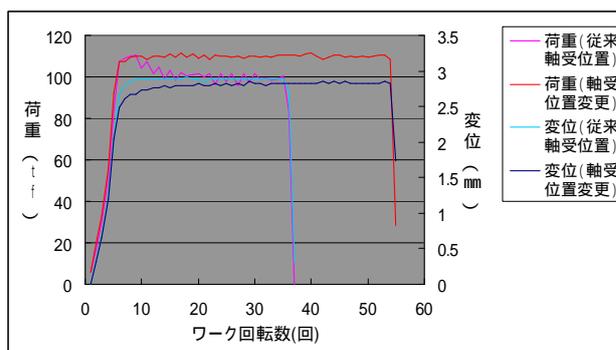


図 2-1-11 軸受位置変更前後での荷重・変位の比較

判った。

図2-1-11は従来軸受と軸受間距離を短くした転造の荷重、変位 ワーク回転数線図であるが、データ上では変位にあまり違いがないが、ねじ部充満率には大きな変化がみられた。

	ねじ端部	ねじ軸部
従来軸受	93%	79%
軸間距離を短く	100%	91%

この実験により転造プロセスも大事な要素であるが、基本的な軸受強度がねじ加工の完成度を高めることが判った。

8) 中径ねじ 2.625 - 1.2 UNJ、インコネル材のねじ長さ差異による転造試験

上記軸受間距離を短くし、転造プロセスは試験結果の最適パターン即ちダイスとワークの接触過程はゆっくり、その後ダイス送り速度を上昇させるパターンにてワーク長さ120mmと60mmの試験を行った。どちらもねじ部充満率は100%であった。

図2-1-12はねじ長さ差異での荷重、トルク、変位 回転数の線図である。

120mmねじではピークトルクを過ぎると荷重上昇カーブが緩やかになり、変位の進行ペースも落ちるが設定値まで、転造回転を行っている。一方、60mmねじではピークトルク時に、最大荷重となりトルク減少に伴い荷重は減少しているが変位はピークトルク、最大荷重時点ですでに設定位置に到達している。

120mmねじでは、加工途中で荷重が能力飽和状態に近づき荷重上昇カーブが緩やかになったためにピークトルクもその時点がピークとなりその後荷重の増加及び保持状態により変位は進んだもの推察できる。また、60mmねじでは荷重能力に余裕があり一気に設定位置まで転造が進んだため、その時点で最大荷重、ピークトルクとなったと推察できる。

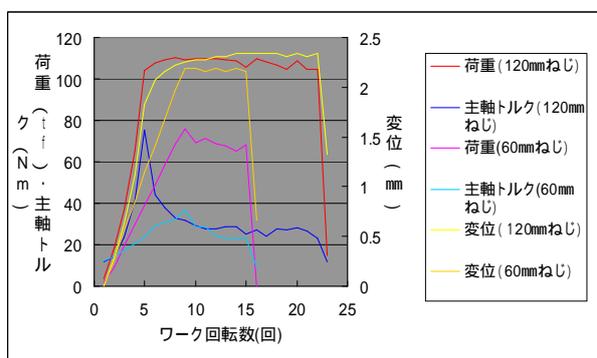


図2-1-12 ねじ長さの違いによるテスト比較 (インコネル718)

9) 従来転造と最適プロセス転造とのねじ底面の比較

従来転造の転造回転数の長いものはねじ底面が最適プロセス転造と比べると図2-1-13のように面粗度が荒い。

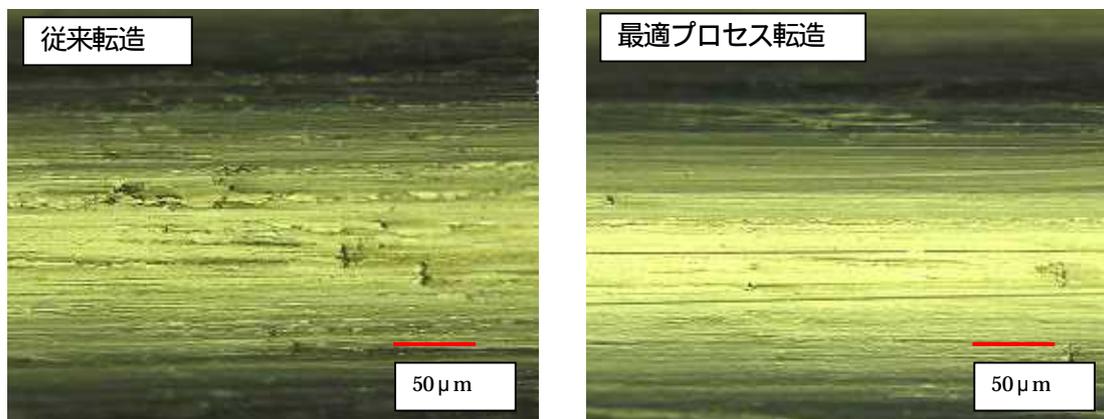


図2-1-13 転造方法の違いによるねじ底の面粗さ比較

これは後述するが硬度低下及び微細組織に変化が認められ、疲労限の減少にも影響があるのではと推察する。

10) まとめ

今回、転造プロセスの最適化の検討のため、種々の上記のとおり行い以下の結論を得た。

最適な転造プロセスはダイスと試供材の接触は緩やかにし、その後押し込み速度を上げるのが好ましい。今回のインコネル材では1 mm/s程度が試験したどのねじサイズにおいても良かった。

転造盤の制御は位置制御、圧力制御、平行制御などを試みたが、平行制御をしながら位置制御するのが最も良かった。

今回は既設機を改造して高精度制御転造盤を開発し試験を行ったが、転造盤自体の剛性、特にダイス軸強度の剛性が大きな加工要素であることが顕在化した。

最後に、別途今回の最適プロセスにて加工した小径ねじと切削ねじ疲労試験をしてみたが、切削ねじに比べ疲労限度で2倍以上、疲労回数で10倍以上の結果が出ていることを報告してまとめとする。

2 - 1 - 2) 微細組織解析

製造技術の最適化を図るための3つの因子「新加工制御」、「潤滑」、「ダイスの耐久性」の中で、加工制御は歪速度と歪量を変化させるものであり、潤滑剤はこれらに影響を及ぼし、いずれも結果的に変形組織も含めた意味においての微細組織を変化させる。歪量は硬度測定で把握

できる。歪を含む微細組織の評価は、これまでの手法では困難であった。比較的最近の手法であるSEM(走査電子顕微鏡) - EBSD(後方散乱電子回折)法の特長は、歪の情報が重畳した組織写真を示し得ることである。

図2 - 1 - 14 (a)にねじ底部の結晶方位マップ(IPFマップ)を示す。(b)に示したのはねじ底から離れた部分のIPFマップである。(b)中に示した標準ステレオ三、角形の色に従って結晶粒の方位を色で示している。

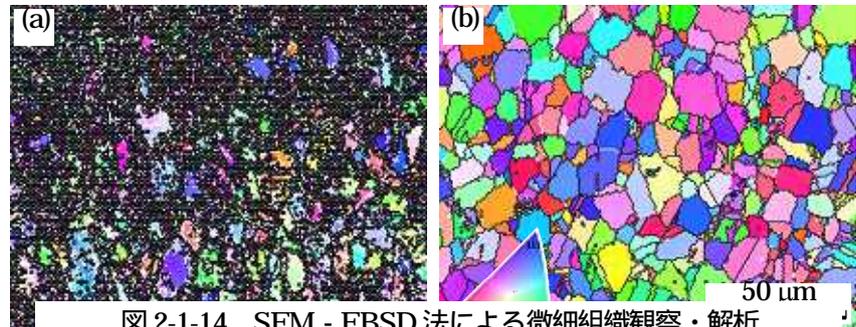
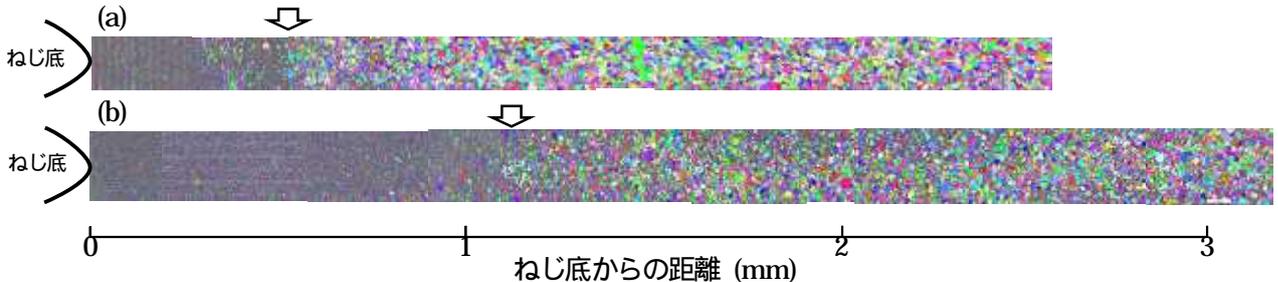


図 2-1-14 SEM - EBSD 法による微細組織観察・解析

(a) ねじ底部、(b) ねじ底から離れた部分



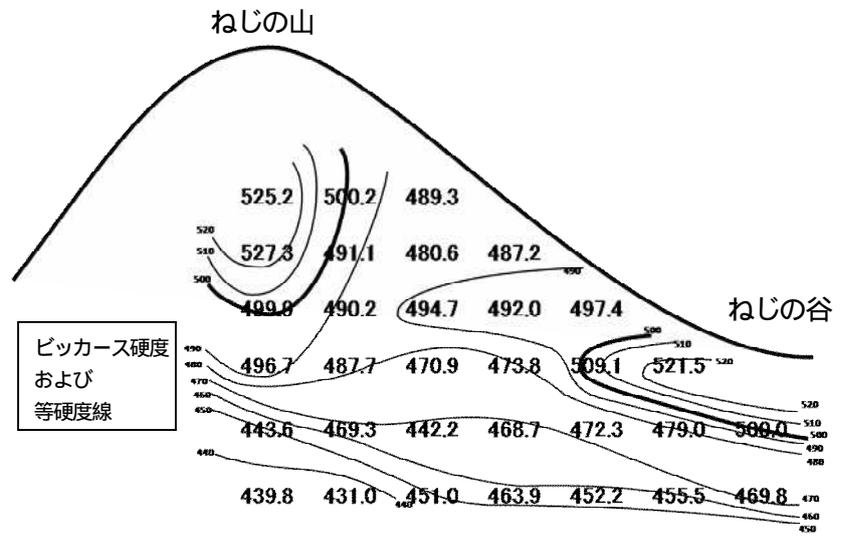
(a)では黒で示された部分が多い。また、色で示された結晶粒も見られるが、色のグラデーションがあり、歪を含む結晶粒であることを示している。黒い部分はさらに歪が多く、方位解析不能な部分である。この黒い部分については後述するように硬度と対応させることができる。製造条件のうち、成形終了までの回転数を変えて作製した試料のねじ底部のIPFマップを図2 - 1 - 15に示す。(a)の試料は164回、(b)は39回の回転でねじを形成した。図中に白矢印で示すように、上記歪が多いために黒く表示される部分が、(a)では

図 2-1-15 成形終了までの回転数の異なるねじの微細組織

(a) 回転数164 (試料JT - 1)、(b) 回転数39 (試料T - 7)

ねじ底から約0.5 mm、(b)では約1.2 mmの深さまで及んでいる。素材のインコネル718の降伏強度は約1200 MPa、引張り強度は1650 MPaとする報告があり、加工硬化が比較的大きい材料である。強度は微細な規則析出物による析出強化である。変形を繰り返し被ると析出物が転位に切断されて軟化することをH20年度に報告した。回転数が多い場合には軟化によって変形が深部に及ばないのに対して、回転数が少ない場合には加工硬化が内部にまで進行すると考えられる。このような加工法の差が推測されることが、EBSD法の利点である。しかし、IPFマップで示されるのは、歪量の定性的な情報である。一般的な手法であるが硬度測定は貴重なデータである。

図2-1-16にJT-1のねじの断面のマイクロピッカース硬度測定を行った結果を示す。ねじの底部およびねじ山からやや内部寄りに硬度の高い部分が形成される。ピッカース硬度の値は引張り強度(単位を kg/mm^2 とした値)のおおよそ3倍であるとされる。図2-1-16の最高硬度は520程度であるので、およそ1700 MPaの強



度に対応し、上に引用した引張り強度、1650 MPa程度まで加工硬化が進んでいることが判る。

図2-1-16 JT-1のねじ部の硬度分布とそれに基づく等硬度線

本研究開発の大きなテーマは、ダイスの押し込み速度などの加工諸要素を制御して転造を行うことであった。



図2-1-17 微細組織におよぼすダイス送り速度の影響

(a) 一定送り速度: 1 mm/s (試料4A)、(b) 0.3→0.5→1.0 mm/s (試料4B)

図2-1-17に、ダイス送り速度を変化させた際の微細組織の変化を示す。(a)は従来通りに一定の送り速度で成形されたねじの断面である。黒矢印でねじの底を示す。一方、(b)は多段で送り速度を変えて成形したねじの断面である。ねじ底に形成される歪の多い部分は、図中に白矢印で示すように、いずれのねじにおいても同程度の深さまで及んでいる。しかし、(a)では白矢印よりも深い位置までグラデーションを伴う結晶粒が観察され、さらに深部には矢印で示す範囲に再び歪の多い領域が観察される。

図2-1-16から推測したように、加工硬化が内部にまで及びやすいのは急速な加工により歪速度が大となる場合である。送り速度を一定にするとダイスと接する面での塑性流動が不十分なままの成形となるの

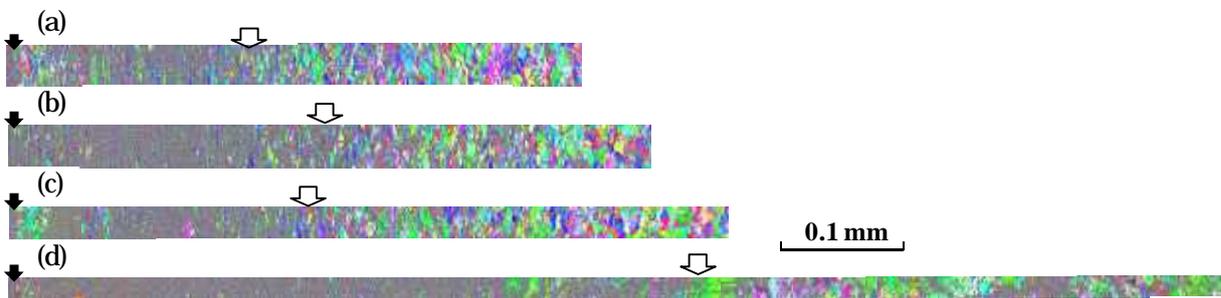


図2-1-18 種々の潤滑剤を用いて作製したねじの微細組織

(a) SRH 8 - 3 (試料7A)、(b) SRH - 3f (試料7B)、
(c) SRH 80 - 3h (試料8A)、(d) SRH 154 - 2b (試料8B)

