

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「ステンレス鋼製 高強度・高疲労強度極薄ベルトの開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 3月

委託者 経済産業省 関東経済産業局

委託先 財団法人にいがた産業創造機構

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（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	2
1-3	成果概要	7
1-4	当該研究開発の連絡窓口	7

第 2 章 本論

2-1	シミュレーション技術の開発	8
2-2	新加工法の開	16
2-3	残留応力の評価と活用	22
2-4	ベルト端面性状の改良	26

最終章 全体総括

		28
--	--	----

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

〈研究開発の背景〉

印刷機械や複写機、プリンタなど、精密機器における動力伝達方式は主に歯車が用いられているが、近年、機器の小型化、高速・高精度化、さらに低コスト化が進むにつれ、歯車に求められる技術課題は少なくない。特に小型化、高速化による振動や騒音の問題は深刻であり、解決するには歯車の精度やその取り付け精度の向上、潤滑剤、潤滑方法の改良などが必要となる。機器の高精度化においては、歯車の宿命的な問題であるバックラッシュが障害となり、その影響を小さくするために様々な技法、機構があるものの、コスト的には高いものとなる。また、摩擦による磨耗や発熱、磨耗粉塵飛散による周囲汚染といった問題についても対策する必要がある、機器メーカーを悩ませている。

歯車が抱える課題を解決する動力伝達方式として、金属ベルトによる動力伝達方式が知られている。一般的な金属ベルトの製法は、ステンレス鋼等の薄板を必要な幅にスリット裁断し、溶接にてリング状にしたのち、熱処理を行い、リングロール圧延法により所定の板厚、周長へと加工される。この方法は、加工工程が複雑で、工数が多い製法のため高価であり、手軽に使用できないのが現状である。一方、機器メーカーからは低コスト化の要求が強く、加えて品質・性能面、特に寿命向上に対するニーズも高い。

これらの要求を満たすべく、高強度・高疲労強度を有する安価なシームレス金属ベルトを実現させることで、精密機器の性能向上が可能になり、金属ベルトの適用拡大が期待できる。

〈研究目的及び目標〉

(株)遠藤製作所では独自のスピニング加工法によってステンレス鋼製極薄シームレスパイプ(メタルスリーブ:商標登録済み)を製造している。本研究開発では、この加工性の高いスピニング加工法を基に、①スピニング加工のシミュレーション技術の開発、②スピニング加工を発展させた新加工法の開発、③性能試験(基礎試験、疲労試験)を実施し、従来のスピニング加工に比べて30%以上高い疲労強度を有する金属ベルトを、一般的な金属ベルトの製法であるリングロール圧延方式の金属ベルトに比べて50%以下の低コストで製造する技術の確立を目指す。

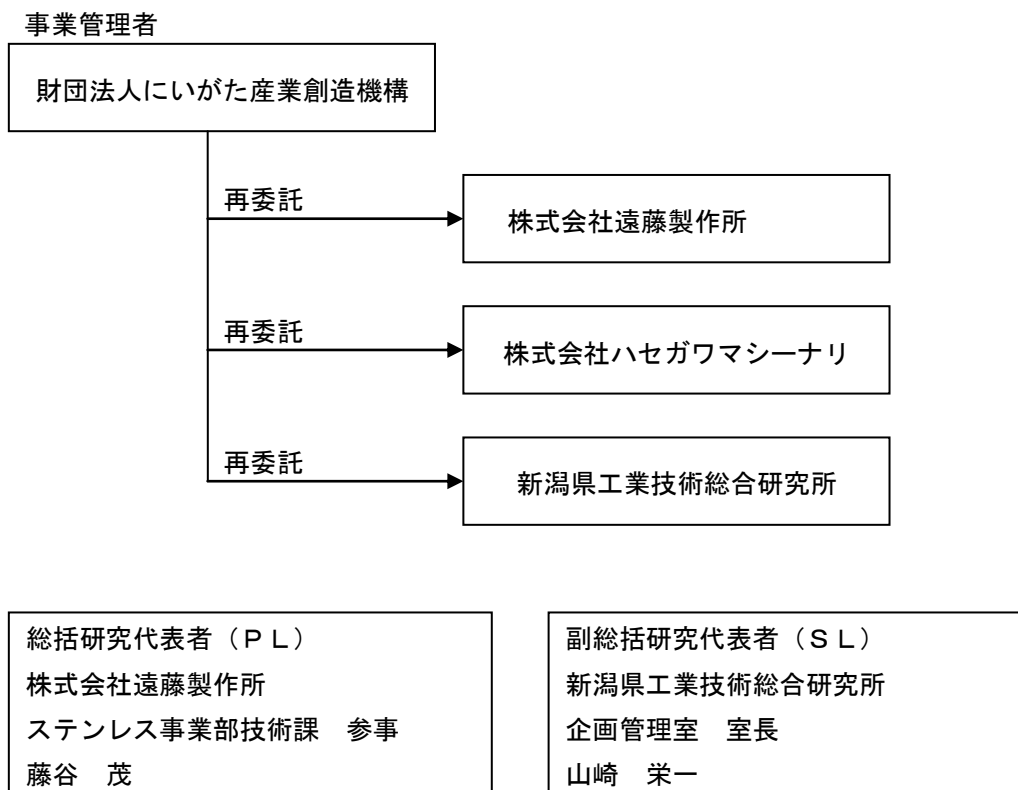


動力伝達用ステンレス鋼製シームレスベルト

1-2 研究体制(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

(1)研究組織及び管理体制

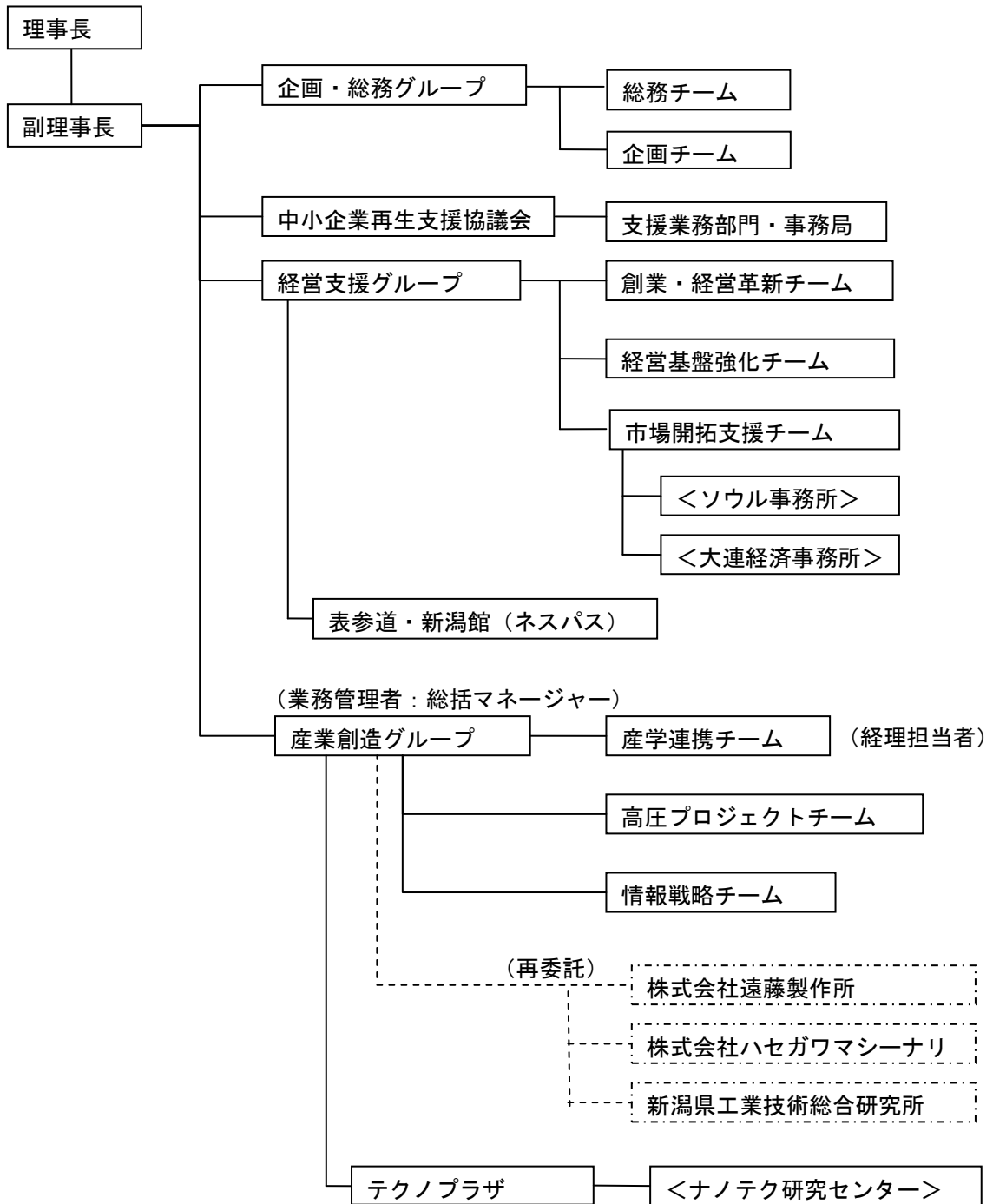
1)研究組織(全体)



