

平成28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

「高精度冷間圧延用工具の低歪み高速加工プロセス開発」

研究開発成果等報告書

平成29年 3月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター

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
- 1-2 研究体制
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

2-1 長尺ロールの加工工程短縮

- 2-1-1 プラズマツループイングシステムの開発
- 2-1-2 ELID 研削システムの開発
- 2-1-3 長尺研削用砥石の開発
- 2-1-4 机上計測システムの開発
- 2-1-5 先進円筒研削システムの開発
- 2-1-6 長尺ロールの熱処理シミュレーション
- 2-1-7 先進円筒研削システムの統合化及びランニング条件の最適化

2-2 スリッターの新規開発

- 2-2-1 スリッターの熱処理条件と熱処理歪みの関係把握
- 2-2-2 スリッターの熱処理シミュレーション技術の開発
- 2-2-3 スリッターの熱処理条件の確立
- 2-2-4 スリッターの平面研削条件の確立
- 2-2-5 スリッターのELID 研削条件の確立
- 2-2-6 試作スリッターの検証

最終章 全体総括

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

株式会社シントク（以下本文において「研究代表者」という）は、冷間圧延工程で不可欠な長尺ロールの製造者として、国内シェア約80%、海外シェア約30%を有するグローバルニッチトップ小規模事業者であり、国内市場ではプライスリーダーとして価格設定をし得る立場にある。しかし、海外市場では東南アジアを中心に低価格ロールが流通を始めており、川下事業者である冷間圧延メーカーは効率化の向上、低コスト化が課題となっている。そのため、研究代表者は、川下事業者から在庫削減と工場安定稼働のために長尺ロールの納期短縮を求められている。今後は、国際価格の変動に柔軟に対応することを求められる可能性が高い。また、川下事業者から既存製品（他社製品）が高価格であるスリッターの安価な製造販売を求められている。スリッターは冷間圧延工程で長尺ロールとセットで用いられるもので、川下事業者にとって不可欠なものである。

しかしながら、従来技術では、これら川下事業者のニーズに応えられない。長尺ロール及びスリッター材質は主にダイス鋼及びハイス鋼を使用しており、仕様硬度は58HRC以上と非常に高い硬度を持つ難削材である。この硬度を得るには熱処理を施すが、申請者の熱処理は無酸化雰囲気炉で加熱し、油冷による焼入れを行っている。その後2回以上の焼戻しを繰り返すが、焼戻しが完了するまで熱処理歪みの発生状況を予測出来ないため、削り代を大きくせざるをえず、後工程の所要時間もまちまちである。焼入れ焼戻しの後工程である切削作業時間は、歪みの大きいワークについては、歪みの小さいワークに比べて2倍以上を要することも多く、作業効率が非常に悪い。次工程の研削作業においては、近年、ユーザーが要求する材質硬度がますます高まっていることから、砥石の切削性能の劣化が激しく、長時間安定した研削加工が困難であることから、作業時間が大幅に増大しているのが現状であり、さらに、研削精度にも度々問題が生じる。

このような背景より、上述した川下事業者のニーズに応え、海外シェアを維持するためには、長尺ロール製作時間の大幅短縮、安価なスリッターの新規商品開発が必要である。納期の短縮を図るには、硬度を維持する上で熱処理工程は短縮することができないため、その後工程である切削加工・研削加工の工程短縮が求められる。それには従来技術では解決できない熱処理による歪みを考慮した製造プロセスの開発とともに、高効率化・高速化を実現する新たな研削技術を確立することが必要である。

そこで、本研究開発では、熱処理歪みを制御・予測すること、及び先進円筒削システム技術を確立することによって、切削・研削加工時間を現状比40%削減することを目標とする。

具体的な研究開発の技術目標値等は以下の通りである。

【1】長尺ロール加工工程の短縮

【1-1】プラズマツルレーイングシステムの開発

目標：φ50mm、長さ950mmの長尺ロール（材質：高速度工具鋼）の外周円筒研削に適合する現有機に搭載できる、研削砥石の外周振れ取りおよび、円筒度修正作業を行うプラズマツルレーイングシステムを開発する。

【1-2】ELID研削システムの開発

目標：前記の長尺ロールの外周円筒研削に適合する現有機に搭載できるELID研削システムを開発する。長尺ロールの表面精度はRa0.4μmを目標とする。また、真円度、円筒度、振れの精度はいずれも5μm以内とする。

【1-3】長尺研削用砥石の開発

目標：上述の長尺ロールの ELID 研削システムに適合して、前記の精度を達成できる導電性砥石を開発する。

【1-4】機上計測システムの開発

目標：前記の長尺ロールに対して、前記の ELID 研削システムに搭載して、機上計測システムを開発する。

最小分解能は $0.1\mu\text{m}$ 以下とする。

【1-5】先進円筒研削システムの開発

目標：上述の長尺ロールの外周円筒研削に適合するプラズマツルレーイングシステムおよび ELID 研削システムに機上計測システムを組み合わせて、先進円筒研削システムを開発する。

【1-6】長尺ロールの熱処理シミュレーション

目標：長尺ロールの長手方向の曲がり予測を行う熱処理シミュレーション技術を開発する。

【1-7】先進円筒研削システムの統合化及びランニング条件の最適化

目標：熱処理シミュレーション及び機上計測を援用した研削条件をフィードバックする加工手順を確立し、最適砥石とともに開発した先進円筒研削システムに統合化し、一連の加工工程のシーケンスを実施する。

【2】スリッターの新規開発

【2-1】スリッターの熱処理条件と熱処理歪みの関係把握

目標：小型のモデル試験片における、熱処理歪みに及ぼす熱処理条件の影響を可視化する。

【2-2】スリッターの熱処理シミュレーション技術の開発

目標：上記のモデル試験片における、熱処理シミュレーション結果と実際の歪みの間の誤差を 20%以内とする。また、金属組織の再現性を組織写真上でほぼ同等とする。

【2-3】スリッターの熱処理条件の確立

目標：開発した熱処理シミュレーション技術を用いて、実サイズのスリッターの歪み予測を行い、実歪みの検証を行う。この結果を活用して、熱処理治具、熱処理条件を確立し必要最小限の加工取り代の設定を行う。

【2-4】スリッターの平面研削条件の確立

目標：平面研削条件を検討して、直径 250mm、厚み 10mm の小型スリッター（材質：冷間ダイス鋼）に対して、表面精度 $Ra0.5\mu\text{m}$ 、形状精度（平坦度） $5\mu\text{m}$ を実現する。

【2-5】スリッターの ELID 研削条件の確立

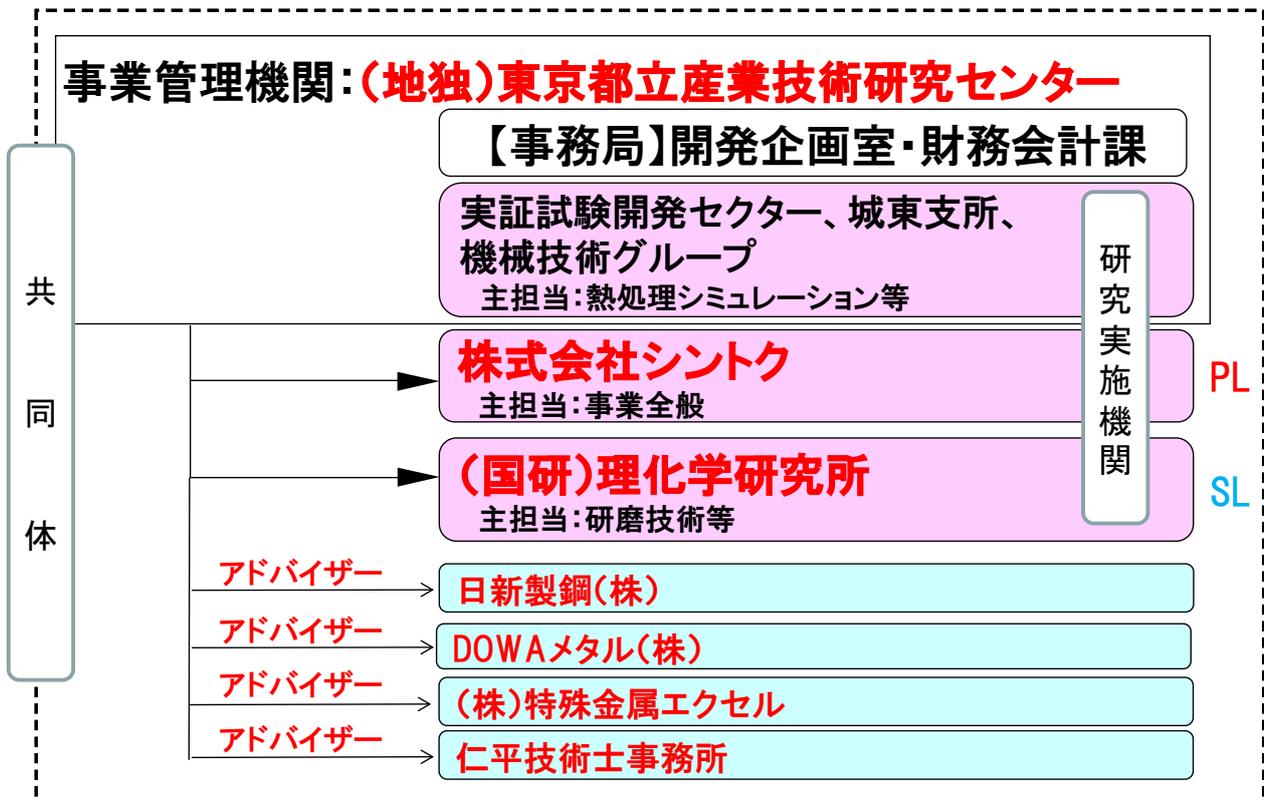
目標：長尺ロールの ELID 研削条件を応用して、スリッターの ELID 研削条件の確立を行う。直径 315mm、厚み 10mm の大型スリッター（材質：冷間ダイス鋼）に対して、表面精度 $Ra0.5\mu\text{m}$ 、形状精度（平坦度） $5\mu\text{m}$ を実現する。

