

# せん断付与圧延による圧延鋼板の特性

中嶋 宏\*・山下 晃生\*<sup>2</sup>・井上 忠信\*<sup>2</sup>・鳥塚 史郎\*<sup>2</sup>・花村 年裕\*<sup>2</sup>・長井 寿\*<sup>2</sup>

Characteristics of Steel Plates Rolled with Shear Deformation

Hiroshi NAKAJIMA, Teruo YAMASHITA, Tadanobu INOUE, Shiro TORIZUKA, Toshihiro HANAMURA and Kotobu NAGAI

**Synopsis :** The mechanical properties of the plates rolled with shear deformation are compared with those of conventionally rolled plates. The pair cross rolling is employed to introduce uniform shear strain through the plate thickness. The introduced shear strain and the equivalent strain are evaluated from both experimental and numerical analyses. A 12 mm thick plate with a fine ferrite grain under  $2\ \mu\text{m}$  is produced using the pair cross rolling mill, and tensile and the sharp impact tests are carried out. The interesting effect of the shear deformation is discussed from the viewpoint of the tensile strength and the energy transition temperature. The result shows that the addition of shear deformation can become an effective method for improving the strength and the energy transition temperature of steel plates.

**Key words:** pair cross rolling; shear deformation; low carbon steel; separation.

## 1. 緒言

結晶粒微細化は、合金組成の助けによらず、鉄鋼材料の高強度化、高靱性化を実現できる有用な手段である<sup>1-4)</sup>。特に、大ひずみを材料に導入する技術の提案により、粒径 $1\ \mu\text{m}$ 以下の微細粒鋼のサンプル作成が可能となり、引張特性、シャルピー衝撃特性を具体的に検討できるようになった。大ひずみを導入する技術としては、ECAPやARBなどのようにせん断ひずみを繰り返して行う方法<sup>5)</sup>や多方向から同時あるいは非同時に圧縮する方法<sup>6)</sup>などが提案されている。

さて、鉄鋼材料のような多結晶金属材料の機械的性質の向上に関しては、結晶粒径と集合組織が重要な役割を果たしていることはよく知られている。一般に板材の圧延においては、平面ひずみ圧縮変形により形成される変形集合組織を持つ<sup>7)</sup>。しかし、Fig. 1に示した特殊圧延の一つである異周速圧延を用いると、一般の圧延の場合と異なる集合組織を持つことが指摘されている<sup>8,9)</sup>。これは、異周速圧延の場合、上下のロールの周速が異なることで、中立点の位置が両ロールで異なり、Fig. 1に模式的に示したように

厚さ方向全体にせん断変形が生じるためであると説明している。また、アンビル圧縮を用いた研究において、加工オーステナイトから変態生成したフェライト粒径は、同じ相当塑性ひずみのもとで、せん断ひずみが付与された領域は、せん断ひずみのない領域に比べて微細になることが報告されている<sup>10,11)</sup>。そして、これは加工オーステナイトの単位体積あたりの粒界表面積比の差によるものだということが指摘されている。このように、同じ相当塑性ひずみが導入されたとしても、加工モードの違いによって形成される組織が異なる。したがって、せん断付与加工によって組織制御の自由度が拡がり、新しい材質制御法の発展が期待できる。

さて、せん断付与加工が可能な圧延にはFig. 1に示した異周速圧延だけでなく、異径圧延(Fig. 2)やペアクロスロール圧延(Fig. 3)がある(今後、これらを総称して“せん断付与圧延”と呼ぶ)。異周速圧延や異径圧延は、元々変形抵抗が高い材料などの難加工材を対象とし、1パスあたりの圧延荷重を軽減する目的で使用されていた<sup>12-15)</sup>。微細粒鋼を世界で初めて熱延ラインで創製した中山製鋼所の圧延ミルには、1パス大圧下の際の圧延荷重軽減を目的と

