

平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「超微細粒冷延薄板を用いた精密部品プレス加工技術開発」

## 研究開発成果等報告書

### 【HP 公開版】

平成 22 年 3 月 31 日

委託者 関東経済産業局  
委託先 株式会社 小松精機工作所

## 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 当該プロジェクト連絡窓口

### 第2章 本論－(1)超微細粒温間・冷延薄板の学術的基礎構築(NIMS)

- (1)-1 温間大ひずみ圧延装置設計基礎
- (1)-2 超微細粒鋼製造のためのコンパクトプロセスの開発
- (1)-3 超微細粒鋼せん断基礎実験

### 本論－(2)超微細粒薄板の製作と供給(特金)

### 本論－(3)プレス加工技術の開発(KSJ)

- (3)-1 超高アスペクト比スムーズホールプレス加工技術の構築
- (3)-2 製品試作の評価

## 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 金属プレス加工に係る技術において達成すべき高度化目標

##### (1) 自動車に関する事項

- ・川下製造業者の抱える課題及び要請及びニーズ
  - ウ. 複雑形状化 オ. 低コスト化 カ. 環境配慮 (ニーズ)

自動車部品の微細精密化に伴い、個々の部品に求められる要求は寸法精度だけでなく、機能面での精度も要求されている。特に燃費規制や排ガス規制等の環境規制が厳格化されていく中で燃料系部品に多くの課題が要求されている。例として燃料噴射部品では、燃料の噴射流量のコントロール高度化や超微粒化した燃料の噴射が求められている。

噴射状態比較すると微粒化の状態に差異があるが燃料が霧化しない状態では燃焼効率が下がってしまう。一方、噴霧微粒化を行なうことで、燃焼の伝播を向上させ燃費効率と完全燃焼化による有害物質の発生の低減が可能となる。その実現の為に、オフィス部分を斜めにするなどの噴射部分の形状複雑化(図1)や高圧力噴射を行なわなければならない。この機能を満足するために、加工面では板厚よりも小さい穴(高アスペクト比穴)、噴射部加工面の平滑化及びバリの制御を実現することが求められている。しかし、これらの要求を安定的に行なう加工方法は確立されていない。環境対策の為に排気部品の高性能化やハイブリット化も検討されており、これら技術との併用により効果的で総合的な環境対策と低コスト化を求められている。

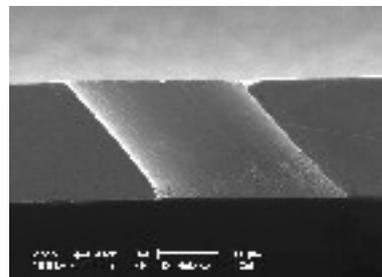


図1 微細穴詳細写真

また、材料面では高張力鋼板などが市場に出て技術確立が推進されているが、環境面や機能面から新規材料として超微細粒鋼が注目されている。特に別途元素を追加せずに結晶状態のコントロールによって強化する方法は省資源面でも有効な手段である。近年、基礎的な加工技術の構築の必要性も指摘されており、高張力鋼板と同様に難加工が予想されるが、この材料への加工技術の構築により自動車に関する課題及び要請を解決する手段として注目されている。また、現在までの研究の結果、超微細粒鋼を用いることでより平滑なプレス加工面が得られることを確認している。

##### (現状関連技術)

加工面向上のために用いられるファインブランキングは、薄板を使用した微小な部品への適応がその加工機構上困難であるため、加工面の向上の技術的限界に直面している。また、バレル加工も破断面向上の2次的な対策として効果はあるが、微小部品の場合はエッジ部の変形などが問題となる。

##### (2) 情報家電に関する事項

- ・川下製造業者の抱える課題及び要請及びニーズ
  - ア. 精密化・微細化 イ. 軽量化・小型化・静音化 ウ. 複雑形状化 カ. 環境配慮 (ニーズ)

情報家電においてはEUのRoHS規制にも見られるように使用可能な材料の規制に始まり、低環境材料を用いた製品作りが進められている。付け加えて、本年4月に物質材料研究機構から発表の「金属の2050年枯渇説」や政府・経済産業省・文部科学省が進められている元素戦略及び希少金属戦略などから材料の有効活用化が注目されている。このような環境の中で元素等を追加せずに物理的特性の向上させる微細粒鋼の活用は有効な手段の一つである。例として、携帯電話に代表されるように情報家電分野での部品の小型化+リサイクル化は顕著であり、小型の駆動部品等に於いてはプレス加工時の破断面が問題となるケースも報告されている。

##### (現状関連技術)

上記解決の為にファインブランキングやバレル処理などで対応しているが、より微細な部品に対してはファインブランキングが不可能であり、バレル加工も変形等を考慮すると微細製品への適応が不可能であるため形状の限界が指摘されている。付随して、製品の小型化に伴いバリが製品機能へ与える影響が大きくなってきており、バリの抑制を行なうことも課題である。

材料面に於いても環境調和型の材料の利用が課題であり、自動車に関する事項で挙げられた超微細粒鋼の使用によって解決が可能な面があると推測される。

##### (3) 燃料電池に関する事項

- ・川下製造業者の抱える課題及び要請及びニーズ
  - イ. 高耐久化 (ニーズ)

現在急速に燃料電池に対する注目が集まっているが、多くの課題を抱えている状態である。特にセパレータ分野では、ステンレス系及び炭素系の材料を用いることが主流になってきているが、エネルギー効率の低下や強度、耐久性などの材料面の課題に加えて、流路の形状加工精度が求められている。例としてダイムラークライスラーが現在発表している燃料電池のセパレータでは板厚0.15mmのステンレス材料である。

##### (現状関連技術)

この新規市場構築分野では新規材料が使われる可能性が高いことから、新規材料へのプレス加工技術の開発が必

要であり、同様に超微細粒鋼の展開先として可能性が予想される。

\* 超微細粒ステンレスについては日本金属学会 2006 年 3 月 26 日に概要が発表されている。

(4) ロボットに関する事項

・川下製造業者の抱える課題及び要請及びニーズ

ア. 高精度化・微細化 イ. 高耐久化 ウ. 低コスト化  
(ニーズ)

近年、大型のロボットだけでなく、マイクロロボットの分野が注目されており、2006 年には国際マイクロロボットメイズコンテストが名古屋大学で行なわれ、製品としてはセイコーエプソンの「 $\mu$ FR-I I」や「ムッシュ I I-IP」などが登場している。このようなマイクロロボットの活用は、内視鏡やカテーテルなどの医療用の駆動源としても考えられている。

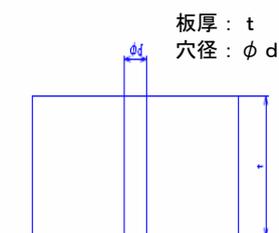
1 金属プレス加工に係る技術において達成すべき高度化目標

(1) 自動車に関する事項

・上記を踏まえた高度化目標

ア. 高張力鋼板、アルミニウム合金等の難加工材に対応した成形技術の向上 ウ. 複雑三次元形状等を創生する成形技術

概要： 第一段階では、通常使用材料に対しクリアランスの最小化とパンチ+ダイの同軸度精度の向上により高アスペクト比穴(図3 高アスペクト比説明図)の実現を行なう。現在高アスペクト比加工について、板厚 2mm 以上のものについてアスペクト比 ( $t/\phi d$ ) 2 に近い実験が行なわれた報告が論文等でされているが量産加工は実施おらず、それ以下の板厚においては、金型部品強度の問題もあり実例が報告されていない。よって、薄板材 (2mm 以下) の材料に対して、高アスペクト比穴のプレス加工方法の開発を行ない、超高アスペクト比 ( $t/\phi d$ ) 2 に近いプレス加工技術の開発を行ない、より耐高圧、高強度の微細穴を保有する部品の開発を行なう。



( $t/d$ ) = アスペクト比  
高アスペクト比 > 1.0

図3 高アスペクト比説明図

第2段階として難加工性が予想される超微細粒鋼に対して第一段階と同様な実験を行なう。これまでの成果の中で、微細粒鋼のプレス加工の破断面は通常材料と比較し平滑(スムーズ)であり、バリも少ないことが確認されていることから(図4参照)、微細粒鋼を用いてのプレス加工によりこれら問題の根本解決に繋がるのが予測されるからである。同様に総合的なコストを考慮し、且つ環境に配慮した設計により自動車部品の微細精密化が進む中で、このような、材料面を含めた加工技術の開発が急務である。

キ. 金型・工具の高機能化及び耐久性向上

概要： 上記技術向上の為に金型の構造的な面から、パンチ+ダイの同軸度精度の向上と工具に使用する材料の選択が重要になる。この基礎データの構築を行なうことで最適条件を探索し、耐久性向上を行なう。1982年に高石氏(塑性と加工 val23 No. 26)などにより報告されている様に、特に高アスペクト比穴加工では、パンチ側面の磨耗が特に進むため、適切なクリアランス状態維持などの対策を行なった金型技術の構築が必要である。

(2) 情報家電に関する事項

・上記を踏まえた高度化目標

ア. 精密・微細加工技術等の向上 イ. バリやカス上がりの抑制技術及び自動処理技術の向上

概要： 自動車に関する事項と同様に、携帯電話を初めとした部品の微小化に伴い、部品精度及び微細加工技術の向上を行なう。また、バリの抑制対策は微細加工技術と同等に重要な課題であり、バリの発生自体を抑制した技術の向上を目標とする。

(3) 燃料電池に関する事項

・上記を踏まえた高度化目標

ア. チタンや硬質ステンレス等の難加工材の成形技術の向上 イ. プレス機械及び金型技術の向上

概要： セパレータ材料として現在導入検討されているステンレス材に対して、材料自体の強度向上の為に材料の微細粒化を施し強度、耐久性の要求に対応し、プレス加工技術面ではこの材料に対する部品精度の向上を目標とする。

(4) ロボットに関する事項

・上記を踏まえた高度化目標

ア. 精密・微細加工技術の向上 イ. バリやカス上がりの抑制技術及び自動処理技術の向上 ウ. 難加工材の成形技術の実現 カ. プレス機械及び金型技術の向上

概要： 微細部品に発生するバリ及びシャープエッジは製品機能へ与える影響は大きくなり、この抑制は課題である。また、プレス加工時に材料が引っ張られることによって起こる「ダレ」の発生は製品の寸法精度に影響を及ぼすため、適切なクリアランス状態を維持可能な金型の精密・微細加工技術が不可欠である。

特定研究開発における各技術開発項目の目標値を下記に挙げる。

現在までの研究段階

超微細棒鋼（長さ 60cm 材 x 厚さ 4mm）を途中焼鈍なく 0.2mm まで圧延でき、もともと短尺材のため板の蛇行や表面性状などで、問題があったがプレス加工の実験は可能なレベルであった。その結果、図 4 及び 5 に示すようにバリの発生が見られず、加工面がなめらかであった。内部組織は短軸 0.2 ミクロン、長軸数ミクロンの超微細組織で、1000MPa 以上の高強度を有していた。一方、問題点として、のびが 3% と小さいこと、異方性も観察され、適切な焼鈍による異方性緩和が必要と考えられた。これらの基礎研究をふまえ以下の研究を行う。

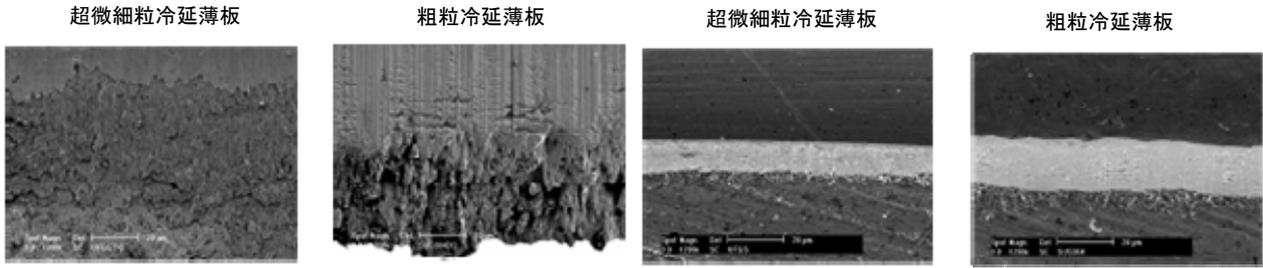


図 4 加工面荒れの様子

図 5 加工面のばりの発生状況

1. プレス加工技術の開発（小松精機工作所 以下 K S J）
  - 1-1 高アスペクト比穴プレス加工技術の開発
  - 1-2 超高アスペクト比スムーズホールプレス加工技術の構築
  - 1-3 製品サンプル製作
2. 超微細粒温間・冷延薄板の製作と供給（特殊金属エクセル 以下特金）
  - 2-1 温間大ひずみプロトタイプ圧延装置のスケールアップ及び冷間圧延装置開発
  - 2-2 熱処理条件の確立（急速短時間低温焼鈍）
  - 2-3 下流加工工程に適合した素材特性のすりあわせ
  - 2-4 ステンレス系超微細粒鋼の製作と技術水平展開
3. 超微細粒温間・冷延薄板の学術的基礎構築（物質・材料研究機構 以下 N I M S）
  - 3-1 温間大ひずみ圧延装置設計基礎
  - 3-2 プロトタイプ圧延機による試作と評価
  - 3-3 冷間圧延及び急速低温焼鈍による組織変化の基礎検討
  - 3-4 超微細粒冷間圧延鋼板の穴抜き加工時のせん断面、破断面の特徴の解析

## 1-2 研究体制

### 研究役割と体制

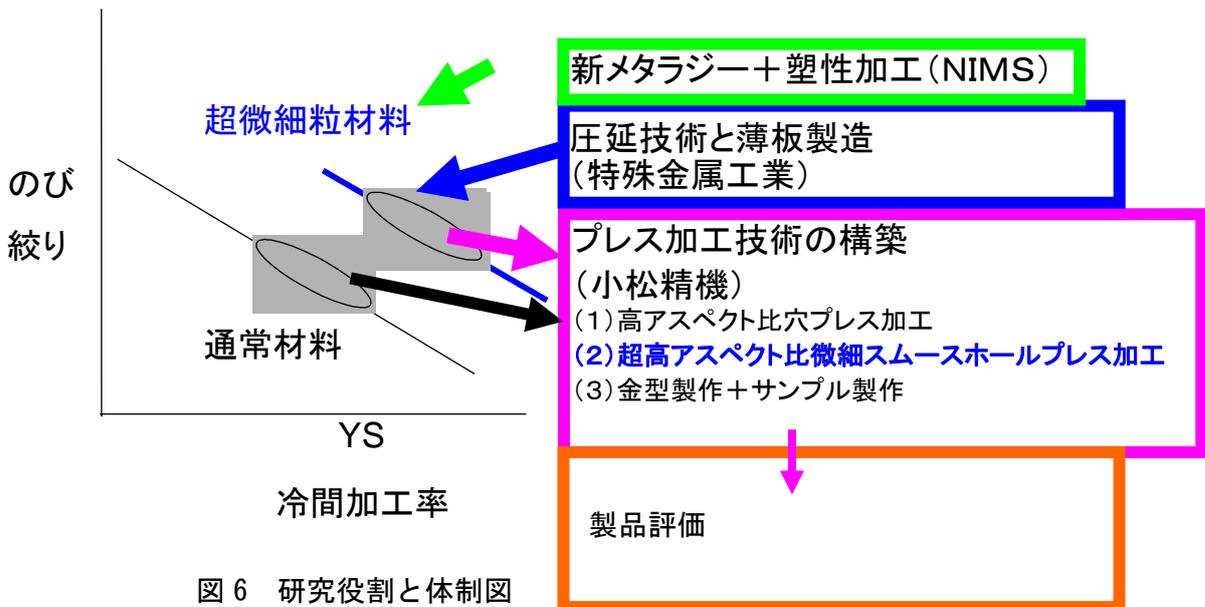


図 6 研究役割と体制図

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

<p>1. プレス加工技術の開発（K S J）</p>	<p>株式会社 小松精機工作所          生産技術部 小松隆史          〒392-0012 長野県諏訪市四賀桑原 942-2          0266-52-6100          0266-58-0107          takafumi@komatsuseiki.co.jp</p>
<p>2. 超微細粒薄板の製作と供給（特金）</p>	<p>特殊金属エクセル株式会社          〒355-0342 埼玉県比企郡ときがわ町大字玉川 5 6          03-5391-6151          03-5391-6101          y-matuzawa@tokkin.co.jp</p>
<p>3. 超微細粒温間・冷延薄板の学術的基礎構築（N I M S）</p>	<p>独立行政法人物質材料研究機構          〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1          029-859-2111          029-859-2851          TORIZUKA.Shiro@nims.go.jp</p>

## 第2章

### 本論一 (1) 超微細粒温間・冷延薄板の学術的基礎構築 (NIMS)

#### (1) - 1 温間大ひずみ圧延装置設計基礎

微細粒組織を得る為に85%台ひずみ圧延を可能とする基本コンセプトを実現する装置の設計と製作を行った。

#### (1) 基本仕様

1. 件名 VH一体型圧延機320
2. 数量 1式
3. 概要 VH一体型圧延機で温間圧延を行うことにより、超微細粒組織鋼細帯板を製造する。
4. 仕様 VH一体型圧延きは、3タンデムロール形圧延機部分からなる。

#### (2) プロトタイプ圧延機による試作と評価

装置立会いに伴い、普通鋼(S15C)を用いてプロトタイプ圧延機の圧延能力の確認を行った。図2-1-1に試験材料写真を示す。本圧延実験によるプロトタイプ圧延機が超微細粒鋼の製作に必要な能力を十分に持っていることを確認した。



図 2-1-1 試験材料圧延結果写真

#### (1) - 2 超微細粒鋼製造のためのコンパクトプロセスの開発

##### (1) 緒言

超微細粒鋼は、マルテンサイトやベイナイトに比較して、強度-絞りバランスが優れ、高強度の非調質冷間圧造用鋼として、高い可能性を持つことを報告してきた<sup>1-3)</sup>。超微細粒鋼が線材として供給できるようになれば、この線材を新しい高強度非調質冷間圧造用鋼として提供できることになる。例えば、従来、高強度ねじ・ボルト製造に際して必須であった焼入・焼戻しが不要となり、工程省略やエネルギー及びCO<sub>2</sub>排出量削減に寄与できる。一方、超微細粒鋼の実用化例は少ない。その理由として、微細粒鋼の製造プロセスの難しさが挙げられる。現在、超微細粒鋼の製造方法として、以下の2つに大別される。