【2-6】試作スリッターの検証

目標：川下ニーズに対応するため、試作した実スリッターを検証し、形状精度（平坦度） $5\mu\text{m}$ 、表面精度 $Ra0.5\mu\text{m}$ とする。アドバイザー（川下事業者）において実証試験を実施し、評価を得る。

1-2 研究体制

本研究開発の研究体制を以下に示す。



1-3 成果概要

本研究開発事業期間内に得られた成果概要を以下に示す。

【長尺ロール加工工程の短縮】

1. 長尺ロールの熱処理シミュレーション

直径 50mm、長さ 950mm の長尺ロールにおいて、冷却条件の違いによる熱処理変形シミュレーションを実施し、冷却状態と熱処理後の変形の関連を実測により明らかにした。図 1-1 左のように上下で冷却速度が異なる場合には不規則な変形を起し、図 1-1 右のように側面の冷却速度が異なる場合には弓なりに変形することが再現できた。

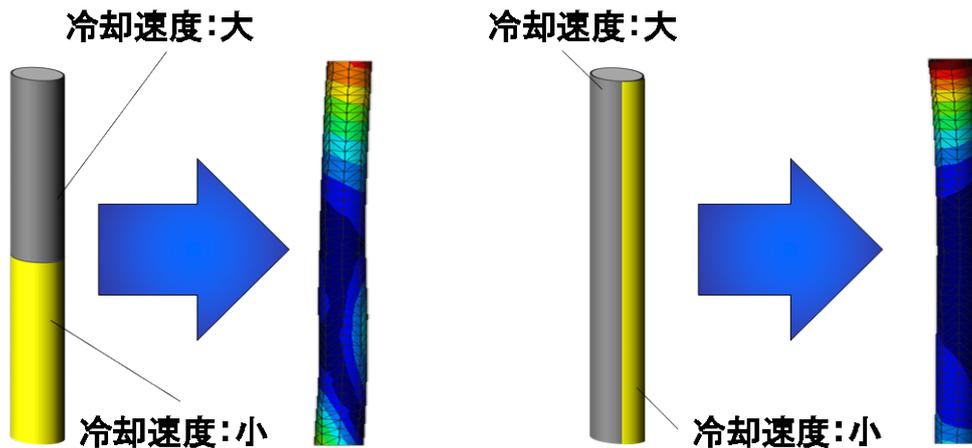


図 1-1 長尺ロールの変形予測結果

2. 先進円筒研削システムの開発

本研究で、先進円筒研削システムを試作開発した。

【スリッターの新規開発】

1. ELID 研削条件の確立

図 1-2 に示すように、形状精度（平坦度）は $\pm 1.5\mu\text{m}$ となり、目標の $5\mu\text{m}$ 以内となっていることが明らかとなった。以上から、ELID 研削条件が確立できたものと評価できる。

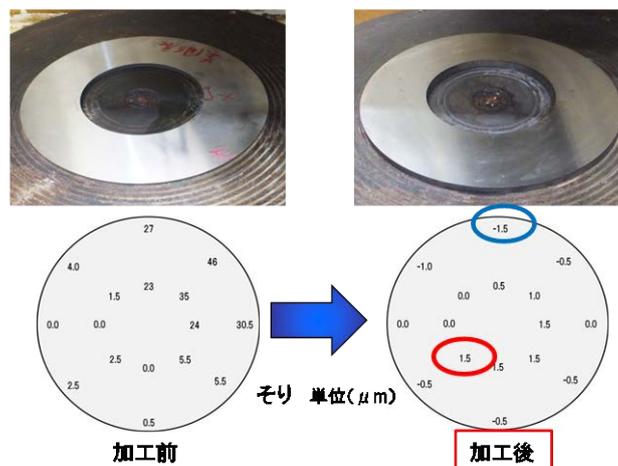


図 1-2 形状精度(平坦度)測定結果

2. 試作スリッターの検証

試作したスリッターについては、要求仕様を満たしていることがわかった。また、表面の形状および内部の金属組織については、それぞれ走査電子顕微鏡および金属顕微鏡による観察により正常であることが確認された。試作したスリッターについては、実用条件による実証試験を実施中である。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

事業管理機関

名称： 地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター

住所： 〒135-0064 東京都江東区青海 2-4-10

連絡窓口： 開発本部 開発企画室

Tel: 03-5530-2528

Fax: 03-5530-2458

第2章 本論

2-1 長尺ロールの加工工程短縮

2-1-1 プラズマツルーイングシステムの開発

本研究では、汎用円筒研削盤にツルーイング装置を搭載できるように開発を行なった。

2-1-2 ELID 研削システムの開発

長尺ロール用 ELID 研削システムを開発した。

2-1-3 長尺研削用砥石の開発

本研究では、長尺研削用砥石を開発した。

2-1-4 機上計測システムの開発

さらに、本研究では接触式機上測定ユニットと非接触式機上測定ユニットを開発した。

2-1-5 先進円筒研削システムの開発

本研究では、上記の各要素を統合して先進円筒研削システムを開発した。

2-1-6 長尺ロールの熱処理シミュレーション

① 解析理論

熱処理による変形挙動は図 2-1 に示すように複数のパラメータが相互に関係しており、非常に複雑なメカニズムを有している。材料に生じる応力は温度勾配による熱膨張の違いや組織変態に伴う体積変化により生じるが、温度や組織もまた材料内部の応力状態により変化する。組織変態挙動や伝熱のパラメータである熱伝導率や比熱は材料中の化学成分の影響を受ける。

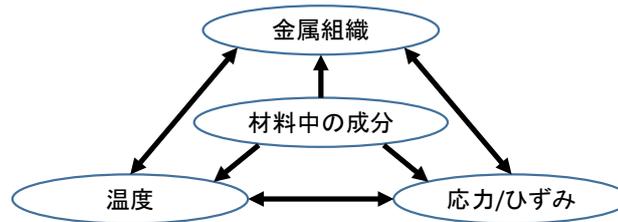


図 2-1 熱処理における各要素の相関

変態・熱・力学の理論を搭載した熱処理シミュレーションソフトを用いて変形解析を実施した。

② 解析条件

直径 50mm、長さ 950mm の長尺ロールを対象とし、材質はダイス鋼 SKD11 である。境界条件として実際の熱処理現場を想定して 2 つの条件を設定した。一つは冷却材の対流を考慮し、上下で冷却速度が異なる場合、もう一つは複数材料の熱処理を考慮し、隣接する側とその逆で冷却速度が異なる場合である。図 2-2 に模式図を示す。(a) で示す対流を考慮した場合は下部の方が冷却速度が遅くなるとし複数同時処理では隣接する側の冷却速度が遅くなるとした。冷却速度の違いは 2 つの熱伝達係数と与えた加熱条件で示す。

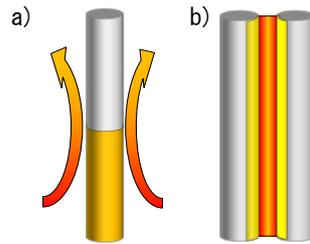


図 2-2 冷却状態の模式図(a)対流により上下で異なる場合 (b)複数同時処理により左右で異なる場合

③ 解析結果及び考察

図 2-3 に熱処理シミュレーションにより得られた変形図を示す。(a)で示す材料の上下で冷却速度に違いが生じた際は不規則な変形となった。これは冷却材の対流により冷却時の温度分布が不均等になり、その結果組織変態の仕方も不均質となるためであると考えられる。一方(b)で示した左右で冷却速度が異なる場合は弓なりに変形した。これは材料同士が隣接する側とその逆側で冷却時の温度が大きく異なり、急冷される側では変態が進むと同時に冷却による収縮も進むため、このような変形形状が得られたものだと考えられる。

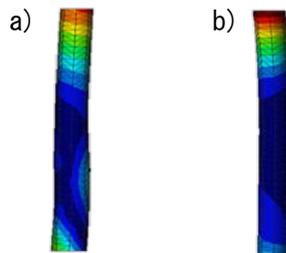


図 2-3 変形解析結果 (a)対流により上下で異なる場合(b)複数同時処理により左右で異なる場合

以上の結果より、冷却状態により熱処理による変形形状が大きく異なることが明らかとなった。(a)の結果はいびつな変形が得られた場合は冷却状態を考慮する必要があることを示し、(b)の結果は、複数同時に熱処理を行う場合は互いの材料が相互に熱的な影響を及ぼさないよう配置に注意すべきであることを示しているといえる。

しかしながら、今回の結果は定性的なものであり、実際の熱処理における状況を詳細に再現できているとは言いがたい。今後、シミュレーション技術の高度化に向け、データベースの作成、実現賞の把握等を推進していく予定である。

