

令和2年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「世界初の量産普及型緩まないねじ生産用「転造金型」の開発」

研究開発成果等報告書

令和3年 3月

担当局 関東経済産業局
補助事業者 山梨県中小企業団体中央会

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 当該研究開発の連絡窓口	3
第2章 本論一（1）	
【1】「第三世代緩まないねじ」の課題である革新的ねじ形状開発	4
【2】放電金型の課題である高品質、生産性向上及び、高精度転造金型試作	8
【3】高精度研削転造用金型の転造性評価	19
【4】世界初量産普及型緩まないねじ 生産性と総合性能を評価し、転造金型を開発	22
最終章 全体総括	35

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

<社会的・経済的背景>

かつて、安全・安心な社会を形成した我が国のものづくりに対する信頼性は、世界的に優位にあった。しかし、近年、設備機器や構造物などの事故件数が増加する傾向にあり、ものづくりへの信頼が揺らいでいる。製品事故の件数が増加している背景としては、企業に対するアンケートの結果[(社)日本機械工業連合会]によると、「製造スキルの低下(45.2%)」、「コスト低下圧力による検査、品質管理体制の弱体化・省略化(42.8%)」、「製品ライフサイクルの短期化(32.6%)」という要因が挙げられる。特に、ねじの基本的な技術に対するスキルの低下や投資の削減に加えて、製品サイクルの短縮化により、ねじの強度や緩み現象を試験機等でテスト解析する余裕が無く、結果、事故は多く、機械設備や構造物の損害は甚大である。近年の国内外で「ボルト緩み」による重大事故が多発しており、一例は、次の通りである。

- ボンバルディア社製全日空機 高知空港胴体着陸事故(2007年3月13日)：原因「ボルトの欠落」
- 山陽新幹線カバード脱落事故(2014年8月8日)：原因「緩み防止不良によるボルトの欠落」
- 笹子トンネル天井板落下事故(2012年12月2日)：原因「つり金具固定用アカボルトの緩み、腐食など」

【研究目的及び目標】

<研究開発の目的>

本研究の目的は、図1に示すように、世界初の量産普及型「緩まないねじ」生産用の転造金型の開発である。従来技術では達成できなかった複雑なねじ形状の量産加工に適した金型を開発し、従来の放電加工に替えて高精度研削加工の導入により、金型の量産化と高精密化並びに高耐久性化を達成することによって、作業性の良い真の「緩まないねじ」生産用転造金型の開発を完成させるものである。

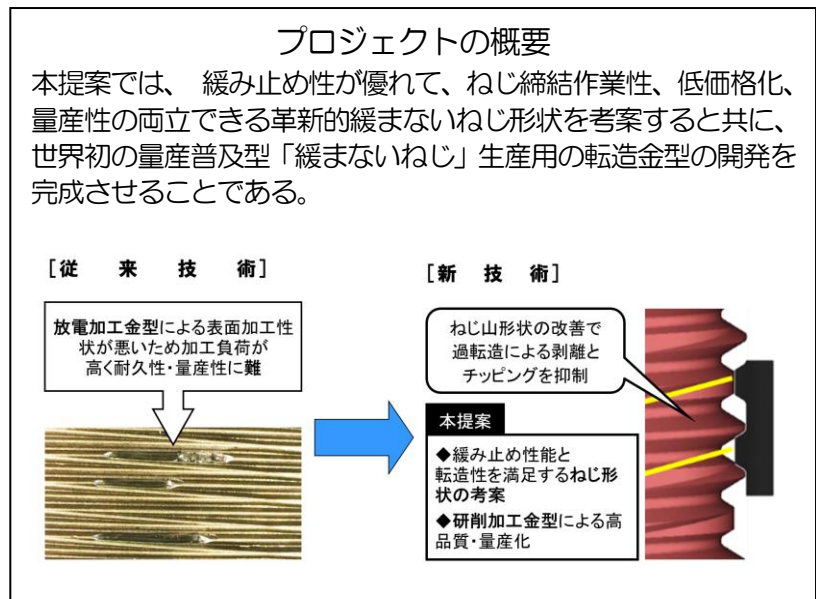


図1 プロジェクトの概要および目標

〈当初の目的及び目標に対しての実施結果〉

技術的目標値の達成度

本研究開発で当初設定した「技術的目標値」を3年間で、目標をクリアーした結果を下表に纏めた。

技術的目標値	従来値	目標値	達成度	参照サブテーマ
・ねじ溝充填率	35%	→ 90%	100%	【1-1】
・加工表面粗さ	Ra=5~8 μ m	→ 0.8 μ m	100%	【2-6】
・ねじに発生するひずみ 量	15	→ 15未満	100%	【2-2】
・加工時間 (1セット完成)	約25日間	→ 約5日間	100%	【4-3】
・生産量(毎分)	10本	→ 300本	100%	【4-3】

1-2 研究体制

【体制及び役割分担】 (実施体制を図2に示す)

〈研究実施機関(1)〉： (株)ニッセー

PL：(株)ニッセー 代表取締役社長 新仏 利仲

研究開発の全体を総括し、アドバイザーや川下企業との連携をマネジメントする。

SL：(株)ニッセー 専務取締役 天野 秀一

研究開発のサブテーマ毎の目標管理を行い、工程管理と予算管理を総括する。

〈研究実施機関(2)〉：国立東京工業高等専門学校 ねじの疲労強度に及ぼす材料力学的解析の実施

〈アドバイザー〉：

諏訪東京理科大…ねじの長寿命化及びシミュレーションに関するアドバイス

都立産業技術高等専門学校…ねじの引張強度に及ぼす材料力学的解析に関するアドバイス

竹増光家：転造分野の専門家としてのねじの長寿命化、ねじのシミュレーション評価等のアドバイス

田口裕也…本事業の推進および纏めのアドバイス

〈川下企業〉：(株)協栄製作所…ねじメーカーとして、金型に関するアドバイス及び評価

東京ファブリック工業(株)…鉄道製品、橋梁製品等メーカーとして、鉄道・橋梁等の付帯構造物の振動における緩み防止改善に関するアドバイス及び評価

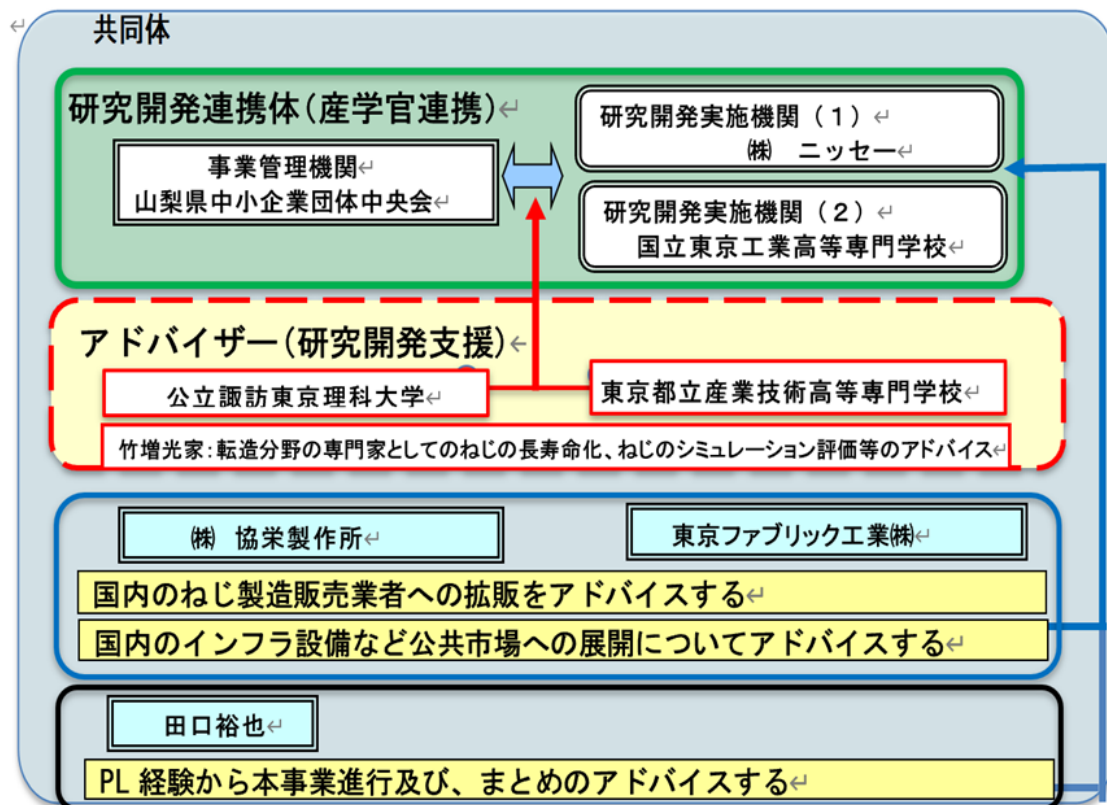


図2 実施体制

1-3 成果概要

本事業では、緩み止め性が優れて、ねじ締め作業性、低価格化、量産性の両立できる革新的緩まないねじ形状を考案すると共に、世界初の量産普及型「緩まないねじ」生産用の転造金型を開発した。具体的な成果を下記に示す。

■新規形状「緩まないねじ” PLBv2”」の開発

- PLBv2は、ISO16130に準拠したユンカー式振動試験にて、競合製品と比較し、唯一最高位の緩み止め性能を実証した。
- 引張強度および引張疲労強度共に、呼び径M12 材質 SCM435 10.9T の標準ボルトと同等程度の強度を実証した。

■研削加工による高精度転造金型の開発

- 研削加工による丸転造式金型、平転造式金型、プラネタリ転造式金型の開発に成功した。
- 新規ねじ形状により転造性を改善し、金型寿命を大幅に向上した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社 ニッセー 担当者：沖本悠暉

電話番号：0554-26-5311 FAX番号：0554-26-5313 E-mail：plb_bolt@nisseiweb.co.jp

第2章 本論一（1）

【1】「第三世代緩まないねじ」の課題である革新的ねじ形状開発

【1-1】「新緩まないねじ」の設計

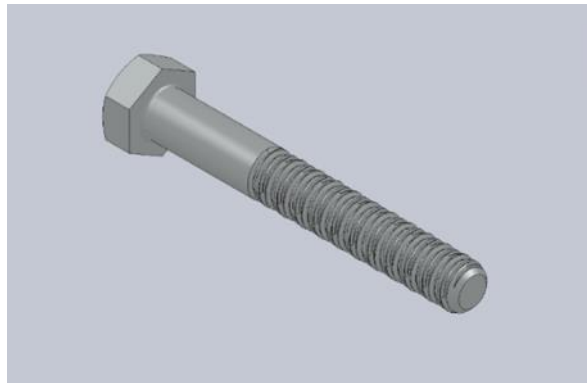


図 1.1.1 「新緩まないねじ」 3D モデル

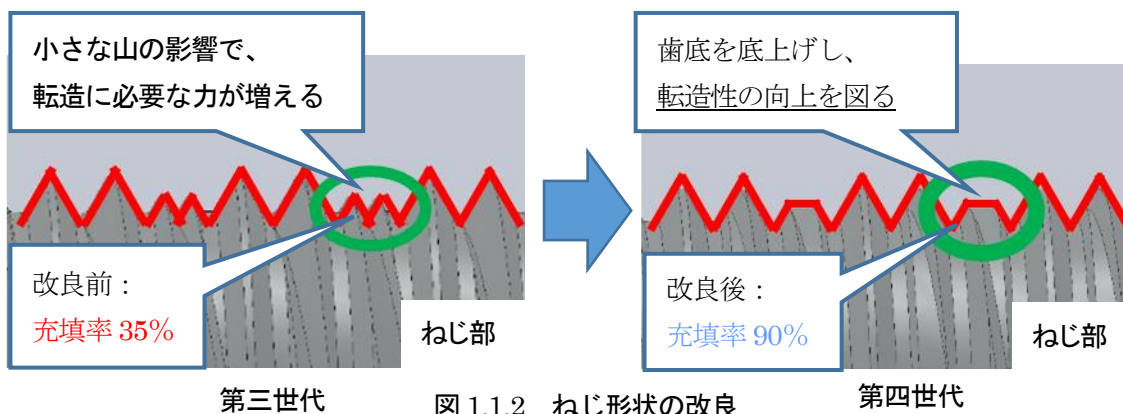
「新緩まないねじ」である第四世代 PLB(図 1.1.1)は、第三世代 PLB の課題であった「転造性の低さ」を改善するために設計された。

