



S. Torizuka

## 超微細粒鋼のせん断加工面の特徴

鳥塚 史郎\*

### 1. まえがき

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)6)</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。

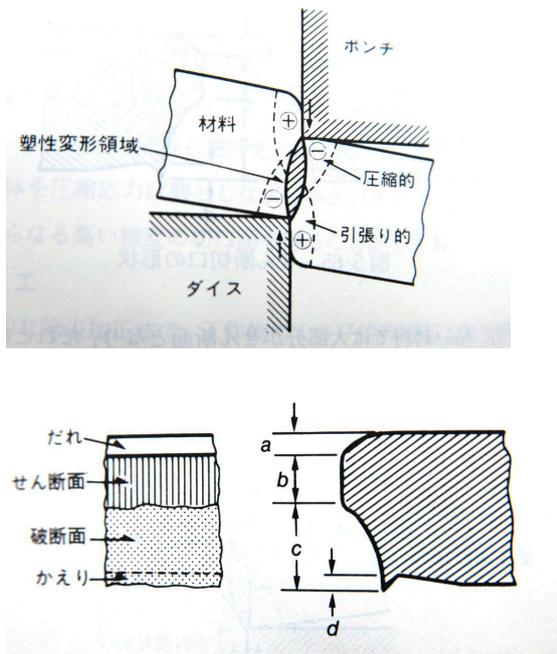
図1 せん断面の特徴<sup>7)</sup>

図1<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。超微細粒鋼のせん断加工面の特徴を明らかにするために、サブミクロン結晶粒径の低炭素フェライト鋼、比較のため、10ミクロンの低炭素フェライト鋼、また、

0.3%Cのフェライト+パーライト鋼を用いて、穴あけ加工を行い、そのせん断面の特徴を解析した<sup>8)</sup>。

### 2. 実験方法

0.002%および0.02%C-0.3%Mn-0.2%Si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、フェライト単相組織とするためである。この18mm角の棒材の一部を650°Cで熱処理を行い、粗大粒組織棒材も作製した<sup>1)</sup>。また、比較のため、0.3%C-1.5Mn-0.3Si組成のフェライト+パーライト組織鋼を熱間圧延によって作製した。

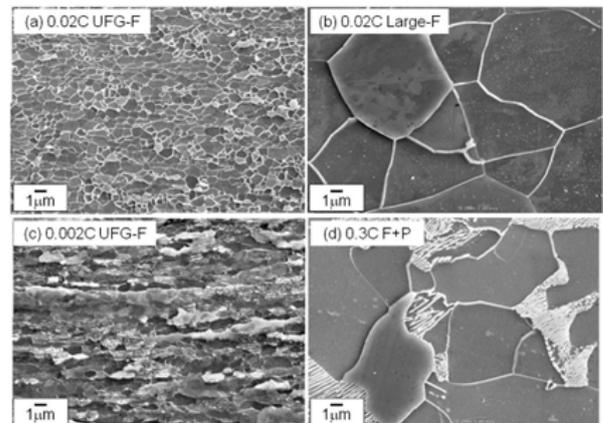


図2 超微細粒材と粗粒材の組織

図2に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 $\mu$ m、13 $\mu$ mであった。セメンタイトは見いだされなかった。0.30C鋼はフェライト粒径約20 $\mu$ mで、第2相はパーライトであった。

図3に棒材の引張試験結果を示す。0.02C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+パーライト組織は、降伏強度400MPa、引張強さが630MPaで、大きな加工硬化をもつ。一方、0.02C微細粒材は降伏強度700MPaと粗粒材の3倍になったが、降伏後全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の薄板形状のサンプルを作

\* 兵庫県立大学 教授

製し、せん断加工用のサンプルとした。せん断加工には、図4に示す金型を用いて、穴開け加工を行った。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2.0, 6.0, 10.0%とした。せん断面の評価は、キーエンス3D-SEM VE9800等を用いた。