で、硬化部が内部に進行するのに対して、初期の送り速度を低くすると、塑性流動によって硬化部が山側に流れて、新鮮部が加工を受けるため、歪の多い領域が浅くなるものと考えられる。

ダイスと接する面での塑性流動は、潤滑剤の特性によって左右される。後述の2-3で潤滑剤の特性が示されるが、ここでは数種類の潤滑剤を使用して作製したねじについて、EBSD測定を行った結果を示す。

図2-1-18は、4種類の潤滑剤を使用し、その他の条件は一定として作製したねじの微細組織である。黒矢印でねじ底を示す。歪の多い領域の深さを白矢印で示す。潤滑剤の特性によって加工硬化領域の深さが

変化することが明らかとなった。

SEM - EBSD 法はこれまでに述べてきたように、種々利点があるが、一般的な手法ではない上に、測定領域が狭い。手軽に定量値が得られる硬度測定との対応を得ておく必要がある。

図 2 - 1 - 17 に示した試料 4A、4B について断面の硬度分布を示す。図 2 - 1 - 17 の IPF マップも再度示した。(a) は歪の大きい領域が深い 4A である。太い波線で示したのはビッカース硬度 500 である。4A では硬度は 2.5 mm 以上の深さまで 500 以上の値を示した。一方、試料 4B では (b) に示すようにねじ底の直下およびおよそ 0.7 mm の深さの部分に硬度 500 以上の部分があり、ねじ底直下の部分は細い波線で示したように IPF マップで方位解析が不能な領域にほぼ一致している。HV が 500 となる領域は、図 2 - 1 - 16 に示したようにねじの谷底直下と山の部分のやや深い位置に形成されている。絶対値の 500 に特別な意味はないが、インコネル 718 においては、上述のように引張り強度に相当する加工硬化を受けた領域に対応する。

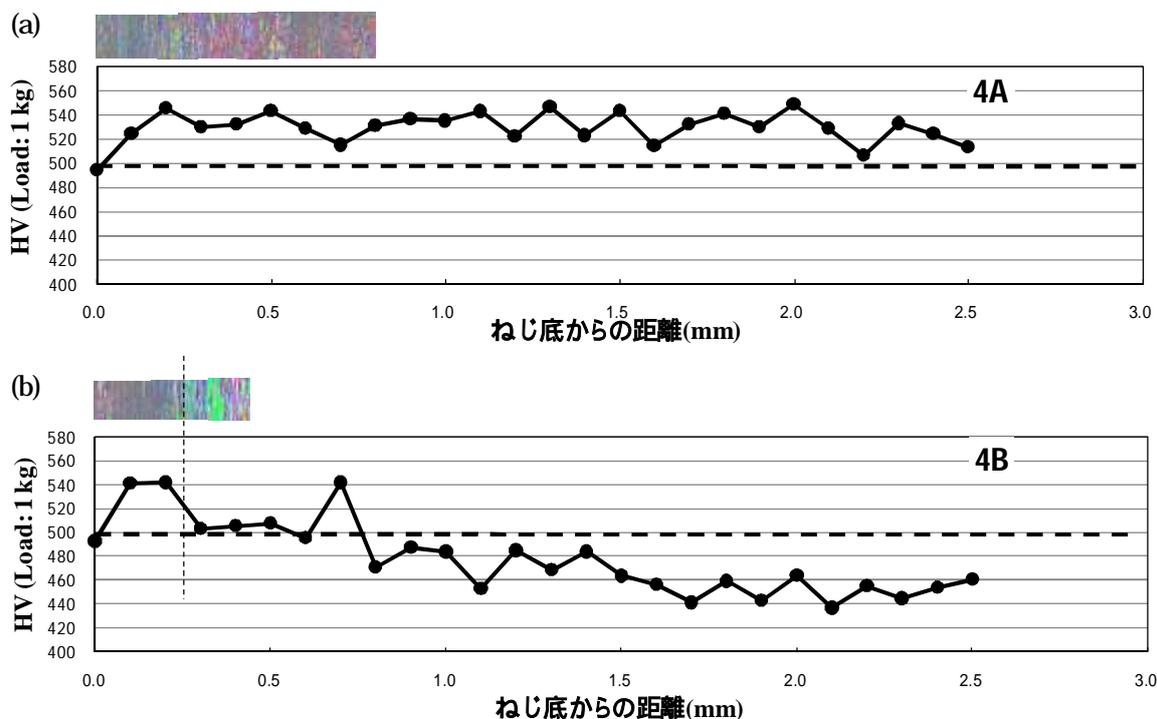


図 2-1-19 図 2-1-17 に示した試料の硬度分布 (a)試料 4A、(b)試料 4B

図 2 - 1 - 18 に示した潤滑剤を変えて製造したねじについての硬度分布を図 2 - 1 - 20 に示す。それぞれの IPF マップを、位置を揃えて示した。太い波線は図 2 - 1 - 19 と同様に硬度 500 を示し、細い波線は方位解析が困難な領域を示す。やはり硬度がおよそ 500 を超える領域で IPF マップが黒くなっている。

以上から得られた新たな知見は、ねじ製造の条件のうち、成形終了までの回転数、ダイス送り速度、潤滑材のいずれを変えてもねじの塑性変形の状況が変わり、著しい加工硬化を被る領域の面積が変化することであり、簡便に硬度分布を測定すれば硬化領域の概略を把握できることである。SEM - EBSD 法はその分布を詳細に示すことができるが簡便な手法ではない。

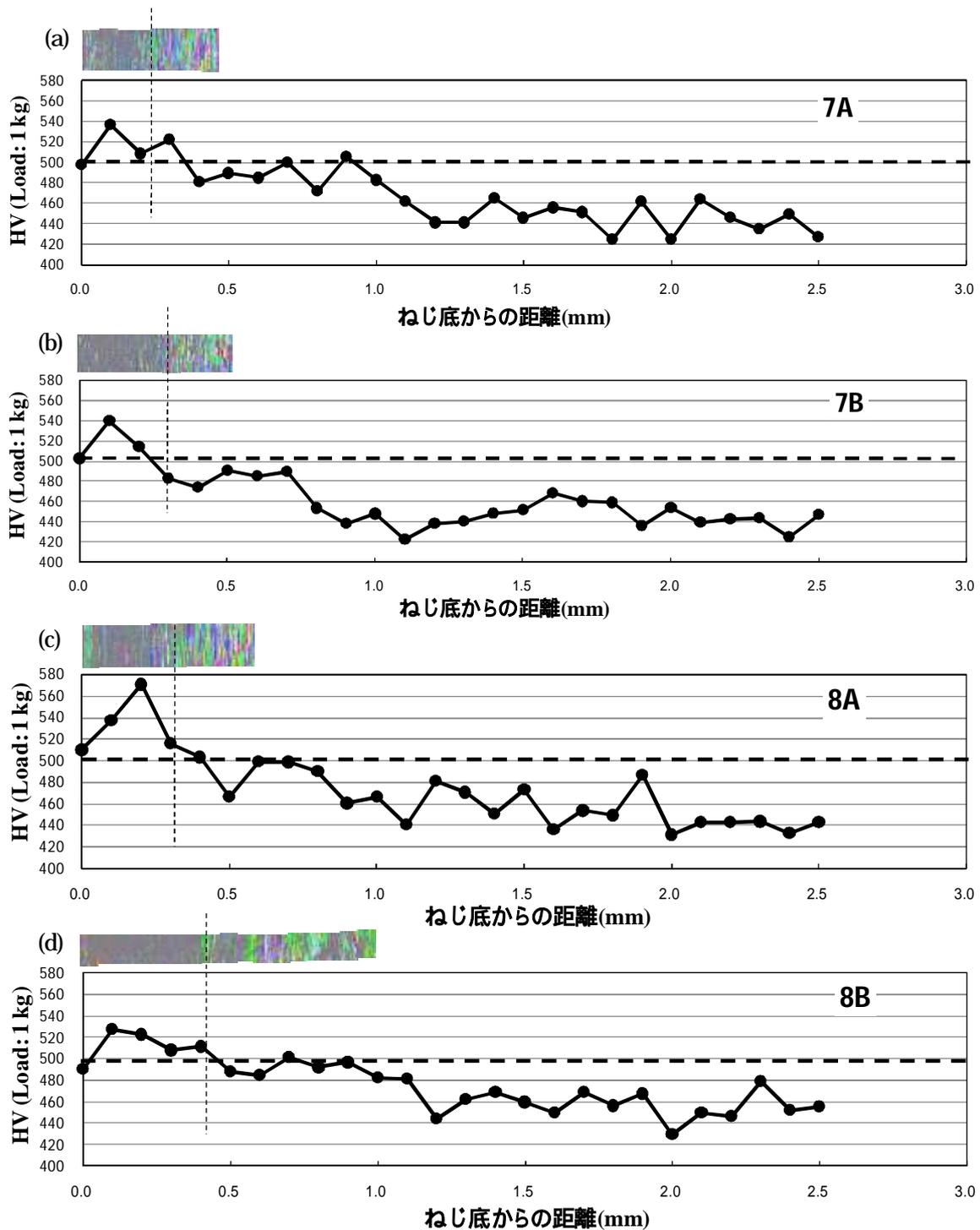


図 2-1-20 図 2-1-18 に示した試料 7A、7B、8A、8B についてのねじ底部の硬度分布
 (a) 7A 潤滑剤: SRH8 - 3、(b) 7B 潤滑剤: SRH - 3f、
 (c) 8A 潤滑剤: SRH80 - 3h、(d) 8B 潤滑剤: SRH154 - 2b

図 2 - 1 - 16 に示した JT - 1 の試料について、IPF マップの組写真を図 2 - 1 - 21 に示す。図中に白矢印で示した黒い部分は焦点外れの部分であり、歪の多い部分ではない。それを除けば概略、硬度分布と一致し、ねじの底部直下、および山部からやや内部に歪の大きい領域があり、側壁に歪の少ない領域がある。歪の多い領域が約 1700 MPa の強度まで加工により硬化しているとするのは硬度測定の結果を合わせた知見である。

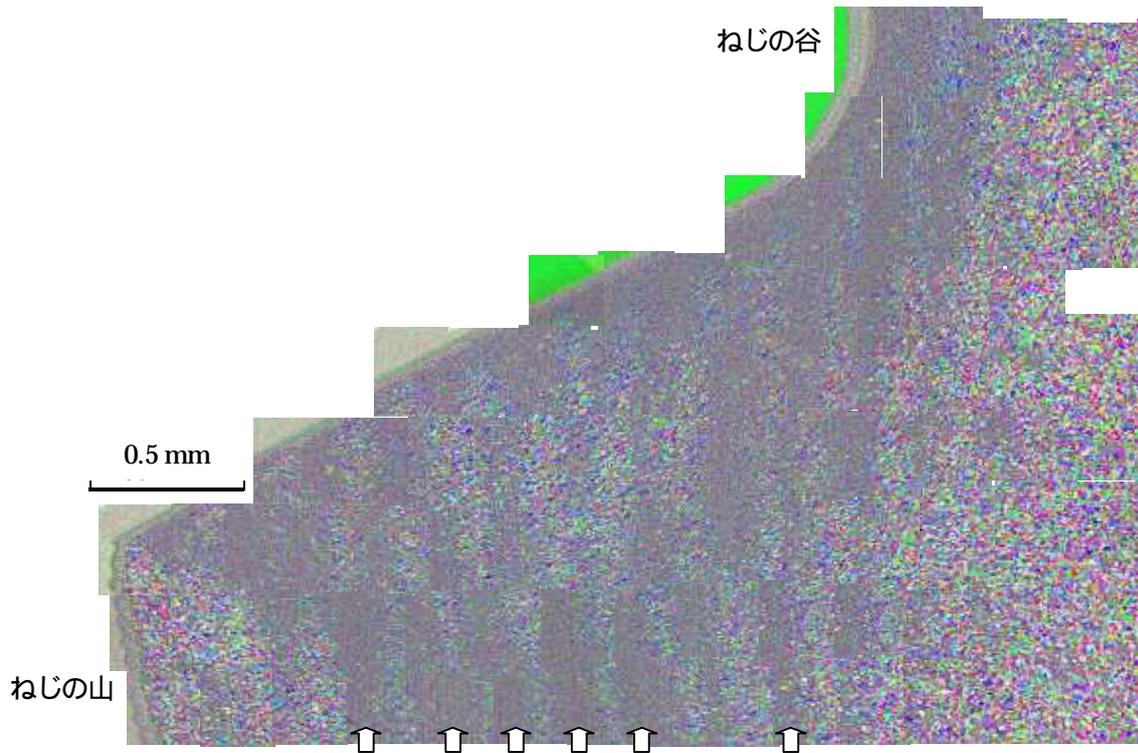


図2-1-21 JT-1のねじ部のIPFマップ

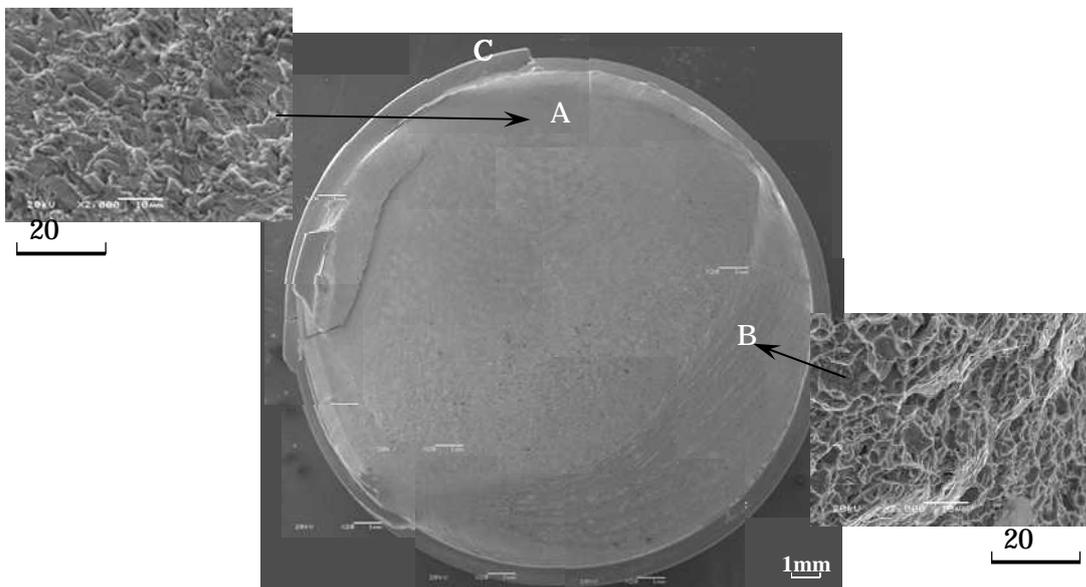


図2-1-22 10^6 回の繰り返し応力負荷で破断した試料の破面。

最終的にねじに問われる機械的特性は疲労強度である。本研究課題のねじは、太径であるため、SEMの試料室に入りきらず、疲労破壊の状況を観察することはできないので、同じインコネル718製の小径(20mm)のボルトについて疲労破面などの観察を行った。同サイズのボルトで、一方はダイスの送り速度を一定として製造したものであり、他方は送り速度を徐々に増加して製造したものである。前者については2本の試料について疲労試験を行った。そのうちの1本は 10^4 回で破断し、他方は 10^7 サイクルまで破断しなかった。送り速度を制御して作製した後者は 10^6 回で破断した。