(a) 温間強加工による $\alpha$ 再結晶を利用した方法 この方法は500–600°Cという圧延負荷の大きな温度域での加工が必要であることが問題である。

(b) Ar3 直上強加工と急速冷却による $\gamma$ – $\alpha$ 相変態を利用した方法

この方法は、圧延負荷の低い750°C以上であるが、短時間で加工を行う必要があり、さらに、遅滞なく急速冷却を行う必要があり、必ずしもプロセスウィンドウが広いとは言えない点が上げられる。

われわれは、(a)の方法のメリット、例えば、多パス圧延を行うときにパス間時間の影響が少ない、Zパラメータとひずみ量で組織を制御できる（高Z–大ひずみ加工）というメリットに注目して、プロセス技術を検討してきた。棒鋼や線材の場合、温間加工をおこなっても、圧延時の負荷の大きさは、板材にくらべ大きな問題にならないことに注目し、溝ロール圧延による棒鋼製造に適用し、超微細粒棒鋼が作製可能であることを明らかにした<sup>4)</sup>。しかしながら、単純な溝ロール圧延では、工業化・量産化はできないため、より効率的な方法が求められてきた。我々は、溝ロール圧延を発展させ、線材の連続圧延が可能かつコンパクトなプロセスを開発してきた。

大ひずみの導入方法として多方向加工がある<sup>5,6)</sup>。これは単純な圧縮加工であっても多方向からひずみを与えることによって、断面減少率が小さくても大きな塑性ひずみを材料内部に導入できる技術である。多方向加工は鍛造型の圧縮加工であるが、それを圧延で連続的に実現することが、超微細粒鋼を生産するための基盤技術となる。本研究では、多方向加工の連続化をコンセプトとして、超微細粒鋼線材製造のためのコンパクトプロセスについて報告する。また、線材から薄帯板・極細線の製造への適用可能性についても報告する。

## (2) コンパクトプロセスの構成

図2-1-6に圧延機の模式図を示すがコンパクトプロセスのコンセプトを有する圧延機を設計・製作した。

- (1) Coil to Coil 連続圧延
- (2) 直近加熱による温間制御圧延
- (3) 直交2ロール超近接圧延
- (4) オーバル・スクエア孔型を用いた多方向圧延

連続圧延のためには、素材を線材コイルとし、圧延後もコイルに巻き取るCoil to Coil圧延が基本となる。高Z–大ひずみ加工の場合、結晶粒径は、Z値（Zener-Hollomon parameter）で決まる<sup>2)</sup>。ひずみ、圧延時間、圧延温度を線材の全長で一定にできれば、組織も同一となる。そのためには、温間圧延を一定温度で行ういわゆる制御圧延を連続的に行う必要がある。高周波加熱装置を用い、ライン上の圧延装置直近に設置することによって、制御圧延を実現することを試みた。圧延機本体であるが、2タンデム圧延とした。溝の形状は1パス目がオーバル、2パス目がスクエアとなるようにして、2ロールを直交させている<sup>7)</sup>。また、超近接圧延では、短パス間時間化、温度低下の防止に加え、線材の倒れを防ぐことを目的とし、ロール間距離はほぼロール径と同じとした<sup>8)</sup>。

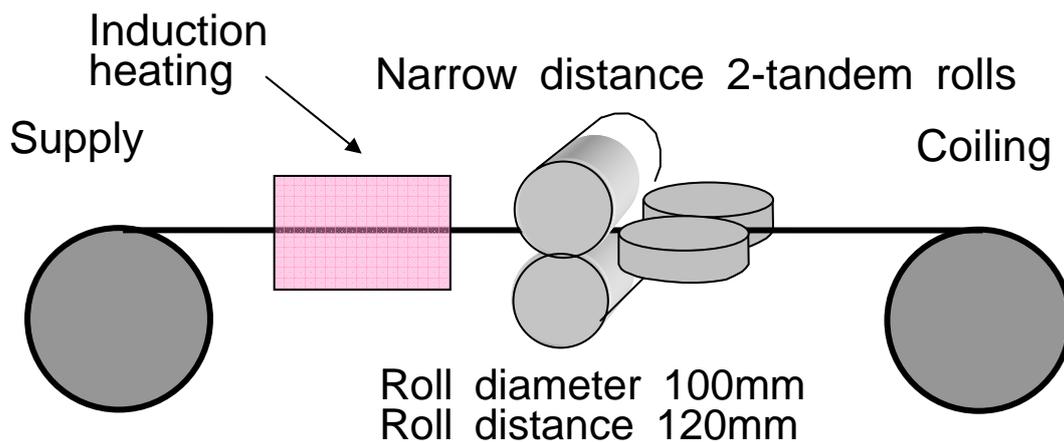


図2-1-2 連続温間大ひずみ圧延装置

## (3) 実験方法

直径6mmの線材をスタート材とした。(1) 第一工程：500°C高周波加熱→オーバル→スクエア圧延→巻取 (2) 第二工程：高周波加熱→オーバル→スクエア圧延→巻取 (3) 第三工程：500°C高周波加熱→オー

#### バル→スクエア圧延→巻取

以上の3工程からなる孔型圧延によって、直径3mmまで圧延を行った。3工程での総減面率は75%であり線材断面の状態を図2-1-3に示す。線材の圧延速度は入り側4m/minである。また、第3工程をオーバルの状態と定め、そこから平ロール圧延で、厚さ0.2mm薄帯板を作成した。薄帯板は、引き続き、焼鈍をおこなって、粒径を制御した。

#### (4) 実験結果

本方法により、コイル to コイル圧延を3工程行うことにより、10数kgの線材が製造できた(図2-1-4)。また、第1工程後は、中心部に微細粒が生じているのみであるが、第2工程、第3工程を経ることによって、断面全体が微細粒になっていく。図2-1-5に3工程後の線材のEBSD粒界マップを示す。方位差角 $5^\circ$ 以上の粒界の割合は75%であり、平均粒径は $0.5\mu\text{m}$ であった。見かけの減面率は75%であったが、等軸微細組織からなっていた。オーバル・スクエア圧延は、多方向加工の効果によって、4を超える大ひずみが導入されたためである。3工程後の3mm線材の強度を表1に示す。たとえば、0.06C鋼の $6\phi$ 段階の強度が $TS=40\text{MPa}$ であるから、2倍以上に高強度化されている。さらに冷間圧延の結果、より高強度化する。図2-1-6に薄帯板の外観を示すが、薄帯板製造にも適用可能である。

図2-1-7に焼鈍後の応力-ひずみ曲線、表2-1に力学的性質を示す。

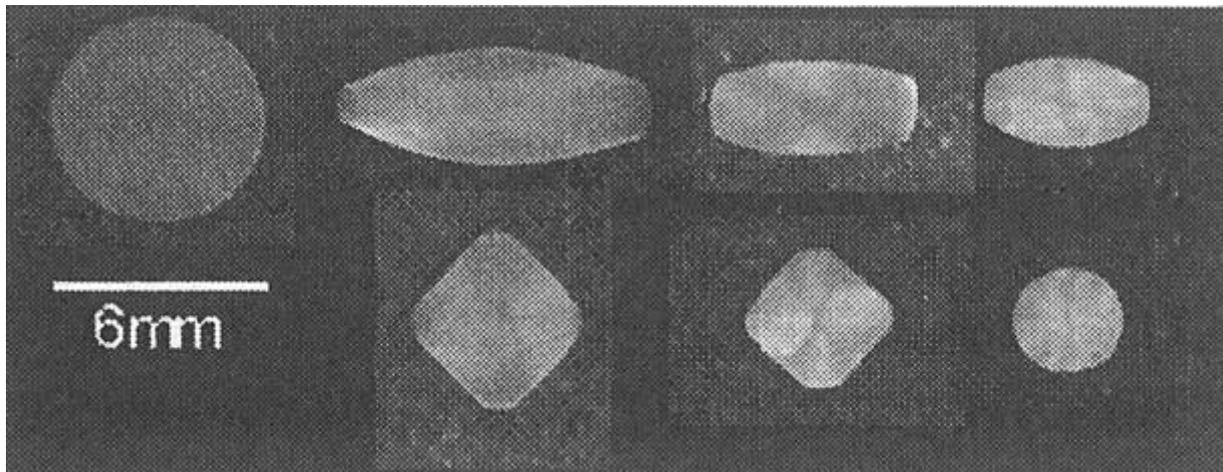


図2-1-3 1工程、2工程、3工程後の線材の断面



図 2-1-4 超微細粒鋼線材コイル

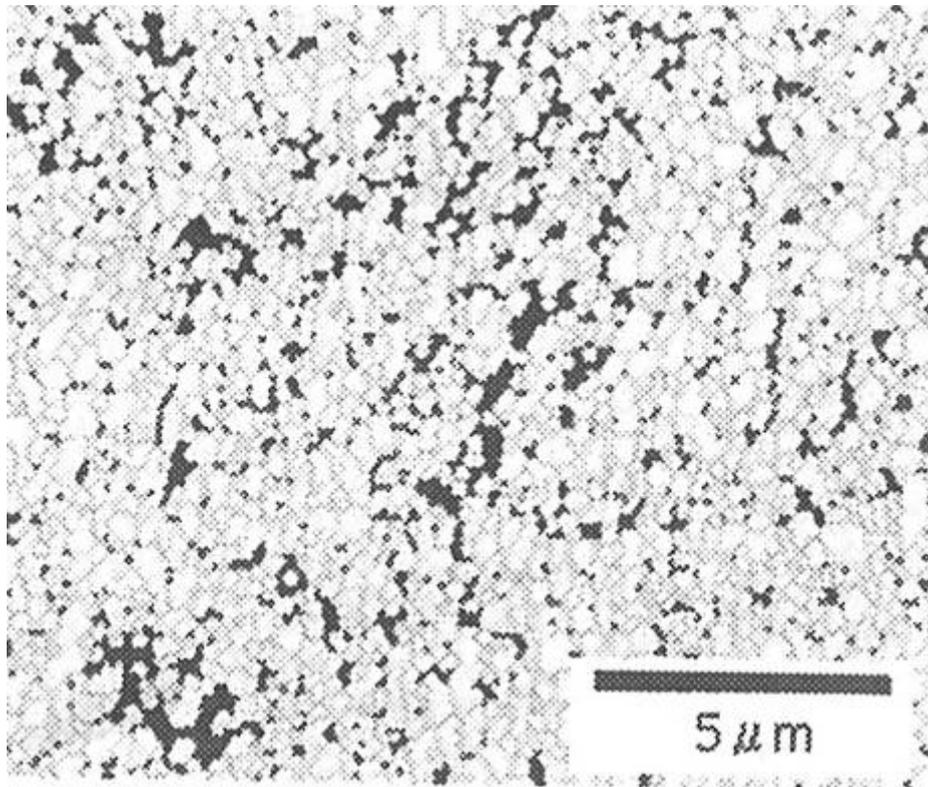


図 2-1-5 3 工程後の 3mm 線材の C 断面の粒界 EBSD マップ



図 2-1-6 0.2mm 厚の薄帯板

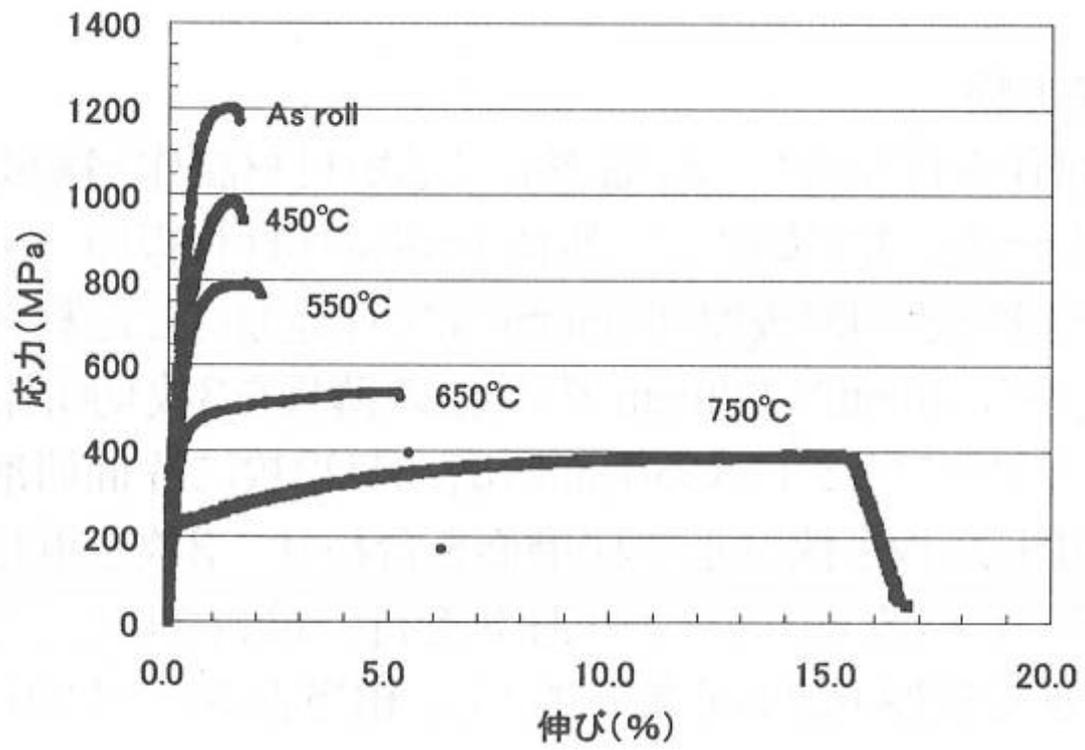


図 2-1-7 薄帯板の焼鈍後の力学的性質

表 2-1 線材の力学的性質

Carbon content	After warm rolling 3φ			After cold rolling 1.35φ		
	TS(MPa)	RA(%)	Hv	TS(MPa)	RA(%)	Hv
0.06	890	73.0	290			
0.1	813	75.2	289	980	68.0	314
0.45	1030	55.4	339	1291	30.0	353

**(5) 冷間加工された超微細粒鋼の組織**

冷間加工された線材の微細組織を透過電子顕微鏡で観察した。図 2-1-8 の写真は、線材の L 断面である。等軸性のよい微細組織も、冷間加工によって、伸長した組織となっており、内部には多くの転位が観察される。また、図 2-1-9 の制限視野回折像からは、多くの方位の粒が存在していることが分かる。

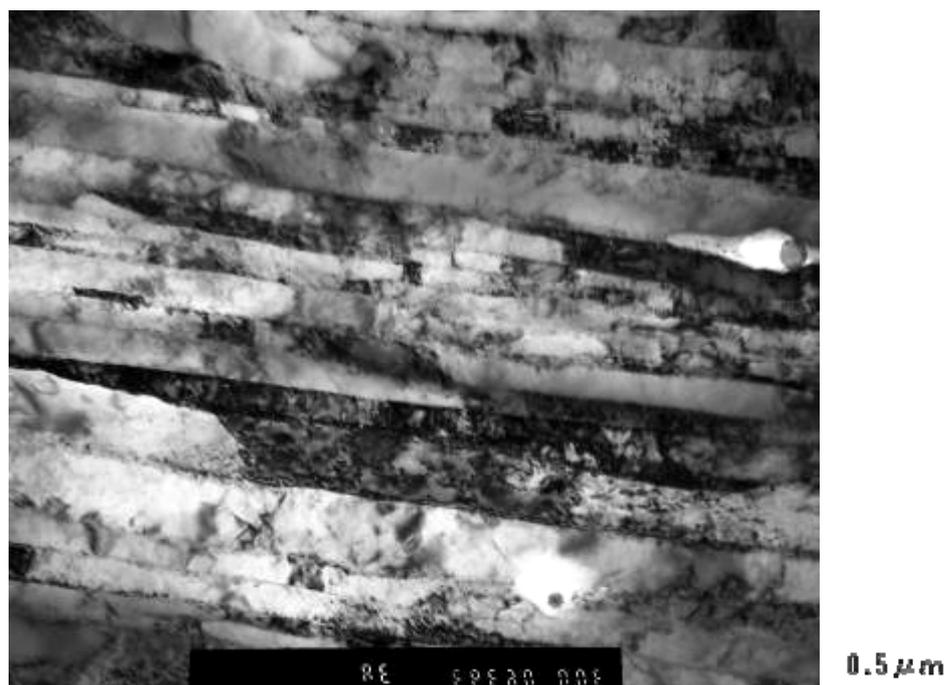


図 2-1-8 線材の TEM による微細組織観察（明視野像）

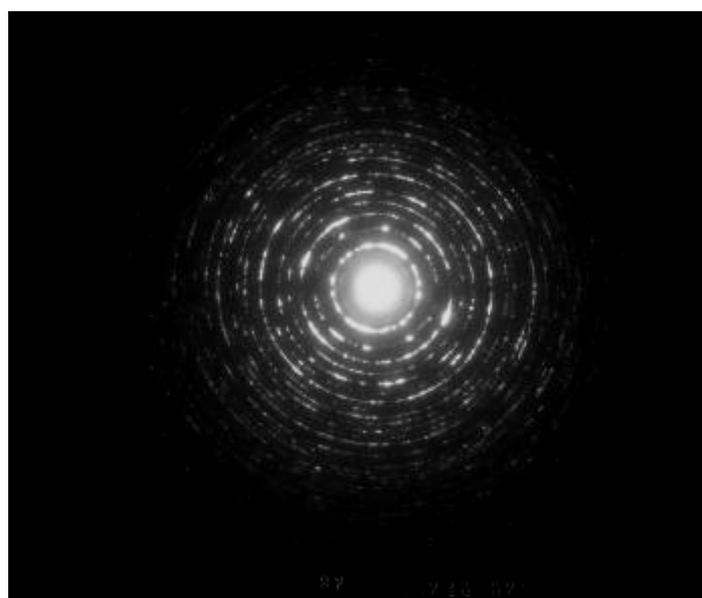


図 2-1-9 線材の TEM による微細組織観察（制限視野回折）

## (6) 極細線の性質

超微細粒鋼は、25-30 ミクロンまで冷間伸線することが可能である。その性質を調べるため、引張試験を行った。ヤング率は焼く 210GPa であり、ここまで伸線しても、変化はない。従って、ヤング率自体は、塑性加工で変化しないといえる。代表的な引張強さを以下に示す。

表 2-2 極細線の力学的性質

組成	線径 ( $\mu\text{m}$ )	降伏強さ (MPa)	引張強さ (MPa)	ヤング率 (GPa)
0.0014C	30	1670	2100	208
0.04C	25	2840	3130	208

## (6) まとめ

オーバル・スクエア孔型を用いた直近加熱 2 タンデム圧延機からなるコンパクトプロセスを開発した。その結果、薄帯板と微細粒組織線材の工業的な生産を可能にするプロセスの開発に目途をつけた。

### 参考文献

- 1) S. Torizuka et. Al., : Scripta. Mater., **55**(2006), 751.
- 2) 鳥塚：まてりあ, **45**(2006), 438.
- 3) 鳥塚ほか：CAMP-ISIJ, **18**(2005), 1745.
- 4) 大森ほか：鉄と鋼, **89** (2003) , 78.
- 5) 井上ほか：鉄と鋼, **86** (2000) , 793.
- 6) 鳥塚ほか：鉄と鋼, **86** (2000) , 801.
- 7) 井上ほか：日本金属学会誌, **69** (2005), 934.
- 8) 鳥塚ほか：第 58 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2007), 139.

