



S. Torizuka

超微細粒鋼のせん断加工面の解析

鳥塚 史郎*

1. 研究の目的と背景

超微細粒鋼は、フェライト+パーライト鋼、マルテンサイト鋼やベイナイト鋼に比較して、強度-絞りバランスに優れている。そのため、超微細粒鋼の線材は、高強度の非調質冷間圧造用鋼として、高い可能性を持つ¹⁻⁴⁾。

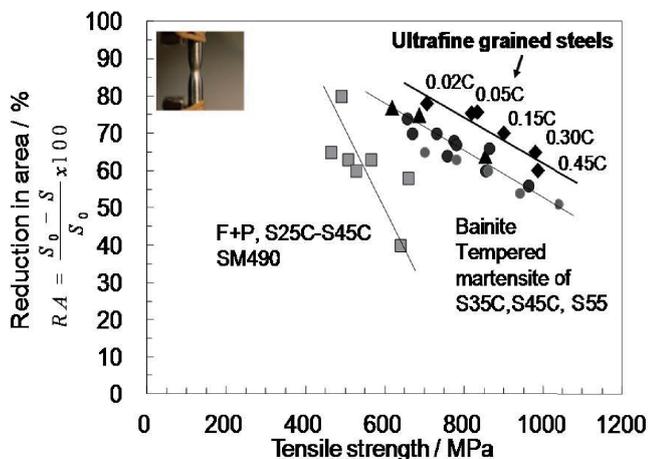
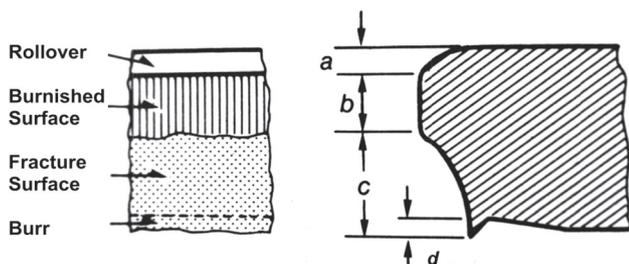


図1 引張強さと絞りの関係

一方、超微細粒鋼が、成形性の優れた高強度薄鋼板として提供できれば、プレス加工で製造する精密部品への適用が可能となる。しかし、プレス加工特性に関しては、サブミクロン組織を持った薄板の製造が困難なことから、報告例は少ない⁵⁻¹⁵⁾。精密部品のプレス加工には、素材の切断や穴抜きなどせん断加工による成形が欠かせない。

図2に示すように¹⁶⁾、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、せん断加工の切り口面に大きな影響を与えられと考えられる。本研究では、超微細粒鋼のせん断加工特性に注目し、その特徴を解析し、せん断加工面の生成機構を解析した¹⁷⁾。

図2 せん断加工で生じる切り口面の特徴¹⁶⁾

2. 実験方法

2.1 超微細粒鋼の作製

表1に示す組成の0.002C極低炭素鋼、0.02C低炭素鋼および0.3C中炭素鋼を真空溶解により作製し、熱間鍛造によって80x80mmの角棒とした。この角棒のうち、極低炭素鋼、低炭素鋼に対し、温間温度域で溝ロール圧延を施した。圧延条件を図3に示すが、823Kに加熱し、773Kで21パスの圧延を行い、18x18mmまで圧延した¹⁸⁾。総減面率は95%(真ひずみ=3)であり、組織の微細化が可能である。この中で、0.02C鋼に対し、さらに、923Kで熱処理を行い、組織の粗大化を行った。なお、超微細粒鋼の成分を低炭素組成としたのは、セメントaitを含まない、フェライト単相組織とするためである。また、0.3C中炭素鋼に関しては、80x80mm角の素材を18x18mm角まで熱間圧延を行い、仕上げ温度1173Kとし、フェライト+パーライト組織鋼を得られるようにした。

表1 供試鋼の組成 (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	N
1	0.002	0.3	0.20	0.01	0.001	0.002
2	0.022	0.30	0.20	0.01	0.001	0.002
3	0.30	0.30	1.50	0.01	0.001	0.002