第三世代 PLB は引張試験、疲労試験、緩み試験において、第二世代以前の PLB より優れた性能を示した。しかし、転造時に大量の剥離が発生し、転造金型にはチップングが発生するなど転造性に大きな課題を抱えており、量産性は非常に悪かった。

転造時に種々問題が発生する「転造性の低さ」の原因として、第三世代 PLB のねじ形状は、一条ねじと多条ねじを組み合わせているため、その交差点のねじ山は大きく削れ、二つの小さな山が生じていた。転造時はここがいち早く成型され、以降はこの小さな山が既に出来上がっているにもかかわらず、一条ねじ山の成型が終わっていないために、金型をさらに押し込まなければならない。この小さな山の影響で転造性は極めて悪く、転造には通常のねじ(一条並目ねじ)以上の力を必要とし、金型にはチップングを発生させ、ねじには金属組織の剥離が大量に生じた。

第四世代 PLB は、この小さな山の歯底を「底上げ」することにより、転造時に必要な力を軽減させ、転造性の改善を達成した。その裏付けとして、転造シミュレーションの結果より転造時の最小ねじ山溝部充填率は従来値 35%から目標値 90%に改善した。また、この底上げの変化率によって転造性が変化することがわかり、第四世代より更に底上げ率を変化させた第五世代 PLB も開発した。

(図 1.1.2 ねじ形状の改良)



【1-2】プロトタイプを試作

• 目的

設計したねじ形状に問題がないかを確認するため、NC 旋盤で切削加工により試作および検証した。

(1) 切削加工品(ボルトとナット)

• 結果

図 1.2.1、図 1.2.2 に完成した試作品を示す。

製造したプロトタイプを用いて、今回新規考案した第四世代 PLB の性能を検証した。



図 1.2.1 試作ナット

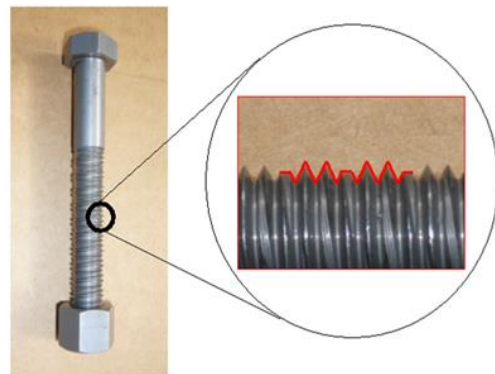


図 1.2.2 切削プロトタイプボルト

(2) ねじ山破壊トルク試験

• 目的

新規形状 PLB のねじ山せん断強度を評価する。

• 試験概要

ボルト、ナットの間ロードセルを挟みこみ、締結過程のトルク変位を計測し、ねじ山が破壊されるまでトルクを上昇させる。トルクと軸力は、ひずみゲージを貼り付けたロードセルで計測する。試験は一条ねじナット、多条ねじナット別々に測定する。

• 実験装置

データロガー
ひずみゲージ、アンプ
ロードセル

• 試験片の諸元

試験片：第四世代 PLB、第五世代 PLB
呼び径：M12
ボルト、ナット材質：SCM435 相当(調質)
ボルト強度区分：10.9
ナット強度区分：10

• 結果

図 1.2.4 より、四世代 PLB および第五世代 PLB の一条ねじ山は標準の M12 一条ねじと同等以上のせん断トルクに耐えることが分かった。強度区分 10.9 のねじを締結する時は、100 [Nm] をやや超える程度のトルクで占めることが推奨されている(グラフ中の参考締付けトルク)が、締付けトルクに対するねじ山の強度はそれを十分に耐えられることが分かった。

これらにより、第四世代と第五世代は実用的なねじ山強度を持っているといえる。

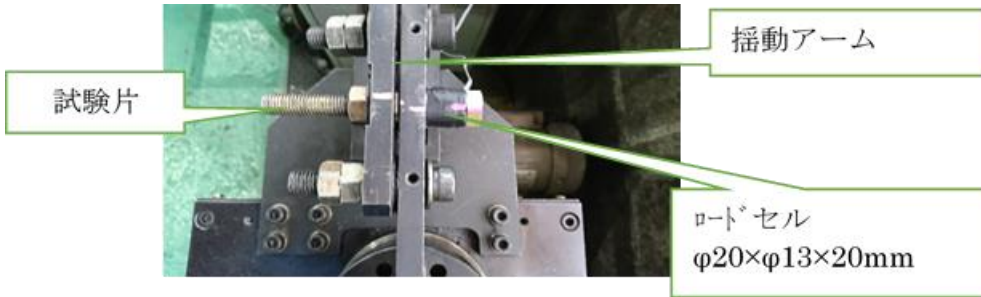


図 1.2.3 試験片の取り付け

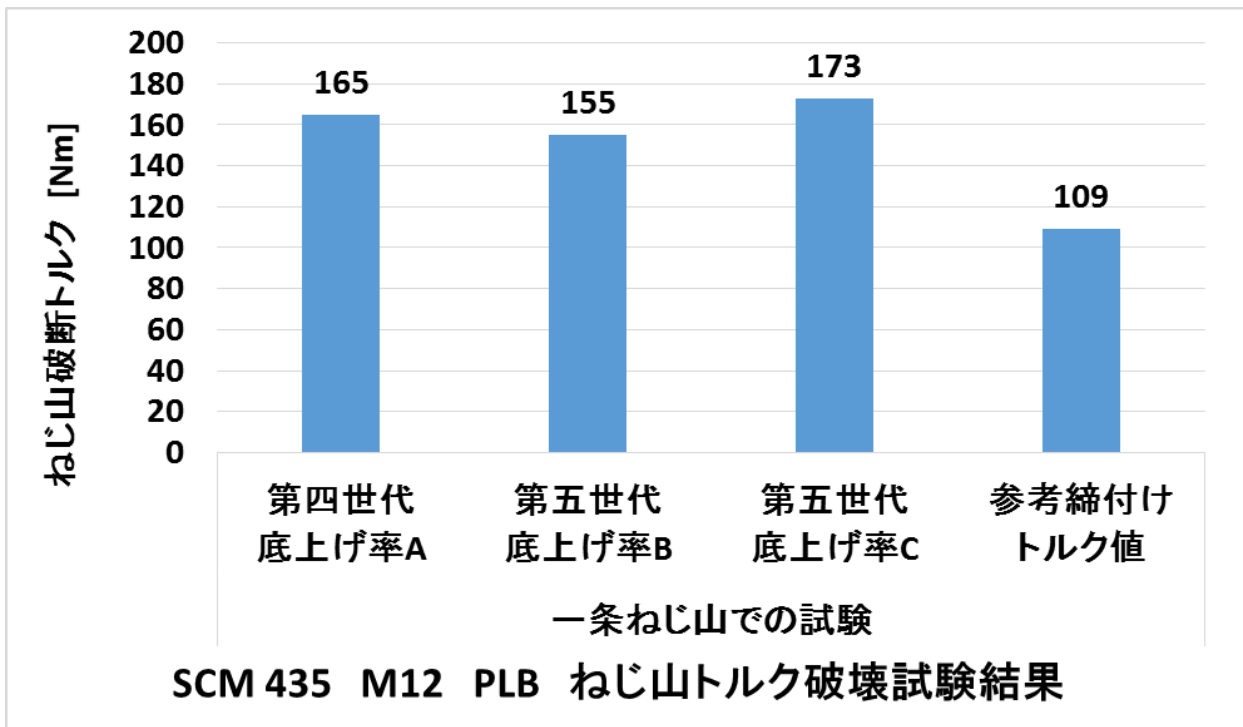


図 1.2.4 ねじ山トルク破壊試験結果

(3) 施工性評価

• 目的

ねじ締め作業性等の評価指標である施工性を評価する。

まず各世代 PLB での施工性の特徴を以下に示す。

- 第一世代 PLB は、二つのナットを別々に締結しなければならなかったため、施工性は悪い。
- 第二世代 PLB は、多条ナットをトルク管理する必要がなくなり、一条ナットのみ締結すれば良かったため、第一世代 PLB と比べ施工性が向上した。
- 第三世代 PLB は、第二世代 PLB と同様にトルク管理の必要性がなくなり、第二世代 PLB と比べ施工性が向上したが、過転造による材料剥離や金型のチップングが発生しており、ナットに引っ掛かりが生じるという課題が残った。

• 評価方法

一条ナットを締めた際に、多条ナットが従動するかを確認する。

• 結果

図 1.3.1 に第四世代 PLB での施工性評価方法概観を示す。第四世代 PLB は、新規ねじ形状により転造性が改善したことにより剥離の発生が抑制されたため、引っ掛かりが無くなった。第五世代 PLB は、第四世代 PLB と同様に、ナット同士の引っ掛かることなく締結できるため、締め付け作業は一条ねじと同様に簡単に締結できる。

上記の結果より、第四世代 PLB 及び第五世代 PLB は第三世代 PLB と比べて、施工性が向上していることを確認できた。

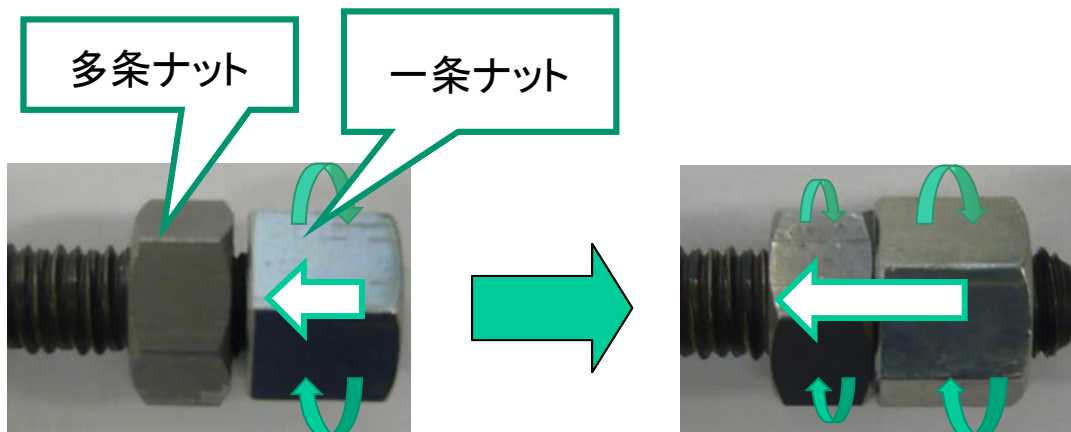


図 1.3.1 施工性評価方法概観(第四世代 PLB)

【2】放電金型の課題である高品質、生産性向上及び、高精度転造金型試作

【2-1】金型設計

- (1)丸転造式金型
- (2)平転造式金型
- (3)プラネタリー転造式金型

・目的

新規ねじ形状に対応した各種方式の金型を設計する。

・結果

丸転造式金型は、当社の知見を活かして設計し、平転造式金型、プラネタリー転造式金型は、アドバイザーの協栄製作所と打合せし、設計完了した。当初の技術的目標値であるねじサイズ 3 種類を超え設計完了した。

【2-2】転造加工解析

- (1)丸転造式加工シミュレーション
- (2)平転造式加工シミュレーション
- (3)プラネタリー転造式加工シミュレーション

・背景

第三世代 PLB での FEM モデルによるねじ転造シミュレーションの結果から、ねじ溝底部の微小ねじ山近傍の領域は過転造になり、最終成形段階ではその部分の相当塑性ひずみが $\bar{\epsilon} > 15$ と異常に大きな値となった。また、それが原因となり、転造中に切りくずや材料表面の剥離が発生し、専用転造金型も特定箇所でチッピングを起こすなど、この種のねじを量産化する上で幾つかの課題が明らかになった。

・目的

ねじ溝底部の相当塑性ひずみの分布、材料流動や最終成形状態に及ぼす影響を検証するために、3次元FEMモデルによるねじ転造シミュレーションを行い、転造可能性や成形上の問題点を解明する。