## (1) - 3 超微細粒鋼せん断基礎実験 超微細粒鋼のせん断面の特徴

### (1) 緒言

超微細粒鋼は、マルテンサイトやベイナイトに比較して、強度-絞りバランスに優れ、超微細粒鋼線材は高強度の非調質冷間圧造用鋼として、高い可能性を持つことを報告してきた<sup>1, 2)</sup>。一方、超微細粒鋼が、成形性の優れた高強度薄板として提供できれば、プレス加工で製造する精密部品分野への適用が可能となる。しかし、プレス加工特性についての研究に関しては、サブミクロン組織をもった薄板の製造の困難性から、報告例は少ない。精密部品のプレス加工には、素材の切断や穴あけなどせん断加工による成形が欠かせない。

図2-1-10<sup>3)</sup>に示すように、せん断加工面はだれ、せん断面、破断面、かえりからなるが、結晶粒径の影響は明らかではない。微細粒鋼の特徴である加工硬化が小さい、絞りが大きいという特性はせん断加工面に大きな影響を与えると考えられる。本研究では、前報<sup>4,5)</sup>に引き続き、超微細粒鋼のせん断加工特性に注目し、せん断加工面の特徴を解析した。

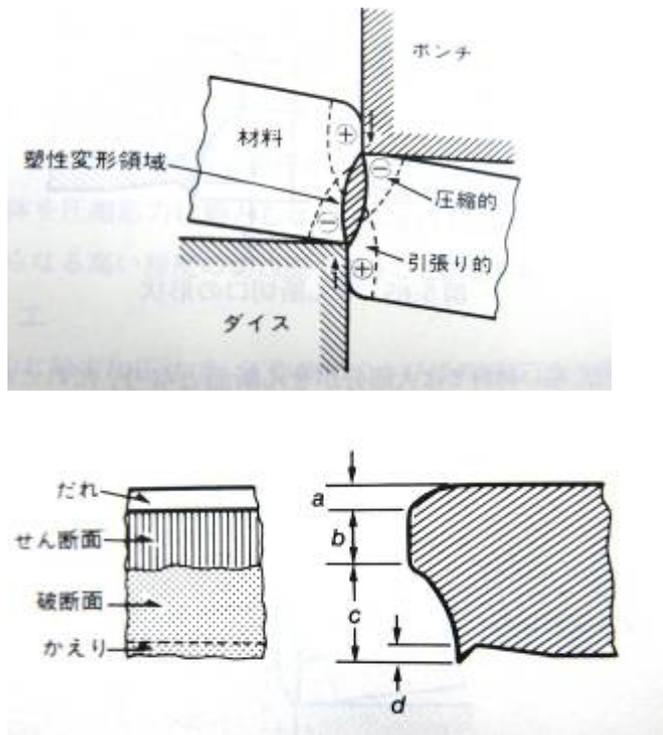


図 2-1-10 せん断面の特徴<sup>3)</sup>

## (2) 実験方法

0.002及び0.01C-0.3Mn-0.2Siの組成の超微細粒鋼を温間溝ロール圧延法（18mm角の棒材）によって作製した。低炭素組成としたのは、フェライト単層組織とするためである。この18mm角の棒材の一部を650℃で熱処理を行い、粗大粒組織棒材も作製した。また、比較の為、0.3C-1.5Mn-0.3Si組成のフェライト+パーライト組織材を熱間圧延によって作製した。図2-1-11に0.01C微細粒材と粗粒材の組織写真を示すが、結晶粒径はそれぞれ、 $0.7\mu\text{m}$ 、 $13\mu\text{m}$ であった。セメントライトは見いだされなかった。0.30C鋼はフェライト粒径 $20\mu\text{m}$ で、第2相はパーライトであった。図2-1-12に棒材の引張試験結果を示す。0.01C粗粒材は伸びが50%で引張強さが330MPaであった。0.3Cフェライト+パーライト組織材は、YS=400MPa、TS=630MPaで、大きな加工硬化をもつ。一方、0.01C微細粒材はYS=700MPaと粗粒材の3倍になったが、降伏後、まったく一樣伸びを持たずに破断した。0.002C超微細粒材は、伸びが20%程度あった。次に、18mm角の棒材から、放電加工および表面研削によって、幅18mm×厚さ1mmのうちいた形状のサンプルを作製し、せん断加工用のサンプルとした。

せん断面の切口面性状を調査する為に、スイング式油圧シャー（コマツ産機SHS10）を用いた。クリアランスは5%とした。また、穴抜き加工における切口面形状の比較として図2-1-17に示す金型を用いて、穴あけ加工を行い製品側とカス側の調査を行った。使用するパンチ直径は3.00mm、ダイス直径は3.04,3.12,3.20mmで、クリアランスは2.0,6.0,10.0%とした。

せん断面の評価にヒキエンス3D-SEM VE9800等を用いた。

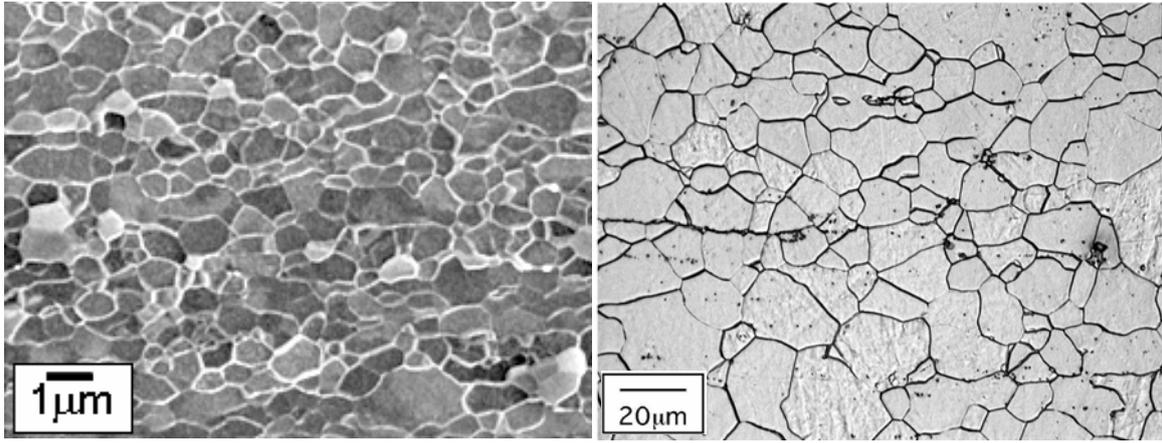


図2-1-11 0.01C鋼 (a) 超微細粒材と (b) 粗粒材料の組織

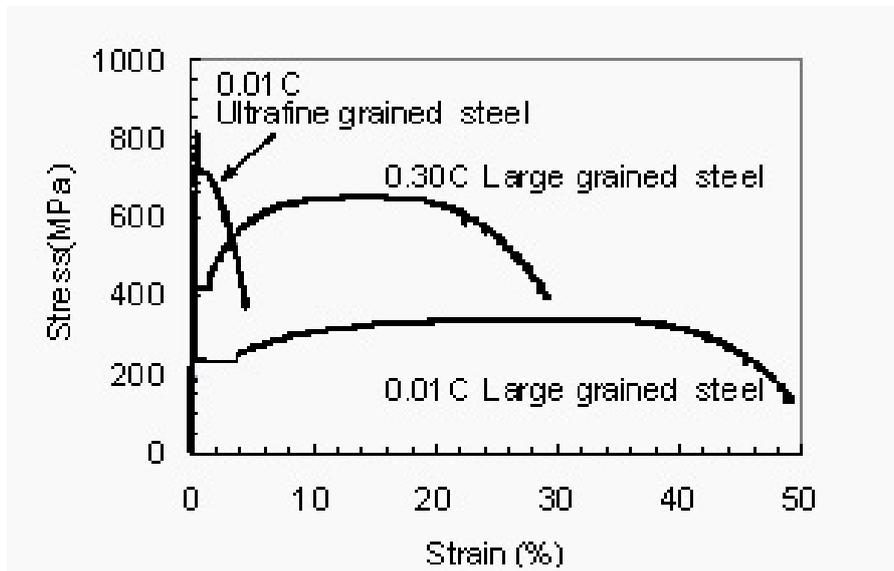


図2-1-12 超微細粒材と粗粒材の応力-ひずみ曲線

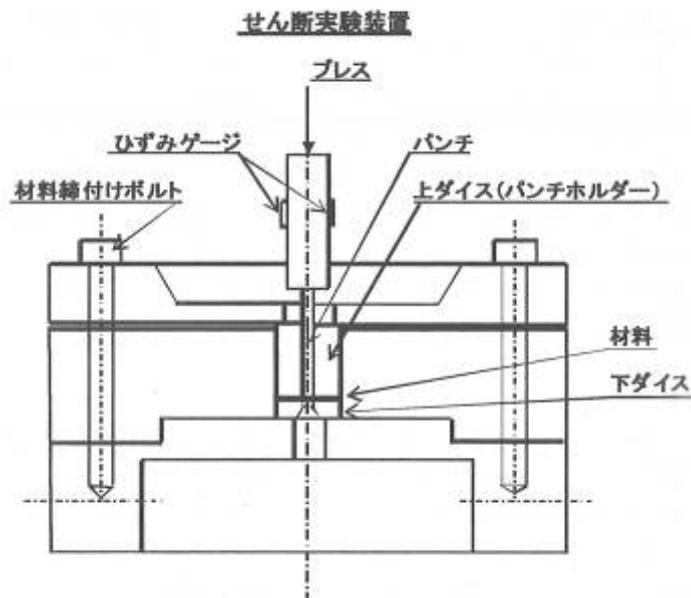


図2-1-13 せん断加工試験に用いた金型

### (3) 実験結果

#### (3-1) 超微細粒鋼のせん断切口面性状の特徴

図2-1-14にせん断加工面のSEM像を示す。せん断加工面にはせん断面、破断面が観察される。低強度材である0.01C粗粒材(c)は、せん断面比率は大きいものの、加工面全体の変形が大きく、さらに、だれ、かえりも大きい。

図2-1-18(d), (e), (f)に破断面の拡大を示すが、(f)の0.01C粗粒材の場合大きなディンプルが観察され、凹凸が大きい。一方、(d)の0.01C微細粒材の場合は、大きなディンプルは観察されない。また、(e)の0.30Cフェライト+パーライト材の破断面は、どちらかといえば、0.01C微細粒材に近く、大きなディンプルはないようである。引張強さも微細粒材に近く、破断面に関しても、微細粒材に近い。破断面の凹凸を3D-SEMの機能を用いて、縦横3カ所の高低差を測定し、平均したところ、粗粒材で約30 $\mu\text{m}$ 、微細粒材で約9 $\mu\text{m}$ であった。0.30Cフェライト+パーライト材では約12 $\mu\text{m}$ であった。

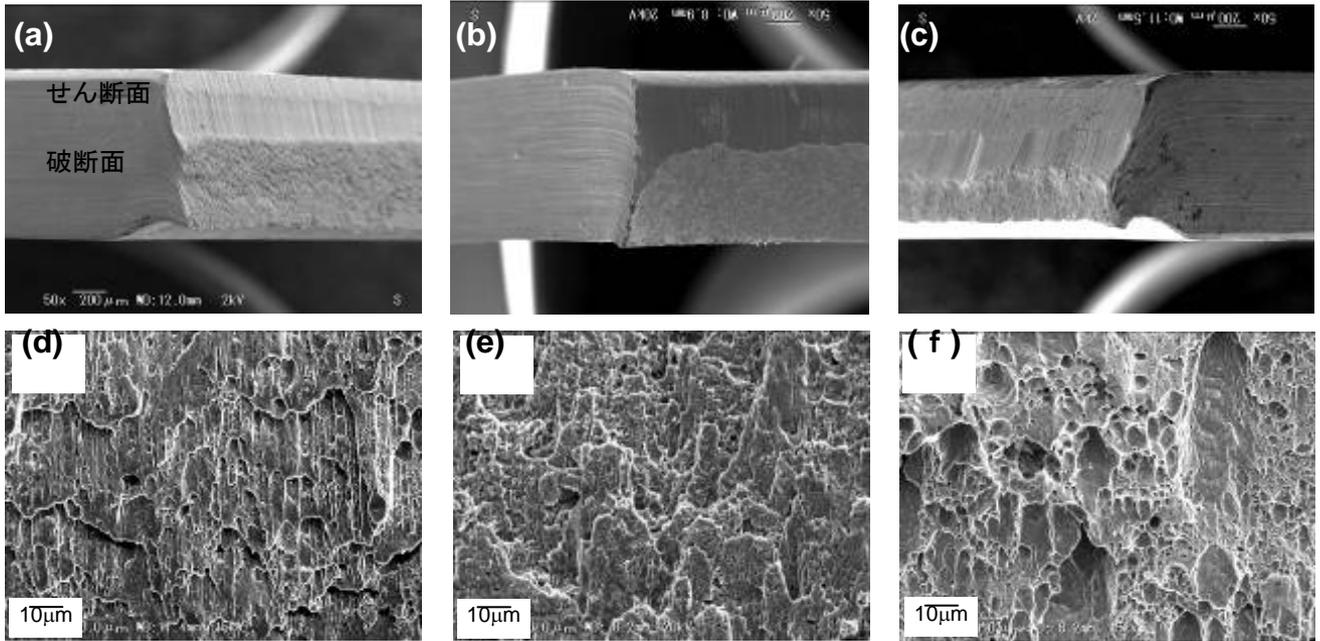


図 2-1-14 上段:せん断加工面全体、下段:破断面の拡大

(a)0.01C 超微細粒材、(b)0.30C フェライト+パーライト材、(c) 0.01C 粗粒材

#### (3-2) 超微細粒鋼の穴抜き加工における切口面形状（製品側）

図2-1-15に示すように、穴のせん断加工面の観察を行った。だれ、せん断面、破断面比率についてクリアランスが及ぼす影響をまとめた結果を図2-1-20に示す。クリアランスが小さくなると、せん断面比率が増加し、破断面比率が減少する。これは、フェライト単層組織かフェライト+パーライト組織か、さらに、結晶粒径によらない傾向がある。ただ、クリアランスが10%から5%では、せん断面比率の増加は少ないが、2%になると大きく増加する。0.01C粗粒材の場合、

TS=300MPa、EI=50%ときわめて延性にとんだ材料であるため、クリアランスによらず、せん断面比率は大きい。一方、クリアランスが2%の場合、せん断面比率は、組織によらず70%程度になる。

図2-1-16に示すように、だれの比率も、クリアランスの影響を受け、クリアランスが小さいほどだれ比率も小さくなる。一方、結晶粒径の影響は顕著である。0.01C粗粒材のだれ比率が3%以上あるのに対し、0.01C微細粒材および0.002C微細粒材では、だれ比率は1/3程度となり、クリアランス10%の場合でも、だれ比率は2%以下である。クリアランス6%、2%の場合、だれ比率は1%以下となる。したがって、穴側のだれは実質的ないといっている。

0.30Cフェライト+パーライト組織の場合のだれ比率は、0.01C粗粒材のだれ比率に近い。したがって、結晶粒の大きさがだれ比率を支配しているとはいえない。注目している点は、加工硬化（指数）である。0.01C粗粒材及び0.30Cフェライト+パーライト材は、加工硬化の大きな材料である。一方、0.01C微細粒材は降伏直後にネッキングがはじまる加工硬化のない材料である。また、0.002C超微細粒材も、局所伸びは大きいものの、実質的に加工硬化のない材料である。したがって、微細粒材料でだれが極めて少なかったのは、結晶粒の微細化によって、加工硬化能を失ったことと関連があると考えられる。