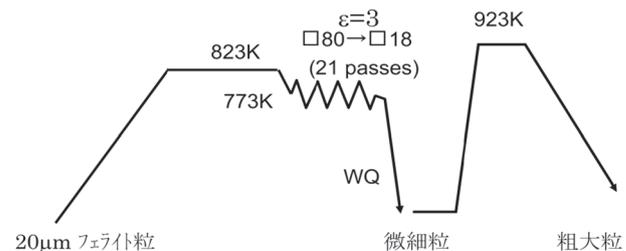


図3 超微細組織生成のための溝ロール圧延条件と結晶粒粗大化のための焼鈍条件

2.2 せん断加工

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14mm x 厚さ1mmの薄板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(図4(a))。せん断加工として、図4(b)に示す金型を用いて、穴抜き加工を行った。パンチの直径は3.00mm、ダイスの内径は3.04, 3.12, 3.20mmで、クリアランスはそれぞれ2.0, 6.0, 10.0%とした。これらの金型セットを引張試験機に取り付けて、穴抜き加工を行った。金型の外観を図4(c)に示す。クロスヘッド速度は、0.5mm/minとした。試験後のせん断加工切り口面の評価には、光学顕微鏡およびSEM(キーエンス3D-SEM VE9800)を用いた。

*兵庫県立大学大学院工学研究科 教授

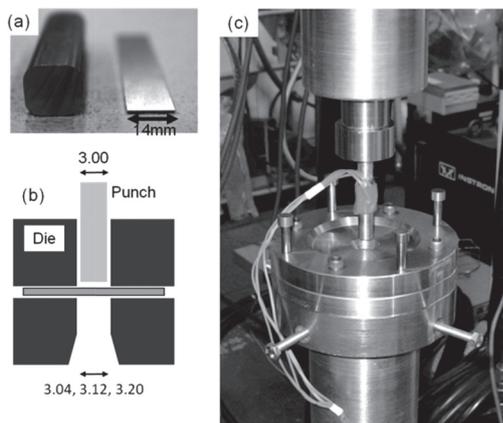


図4 (a) 穴抜き加工に用いた厚さ1mm幅14mmの薄板および薄板を切り出すのに用いた角棒(18x18mm), (b) 穴抜き加工に用いたパンチとダイスおよび直径と内径, (c) 外観¹⁷⁾

3. 研究成果

3.1 素材の組織と力学的性質

図5(a), (b)に0.02C超微細粒鋼と粗粒鋼の組織写真を示すが、結晶粒径はそれぞれ、0.7 μm , 13 μm であった。セメントタイトは見いだされなかった。図5(c)は、0.002C微細粒鋼であるが、0.02C超微細粒鋼と同等な微細フェライト粒組織であった。図5(d)は、0.30Cフェライト+パーライト鋼の組織で、フェライト粒径約10 μm であった。

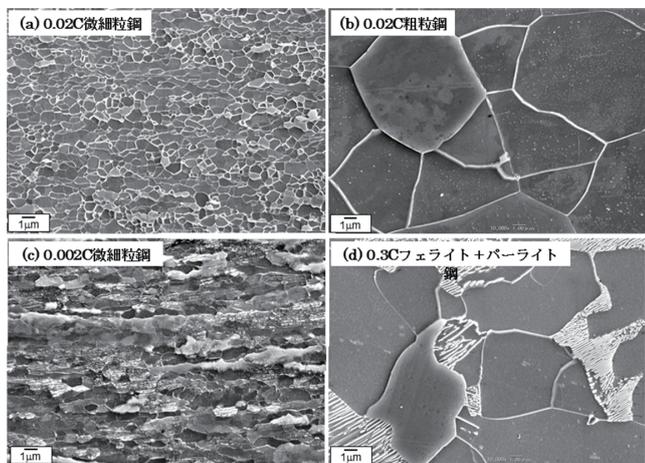


図5 穴抜き加工に用いた薄板の組織 (a) 0.02C超微細粒鋼, (b) 0.02C粗粒鋼, (c) 0.002C超微細粒鋼, (d) 0.30Cフェライト+パーライト鋼