図2-1-22に後者の破面を示す。図中Aで示す破面は高倍率象に示されるように疲労破面であり、Bの破面は延性破面である。延性破面は試料破断時に形成されたものである。疲労クラックの起点は試験中に磨滅しており介在物等の異物は探しえなかった。Cで示す部分はねじの山であり、クラックが底部近傍を貫

通して山部が剥離している。

Cで示した山側から見た状況を図2-1-23に示す。ねじの谷部の中心近傍を破線で示した。疲労クラックは谷の最凹部ではなく、側壁部に近い位置で発生している。

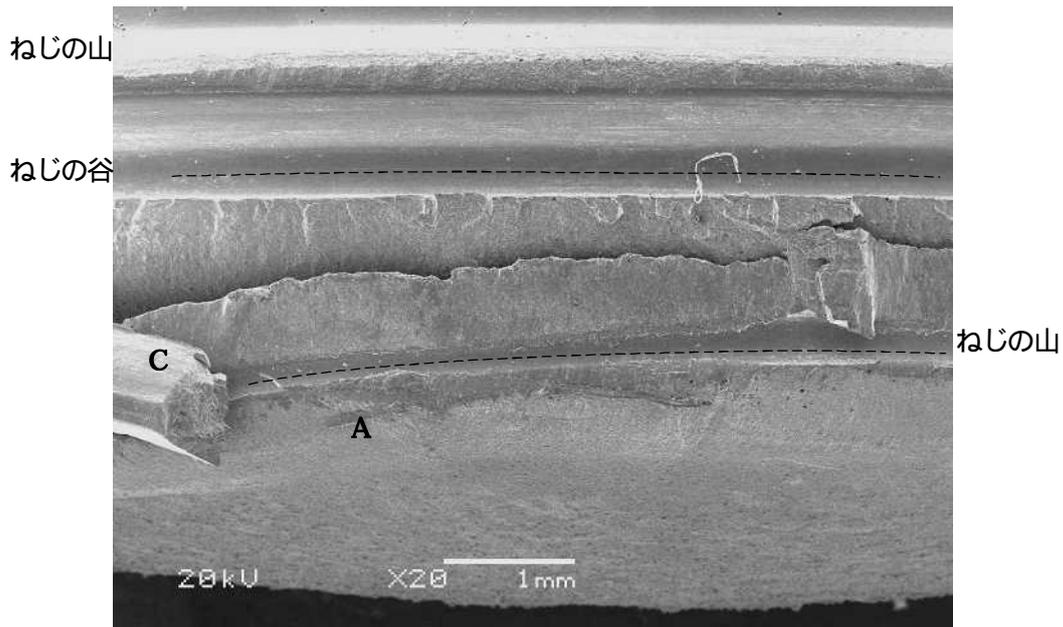


図2-1-23 図2-1-22に示したボルト破断部とねじの谷と山

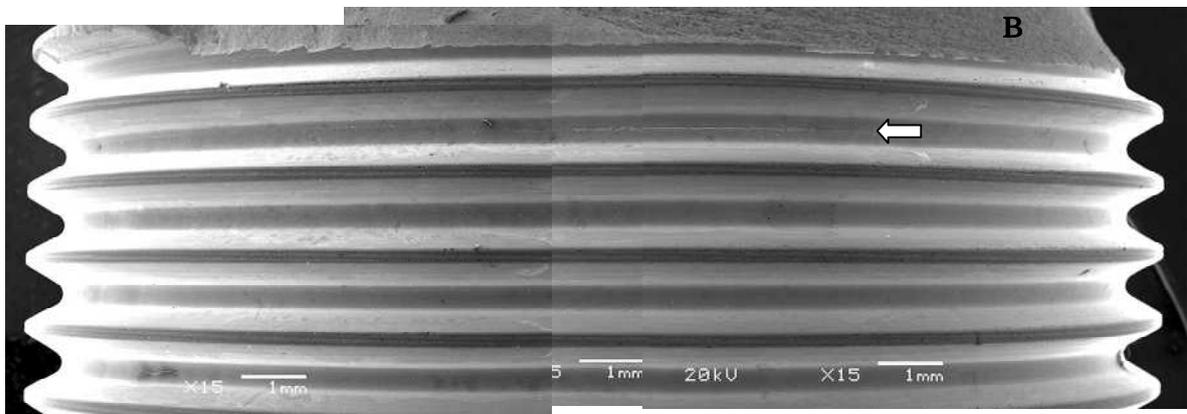


図2-1-24 図2-1-23に示した部分の裏側。白矢印はクラック

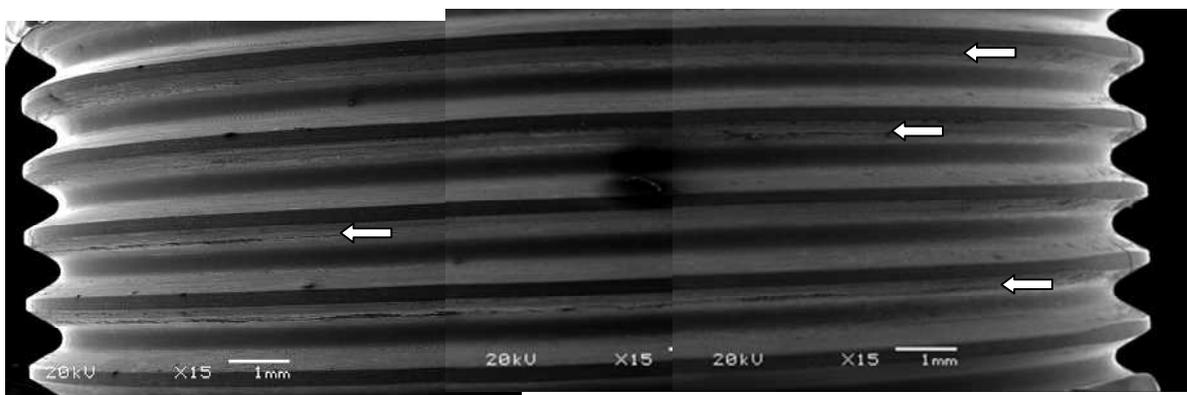


図2-1-25 10⁷回で破断しなかったボルト

図2-1-24に図2-1-22の延性破面側からみた状況を示す。図中白矢印で示す部分にクラックが観察される。谷の最凹部で発生している。このボルトは前述のようにダイス送り速度を制御して製造したものであり、図2-1-19(b)あるいは潤滑剤の種類に依存して図2-1-20のような硬度分布になっ

ていると推測される。ボルトの径が異なることなど、他の条件が同じではないので即断はできないが、谷底近辺の硬度分布が疲労強度に影響を及ぼしていると考えられる。

送り速度一定としたボルトのうち、 10^7 回の繰り返し負荷で破断しなかったボルトの観察結果を図2-1-25に示す。白矢印でクラックを示す。いずれも谷の最凹部から側壁側にずれた位置で発生している。図2-1-17(a)および図2-1-19(a)に示したように、送り速度一定の場合には谷底から深い位置まで硬度が高い。

図2-1-26に図2-1-16の測定結果から推測される硬度分布と、疲労試験の応力分布を推察した模式図を示す。ねじの側壁部に硬度が低い領域があること、および疲労試験の応力が谷底近傍で極大値となることに大きな間違いはないと思われる。図2-1-27(a),(b)に谷底の硬度が十分に高いねじ、および硬度が不十分な場合について、疲労試験時の応力分布と硬度分布の模式図をそれぞれ示す。

谷底近傍の硬度が十分に高い場合には、(a)に示したように応力のピーク値は硬度、すなわち変形強度を下回るため、谷底でのクラック発生が抑制される。この場合には、図(a)中にAで示した位置で応力が硬度を上回り、疲労クラックが形成されるが、応力の絶対値はピーク値よりも低いため、高疲労強度となる。クラックの位置は谷底から離れて側壁部になる。図2-1-25の状況である。

一方、何らかの原因でねじの谷底の硬度が不十分な場合には、(b)に示すように疲労変形の応力が硬度を上回り、谷底の凹部の応力が最大の部分でクラックが発生する。応力が高いため低疲労強度となる。クラックの位置は最凹部から側壁であり、図2-1-24の状況である。

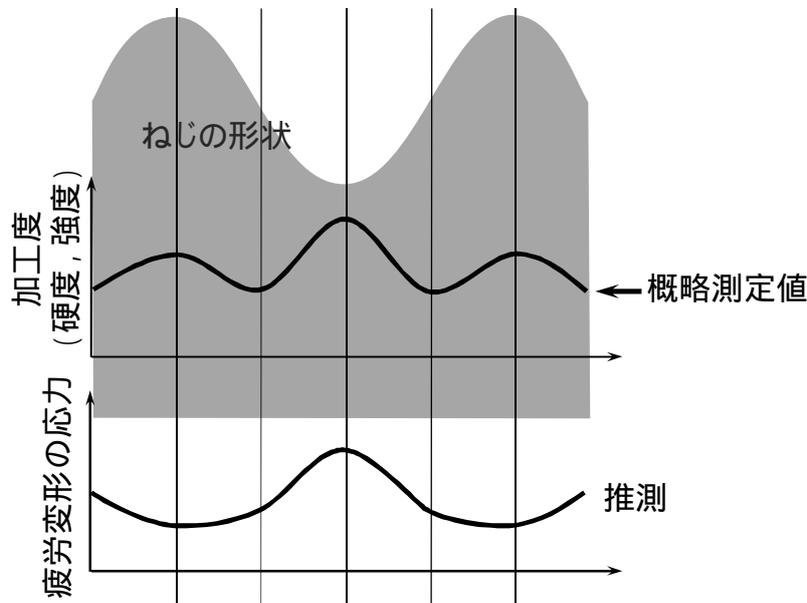


図 2-1-26 ねじの硬度分布と疲労試験の応力分布の模式図。

ダイスの送り速度一定で作製したボルトの疲労強度がばらつくことを既述した。速度一定としたが、あくまでも機械的な制御にすぎず2本のボルトの成形速度が異なっていたため加工硬化の状況が変化し、強度にばらつきが生じたと考えられる。これまでに示してきたことをまとめると、以下のようなになる。ねじ成形までの回転数、ダイスの送り速度、潤滑剤、いずれもねじの硬度分布に影響を及ぼす。これら3要素は本研究課題の骨子であり、これらを自在に制御できるようになった。ここではねじの成形性向上のために高精度制御を目指してきたが、今後は疲労強度を向上させるために、ここで実現できた制御機構を有効に生かしていくことができるのである。指標となるのは硬度分布であり、これをEBSD測定の結果得られる歪量の分布と対応させることによって適正な製造条件および高疲労強度を得ることが可能であることが明らかとなった。

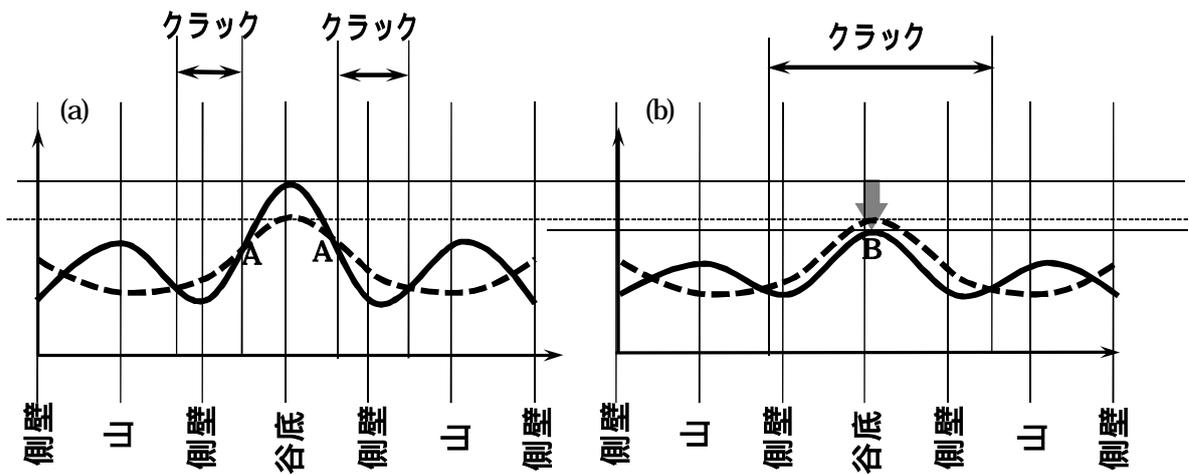


図 2-1-27 谷底の硬度が高い場合(a)、および低い場合(b)の
 硬度分布と疲労試験の応力分布の模式図。
 太い実線は硬度分布、太い破線は応力分布、細い破線は応力最大レベル、
 黒い大きな矢印は谷底部の硬度低下を示す。

2 - 2 転造過程のシミュレーションの高度化

1) 目的

本数値解析の目的は、ニッケル基耐熱超合金であるインコネル718を素材とする大型ねじの常温での転造加工プロセスを、有限要素法も用いてシミュレートすることにより、素材の変形状態、ねじ各部の応力やひずみの状態を明らかにするとともに、加工加重の推移を調査し、転造ダイスや転造盤への負荷を解明することである。工具の転造時位相ずれ、素材の駆動方式、工具回転数と送り速度、素材端面の面取角度等がねじの転造加工性におよぼす影響についても調べ、インコネル718大型転造ねじの加工実験に対する補完および最適化に寄与するものである。