微細粒材を用いればクリアランスが大きくても、ファインブランキングに相当するだれの少なさが得られる可能性を示している。

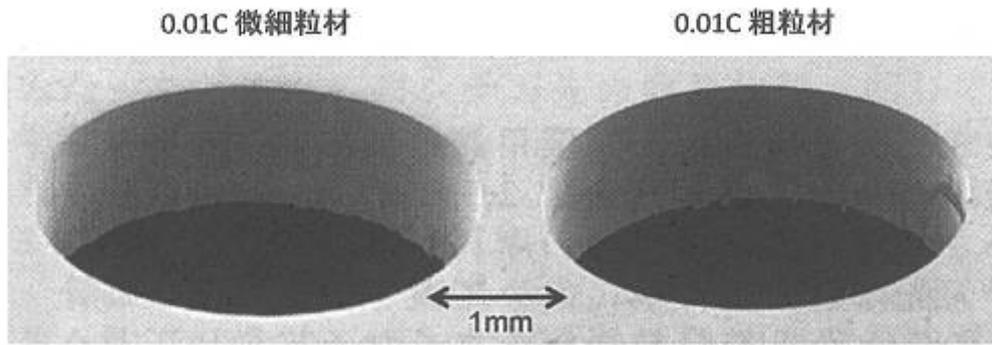


図2-1-15 穴抜き加工面

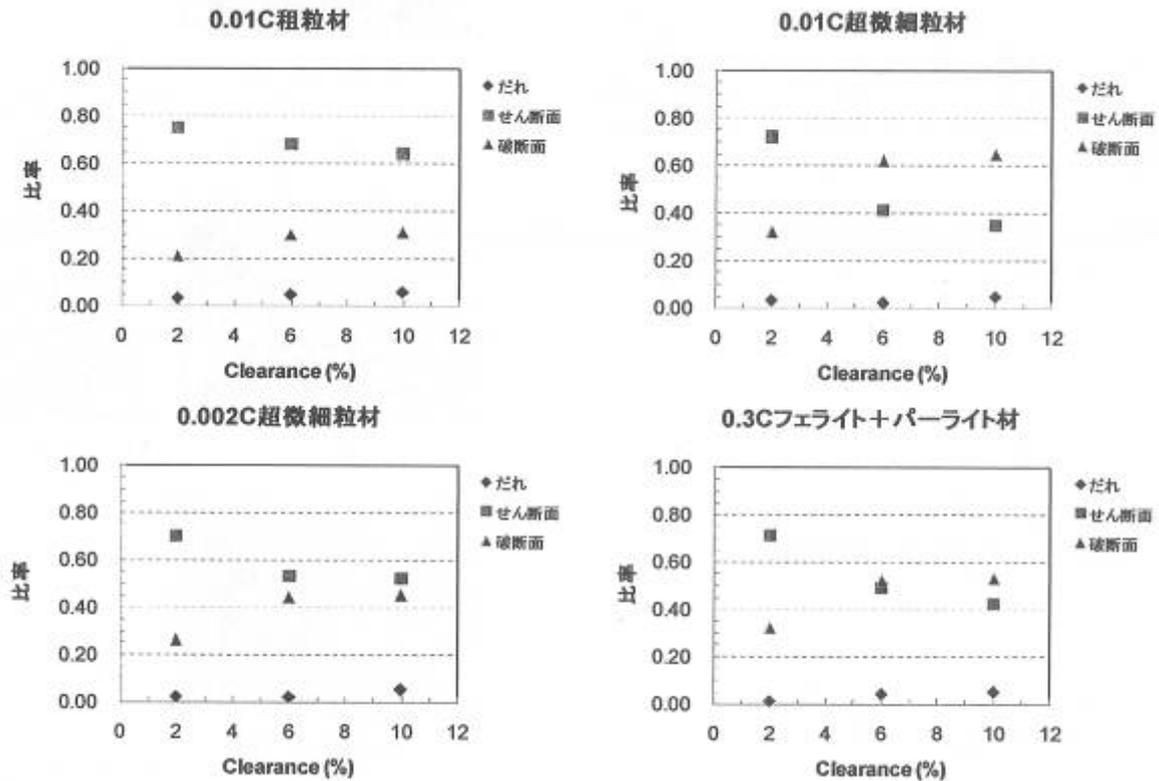


図2-1-16 製品側せん断加工面におけるダレ、せん断面、破断面の割合に及ぼす組成とクリアランスの影響

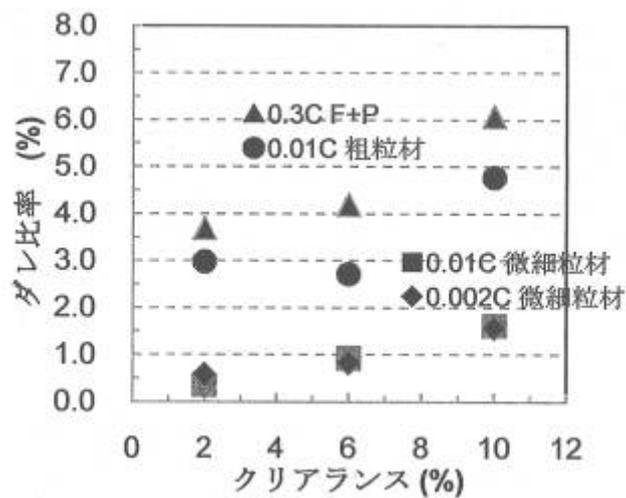
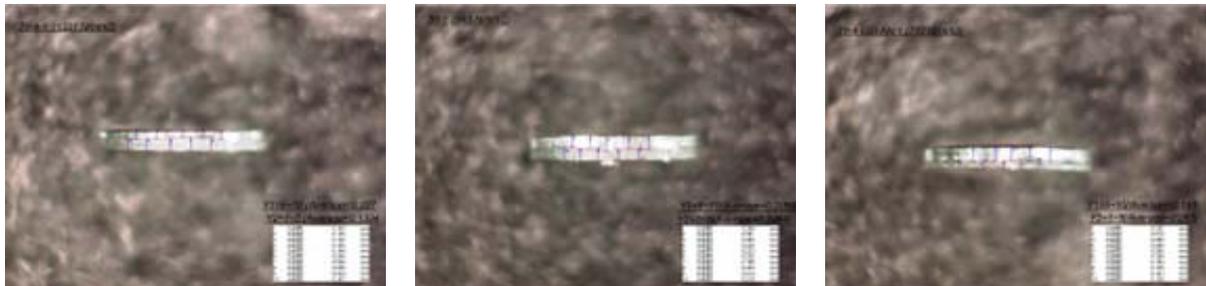


図2-1-17 ダレ比率と組成、クリアランスの影響

(3-3) 超微細粒鋼の穴抜き加工における切口面形状 (かす側)

図2-1-18に穴抜きのかす側の観察を行った。かす側におけるだれ、せん断面、破断面比率についてクリアランスが及ぼす影響をまとめた結果を図2-1-19に示す。クリアランスが小さくなると、だれ比率が減少し、せん断面比率が増加し、破断面比率が減少する。これは、フェライト単相組織かフェライト+パーライト組織か、さらに、結晶粒径によらない傾向である。また、クリアランスが10%と5%の場合、差は小さいが、2%になると、これらの傾向が大きくなる。0.01C粗粒材の場合、TS=300MPa、EI=50%と極めて延性にとんだ材料であるため、せん断面比率は大きい。TSが同等である0.01C微細粒材と0.3Cフェライト+パーライト材を比べた場合、だれ比率は、クリアランスによらず、微細粒材が小さく、だれが抑制されることを表している。クリアランスが2%の場合、せん断面比率は0.3Cフェライト+パーライト材が大きい。これは、伸びが大きいことに関連があると思われる。0.002C微細粒材は、伸びもあるため、せん断面比率は、0.3Cフェライト+パーライト材よりも大きい。従って、結晶粒微細材で、伸びもある程度ある材料の場合、だれが少なく、せん断面比率も比較的大きなせん断加工面が得られる。

破断面の凹凸を測定するために、3D-SEMの機能を用いて、横203 $\mu$ m、たて78 $\mu$ mの領域で縦横3箇所の高低差を測定した。破断面の面粗さ(最大高さRy)の測定結果を表2-2に示す。0.3Cフェライト+パーライト材及び0.01C粗粒材の場合、Ryは10.4、14.3 $\mu$ mであったのに対し、0.01C微細粒材の場合、6.0 $\mu$ mであり、1/2程度となっていた。0.01C粗粒材では、破断面に大きなディンプルが観察されたが、微細粒材ではそれがなく、そのため、面粗さが良いものと思われる。



(a) 0.01C超微細粒材 (b) 0.3Cフェライト+パーライト材 (c) 0.01C粗粒材

図2-1-18 かす側外観

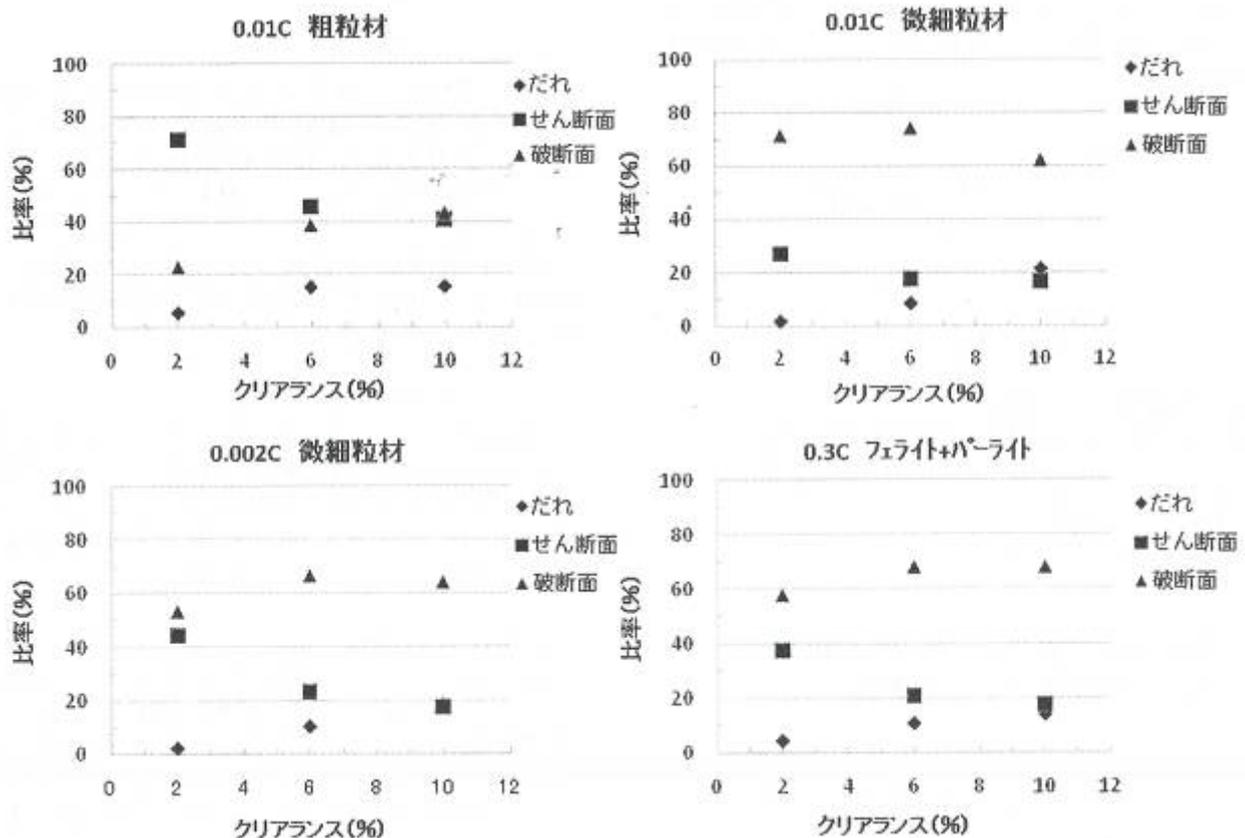


図2-1-19 だれ、せん断面、破断面の割合に及ぼす組成とクリアランスの影響

表2-3

組織	破断面粗さ 最大高さRy ( $\mu\text{m}$ )
0.3C F+P	10.4
0.01C 13 $\mu\text{m}$	14.3
0.01C 0.7 $\mu\text{m}$	6.0

#### (4) まとめ

超微細粒材の破断面粗さは粗粒材の1/3と小さい。また、引張強さが同等であるが、加工硬化能の大きいフェライト+パーライト鋼と比較しても、微細粒材の破断面粗さは小さい。

#### 参考文献

- 1) S. Torizuka et. al., : Scripta. Mater., **55**(2006), 751.
- 2) 鳥塚：まてりあ, **45**(2006), 438.
- 3) せん断加工、日本塑性加工学会編, コロナ社, P9.
- 4) 鳥塚ら: 平成 20 塑加春講論(2008), 43-44
- 5) 小松ら: 平成 20 塑加春講論(2008), 45-46

#### 参考文献

- 1) 鳥塚ら: 平成21塑加春講論(2009), 143-144.
- 2) 小林ら: 平成21塑加春講論(2009), 145-146.
- 3) 小松ら: 平成21塑加春講論(2009), 147-148.

## 本論一（２） 超微細粒薄板の製作と供給（特金）

諸言

当社では、本研究に必要な超微細結晶粒材料の提供を目的として、工業的な規模での製造技術確立のための研究を推進してきた。結晶粒の微細化には一般的に巨大ひずみ加工が行われ、圧延加工では相当ひずみで4、圧延率にしておよそ97%もの非常に大きなリダクションが必要となり厚板の製造には適していない。そこで主に検討を進めたのが、当社で従来行っているクラッド圧延<sup>1)</sup>を利用した方法である。クラッド圧延は最大で3枚の板を重ねて圧延し、1枚の板に接合する技術で、繰り返し重ね圧延法（ARB）<sup>2)</sup>でも知られる様に板厚を減少させずに巨大なひずみを導入する事ができる（図2-2-1）。平成19年度研究では、超微細粒鋼薄帯板の製造方法としてクラッド圧延技術を利用した大歪み圧延の検討を行った。その結果、当社既存の冷間クラッド圧延設備を用いて平均結晶粒径1 $\mu$ m程度の超微細粒SUS430鋼薄帯板を工業的な規模で生産する可能性を見出したが、クラッド界面密着性の課題が明らかとなった<sup>3)</sup>（図2-2-2）。

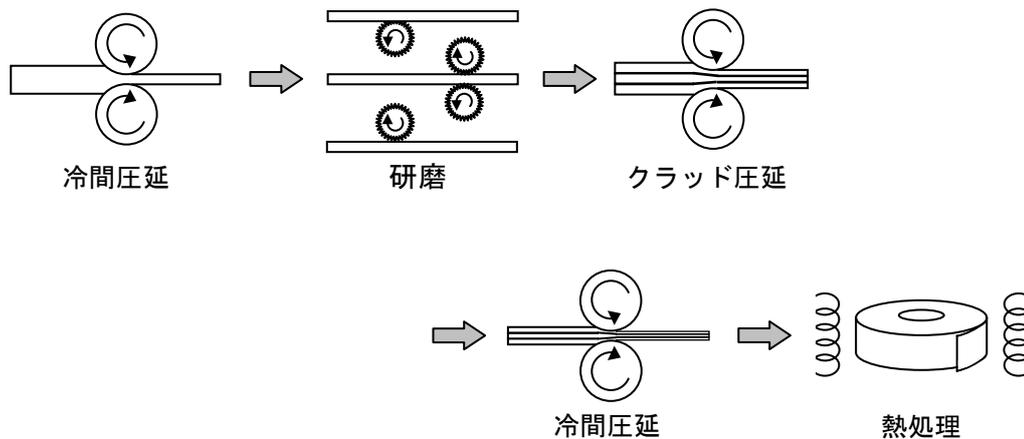


図2-2-1. クラッド圧延を利用した超微細粒鋼製造プロセス

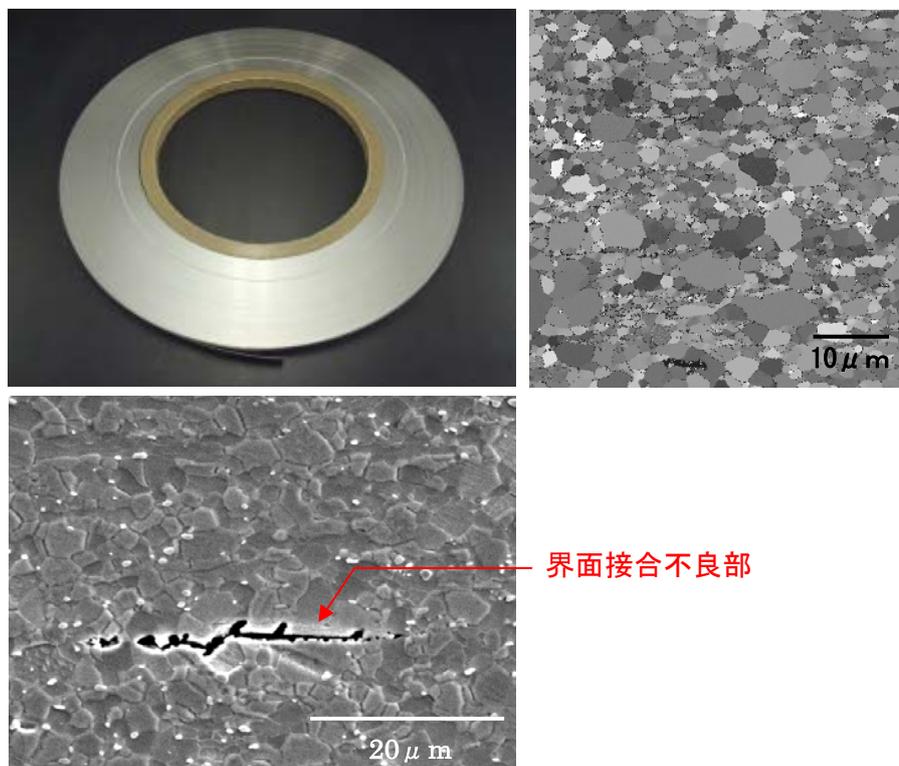


図2-2-2. H19年度研究で試作したSUS430超微細粒鋼  
（左上：試作したコイル 右上：試作材のEBSD組織 左下：クラッド界面）

密着性の改善にはクラッド加工時の圧延率向上と加工温度を上げ拡散結合を向上させることが有効であることから、当社既存クラッド圧延設備へ着脱可能なタイプの通電加熱式の材料加熱装置を製作した

平成 20 年度は製作した材料加熱装置をクラッド圧延設備に組み込み、温間大歪み圧延技術確立のための研究推進を行ったが、高温下での材料変形が大きい事や、クラッド圧延設備の張力制御方式の問題点から、安定した温間加工を実現することが出来なかった<sup>4)</sup>