図6にサンプルの引張試験結果を示す。0.02C粗粒鋼は全伸びが50%と大きく、引張強さは330MPaであった。0.30Cフェライト+パーライト鋼は、降伏応力400MPa、引張強さ630MPaで、大きな加工硬化をもつ。一方、0.02C超微細粒鋼は降伏応力700MPaと粗粒鋼の3倍になったが、降伏後、一様伸びを持たずにくびれが発生し、全伸び5%で破断した。一方、0.002C超微細粒鋼は、630MPaの引張強さと伸びが20%程度であった。また、それぞれの絞り値(引張試験前後の盤面変化)は、90%(0.02C粗粒鋼), 80%(0.02C微細粒鋼), 88%(0.002C微細

粒鋼), 71%(0.30Cフェライト+パーライト鋼)であった。

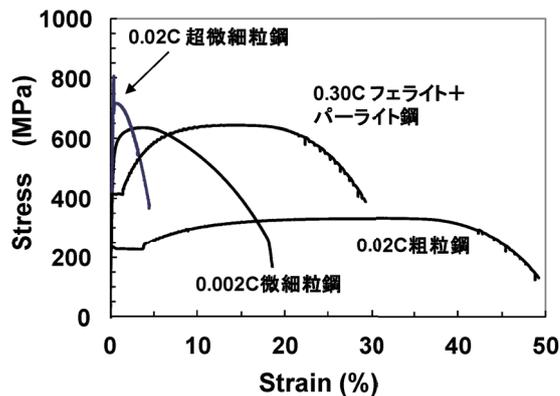


図6 供試鋼の応力-ひずみ曲線

3.2 切り口面の特徴

図7は穴を切断し、切り口をSEMで観察した結果である。上からだれ、なめらかな表面を持つせん断面、凹凸を持つ破断面が観察される。クリアランスの減少にともない、だれが減少し、せん断面が増加、同時に破断面が減少することが観察される¹⁶⁾。これらのことは、引張強さ980MPa級の高張力鋼においても同様な報告がされている¹⁹⁻²¹⁾。

Material	Clearance		
	2%	6%	10%
0.01C粗粒鋼			
0.01C微細粒鋼			
0.002C微細粒鋼			
0.30Cフェライト+パーライト鋼			

図7 クリアランスの減少にともなう切り口面の変化

3.3 結晶粒微細化とせん断面、破断面比率の関係

図1に示した切り口面の模式図において、だれ、せん断面、破断面の長さの割合を評価するために、各比率を式(1) - (3)のように定義して、各長さa, b, cを写真から計測して、各比率を求めた。図8に結果を示す。