2)管理体制

①事業管理者

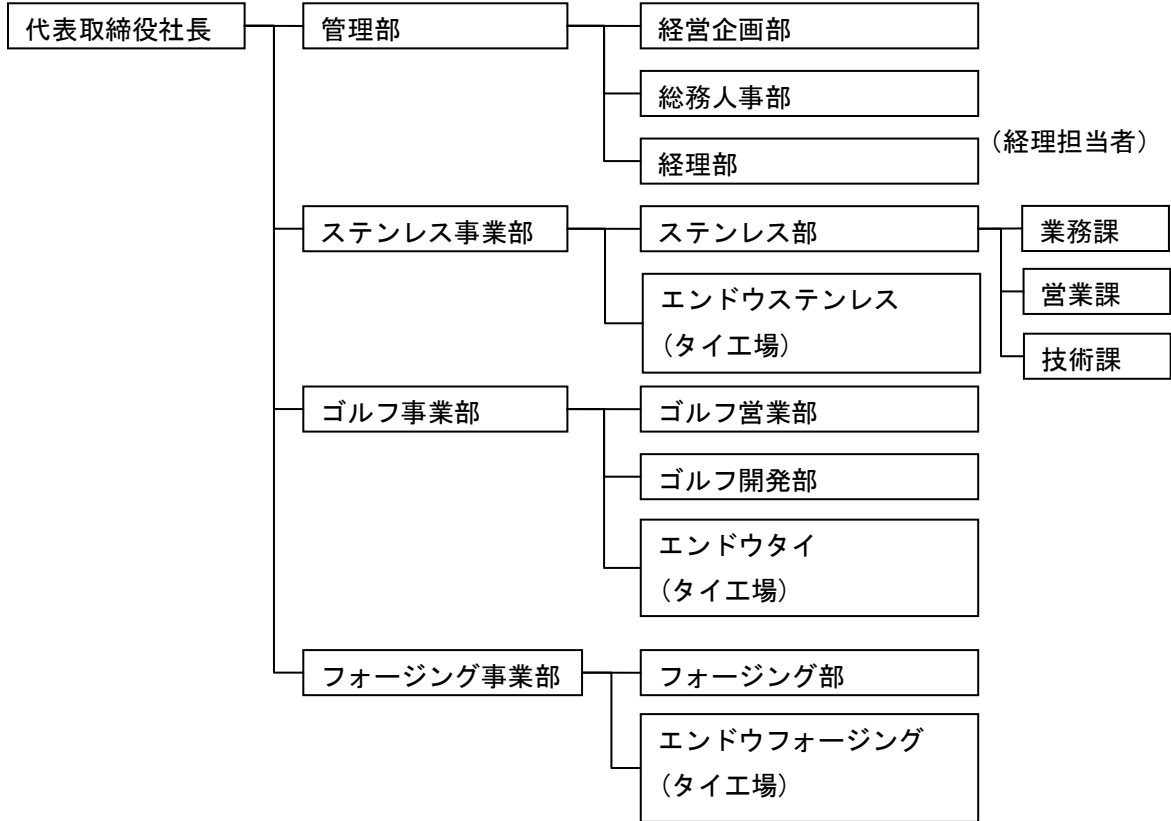
財団法人にいがた産業創造機構



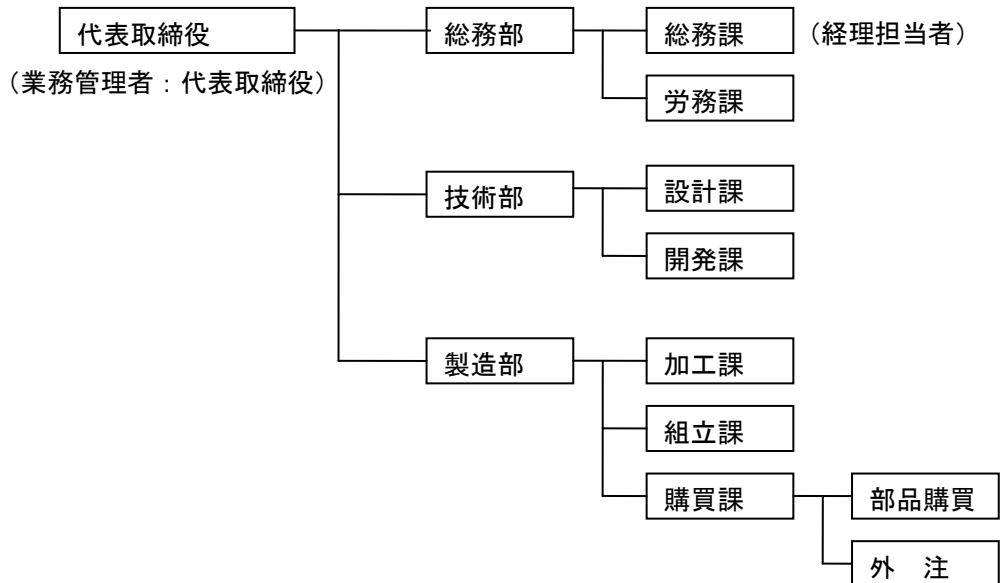
②再委託先

株式会社遠藤製作所

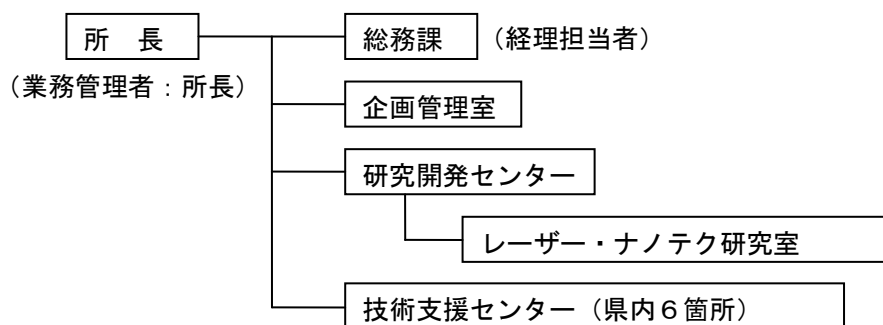
(業務管理者：代表取締役社長)



株式会社ハセガワマシーナリ



新潟県工業技術総合研究所



(2) 管理員及び研究員

1) 事業管理者 (管理員)

財団法人にいがた産業創造機構

氏名	所属・役職
杉井 伸吾	産業創造グループ産学連携チーム シニアエキスパート
平賀 恵一	産業創造グループ産学連携チーム チーフ

2) 再委託先 (研究員)

株式会社遠藤製作所

氏名	所属・役職
藤谷 茂	ステンレス事業部技術課 参事
小林 剛	ステンレス事業部技術課 副参事
内藤 瞬	ステンレス事業部技術課 技術部員
大橋 克之	ステンレス事業部技術課 技術部員

株式会社ハセガワマシーナリ

氏名	所属・役職
長谷川 博	代表取締役
長谷川 聡	技術部員
高山 公介	技術部員
笠原 静夫	技術部員
小林 勇	技術部員
高島 伸之	技術部員
佐藤 高幸	技術部員

新潟県工業技術総合研究所

氏名	所属・役職
山崎 栄一	企画管理室 室長
長谷川 雅人	研究開発センター 研究主幹
坂井 修	県央技術支援センター センター長
三村 和弘	研究開発センター 専門研究員
菅野 明宏	研究開発センター 主任研究員
本田 崇	研究開発センター 主任研究員

(3)他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

〔開発推進委員会委員〕

氏名	所属・役職	備考
藤谷 茂	株式会社遠藤製作所 ステンレス事業部技術課 参事	P L
山崎 栄一	新潟県工業技術総合研究所 企画管理室 室長	S L
長谷川 博	株式会社ハセガワマシーナリ 代表取締役	
長谷川 雅人	新潟県工業技術総合研究所 研究開発センター 研究主幹	
早川 新一	財団法人にいがた産業創造機構 産業創造グループ ディレクター	
紫竹 耕司	財団法人にいがた産業創造機構 産業創造グループ 総括マネージャー	
野原 清彦	ケイエチ・テクニカルズ 代表	アドバイザー
伊藤 洋治	元 株式会社遠藤製作所 ステンレス事業部 技術顧問	アドバイザー
渡辺 琢也	新潟県産業労働観光部産業振興課 課長	アドバイザー

1-3 成果概要

1-3-1 シミュレーション技術の開発

有限要素法の解法である静的陰解法、動的陽解法、両者を用いて、実際のスピニング加工の変形現象を再現できるシミュレーション技術を開発した。陰解法によるスピニングシミュレーションでは、モデルの部分解析等の手法を用いても、実用的な計算速度は得られない。一方、陽解法にて計算精度を保ちつつ、加工スピードの倍率設定、マススケーリング、並列処理等の好適化により陰解法に比べ計算速度が20倍以上となり、実用可能なものに仕上げた。

1-3-2 新加工法の開発

開発したシミュレーション技術を用いて、スピニング加工を基本とした新加工法の可能性を検討した。その結果、円周方向へ変形を付加する有効な加工条件を見出すことができた。また、シミュレーション技術によって新加工法に必要な制御機構、制御能力を解析し、新加工法を実現するための新加工機械を設計開発、完成に至った。開発した新加工機械は加工中の各動作部の変位量、荷重をモニタリングでき、収集したデータをもとに変形現象をシミュレーションすることで新加工法の未知なる加工条件を効率よく見出すことができた。その結果、円周方向へ変形を加えた新加工法を可能にし、従来のベルトに対し23%高い疲労強度(回転疲労強度、従来750MPa)を得ることができた。

1-3-3 残留応力の評価と活用

さらなる疲労強度向上のため、表面改質に着目し、表面あらさ、残留応力の影響について調べた。その結果、残留応力の変化がもたらす疲労強度向上への効果を見出すとともに、ベルト切り開き試験とシミュレーションを組合せた新たな残留応力の評価手法を考案した。この手法によって、より高い圧縮残留応力を付与させた新条件表面改質ベルトを開発した。このベルトは、疲労強度970MPaと高い疲労強度を示し、開発目標(疲労強度30%向上)を達成することができた。

1-3-4 ベルト端面性状の改良

ベルト端部の仕上げ状態、端面性状が疲労寿命に大きく影響を及ぼすことから、従来の切断方法、端面仕上げ方法の問題点を整理し、新たな切断方法と端面仕上げ方法の方案検討を行い、新切断装置、端面仕上げ装置を開発した。これらの開発により、高精度なベルト幅寸法と良質な端面性状を有するベルトを開発することができた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

財団法人にいがた産業創造機構

〒950-0078 新潟市万代島5番1号「万代島ビル」10F

産業創造グループ 産学連携チーム

シニアエキスパート 杉井 伸吾

チーフ 平賀 恵一

TEL 025-246-0068 FAX 025-246-0033

E-mail info@nico.or.jp

第2章 本論

2-1 シミュレーション技術の開発

スピニング加工とは、板材、管材などを回転させながら工具を周囲より押し付け、板厚を薄く伸ばしていく加工法である¹⁾。スピニング加工のイメージを図 2-1 に示す。

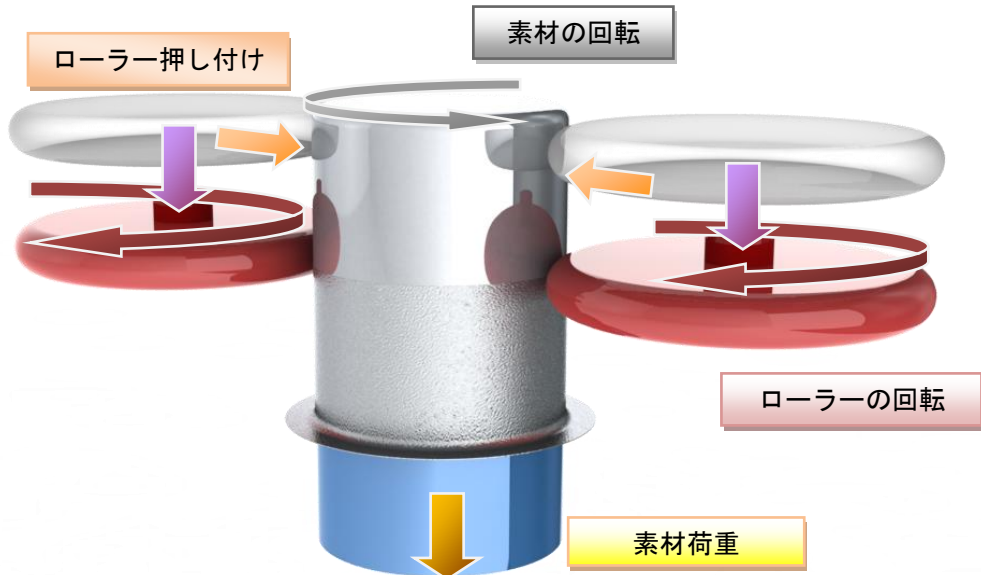


図 2-1 スピニング加工イメージ

本研究開発では、従来のスピニング加工の変形に円周方向への変形を加える新加工法を開発し、ベルトとして使用する場合に必要な円周方向の強度向上を目的としている。この新加工法の装置開発にあたり、未知なる装置の仕様・加工条件を把握することが必要であり、シミュレーションを活用して効率的に行うこととした。しかし、従来スピニング加工のシミュレーションによる解析は、つぎの理由からほとんど行われていない。

- ①解析時間が膨大： スピニング加工は加工パスの長い逐次変形による加工であり、全加工を逐一シミュレートするには多くの時間を必要とするため、実用的な課題が残る。
- ②大変形に起因する難収束性： スピニング加工では極度の板厚減少とそれに伴う伸び変形が生じる。シミュレーションではこのような大変形への追従は難しく、解を求めることが困難である。

このような課題を背景に、計算の高速化と大変形に対する計算安定化の両立を図り、実現象に近いトレース可能な、実用に耐えうるシミュレーション技術の開発を行った。

シミュレーション技術を開発するにあたり、スピニング加工に適した解析手法の検討を行った。表 2-1 に検討したシミュレーション解法およびソフトウェアを示す。

表 2-1 検討したシミュレーション解法およびソフトウェア

解法	ソフトウェア名
静的陰解法	ANSYS Mechanical
陽的動解法	ANSYS-DYNA

(1)静的陰解法によるスピニング加工シミュレーションの開発

静的陰解法は外力と変形によって生じる内力との釣り合いを求めることで、各変形状態を求める手法であり、計算精度が高く有限要素法で最も普及している手法となる。ただし、未知の最終形状を求めるには、変形が大きいほど多くの繰り返し計算を必要とする。メリットデメリットを表 2-2 に示す。

表 2-2 陰解法のメリット/デメリット

メリット	精度の保障（力の釣り合いの計算有）
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ・非線形性が強い場合、繰り返し計算が必要 ・非線形性が強い場合、計算が収束せず解が得られないことがある ・要素数の増加により メモリ、計算時間が 2 乗で拡大する