2-1-7 先進円筒研削システムの統合化及びランニング条件の最適化

開発した先進円筒研削システムにより加工および計測、そして、フィードバック加工を実施した。その結果、本事業のシステムを使用すると時間短縮が可能であることを確認した。

2-2 スリッターの新規開発

2-2-1 スリッターの熱処理条件と熱処理歪みの関係把握

① 事前解析

実サイズのスリッター開発にあたって、まずは、スリッターを縦置あるいは横置きにして熱処理すべきかを汎用ソフトウェアの ANSYS を用いて解析した。後述するが、熱処理現象を正確に把握するためには図 2-4 に示すように伝熱解析、構造解析、組織変態解析を相互に連携させた連成解析を行う必要があるが、まずは簡単のため熱処理による変形に強い影響を及ぼすと考えられる伝熱と構造に絞って両者の連成解析を行った。解析は焼入れ後の自然放冷による冷却過程を想定している。

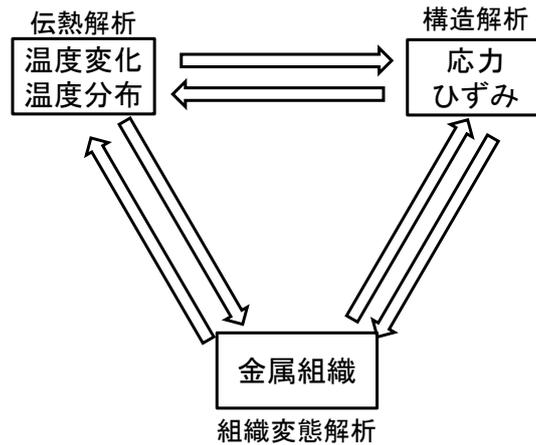


図 2-4 熱処理解析の相互関係

スリッターの解析モデルを図 2-5 に示す。スリッター形状は、外径 94mm、内径 30mm、厚さ 10mm、外形 240mm、内径 80mm、厚さ 10mm の 2 種類である。密度を 7.8 g/cm^3 、比熱 $4.6 \text{ g/Kg} \cdot \text{K}$ 、弾性率 210 GPa、ポアソン比 0.3、熱膨張係数 $1.17 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 、熱伝導率 45 W/mK、熱伝達係数は、材料定数ではなく、解析対象の形状と温度に依存するため参考文献¹⁾より得られたグラフにより与えた。解析ソフトウェアには ANSYS を用い、過度伝熱 - 構造連成解析を行った。過度伝熱解析では初期温度 800°C 、雰囲気温度 25°C とし、解析モデルが 25°C に達するまで解析を行った。構造解析ではスリッターをワーク平面に縦置きにした場合と横置きにした場合を仮定した固定条件を与え、温度変化、温度分布に伴う熱応力による変形形状がどのように異なるのか検討を行った。

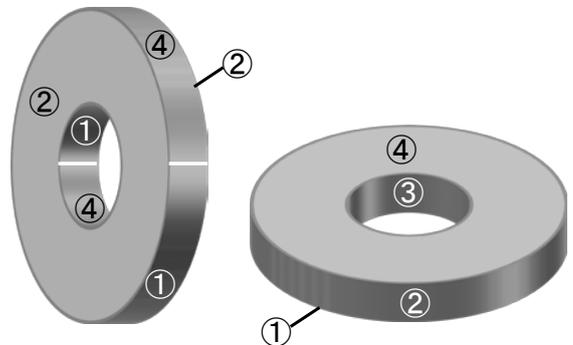


図 2-5 解析モデル図(左：縦置き、右：横置き)

解析結果として、熱温度分布と変形分布図を図 2-6 にそれぞれ示す。

スリッターを縦置きにした場合と横置きにした場合で、温度分布に明確な違いが生じているのがわかる。

縦置きにした場合は、表と裏側で温度分布はほとんど変わらないのに対して、横置きにした場合は表裏で温度分布に明確な違いが生じている。この温度分布に追随するように変形形状も明確に違いが生じている。縦置きにした場合、変形は表裏全面ほぼ一定の変形量を示すが、横置きにした場合は、内径付近が円周上に変形が集中しているのがわかる。これより、スリッターの熱処理においては横置きにするよりも縦置きにした方が変形形状を安定させることができると言える。

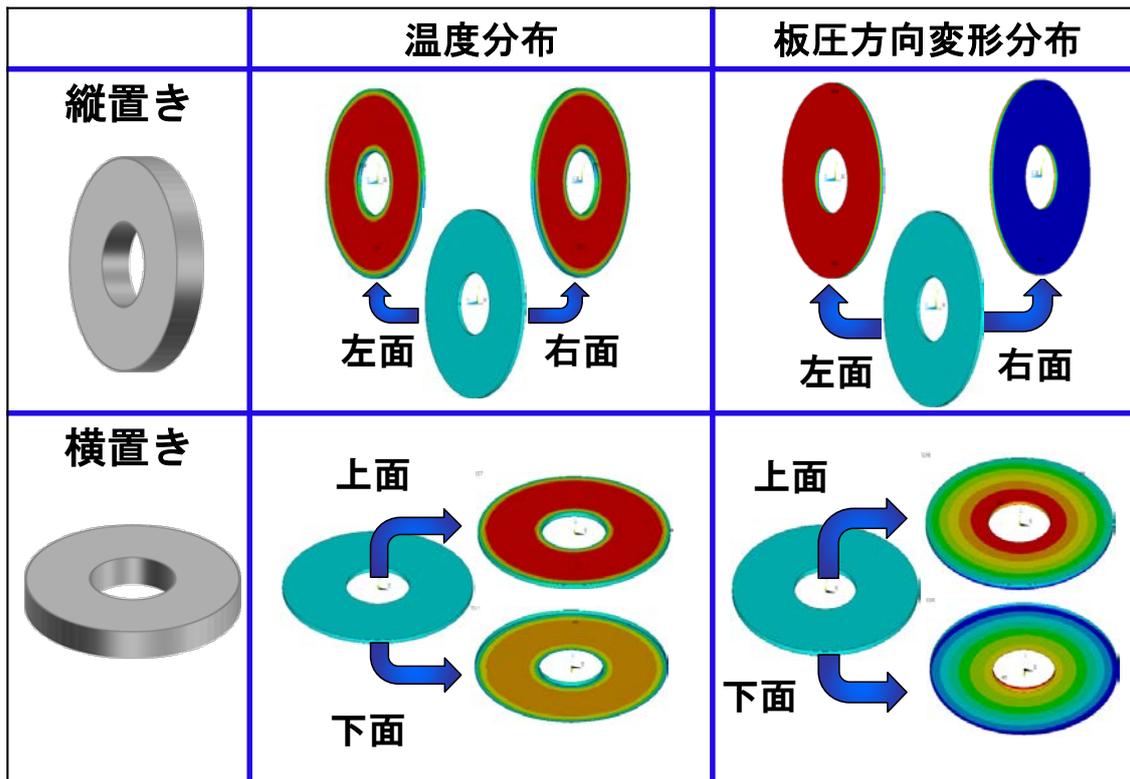


図 2-6 温度分布と板厚方向変形分布

② 小型スリッターの熱処理実験

②-1 材料と実験方法

前述したように、スリッターを縦置きにして熱処理をすることが変形状を安定化させることができると分かったので、熱処理実験では以後、縦置きとする。

スリッター形状は、外径 94mm、内径 32mm である。材質は SKD11 とした。小型スリッターは 8 枚重ねとした。固定は、M27 全ねじボルトおよび厚さ 10mm の六角形状座金を用いて締付けトルク 10N・m にて固定した。この時、締付けトルクは、以下の式にて算出している。

$$T_f = K F_f d$$

T_f は締付けトルク、 K はトルク係数、 F_f は締付け軸力、 d はボルト径である。締付け軸力を 10N・m 与えると締付け軸力はトルク係数を 0.2 であると仮定すると、1852 N となる。実際に熱処理実験の前に、デジタルトルクレンチ(東日製作所(株))で 10N・m を与えて超音波ボルト軸力計(ダコタジャパン(株) BOLT-MAX II)で軸力を計測したところ、約 2000N を計測した。スリッターおよび座金の重量を考慮すると、2000N 程度であれば、熱処理籠に設置する際にはずれることはほとんどないものと判断した。

熱処理スケジュールは、焼入れ、2 回焼戻しを行い、油冷とした。熱処理時の様子を図 2-7 に示す。また熱処理後、組織観察と硬さ測定についてを行い、必要性能を満たすのか確認した。



図 2-7 小型スリッターの熱処理時の様子

②-2 実験結果と考察

熱処理後、スリッター同士が凝着を起し、剥離できない状況であった。これはハンマーで叩いてもとれないほどの凝着であり、スリッター同士を重ねて熱処理することは製造上合理的でないことがわかった。凝着しないように BN スプレーなどで対策を講じることができると考えられるが、工程上、この方法はあまり合理的でない。従ってこの実験から判断する限り、スリッター同士の熱処理による凝着を防ぐ方法としては、スリッター間にスペーサーを重ねることが最善であると考えられた。また、凝着して 2 枚しか剥がせない状況であったため変形を定量的に十分に確認できなかったが、形状について多関節 3 次元形状測定機を用いて計測した。その結果、変形は 0.1mm 程度であり、ほとんど変形していないことがわかった。