$$\text{だれ比率} = a/(a+b+c) \quad (1)$$

$$\text{せん断面比率} = b/(a+b+c) \quad (2)$$

$$\text{破断面比率} = c/(a+b+c) \quad (3)$$

0.02C粗粒鋼の場合、クリアランスが、10%, 6%, 2%と減少してゆくにしたがって、せん断面比率は64%, 68%, 75%と

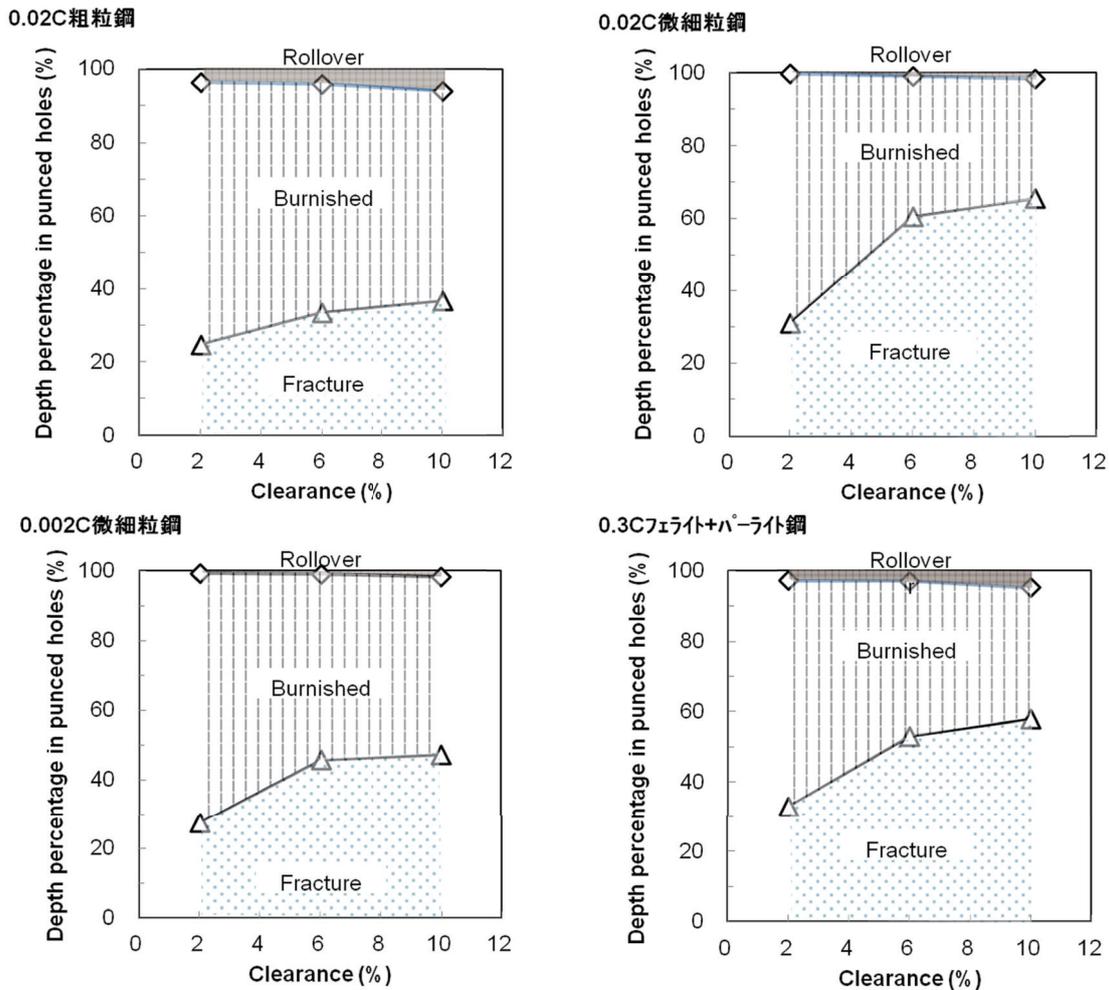


図8 だれ、せん断面、破断面の各比率に及ぼすクリアランスの影響¹⁷⁾

増加し、逆に、破断面比率は、31%、30%、21%と減少する。一方、0.02C微細粒鋼の場合、傾向は同様であるが、せん断面比率はクリアランス10%、6%では、41%以下であり、粗粒鋼に比べて小さい。しかし、クリアランスが2%になると、せん断面比率は72%と同等となる。0.002C微細粒鋼でも、傾向は同じである。しかし、クリアランス10%、6%の場合、せん断面比率は53%程度あり、0.02C微細粒鋼よりも大きい。一方、0.3Cフェライト+パーライト鋼の場合も、同様な傾向であるが、せん断面比率は、42%、49%、71%と0.02C微細粒鋼に近い。

せん断面から破断面への変化は、塑性変形から破壊への遷移であり、破断亀裂の発生が原因である。クリアランスの減少によるせん断面比率の増加は、材料に与えられる曲げモーメントによる引張応力が小さくなり、亀裂発生の時期が遅れるためであることが知られている¹⁶⁾。クリアランスの減少に伴ってせん断面比率が増加するという現象は、結晶粒径がサブミクロンとなっても変わらなかった。