・解析ソフトウェア

汎用の弾塑性静的陰解 FEM ソフト simufact.forming

・結果

図 2.2.1 に平転造方式での解析結果を、図 2.2.2 に丸転造方式での解析結果を、図 2.2.3 にプラネタリー転造方式での解析結果を、表 2.2.1 に各モデルに対する解析終了時点での相当塑性ひずみの最大値を各々示す。図 2.2.1-2.2.3、表 2.2.1 より、丸転造式金型_第五世代+A%を除いて、第四、五世代 PLB の各種転造式金型の解析終了時点での相当塑性ひずみの最大値は、第三世代の結果と比較し、減少していることから、本事業で提案した新規ねじ形状は、転造性の改善に寄与することが分かった。

また、平転造式金型およびプラネタリー転造式金型は、第三世代の結果と比較し、相当塑性ひずみが 4 割減少しており、これは金型の負担低減を意味するため、PLB 製造では平転造式・プラネタリー転造式が有用であると考えられる。

また、図 2.2.2(b)の底上げ率+A%は 1 箇所に赤色領域が見られ（赤色破線部分）、これにより最大相当塑性ひずみが 15.55 を示すが、相当塑性ひずみは丸転造式金型三種のうちの中位と考えられる。これより、第五世代 PLB の方が金型に対する負荷が小さく、金型の寿命向上に寄与すると推察される。

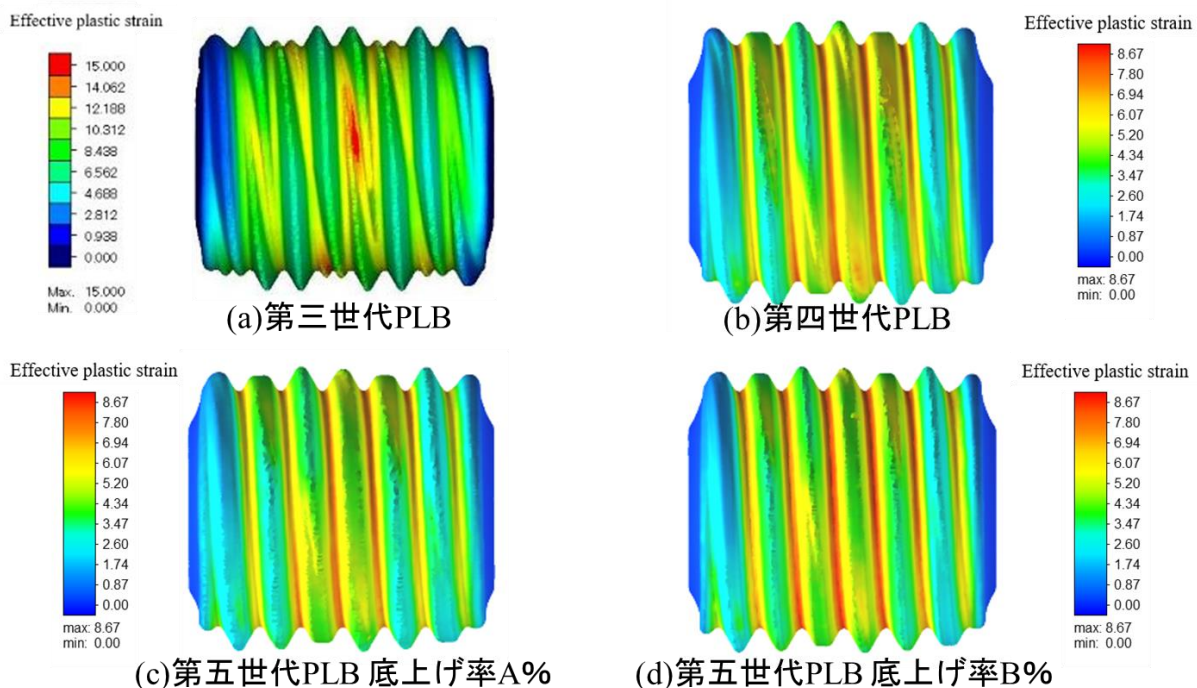


図 2.2.1 平転造方式での解析結果

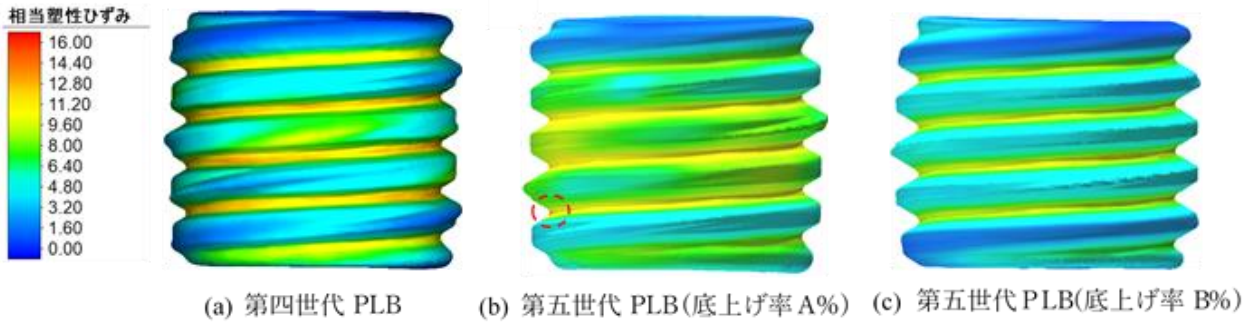


図 2.2.2 丸転造方式での解析結果

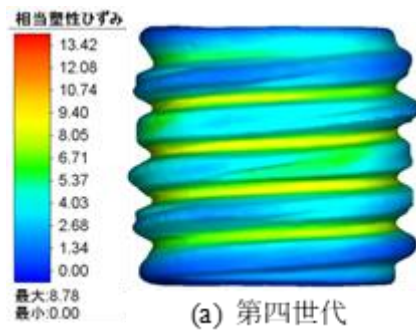


図 2.2.3 プラネタリー転造方式での解析結果

表 2.2.1 相当塑性ひずみの比較

金型	相当塑性ひずみ[%]
丸転造式金型_第四世代	14.57
丸転造式金型_第五世代+A%	15.55
丸転造式金型_第五世代+B%	13.42
平転造式金型_第三世代	15
平転造式金型_第四世代	8.67
平転造式金型_第五世代+A%	8.67
平転造式金型_第五世代+B%	8.67
プラネタリー転造式金型_第四世代	8.78

【2-3】 金型試作 I

(1) 放電加工による丸転造式金型試作

• 目的

研削加工金型と比較する為の基礎データとして、放電加工金型の試作を行う。

• 結果

図 2.3.1 に放電加工で試作した第四世代 PLB 金型を、図 2.3.2 に放電加工で試作した第五世代 PLB 金型を各々示す。放電加工を試作した結果、以下の知見が得られた。

課題

(1) 金型製作には、合計約 25 日掛かる。

- 金型加工に長時間要する。(金型一つに 7 日、セットで 14 日)
- 電極の製作に約 11 日掛かる。

(2) 放電加工の性質上、金型表面が荒れ、電極が摩滅し易い。またマイクロクラックの影響で、転造性と金型寿命に悪影響を及ぼす可能性がある。

(3) コストが非常に高い(放電加工一式 ¥576,250)

改善案

【2-5】で挙げる CNC 制御の CNC 高精度研削機を導入して解決する。



図 2.3.1 試作した第四世代 PLB 金型

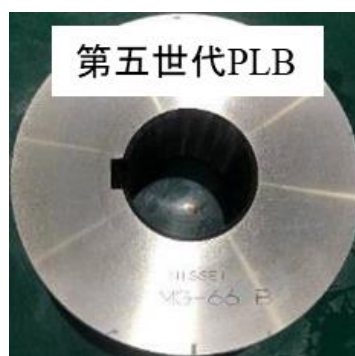


図 2.3.2 試作した第五世代 PLB 金型

【2-4】 金型試作 II

(1) 研削加工による丸転造式加工プログラム検討

(2) 研削加工による平転造式金型加工プログラム検討

(3) 研削加工によるプラネタリー転造式金型加工プログラム検討

(4) 研削加工による丸転造式金型の加工試作

• 目的

金型を高精度研削加工できる加工プログラムを完成させ、丸転造式金型の加工試作を行い、金型高精度化の加工基盤を確立する。

・結果

メーカーと種々打ち合わせを通じて、加工プログラムを完成した。図 2.4.1 に研削加工にて試作した丸転造式金型を示す。加工方式を放電加工から研削加工に変更することによって、加工時間の大幅な短縮及び滑らかな加工表面が得られた。



図 2.4.1 研削加工にて試作した丸転造式金型

【2-5】金型試作Ⅲ

- (1) CNC 高精度研削機の導入
- (2) 研削加工による丸転造式金型の精密化試作
- (3) 研削加工による丸転造式金型の量産化試作
- (4) 平転造式金型用治具導入
- (5) 平転造式金型の加工試作

・目的

本項目では金型の高精密化、量産化を両立するために CNC 高精度研削機の導入および丸転造式金型の精密化及び量産化、平転造式金型の加工試作を実施した。

・結果

図 2.5.1 に精密化試作した丸転造式金型を、図 2.5.2 に量産化試作した丸転造式金型を、図 2.5.3 に導入した平転造式金型用治具を、図 2.5.4 に精密化試作の測定結果を、図 2.5.5 に量産化試作の測定結果を、図 2.5.6 に加工試作した平転造式金型を各々示す。