次にスリッター熱処理後の金属組織観察およびマイクロビッカース硬さ測定を行った結果および考察を示す。図 2-8 に示す小型スリッターの A の位置で試験が行えるように試験片を採取した。金属組織写真を図 2-9 に示す。観察位置は図 2-8 の A を表面とし、板厚方向の中央、A の裏面の 3 か所とした。エッチングには 10% 硝酸アルコール溶液を用いた。素地は焼戻しマルテンサイト組織であり、白い粒はオーステナイトに未溶解の炭化物である。いずれの位置でも同様な組織を呈していることから、熱処理は内部まで均一に施されていることがわかる。



図 2-8 小型スリッターの外観

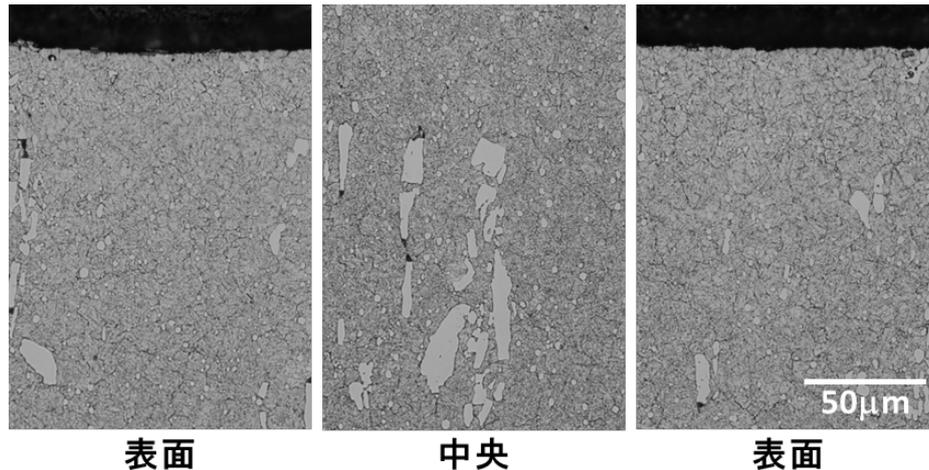


図 2-9 小型スリッターの金属組織写真

マイクロビッカース硬さ試験では金属組織試験と同じ試験片を使用し、表面および裏面において表面から 0.5mm までの硬さ分布を測定した。表面および裏面の硬さ分布は、表面から 20mm から 0.5mm の位置まで、熱処理が均一に施されていることが確認された。

③ 中型スリッターの熱処理実験

③-1 材料と実験方法

前述したように、スリッター間の凝着を防ぐには、スリッター間にスペーサーを重ねることが最善であると考えられた。そこで、この中型スリッターの実験では、スリッター間にスペーサーを重ねて熱処理に供した。スペーサーは、前述の小型スリッターと同サイズとし、中型スリッター形状は、外径 234mm、内径 80mm とした。スリッター材質は SKD62 とした。ボルト締付けトルクは前述と同様に 10N・m とし、熱処理籠に番線で固定した。熱処理スケジュールは、焼入れ、2 回焼戻しを行い、油冷とした。

熱処理前後の形状変化を確認するために、多関節 3 次元形状測定機を用いて計測した。また熱処理後、組織観察と硬さ測定についても行った。

③-2 実験結果と考察

熱処理後に、スリッターの解体を行ったところ、容易に取り外すことができ、凝着は確認されなかった。これより、スリッター間のスペーサーが凝着防止に有効であることが明らかとなった。熱処理後の代表的な熱処理後の変形分布を図 2-10 に示す。これによれば、局所的に変形が内円内側に変形が 0.3mm 以上を示しているが、これは、多関節 3 次元形状測定機のノイズによるものであると考えられる。全体的には 0.3mm 以内に変形は抑えられており、スリッターの後加工における取り代を 0.3mm 以内に抑えられることがわかった。また、スリッター熱処理後の金属組織観察および硬さ測定を行った結果および考察を以下に示す。図 2-11 に示すようにスリッターを切断し、A およびその裏面(A')と厚さ方向の中心(C)の断面金属組織の観察およびマイクロビッカース硬さ測定を行った。

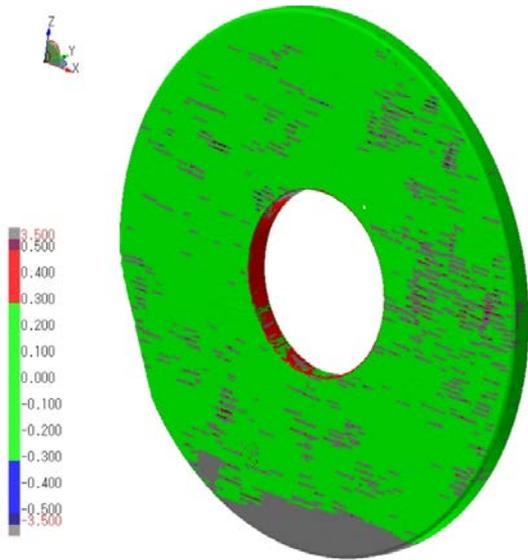


図 2-10 中型スリッターの代表的な変形分布

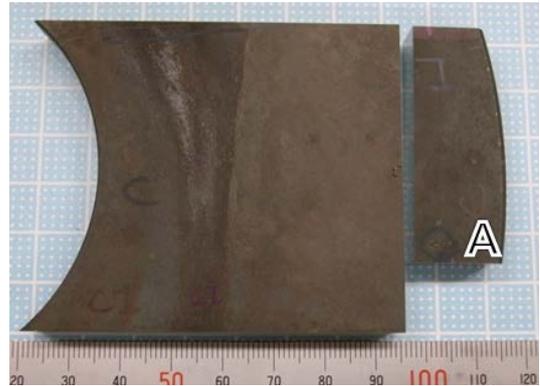


図 2-11 金属組織観察および硬さ測定位置

図 2-12 に金属組織写真を示す。エッチング液には 10%硝酸アルコール溶液を用いた。A、A' および C のいずれも焼戻しマルテンサイト組織を呈していることから、熱処理は内部まで均一に施されていることがわかった。しかしながら、A および A' の赤い矢印で示した表面から 30 μ m 程度の領域には、脱炭によるフェライト組織が観察された。さらに青い矢印で示した箇所には、若干の粒界酸化が認められた。このことから、酸化性の熱処理雰囲気であることが推察された。

以上のことから、スリッターを使用する場合には被切断物と接触する最表面の組織が重要であり、このような脱炭層の存在は、スリッターの破損による短寿命化につながると推察される。今後は脱炭を生じないような熱処理雰囲気の改善や熱処理後の ELID 平面研削工程の取り代許容内となるような脱炭層厚さの制御、もしくは熱処理雰囲気の改善が難しい場合、ELID 平面研削工程の取り代について焼入れによる歪みだけではなく、脱炭層厚さについても考慮する必要があると考えられる。

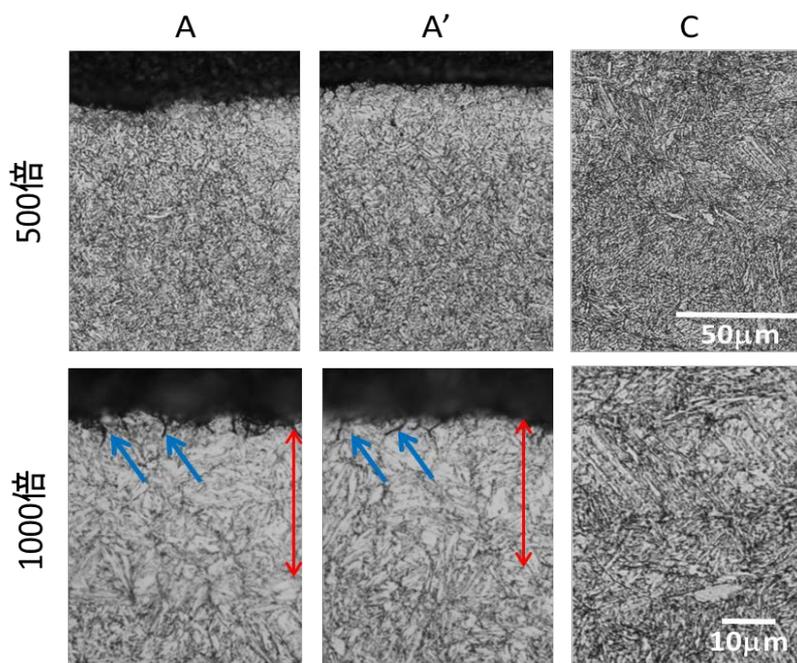


図 2-12 中型スリッターの金属組織写真

④ 実サイズスリッターの熱処理実験

④-1 材料と実験方法

前述までは小型スリッターおよび中型スリッターの熱処理実験を行った。さらに前倒しで、実サイズスリッターの熱処理を行った。形状は、外径 315mm、内径 160mm、厚さ 10mm とした。スペーサー形状は、外径 234mm、内径 80mm とした。材質はSKD11 である小型スリッター、中型スリッターと同様に、M27 ボルトで締付けトルク 10 N・m にて固定した。実験は、4 枚一組として、2 組実施した。一組目を記号 A～D、二組目を E～H とする。熱処理前後の形状変化を確認するために、多関節 3 次元形状測定機を用いて計測した。また熱処理後、組織観察と硬さ測定についても行った。