一方、クリアランスが10%、6%の場合、結晶粒微細化によって、せん断面比率が低下し、破断面比率が増加する。伸び、絞りの観点からこの機構を考察する。図9に材料の全のびとせん断面比率の関係を示す。クリアランスが10%、6%の場合、全伸びと良い相関がある。このことは、延性の大きな材料ほど延性亀裂が発生しづらく、せん断面比率が大きくなることを意味すると思われる。

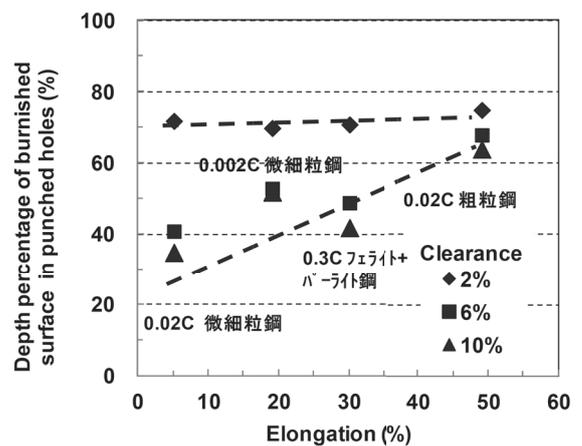


図9 全伸びとせん断面比率の関係

しかし、30%も伸びがある0.3Cフェライト+パーライト鋼のせん断面比率が全伸び18%の0.002C微細粒材よりも小さいこと、さらに、全伸びがわずか5%の0.02C微細粒鋼でもせん断面比率が40%程度あり、0.3Cフェライト+パーライト鋼を少し下回る程度であることを考えると、全伸びだけでは説明できないと思われる。

引張試験において、延性亀裂が発生するのはボイドが発生するような破断直前であり、全伸びよりも絞りに関係が深いとも考えられる。絞りは引張試験片の断面変化であるから、破断真

ひずみを引張試験結果から求めることができる。この破断真ひずみとせん断面比率の関係を表した図が図10である。

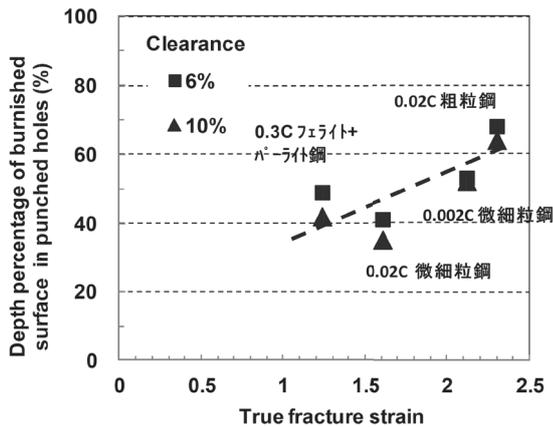


図10 絞りとせん断面比率の関係

0.3C フェライト+パーライト鋼がはずれているため、絞りのみから説明できるわけではないが、超微細粒鋼のように、伸びが小さいが、絞りが大きい材料のせん断特性は、絞りが大きく影響するといえる。

クリアランスが2%になるとせん断面比率は、組織や力学的特性によらなくなる。これは圧縮応力が亀裂の発生を抑制するファインランキングの効果と考えられる²²⁾。

3.4 結晶粒微細化とだれの関係

図8に示すように、だれもクリアランスの減少とともに低下してゆく。これも、従来知見と一致する点である²³⁾。一方、結晶粒径の影響は顕著である。

クリアランスとだれの変化を詳細に解析した結果が図11である。0.02C 粗粒鋼のだれ比率は、クリアランス10%-2%の低下によって、6.1%、4.2%、3.7%となるのに対し、0.02C 微細粒鋼および0.002C 微細粒鋼では、だれ比率は1/3程度の1.6%、0.93%、0.37%および1.6%、0.83%、0.59%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。