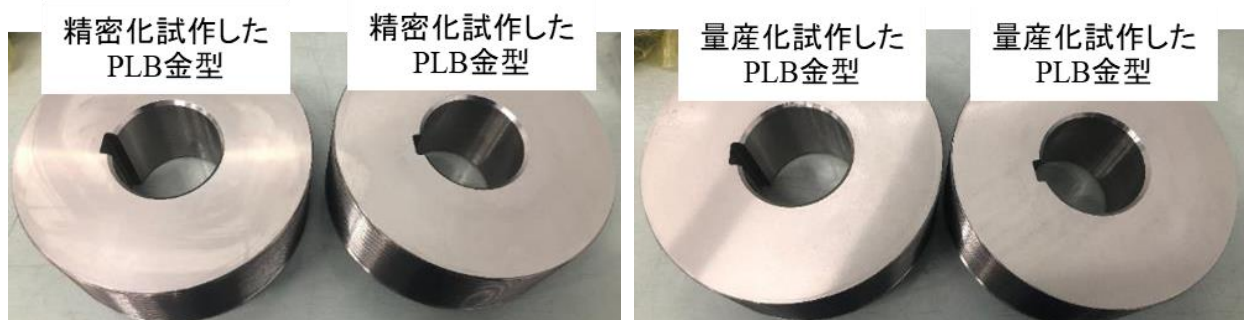


図 2.5.1 精密化試作した丸転造式金型

図 2.5.2 量産化試作した丸転造式金型

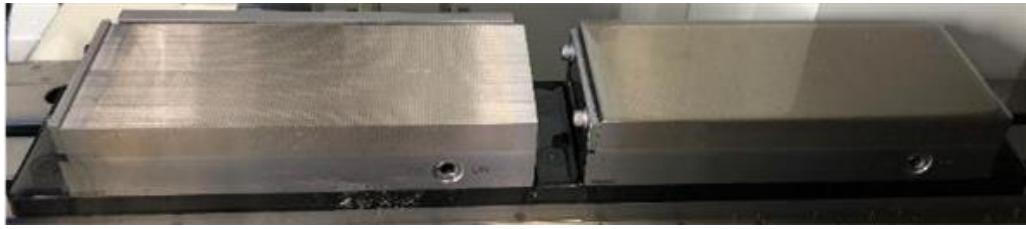


図 2.5.3 平転造式金型用治具

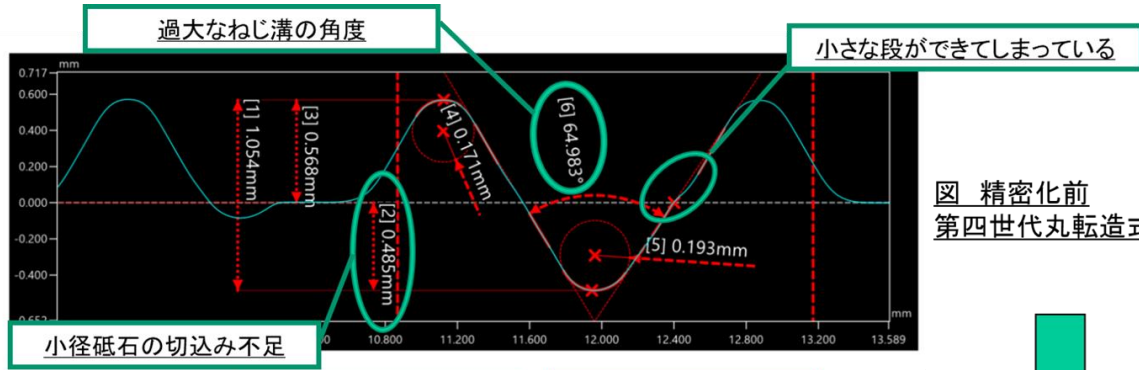


図 精密化前
第四世代丸転造式金型

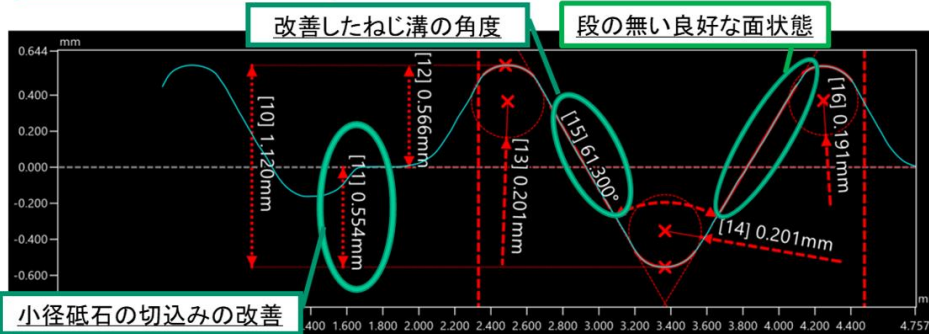
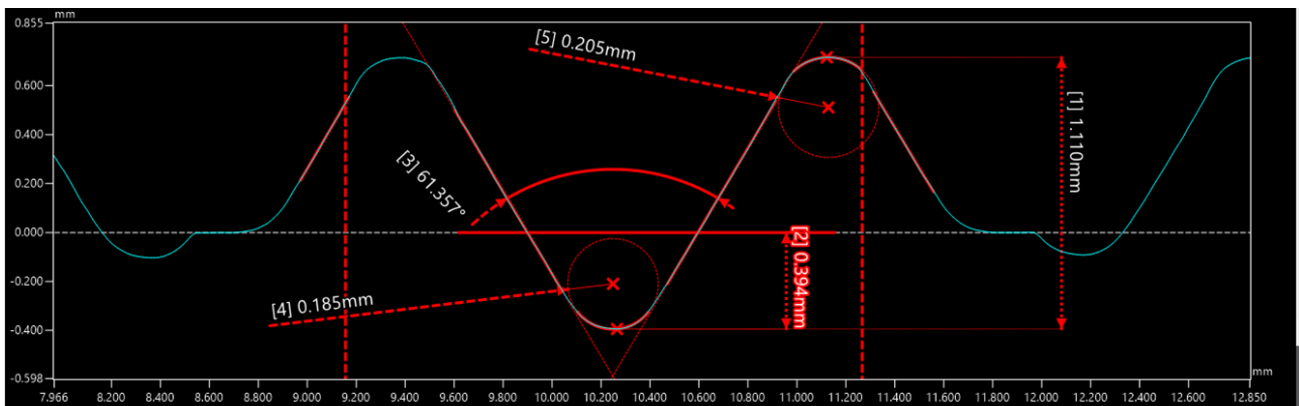


図 精密化完了
第四世代丸転造式金型

第五世代PLB
丸転造式金型は、
第四世代PLBの最適
化手法を反映させ、
精密化完了した。

評価項目	3D形状測定機		寸法公差
	加工試作	精密化完了	
①金型の山R径	0.171	0.201	R0.180~R0.200[mm]
②金型の谷角度	64.983	61.3	60±0.834[°]
⑥金型のデデンダム	0.485	0.554	0.568+0.022[mm]

図 2.5.4 精密化試作の測定結果



評価項目 測定対象物	3D形状測定機		寸法公差
	精密化試作	量産化試作	
①金型の山R径	0.198	0.205	R0.180~R0.200[mm]
②金型の谷角度	61.538	61.357	60±0.834[°]
⑥金型のデデンダム	0.401	0.394	0.417

図 2.5.5 量産化試作の測定結果



図 2.5.6 加工試作した平転造式金型

図 2.5.4 より、精密化試作の結果は、加工試作と比較し、形状の改良を実現した。また加工時間は約 4 日間要したことから、放電加工方式と比較し、大幅な加工時間削減を達成した。

図 2.5.5 より、量産化試作の結果は、精密化試作と比較し、形状の差異は殆どないことが分かった。また加工時間は約 2 日間要したことから、精密化試作と比較し、加工時間の削減を達成した。従来の放電加工金型加工時間約 25 日間と比較し、大幅に研削時間を短縮することが出来たため、金型の量産化体制を実現した。

【2-6】金型試作Ⅳ

(1)平転造式金型精密化試作

(2) 平転造式金型量産化試作

- 目的

平転造式金型の高精密化、量産化技術を確立する。

- 結果

図 2.6.1 に精密化試作した平転造式金型を、図 2.6.2 に量産化試作した平転造式金型を、図 2.6.3 に精密化試作した平転造式金型の測定結果を、図 2.6.4 に量産化試作した平転造式金型の測定結果を、図 2.6.5 に平転造式金型の加工表面粗さの測定結果を各々示す。

図 2.6.3、図 2.6.4、図 2.6.5 より、精密化試作は、加工試作と比較し、各種形状の改良を実現した。量産化試作は、加工条件の各種パラメータの最適化を通じ、加工試作と比較し、金型形状が優れなおかつ金型加工時間を約 1.5 日間と大幅な削減を達成した。また、金型加工表面粗さは、加工方式を研削加工に変更することにより、当初の技術的目標値である $Ra0.8\mu m$ 以下を達成した。



図 2.6.1 精密化試作した平転造式金型

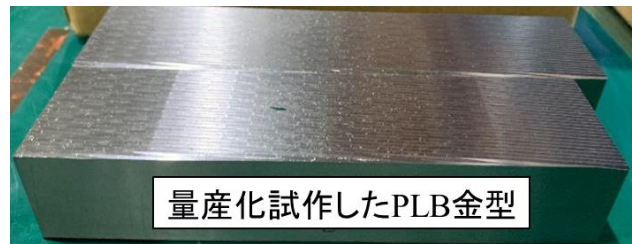
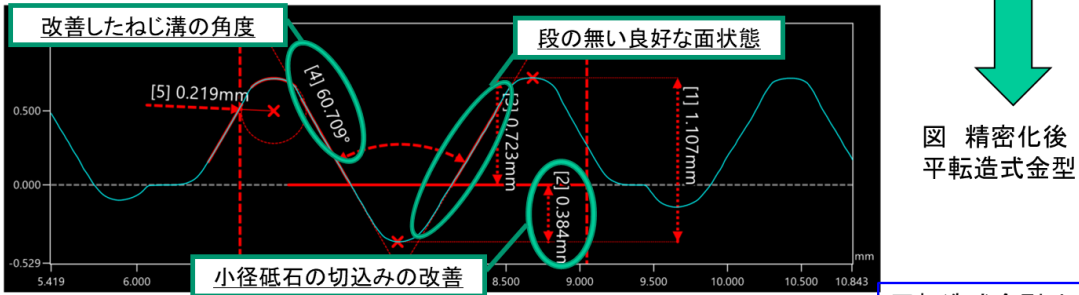
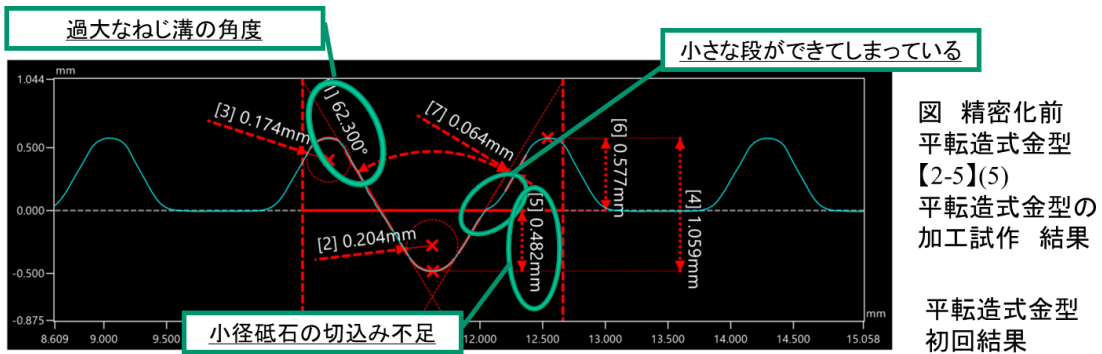


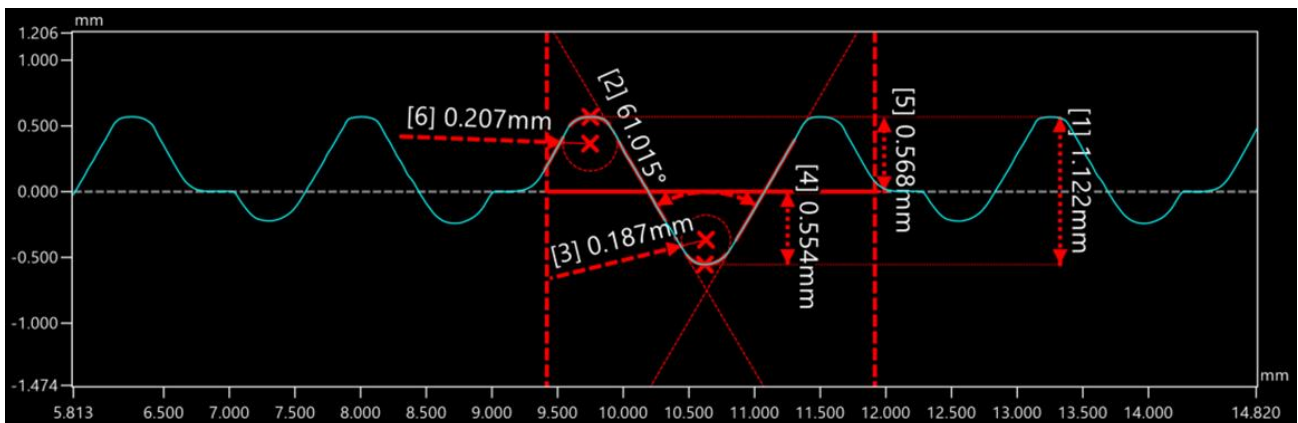
図 2.6.2 量産化試作した平転造式金型



評価項目	3D形状測定機		寸法公差
	加工試作	精密化完了	
①金型の山R径	0.174	0.219	R0.180~R0.200[mm]
②金型の谷角度	62.3	60.709	60±0.834[°]
⑥金型のデデンダム	0.482	0.384	0.417

平転造式金型は、
丸転造式金型の最適
化手法を反映させ、
精密化完了した。

図 2.6.3 精密化試作した平転造式金型の測定結果



評価項目	3D形状測定機		寸法公差
	加工試作	量産化試作	
①金型の山R径	0.174	0.207	R0.180~R0.200[mm]
②金型の谷角度	62.3	61.015	60±0.834[°]
⑥金型のデデンダム	0.482	0.554	0.568 ^{+0.022} _{-0.016} [mm](第四世代PLB)