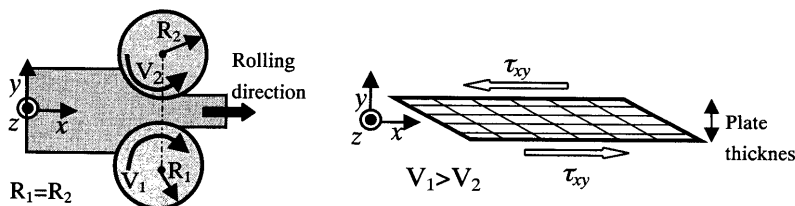


Fig. 1. Schematic illustration of different speed rolling.

平成14年8月1日受付 平成14年10月17日受理 (Received on Aug. 1, 2002; Accepted on Oct. 17, 2002)

\* 三菱重工業(株)広島研究所(Hiroshima R&D Center, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.)

\*<sup>2</sup> 物質・材料研究機構 超鉄鋼研究センター(Steel Research Center, National Institute for Materials Science, 1-2-1 Sengen Tsukuba 305-0047)

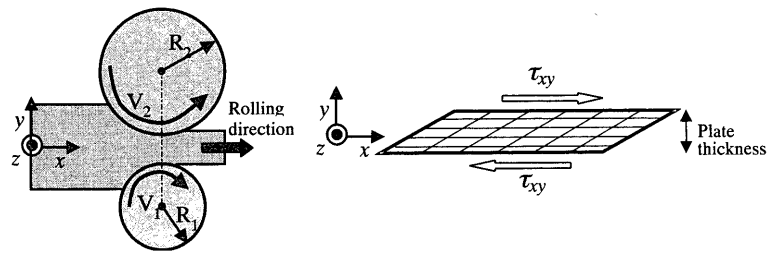


Fig. 2. Schematic illustration of asymmetric rolling.

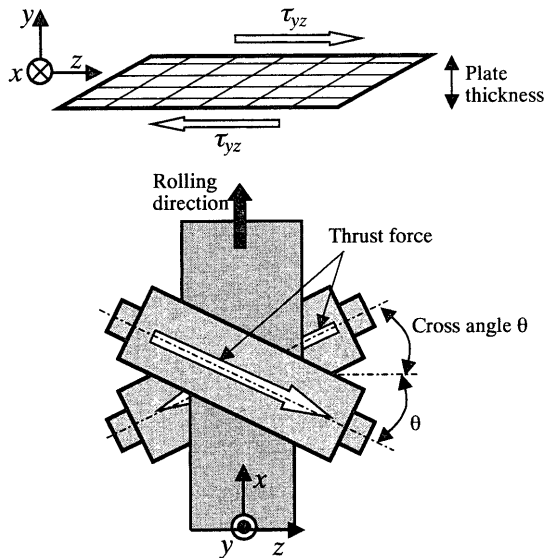


Fig. 3. Schematic illustration of cross rolling.

して、異径圧延の一つである小径異径片駆動圧延が用いられている<sup>14)</sup>。これらの圧延法では、圧縮ひずみと共に $y-z$ 平面 (TD面) 上にせん断ひずみが板厚全体に均一に導入される特徴がある。一方、Fig. 3に示したペアクロスロール圧延は、上下のロールをクロスさせる (クロス角度をとる) ことにより、板の平坦度すなわちエッジドロップ制御を目的として既に多くのミルで用いられている<sup>16,17)</sup>。この圧延は、各ロールの軸方向にスラスト力が作用することによって、板材には板幅方向に変形力 (スラスト力) が作用する。これによって、圧縮ひずみと共に $y-z$ 平面 (RD面) 上にせん断ひずみが板厚全体に均一に導入される。すなわち、せん断付与圧延は板厚全体に均一なせん断ひずみが圧縮ひずみと共に導入される圧延を指す。なお、一般の圧延でもロールと材料の摩擦の影響によって板厚方向にせん断ひずみが導入されるが、この場合は板厚中心でゼロとなる分布を持ち、均一なせん断ひずみは導入されない<sup>18)</sup>。