2) 解析方法

2 - 1) 解析対象と解析コード

ねじ転造による塑性加工の工程を解析対象とするが、具体的内容や考慮すべきパラメータは以下の通りである。また、使用コードは予備検討の結果ABAQUS/Explicit（動的陽解弾塑性有限要素法）とsimufact.forming（静的陰解弾塑性有限要素法）の2種類とした。

- ねじ転造工程 : 二丸ダイスによる寄せ転造
製品ねじ形状 : 呼び径3.25インチ(82.55mm)、ピッチ3.175mmのUNJねじ
ワーク素材 : インコネル718時効処理材
- ・工具の転造時位相ずれ
 - ・素材の駆動方式
 - ・工具回転数と送り速度
 - ・素材端面の面取角度

2 - 2) ABAQUS/Explicit での解析モデルと条件

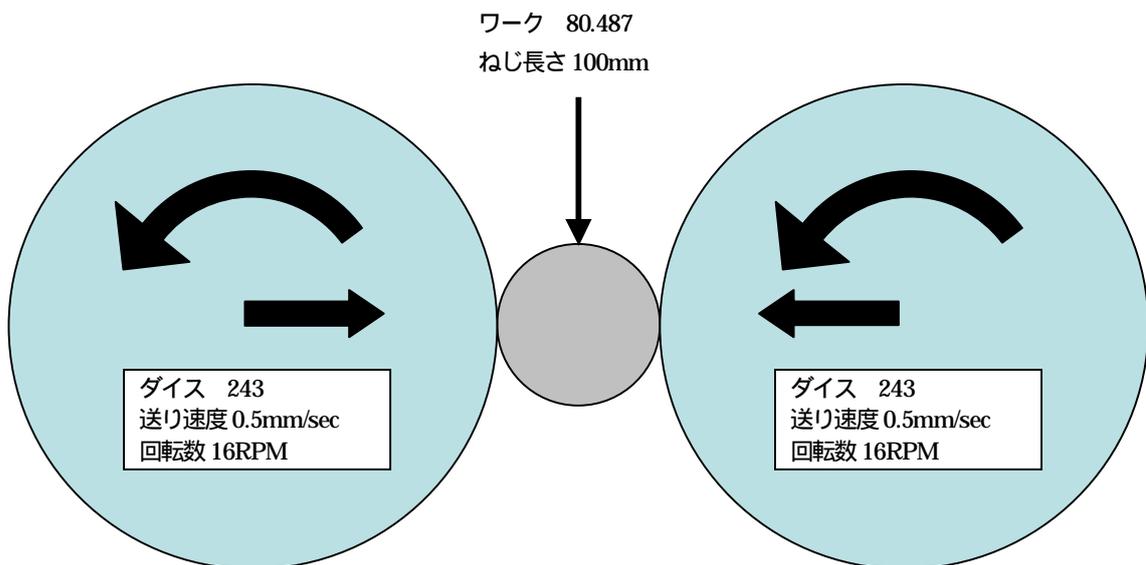


図2 - 2 - 1 解析対象となる2丸ダイスによるねじ転造概略図

図2 - 2 - 1に実際のねじ転造状態と本報で成形対象とした大型ねじの転造モデル概略図を示す。基本的な転造条件として、左右両ダイスの回転速度は16 rpm、送り速度は0.5 mm/secである。実機でのねじ転造では、同図の右側のダイスのみがワークの半径方向に押し込まれるが、解析では境界条件を簡略化するために左右両側のダイスが同期回転しながら同一速度で押し込まれることとした。ただしモデルの大きさは、計算時間を短縮するために軸方向に3ピッチ分とし、ねじのリード角は簡略化のため考慮しないこととした。また、過去の研究より加工速度を500倍することによる影響がほとんどないことが検証できたため、計算時間を短縮するため加工速度を500倍して解析した。加工速度を500ワークは外

径40.2435 mmの円柱状試料で、弾塑性体であり、8節点6面体アイソパラメトリック選択低減積分アワーグラスコントロール要素によりメッシュ分割した。総節点数は約28万7千個、総要素数は27万2千個である。図2-2-2を参照。

拘束条件として、ワーク上下面の全節点とダイスの回転中心（これはモデル内で参照節点でもある）の軸方向変位をゼロとした。変位条件として、ダイスの回転中心の軸周りと半径方向に所定の強制変位を与えた。接触条件はダイスとワークの間に定義し、接触界面における摩擦はクーロン摩擦を仮定した。一般に十分に潤滑油を供給されながら転造が行われる境界潤滑状態での摩擦係数は $\mu = 0.05 \sim 0.2$ 程度とされているので、過去の解析を考慮し0.1を仮定した。

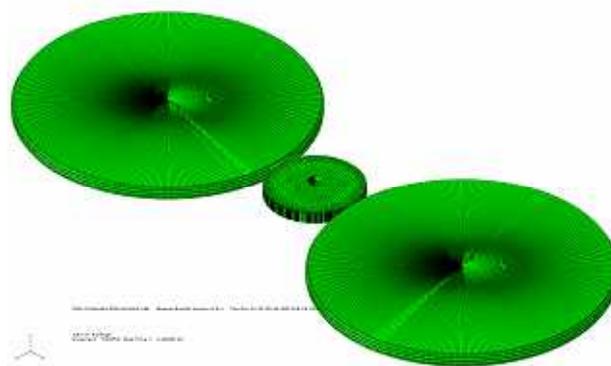


図2-2-2 ABAQUS/Explicitの有限要素モデル

ワーク材料はインコネル718の時効処理材である。解析に用いるための、インコネル718の引張試験より求めた実際の応力-塑性ひずみ関係を図2-2-3に示す。また、解析で用いたおもな材料定数を表2-2-1に示す。

表2-2-1 インコネル718時効処理材の材料定数

ヤング率 [GPa]	降伏応力 [MPa]	引張強度 [MPa]	ポアソン比	密度 [kg/mm ³]
200	1200	1653	0.3	8.220x10 ⁻⁶

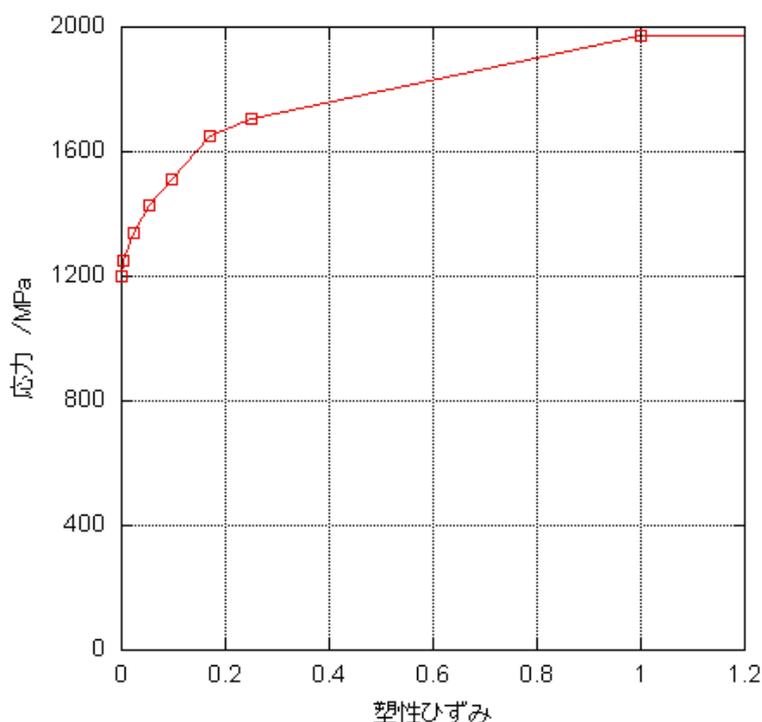


図2-2-3 インコネル718時効処理材の応力-塑性ひずみ曲線図

2-3) simufact.formingでの解析モデルと条件

ABAQUS/Explicitと同じく境界条件を簡略化するために左右両側のダイスが同期回転しながら同一速度で押し込まれることとした。またダイスとワークの形状もほぼ同じである。計算時間を短縮するために軸方向に4ピッチ分とし、ねじのリード角は簡略化のため考慮しないこととした。ワークは外径40.2435 mmの円柱状試料で、弾塑性体であり、6面体要素によりメッシュ分割した。図2-2-4を参照。

拘束条件として、ワークを抑えるピンとダイスの回転中心の軸方向変位をゼロとした。変位条件として、ダイスの回転中心の軸周りと半径方向に所定の強制変位を与えた。接触条件はダイスとワークの間に定義し、接触界面における摩擦はクーロン摩擦の0.2を仮定した。

ワーク材料はABAQUS/Explicit で用いたものと同じ、図2-2-3と表2-2-1に示した応力-塑性ひずみ関係と材料定数を解析で用いた。

実際の転造加工実験では転造盤の容量不足のため、送り量が大きくなるほどダイスの送り速度が減速していく。それを再現するため、ABAQUS/Explicit と simufact.forming のモデルにおけるダイスの送り速度に図2-2-5に示すような時間依存性を持たせた。

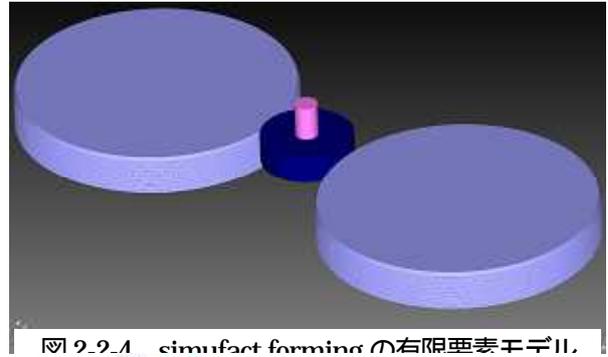


図2-2-4 simufact forming の右限要素モデル。

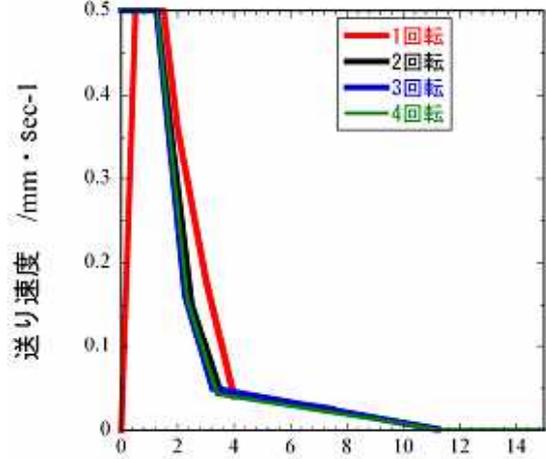


図2-2-5 ダイスの送り速度の時間推移

3) 結果と考察

3-1) ダイスの転造時位相ずれの影響

インコネル718は超難加工材であるため転造盤は100tを超える大型転造盤を使用するが、100tクラスのカNC大型転造盤がないため人の目によりダイスの位相を合わせている。そのため、どんなに正確に合わせたとしても約30μmのずれが生じ、また加工中ダイスに荷重がかかり約100μmのずれが生じることがあるので、図2-2-2に示した2つのダイスの向かい合うねじ山の重なる位置を軸方向に上下に30μm、100μmずらし、位相ずれを再現してひずみ量と転造加工性への及ぼす影響について調べた。ダイスの送り速度は図2-2-5の1回転を用いた。

図2-2-2に示した2つのダイスの向かい合うねじ山の重なる位置を軸方向に上下に30μm、100μmずらし、位相ずれを再現してひずみ量と転造加工性への及ぼす影響について調べた。ダイスの送り速度は図2-2-5の1回転を用いた。

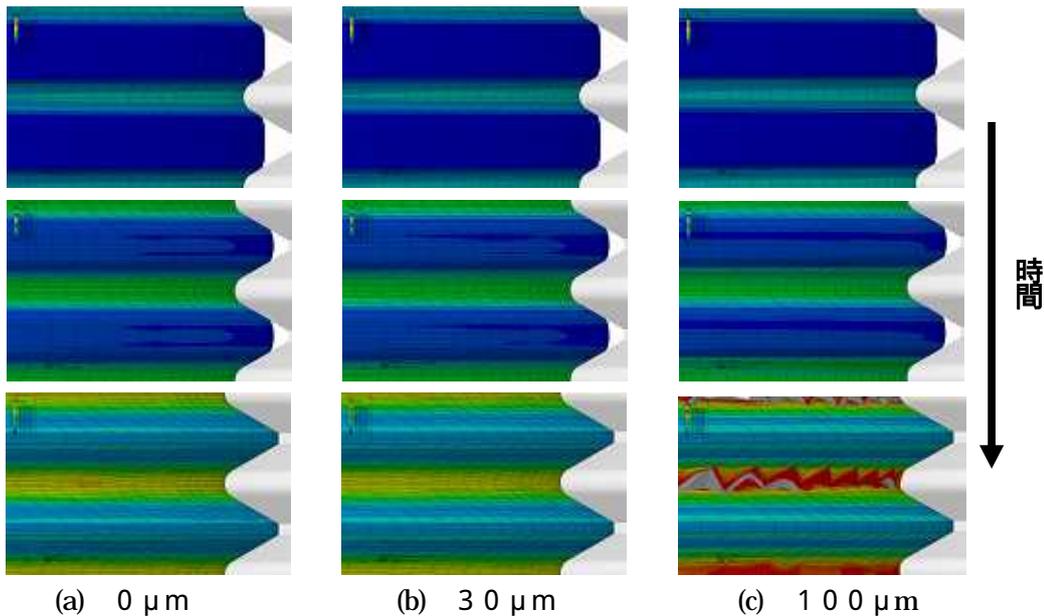


図2-2-6 位相ずれの比較(ねじ表面の相当塑性ひずみ)

図2-2-6は相当塑性ひずみのねじ表面分布を代表的成形段階でまとめて比較したものである。これらの図より、位相ずれが大きくなるほどねじ溝の相当塑性ひずみが大きくなっていることがわかる。これは、図2-2-7に示すように一方のダイスのねじ頂部によって転造されたワークのねじ溝が、半回転して接触するダイスのねじ頂部とずれていることで、成形されていたねじ溝が最初に転造されたねじ溝を基