④-2 実験結果と考察

本実験条件の範囲では、熱処理スケジュール中で 510℃、2 回焼戻しを行うことが最適な熱処理条件であると言える。

熱処理前後の各試験体の変形状況を図 2-13 に示す。一組目では、A および D に大きな変形が認められ、最大公差で 1mm を越えていた。一方二組目についても、F および G に大きな変形が認められ、最大公差約 2mm を示していた。この変形原因を調べるために、熱処理後、スペーサーのずれ位置を確認した。そのスペーサーのずれ位置によれば、大きな変形を示した A と D について、スペーサーが表裏で相互にずれているのに対し、大きな変形を示さなかった B と C についてはスペーサーのずれは認められなかった。二組目についても同様の傾向が認められ、変形原因は、スペーサーのずれであることが分かった。これは、スペーサーがずれることで、スリッターの表裏で冷却速度が変化したためであると推測される。従って、スペーサーがずれないようにするために、スペーサー形状に工夫が必要であると言える。この解決策として、スペーサーにスリッター内径とほぼ同等の凸をつけ、ずれを防止する案が考えられる。

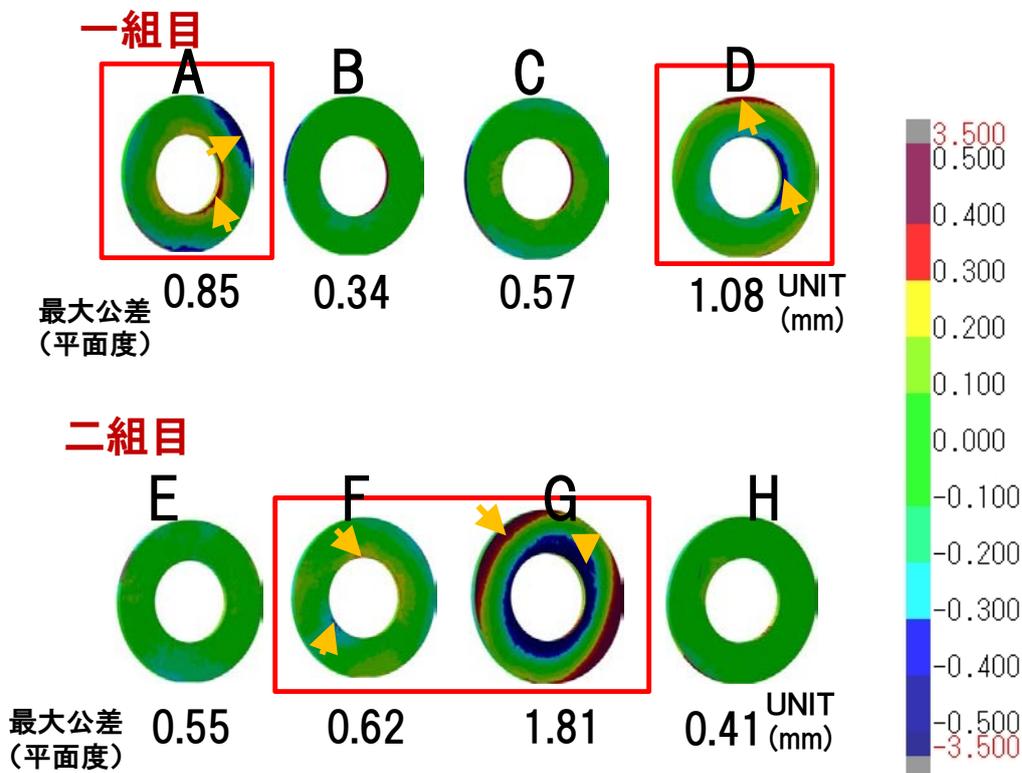


図 2-13 各試験体の変形分布図

続いて、実サイズスリッターについて金属組織試験および硬さ試験を実施した。熱処理後のスリッター(G)の金属組織写真を図 2-14 に示す。金属組織観察位置は、①：表面、②：板厚方向の中心、③：①の裏面の3か所とした。エッチング液には 10%硝酸アルコール溶液を用いた。すべての観察位置において、素地は焼戻しマルテンサイト組織、白い小さい粒は焼戻しにより析出した二次炭化物、粗粒はオーステナイトに溶解しなかった未固溶炭化物である。このことから、実サイズにおいても均一に熱処理が施されていると推察される。

一方、d～f の位置では①および③共に同様な状態を呈していた。今後、スペーサーの接触部と接触のない外周部における金属組織の差異を検討する必要があると思われる。

次に、マイクロビッカース硬さ測定による a～f の各位置における中央の硬さであるが、いずれの位置においても硬さは 660～690 HV0.1 の値を示した。熱処理条件の必要硬度はショア硬さで 78 ± 2 HS (ビッカース硬さ換算 630～680 HV) であることから、試料中央において必要硬度を満たしている。表面および裏面の硬さ分布から、表面から 0.02mm より内部では a～f のすべての位置において 660～700 HV0.1 を示しており、中央の硬さと同様に必要硬度が得られていることから、内部まで均一に熱処理が施されている。また、0.01mm の位置にみられる硬度の低下は脱炭層の領域とほぼ一致している。

今回の実サイズスリッターの熱処理では 10・m 程度の脱炭層が生じたが、次の ELID 平面研削工程で除去されることが予想される。今後も脱炭層の厚みを取り代を超えないような熱処理雰囲気制御が重要であると考えられる。

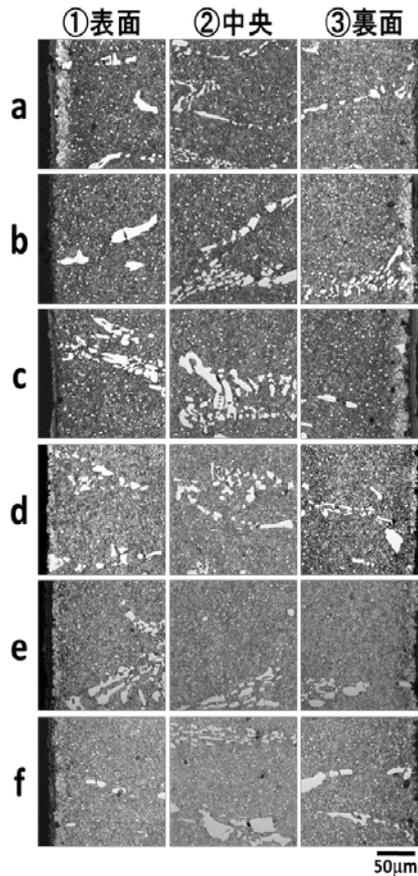


図 2-14 実サイズスリッターの金属組織写真

2-2-2 スリッターの熱処理シミュレーション技術の開発

① 解析理論

熱処理による変形挙動は図 2-15 に示すように複数のパラメータが相互に関係しており、非常に複雑なメカニズムを有している。材料に生じる応力は温度勾配による熱膨張の違いや組織変態に伴う体積変化により生じるが、温度や組織もまた材料内部の応力状態により変化する。組織変態挙動や伝熱のパラメータである熱伝導率や比熱は材料中の化学成分の影響を受ける。

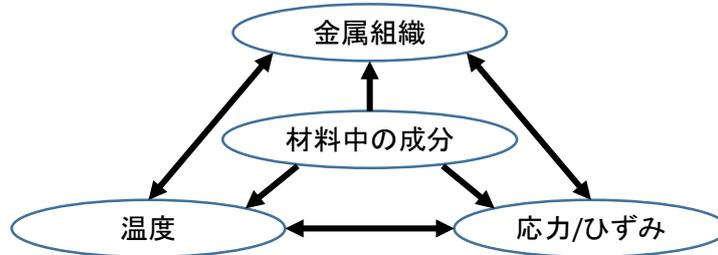


図 2-15 熱処理における各要素の相関

熱処理シミュレーションでは金属組織の相変態による体積変化、温度変化による熱変形、境界条件による応力・ひずみの3要素の変態・熱、力学の連成解析を行う。

これら変態・熱・力学の理論を搭載した熱処理シミュレーションソフトを用いて変形解析を実施した。

② 解析条件

スペーサーを挿入したスリッターを想定したモデルを作成した。材料はSKD11相当とし、温度条件は油焼き入れのみを想定しており、焼き戻し過程は考慮していない。試験体と冷却材との熱の授受の大きさを示す熱伝達係数は簡単のため面の方向によらず一定とした。また、スペーサーと接触すると思われる部分は周辺の3倍の熱伝達係数を与えた。今回の解析では、2-2-1の知見よりスペーサーが表裏でずれた場合とずれが生じなかった場合の2通りについてシミュレーションを行った。

③ 解析結果及び考察

図 2-16 に今回の解析で得られた変位の結果を示す。左がスペーサーにずれが生じなかった場合、右がずれの生じた場合の結果である。まず、スペーサーにずれが生じていない場合の結果を見ると、板厚方向の変形がほぼ生じていないことがわかる。これは、実験結果と一致するものであり、良好な結果が得られたといえる。次に、スペーサーにずれが生じた場合の結果を見てみると、外側に変形が生じており、実際の熱処理の変形形状とよく一致した。次に変形量を見てみると最大偏差はおよそ 0.37 mm で実験結果を大きく下回る結果となった。これは、マルテンサイト変態にともなう応力が実際よりも過少に算出されたため、変形が小さくなったものと考えられる。また、降伏応力を 0.2%耐力として設定したが、比例限度より考える降伏応力はこの 40%程度になるとも言われている。このため、解析では実際よりも高い降伏応力を設定し、解析したため、変形が大きくなり、マルテンサイト変態も進まなかった可能性がある。また、今回の解析では焼き戻し過程は考慮していない。しかしながら、焼き戻し過程に残留オーステナイトがマルテンサイト変態することは十分に考えられ、この際に変形が大きく進行したと考えられる。しかしながら、今回の解析によりスリッターの熱処理変形形状を定性的に予測可能になったと言える。