図 2.6.4 量産化試作した平転造式金型の測定結果

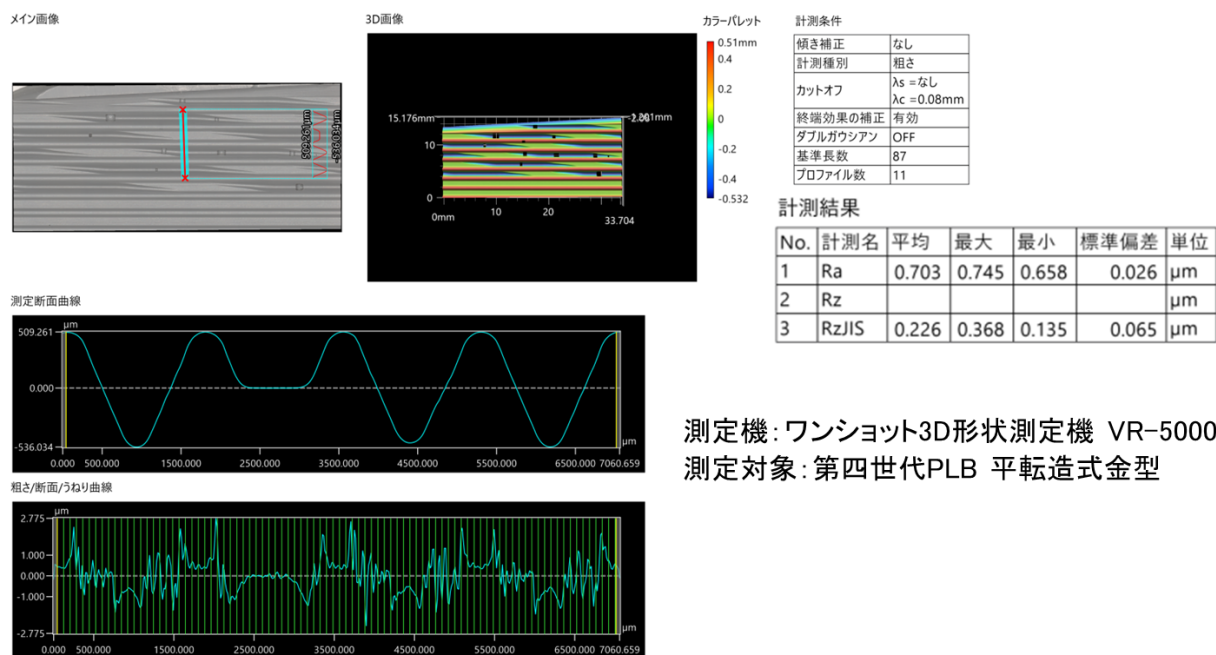


図 2.6.5 平転造式金型の加工表面粗さの測定結果

【2-7】金型試作V

- (1) プラネタリー転造式金型用治具導入
- (2) プラネタリー転造式金型の加工試作
- (3) プラネタリー転造式金型の精密化試作
- (4) プラネタリー転造式金型の量産化試作

・目的

プラネタリー転造式金型の製造方法、高精密化並びに量産化技術を確立する。

・結果

図 2.7.1 に導入したプラネタリー丸転造式金型治具を、図 2.7.2 に導入したプラネタリーセグメント金型治具を、図 2.7.3 に加工試作したプラネタリー丸転造式金型を、図 2.7.4 に加工試作したプラネタリーセグメント式金型を、図 2.7.5 にプラネタリーセグメント式金型の精密化試作の結果を各々示す。

図 2.7.5 よりプラネタリーセグメント式金型の測定結果は、加工試作の結果と比較し、各種形状の改良を実現した。また、加工試の加工時間は、プラネタリー丸転造式金型およびプラネタリーセグメント式金型の各 1 個ずつのセットで、約 5 日要したのに対し、量産化試作の加工時間は、約 3 日と加工時間の削減を達成した。

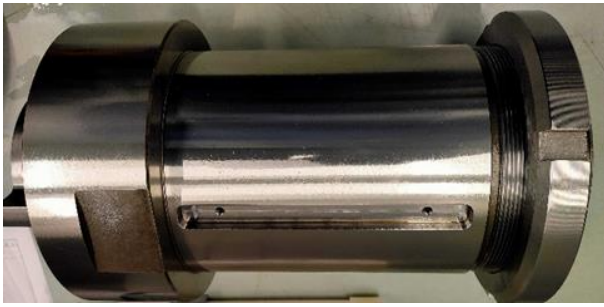


図 2.7.1 プラネタリー丸転造式金型治具

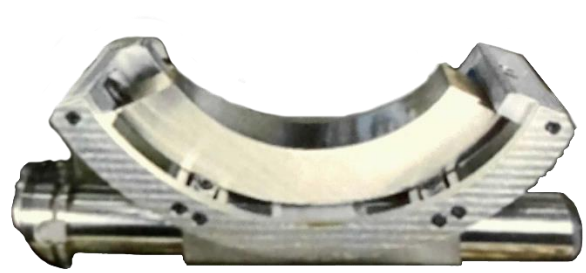


図 2.7.2 プラネタリーセグメント金型治具

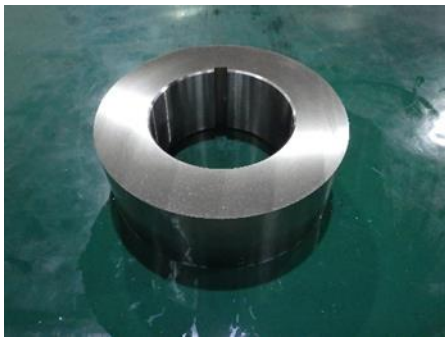


図 2.7.3 プラネタリー丸転造式金型

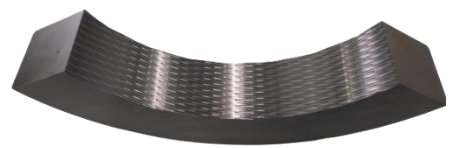


図 2.7.4 プラネタリーセグメント式金型

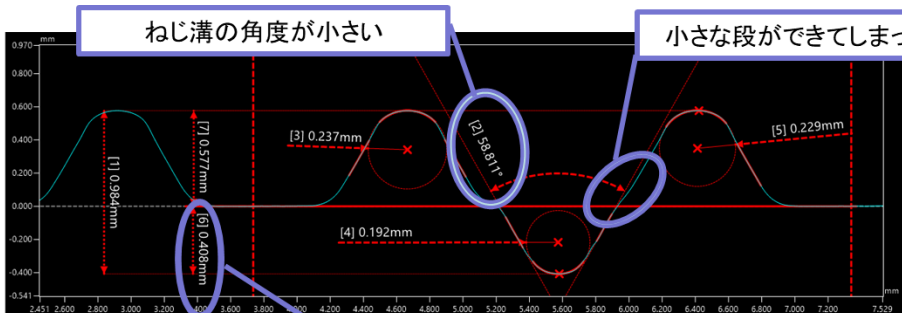


図 加工試作
プラネタリーセグメント
転造式金型

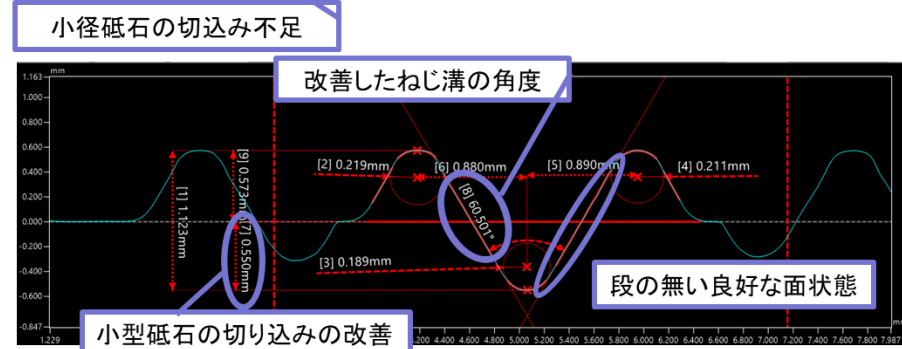
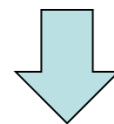


図 精密化試作
プラネタリーセグメント
転造式金型

丸および平転造方式の
経験を活かし、
精密化試作に成功した。

評価項目	3D形状測定機		寸法公差
	加工試作	精密化完了	
①金型の山R径	0.237	0.219	R0.180~R0.200[mm]
②金型の谷角度	58.811	60.501	60±0.834[°]
⑥金型のデデンダム	0.408	0.550	0.568+0.022[mm]

図 2.7.5 プラネタリーセグメント式金型の精密化試作

【3】高精度研削転造用金型の転造性評価

【3-1】放電加工転造金型を使用した転造ねじ試作

- (1)ボルト素材の試作
- (2)ナットの試作
- (3)丸転造式金型による加工試作

・目的

放電加工により試作した丸転造式金型にて、PLB を試作し、転造性を評価する。

・結果

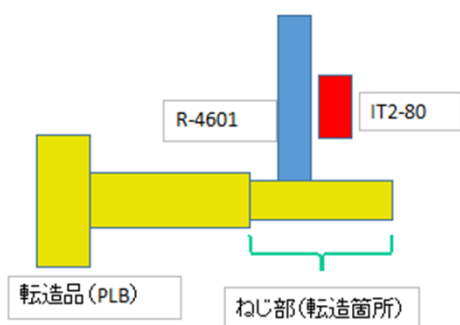
図 3.1.1 に放電加工金型で加工試作した PLB を、図 3.1.2 に加工試作したナットを、図 3.1.3 に転造性評価結果の概要を各々示す。図 3.1.3 より第五世代 PLB は、第四世代と比較し、転造時の発熱量が大幅に削減していることから、ねじ形状の変更は、転造性の向上に寄与することが分かった。ただし、設定した転造時の素材径が小さいため、実際の温度は多少高くなることが予想される。



図 3.1.1 放電加工金型で加工試作した PLB



図 3.1.2 に加工試作したナット



計測方法及び評価結果

- ・転造直後のPLBの発熱量を計測
- ・計測は赤外線→接触式
- ・第三世代、第四世代それぞれ10個の転造結果の平均を比較

温度測定方法	第三世代PLB[°C]	第四世代PLB[°C]	温度差[°C]
赤外線	90.0	76.3	△13.7
接触式	101	95	△6

図 3.1.3 転造性評価結果の概要

【3-2】研削加工転造金型を使用し転造ねじ試作

- (1) ボルト素材試作
- (2) ナット素材試作
- (3) 丸転造式金型を使用し転造ねじ試作
- (4) 平転造式金型を使用した転造ねじ試作
- (5) プラネタリー転造式金型を使用し転造ねじ試作

・目的

研削加工により試作した各種転造式金型にて、PLB を試作し、転造性を評価する。

・結果

図 3.2.1 に研削加工金型で加工試作した PLB を、図 3.2.2 に加工試作したナットを、図 3.2.3 にハイスピードマイクロスコープにより撮影した丸転造式金型の転造過程動画の切り抜きを、図 3.2.4 に転造性評価結果の概要を各々示す。図 3.2.3、図 3.2.4 より、本事業で開発した新規ねじ形状および研削加工金型への改良は、転造中に生じる剥離発生量が大幅に削減しているため、転造性の大幅な向上を達成した。