計算速度を向上させるため、変形の計算はブランクのみ行い、加工ローラーは剛体とした。併せて、モデルの対称性を利用し、加工ローラーの配置および加工ブランクの形状から図 2-2 のように全周の 1/3（120°）を解析対象とすると共に、ローラーの軸方向への移動量を 2.5mm までと解析範囲を絞り、計算モデル自体を小さくすることで計算時間の向上を図った。また、接触計算は解の収束が不安定になる原因となることから、ブランク内側のマンドレルとの接触を半径側へ食い込みの拘束と、周方向への移動のみ可という条件に置き換えることでこれを模擬した。設定した境界条件を図 2-2 に示す。

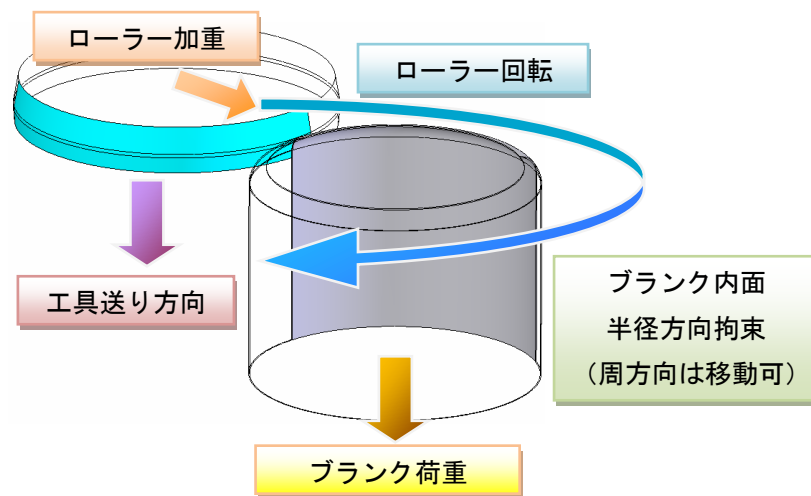
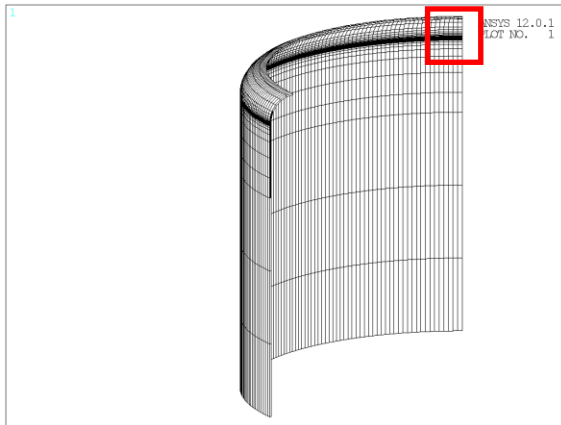
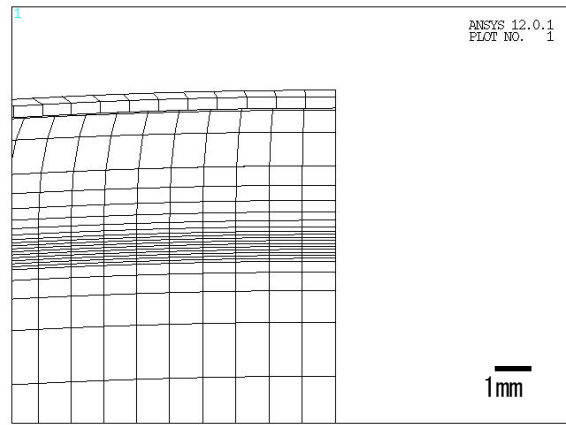


図 2-2 陰解法 境界条件

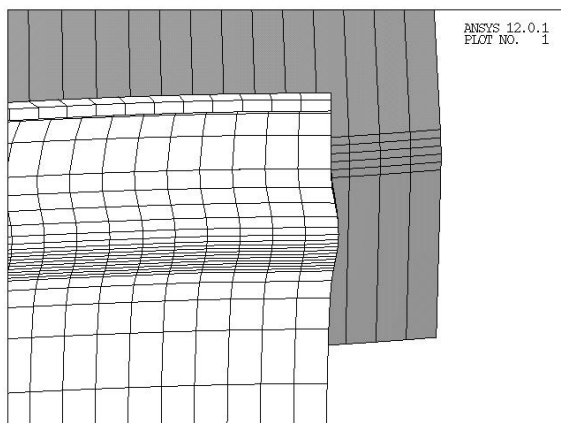
静的陰解法によって解析した加工中の変形過程の様子を図 2-3 に示す。図 2-3(b)～(f)は図(a)の赤枠で示す観察位置を拡大したもので、図 2-3(a)、(b)は初期形状、図 2-3(c)～(f)は変形後の形状である。図 2-3(c)～(f)のブランクの後ろにあるグレーの要素は加工ローラーを表し、現在の加工箇所を示す。加工が進むにつれブランクの変形している領域が拡大していることがわかる。



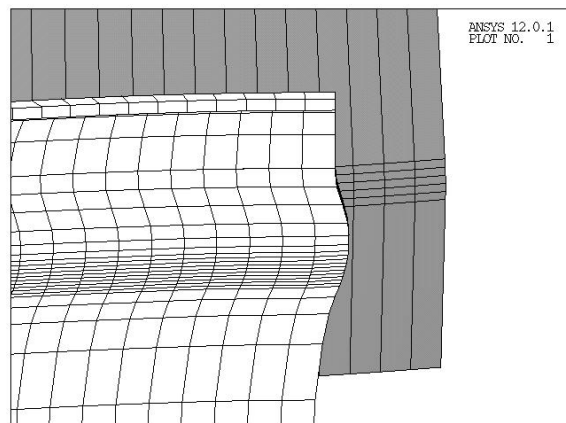
(a) 初期要素形状 (全体図)



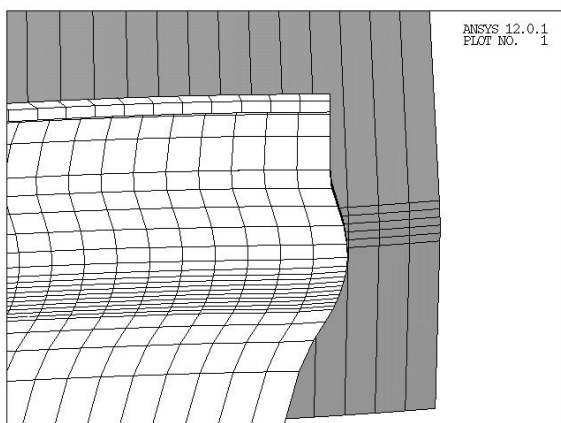
(b) 初期要素形状 (拡大図)



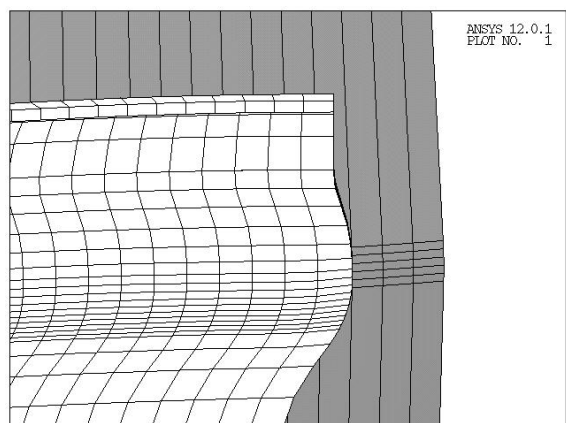
(c) 1 回転



(d) 4 回転



(e) 8 回転



(f) 12 回転

図 2-3 加工中の変形過程

シミュレーションの結果を検証するため、実加工品との外観比較を行った。比較にあたり、加工後の変形を調べるため、あらかじめ変形前のブランクにけがき線を設けてスピニング加工を行った。図 2-4(a) にスピニング加工後のブランクを示す。けがき線を視認しやすいよう、図 2-4 (b) に図 2-4 (a) のけがき線を赤くマーキングしたライン A を示す。ローラーの回転方向には変形はほとんど生じておらず、軸方向のみに伸びていることが見て取れる。図 2-4 (c) にシミュレーションの計算結果を示す。図のライン B は 120° から 360° へ拡張した表示の境界であり、実加工ブランクのけがき線と対比できる。実加工とシミュレーションの結果はよく一致しており、加工開始時に材料は加工ローラーとの接触により円周方向へわずかに変形が見られるものの周長は増加しておらず、その後は円周方向への変形もほぼなくなり、軸方向のみ伸びが発生していることがわかる。これは、図 2-3 の変形過程とも一致しており、このシミュレーション解析は、スピニング加工の変形現象を再現できたと考える。

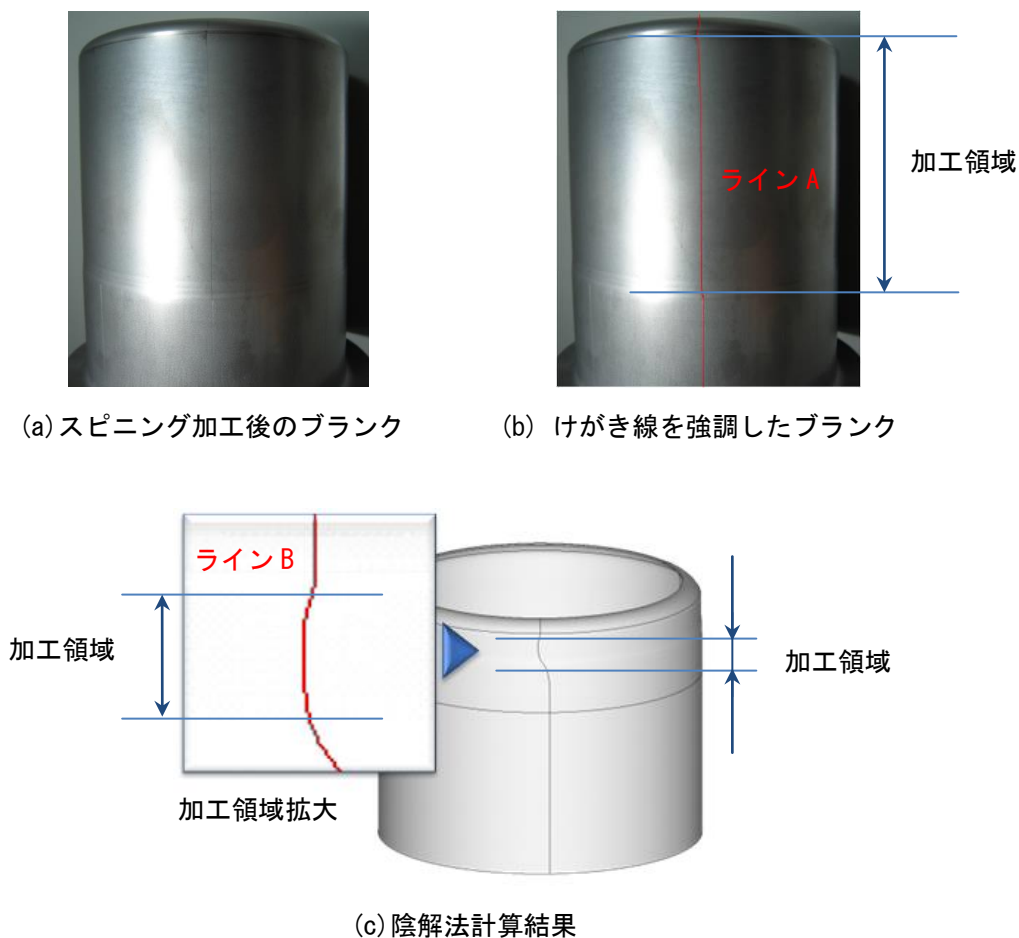


図 2-4 実加工ブランクと陰解法計算結果との比較

陰解法を使用したスピニングシミュレーションの課題として、計算の安定性に関連する接触問題が挙げられる。2 つ以上の物体の接触している状態の解を求めることは、1 つの物体での変形を求めるより解が収束しにくく、特に接触開始と離れる場合に収束性は悪化する。本研究では、計算速度を向上させることを目的に全周の 1/3 を計算対象としているため、エッジ部でのローラーとの接触無→有/有→無の変化は避けられない。この問題を回避するにはフルモデル化が有効であるが、モデルサイズ拡大により計算時間が 2 乗で増すことが問題となる。現時点において、モデルを簡略化しているにも関わらず、2.5mm のスピン量に対し、約 160.3 時間の計算時間を必要としていることから、これ以上の解析時間の増