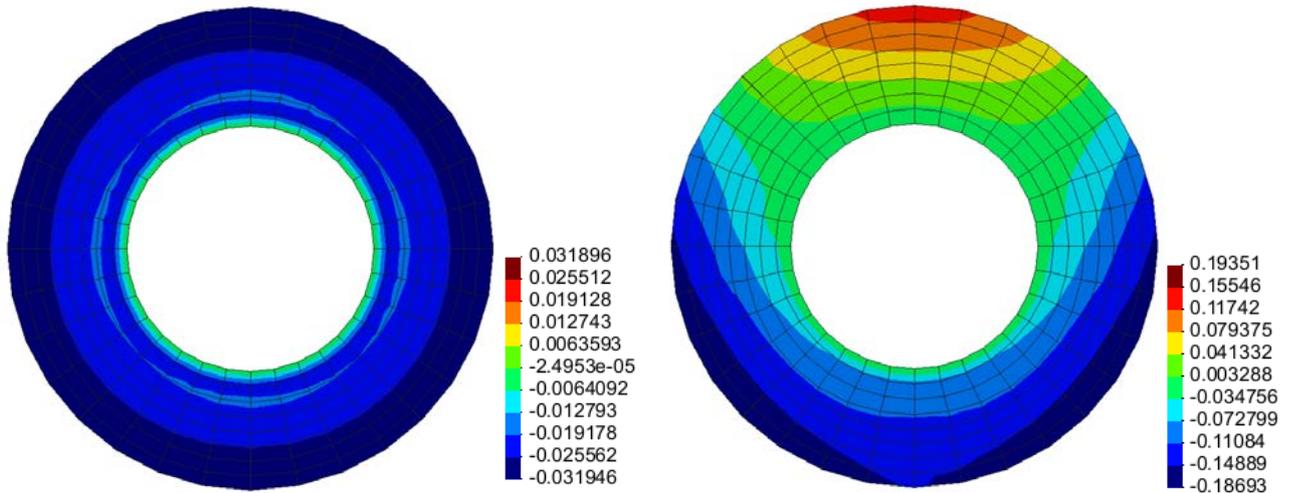


図 2-16 板厚方向変位分布解析結果(左:スぺーサーのずれ無 右:スぺーサーのずれ有)

2-2-3 スリッターの熱処理条件の確立

① 実サイズスリッターの熱処理実験

①-1 材料と実験方法

スリッター形状は、外径 315mm、内径 160mm、厚さ 10mm とした。スぺーサーのずれがスリッターの変形を増大させていたのではないかという前述の解析結果を踏まえ、スぺーサー形状は、スぺーサーにずれ止めを施した。スぺーサ寸法は外径 234mm、内径 80mm であり、材質は SKD11 である。M27 ボルトで締付けトルク 10 N・m にて固定した。実験は、4 枚一組とした。熱処理前後の形状変化を確認するために、多関節 3 次元形状測定機を用いて計測した。また熱処理後、組織観察と硬さ測定についても行った。

①-2 実験結果と考察

熱処理前後の各試験体の変形状況を図 2-17 に示す。スペーサーのずれは抑制できたものの最大変形量が約 3 mm となり、スペーサーにずれを施さない場合よりも大きな変形量を示した。これは、スペーサーを生材のまま熱処理したためであり、冷却速度がスリッターの表裏面で著しく異なったためであると推察される。このことから、本熱処理治工具を用いる場合は、加工取り代を 3mm 程度に設定すべきものと思われる。

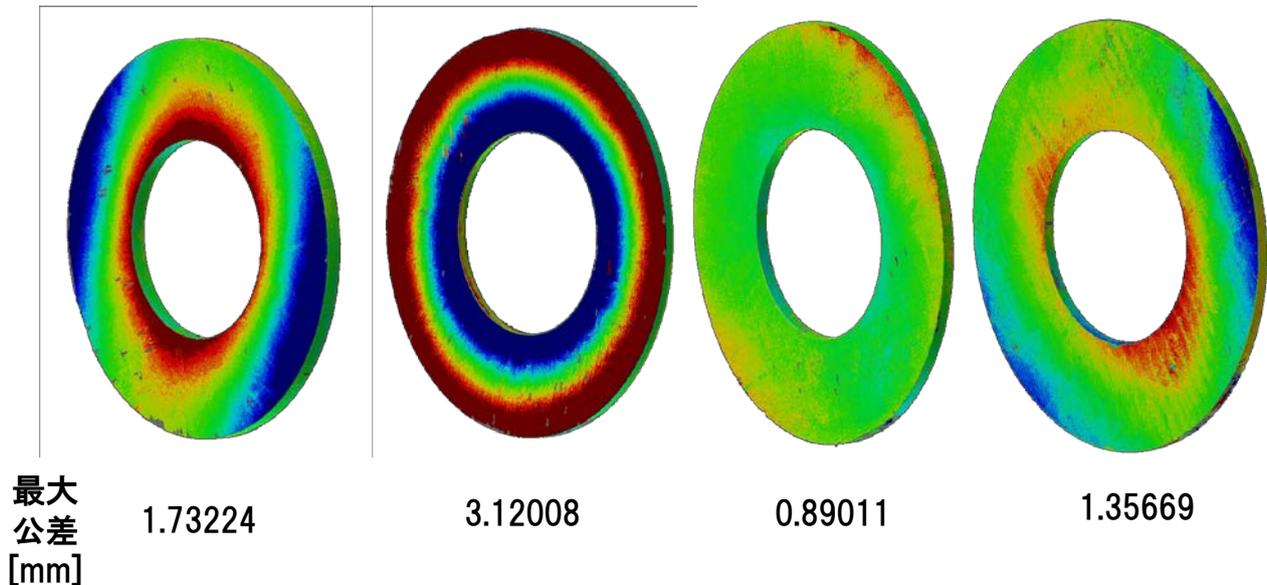


図 2-17 実サイズスリッターの熱処理変形測定結果

この熱処理条件を基に後述する ELID 研削を施したスリッターについて、走査型電子顕微鏡 (SEM) による表面観察、金属組織試験および硬さ試験を実施した。図 2-18 に ELID 研磨後のスリッター外観と各試験位置を示す。