図 3.2.1 研削加工金型で加工試作した PLB



図 3.2.2 加工試作したナット

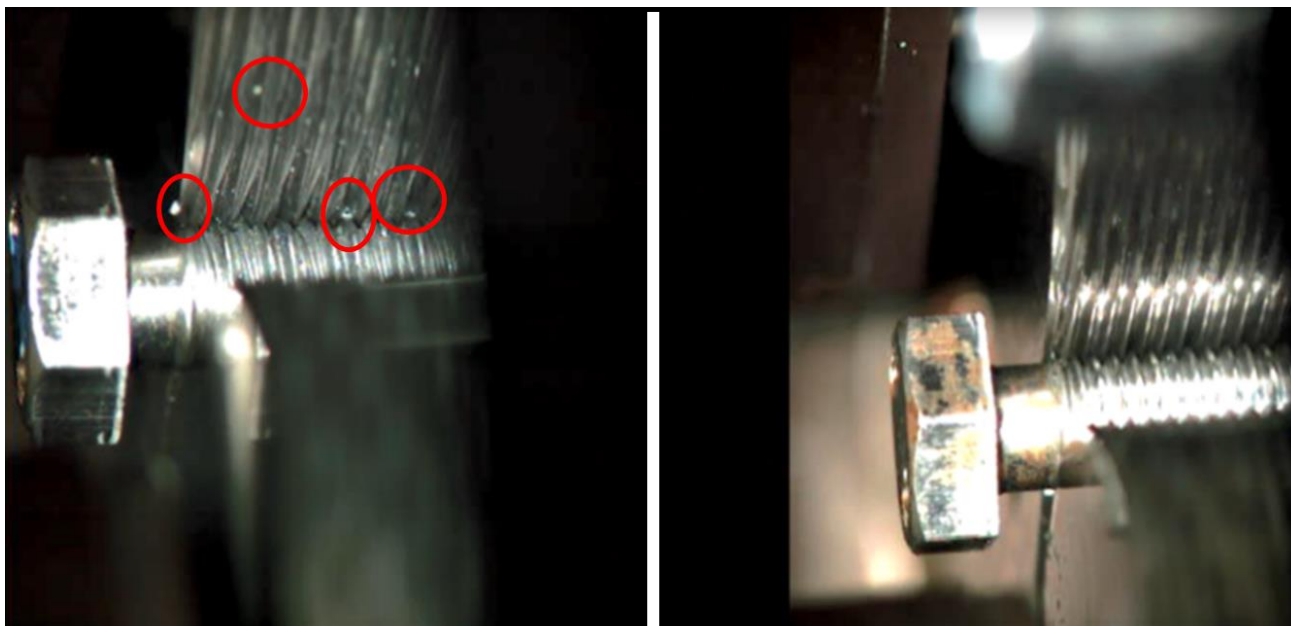
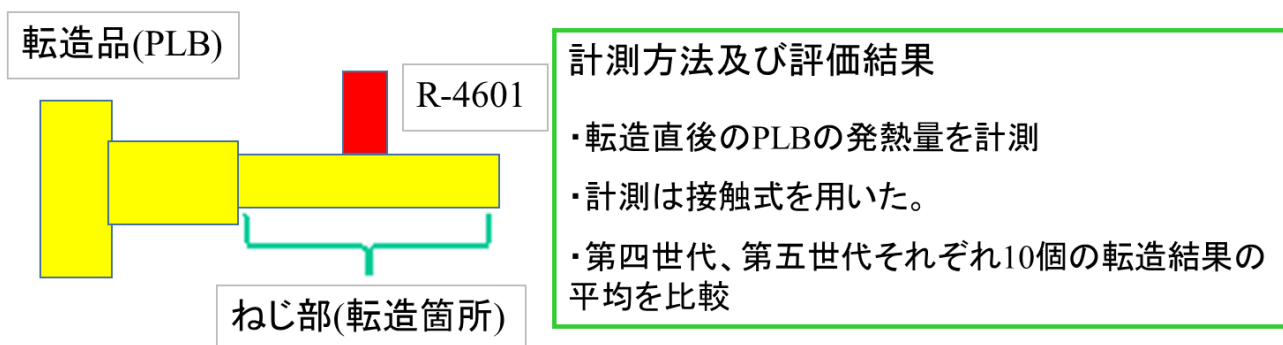


図 3.2.3 ハイスピードマイクロスコープにより撮影した動画の切り抜き
 (左) 第三世代 PLB 放電加工金型の転造過程に生じる剥離
 (右) 第五世代 PLB+B% 研削加工金型の転造過程に生じる剥離



温度測定法	第四世代PLB[°C] 放電加工	第五世代PLB 底上げ率+B%[°C]	温度差[°C]
接触式(R-4601)	95	85.9	△9.1

材質:SCM435
 熱処理:有り

図 3.2.4 転造性評価結果の概要

【4】世界初量産普及型緩まないねじ 生産性と総合性能を評価し、転造金型を開発

このテーマは、PLB の各種強度・緩み止め性能評価および各種転造式金型の耐久性能評価に大別される。PLB の性能評価として、試験片を切削加工、放電加工金型による試作、研削加工金型による試作に分け、各種試験を実施する。

ねじの性能評価手段として下記3点を試験した。

- (1) 引張強度試験
- (2) 疲労強度試験
- (3) 複合振動方式ねじ緩み試験、ユンカー式振動試験(研削加工金型による試作した PLB のみ実施)

試験片の諸元は共通して下記となる。

試験片：第四世代 PLB、第五世代 PLB+A%、第五世代 PLB+B%、標準ねじ

呼び径：M12

ボルト、ナット材質：SCM435 相当(調質)

ボルト強度区分：10.9

ナット強度区分：10

締結方法は共通して、標準ナット(一条)のみで締結する。

ここでは、まず各種試験に共通する試験機および試験条件を示す。

(1)引張強度試験

試験機：オートグラフ AG-25TB

引張速度：2[mm/min]



図 4.1.1 引張強度試験機

(2) 疲労強度試験

試験機：油圧サーボ式強度試験機（株式会社島津製作所製，EHF-EV100K1-020-1A）



図 4.1.2 疲労試験機

表 4.1.1 試験条件

材料	SCM435
波形	サイン波
繰り返し回数	2,500,000[cycles]
平均荷重値	18.4[kN]
周波数	10[Hz]

(3) 耐振動試験

試験機：複合振動方式ねじ緩み試験機、ユンカー式振動試験機

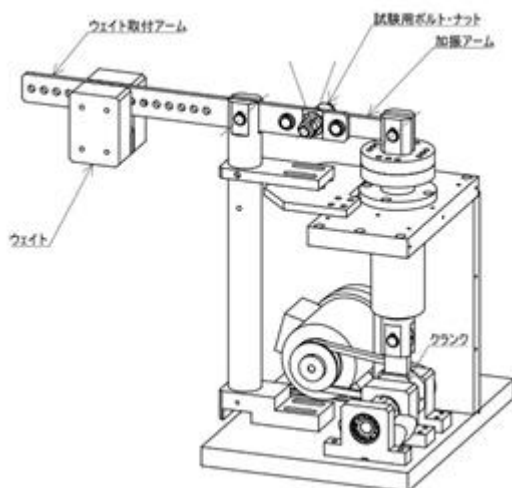


図 4.1.3 複合振動方式ねじ緩み試験機



図 4.1.4 ユンカー式振動試験機
(Vibrationmaster, J121)

図 4.1.3 の複合振動式ねじ緩み試験機は、当社が開発した耐振動試験機である。NAS 式およびユンカー式は、ボルト軸直角方向に加振するが、本試験機は、ボルト緩みの主要因である回転緩みの振動に分類される、軸直角、軸方向、軸回り方向全てに外力が生じるというボルトの耐振動試験機として、非常に厳しい試験機となっている。

図 4.1.4 のユンカー式振動試験機は、ボルトの軸直角方向に加振する世界で最も厳しいとされる耐振動試験である。2015 年にねじ締結体の緩み止め性能を評価する国際規格として、ISO16130 が制定され、本試験機は上記条件を全て満たす試験機である。研削加工金型で試作した PLB のみユンカー式振動試験機で緩み止め性能を評価した。本事業では、公式試験機ではない複合振動式機ではなく、ISO16130 に準拠しているユンカー式振動試験機を中心に試験した。

試験条件

・複合振動方式ねじ緩み試験機
振動周波数 : 35Hz
振動時間 : 30秒
締付けトルク : 42Nm
ユンカー式振動試験

ユンカー式振動試験
・ISO16130 に準拠した試験条件及び試験機
呼び径 : M12
ボルト・ナット材質 : SCM435
ボルト強度区分 : 10.9
ナット強度区分 : 10
初期軸力 : 15 [kN]
変位量 : ±0.8
振動周波数 : 12.5 [Hz]
振動回数 : 2000 回
潤滑材 : 二硫化モリブデン

【4-1】切削加工によるプロトタイプねじ評価

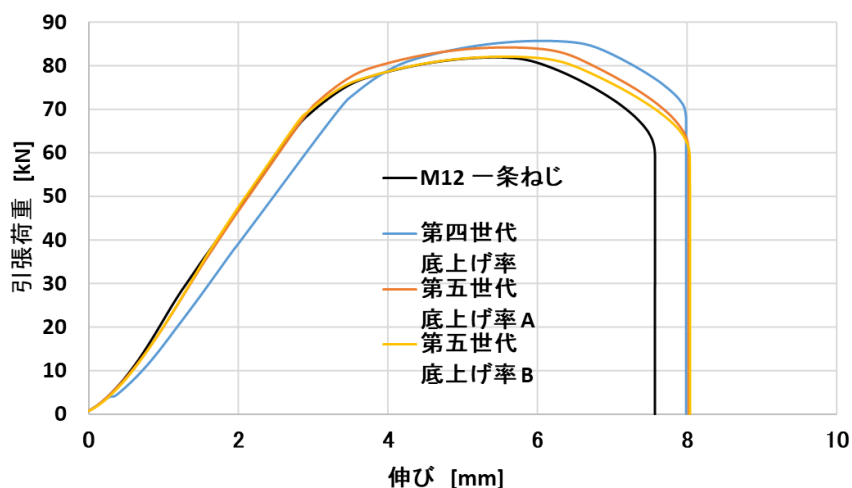
- (1) 引張強度試験
- (2) 疲労強度試験
- (3) 複合振動方式ねじ緩み試験

・目的

切削加工で試作した PLB の各種強度・緩み止め性能を評価する。

・結果

(1) 図 4.1.5 に荷重-ストローク線図を、表 4.1.2 に試験結果の比較表を各々示す。切削加工第四世代 PLB、第五世代 PLB+A%、第五世代 PLB+B%は、標準ねじと比較し、同等程度の引張強度を有していることが分かった。



SCM 435 M12 PLB 引張強度試験

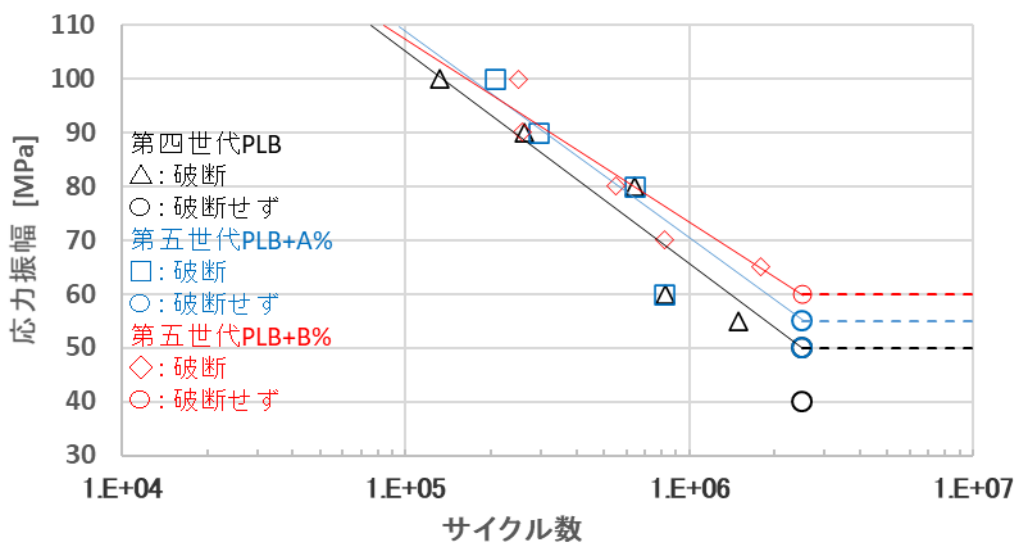
図 4.1.5 荷重-ストローク線図

表 4.1.2 試験結果の比較表

	M12一条ねじ	第四世代 底上げ率	第五世代 底上げ率 A	第五世代 底上げ率 B
破断時のストローク [mm]	7.50	8.02	7.97	8.02
最大荷重 [kN]	82.17	86.77	84.50	83.72

(2) 図 4.1.6 に各種試験片の S-N 線図の比較を、表 4.1.3 に試験結果の比較表を各々示す。

図 4.1.6、表 4.1.3 より、疲労強度は、底上げ率を変化させた第五世代 PLB が、第四世代 PLB と比較し、わずかに優れることが分かった。本試験片は、切削加工で製造しているのに、転造試作した PLB は疲労強度が向上することが見込まれる。



疲労試験結果 第四世代—第五世代 PLB M12

図 4.1.6 各種試験片の S-N 線図の比較

表 4.1.3 試験結果の比較

	応力振幅 [MPa]	サイクル数	破断状況
第四世代PLB	50	2500000	破断せず
第五世代PLB+A%	55	2500000	破断せず
第五世代PLB+B%	60	2500000	破断せず