本論文では、低炭素鋼を対象とし、上記で示したせん断付与圧延の一つであるペアクロスロール圧延を用いて、まずクロス角度を変えた場合による圧延鋼板を創製する。そして、クロス角度をとることによって板厚方向に均一なせん断ひずみが導入されることを実験・数値解析の両面から検討する。次に、創製された鋼板に対して、引張試験およ

びシャルピー試験を行い、せん断付与圧延による鋼板の機械的性質について検討する。

## 2. 実験方法

### 2.1 ペアクロスミルの利用

鋼板の板厚方向へのせん断ひずみの導入手段として、ホットストリップミル<sup>19)</sup>、コールドストリップミル<sup>20)</sup>およびプレートミル<sup>16)</sup>への形状制御を目的として実用化されているペアクロスミルを使用した。

ロールをクロスさせる圧延機には、1.ワークロールのみをクロスする方法、2.バックアップロールのみをクロスする方法、3.ワークロールとバックアップロール双方をクロスする方法の3種類があるが、唯一実用化されているのは3の手法である、ペアクロスミルである。本実験で使用した三菱重工業 (株) 広島研究所のペアクロスミル<sup>21)</sup>の外観および主な仕様をFig. 4に示す。

一般の圧延機では、ロールは上下平行になっているがペアクロスミルの場合上下のロールをクロスさせる (クロス角度をとる) ことによって、圧延時板材の上面・下面でFig. 3に示すように、各ロールの軸方向にスラスト力が作用する。その結果として、板材には板厚方向だけでなく板幅方向に変形力が作用し、 $y-z$ 平面上にせん断ひずみが板厚方向に均一に導入される。なお、ペアクロスロールの場合、クロス角度を $0^\circ$ とすれば、鋼板の幅方向にせん断ひずみが付与されない一般の圧延となる。

### 2.2 実験条件

供試材には、0.15C-0.3Si-1.5Mn-0.01P-0.002S (mass%)のSM490鋼を用いた。圧延用サンプルは $65\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 200\text{ mm}^3$ で、大きな圧下を考慮して、一端をくさび形状とした。加工熱処理履歴をFig. 5に示す。まず、圧延用サンプルを1173Kに加熱し600s保持 (そのときの初期オーステナイト粒径は $17\ \mu\text{m}$ ) 後、オーステナイトの未再結晶域から2相 (フェライトとオーステナイト) 域にあたる1033~853Kの範囲で6パス ( $65 \rightarrow 47 \rightarrow 40 \rightarrow 30 \rightarrow 22 \rightarrow 16 \rightarrow 12\text{ mm}$ )、無潤滑で圧延し、板厚約12mmの圧延材を作製した。各パスにおける温度履歴は、サンプルに熱電対を埋め込み測定し、1パス目1033K、2パス目1003K、3パス目988K、4パス目963K、5パス目933K、6パス目853Kである。

Mill type : Pair-Cross 4 high mill  
 Work roll :  $\phi 260\text{mm} \times l 610\text{mm}$   
 Back up roll :  $\phi 580\text{mm} \times l 610\text{mm}$   
 Maximum rolling force: 150ton  
 Main drive motor : DC300kW  
 Maximum rolling speed: 100m/min  
 Cross angle : 0 to 1.5°