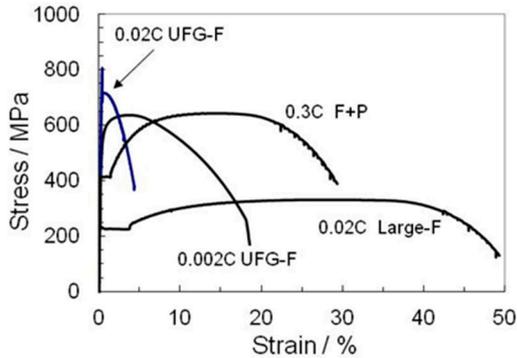


図3 0.02C, 0.002C 超微細粒材と 0.02C 粗粒材および 0.3C フェライト+パーライト材のの応力-ひずみ曲線

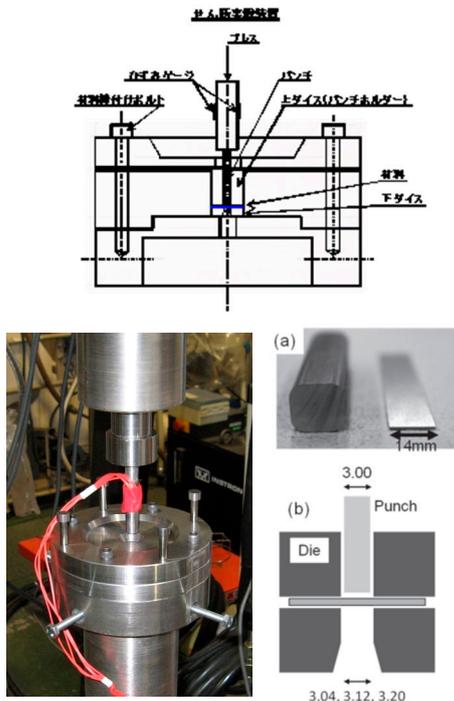


図4 せん断加工試験に用いた金型

### 3. 結果および考察

#### 3.1 せん断面と断面の比率

図5(a)に穴を切断し、切り口をSEM観察した結果を示す。また、図5(b)は抜けカスの外観を示す。切り口面(穴)の形状は、だれ、せん断面、破断面からなるが、その長さの割合を評価した結果を図5に示す。0.02C粗粒材の場合、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%と増加し、破断面比率は、31%、30%、21%と減少した。