点にそのずれた分だけ押し広げられ、新しくねじ溝を転造されるのでその位置で変形量が極めて大きくなるから位相ずれが大きくなるほどひずみ量が大きくなるためである。

図2 - 2 - 8は転造時ダイスにかかるトルクの推移を送り量により示したものである。位相ずれが大きくなるほど新しくねじ溝を転造する量が大きくなるため、一回当たりの加工量が大きくなるためトルクが大きくなることわかる。

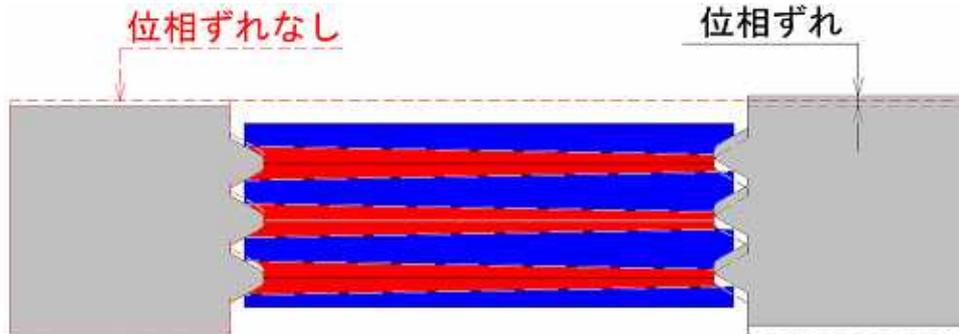


図2-2-7 位相ずれによるねじ谷の転造状態

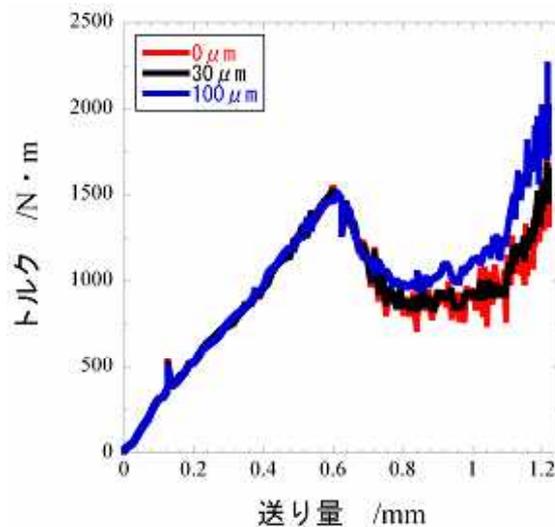


図2 - 2 - 8 トルクの比較

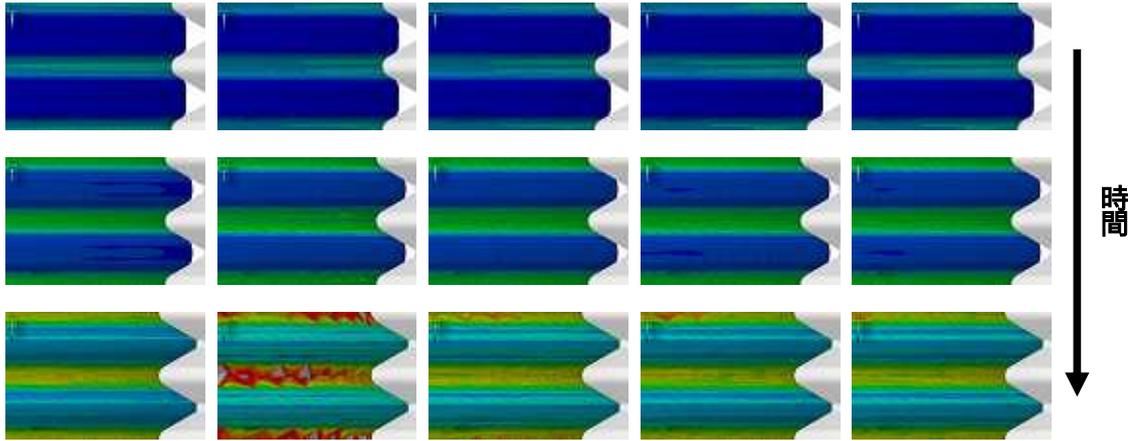
3 - 2) ワークの駆動方式の影響

現状ではセンター支持され自由駆動の状態にあるワークを、ウォームやボールねじなどのようにワークを強制駆動させた場合についてシミュレートし、ワークの駆動方式がねじ溝の相当塑性ひずみ量や加工荷重におよぼす影響を調べた。本解析では駆動方式の異なる5種類のモデルを用意し、各モデルにつき比較した。モデル1はワークを自由駆動させた場合である。モデル2、3、4は各々ワークの回転速度を転造加工により随時成形されるねじの谷部、有効径部、および頂部でダイスの回転速度と一致するようにした場合である。またモデル5は途中まで頂部一致で、その後自由駆動するようにした場合である。ダイスの送り速度は図2 - 2 - 5の1回転を用いた。

図2 - 2 - 9はねじ表面での相当塑性ひずみ分布を、代表的成形段階において比較したものである。モデル1と比べモデル2は谷部でメッシュが壊れるほど大きな変形をおこしているが、モデル3、モデル4、およびモデル5ではモデル1と比べて、大きな差異が見られない。

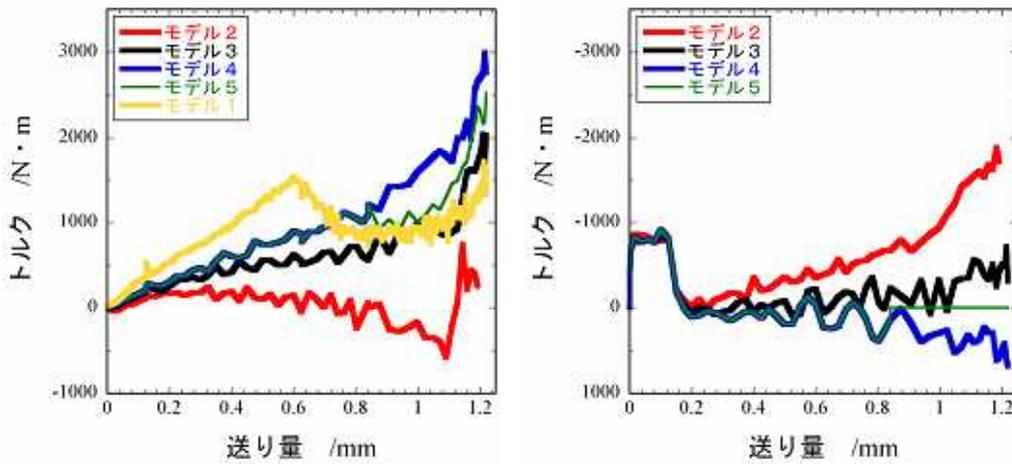
図2 - 2 - 10は転造時ダイスとワークにかかるトルクの推移を送り量により示したものである。モデル2では、自由駆動に比べダイス側のトルクが小さくなり、ワーク側のトルクが大きくなる。モデル3では、ダイス側のトルクはモデル1のトルクと近い値になり、ワーク側のトルクがゼロに近い値になる。モデル4では、ダイス側のトルクがモデル1と比べ大きくなり、ワーク側のトルクはマイナスの値をとる。モデル5では途中までモデル4と同じだが、自由駆動にした後はモデル1や3とよく一致する結果になる。これらのことから、トータルエネルギー的にはモデル3がもっとも望ましいと思われ、また加工当初にお

けるダイスとワークの滑りがないので、自由駆動よりスムーズに加工できると見受けられる。



(a) モデル1 自由駆動 (b) モデル2 谷部一致 (c) モデル3 有効径部一致 (d) モデル4 頂部一致 (e) モデル5 頂部一致後自由駆動

図 2-2-9 駆動方式の比較(ねじ表面の相当塑性ひずみ)



(a) ダイス側トルク

(b) ワーク側トルク

図 2-2-10 トルクの比較

3 - 3) ダイス回転数と送り速度の影響

ダイスの回転数と送り速度が成形されるねじ溝表面層の相当塑性ひずみ量や加工荷重に与える影響について調べた。ここでは、ダイスが2回転後(ワーク約6回転後)、3回転後(9回転後)および4回転後(12回転後)各々加工が終了する3種類のモデルを作成した。その時のダイスの回転数と送り速度の関係を図2-2-5に示す。

図2-2-11はワークに5つ成形されるねじ溝のうち、ワーク端部から3つ目のねじ溝を拡大し、その位置におけるねじ表面での相当塑性ひずみ分布を代表的成形段階において比較したものである。加工終了までのダイスの回転数が増加するにつれ、成形されるねじ溝表面層の谷部、斜部、および頂部全ての位置での相当塑性ひずみ量が大きくなっている。これは加工回数が増えるほどダイスとの接触回数が増し、表面層の材料だけが繰り返しせん断変形を受けるためである。図2-2-12は転造時ダイスにかかるトルクの推移を送り量により示したものである。加工終了までのダイスの回転数が多いモデルほど、図2-2-5に示したように送り速度が減速するので、ダイスの一回当たりの加工量が小さくなり、そのためトルクが小さくなる傾向にあるが現実の加工上問題となるような大きな差はない。



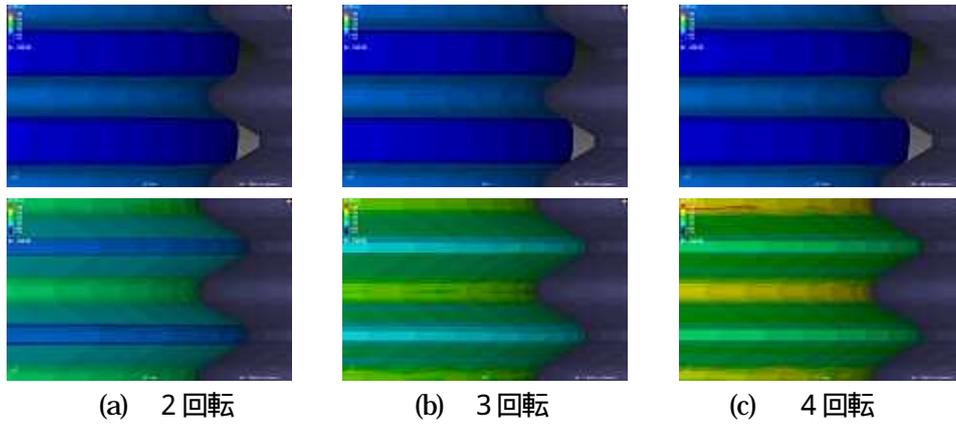


図 2-2-11 回転数の比較(ねじ表面の相当塑性ひずみ)

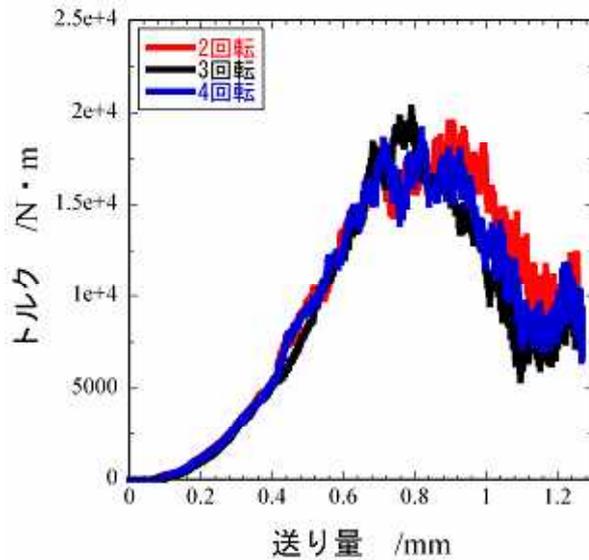


図 2-2-12 トルクの比較

3 - 4) ワーク端面の面取角度の影響

ワーク端面より 1.5875 mm (製品ねじ半ピッチ分) 離れた位置からの面取角度を 5°、10°、および 15° とした 3 種類のワークについて転造シミュレーションを行い、ワーク端部の形状がねじ溝の成形状態や加工荷重におよぼす影響について調べた。ダイスの送り速度は図 2 - 2 - 5 の 4 回転を用いた。

図 2 - 2 - 13 はワークに 5 つ成形されるねじ溝のうち、ワーク端部から 3 つ目のねじ溝を拡大し、その位置におけるねじ表面での相当塑性ひずみ分布を代表的成形段階において比較したものである。ワーク端面の面取角度が 15°、10°、5° と小さくなるほどねじ溝の相当塑性ひずみが小さくなっている。

図 2 - 2 - 14 はダイスを最終加圧位置まで押し込んだときのワーク端部の伸びを比較したものである。面取角度が 15°、10°、5° と小さくなるほどワーク端部の伸長が大きいことがわかる。

ワーク端面の面取角度が小さいほどワーク端部が早い成形段階でダイスのねじ山に接触してしまい軸方向への伸びを妨げ、材料が赤矢印方向に押されて緑矢印方向のダイスねじ溝に流れにくくなり、ダイスのねじ溝への材料の充填率が悪くなる。これが隣り合うダイスのねじ溝への材料の流れにも影響するため黄矢印方向に流れにくくなり、全体の充填率が悪くなる要因となる。そのため図 2 - 2 - 13 でワーク先端の面取角度が小さくなるほどねじ溝の相当塑性ひずみが小さくなった。



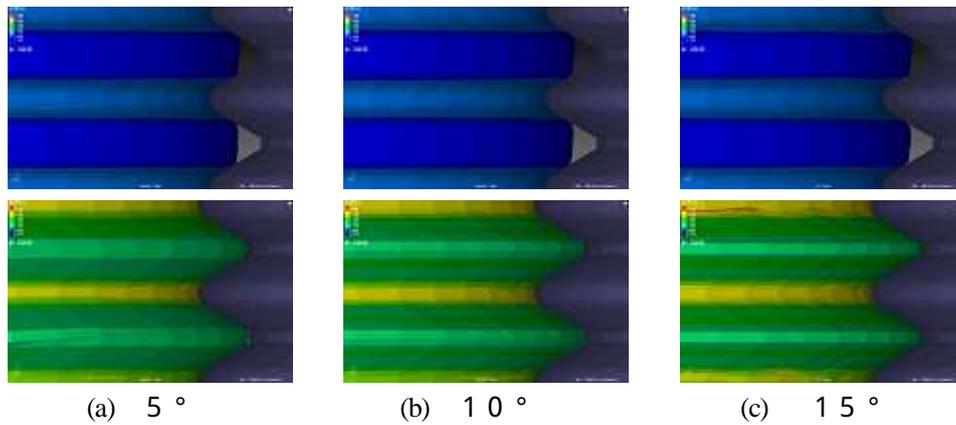


図 2-2-13 面取角度の比較(ねじ表面の相当塑性ひずみ)