大は望ましくない。また、実加工では、加工条件によっては周方向への膨らみが起こる場合もあり、新加工法の加工条件を検討するにはマンドレルとの接触も考慮する必要がある。その結果、現計算モデルに比べ計算時間の増大と解が収束しなくなる可能性が高い。以上の検討により、陰解法による実用的な新加工法の検討は難しいと考える。

(2)動的陽解法によるスピニング加工シミュレーションの開発

動的陽解法は、変形の進捗を多くのステップに分け、微小な1ステップの計算では十分な精度で線形問題と見なしうるようにすることで、力の釣り合いを求めず1回の計算で解を求める計算方法である。²⁾ メリットデメリットを表2-3に示す。

表 2-3 陽解法のメリット/デメリット

メリット	<ul style="list-style-type: none"> ・ 計算の安定性（力の釣り合いの計算なし） ・ モデルサイズとメモリ/計算時間の増大は比例
デメリット	<ul style="list-style-type: none"> ・ 力の釣り合いを保障しないため計算精度の確認が必要 ・ モデルサイズに依存した時間ステップの制限

陽解法では、材料のヤング率、密度から求まる弾性波伝搬速度とモデルを構成する要素の代表長さから、1ステップの計算で進められる時間ステップの大きさ Δt が決まる。ここで、モデルの寸法が小さい場合や解析対象の時間 t が大きいと、 t に比べ Δt が小さくなり、多くの計算時間が必要となる。³⁾ そこで、通常計算速度を向上させるため表2-4の手法が用いられる。

表 2-4 陽解法における計算速度向上の手法

手法	効果
加工速度の倍率変更	倍率だけ計算時間を短縮できる
材料質量の増加	時間ステップ Δt を大きくできる

これらの手法を活用することで、陰解法による計算では時間がかかりすぎてしまうスピニングシミュレーションも実用的な時間、コストで行える可能性がある。ただし、過剰な加速度の影響により計算の不安定、変形形状の相違等が現れる可能性があり、さらに力の釣り合いも保証されておらず、計算結果の検証が必要となる。

陰解法から抽出された課題から、陽解法での解析モデルは 360° とし、実加工と同様マンドレルとの接触を考慮して計算を行った。設定した解析モデルを図2-5に示す。陰解法と同じく、工具である加工ローラー、マンドレルは剛体とし、加工条件はスピニング加工の実加工条件に基づいて設定した。ただし、実成形条件の成形速度では、スピニング加工における Δt が小さいことから多くの時間が必要となることが想定される。そこで、計算時間の短縮をねらいローラーの回転速度と送りフィードの関係は保ったまま、加工速度を100、250、500倍にて検討した。

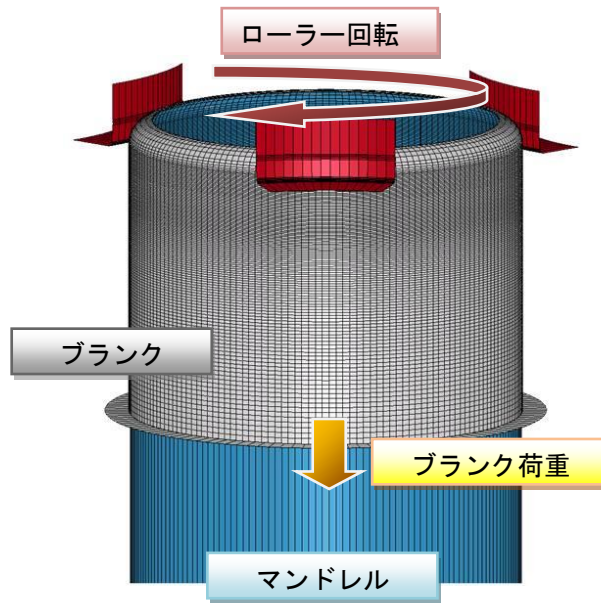
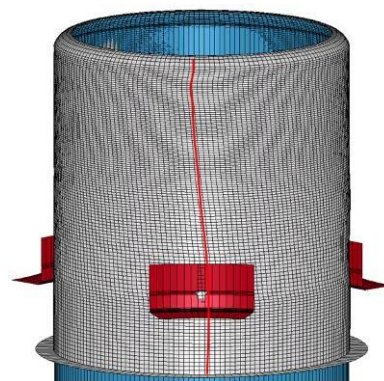


図 2-5 陽解法 解析モデル

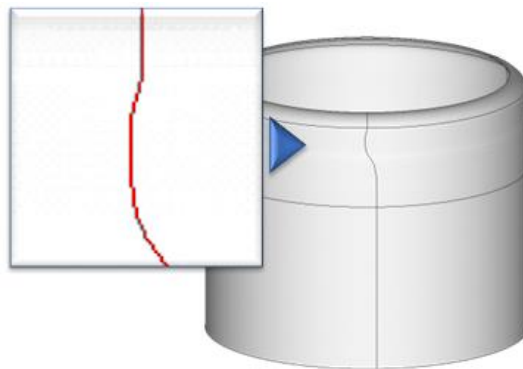
シミュレーションの結果を検証するため、陰解法の確認と同様に実加工品との外観比較を行なった。図 2-6(a)にけがき線を強調したブランク（実加工品）、図 2-6(b)に陽解法での 250 倍での計算結果、図 2-6(c)に参考として陰解法での計算結果を示す。陽解法での検証はモデルを構成する要素の形状とけがき線との対比で行なった。



(a) けがき線を強調したブランク



(b) 陽解法計算結果（加工速度×250）



(c) 陰解法計算結果

図 2-6 実成形ブランクと陽解法計算結果の比較

加工速度の倍率変更の影響は、100倍、250倍ともに収束性に問題なく計算は終了したが、500倍では加速度の影響が大きく、要素が部分的に極端な変形を起こしてしまい、最後まで計算させることができなかった。計算精度の検証については、実成形ブランク、陰解法、陽解法ともに同じような変形であり、前節陰解法での確認と同様、材料の流れを陽解法でも再現できると考える。計算時間については、25.6mm スピン量に対し100倍時に約70.7時間、250倍時に27.2時間と陰解法に比べ大幅な計算速度の向上を図ることができた。100倍、250倍の変形形状に差はないことから、250倍へ速度を上げたことによる計算精度の低下は生じないと考える。以上の検討より、計算速度の向上と安定性および計算精度の確保を考慮し、加工速度倍率の設定は250倍とした。

もう一点陽解法の計算時間の課題として、 Δt が要素の代表長さに起因しているため、微小なモデルに対して Δt も小さくなってしまふことが挙げられる。スピニング加工では変形が進むにつれて板厚は減少し、 Δt は計算開始の大きさに比べ小さくなるため、計算時間が長くなることは避けられない。そこで選択的に板厚の薄い要素のみ質量を増すことで、 Δt が小さくなることを防ぐ、マススケーリング（以下MS）手法について検討した。スピニング加工におけるMS処理は意図的に加工終了部の密度を増すことであり、その結果本来の重量バランスとは異なるモデルになることから、計算精度には十分注意する必要がある。このことからMS設定の有無による計算精度と計算に必要な時間の変化について調べた。表2-5にMS設定の有無による計算時間の変化を示す。

表 2-5 MS 設定有無による計算時間の変化

設定	加工後の板厚 (mm)	MS 制限時間ステップ	時間 (hour)
第1工程 MSあり	1.5	1e-8	27.2
第1工程 MSなし	1.5	-	28.4
第2工程 MSあり	1.0	0.72e-8	42.4
第2工程 MSなし	1.0	-	60.7

計算時間の違いから、板厚が薄くなる第2工程でMSの効果は大きいことがわかる。表2-5設定時の変形後の形状を相当塑性ひずみ分布の表示とともに図2-7に示す。図2-7より変形形状、相当塑性ひずみ分布および計算安定性に差は見られないことから、新加工法の検討は表2-5のMS時間の設定にて行うことにした。

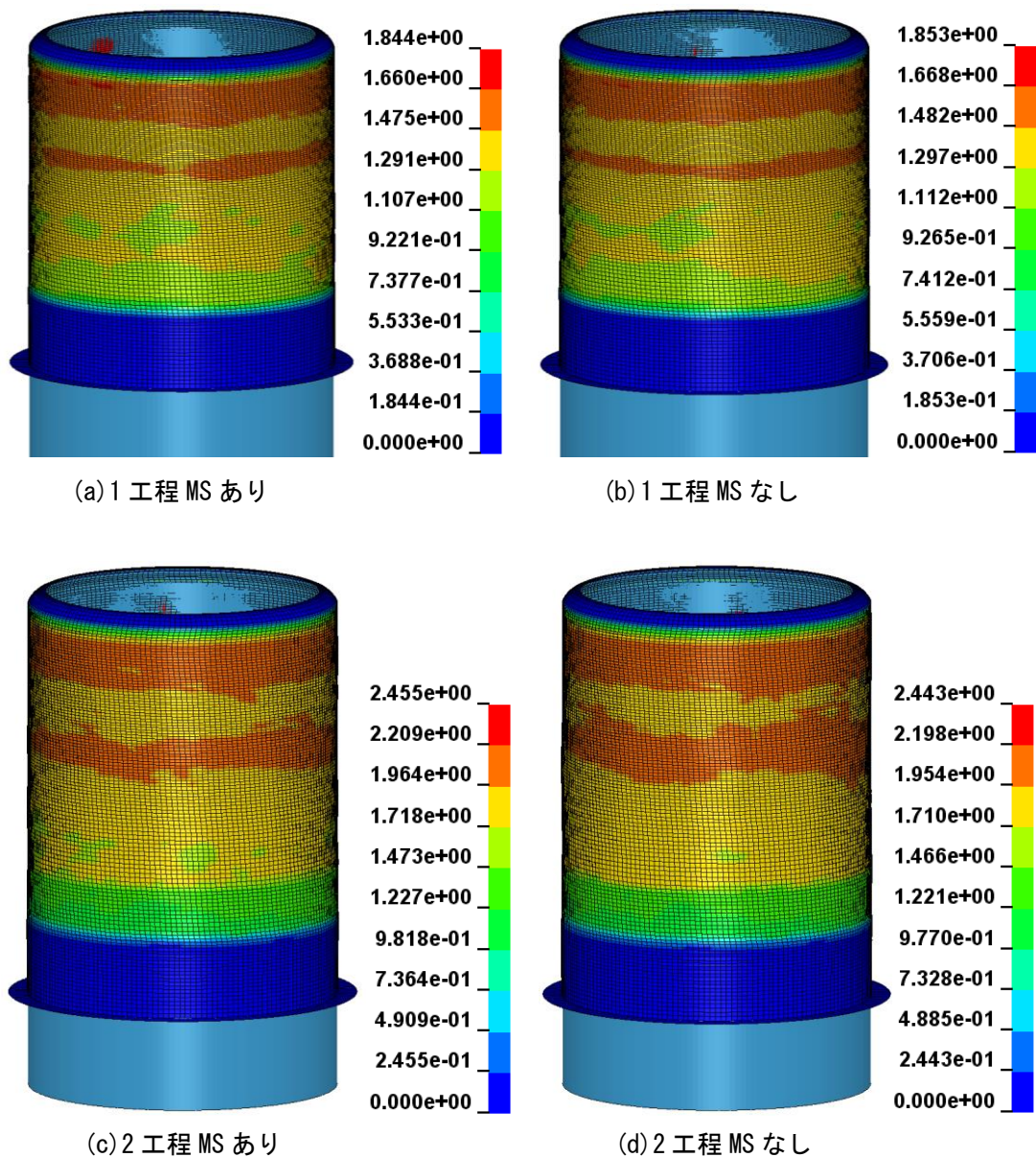


図 2-7 MS 設定時の変形形状

陰解法、陽解法、2つの解析法ともに、実際の加工と同様の変形を再現できるシミュレーション技術を開発することができた。陰解法によるスピニング加工シミュレーションでは、モデルの部分解析等の手法を用いても実用的な計算速度は得られない。一方、陽解法にて計算精度を保ちつつ、加工スピードの倍率、MS、並列処理の検討により、陰解法に比べ20倍以上の計算速度となり、実用可能なシミュレーション技術を確立した。