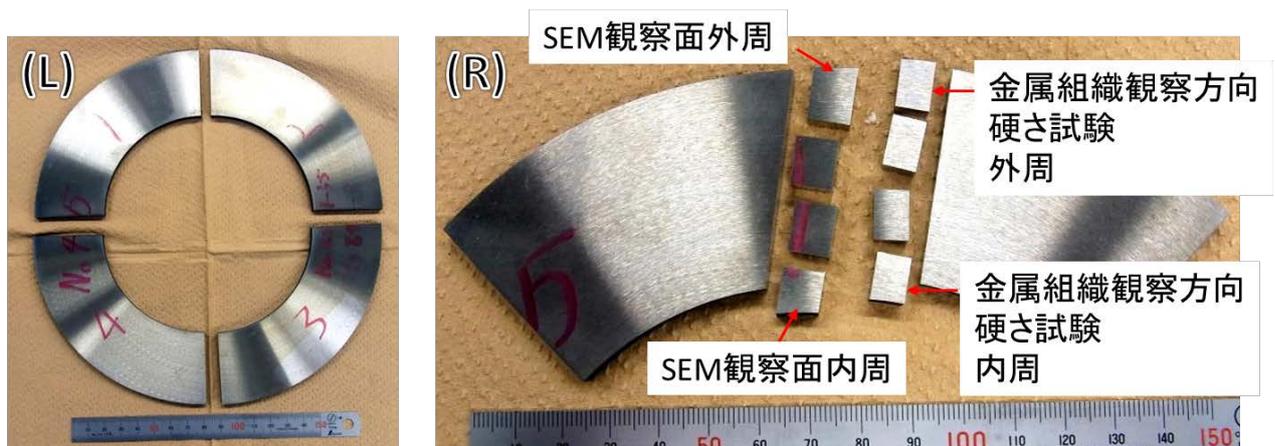


図 2-18 ELID 研削後のスリッター外観と各試験位置

ELID 研削後のスリッターの表面を SEM で観察した結果を図 2-19 に示す。外周および内周のどちらも研削状態に差はみられず良好な状態であった。

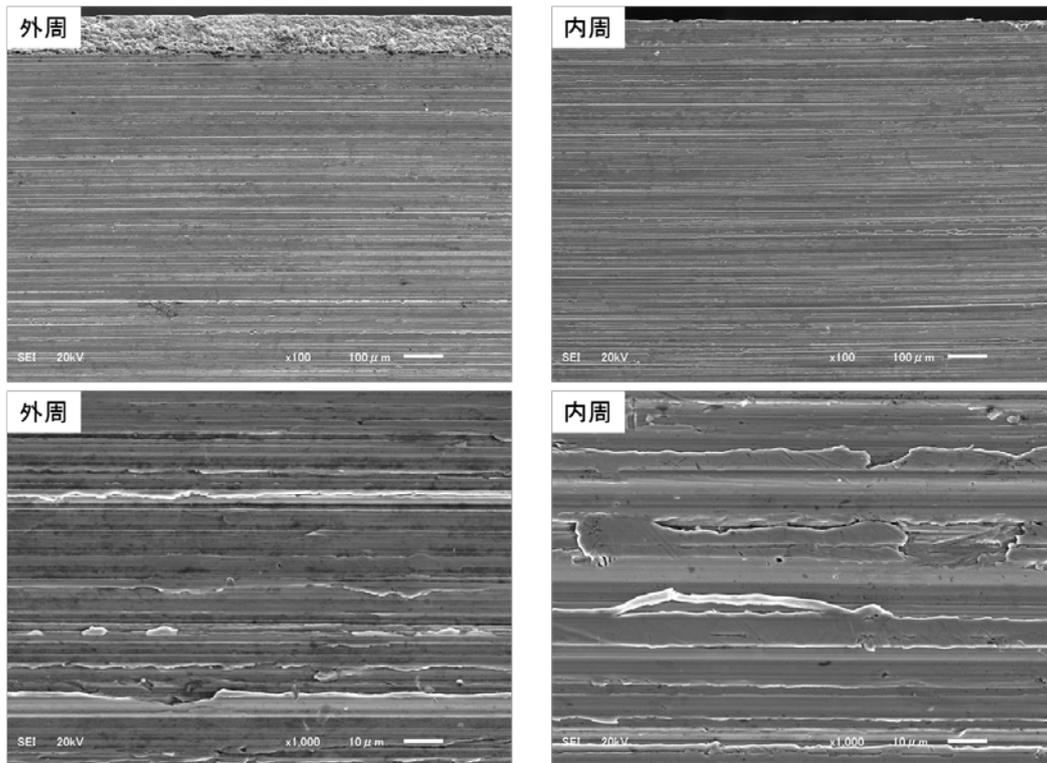


図 2-19 SEM による ELID 研削後のスリッター表面の観察

次に、図 2-20 に ELID 研削後のスリッター外周および内周の金属組織試験結果を示す。金属組織の現出には、10%硝酸アルコール溶液を用いた。金属組織は焼戻しマルテンサイトを呈しており、残留オーステナイトは観察されていないことから、焼戻しは十分にされていることがわかる。白い粗粒は、焼入れの加熱の際にオーステナイトに固溶しなかった未固溶炭化物である。外周および内周の表層において塑性変形の痕跡は、金属組織に見られないことから、ELID 研削では表層に過剰な負荷がかかっていないことを示している。また、図 2-14 の金属組織に見られたような白い脱炭層は観察されなかった。

マイクロビッカース硬さ試験結果より、外周と内周のそれぞれの表層と板厚の中心付近について測定した。熱処理は内部まで均一に施されている。本熱処理条件においてスリッターとしての要求仕様を満たしていることも示唆された。

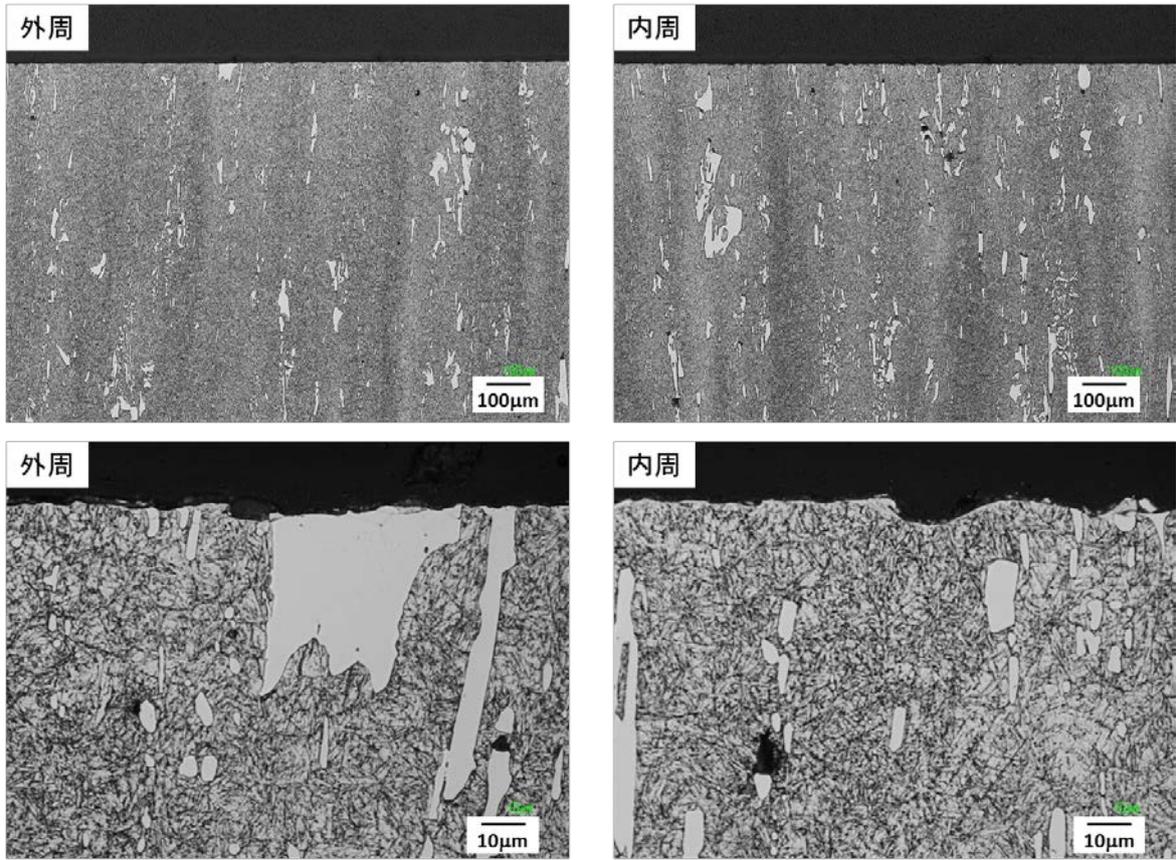


図 2-20 ELID 研削後のスリッターの金属組織

2-2-4 スリッターの平面研削条件の確立

一般的な研削加工におけるスリッターのそりの発生状況について検証を行った。

図 2-21 に $n=3$ のサンプルについてソリ測定を実施した結果を示す。

測定には超精密ロータリー研削盤を用いて、テーブルの芯振れおよび面振れのない環境で測定を行った。また、超精密ロータリー研削盤は油静圧の軸受けを採用しているため転がり軸受けなどと違い、ローラやボールの転動による振動の影響を受けない測定環境となっている。

また、測定子は最小目盛が $1\mu\text{m}$ のピックテスターを用いて、外径に近い部分を 8 箇所、中心に近い付近を 8 箇所の合計 16 箇所のポイントについて測定を行った。

一般的な研削加工では、約 $47\mu\text{m}$ 程度のソリの発生が確認された。また、3 個の内の 1 個は $120\mu\text{m}$ 以上のそりの発生が確認された。

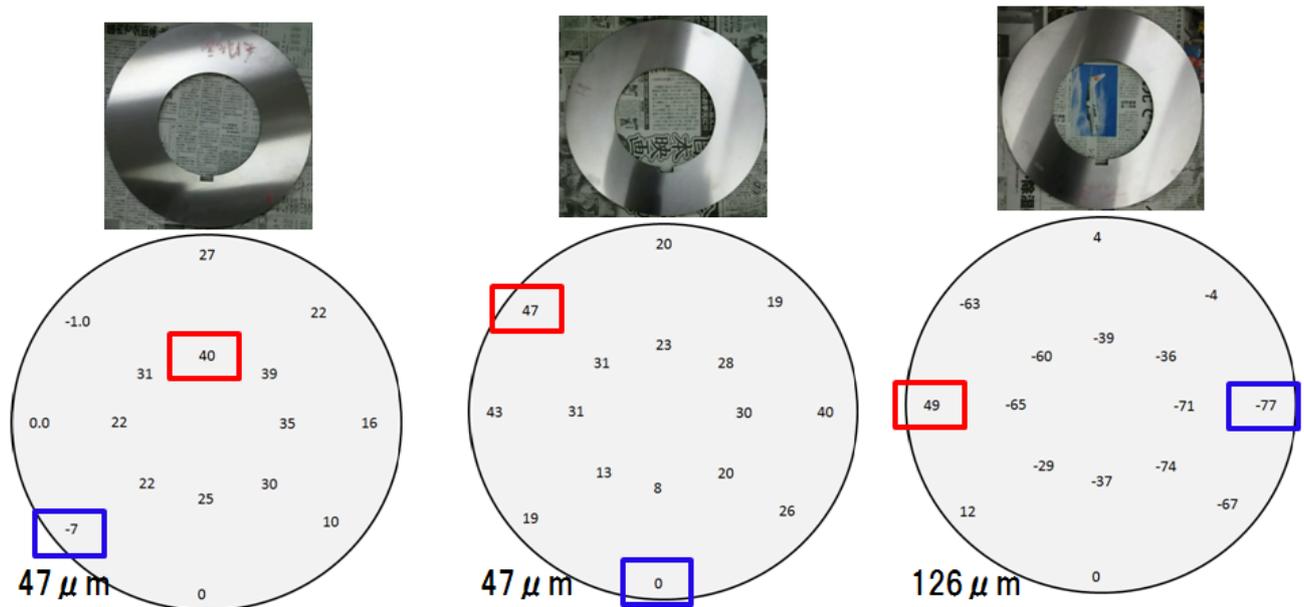


図 2-21 ソリの測定結果

2-2-5 スリッターの ELID 研削条件の確立

ELID を搭載したロータリー研削盤によりスリッターの加工を実施し、ソリ及び表面粗さについて加工条件との相関性について検証を行った。

図 2-22 に加工サンプルを示す。



(ア) 加工前

(イ) 加工後

図 2-22 加工サンプル

ソリ測定は、最小目盛が $1\mu\text{m}$ のピックテスターを用いて測定を行った。また、表面粗さはポータブル接触式表面粗さ計を機上に設置して測定を行った。加工前に $46\mu\text{m}$ 程度のソリを有する被削材に対して加工したソリの結果は、 $3\mu\text{m}$ 程度のソリ量を達成した。図 2-23 にソリの測定結果を示す。