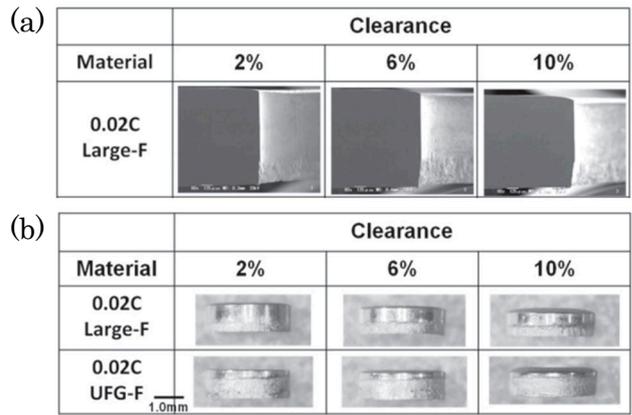


図5 (a)切り口面と(b)抜け

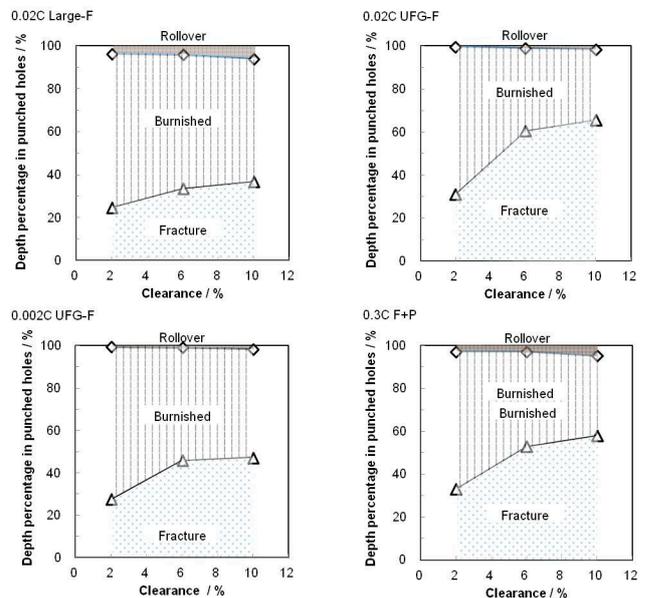


図6 だれ、せん断面 破断面の割合におよぼす組織とクリアランスの影響

一方、0.02C微細粒材の場合、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、粗粒材に比べて小さい。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%程度有り、0.02C微細粒材よりも大きくなる。また、クリアランス2%の場合は75%あった。一方、0.3Cのフェライト+パーライト材の場合も、同様な傾向であるが、せん断面比率は、42%、49%、71%と0.02C微細粒材に近い。

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。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7に示す全伸びとせん断面比率の関係を見ると、クリアランス10%、6%では、

せん断面比率は全伸びが支配しているといっている。しかし、30%も全伸びがある0.3C フェライト+パーライト材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 微細粒材でもせん断面比率が40%程度あり、0.3C フェライト+パーライト材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。

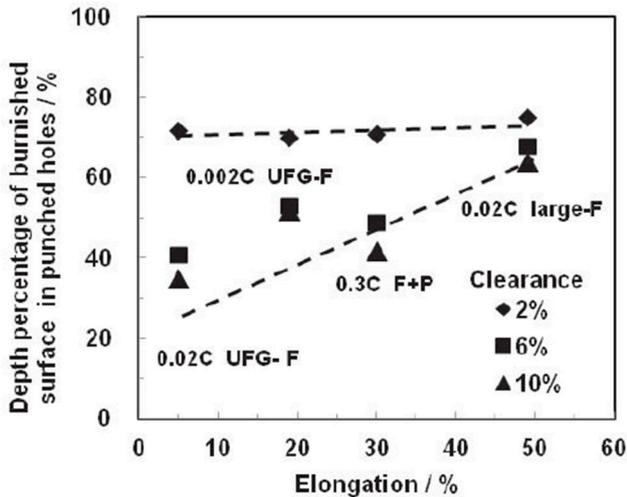


図7 全伸びとせん断面比率の関係

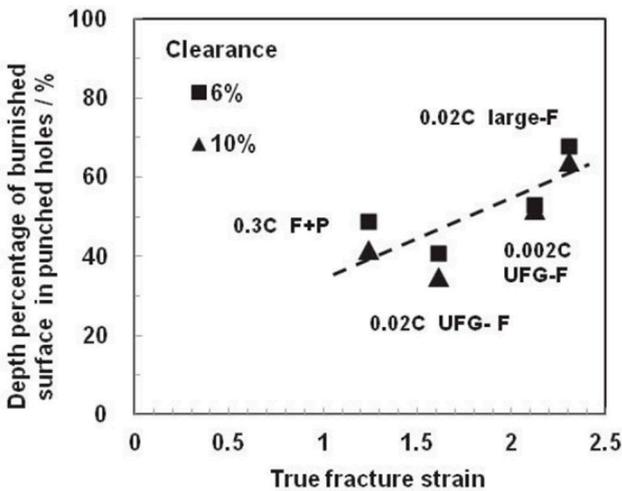


図8 せん断面比率と破断真ひずみの関係

破断真ひずみ(絞り)とせん断面比率の関係を表したものが図8である。0.3C フェライト+パーライト材がはずれているため、絞りのみからも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、絞りから説明できる。クリアランスが10%、6%の場合、全伸びと絞りがともに影響するが、クリアランスが2%となると、全伸びや絞りの差でせん断面比率は変化しなくなる。