一方でクラッド圧延を用いずに結晶粒を微細化する方法としてマルテンサイト相からオーステナイト相への逆相変態を利用する方法も合わせて検討し、板厚 0.10mm までの限られた鋼種においてではあるが、平均結晶粒径 0.5~1.5 $\mu\text{m}$  程度の非常に微細かつ均一な超微細粒薄帯板の製造に成功し、精密部品プレス加工技術研究用に提供するという一定の成果を上げることができた<sup>4)</sup>。図 2-2-3 にはこの方法で試作した SUS304 超微細粒鋼コイル材とその微細組織を示す。



図 2-2-3. H20 年度研究で逆相変態を用いて試作した SUS304 超微細粒鋼  
(左：試作したコイル 中央：試作材 EBSD 組織(0.45 $\mu\text{m}$ ) 右：試作材 EBSD 組織(粒径 0.80 $\mu\text{m}$ )

しかし、依然としてより板厚の厚い材料や多様な鋼種の超微細粒鋼提供に対応して行くためには温間クラッド圧延技術の確立が必要であることから、平成 21 年度はクラッド圧延設備用の高張力の巻き出し装置を新たに製作し、加工の安定化を図った上で界面密着性改善の研究を推進した。本報告ではこれらの結果の詳細について報告する。

#### 目的

・高張力の巻き出し装置製作により温間クラッド圧延加工の安定化を図り、接合界面密着性向上の研究を推進し、信頼性の高い超微細粒鋼製造技術を確立する。

##### (1) 高張力巻き出し装置の製作

従来使用していたクラッド圧延設備用の材料巻き出し装置を製作したが、張力制御は手締めベルトブレーキ制御であり、最大まで締めても  $\tau = 7\text{kgf}\cdot\text{m}$  のトルクしか得られなかった。被加工材の外形は加工に伴い最大で  $\phi 1000\text{mm}$  から  $\phi 300\text{mm}$  まで変化するため、材料にかかる張力は 7kgf から 23kgf 程度まで前後端で変化する。これを被加工材の単位断面積当たりの張力に換算すると 0.18~0.58kgf/mm<sup>2</sup> (板厚 0.5mm、板幅 80mm として) で一般的な圧延加工張力 (5~20kg/mm<sup>2</sup>) に比べ圧倒的に不足していた。また、ベルトの摩擦によるため張力が不安定であることや、コイル径の変化に伴う張力変動も加工安定化の阻害要因であった。

それに対し、本年度に新たに製作した巻き出し装置で、最大張力を 250kgf に増強し、インバータモーター制御で安定した張力制御を可能とした。コイル径演算や高精度のメカロス制御により、コイル全長にわたって一定の張力制御が可能となっている。

##### (2) 密着性向上の検討

従来の冷間クラッド加工と今回温間クラッド加工とで、接合状態を比較するため試作材を製作した。使用した材料は共に板厚 0.35mm の SUS430-H 材 (82.5%冷間圧延仕上) で、クラッド加工の前にステンレス製の

ワイヤーブラシでそれぞれの接合面を研磨加工し、3枚を重ねて1パスで約43%（板厚0.60mm）のクラッド圧延をそれぞれ室温、500℃温間で行った。それぞれのクラッド圧延直後の接合界面をSEMで観察した結果を図2-2-4に示した。ここでの接合状態は一般的な冷間クラッド材では仮接合の状態であるが、この仮接合の安定化が最終製品の接合信頼性に大きく影響する。しかし、この超微細粒鋼製造プロセスでは被クラッド材は強圧延仕上げされたハード材であるためクラッド圧延時のリダクションを大きく取る事が出来ず、一般的なクラッド材よりも接合が不利な条件となっている。そのため、従来の冷間加工材では界面に明らかな隙間が開いた部分が所々に確認される。一方、今回のB℃温間加工材では明確な隙間は見られず、仮接合の状態が安定化していることが確認できた。

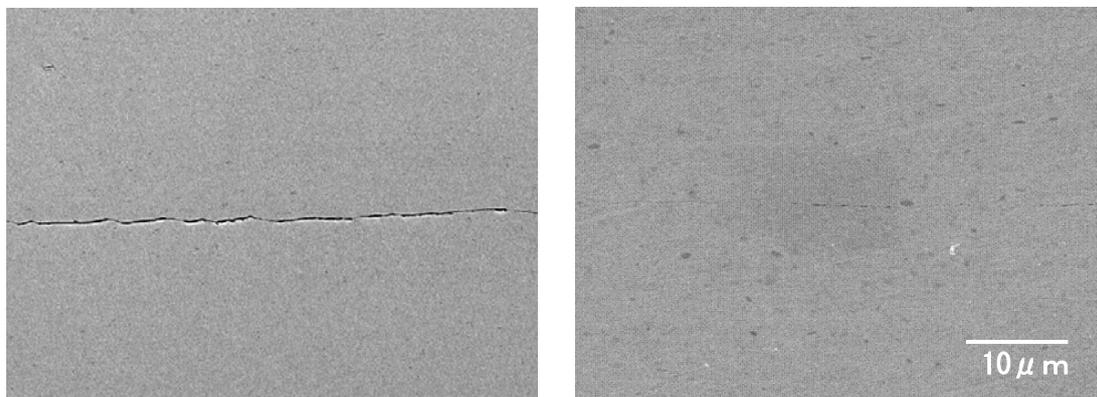


図 2-2-4. 冷間および温間クラッド材の界面 SEM 写真（左：冷間材 右：温間材）

500℃温間クラッドによる仮接合状態の改善効果が確認できたため、次に最終製品（板厚0.20mm）までの加工条件について検討を行った。加工条件としては、熱処理のタイミングと熱処理条件が挙げられる。しかし、熱処理については結晶粒の粗大化を防ぐために一般的なクラッド材のような再結晶温度を超える条件では行えないため、再結晶が進まない限界の温度A℃で1時間とし、熱処理タイミングに重点を置いて検討を行った。具体的には図2-2-5に示すように、B℃温間クラッド直後（タイミング①）、板厚0.35mmまで圧延後（タイミング②）、製品板厚0.20mmまで圧延後（タイミング③）の各タイミングで熱処理の有無を組み合わせ、AからHまでの8通りの製品サンプルを試作した。それぞれについて界面接合状態のSEM観察、剥離強度の測定を行い、密着性を評価した。剥離強度は、あらかじめクラッド圧延直後の板材の端20mm程度の界面を機械的に剥がしてから図2-2-6の加工をそれぞれ加えた後、幅10mmに放電加工で切断して試験片とし、剥離させた部分をつかみ部としてインストロン社製引張試験機で測定（図2-2-6）、幅1mmあたりの強度を測定した。



図 2-2-5. 剥離強度の測定

図 2-2-13 には各サンプルの接合界面の SEM 観察写真を示す。これらは未接合部をより明確に表すために、塩化第二銅の塩酸+アルコール溶液でエッチングしてある。写真から、サンプルBとDが良好で、次いでサンプルFが良好であるように見える。

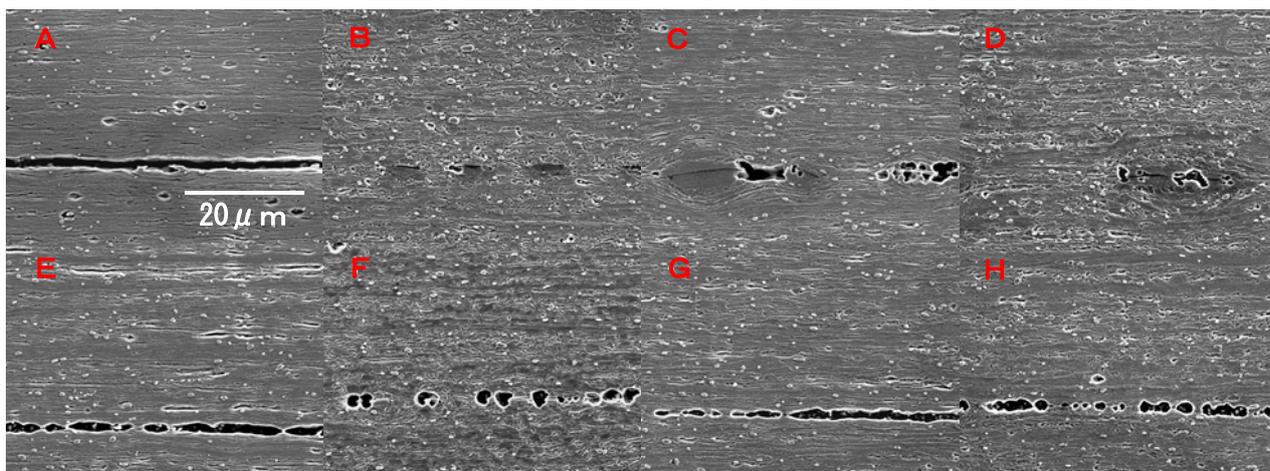


図 2-2-6. 各サンプルのクラッド界面 SEM 写真

また剥離強度の測定結果を表 2-4 に示すが、SEM で観察された接合状態と良く対応している。表 2-4 の \* 印のものは界面ではなく母材部から破壊しており、界面強度が母材強度に匹敵するまでに向上していることが確認されている。

表 2-4. 各サンプルの剥離強度 (N/mm)

A	B	C	D	E	F	G	H
0.740	20.697*	4.534	21.025*	0.627	25.420*	2.348	24.837*
0.599	20.309*	3.329	22.403*	0.655	27.311*	2.474	13.080

この結果について熱処理タイミングとの相関をより分かり易くするために、各タイミングにおける熱処理の有無が剥離強度に与える要因効果を計算し、図 2-2-7 を得た。この結果から、タイミング③における熱処理の有無が重要な要因であることが明らかとなった。

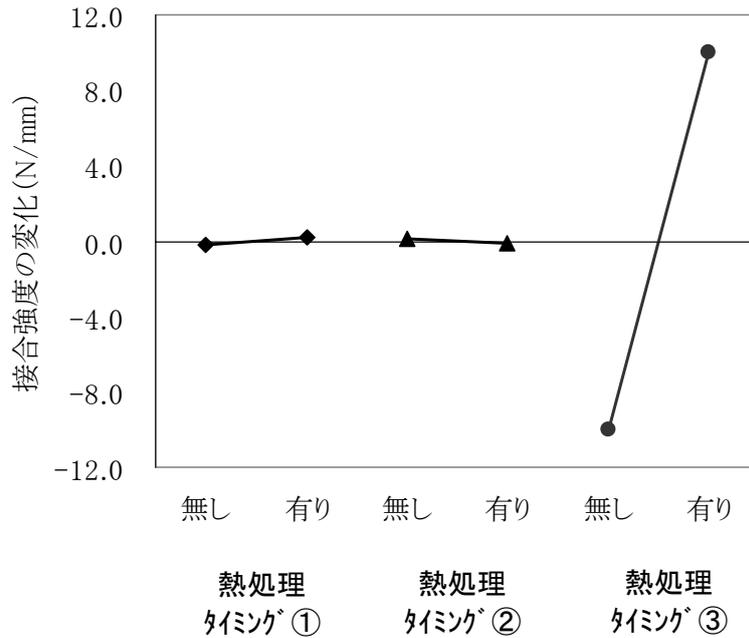


図 2-2-7. 各タイミングでの熱処理の有無が界面接合強度に与える効果

この結果は、クラッド圧延のスタートから最終の熱処理を実施するまでの圧延率を大きく取ることが重要になってくることを表す。そこで、クラッド圧延—最終熱処理間のリダクションと界面の剥離強度をグラフ化すると図 2-2-8 の様になる。その結果、圧延率が 80%を超えた辺りから急激に界面の接合強度が増加することが明らかとなった。

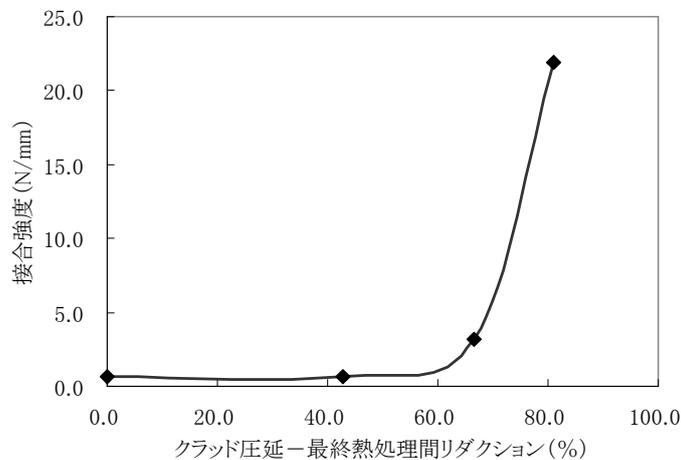


図 2-2-8. クラッド圧延—最終熱処理間のリダクションと接合強度の関係

実際にはクラッド圧延—最終熱処理間のリダクションが 80%を超えたもの（サンプル B, D, F, H）の間でも差が見られる。サンプル B と D が明らかに良好な接合状態であるが、これらの加工条件の違いとしては、クラッド圧延直後（タイミング①）に熱処理を行ったかどうかということになる。このメカニズムは一般的な冷間クラッド材の接合メカニズムから説明できると考える。冷間クラッド材では、接合前にブラッシングやショットブラストを行い表層に非常に硬い加工硬化層を形成させる。この硬化層は延性に乏しいためクラッド圧延時の強加工によって破壊し、その隙間から新生面が現れ、新生面同士が合わさることで金属結合が起こり接合する（図 2-2-8）。

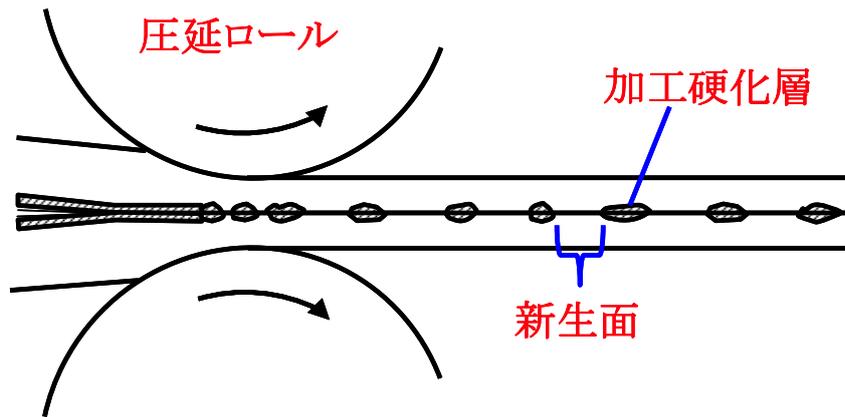


図 2-2-9. 一般的な冷間クラッド材の接合メカニズム

サンプルF、Hではクラッド圧延直後に熱処理を行っているが、その際に界面の加工硬化層が軟化していることが考えられる。そうすると、加工硬化層に延性が生まれ、その後の圧延加工では新たな新生面が生まれにくくなることが予想される。サンプルBでは製品板厚 0.20mm まで熱処理を行っていないため、その間の圧延で新生面の比率はますます増加し、サンプルDでも板厚 0.35mm まで熱処理を行っていないため、新生面比率は大きいと予想される。この効果と熱処理タイミング③での接合強度向上の効果が相まって、良好な接合状態が達成されたものと考えられる。

### (3) 実機試作材の製造

B°Cでの温間クラッド加工と、その後の加工を最適化した条件で、実機製造ラインによる SUS430 超微細粒材（板厚 0.20mm）の試作を行った。得られた製品コイルは、精密部品プレス加工研究用に提供した。

図 2-2-10 に H19 年度に試作した冷間クラッド材と今回試作材の接合界面の SEM 観察写真を示したが、H19 年度試作材は約 20 μm の大きな未接合部が残っていたのに対し、今回 B°C 温間試作材で大きいもので 5 μm 程度にまで改善されており、前項で検討した密着性改善の効果についての再現性も確認できた。

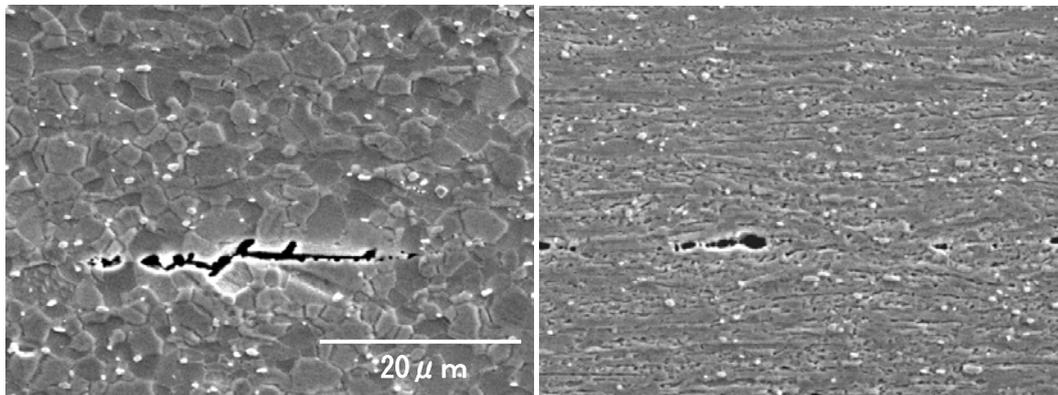


図 2-2-10. 接合界面 SEM 写真（左：H19 年度試作材 右：今回試作材）

図 2-2-11 は今回得られた試作材の組織を EBSD 結晶方位解析装置で解析したものであるが、平均結晶粒径  $1.3\mu\text{m}$  で大部分が方位差  $15^\circ$  以上の大傾角粒界で囲まれた非常に微細な結晶組織が得られている。