(3) 図 4.1.7 に複合振動式ねじ緩み試験機による結果を示す。図 4.1.7 より、第五世代 PLB+A% は、第四世代 PLB と比較し、緩み止め性能が向上したことが分かった。第四世代 PLB は、試験片 10 本に対して、2 本かなりの軸力減少が見られた。しかし第四世代 PLB も、「【4-2】放電加工による転造金型を使用した転造ねじ評価」の耐振動試験結果と比較すると、切削プロトタイプねじは軸力を高く保つ傾向があることが分かった。これは、放電加工金型にはマイクロクラックによる金型表面の荒れや形状の不良など、転造に悪影響を与える問題が生じたためであると考えられる。この問題により、転造されたねじはねじ山表面が粗く、ねじ山の形状も不完全になりやすいため、【4-2】で述べるような結果に影響したと

考えられる。

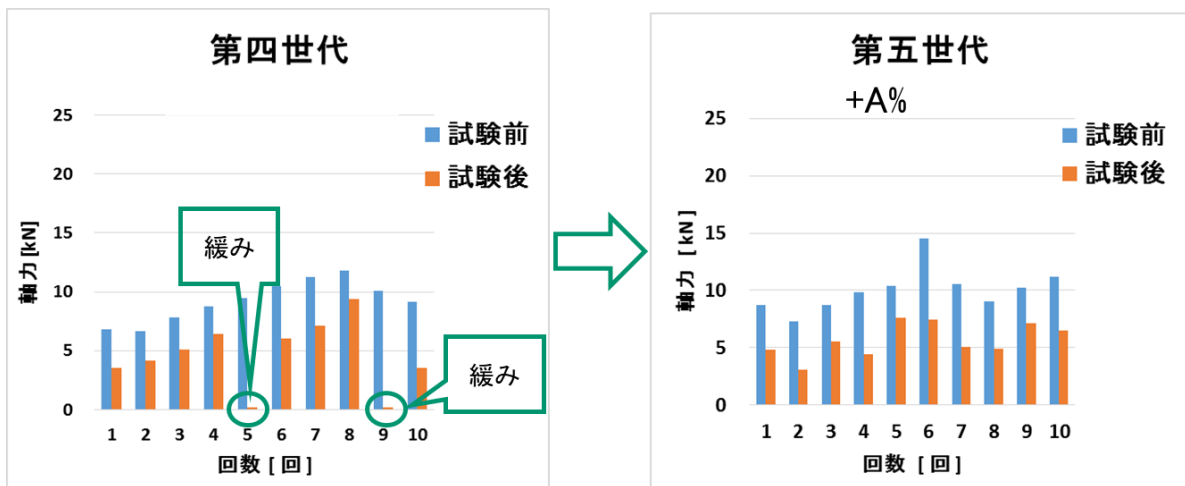


図 4.1.7 複合振動式ねじ緩み試験機による耐振動試験結果

【4-2】放電加工による転造金型を使用した転造ねじ評価

- (1) 引張強度試験
- (2) 疲労強度試験
- (3) 複合振動式ねじ緩み試験

・目的

放電加工金型で試作した PLB の各種強度・緩み止め性能を評価する。

・結果

(1) 図 4.2.1 に荷重-ストローク線図を、表 4.2.1 に試験結果の比較表を各々示す。第五世代 PLB+B% は、第四世代 PLB および標準ねじと比較し、引張強度に優れるため、第五世代 PLB の引張強度は実用域で問題ないことが分かった。破断時のストロークは、標準ねじと比べ、第五世代 PLB 底上げ率+20%の方がわずかに低かったが、実用域では大きな問題になる差ではない。

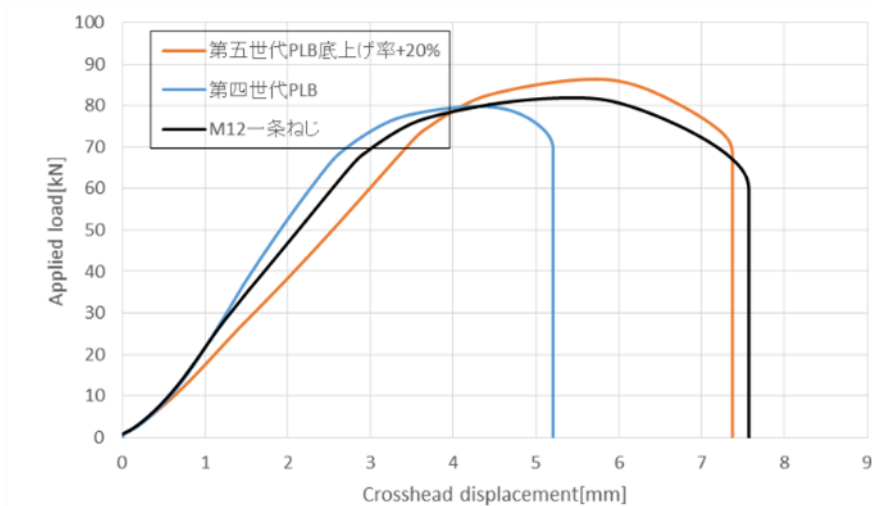


図 4.2.1 荷重-ストローク線図

表 4.2.1 試験結果の比較表

	第五世代PLB +B%	第四世代PLB	M12一条ねじ
破断時のストローク [mm]	7.37	5.21	7.50
最大荷重[kN]	86.42	79.84	82.17

(2)図 4.2.2 に各種試験片の S-N 線図の比較を、表 4.2.2 に試験結果の比較表を各々示す。

放電加工金型で試作した第五世代 PLB+B%は、切削加工にて製造された PLB と比較して、疲労強度が優れないことが分かった。この理由として、下記挙げられる。

- ・ 転造時に設定した素材径が小さかったため、ねじと多条ねじナットのガタが大きく、ねじ山がナットに殆ど引っかかっていないため、シングルナット締結と変わらず、PLB の緩み止め性能が機能しなかったため
 - ・ マイクロクラックによりねじの転造結果に悪影響を与えているため
- なお、研削加工金型では、疲労強度が向上すると見込まれる。

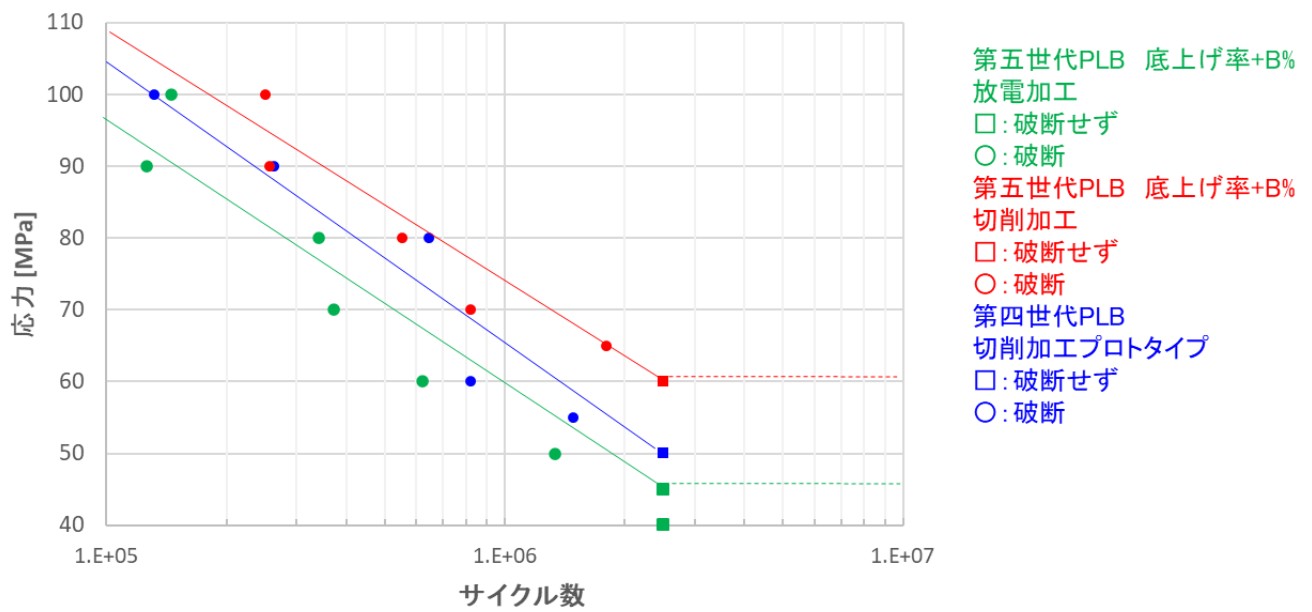


図 4.2.2 各種試験片のS-N 線図の比較

表 4.2.2 疲労強度試験結果まとめ

	応力振幅 [MPa]	サイクル数	破断状況
第五世代 PLB 底上げ率+B% 切削加工	60	2500000	破断せず
第五世代 PLB 底上げ率+B% 放電加工	45	2500000	破断せず
第四世代 PLB 切削加工	50	2500000	破断せず

【4-3】 研削加工による転造金型を使用した転造ねじ評価と金型寿命評価

- (1) 引張強度試験
- (2) 疲労強度試験
- (3) 複合振動式ねじ緩み試験
- (4) 研削金型の寿命評価

(1) 図 4.3.1 に研削加工金型にて試作した PLB の荷重-ストローク線図を、表 4.3.1 に試験結果の比較表を各々示す。下記知見が得られた。

- ・研削加工金型にて試作した第五世代 PLB は、標準ねじと比較して、引張強度が優れていたため、実用域で問題なく使用できることが分かった
- ・引張強度は、熱処理過程により向上することが分かった

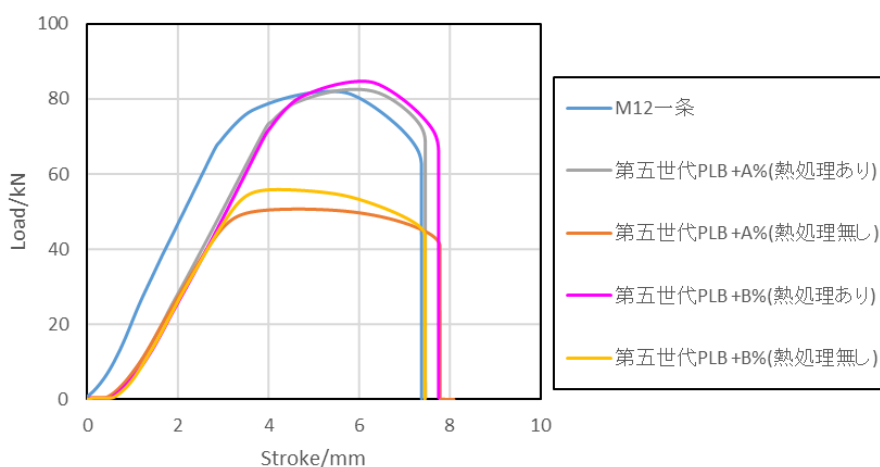


図 4.3.1 荷重-ストローク線図

表 4.3.1 試験結果の比較表

ねじ形状	評価項目	
	破断時のストローク[mm]	最大荷重[kN]
M12一条ねじ	7.50	82.17
第五世代PLB +A%(熱処理あり)	7.59	82.57
第五世代PLB +A%(熱処理無し)	7.83	50.57
第五世代PLB +B%(熱処理あり)	7.75	84.23
第五世代PLB +B%(熱処理無し)	7.40	55.98

(2) 図 4.3.2 に研削加工金型によって試作した各種試験片での S-N 線図を、表 4.3.2 に各種試験片での試験結果の比較を各々示す。以下の知見が得られた。