### 3.2 だれ比率

図9は、せん断加工切り口面の変形、特にだれの様子を詳細に観察するために、穴抜き加工の途中止めを行い、断面を観察した結果である。クリアランス6%であるが、結晶粒微細材のだれはわずかであることが明らかである。

図10に示すように、0.02C 粗粒材のだれ比率は、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 微細粒材および0.002C 微細粒材では、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。結晶粒微細化のだれに対する影響は極めて大きい。

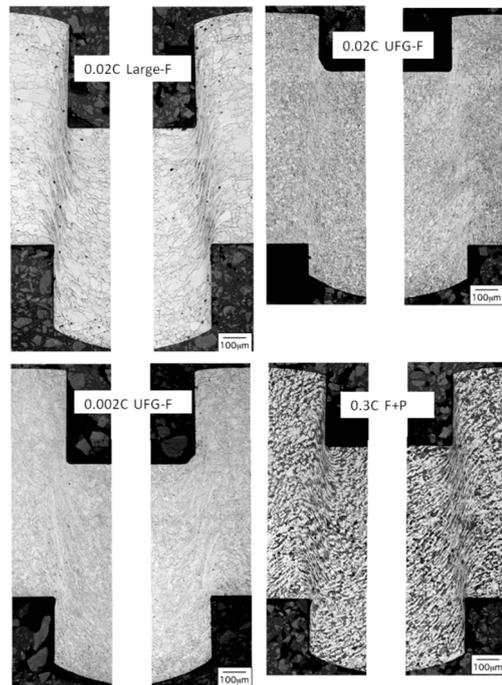


図9 だれの様子とその比率に及ぼす組織の影響

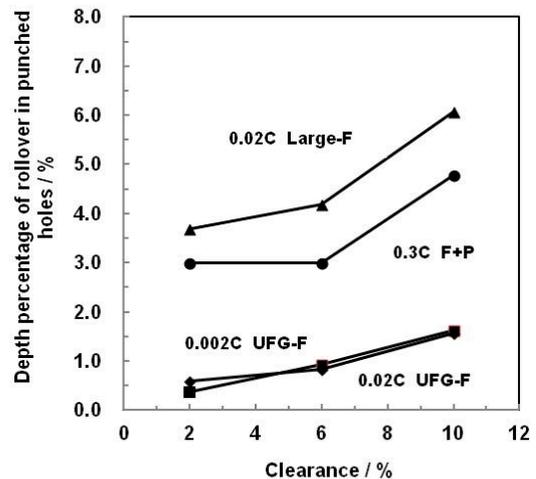


図10 クリアランスとだれ比率の関係

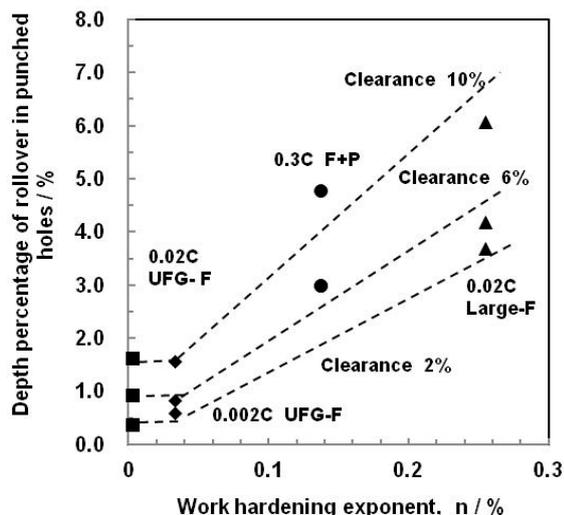


図 11 n 値とだれ比率の関係

ここで、注目している点は、加工硬化（指数）である。図 11 に n 値とだれ比率の関係を表わす。n 値が大きくなるほどだれ比率が大きくなる。加工硬化能が大きいうことは、一様変形能が大きく、パンチを押し込むときに、パンチに接する材料が広範囲に変形するためである。微細粒材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の低下が一様変形能を低下させ、変形範囲が減少したためと考えられる。