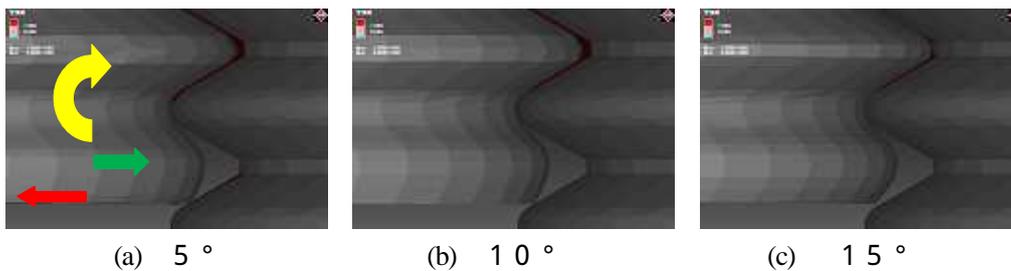


図 2-2-14 ワーク端部の伸びの比較

4) 結言

4 - 1) ダイスの転造時位相ずれの影響

ダイスの位相ずれを $0\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ として解析を行い、それが転造加工性におよぼす影響を調べた。結果を総合的に判断すると、位相ずれが大きくなるほどねじ溝でのひずみ量が大きくなり、ダイスに働くトルクも大きくなるという現象が確認できた。

4 - 2) ワークの駆動方式の影響

ワークを強制駆動させると、ワークとダイスの回転速度の関係によって、ダイスに働くトルクが大きく異なることがわかり、トータルエネルギー的にはダイスの回転速度と有効径部でワークの回転速度を合わせたモデルがもっとも望ましいと思われる。また加工当初におけるダイスとワークの滑りがないので、自由駆動よりスムーズに加工できると見受けられる。

4 - 3) ダイス回転数と送り速度の影響

加工終了までのダイスの回転数が増加するに従い、ねじの転造加工中ダイスに働くトルクが小さくなることを確認できた。しかし加工回数が増えるほどダイスとの接触回数が増し、表面層の材料だけが繰り返し厳しいせん断変形を受けるため成形されるねじの谷部、斜部、および頂部全ての位置での相当塑性ひずみが大きくなる。

4 - 4) ワーク先端の面取角度の影響

面取角度が小さいほどワーク先端の伸長が大きくなることを確認できた。また伸びた先端がダイスのねじ山に接触し半径方向に押し込まれることにより、ダイスのねじ溝に材料が流れにくくなるため、完全に充填しにくくなるという現象も確認できた。

2 - 3 潤滑油の最適化検索

1) 目的と概要

本研究は、現状転造加工用潤滑油といったカテゴリーは無く引抜き加工油、プレス加工油などで代用され転造加工が行われてきたが、ニッケル基耐熱超合金などの難加工材の転造加工を行う上では、延性の限界を超えてメタルフロー組織に断層を生じたり、ねじ底の表面層が剥離するなどの原因で疲労強度が低下し折損に繋がる危険性があると考えられる。

これらの危険性を回避する為に、平成 19 年度の研究では今まで使用していた潤滑油に新たに 9 種の油剤を加えた 10 種でラボ評価実験を行った結果、4 種に絞込み転造盤にて実機評価を行った。その上でさらに

2種の油剤へと絞り込んだ。

次いで平成20年度では前年の研究で絞り込んだ2種の油剤の極圧添加剤含有量を調整した改良油剤3種にてラボ評価実験・実機評価を行い更なる油剤の絞り込みを行った。

今年度は油剤の動粘度を変更しラボ評価実験・実機評価を基にニッケル基耐熱超合金の転造加工における最適潤滑油の検索を行った。

2) ラボ評価実験

ラボ評価実験では、昨年度評価したSRH80-3fの低粘度2種とSRH154-2bの低粘度1種に、新たに硫黄系極圧添加剤を含むAH-80-3と塩素系極圧添加剤を含むSDHT4060を加えた5種の油剤を用い、図2-3-1に示すパウデンレーベン型試験機にて往復動摩擦試験を行った。潤滑油剤は表2-3-1に、試験条件は表2-3-2に示す。

表2-3-1 潤滑油剤一覧

項目	単位	AH-80-3	SDHT4060	SRH80-3 f (低粘度 01)	SRH80-3 f (低粘度 02)	SRH154-2 b (低粘度)
40 動粘度	mm ² /s	72.68	80.66	44.92	42.56	46.54
100 動粘度	mm ² /s	12.34	10.43	7.592	7.373	8.127
酸価	mgKOH/g	0.27	0.71	0.37	2.46	2.19
密度	g/cm ³	0.9469	0.9359	0.9491	0.9514	0.9504
引火点		162	218	164	164	166

表2-3-2 往復動摩擦試験条件

試験機	パウデンレーベン型
材料	Inconel 600
ボール	SUJ-2 (3/16inch)
荷重	5 kgf (Pmax = 2787MPa)
摺動速度	20 mm/s
摺動距離	50 mm
温度	22
油剤塗布方法	刷毛塗り

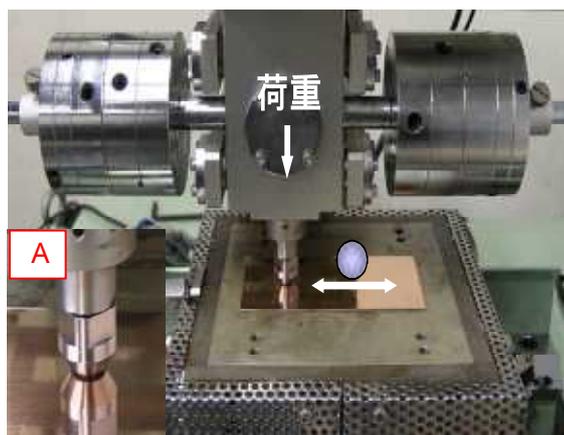


図2-3-1 パウデンレーベン型試験機
(Aは試験片近傍拡大図)

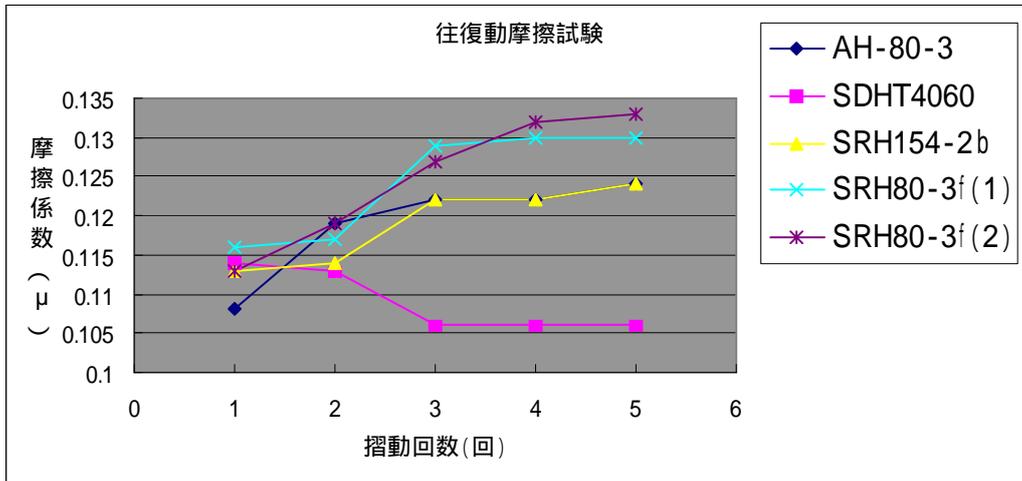


図 2-3-2 往復動摩擦試験結果

図 2 - 3 - 2 に往復動摩擦試験の結果を示す。昨年度のシミュレーションの結果において摩擦係数が 0.15 付近に表面剥離を抑制できる最適値が存在すると考えられ、その数値に近い SRH80-3f が有効ではないかと考えられる。

この結果を得て 100tf 転造盤を使用し、ねじ転造加工にて実機評価を行うこととした。

3) 実機評価

ラボ評価を行った 5 種の油剤のうち SRH80-3f (低粘度 0.1) を除く 4 種の油剤を使用し、100tf 転造盤にて実機評価を行い、加工後のねじ谷底の表面観察と加工データを基に最適油剤を見出す事とした。図 2 - 3 - 3 に各油剤で転造加工したインコネル 718 のねじ谷底表面写真を示す。図 2 - 3 - 4 にトルクアーム係数 - 変位線図を示す。

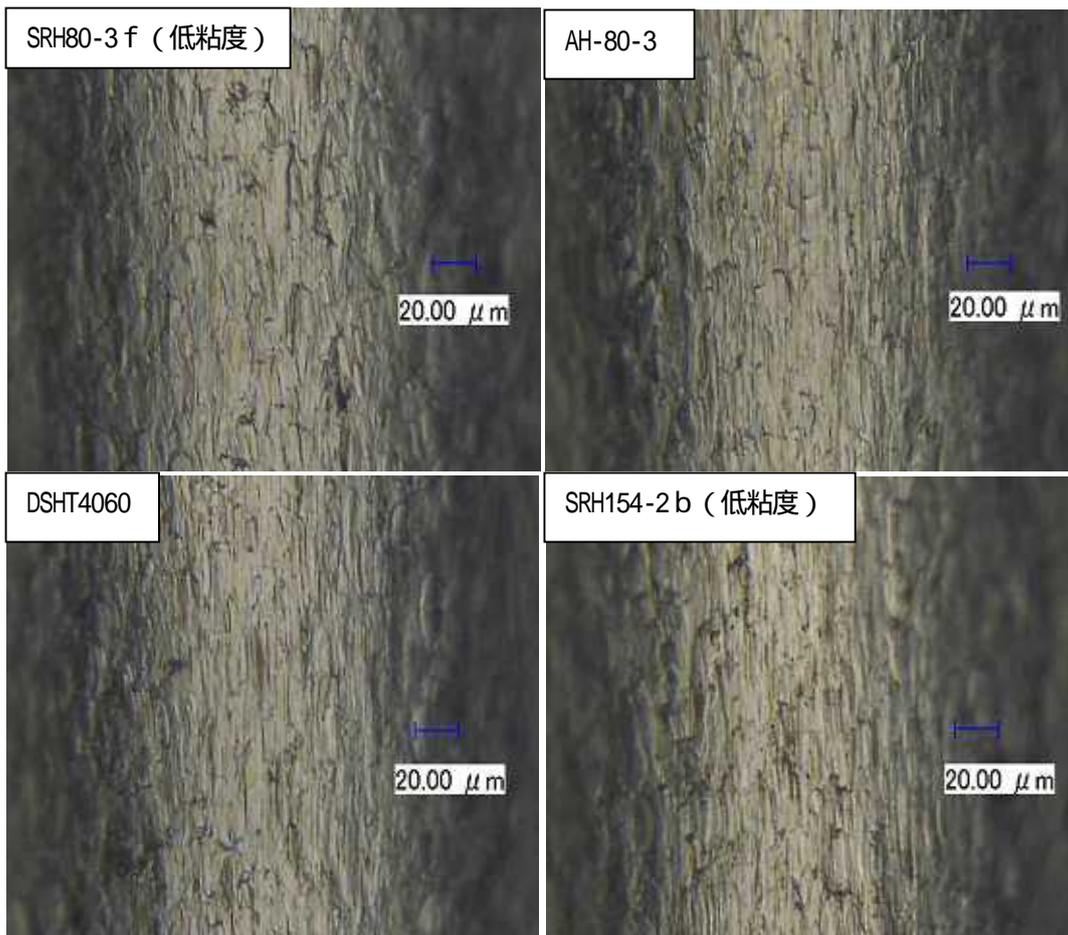


図2 - 3 - 3 ねじ谷底表面観察写真
(材質：インコネル718、ねじサイズ：2.625 - 12UNJ)

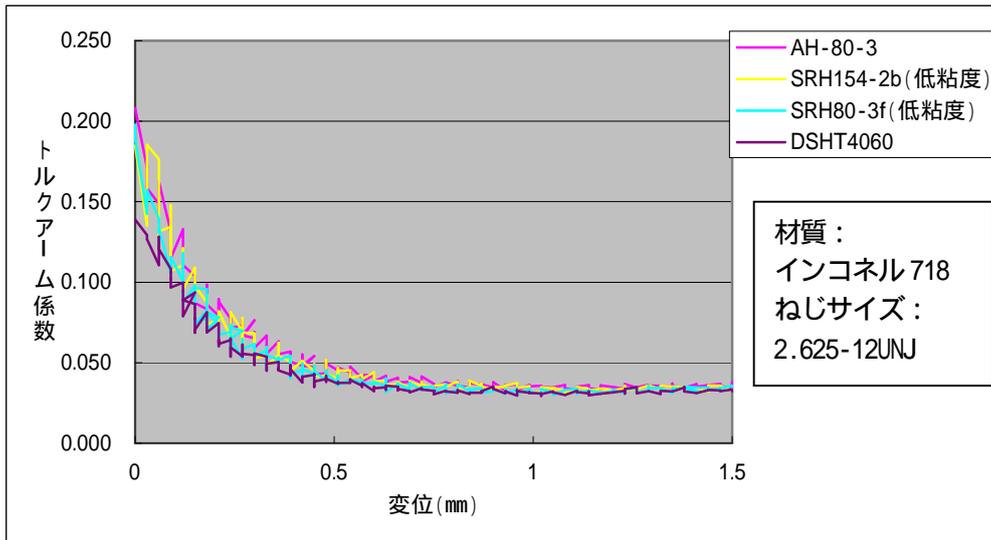


図2-3-4 トルクアーム係数 - 変位線図

ねじ谷底の表面観察では、表面が荒れたように見られるがこれはWPC処理を施したダイスで転造加工を行ったため、ダイス表面のマイクロディンプルが転写されたものである。転写されたマイクロディンプルのサイズは油剤によって差異は無く、表面が剥離した様子も見受けられなかった。

また、トルクアーム係数においても特出した差異は認められず加工誤差範囲内の違いかと思われる。

しかし、県立大学においてSEM-EBSP測定、マイクロピッカー測定を行った結果ではSRH80-3f(試料7B)が、ねじ谷底の歪が少なく加工硬化の影響が低いことが判った。

ラボ評価、実機評価、ミクロ観察、シミュレーションの結果よりSRH80-3fがインコネル718の太型ねじ転造加工用潤滑油として非常に有効であることが判ったが、出来る限りの改良を加え更なる最適化を目指し今後も評価実験を続けていくことが必要かと思われる。