参考文献

- 1) 日本塑性加工学会編, 「回転加工」, コロナ社, p.142-149
- 2) 後藤學, 「実践 有限要素法 ー大変形弾塑性解析ー」 コロナ社, p.73-74
- 3) 「ANSYS/LS-DYNA セミナー」 サイバネットシステム社, p.15-17

2-2 新加工法の開発

従来のスピニング加工において、変形はほぼ軸方向のみであるが、新加工法は円周方向への変形を与えてベルトに必要な強度を向上させるものである。しかし、このような加工は装置の構成の複雑さや加工条件が不明であり、前節で確立したシミュレーション技術を用いて加工機の仕様や設計、および加工条件の把握を行った。

図 2-8(a)は新加工法による変形形状、(b)は参考比較として従来のスピニング加工の変形形状を示す。(b)については円周方向への変形はほとんど生じていないが、新加工法の(a)では円周方向への変形が見られる。ただし、シワがスピニング加工後の領域に生じており、新加工法ではシワ防止対策が必要である。

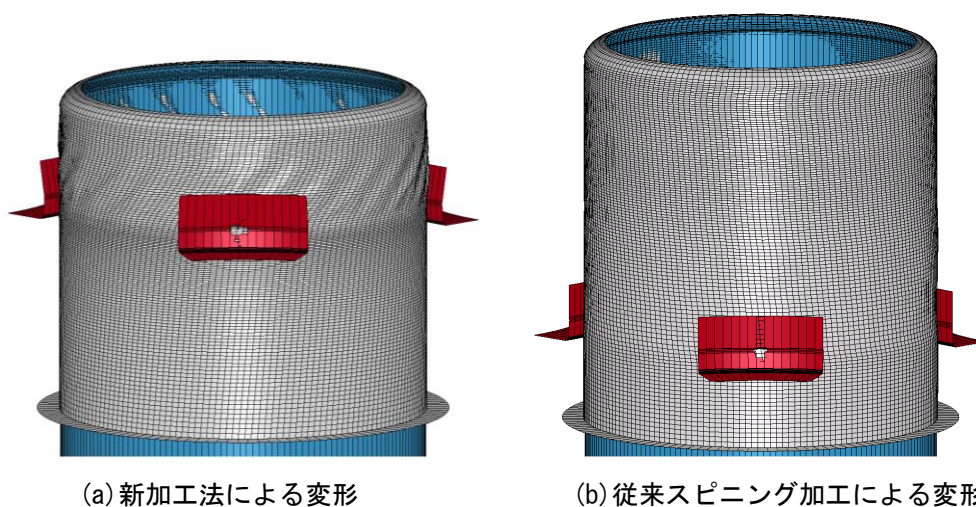


図 2-8 変形形状の比較

前節のシミュレーション結果から、スピニング加工は加工ローラーの通過に伴い材料が逐次変形を繰り返していることを示した。したがって、新加工法におけるシワの発生は、加工ローラー通過時に変形を受けるその周辺の材料が円周方向に膨らむことによると考える。そこで、この膨らみを抑さえるためのシワ抑え機能を備えた加工ローラー形状について調べた。

そのシミュレーション結果を図 2-9 に示す。従来型加工ローラーでシワが発生する加工条件でも、改良型加工ローラーを用いることでシワの発生が抑制されている。適切な工具形状を選択することでシワ抑制効果があることがわかった。

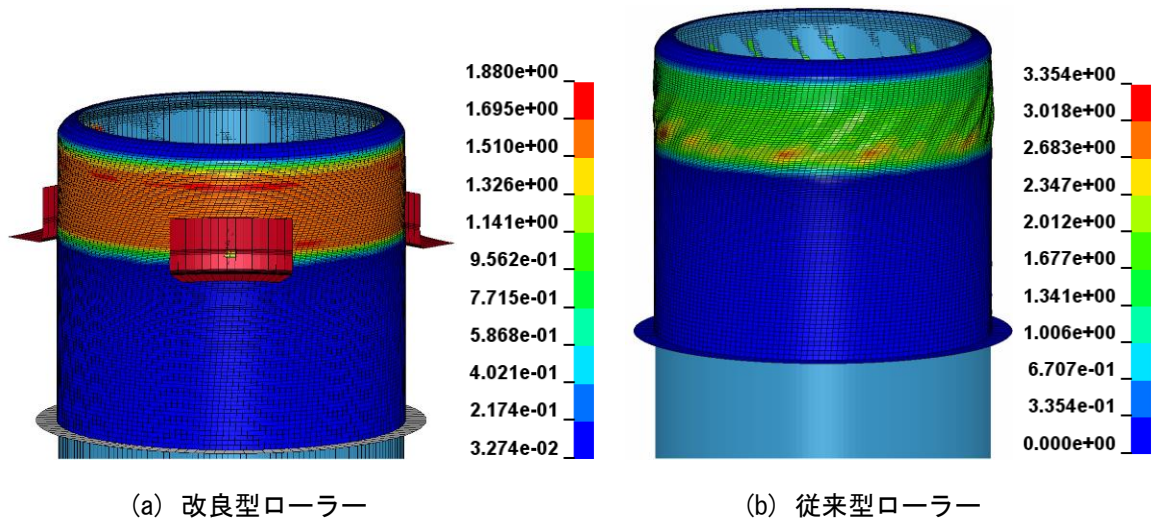


図 2-9 ローラー形状検討結果

次に、加工ローラーの回転速度、回転方向、送り速度、ブランク荷重等、新加工法における有効な加工条件について調べた。その結果、1工程、2工程ともにシワが発生することなく、円周方向へ変形を付与できる加工条件を見出すことができた。その変形の様子を図 2-10 に示す。

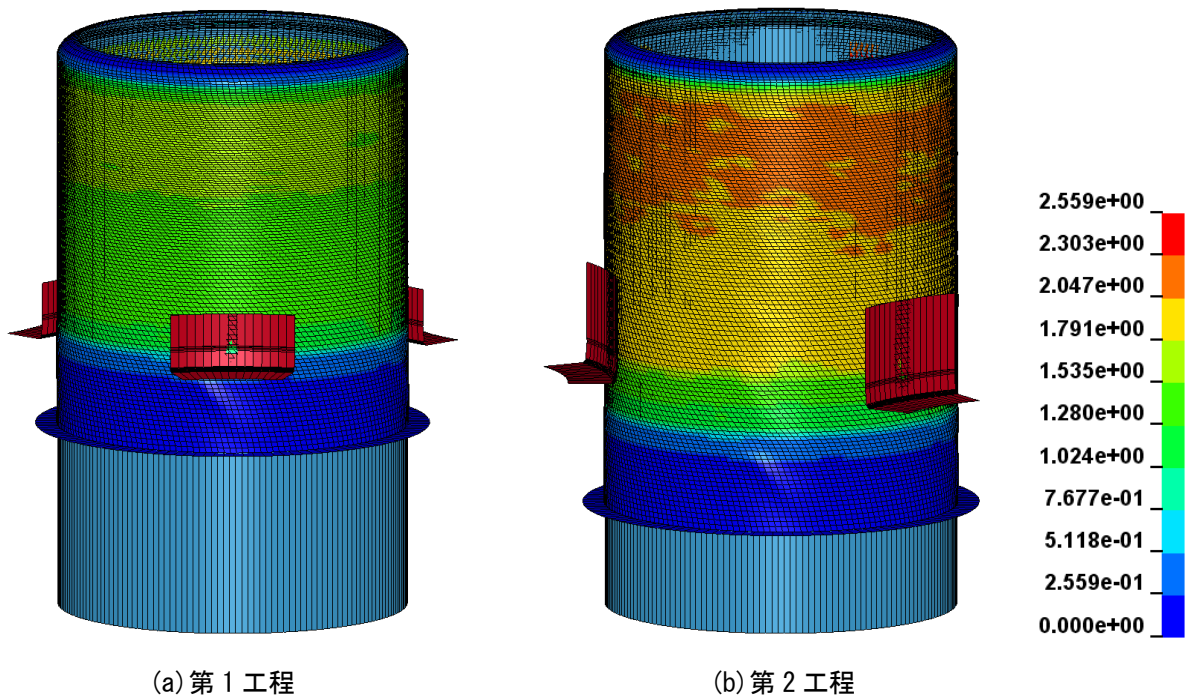


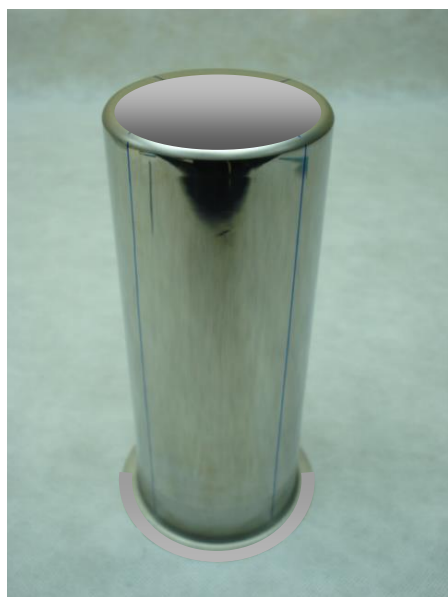
図 2-10 新加工法における加工条件検討結果

シミュレーションによって新加工法に必要な制御機構、制御能力を把握し、これをもとに新加工機械を設計開発した。図 2-11 に開発した加工機を示す。



図 2-11 開発した新加工機

マンドレル上下動作制御、ローラー回転制御、ローラー押し付け制御等は、デジタル式制御とし、また、ブランク荷重制御類にはロードセルと表示モニターを備え、加工中の各動作部の変位量、荷重のモニタリングが可能である。モニタリングによって収集されたデータをもとに変形をシミュレーションすることで、新加工法の未知なる加工条件を効率的に把握することができた。新加工機械によってスピニング加工された加工試験品を図 2-12 に示す。



(a) 従来工法のスピニング加工品



(b) 新加工法によるスピニング加工品

図 2-12 新加工機械による加工試験品

次に、新加工機械による加工品の機械的性質等について調べた。従来工法のスピニング加工品の表面組織を図 2-13 に、円周方向に変形を加えた新加工法によるスピニング加工品の表面組織を図 2-14 に示す。従来工法のスピニング加工品では加工ローラーの通過した跡であるスピン目（周方向）と、それと垂直方向（軸方向）にメタルフローが観察される。一方、新加工法によるスピニング加工品のメタルフローは、軸方向に対し 20°程度傾斜しているのが観察される。

図 2-15 に引張試験で破断した試験片を示す。従来工法のスピニング加工品の引張試験破断サンプルは、引張方向に対してほぼ垂直方向に破断しているのに対し、新加工法によるスピニング加工品は、やや傾斜した方向に破断している。これらはいずれもメタルフローと近い方向に破断面があることから、引張試験における破断はメタルフローの方向に進展しやすいことがわかる。