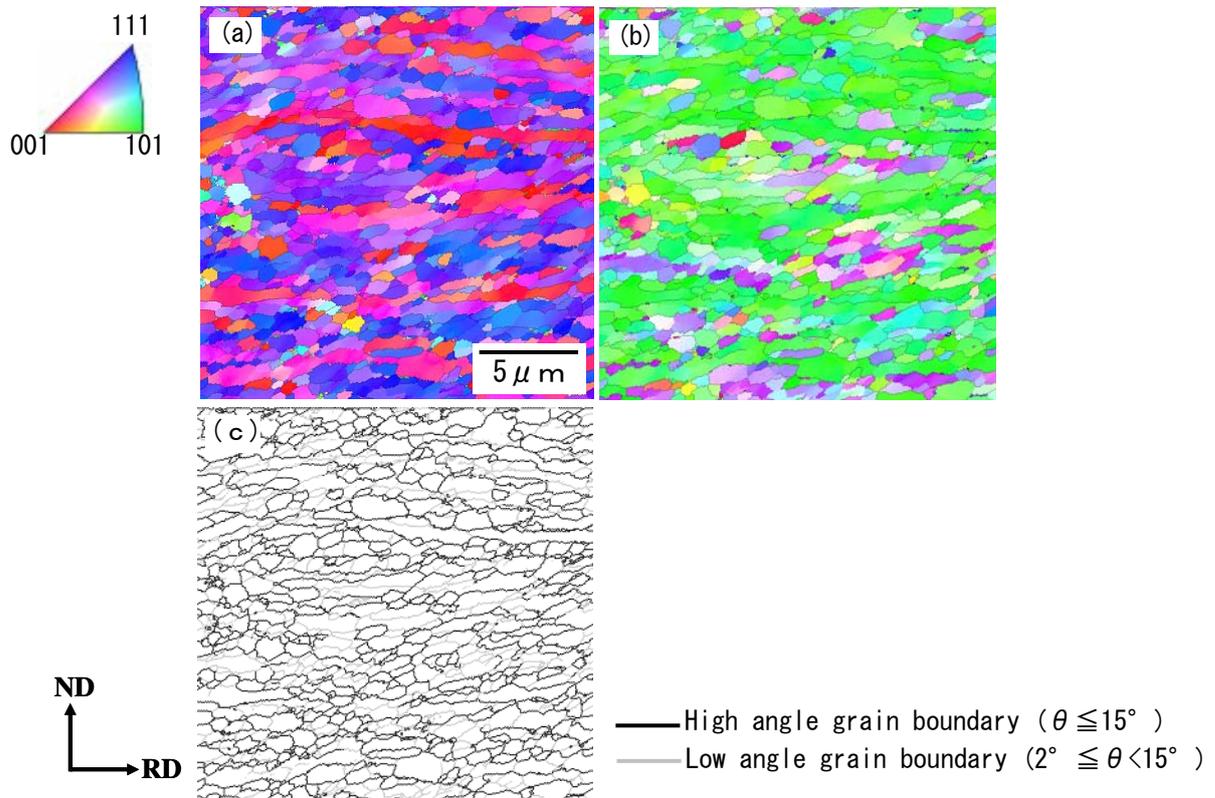


図 2-2-11. 今回試作材の EBSD 解析組織 (a : ND 方位マップ b : RD 方位マップ c : 粒界マップ)

#### 結言

H21 年度の研究では、クラッド圧延機用の巻出し装置を製作し、安定した温間クラッド圧延技術を確立、クラッド圧延後の加工条件の検討も合わせて行うことで、界面の接合性能を大幅に改善し、精密部品プレス加工技術研究に要する超微細粒材料の提供を達成することが出来た。そして、より信頼性の高い超微細粒鋼製造技術を確立するという成果も上げることができた。

#### 引用文献

- 1) L. R. Vaidyanath and D. R. Milner, British Welding Journal, (1960), 1.
- 2) 辻 伸泰, 鉄と鋼, 88(2002), 359.
- 3) 平成 19 年度戦略的基盤技術高度化支援事業報告書
- 4) 平成 20 年度戦略的基盤技術高度化支援事業報告書

## 本論－（３）プレス加工技術の開発（KSJ）

### 緒言

平成 20 年度までに、クラッド技術を用いた SUS304 超微細粒薄板帯板の精密せん断加工実験を行い、①結晶粒径の異なる材料による細孔の入り口部の出口部の寸法変化、及び、②寸法変化と破断量との関係について検討を行った。また、現在流動している製品と同じ仕様で超微細粒鋼材のプレス加工を行い、その効果について幾つかの報告を行った。

平成 21 年度では、初めに超微細粒鋼材の量産的な観点からプレス加工を行った際の影響をより詳細に探索するため、結晶粒径を 3 段階に分け打抜き実験を行った。その中で材料の結晶粒径が小さくなるほど摩耗が激しく工具への負荷が高くなることがわかった。そこで、潤滑油を替えた実験を行いその不具合を改善することが確認できたのでそれをまとめる。また、超微細粒鋼材料を使用する製品へのメリットをまとめた。次に微細粒鋼の製品への展開を考察するため、弊社で製作しているオフィス加工を行い、そこで得られる形状特性及び、機能特性である流体噴射の安定性にどのような影響を与えるかを報告する。また、これにより川下が求める製品実現を達成する目後が立ったと判断する。

### （３）－１ 超高アスペクト比スムーズホールプレス加工技術の構築

#### 目的

- ・超微細粒鋼薄板を用いて超高アスペクト比スムーズホールプレス加工基礎（金型構造、クリアランス、加工油、加工速度）データの構築
- ・加工面粗さの測定と原材料毎比較し破断面の寸法減少  $3\mu\text{m}$  以下

#### （１）実験材料の製作

本実験で使用する SUS304 の通常粒鋼（Normal）および超微細粒鋼 3 種（UFGS1-3）、微細粒材 1 種（UFGS4）の帯鋼を用いた。超微細粒鋼に関しては、はじめ通常加工にて板厚 0.2mm の帯鋼を作成し、次にこの帯鋼に対しクラッド技術を用いて結晶の微細化を施し板厚 0.2mm の超微細粒鋼材の制作を行った。材料特性を表 2-5 に示す。

表 2-5 材料特性

	UFGS1	UFGS2	UFGS3	UFGS4	Normal
硬さ (HV)	400	300	260	285	260
引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	1266	909	870	928	919
伸び (%)	16.1	46.8	51.1	47.0	42.5
平均結晶粒径 ( $\mu\text{m}$ )	0.45	1.10	1.52	5.60	9.10

#### （２）実験方法

図 2-3-1 に示すような板材に対し斜め打抜き加工をセンタークリアランスで行った。以下に実験条件を示す。実験の方法としては、始めに通常鋼を用いて 10,000 個の連続孔抜き加工を行い、その後金型を同一条件で超微細粒鋼材 3 種、微細粒鋼材 1 種に対し 10,000 個の精密細斜め孔抜き加工を、それぞれパンチを新規にして実施した。

パンチ径  $D_p$  :  $\phi 0.129\text{mm}$

ダイ径  $D_d$  :  $\phi 0.138\text{mm}$

クリアランス : 5% (クリアランス量 0.006mm)

打抜き角度  $\theta$  :  $33.5^\circ$

加工油 : プレス加工油

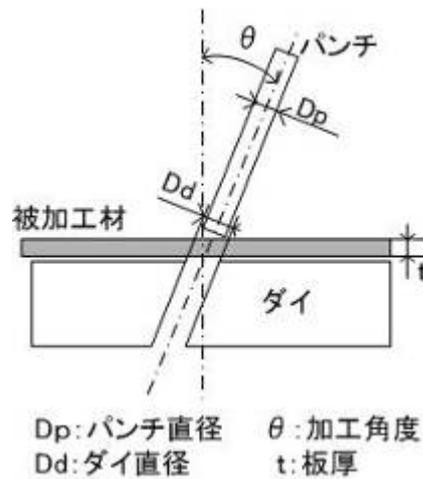
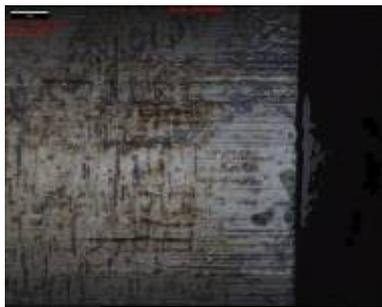


図 2-3-1 孔抜きの概要

### (3) 結晶粒径の違いによるパンチへの影響

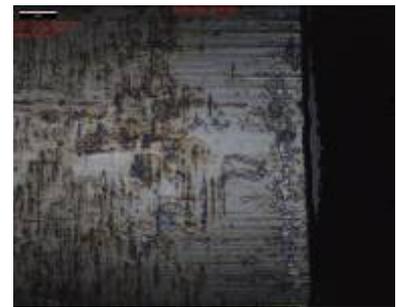
結晶粒径を  $9.1\mu\text{m}$  (Normal)、 $5.6\mu\text{m}$  (UFGS4)、 $1.1\mu\text{m}$  (UFGS2) と変え打抜き実験を行った。打抜き後のパンチ表面観察結果を図 2-3-2 と図 2-3-3 に示す。結晶粒径が小さくなるに従い側面摩耗が増加し、結晶粒径が  $1.1\mu\text{m}$  の UFGS2 においてはパンチ刃先に凝着が生じていることが確認できる。結晶粒径が小さくなるに従い工具への負荷が大きいたことが観察され、材料の結晶粒径の微細化は加工する工具に対しては量産時のデメリットとなりえる為何らかの対策が必要となる。



(a) Normal

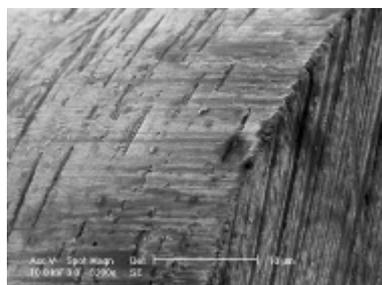


(b) UFGS4

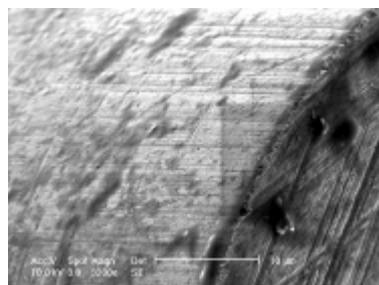


(c) UFGS2

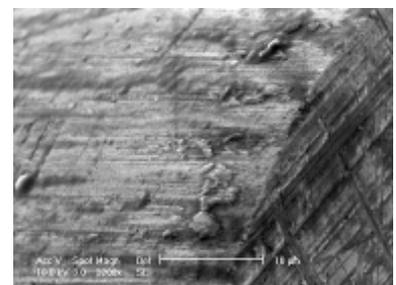
図 2-3-2 パンチ側面の状態  
(10,000shot 後、Alicona)



(a) Normal



(b) UFGS4



(c) UFGS2

図 2-3-3 パンチ刃先の状態  
(10,000shot 後、SEM×3200、傾き 45°)

### (4) パンチへの負荷に関して

材料の結晶粒径が小さくなるほどパンチ刃先に凝着が生じやすいため、パンチ直径  $\phi 0.15$  の垂直抜き加工力測定を実施し結晶粒径の違いによるせん断荷重の比較を試みた。それぞれのせん断荷重の結果を図 2-3-4 で比較する。結晶粒径を変えても立ち上がり、最大荷重点付近において結晶粒径による

差異は見受けられない。この傾向は笹田らが報告したように微細粒鋼材料の打抜き加工力に関しては結晶粒径に無関係に、材料特性から求められる荷重線図とほぼ同一の結果となる。また、この結果から前述したパンチの摩耗と凝着の原因が材料の微細粒化による加工力の増加によるものではないと判断できる。少なくとも、パンチへの摩耗と凝着の原因は結晶粒径が細かくなったことによる別の原因として考えられる。

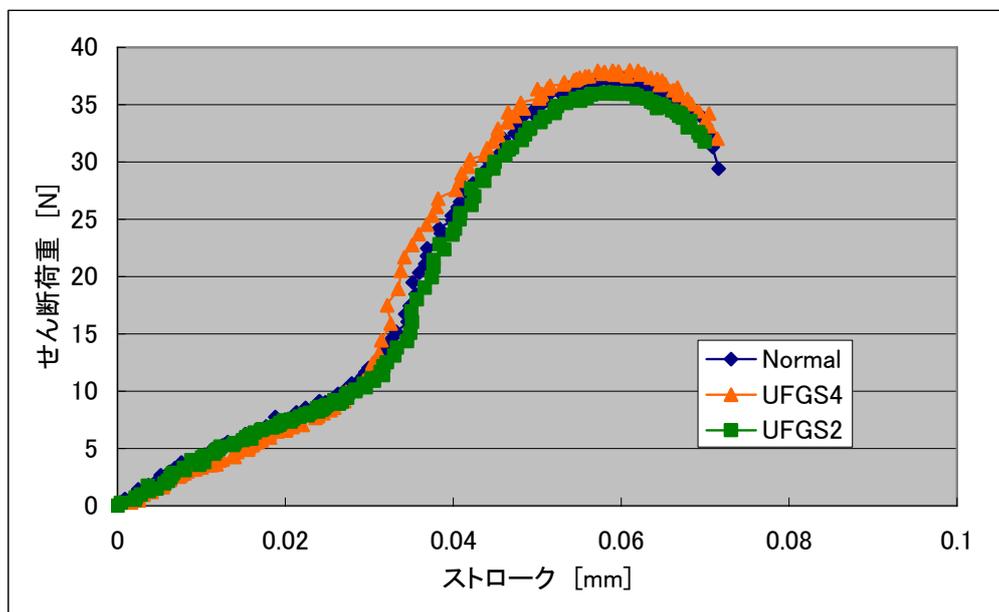


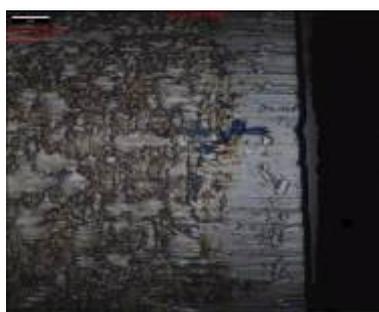
図 2-3-4 せん断線図

#### (5) 潤滑油の影響

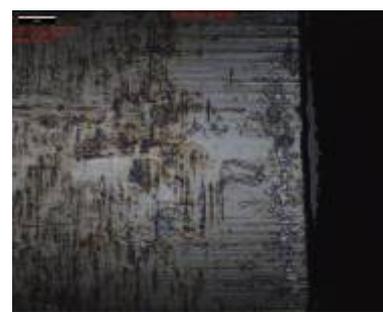
加工力の低減により摩耗と凝着の改善には至らないが、それでも工具と材料との接触によりパンチ刃先摩耗が進展すると考えられるため、潤滑油による効果でパンチへの負荷低減が行えると判断できる。このため、潤滑条件をプレス加工油、切削油、工業潤滑油+添加剤と3種類替え打抜き実験を行った。パンチ刃先の状態とプロファイルを図 2-3-5 と 2-3-6 に示す。潤滑油を替えても凝着はなくならないが、パンチ表面への焼きつきは薄れ綺麗な状態となる事が確認できた。また、刃先摩耗に関してもプレス加工油に比べ他の潤滑剤を使用した場合刃先摩耗が低減していることが確認できた。加工条件の変更だけである程度の工具への付加低減の改善が出来ることを把握した。



(a) プレス加工油

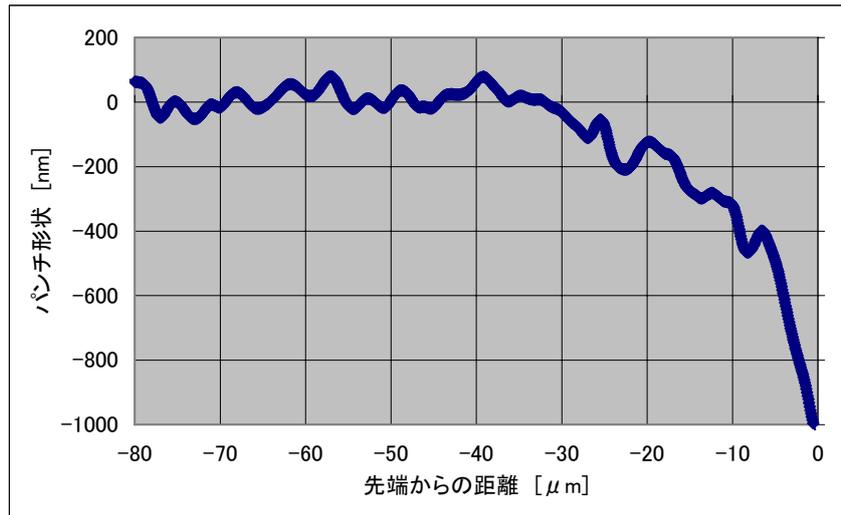


(b) 切削油

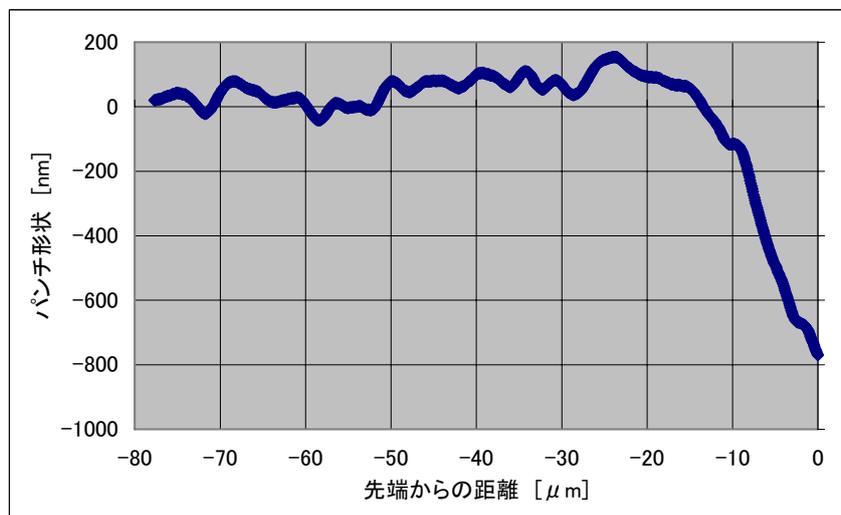


(c) 工業用潤滑油+添加剤

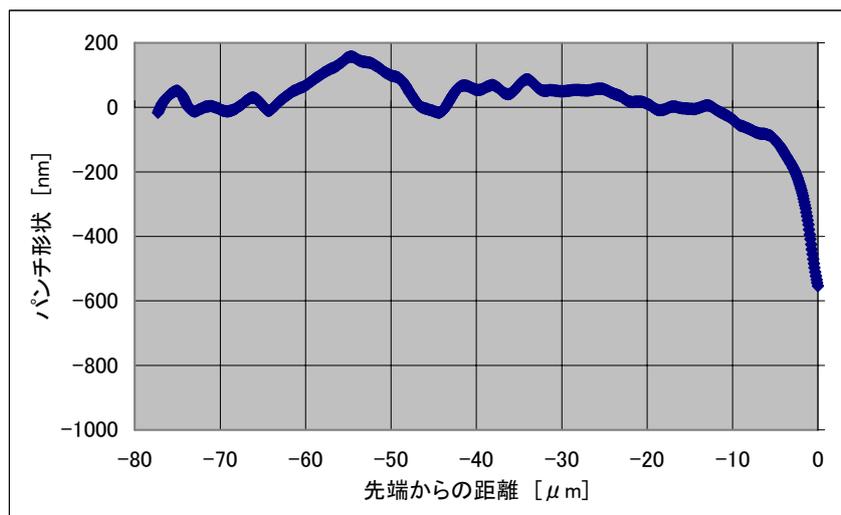
図 2-3-5 パンチ側面の状態  
(10,000shot 後、Alicona)