2 - 4 転造用ダイスの耐久性の評価

1) 目的

大型転造ねじ、特にニッケル基合金のような高強度材を加工する際には、ダイスの破損や亀裂が発生するほどの負荷がかかる。ダイスの高寿命化は、製品の安定成型とランニングコストに大きく関与する為に研究の必要がある。

平成19年度の研究において、粉末ハイス鋼と溶製合金工具鋼の2種の鋼種を用いて耐久性の高度化を図り、粉末ハイス鋼を用いた転造用ダイスの優位性を見出した。続く、平成20年度の研究では、SPM23・SPM30・SPMR8の3種の粉末ハイス鋼を用いて転造用ダイスの耐久性の評価を行いSPMR8に絞り込んだ。

今年度は、絞り込んだSPMR8で製作した転造用ダイスを評価実験に用いて、破損したダイスについては調査を行った。また、SPMR8と同等鋼種のHAP10を用いた転造用ダイスでの比較実験と、SPMR8の耐久性向上の為WPC処理を施したダイスで評価実験を行った。

2) SPMR8ダイスの破損調査

昨年度の研究では、SPM23・SPM30の2種の粉末ハイス鋼を用いた転造用ダイスは、亀裂が発生し原因の推察と亀裂形態の分類を行った。SPMR8においては昨年度の実験では破損しなかったことから今年度も引き続き評価実験を行った結果、破損したダイスについて破損形状・内部組織観察等の調査を行い破損原因の考察を行った。

図2-4-1に破損ダイスの全景を、図2-4-2に破損部の拡大を示す。図2-4-3の亀裂形態は、平成20年度成果報告書36ページの「図2-4-2 発生したクラックの形態」より、負荷時に被加工材の端部に相当しダイスとの接触が均等でない為に起こりやすいTypeCに相当すると思われる。

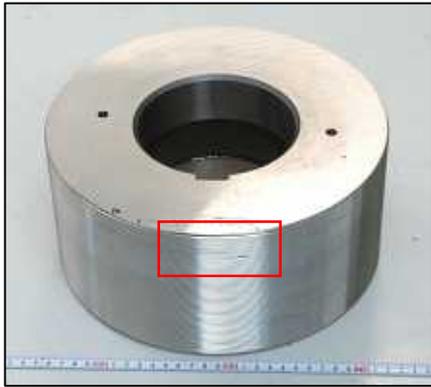


図 2-4-1 破損ダイス全景

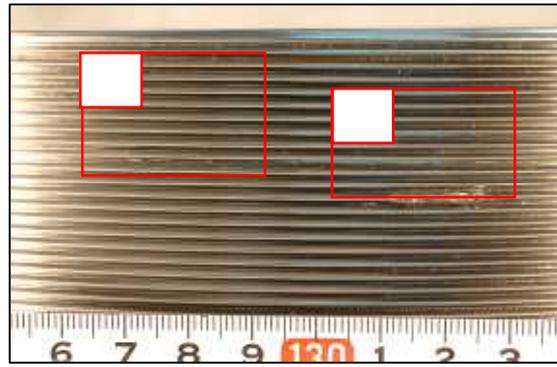


図 2-4-2 図 2-4-1 の赤枠部拡大

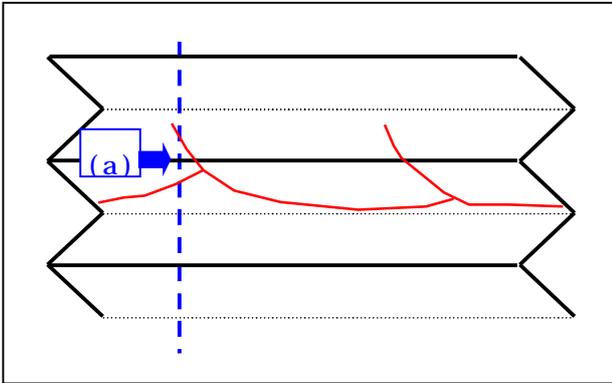


図 2-4-3 図 2-4-2 の 枠部図解

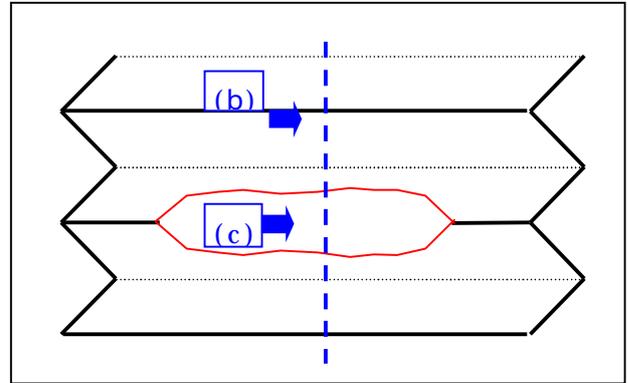


図 2-4-4 図 2-4-2 の 枠部図解

表 2-4-1 破損部(a)・(c)、健全部(b)断面ミクロ観察結果

(a)	(b)	(c)

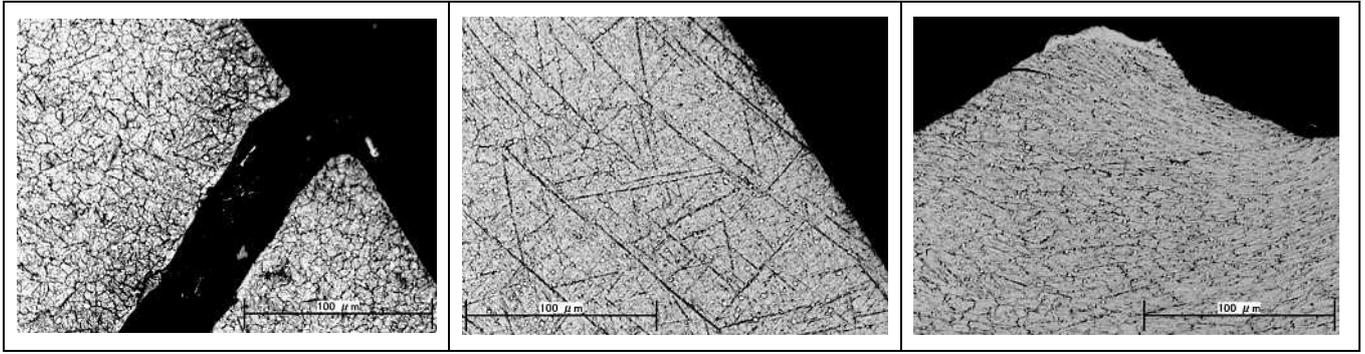


図2-4-2 杵部の割れは表面観察結果によると、ダイスねじ底を通り1.2～1.3mmのピッチで、ダイス山頂部を超えて後面側に達していた。

断面ミクロ組織観察によると、割れはダイスねじ底近傍から直線的に内部へ進展しており、割れ伝播部は塑性変形をほとんど伴っていなかった。ダイス側面部に負荷された過大な荷重が起因となって静的に割れたものと推測される。(ただし、割れ位置がワーク端部相当位置であり非正常状態であること、及び割れピッチに周期性がみられたことから、加工中の荷重の急な変化による衝撃的な割れの可能性もある)

マイクロピッカーによる硬度測定結果は、ダイス山頂部の硬さは約800HV(797～808HV)であり母材硬度とほぼ変化はなかった。

杵部の割れはワーク端部より3山程度手前の位置で発生した欠けであり、ダイス山頂部が欠け落ち失われていた。欠け落ちた頂部は組織観察写真より塑性変形している事が判った。硬度測定結果は、塑性変形に伴い頂部先端の硬さは約850HVに高くなっていたが、その内部側では800HV程度だった。

欠けの原因は、ダイスねじ山両側面から発生した割れが繋がって欠けに至ったものと推定。(歯底側に割れている箇所あり)

3) HAP10での転造実験

SPMR8との耐久性比較として手持ちの粉末ハイス鋼ダイスであるHAP10を使用し転造実験を行った結果、SPMR8は両端ねじのテストピースを4本加工し8箇所目で割れが発生したのに対し、HAP10は同形状のテストピースで7箇所目まで加工したが目視では割れ・欠け等は観察されなかった。しかし、加工したテストピースを見ると一部ねじ山に変化が見られ、ダイスの形状を調べてみるとねじ山が変形していることが判った。テストピースより変形は1箇所目加工終了時には発生していたと思われる。



図2-4-5 実験後のHAP10外観

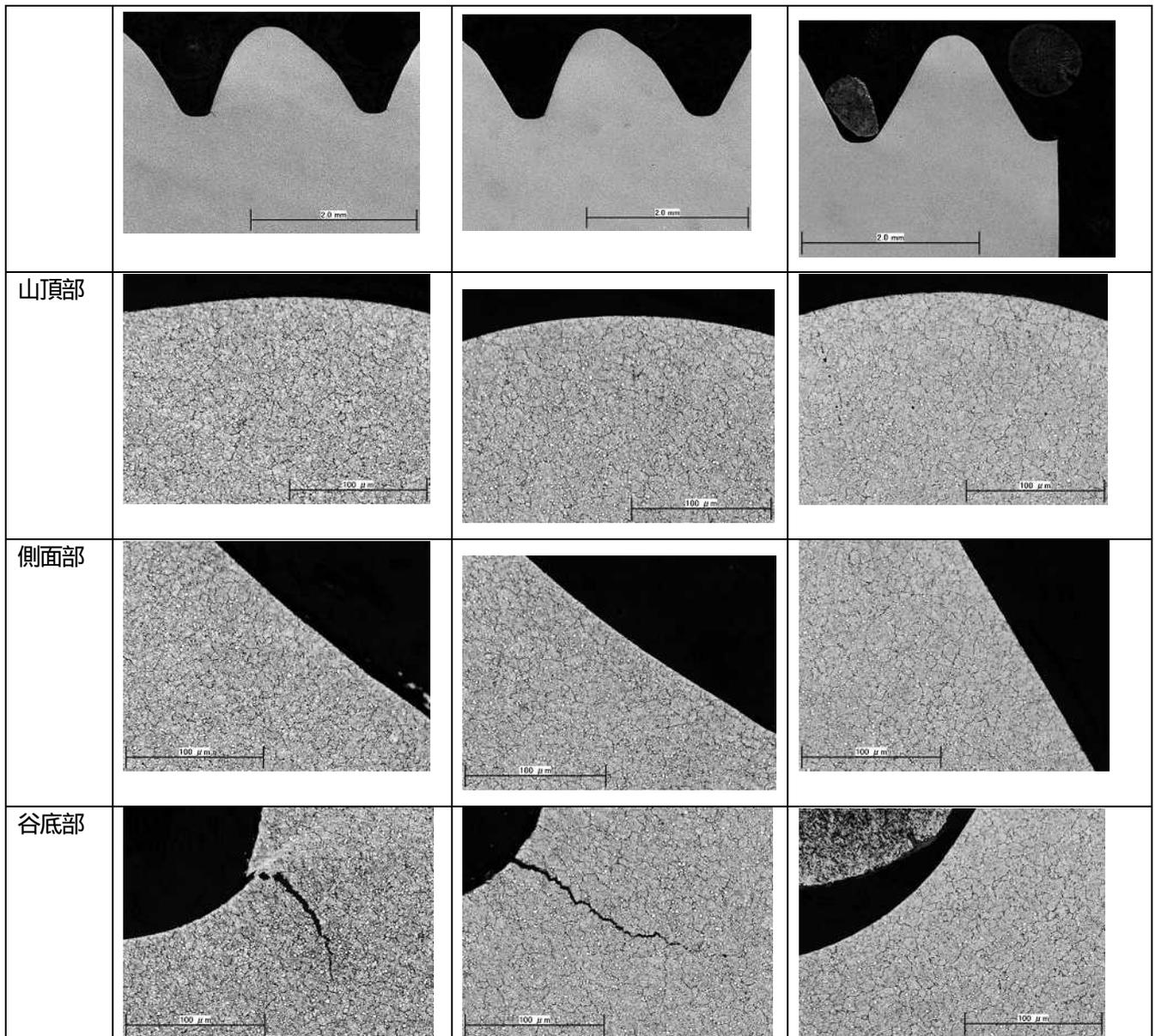
断面観察の結果、山部が一方方向に倒れているような変形であり、目視では発見出来なかったが谷部にはクラックが見られた。

硬度測定では変形が見られない正常部で780HV前後であり、変形した部位では深さ1mmの箇所でも733HVと硬さが低くSPMR8製ダイスでは820HV前後の硬さがあつたのに対し、HAP10の方が約90HV低かった。

ミクロ組織は、炭化物が分散したマルテンサイト組織であり、特に異常は認められなかった事からHAP10製転造ダイスの変形原因は、IN718転造中に硬さ不足により塑性変形したためであると考えられる。

表2-4-2 HAP10断面ミクロ観察結果

			正常部
--	--	--	-----



4) WPC 処理を施した SPMR 8 の評価実験

SPMR 8 の耐久性をさらに向上させる為に自動車部品や歯車等で実績のある WPC 処理をダイスに施し転造実験を行った。

WPC 処理を施すことにより、ねじ研削時に発生したダイス表面の引張応力を圧縮応力（表 2 - 4 - 3 に測定値を示す）に変えると共に、残留オーステナイト組織をマルテンサイト組織化（図 2 - 4 - 8 の表層が白く変化している）し高硬度で靱性のある組織が得られた。



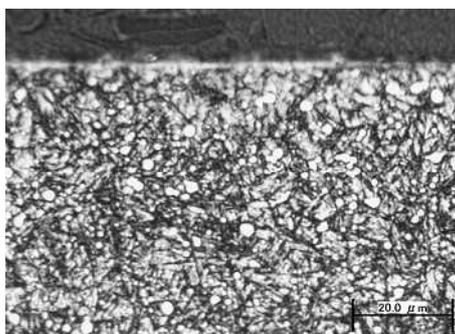


図 2-4-7 WPC 未処理マイクロ組織

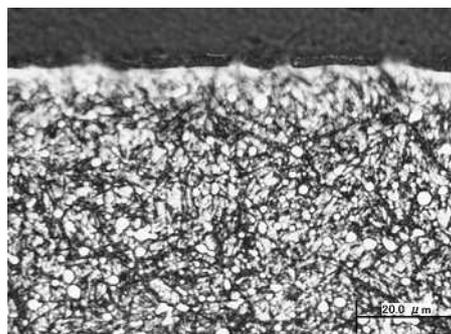


図 2-4-8 WPC 処理後マイクロ組織

表 2 - 4 - 3 内部残留応力測定結果

試料名	測定深さ μm	kgf/mm^2			MPa		
		1	\pm	1	1	\pm	1
WPC 未処理	0	-32.46	\pm	3.22	-318	\pm	32
	10	-2.34	\pm	5.37	-23	\pm	53
	20	4.07	\pm	4.47	40	\pm	44
	30	10.38	\pm	7.76	102	\pm	76
	40	-1.88	\pm	4.18	-18	\pm	41
	50	-1.02	\pm	6.36	-10	\pm	62
WPC 処理後	0	-135.06	\pm	7.44	-1324	\pm	73
	10	-76.34	\pm	4.25	-748	\pm	42
	20	-8.16	\pm	5.18	-80	\pm	51
	30	-8.05	\pm	10.88	-79	\pm	107
	40	-7.97	\pm	3.28	-78	\pm	32
	50	-7.54	\pm	6.41	-74	\pm	63