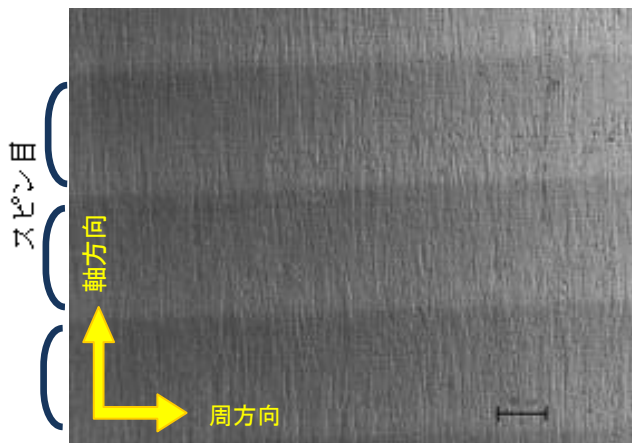


図 2-13 従来工法 表面組織

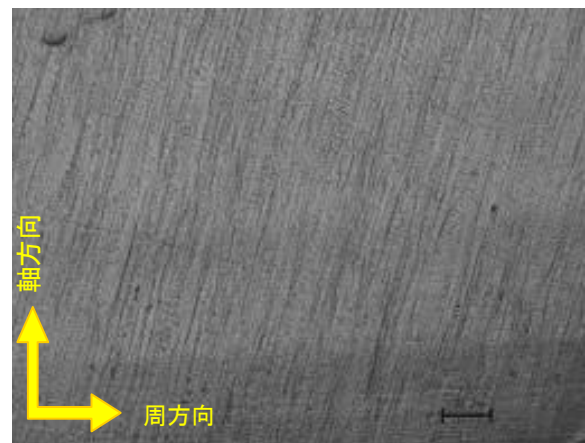


図 2-14 新加工法 表面組織

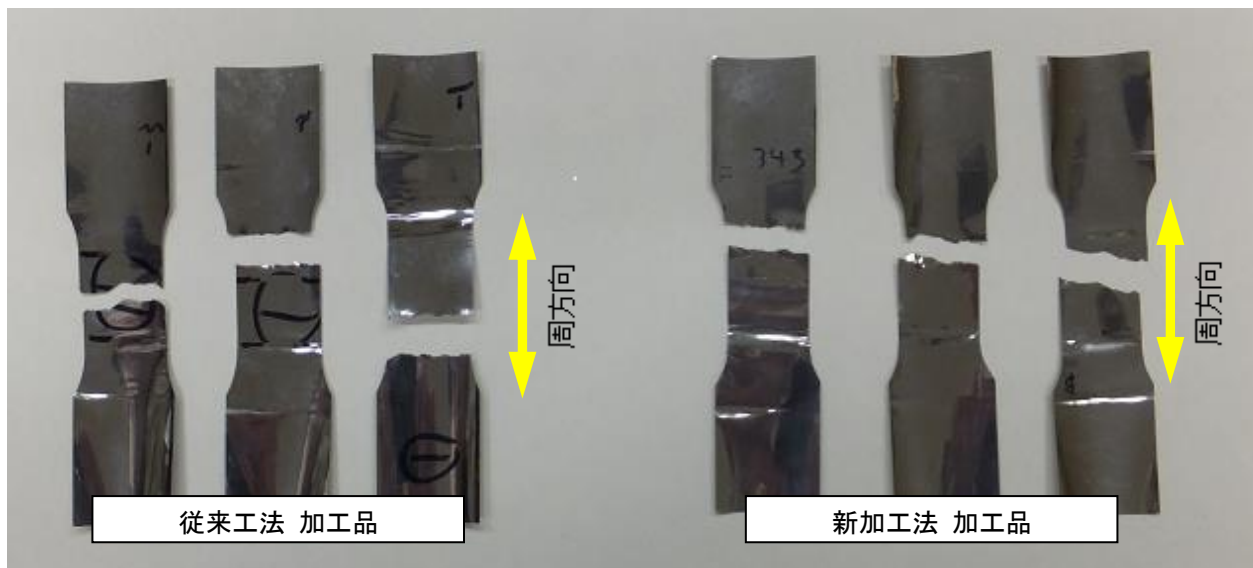


図 2-15 引張試験で破断した試験片

新加工法によるスピニング加工品の引張試験及び硬さ試験結果を、従来加工機でのスピニング加工品（従来加工法）と比較して表 2-6 に示す。耐力、引張強度、硬さとも従来加工法に比べわずかに上昇しているが、静的な強度において新加工法の効果は明確には確認できなかった。

表 2-6 引張試験及び硬さ試験結果

加工法	耐力 (MPa)	引張強度 (MPa)	硬さ (HV)
従来工法加工品	1578	1754	446
新加工法加工品	1598	1829	473

折り曲げ試験の 180°折り曲げ状態を観察した結果を図 2-16 に示す。それぞれについて、曲げ頂辺部分をレーザー顕微鏡で観察するとともに横断面を金属顕微鏡で観察した。円周方向へ折り曲げることで折り目は軸方向となっている。従来工法の加工品は曲げ頂辺付近に複数の大きな亀裂が入っており、前述のメタルフローと方向が一致している。横断面写真では組織繊維が破断されている様子がわかる。これに対して新加工法の加工品は、曲げ頂辺付近に斜めに亀裂が見られるものの連続的につながっておらず、従来工法の加工品ほどの大きな亀裂にはなっていない。また、横断面写真を見ても組織繊維の破断は比較的少ない。新加工法の加工品はメタルフローが斜め方向となり、ベルト使用時の曲げ頂辺方向と角度差が生ずるため、亀裂が進展しにくくなっていると考えられる。

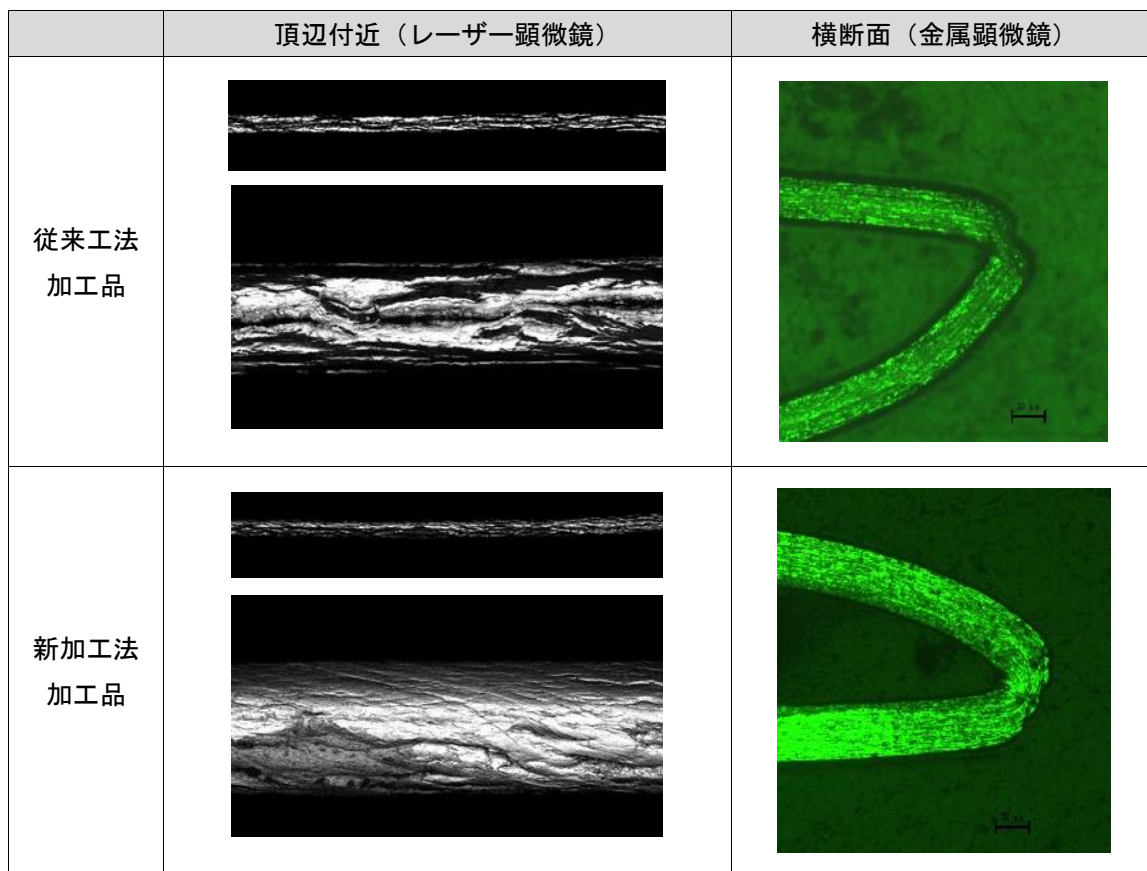


図 2-16 180° 折り曲げた時の頂辺付近と横断面

新加工法によりスピニング加工されたベルトについて回転疲労試験を実施し、その疲労特性について調べた。その結果、円周方向に変形を付与したことによる疲労強度の向上が認められた。回転疲労試験結果を図 2-17 に示す。

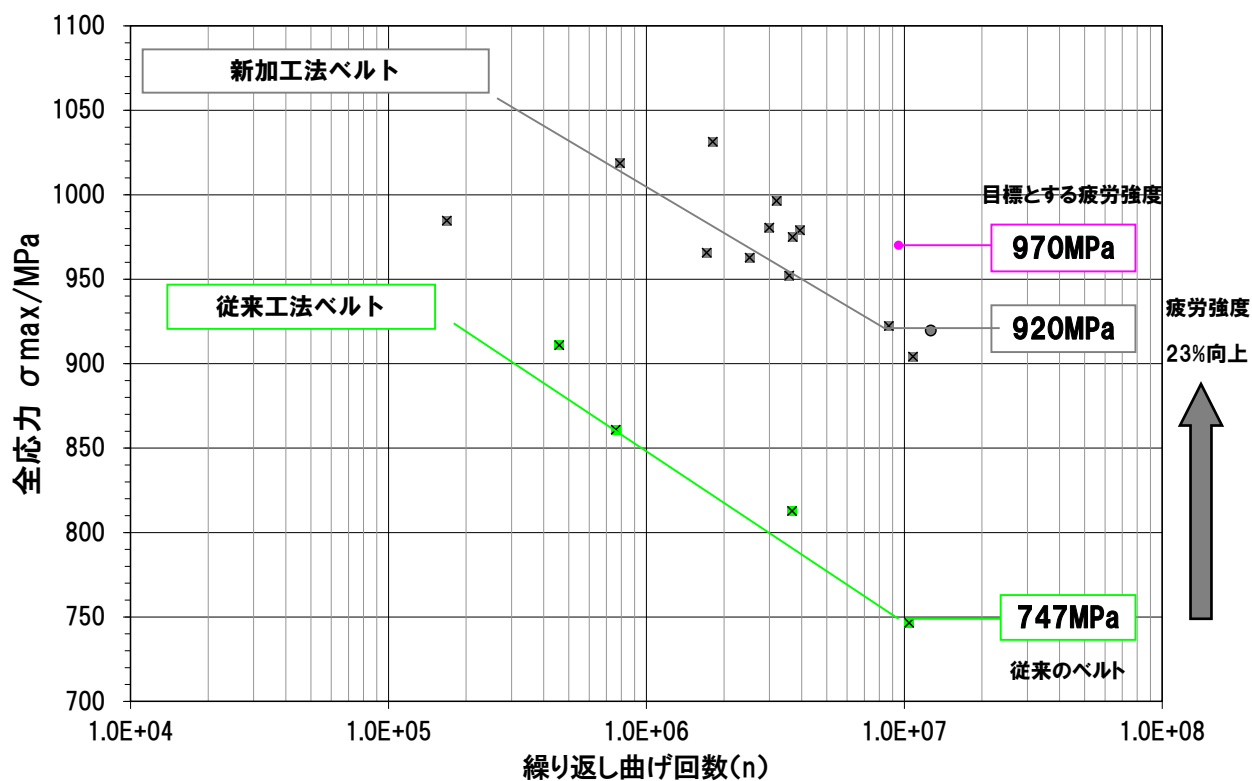
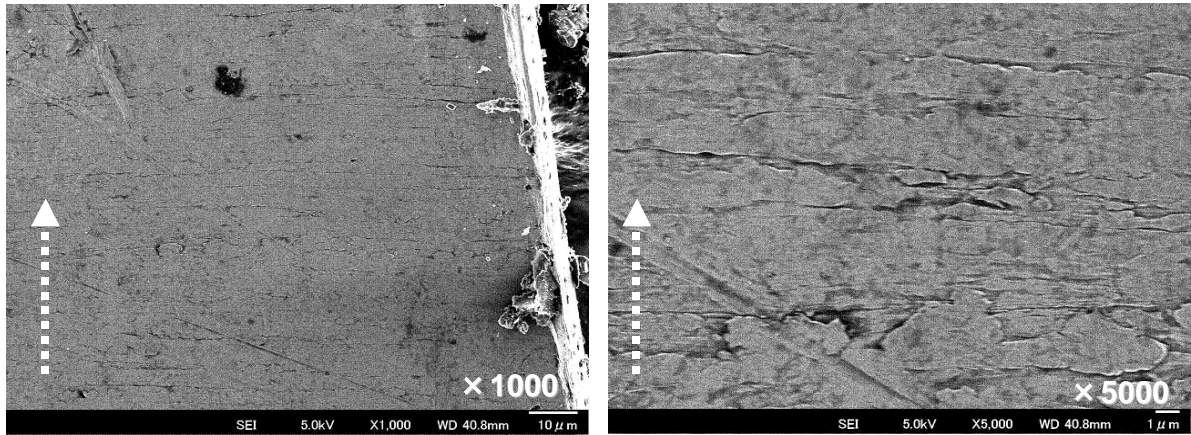