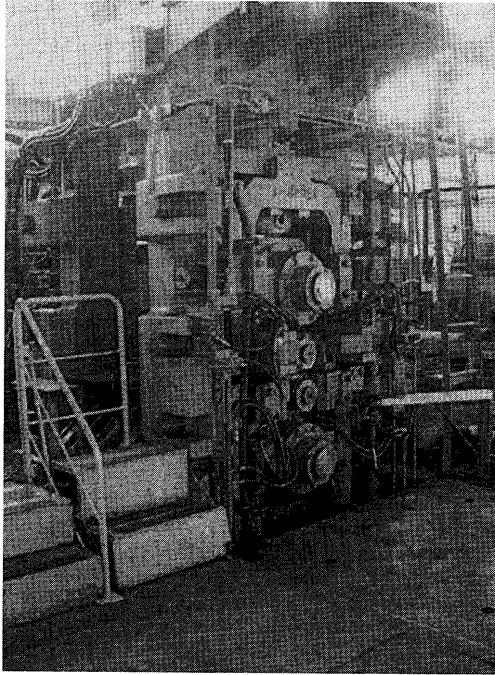


Fig. 4. Pair cross rolling mill used and its specification.

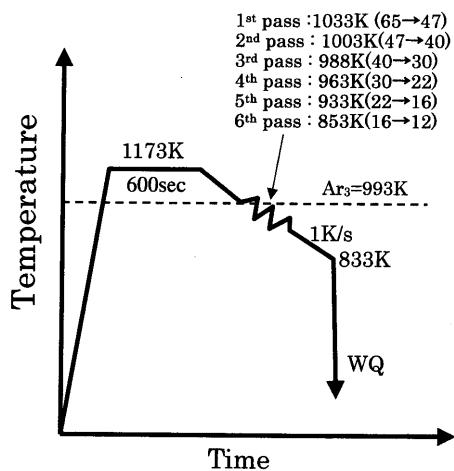


Fig. 5. Thermomechanical treatment diagram.

圧延速度は、10 m/minとした。圧延材は、833Kまで空冷（このときの平均冷却速度は1K/s）し、その後水冷した。クロス角度  $\theta$  は  $0^\circ$  と  $1.5^\circ$  の2条件とした。クロス角度  $\theta=0^\circ$  は板幅方向にせん断ひずみが付与されない一般の圧延であり、 $\theta=1.5^\circ$  はそれが付与されるせん断付与圧延となる。

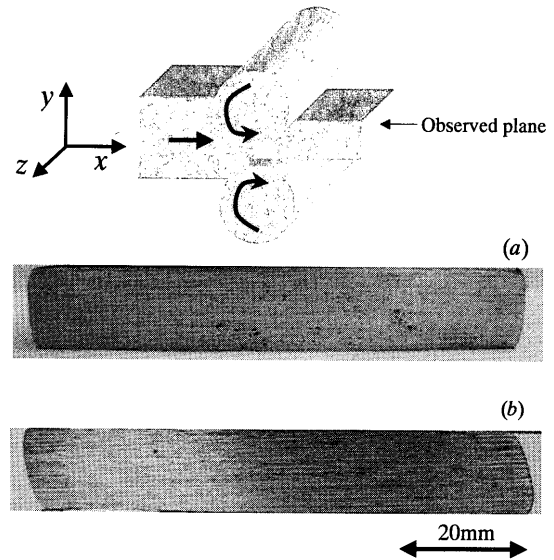


Fig. 6. Appearance of rolled plate on  $y$ - $z$  plane for cross angle (a) 0 degrees and (b) 1.5 degrees.

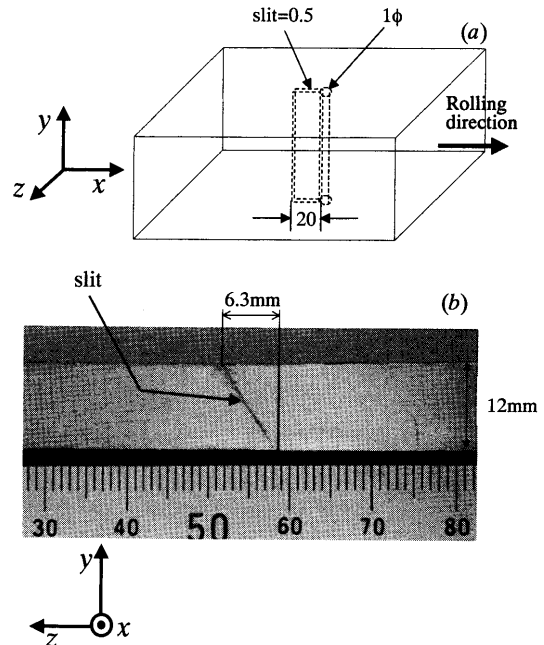


Fig. 7. (a) Sample before rolling and (b) gradient of slit on  $y$ - $z$  plane after cross rolling of 1.5 degrees.