(a) プレス加工油



(b) 切削油



(c) 工業用潤滑油+添加剤

図 2-3-6 パンチ刃先形状 (10,000shot 後)

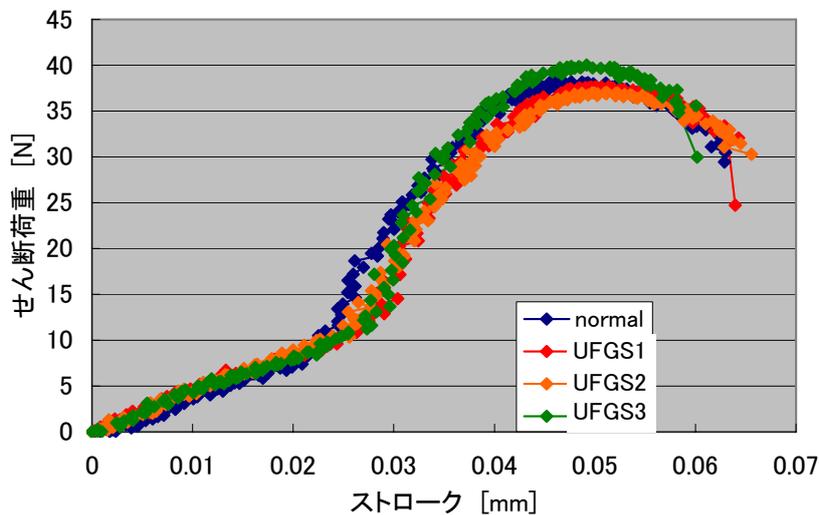
## (6) 有限要素解析の導入

結晶微細化した材料に対するせん断加工の加工性を、加工を行わず有限要素解析を用いて考察できるか評価を行った。有限要素解析には市販汎用コード Marc を用いて材料特性だけを変え破壊の考慮はせず軸対象問題として解析を行った。

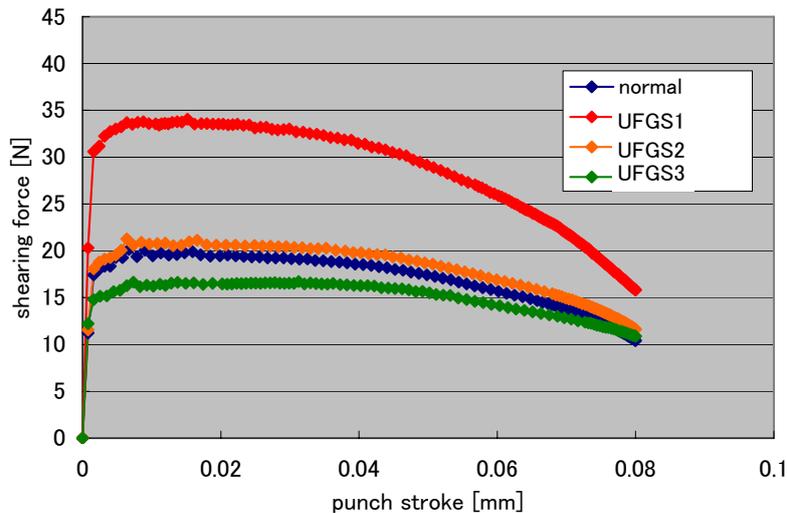
まず、加工力の評価として垂直打抜き型を用いて実験と解析との比較検証を行った。せん断線図比較を図 2-3-7 に示す。加工力に関して、実験の加工力がなだらかに立ち上がるのに対して解析結果はほぼ垂直に立ち上がっている。また、最大荷重点付近において解析結果では材料ごとの明らかな差異が生じ材料特性の違いが見受けられる。得られたせん断荷重の信頼性としてはアスペクト比が小さい場合、従来の知見から今回得られた解析結果に類似の傾向を示すため、実加工の加工力測定に関して再検証が必要かもしれない。ただ、同じ条件での加工結果である為、実験の加工力に対しては解析結果のように明確な差異が生じない可能性もある。このことは、笹田らの研究からも読み取れる。

切口面形状に関しては図 2-3-8 に示すが、解析では破断の考慮をしていない為途中止めとなっている。ダレの形状はほぼ実験結果と同等であると見て取れる。実験の方でも途中止めをして解析結果の形状と比較をする必要があるものの、ある程度の予測は出来るものと判断される。

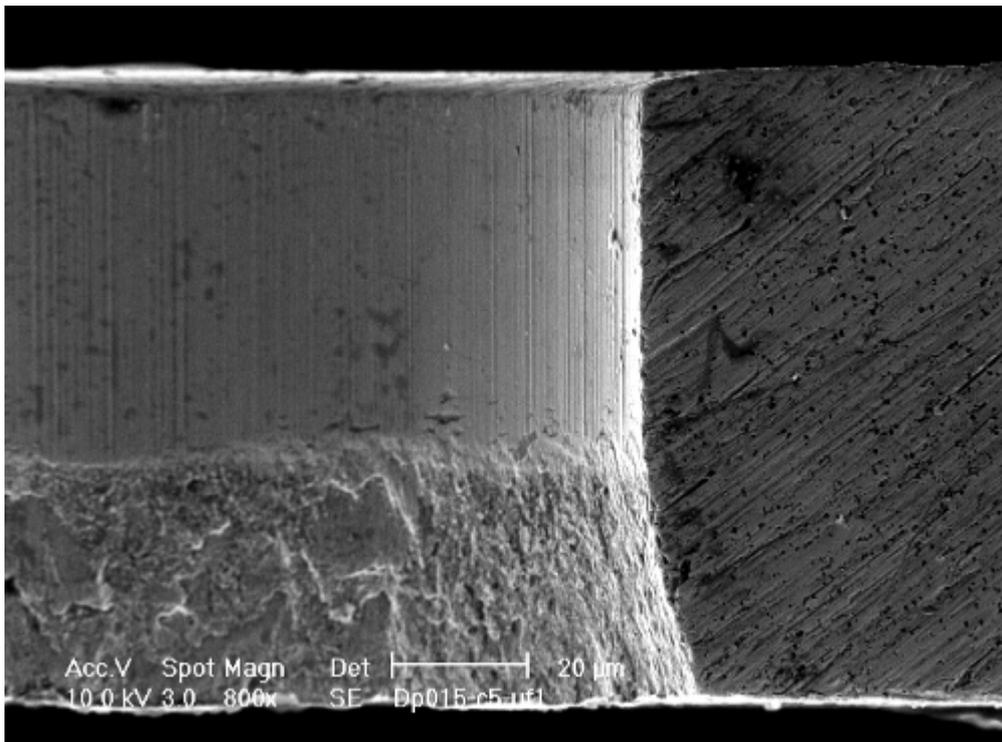
超微細粒鋼材料の変形挙動を推察するだけであるならば有限要素解析である程度の予測は可能であると判断する。また、これにより図 2-3-9 に示すような相当応力等の実加工では測定できない加工上の違いを明確に判断できる。



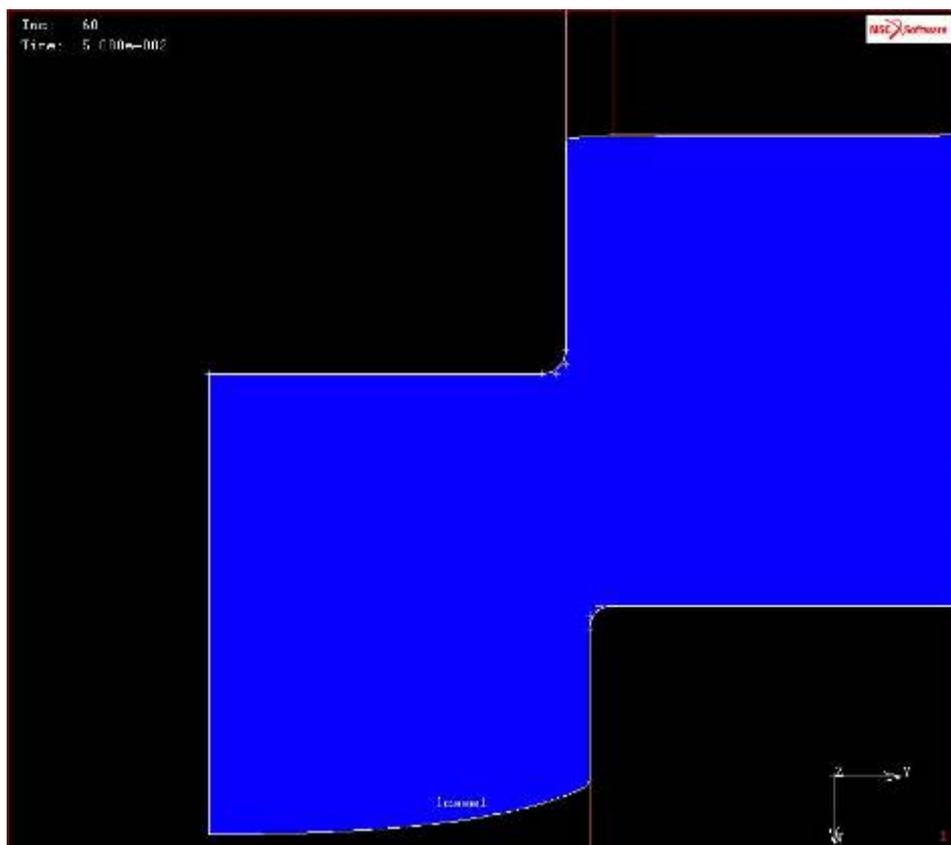
(a) 実験結果



(b) 有限要素法解析結果  
図 2-3-7 加工力の比較



(a) 実験



(b) 解析結果 (パンチ押し込み量: 0.05mm)

図 2-3-8 切口面形状比較 (UFGS1)

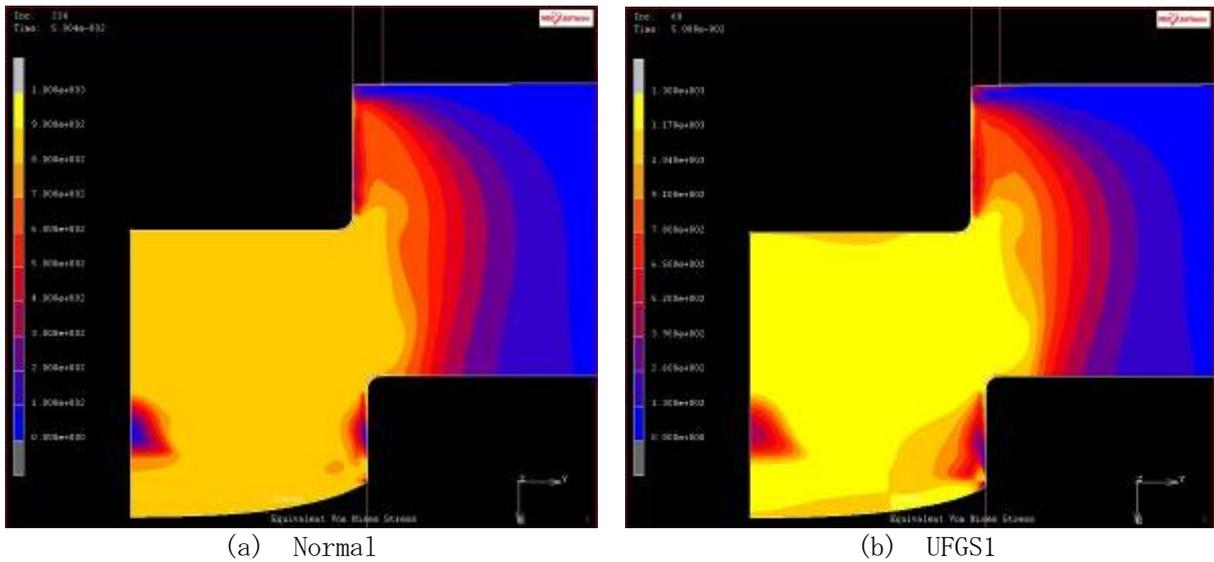


図 2-3-9 相当応力比較

### (7) 材料の方向性の有用性

材料の方向性が製品の加工性に影響を与えると従来の製品製作から考えられる。このため、角形の打抜き加工を行い材料の方向性による切口面形状の比較を行った。図 2-3-10 に角形の打抜きモデル図を示し、その加工で得られた切口面形状の一例とその評価を図 2-3-11 と 2-3-12 に示す。

どの材料でも材料の方向により切口面形状が異なることが確認できる。圧延方向に比べそれと垂直な方向にダレ量が小さくなりその分せん断面が長くなる。これは材料組織が圧延方向に引き伸ばされている為、圧延方向に直角する方向に結晶が密になるからと考えられる。このため、結晶が大きい場合にはダレ量の変化が大きく、結晶が微細化するとその方向による粒径差というものが小さくなるため方向差による切り口面形状の差は小さくなるものと考えられる。このため、成形性においては微細粒鋼材料のほうが安定した製品形状が得られるものと考察できる。

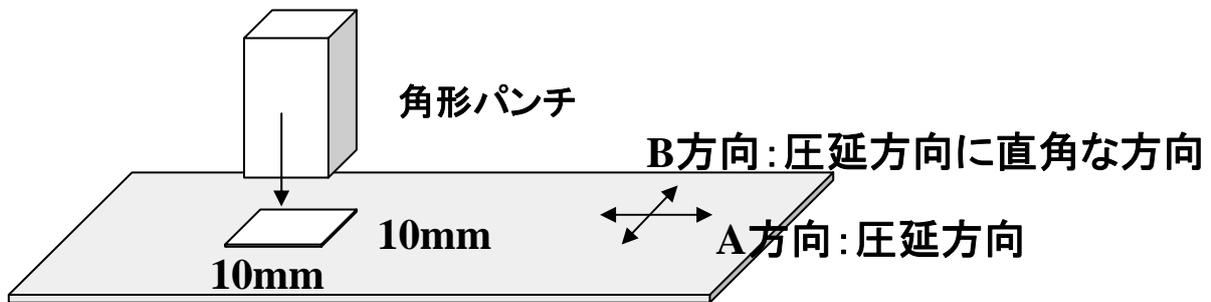
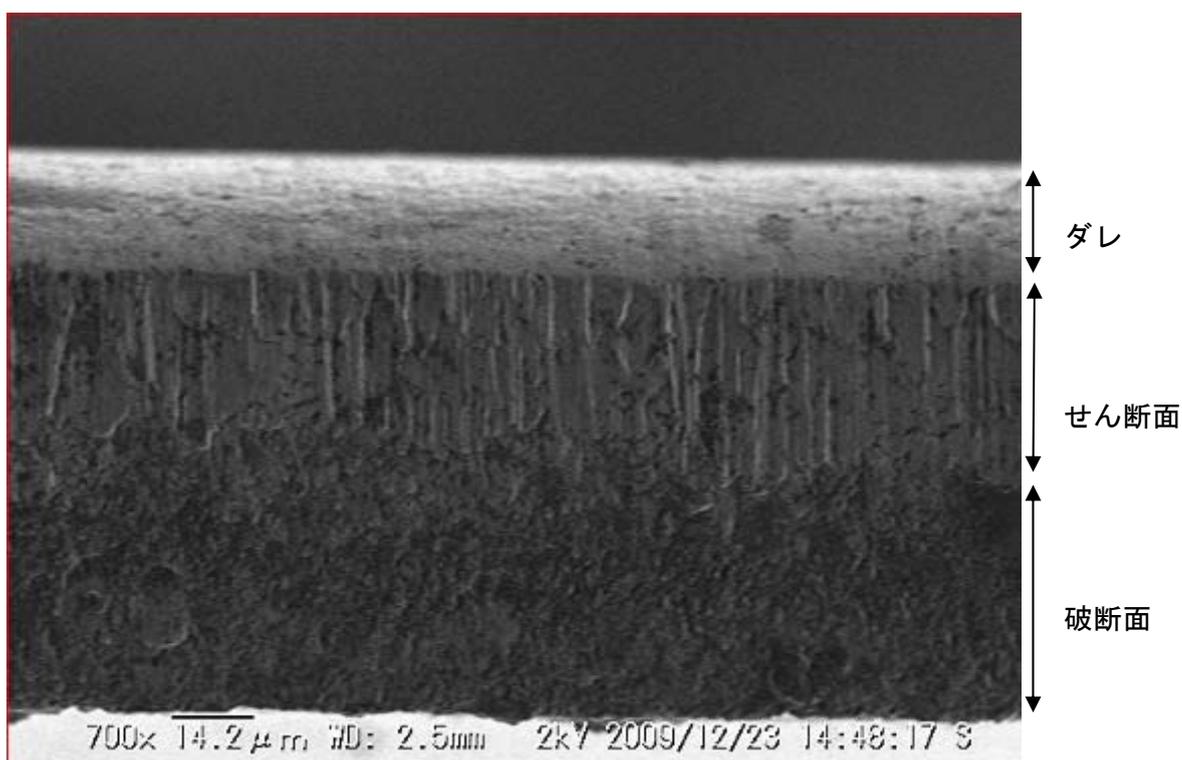
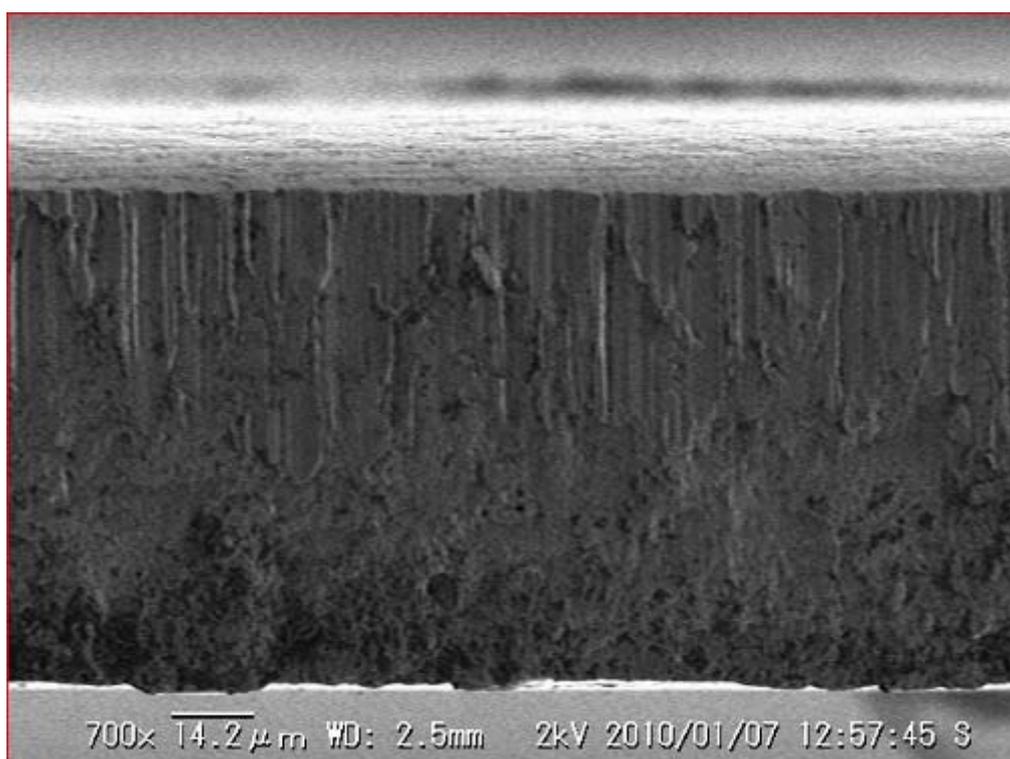