図 2-17 新加工法スピニング加工品 回転疲労試験結果

新加工法によるベルトの疲労強度は 920MPa であり、目標とする疲労強度 970MPa に到達しなかったものの、従来ベルトの疲労強度 747MPa に対し 23%の向上が認められた。これにより、開発された新加工法は、疲労強度向上に対して有効な加工法であると考えられる。

2-3 残留応力の評価と活用

ベルト表面のSEMによる観察結果を図2-18に示す。スピニング加工された表面には、軸方向に伸びるマイクロクラックが数多く存在していることが確認された。このマイクロクラックはベルトの回転方向と直行しており、回転疲労における割れ、破断の起点となり疲労寿命向上の妨げになっていると考えられる。そこで、表面改質によりマイクロクラックの除去を試み、その効果について調べた。ベルトの表面改質前後の状態を図2-19に示す。



*** 写真中の破線矢印はスピニング方向を示す**

図 2-18 SEMによる表面観察結果

	表面状態【400倍】	ベルト外観状態
表面改質前 (スピニング加工表面)		
表面改質後		

図 2-19 表面改質前と改質後の状態

表面改質した表面は、極わずかにマイクロクラックが残るものの、表面改質前に見られた大きなマイクロクラックが除去されている。また、ベルト外観状態を見ると、表面改質前は軸方向の残留応力によって円形状を保持できなかったが、表面改質後は円形状が保持されている。これは残留応力によるものと考えられ、改質により残留応力の変化が生じたと考えられる。

表面改質したベルトについて回転疲労試験を実施し、その効果を調べた。その結果を図 2-20 に示す。

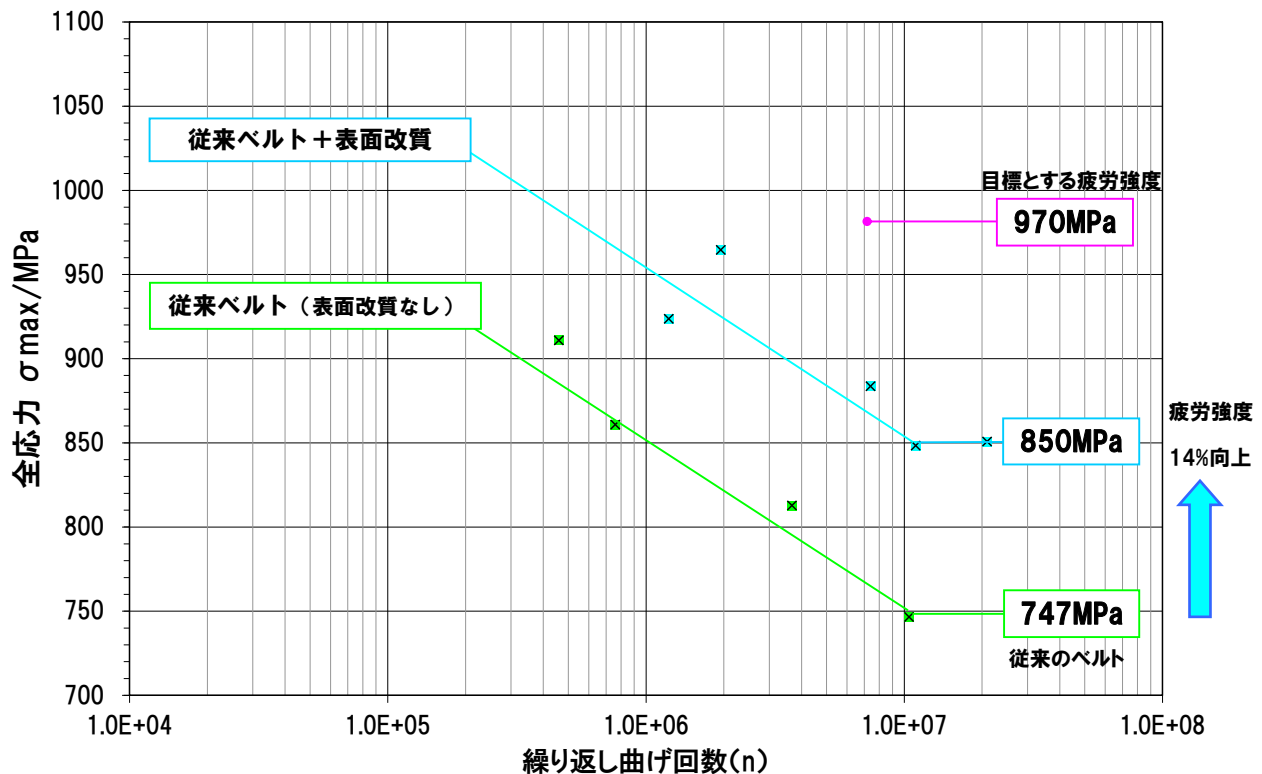


図 2-20 表面改質ベルト 回転疲労試験結果

表面改質したベルトは従来のベルトに対し約 14%高い 850MPa まで疲労強度が向上した。これは、表面改質によって破断の起点となり得るマイクロクラックの減少、または、残留応力の変化によるものと考えられることから、残留応力の変化について調べることにした。

ベルト表面の残留応力を評価するため X 線を用いた測定を試みたが、ベルトが 30 μm と薄くスピニング加工により強加工を受けているため、測定結果に大きなバラつきが生じ、妥当な測定が困難であった。そこで、切り開き試験とシミュレーションの組み合わせによるベルト残留応力の評価手法を検討した。評価手法のイメージを図 2-21 に示す。

本研究では、ベルトの切断 (切り開き) に伴う変形は、残留応力の解放によって起こったものであり、残留応力が応力解放後の形状に反映されると考え、円筒形状のベルトを軸方法に切断した後の形状を初期形状 (残留応力なし) としてモデル化し、もとの円筒形状に変形させたときに生ずる応力をシミュレーションにより求め残留応力とした。

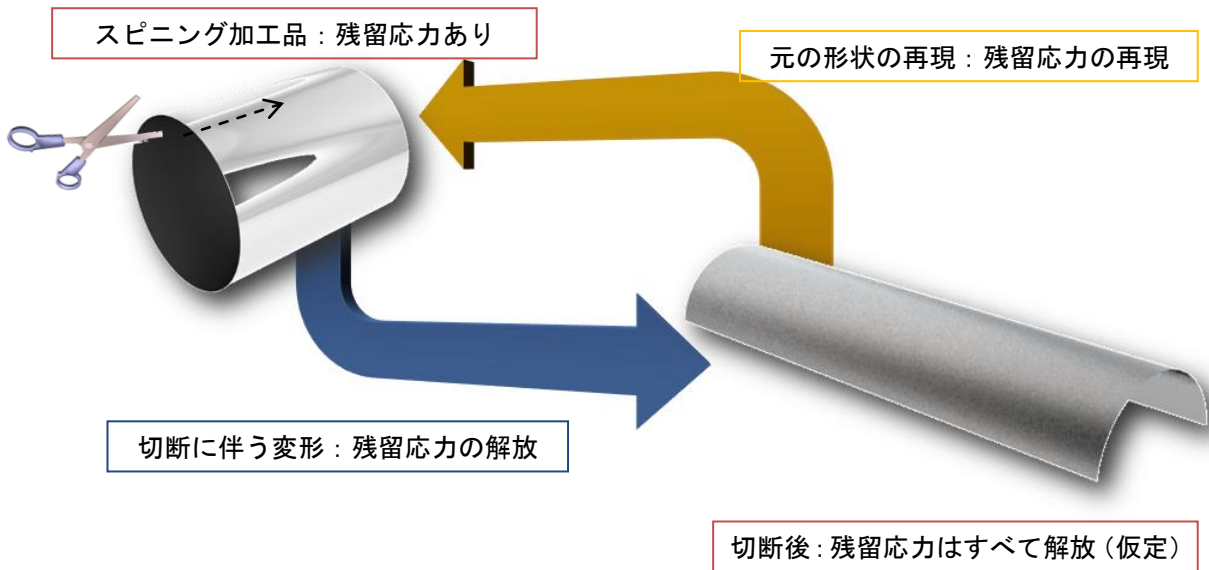


図 2-21 残留応力の評価イメージ

切り開き試験結果を図 2-22 に示す。従来ベルトは、円周方向については円筒が開き、軸方向については外側に反り返るように変形が生じている。一方、表面改質したベルトは、軸方向にズレを生じながら円筒が内側に丸まるように変形した。この切り開き後の変形の様子からも、表面改質による残留応力の変化は大きいことがわかる。



図 2-22 切り開き試験結果

図 2-22 に示すような切り開き後の形状から計算モデルを作成した。計算モデル例を図 2-23 に示す。



図 2-23 計算モデル例

前述した、図 2-22、図 2-23 に示す切り開き後の形状をもとに求めたベルト外表面に発生する残留応力について、主応力ベクトルを図 2-24 に示す。どちらのサンプルについても周方向、軸方向に残留応力が発生していることがわかる。

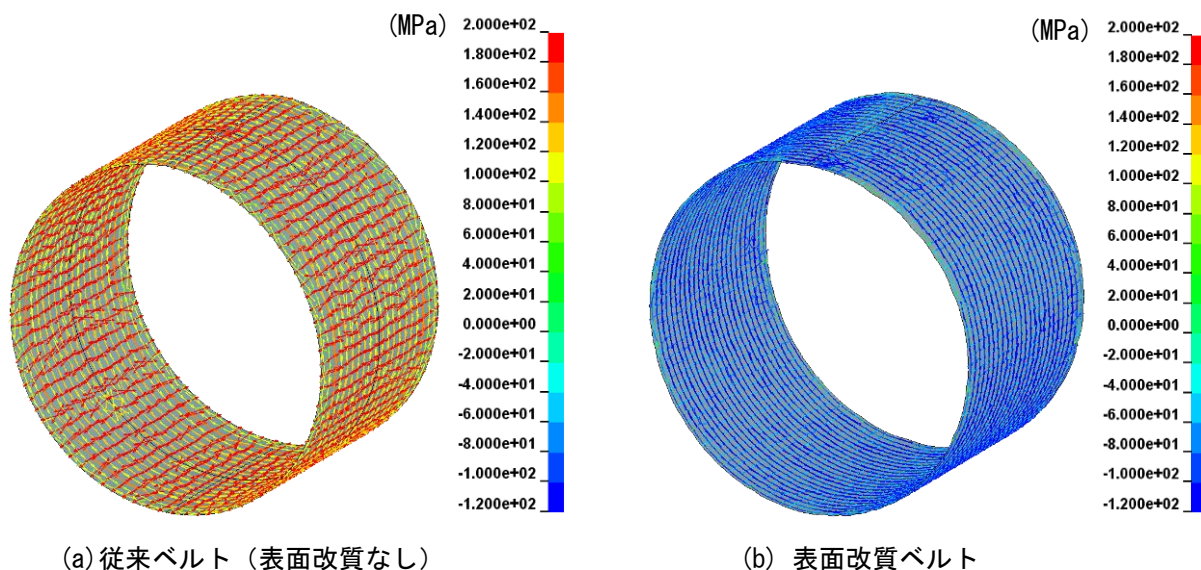


図 2-24 残留応力の主応力ベクトル例

表 2-7 に外表面の残留応力の値を示す。正の値は引張応力、負の値は圧縮応力を示している。従来ベルトは周方向、軸方向ともに引張の残留応力が発生している。これに対し表面改質ベルトの周方向残留応力は、表面改質により引張ではなく圧縮応力となっている。計算により求めた従来ベルトおよび表面改質ベルトの表面残留応力の違いは、それぞれ切り開き試験におけるベルトの変形の向きに一致している。