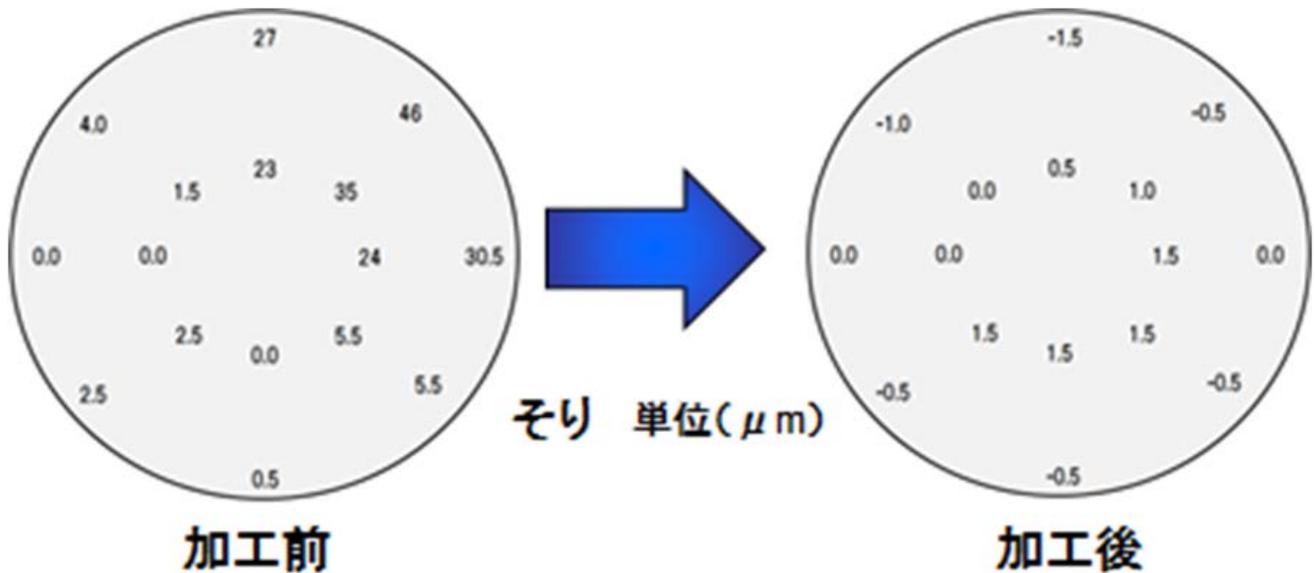


図 2-23 ソリの測定結果

加工したスリッター製品について非接触式表面粗さ計で3次元的に表面粗さの評価を行った。

図 2-24 に測定の様子を示す。

g 測定結果から3次元的な形状評価では最大粗さ (PV) が $3.4\mu\text{m}$ 程度、平均粗さが $0.169\mu\text{m}$ であった。また、2次元的な断面形状評価では最大粗さ (PV) が $1.5\mu\text{m}$ 程度、平均粗さが $0.160\mu\text{m}$ であった。この結果から表面粗さの目標値である平均粗さ $0.5\mu\text{m}$ 以下を達成した。

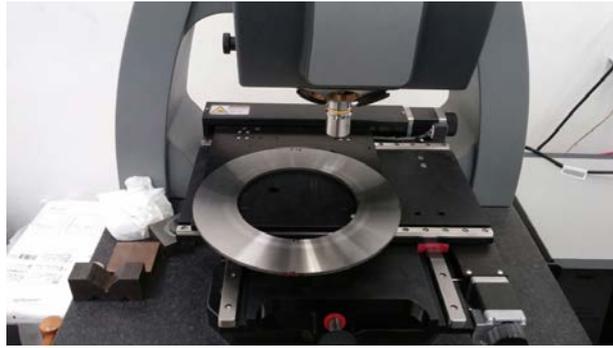


図 2-24 測定の様子

2-2-6 試作スリッターの検証

試作スリッターについて、アドバイザーであり川下企業でもある、日新製鋼株式会社に依頼して実証試験を行った。

現在のところ不具合等は報告されていない。

なお、スリッターについてはアドバイザーの日新製鋼株式会社、DOWA メタル株式会社に対し、平成 29 年度よりサンプルの出荷を予定している。

最終章 全体総括

本研究開発により、低価格かつ高精度な新規スリッターの商品展開を実現し、川下製造業等の生産性・効率化の向上及び低コスト化に貢献するという高度化目標を達成するに資する、重要な数多くの研究成果が得られた。以下に、その研究成果のまとめと今後の課題・事業化展開の展望について述べる。

【1】長尺ロール加工工程の短縮

【1-1】プラズマツルージングシステムの開発

φ50mm、長さ950mmの長尺ロール（材質：高速度工具鋼）の外周円筒研削に適合する現有機に搭載できる、研削砥石の外周振れ取りおよび、円筒度修正作業を行うプラズマツルージングシステムを開発した。

【1-2】ELID研削システムの開発

前記の長尺ロールの外周円筒研削に適合する現有機に搭載できるELID研削システムを開発し、長尺ロールの目標表面精度Ra0.4μmを達成した。また、真円度、円筒度、振れの目標精度はいずれも5μm以内を達成した。

【1-3】長尺研削用砥石の開発

上述の長尺ロールのELID研削システムに適合して、前記の精度を達成できる砥粒含有の導電性砥石を開発した。

【1-4】機上計測システムの開発

前記の長尺ロールに対して、前記のELID研削システムに搭載して計測できる機上計測システムを開発し、最小分解能は0.1μm以下を達成した。

【1-5】先進円筒研削システムの開発

上述の長尺ロールの外周円筒研削に適合する先進円筒研削システムを開発した。

【1-6】長尺ロールの熱処理シミュレーション

長尺ロールの長手方向の曲がり予測を行う熱処理シミュレーション技術を開発し、実際の熱処理結果を予想することが可能となった。

【1-7】先進円筒研削システムの統合化及びランニング条件の最適化

熱処理シミュレーション及び機上計測を援用した研削条件を確立し、先進円筒研削システムによる一連の加工工程のシーケンスを用いて長尺ロールのELID研削によるランニング試験を行った結果、加工表面精度は現状を維持したうえで、加工時間削減率は現状比40%低減する目途がたった。

【2】スリッターの新規開発

【2-1】スリッターの熱処理条件と熱処理歪みの関係把握

小型のモデル試験片における、熱処理歪みに及ぼす熱処理条件の影響を可視化することができた。

【2-2】スリッターの熱処理シミュレーション技術の開発

上記のモデル試験片における、熱処理シミュレーション結果と実際の歪みの間の誤差20%以内を達成し、金属組織の再現性は組織写真上でほぼ同等を達成した。

【2-3】スリッターの熱処理条件の確立

開発した熱処理シミュレーション技術を用いて、実サイズのスリッターの歪み予測を行い、実歪みの検証を行った結果、熱処理治具、熱処理条件を確立して必要最小限の加工取り代の設定を行った。

【2-4】スリッターの平面研削条件の確立

直径250mm、厚み10mmの小型スリッターに対して、表面精度Ra0.5μm、形状精度（平坦度）5μmを実現した。

【2-5】スリッターのELID研削条件の確立

長尺ロールのELID研削条件を応用して、スリッターのELID研削条件の確立を行い、直径315mm、厚み10mmの大型スリッターに対して、表面精度Ra0.5 μ m、形状精度（平坦度）5 μ mを実現した。

【2-6】試作スリッターの検証

試作した実スリッターを検証し、形状精度（平坦度）5 μ m、表面精度Ra0.5 μ mを達成した。アドバイザー（川下事業者）において実証試験を実施し、現在のところ不具合の無いことを確認した。

【アドバイザーからの意見】

- ・先進円筒研削システムにおいては、研削工程の高効率化とコストダウン他、加工対象物の表面精度が更に良品となる技術であり、ロール研削分野において今後を大いに期待しています。
- ・最近には特に表面品質への要望が高まっており、圧延の様なロール模様が転写される世界では目視では確認できない程の微細な状態が影響を受けます。ELID研削技術は常時ドレスがかけられており、均一な表面を維持できる為、生産者側からするととても有効に思えます。
- ・カッターにとって大事な平面度を、熱処理シミュレーションにより予測できると工数削減以上に効果が高いと感じます。
- ・今後、高精度の熱処理シミュレーションを実現するためには、鋼製品の焼入れ変形に関するメカニズムを十分に把握したうえで、さらなるパラメータを取り入れてシミュレーションソフトを育てていかなければならない。

【今後の事業化計画】

事業化・製品化の見通しだが、長尺ロール、スリッターどちらについても、平成29年度は川下事業者における実証実験を含む補完研究を実施する。また、都公社等の補助金を活用して生産用研削システムの導入など設備投資を行う。

平成30年度より販売開始を見込むとともに、以下の事業展開を行っていく。

- ・賃加工を受注する。
- ・他

以上