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 板厚方向における均一なせん断ひずみの導入

##### (a) 実験の評価

クロス角度  $\theta=0^\circ$ 、 $1.5^\circ$  における圧延材の  $y$ - $z$  断面外観を Fig. 6 に示す。クロス角度  $1.5^\circ$  では、 $y$ - $z$  平面において鋼板が平行四辺形に変形しており、せん断付与圧延が実現されていることがわかる。そこで、せん断変形の有無を明確にするため、圧延用サンプルの板厚方向に、まずドリルで1mmの穴をあけ、放電加工（0.5φのワイヤー）によって、Fig. 7(a) に示したように長手方向に20mmのスリットを入れた。Fig. 7(b) は、クロス圧延 ( $\theta=1.5^\circ$ ) 後のスリットを入

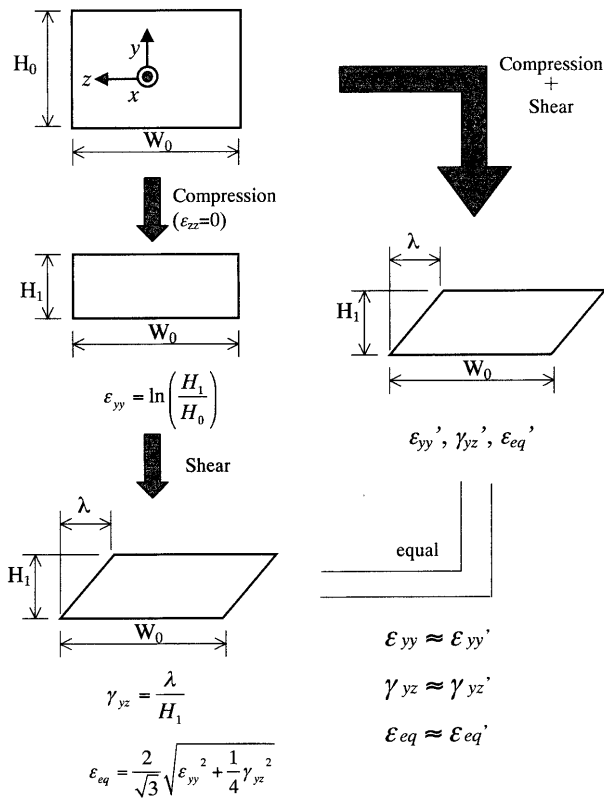


Fig. 8. Compressive strain, shear strain and equivalent strain introduced rolled plate on y-z plane.

れた部分の圧延材断面を示したものである。クロス圧延や異周速圧延のようなせん断付与圧延の場合、鋼板には単純せん断変形ではなく、圧縮変形とせん断変形が同時に導入されていることから、圧延後のスリットの傾きだけからせん断ひずみ量を正確に論じることはできない<sup>18)</sup>。しかし、Fig. 7(b)で示したスリットの傾きは板厚を通して均一であることがわかる。そこで、板厚を通して圧縮ひずみとせん断ひずみが均一であり、圧縮ひずみによる板幅方向の変化はないと仮定して、以下の式によってせん断ひずみを試算した。

$$\gamma_{yz} \approx \frac{\lambda}{H} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\gamma_{yz}$ はせん断ひずみ、 $\lambda$ は板幅方向への傾き量、 $H$ は圧延後の板厚である。式(1)では、圧縮変形とせん断変形が独立した関係にあり、Fig. 8に示したように板材の変形は圧縮後にせん断変形を付与したものと等しいという仮定に基づく。その仮定に基づく、圧延後の板厚とスリットの傾きから、本圧延によって導入される圧縮ひずみ $\epsilon_{yy}$ 、せん断ひずみ $\gamma_{yz}$ 、そして相当ひずみ $\epsilon_{eq}$ は以下のように試算できる。