符号：- は圧縮を示し、+ は引張を示す。

5) まとめ

本年度の成果として、ニッケル基超合金の転造においてダイスの変形を防ぐには、ダイス硬度としては780HV以上が必要となり、WPC処理を施すことにより未処理のSPMR8ではテストピース4本でダイスが破損したが、処理後は8本加工後もダイスに異常は見られず、WPC処理を施すことにより耐久性の向上を得られる事が確認できた。

またWPCを行った事でダイス表面に出来たマイクロディンプルにより、潤滑油の潤滑性向上がダイスの耐久性向上に影響を与えるかは定量的なデータを取り検証する事が、今後の課題の一つと言える。

第3章 光学式探傷装置の実証試験

3-1 光学式探傷装置の改造の概要

本装置は、ニッケル基超合金であるインコネル718を素材とする大型転造ネジの加工プロセスにおいて、発生した疵の検知・記録を目的とするものである。具体的には、電子カメラを用いたラインセンサーで「赤」「緑」「青」の波長の異なる光を受光し、光の強度を電気信号に変換し画像処理することにより、目視では発見できなかった転造ねじ加工で発生した疵の検知・記録を行なうもので、図3-1-1はその概念図を示す。

平成20年度に製作した図3-1-2の光学式探傷装置を用いて採取した画像を解析・統計整理し本装置にインストールを行い疵の検知精度を高めることを目的とする。

3-2 解析ソフトの仕様詳細

1) ハードウェアの改良

カメラ搭載のFPGA(フィールドプログラム・ゲートアレイ)のロジックエリアを最適化する事により、アルゴリズムが実装できる容量を確保した。また、画像データに画像処理結果を含めて、データの統計・解析が容易に行えるよう改良した。

2) ソフトウェアの改良

複数の対象ワークを繰り返し撮像

するため、メンテナンス画面、フォーカス調整画面に機械コントロール機能を付け加えて操作性を高めた。

3) 欠陥検出アルゴリズムの改良

H20年度はラインセンサーカメラ内蔵の周波数フィルターを使用したため、一次元方向(横方向)にのみ周波数を計算するものであったが、本年度改良した周波数フィルターはカメラと画像処理ボードの両方に実装し、スキャン方向に加えて、流れ方向(回転方向)にも周波数分解できるものである。即ち、画像を縦横それぞれ別に周波数分解し、特定の帯域の周波数をN倍、又は削除する事ができる。これにより検査対象を撮像した画像で、特定の大きさの範囲内の画像を、明るさを変換する事によって強調・削除する事ができ、傷と金属地合の区別に非常に有効な改良となった。

4) 特徴解析

H20年度の実験では、画像の変化の激しい部分を特異箇所として欠陥候補としたが、さらに改良を加えて、以下の10項目の特徴を抽出するようにした。

- (1) 面積:特異箇所の総ドット数より面積を求める。
- (2) 外周:特異箇所を囲むドット数を数え周囲の長さを求める。
- (3) 真円度:真円に対する変異を1.0~0.0の範囲で表す。
- (4) 高さ:特異箇所のドットの縦方向のドット数を求める。
- (5) 幅:特異箇所の幅方向のドット数を求める。
- (6) 最小値: 特異箇所に含まれる画像の明るさの分布より最も暗い箇所を求める。

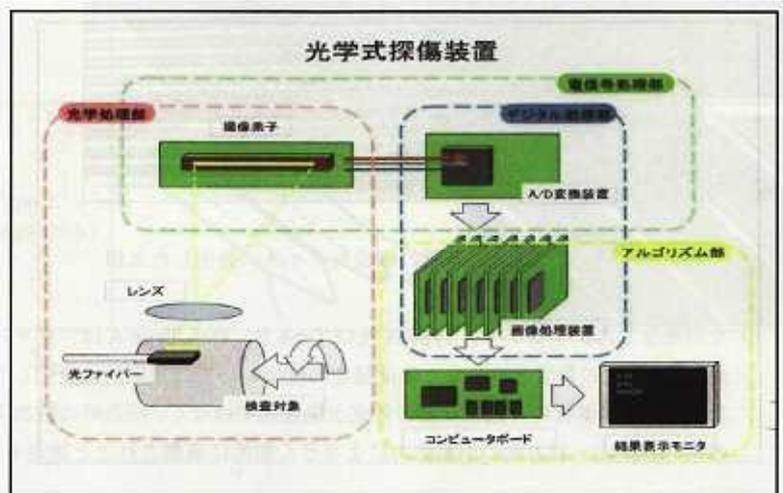


図3-1-1 光学式探傷装置概念図



図3-1-2 光学式探傷装置

- (7) 最大値: 特異箇所に含まれる画像の明るさの分布より最も明るい箇所を求める。
- (8) 平均値: 特異箇所の明るさの平均を求める。
- (9) 中央値: 特異箇所に含まれる画像の最高-最低値の中間値を求める。
- (11) 総密度: 面積、周囲長、輝度変化より密度を求める。

3-3 実証試験結果

1) 欠陥サイズの測定

欠陥画像横幅の明暗ヒストグラムより欠陥サイズの測定を行った。

(a) ドットA 計算計測方法:

画像横幅の明暗のヒストグラム結果より、5%シェアの輝度値を閾値として計測。画像の中に存在する点を暗い点から明るい点の順に並び変えをし、並び変わった点を暗い方から順にカウントしていき、5%の位置にある点の明るさを閾値とする。

(b) ドットB 計算計測方法:

画像横幅の明暗のヒストグラム結果より、モード値より $\pm 10\%$ 輝度値を閾値として計測。画像の中に存在する点を暗い点から明るい点の順に並び変えをし、さらに、暗-明までの明るさを256段階に区切り、各段階の別に点の数をカウントする。このとき一番多かった点の数を代表値として、その前後10%以内の明るさを閾値とする。

(c) 欠陥サイズ換算:

外接四辺形の対角長さ

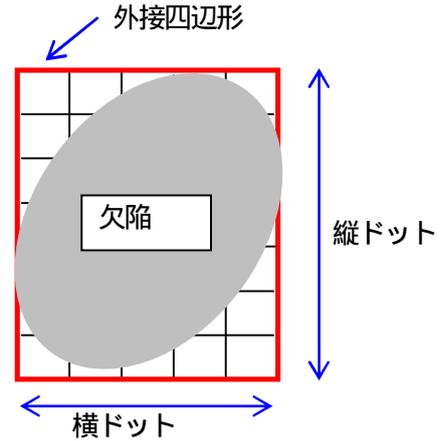


図3-3-1 サイズ判定図

表3-1-1 欠陥画像サイズ測定値

長さ換算 (mm)	縦ドット A	横ドット A	縦ドット B	横ドット B	縦長さA (mm)	横長さA (mm)	縦長さB (mm)	横長さB (mm)	欠陥サイズ 換算	面積換算 (mm ²)
0.003	37	11	15	6	0.111	0.033	0.042	0.462	0.464	0.020
0.003	18	20	2	13	0.054	0.060	0.385	0.128	0.406	0.049
0.003	42	11	40	0	0.126	0.033	0.584	0.245	0.633	0.143
0.003	11	26	10	2	0.033	0.078	0.131	0.163	0.209	0.021
0.003	26	20	14	18	0.078	0.060	0.318	0.190	0.370	0.060

2) 周波数フィルターの選択

取り込み元画像図3-3-2を周波数分解し、1/1~1/10fまでの成分を除去した画像が、図3-3-3となる。

同様に1/50f, 1/100f, 1/250f, 1/500fを除去した画像がそれぞれ図3-3-4、図3-3-5、図3-3-6、図3-3-7となる。

欠陥部分の特徴を損なうことなく、金属地合模様な照明のムラを除去出来ている1/250fカットフィルターが最も有効である。



図3-3-2 元画像



図3-3-3 周波数1/1~1/10fカット



図 3-3-4 1 / 5 0 0 f カット



図 3-3-5 1 / 1 0 0 0 f カット



図 3-3-6 1 / 2 5 0 0 f カット



図 3-3-7 1 / 5 0 0 0 f カット

3) 特徴抽出結果

3 - 1) 画像中のゴミホコリなどの特徴 (欠陥判定 OK)

画像中のゴミ、ホコリなどは、最小値が小さい傾向にあり、また真円度も大きな数値となる傾向がある。面積に対する周囲長の比率が低い物が多く、スジ状ではない塊状の異物として特定する事が可能である。

3 - 2) サビなどの特徴 (欠陥判定 OK)

濃度の最大値、最小値の差が小さい画像が多い。また、真円度が比較的大きな物でも、周囲長が長いものも多く、形状がなめらかでない事がわかる。

3 - 3) 金属の地合 (欠陥判定 OK)

画像として写り、画像処理プロセスで除去出来なかった殆どの金属地合の跡は縦方向に長いものも多く、縦横比率では横方向の長さが極端に短いものが多い。

3 - 4) 外乱電気ノイズ (欠陥判定 OK)

強度の外乱電気ノイズが発生した場合、多少画像として現れる事があるが、面積は全て1ドットであり、容易に区別する事が出来る。

3 - 5) ヒビ割れ (欠陥判定 NG)

面積に対する周囲長は極端に長い物が多い。これは殆どの画像でスジ状に写っているため、面積を測定する為に計数したドットが1列に並んでいる物が多い。また、縦横長さから求めた外接四辺形面積と比較すると、面積が極端に小さい場合が殆どである。

3 - 6) 糸状の異物 (欠陥判定 OK)

糸状の異物が混入している場合では、ヒビ割れと殆ど同じ特徴となり、現状の照明・画像処理手法では区別が困難である。

3 - 4) 今後の課題

画像処理アルゴリズムの改良で、格段に検出精度をあげる事が出来たが、特徴量抽出の結果を効率よくパラメータ化する事が出来ると、さらに検出精度が上がる事が予測される。たとえば、今回の実験の範囲で行った10種類のパラメータの以外に欠陥部分の周囲方向の分布や密集度を付加情報として追加すると、どのような形状の性質を持った欠陥がどのような分布しているかが統計的に把握する事ができ、欠陥抽出の精度向上が期待できる。

最終章 全体総括

本研究開発により、次のような成果を得ることができた。

() 高精度制御機器の開発

ハマックス株式の保有する100トン転造盤に高精度にトルク等の転造プロセスの制御パラメーターを制御可能なように改造したねじ転造装置を開発した。(右写真)

() 転造技術の最適化

ハマックス株式が、制御装置を設置した100トン転造盤にて、ダイスの押込み速度、圧力、位置及び回転数等のプロセス条件を変えて、M80以上の大径ねじの転造加工した比較評価用の転造ねじの試作に成功し、転造プロセスの最適化の効果を確認した。(右写真)

転造加工試験により製作した転造ねじについては、ハマックス株式にて表面疵の有無のマクロ観察を行い、兵庫県立大学にて断面微細組織、特に転造ねじ底の局部域ミクロ組織観察を行い、それらの試験結果に基づき最適転造条件を明らかにし、転造加工条件の最適化へ反映させた。

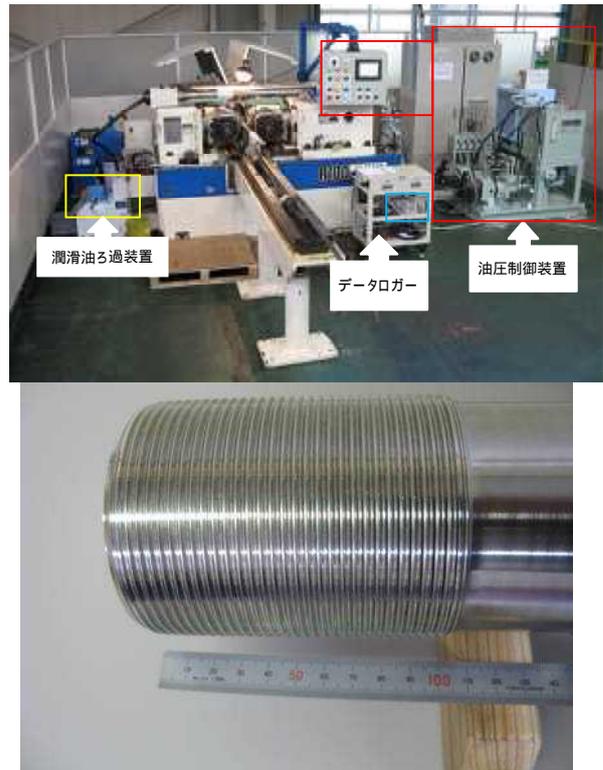
転造プロセスを、有限要素法(FEM)を用いたシミュレーションモデル化を行い、シミュレーションを行い、摩擦係数、ダイス回転数、送り速度などのパラメーターを変えて転造ねじ加工過程の弾塑性接触大変形FEM解析結果を検討し、実体での転造加工との比較を行い、大型転造条件の絞込みを行った。

潤滑油についても改良潤滑油を製作し、ハマックス株式にて、転造盤の主軸トルク値の比較、及び表面マクロ観察(ねじ底の剥離、焼付き状況等の潤滑の影響観察)を行い、兵庫県立大学にて、内部ミクロ組織におけるき裂の有無を観察した。それらの評価から総合的に、最適な潤滑油を選定した。

制御装置を設置した100トン転造盤にて、実機サイズの製品を用い粉末工具鋼を使用したダイスの耐久性の評価を行い、ダイスにWPC処理(ショットピーニング)を施し加工性・耐久性の評価を行った結果、耐久性向上効果を確認した。

() 品質保証技術の確立

光学式探傷装置を試作し、試験材の地合と疵の判別を行う画像処理の実証試験を実施して、検査データを蓄積するとともにソフト改良を行い、実用性の高い検査装置として完成させた。(右写真)



以上