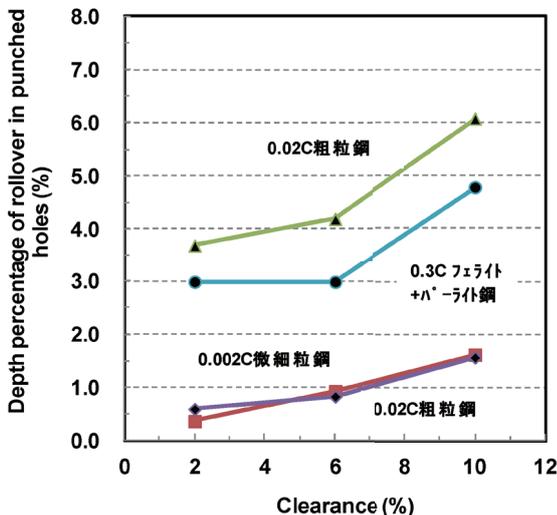


図11 だれ比率とクリアランスの関係

0.3C フェライト+パーライト鋼の場合のだれ比率は、4.8%、3.0%、3.0%と0.02C 粗粒鋼のだれ比率に近い。したがって、結晶粒の大きさがだれ比率に大きな影響を与えているといえる。ここで、注目している点は、加工硬化(指数)である。0.02C 粗粒鋼および0.3C フェライト+パーライト鋼は、加工硬化の大きな材料である。図4の公称応力-公称ひずみ曲線から真応力-真ひずみ曲線を求め、n値を決定したところ、0.26と0.14であった。一方、0.02C 微細粒鋼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 微細粒鋼も、局部伸びは大きいものの、加工硬化は少ない材料である。これらのn値は0.0023および0.033であった。

図12にn値とだれ比率の関係を表す。n値が大きくなるほどだれ比率が大きくなる²³⁾。加工硬化能が大きいと言うことは、パンチを押し込むときに、パンチに接する材料側の組織が加工硬化するため、変形をより進めるためには、硬化した組織の周囲の柔らかい組織が変形してしまう。

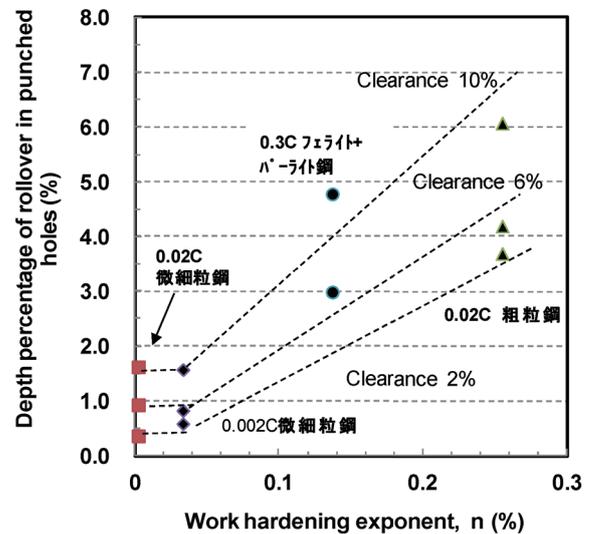


図12 加工硬化指数n値とだれ比率の関係

微細粒鋼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ためと考えられる。パンチに接する材料側の組織は変形しても硬化しないため、その外側の組織との強度差はない。したがって、パンチ周囲の組織が集中的に変形してゆくことになる。そのため、だれが小さくなったと考えられる。微細粒鋼を用いれば、クリアランスが大きくても、だれの少なさが得られる可能性を示している。超微細粒鋼は、その加工硬化能や伸びの小ささが欠点と言われてきたが、穴抜き加工では、だれが極めて小さいという大きなメリットを与える。

3.4 結晶粒微細化とせん断荷重

図13に穴抜き試験における荷重-変位曲線を示す。最大荷重は、引張試験における引張強さとおおそ関係しているが、0.3C フェライト+パーライト材が、最も最大荷重が大きく、最も引張強さの大きかった0.02C 微細粒材および、0.3C フェライト+パーライト材と同等の引張強さの0.002C 微細粒材は、穴抜き荷重がより低いことは大変興味深い。