- ・第五世代 PLB +B%は、標準ボルトの疲労強度を上回ったため、実用域で問題なく使用できることが分かった

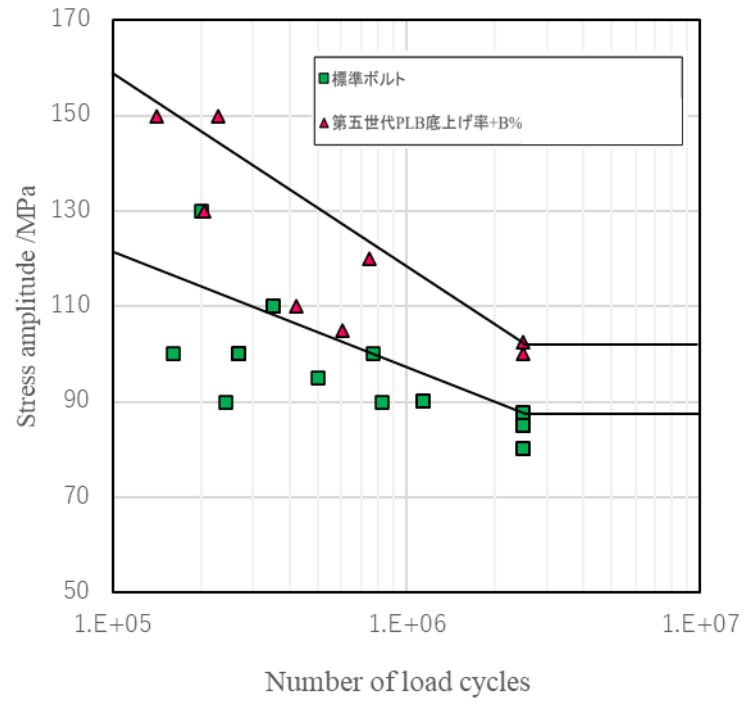


図 4.3.2 S-N線図

表 4.3.2 試験結果の比較

試験片	応力振幅 [MPa]	サイクル数	破断状況
標準ボルト	87.5	2500000	破断せず
第五世代PLB 底上げ率+B%	102.5	2500000	破断せず

(3) 図 4.3.3 に ISO16130 に準拠したユンカー式振動試験にて、競合他社商品と第四世代 PLB の比較結果を、図 4.3.4 にメンテナンス性能評価試験の結果を各々示す。

図 4.3.3 は、ISO16130 に完全に準拠した試験機および試験条件で試験した結果である。

ISO16130(以下 ISO とする。)では、まず緩み止め機能を有していないねじ締結体で試験し、振動回数が 300 ± 100 [回] で完全軸力損失する有効横変位量を求め、その求めた際の試験条件を用いて、緩み止め性能を評価する。これを参照試験と定義している。この参照試験で求めた各種条件を用いて、緩み止め性能を定量評価する検証試験を実施する。ISO の評価は、試験後の残存軸力が $100-85$ [%] を緩み止め機能良好、 $85-40$ [%] を緩み止め効果許容可能、 $40-$ を不十分と定義している。

他社競合製品の試験結果が、緩み止め効果許容可能であるのに対し、第四世代 PLB は、唯一最高位の緩み止め性能を実証した。

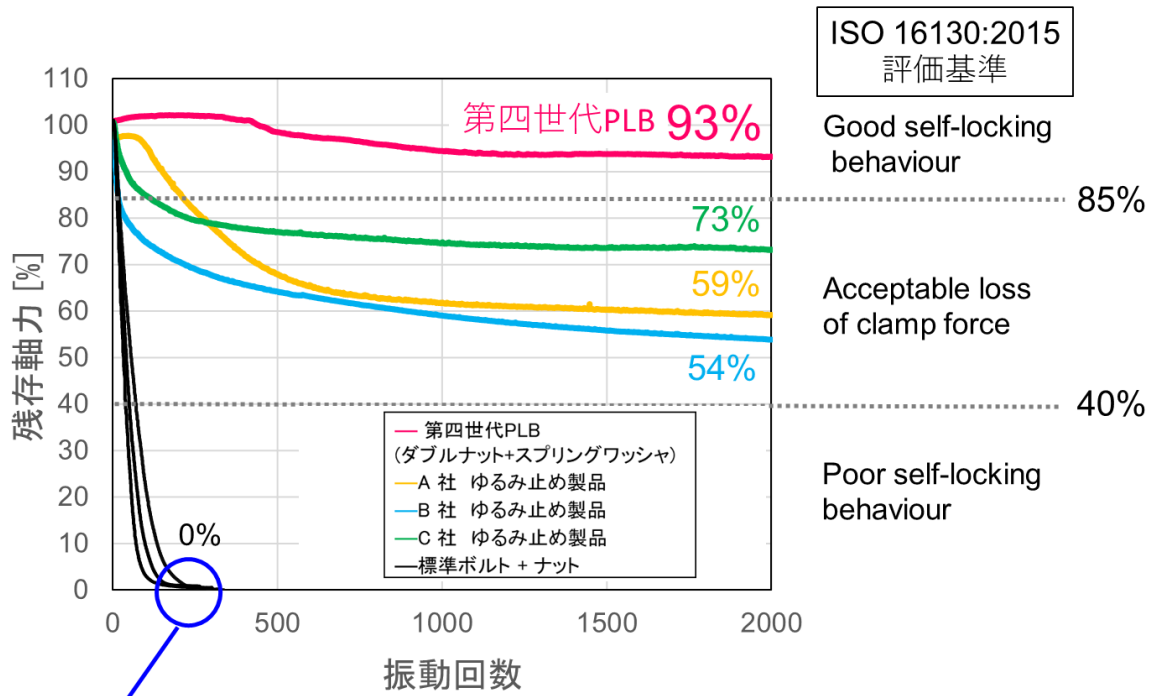
図 4.3.4 は、ユーザが使用する際に大切である、メンテナンス性能(緩み止め性能と作業性を複合した結果)を定量評価した結果である。

試験条件は、ISO の試験を実施する際に求めた有効横変位、周波数は ISO 規定の 12.5 [Hz] と厳しい条件で試験している。ISO との変更点は、現場で使用することを考慮し、軸力管理からトルク管理に変更し、潤滑剤は二硫化モリブデンから防錆剤へと変更している。

試験方法を下記記載する。

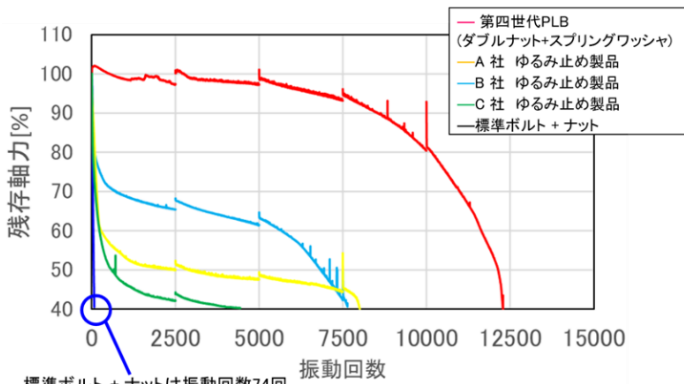
- ① 試験片に潤滑剤として防錆剤を塗布し、試験機にセットする。
- ② 締結トルク 42 [Nm] で締結し、初期軸力を計測する。
- ③ 1 回の試験での振動回数を 2500 回と設定する。(これは本試験機が 1 回で試験可能な最大振動回数である)
- ④ 残存軸力が 40 % 以下になるまで試験を繰り返す。
- ⑤ 残存軸力が 40 % 以下になった時点の振動回数の累積値を計測する。

試験終了時点での振動回数の累積値は、第四世代 PLB が 12290 回に対し、標準ねじは 74 回である。よって、第四世代 PLB は標準ねじと比較して、 166 回分増し締めを削減可能であると評価できる。また、他社競合商品が、振動回数 2500 回までに大幅な残存軸力の低下が確認できるのに対し、第四世代 PLB は 10000 サイクルまでは残存軸力が 80 % 以上有していることも、大きな差別点となる。また、左下の表の増締め工数の比較は、第四世代 PLB が増し締めをする際に、標準ねじは 166 回もの増し締めに要求され、それに増し締めに掛かる時間と本数(例として 50 本)を掛け合わせた結果となる。第四世代 PLB は、標準ねじと比較して、大幅なメンテナンスコスト削減に貢献することが分かった。つまり、第四世代 PLB は、標準ねじ及び他社競合商品と比較して、高い緩み止め性能により増し締め作業を大幅に削減可能であり、なおかつ再締結時の作業性も良好であるため、人件費の大幅な削減が可能であることが分かった。



標準ボルト + ナットは振動回数300±100回で完全軸力損失した

図 4.3.3 競合他社商品と第四世代 PLB の比較



標準ボルト + ナットは振動回数74回で残存軸力40%

試験片	残存軸力40%時点の累計振動回数
標準ボルト+ナット	74
第四世代PLB (ダブルナット+スプリングワッシャ)	12290
A社 ゆるみ止め製品	8010
B社 ゆるみ止め製品	7641
C社 ゆるみ止め製品	4439

試験片	増し締め工数[min] (50本当たり)
標準ボルト + ナット (増し締め要回数: 166回、増し締め時間: 5[s]、本数50) =(166*5*50)/60=692[min]	692
第四世代PLB (増し締め要回数: 1回、増し締め時間: 7[s]、本数50) =(1*7*50)/60=6[min]	6

メンテナンス時間686分削減!

第四世代PLBは、標準ボルトと比較して、 $12290/74=166$ 回分増締め削減可能である。

図 4.3.4 メンテナンス性能評価試験結果

(4)金型の耐久性能評価は、下記条件で試験実施した。要点を下記記載する。

図 4.4.1-図 4.4.3 に試験に使用した各種転造盤を示す。

試験した転造金型

- M10 平転造式金型
- M12 丸転造式金型、プラネタリー転造式金型
- M16 丸転造式金型

• 結果

M10 平転造式金型：

連続転造本数 40,000 本 達成

M12 丸転造式金型

連続転造本数 10,000 本 達成

M12 プラネタリー転造式金型

連続転造本数 25,000 本 達成

M16 丸転造式金型

連続転造本数 10,000 本 達成

新研削加工で製造した各種転造方式金型は、従来の第三世代 PLB 丸転造式金型の連続転造回数 100 回と比較して、大幅な金型耐久性能の向上が見られたため、特殊品を量産化するという本プロジェクトの最終目標を達成した。



図 4.4.1
耐久試験に使用した丸転造式転造盤

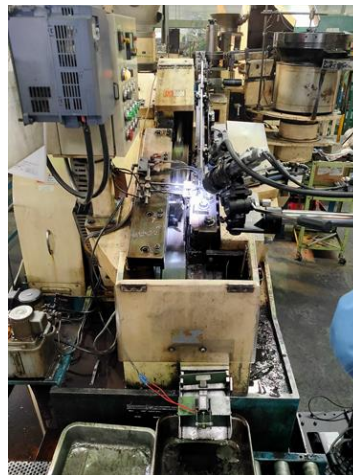


図 4.4.2
耐久試験に使用した平転造式転造盤



図 4.4.3
耐久試験に使用したプラネタリー転造式転造盤

最終章 全体総括

本事業を通じて、緩み止め性が優れ、ねじ締結作業性、低価格化、量産性を満たす革新的緩まないねじ形状および世界初の量産普及型「緩まないねじ」生産用の転造金型を開発した。新規形状のPLBは、多条ねじ山の底上げ率を変化させることにより、高い緩み止め性能を有しながら、各種強度(引張・疲労)共に、呼び径M12 材質 SCM435 10.9T の標準ボルトと同等程度の強度を実証した。また研削加工によって実現した各種転造方式の金型の耐久性能は、第三世代PLBの転造本数と比較して、大幅に向上したことが分かった。なお、当社にて販売価格見込みを試算した結果では、ねじ締結体の値段として、他社競合商品以下に抑えられる見込みがあることも判明している。つまり、第四世代PLBは、従来品の緩み止め性能を付与させたナット・ワッシャを装着したねじ締結体で成しえなかった高い緩み止め性能、良好な作業性能並びに低価格化を全て満たすことに成功した。そのため、製造者、ユーザ、そして我々開発者はWinWinWinの関係史を享受でき、大きな利益性を孕んだ事業を推進できるため、早期に安全・安心の社会を具現できる。

また本事業を通じた販促内容は、新開発の高機能商品であるPLBに関わる知財を貸与し、必要な金型をレンタルする形式で技術使用权、商品製造・販売権を各国の企業に貸与するライセンス事業である。

金型をレンタルするため、製造後使用不可になった金型は返却して頂き、当社にて金型高寿命化に関する研究開発を実施する。つまり、製造元が研究実施機関に該当するため、事業終了後の実施体制および事業化に関する資金計画に問題はないと考えられる。

また自社で独占的に製造販売することは、もちろんできるがいち早く世界に安全・安心な技術を普及させたいという考えから、上記事業計画となっている。

本事業で開発した新規技術は、ユーザのニーズを全て満たすため、全世界に普及する可能性が十分であり、ねじ業界にとって極めて有効であると自負している。