図 2-3-10 角形打抜きモデル



(a) 材料の圧延方向：A 方向



(b) 材料の圧延方向に直角な方向：B 方向

図 2-3-11 切口面形状  
(UFGS2)

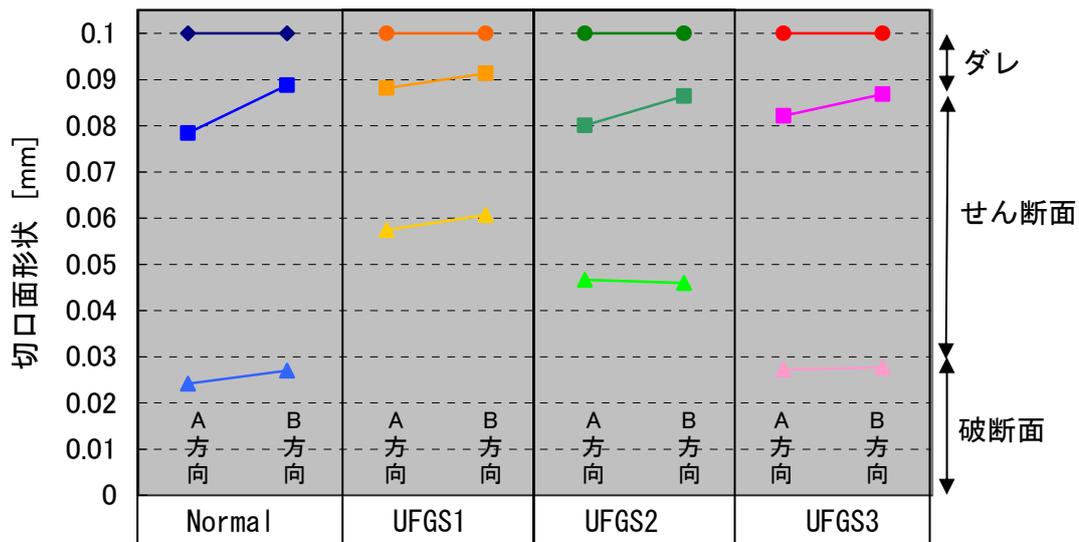


図 2-3-12 角抜き実験による切口面形状の比較

(9) まとめ

微細粒鋼材料を打抜く際の工具に作用する影響に関して考察を行った。初期の状態では工具に対し負荷が多く量産加工に対処することは難しいと考えられた。しかし、潤滑条件を適切に処置することによりパンチの対応は増し量産加工への対応も十分に可能であると判断される。

参考文献

- 1) 鳥塚ら：平成 20 塑加春講論(2008), 43-44
- 2) 小松ら：平成 20 塑加春講論(2008), 45-46
- 3) 平成 19 年度戦略的基盤技術高度化支援事業報告書
- 4) 永山ら：平成 20 塑加春講論(2008), 341-342

### (3)-2 製品試作の評価

#### 目的

微細粒鋼材量を用いることにより、孔抜きエッジ形状の安定性を生かした部品である流体噴射用のオリフィスの加工を行い、機能特性である流体噴射の安定性にどのような影響を与えたか確認する。

#### (1) 実験方法

(3)-1 で使用した材料を使用し、以下の条件でそれぞれの材料で 10,000 個のオリフィスの作製を行う。

パンチ径：φ0.129mm

ダイ径：φ0.139mm

クリアランス：5%

加工角度：23 度、33.5 度、41 度

孔数：各 4 穴（計 12 穴）

加工油：植物系プレス加工油

#### (2) 評価方法

加工されたサンプルの流量測定を加工数量ごとにサンプル抽出 n=20 個行い、そのサンプルの流量測定を実施し加工初めから終わりまでの変化とバラツキの比較を行った。流体にはガソリン系の流体を使用し、1 分間に流れる流体の量を量産で使用している流量測定器を用いて測定した。

#### (3) 製品の状態

超微細粒鋼ステンレス材に於いても現在量産している製品と同様な部品の製作が可能であった。

#### (4) 流量の変化

通常量産で加工している条件で製作を行ったオリフィスの流量の違いを図 2-3-13 に示す。1shot から 10,000shot までの流量の変化量がどの材料においても多いことが見て取れる。この製品では流量ばらつきが大きく (3)-1 で確認したパンチ刃先の摩耗と凝着が原因であると考察できる。

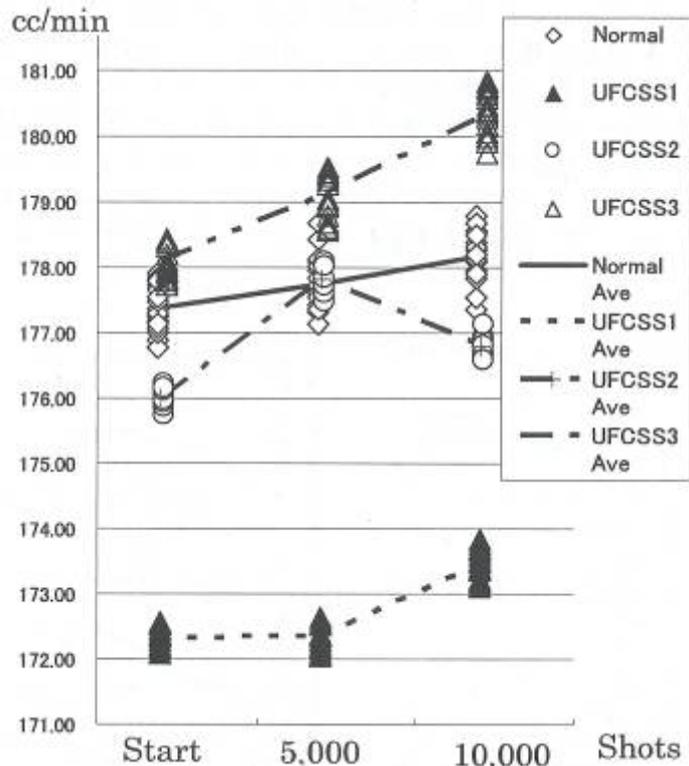


図 2-3-13 流量結果

### (5) 流量のばらつき

各ショット数でのサンプル 20 個のバラツキの結果を表 2-5 に示す。通常材料においては 20 個のばらつきは 1.56cc/min であるが、同レベルの硬度及び引張強度を持つ UFGS2 及び 3 では、各 0.6cc/min 及び 1.08cc/min となり縮小している。また、UFGS1 においては 0.72cc/min のばらつきであり、Normal と比較しても約 53.8%のバラツキ低減になっている。

表 2-7 流量の最大値と最小値との差

Shots	Normal	UFGS1	UFGS2	UFGS3
1	1.14	0.48	0.48	0.72
5000	1.56	0.60	0.60	0.96
10000	1.44	0.72	0.54	1.08
Max	1.56	0.72	0.60	1.08

### (6) 潤滑油を替えた加工

(5) の結果から各 Shots 内のばらつきは小さいものの、(4) で示すように量産時の流量の変化量は大きい。このため、1 でパンチ摩耗が潤滑油により改善できたことを考慮し、オリフィスの作製においても、パンチ摩耗・凝着の低減に効果があった潤滑油を使用して製品製作を行った。

この結果、図 2-3-14 と 2-3-15 に示すような量産時の流量の全体の変化量はなくなり、結晶粒径が小さくなるほど安定した流量の製品が得られていることが分かる。

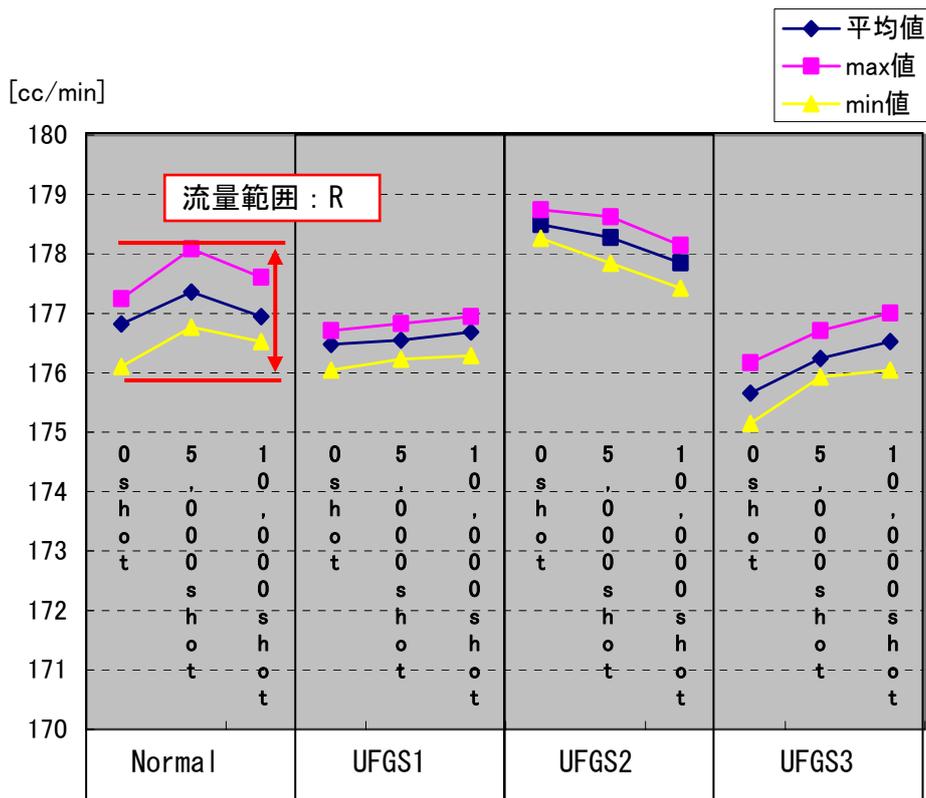


図 2-3-14 潤滑油を替えたオリフィス加工流量

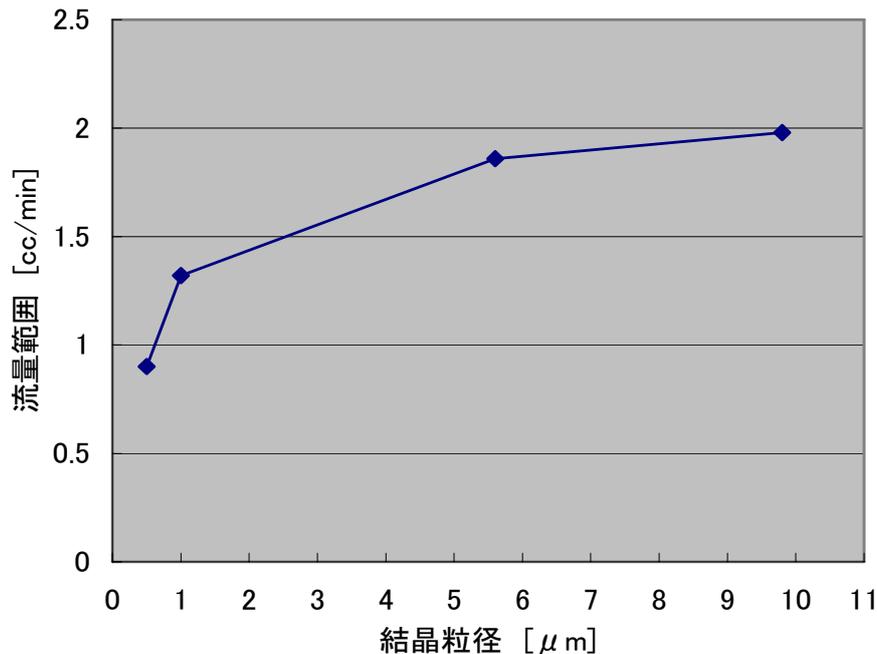


図 2-3-15 結晶粒径による流量範囲 R の推移

## (7) 微細粒鋼材料を使うことのメリット

### (7-1) 孔入り口形状の変化

結晶状態の違いによる孔入り口形状の変化を観察し引張りが同等な通常鋼と UFGS 2 及び 3 を比較すると形状自体にはあまり差は見られない。但し、通常鋼は穴の周りに不均一な箇所が確認されるが、微細粒鋼では等高線に均一性が保たれている。また、結晶が微細なものほどエッジが形成され粒径が大きくなるに従いダレが大きくなっている。

### (7-2) 連続加孔加工状態と安定性

連続した 120 個の孔を始めと終わりで観察した。通常鋼では連続した 5 個であっても突発的に孔入り口の形状の変化が認められるが、超微細粒に於いては連続した穴の形状に大きな差異が認められない。この突発的な孔入り口形状の変化を、各材料 120 個を観察し、カウントを行った結果を図 2-3-16 に示す。通常鋼では 120 個中 74 子が前の孔との違いが認められたが、超微細粒鋼に於いては 1/10-1/5 まで低減している。

### (7-3) ダレ量の比較

材料方向によるダレ量のバラツキを確認した。微細粒鋼材では通常鋼よりダレ量は小さく、また、材料方向による差も通常鋼より小さくなっている。

### (7-4) まとめ

材料の結晶の微細化に伴いエッジ部形状が安定し、突発的なエッジ形状のエラーが発生していないこと、また、材料方向によるダレ量の差が減少していることから、微細粒鋼材によるオリフィスの流量・噴角のばらつきが低減しているものと考察される。さらに、流量のバラツキの低減は、連続するオリフィスから同じ圧力にて噴霧された場合に噴射体間での安定的な出力が望める。

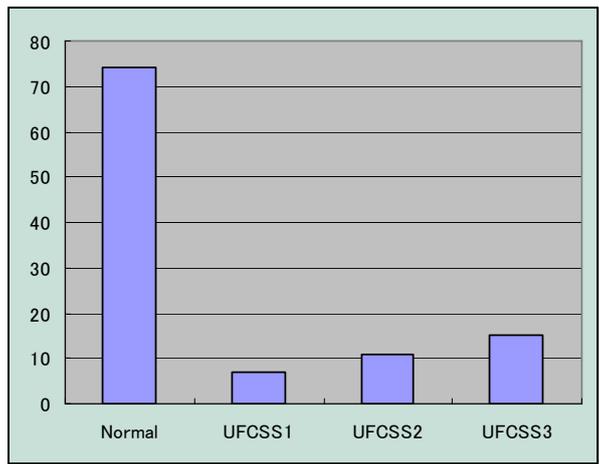
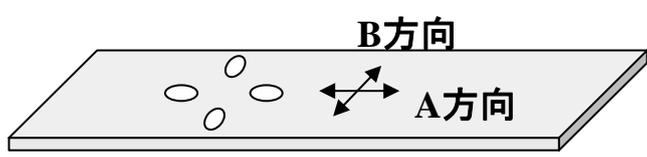


図 2-3-16 孔入り口変形頻度



	A方向	B方向
Normal		
UFGS2		

図 2-3-17 方向差によるダレの状態

表 2-8 ダレ量比較

	A 方向	B 方向	差
Normal	1.31	1.04	0.27
UFGS2	1.05	0.91	0.14

### (8) まとめ

量産加工を行いオリフィスでの機能評価を行った。その結果加工条件を最適にした場合、通常材料に比べオリフィスの機能特性が向上することが確認できた。また、材料の持つ異方性に対して、結晶を微細化することでそれを低減できることが確認できた。

### 参考文献

- 1) 鳥塚ら：平成 20 塑加春講論(2008)，43-44
- 2) 小松ら：平成 20 塑加春講論(2008)，45-46
- 3) 平成 19 年度戦略的基盤技術高度化支援事業報告書
- 4) 永山ら：平成 20 塑加春講論(2008)，341-342