穴抜き加工時のせん断抵抗 k は、最大荷重 P 、板厚 t 、せん

断輪郭長さ l より、

$$k = \frac{P}{il} \quad (4)$$

と表すことができる。各材料の引張強さとせん断抵抗の関係を表した結果が図 14 である。超微細粒材のせん断抵抗が 0.3C フェライト+パーライト材に比べ、小さいことが明らかである。このことも、微細粒材は加工硬化能が小さいために、変形領域が狭く、結果的に低荷重になったことと関連すると考えられる。

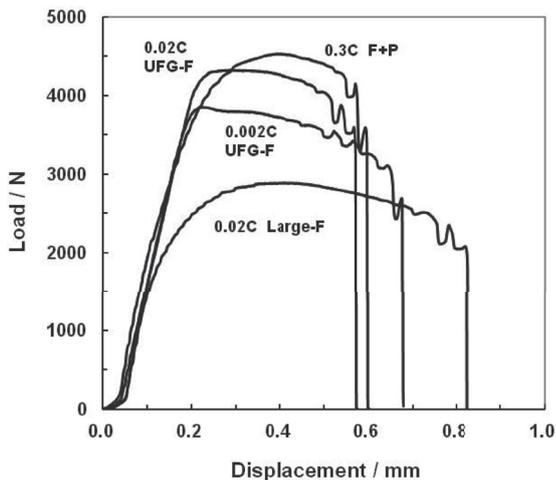


図 13 穴ぬき加工時の荷重-変位曲線¹⁷⁾

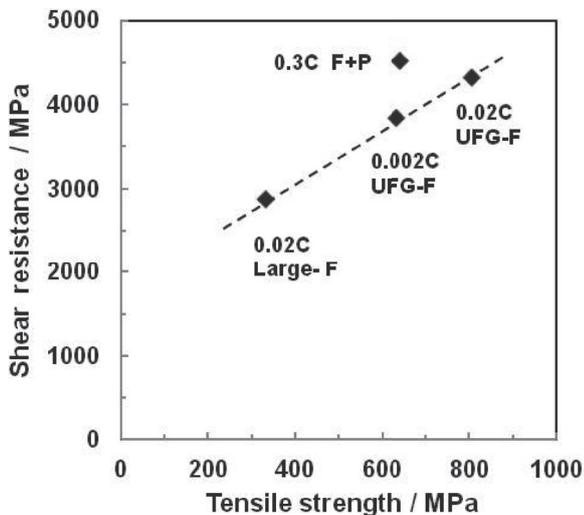


図 14 各材料の引張強さとせん断抵抗の関係¹⁷⁾

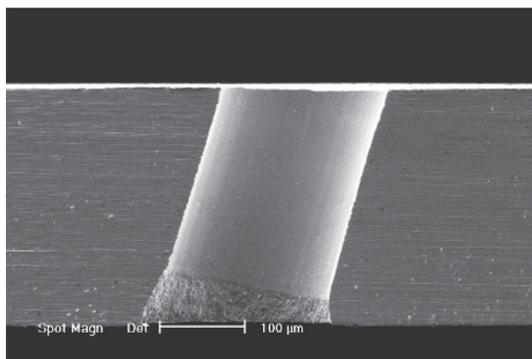


図 15 ななめ穴ぬき加工

図 15 は微細ななめ穴加工の例であるが、微細粒鋼のせん断加工で得られた知見をもとに、開発が行われている²⁴⁾。

4. 結言

超微細粒鋼のせん断加工面の特徴を、穴抜き試験によって調査し、せん断加工面の生成機構に関する検討を行い、以下の結果を得た。

- (1) 超微細粒鋼のせん断加工面は、粗粒鋼やフェライト+パーライト鋼に比べ、だれが極めて小さい。これは超微細粒鋼の加工硬化能が小さいためである。超微細粒鋼の大きなメリットである。
- (2) クリアランスが小さくなるにつれて、せん断面：破断面比率において、せん断面比率が大きくなってゆく。これは組織、粒径によらず、共通の現象であった。
- (3) 超微細粒鋼は、粗粒鋼に比べせん断面比率が小さい。しかし、ほとんど伸びのない 0.02C 微細粒鋼でも、40% 程度あり、さらに、18% の伸びを持つ 0.002C 微細粒鋼は、同等な強度のフェライト+パーライト鋼と比べると、せん断面比率が大きかった。
- (4) せん断面比率は、伸びと絞り両方に影響を受けると考えられるが、超微細粒鋼のように、伸びが小さいが、絞りが大きい材料のせん断特性は、絞りが大きく影響すると考えられる。