表 2-7 残留応力評価結果

サンプル名	周方向残留応力 (MPa)	軸方向残留応力 (MPa)
従来ベルト	130	200
表面改質ベルト	-90	-45

シミュレーションによる残留応力評価結果より、周方向の残留応力が圧縮側であれば疲労寿命が大きくなると考え、より大きな圧縮残留応力が発生する表面改質条件の調査、試験を進め、新条件による表面改質ベルトを試作した。このベルトについて、残留応力評価および回転疲労試験を行い、その効果を調べた。シミュレーションによる残留応力評価結果を表 2-8 に、回転疲労試験結果を図 2-25 に示す。

表 2-8 新条件表面改質ベルト残留応力評価結果

サンプル名	周方向残留応力 (MPa)	軸方向残留応力 (MPa)
従来ベルト	130	200
表面改質ベルト	-90	-45
新条件表面改質ベルト	-120	-75

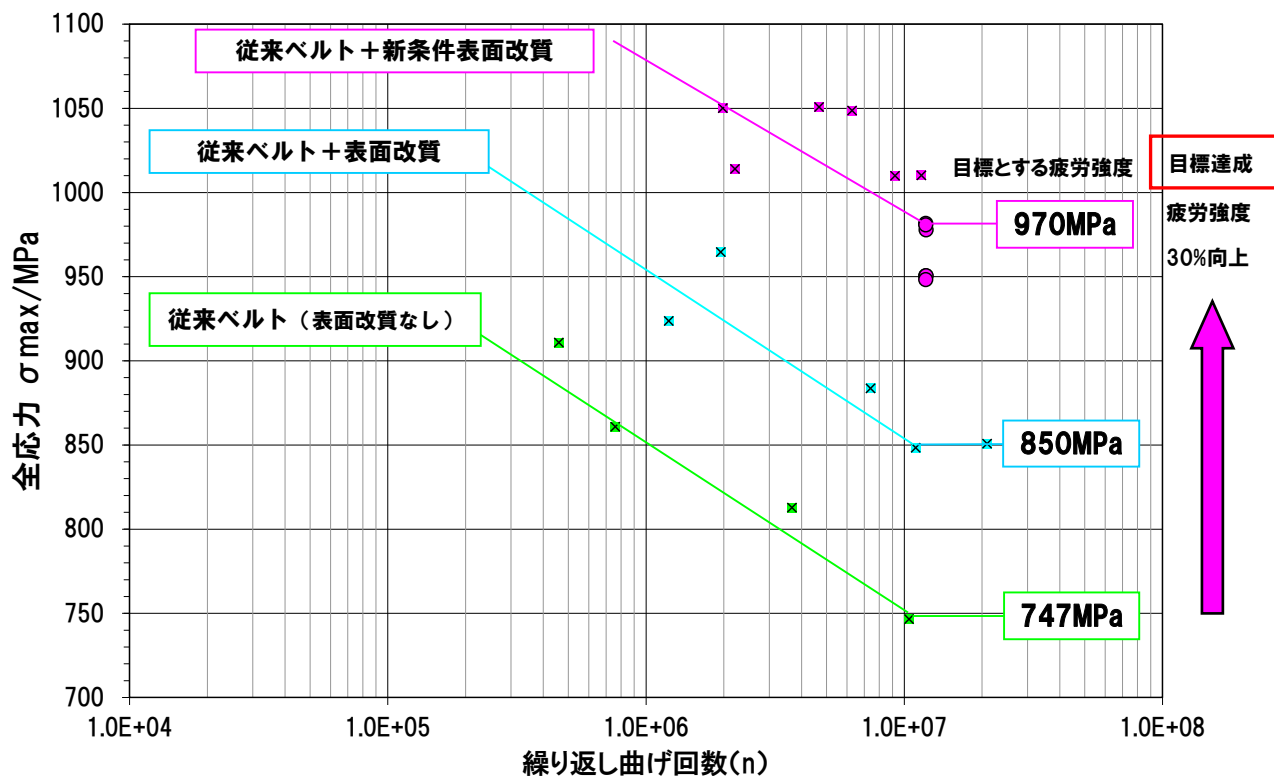


図 2-25 新条件表面改質ベルト 回転疲労試験結果

シミュレーションによる残留応力評価によって導かれた新条件表面改質ベルトは、疲労強度 970MPa と高い疲労強度を示す結果となった。従来ベルトに対し 250MPa の圧縮応力付与が、230MPa の疲労強度向上として結果に現れ、ベルトの残留応力が疲労強度に影響を与えていることが実証された。また、本開発ベルトの疲労強度 970MPa は、本研究開発の目標であり、疲労強度 30% 向上の開発目標を達成することができた。

2-4 ベルト端面性状の改良

基礎試験における引張疲労試験によって、端部の仕上げ状態、端面性状が疲労寿命に大きく影響を及ぼすことが明らかになった。従来のベルト切断方法とベルト端面仕上げ方法では寸法精度、端面仕上がり状態が安定しないといった問題があり、これらの問題を解決し疲労寿命の安定化を図ることを目的に、新たな切断方法と端面仕上げ方法の開発を行った。

新切断方法の開発にあたり①カッター形式と切断方式、②ブランクのクランプ方式、③切断寸法の高精度化、安定化について検討するとともに事前切断テストを行い、新切断装置を開発、完成させた。一方、端面仕上げ方法の開発は、①切断によって発生するバリの除去、②ベルト端面形状をラウンド状に成形し、端部からの破断防止効果を付加させる、③端面仕上げ時間の短縮、端面仕上げ状態の安定化、を目的に方案検討を行い、端面仕上げ装置を開発、完成させた。完成した新切断装置を図 2-26 に、端面仕上げ装置を図 2-27 に示す。

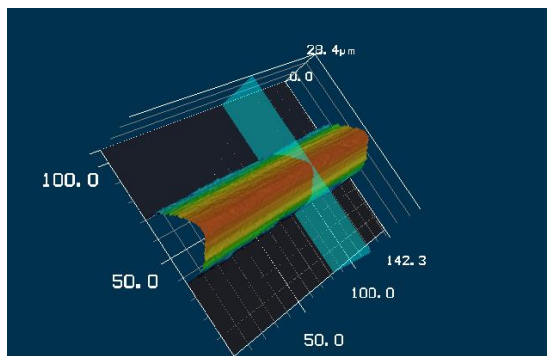
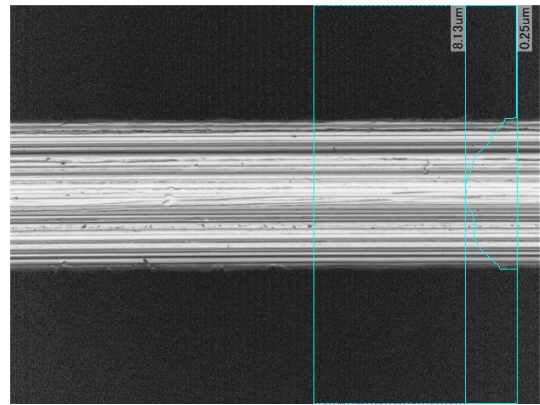
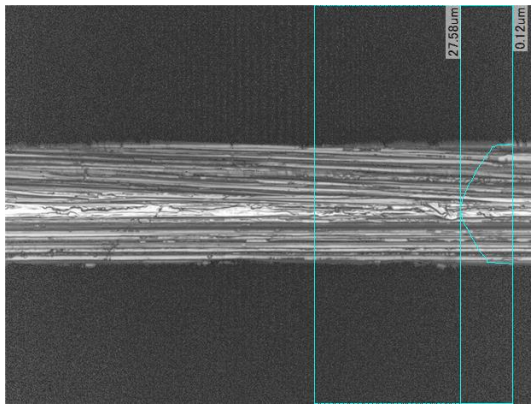


図 2-26 新切断装置

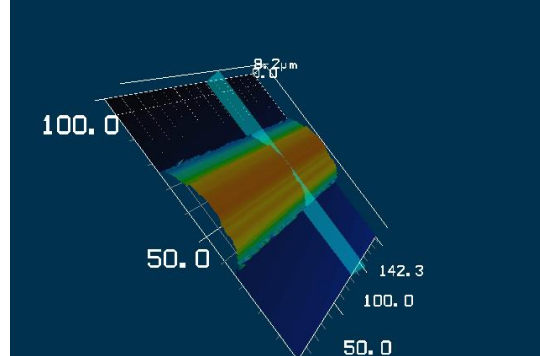


図 2-27 端面仕上げ装置

従来のベルト端面状態と新切断装置+端面仕上げ装置によるベルト端面状態の観察結果を図 2-27 に示す。



(a) 従来のベルト端面状態



(b) 開発装置によるベルト端面状態

図 2-27 ベルト端面状態観察結果

図 2-27 の観察結果を見てわかるように、開発装置で加工された端面は切断時のバリが除去されており、粗さが小さくなるとともに、断面角部のラウンド形状化が認められる。また、大幅な仕上げ時間の短縮、安定した端面仕上げが可能となった。2つの開発によって、高精度なベルト幅寸法と良質な端面性状を有するベルトを開発することができた。

第3章 全体総括

本研究開発では、加工性の高いスピニング加工法を基に、①シミュレーション技術の開発、②新加工法の開発、③残留応力の評価と活用、④ベルト端面性状の改良、に取り組み、高疲労強度を有する金属ベルトを低コストで製造する技術を開発した。

シミュレーション技術の開発では、新加工法を考案、具現化するにあたり、ほとんど実例のない極薄スピニング加工のシミュレーション技術の開発を行い、加工変形メカニズムの解明、新加工法に必要な制御機構、制御能力の検討を効率よく行うことができた。さらに、実加工現象の再現により計算精度を向上させ、加工条件から変形の様子をモニタリングできるところまで開発を進めたことにより、加工の予測が可能となり、新加工法の未知なる加工条件を効果的に見出すことができた。

新加工法の開発では、従来のスピニング加工に円周方向への変形を付与する方法について開発を行った。新加工法によって加工された金属ベルトの金属組織は、変形の方法が変えられており、また、その性能については疲労強度の向上が認められ、良好な結果を得ることができた。

新加工法の開発と並行して、疲労寿命に影響すると考えられる表面性状（残留応力）についても研究開発を実施した。ベルト切り開き試験とシミュレーションを組合せた新たな残留応力の評価手法を考案し、その活用によりさらに効果的な表面改質条件（圧縮残留応力の付与）を見出し、疲労強度の向上に成功した。

一方、金属ベルトの端面性状が疲労寿命に影響することから、スピニング加工後に所定のベルト幅に切断する際の新たな切断方法と端面仕上げの方法を開発した。その結果、良質な切断面と安定した寸法精度の切断が可能になるとともに、短時間で高品質な端面性状を得ることが可能になった。

性能試験（基礎試験、回転疲労試験）では、開発した新加工法によって作製した各種加工品について、各種の基礎試験によりその特性を調査し、回転疲労試験により疲労強度の評価を行った。

これらの多くの研究開発の取り組みによって、本研究開発の目標である疲労強度 970MPa（従来品に対し 30% 向上）を達成することができた。また、開発された新加工法、表面改質、新たな切断方法と端面仕上げの方法は、実用可能な加工技術として確立できたことは大きな成果である。

低コスト化については、加工性の高いスピニング加工と本研究開発による技術成果の組み合わせにより、一般的な金属ベルト（市販品）に対し 50% 以下のコストで製造が可能であると見込んでいる。

本研究開発で完成した金属ベルトの最終評価先である川下企業の計画が見直され、現時点において採用、量産化の目処が立っていないが、今後も量産を前提にサンプル供給を継続し、早期採用、量産化を目指す予定である。また、本研究開発によって培われた技術を既存製品であるステンレス鋼製極薄定着ベルトへ応用、派生させ、疲労強度を向上させた新しいステンレス鋼製極薄定着ベルトの開発を推進する計画である。