### 3.3 破断面粗さとせん断力

図12に示すように、粗大粒材では破面に大きなディンプルが観察されるが、微細粒材では観察されない。その結果、表1に示すように、面粗さRy（最大高さ）は粗大粒材で14μm、微細粒材で6μmと約1/3となった。0.3Cフェライト+パーライト材は10μmであった。微細粒材の加工硬化能が小さいことに起因すると考えられる。

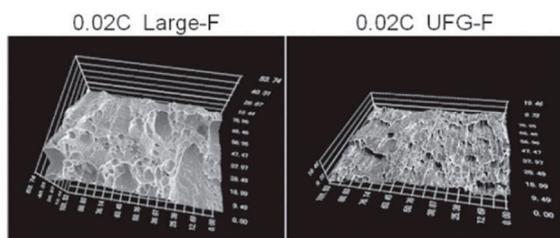


図12 0.02C超微細粒材と粗大粒材の破断面のSEM像

表1 0.02C超微細粒材と粗大粒材および0.3Cフェライト+パーライト材の破断面粗さ

Microstructure	Roughness Maximum height Ry / μm
0.3C F+P	10.4
0.02C Large-F	14.3
0.02C UFG-F	6.0

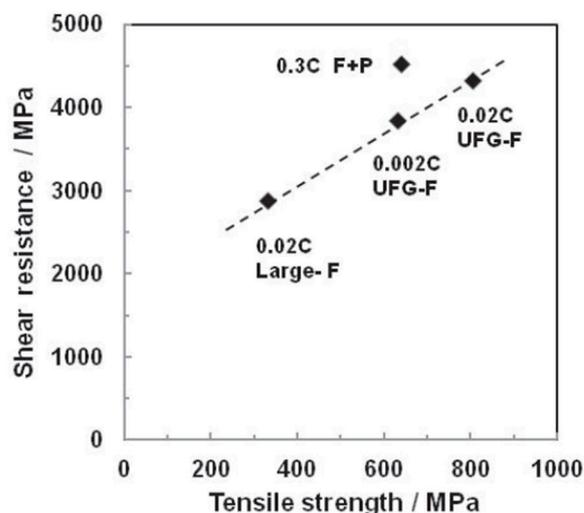


図 13 引張強さとせん断抵抗の関係

この3つの材料の穴抜きの際の抜き荷重、すなわち、せん断抵抗を比較してみると面白い。0.002C および 0.02C 材はせん断抵抗は、材料の引張強さと直線関係を持つ。しかし、0.3C フェライト+パーライト材は、同じ引張強さに対してせん断変形抵抗が大きい。これも、加工硬化能の大小に関連すると考えられる。

## 4. まとめ

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、せん断（穴抜き）加工では、だれが極めて小さいという特長を持つ。

## 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究助成により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 鳥塚史郎：ふえらむ, 10-3, 2005, 188.
- 2) Torizuka, S., Muramatsu, E., Murty, S.V.S., & Nagai, K.; Scripta Materialia, 55-8 2006, 751.
- 3) 鳥塚史郎：まてりあ, 45-6, 2006, 438.
- 4) 鳥塚史郎・村松榮次郎：ふえらむ, 20-9, 2015, 408
- 5) 鳥塚史郎・村松榮次郎：塑性と加工, 56-657, 2015, 850
- 6) 鳥塚史郎・村松榮次郎：ふえらむ, 24-8, 2019, 518
- 7) 日本塑性加工学会編：せん断加工, (1992), 8-39, コロナ社.
- 8) 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.