謝辞

本研究は公益財団法人天田財団のご支援を頂いたものである（平成 22 年度一般研究開発助成 AF - 2010014）。また、研究の遂行に当たり、小松隆史氏、永山真一氏、村松榮次郎氏、塚本雅敏博士、櫻井昇氏、野澤智子氏、土谷悦子氏に、多大なご協力を頂いた。

参考文献

- 1) Torizuka, S., Muramatsu, E., Murty, S.V.S.N., and Nagai, K. : Scripta Materialia, **55** (2006), 751-754.
- 2) 鳥塚史郎 : までりあ, 45-6(2006), 438-443.
- 3) Torizuka, S., Muramatsu, E. and Murty, S.V.S.N. : Materials Science Forum, **710**(2012), 19-26.
- 4) Torizuka, S., Muramatsu, Komatsu T. and Nagayama S. : Nanostructured metals and alloys 1, (2011), 715-746 Woodhead publishing, Cambridge UK.
- 5) 鳥塚史郎・村松榮次郎 : 平成 20 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2008), 43-44
- 6) 小松隆史・鳥塚史郎・村松榮次郎・永山真一 : 平成 20 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2008), 45-46.
- 7) 鳥塚史郎・村松榮次郎・小松隆史・永山真一 : 第 59 回塑性加工連合会講演会講演論文集, (2008), 305-306.
- 8) 小松隆史・鳥塚史郎・村松榮次郎・永山真一 : 第 59 回塑性加工連合会講演会講演論文集, (2008), 307-308.
- 9) 鳥塚史郎・村松榮次郎・小松隆史・永山真一 : 平成 21 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2009), 143-144.
- 10) 小林 仁・小松隆史・鳥塚史郎・村松榮次郎・永山真一 : 平成 21 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2009),

- 145-146.
- 11) 小松隆史・鳥塚史郎・村松榮次郎・永山真一・小林 仁：平成 21 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2009), 147-148
 - 12) 鳥塚史郎・村松榮次郎・小松隆史・小林 仁・永山真一：第 60 回塑性加工連合会講演会講演論文集, (2009), 323-324.
 - 13) 小林 仁・小松隆史・鳥塚史郎・村松榮次郎・永山真一：第 60 回塑性加工連合会講演会講演論文集, (2009), 325-326
 - 14) 小松隆史・鳥塚史郎・村松榮次郎・永山真一・小林 仁：第 60 回塑性加工連合会講演会講演論文集, (2009), 327-328.
 - 15) 鳥塚史郎・村松榮次郎・小松隆史・小林 仁・永山真一：平成 24 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2012), 397-398.
 - 16) 日本塑性加工学会編:せん断加工, (1992), 8-39, コロナ社.
 - 17) 鳥塚史郎・村松榮次郎・小松隆史・永山真一：塑性と加工, 55-642(2014), 626-632.
 - 18) 大森章夫・鳥塚史郎・長井 寿：鉄と鋼, 89-7(2003), 765-772.
 - 19) 村上碩哉・宮武直・笠原延修・金丸尚伸・井村隆昭：塑性と加工 ,51-593(1990),577-581.
 - 20) 安部洋平・森謙一郎・鈴木啓生：塑性と加工 ,50-580(2009),414-418
 - 21) 村川正夫・中村健太・土谷敏郎・松本朗・小閑伸裕：塑性と加工, 54-628(2013), 431-435.
 - 22) 日本塑性加工学会編：せん断加工, (1992), 68-76, コロナ社.
 - 23) 村川正夫：塑性と加工, 38-440(1997),794-799.
 - 24) 小松隆史, 小松誠, 柳沢春登, 上原恒浩, 柳沢保, & 真鍋清一, 塑性と加工, 52-611, (2011), 1281-1285.