In case of  $\theta=0$  degrees (without shear strain):  
 $\epsilon_{yy} = -1.69, \gamma_{yz} = 0, \epsilon_{eq} = 1.95$

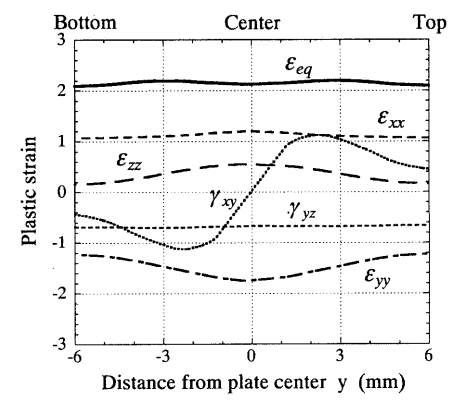
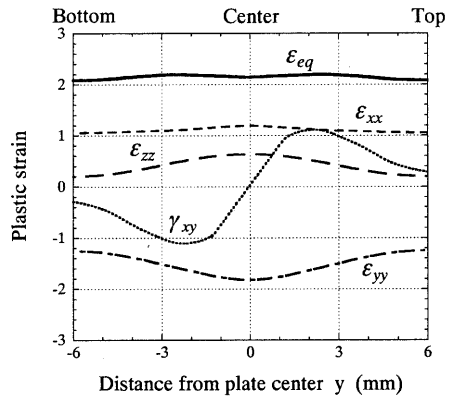
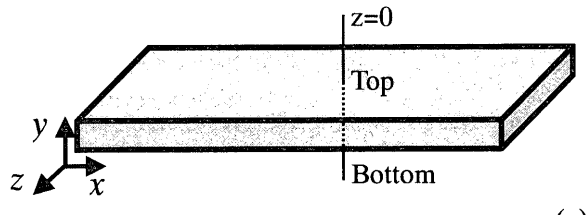


Fig. 9. Plastic strain distributions through plate thickness on the z=0 in cases of (a) cross angle 0 degrees and (b) cross angle 1.5 degrees.

In case of  $\theta=1.5$  degrees (with shear strain):

$$\epsilon_{yy} = -1.69, \gamma_{yz} = 0.53, \epsilon_{eq} = 1.98$$

すなわち、せん断付与圧延ではせん断ひずみ $\gamma_{yz}$ が生じた分だけ、相当ひずみ $\epsilon_{eq}$ がわずかだけ大きくなっているが、本条件ではほとんど同じ $\epsilon_{eq}=2$ と言える。

(b) 数値解析的評価

上述した実験的評価では、Fig. 8に示した考えで、圧縮変形とせん断変形を分離して考えたが、実際の変形は圧縮されながらせん断しており、それらの変形を同時に考慮したもとの、ひずみを算出する必要がある。そこで、圧延によって導入されたひずみを3次元陽解法動的有限要素解析によって算出した。解析では、円柱圧縮試験によって実測した温度、ひずみ速度に依存した応力-ひずみ曲線を用い<sup>6)</sup>、ロールと鋼板の接触条件は一般的な熱間圧延で用いられる摩擦係数0.3のクーロン条件を採用した。加工温度は1023Kで行い、ロール直径、圧延速度は実験と同じ $\phi 260$  mm, 10 m/minであり、加工パス履歴もFig. 5に示したように65 mmから12 mmまで6パスで行った。Fig. 9は、

クロス角度  $\theta$  が  $0^\circ$ ,  $1.5^\circ$  のそれぞれにおける 6 パス後の  $z=0$  での板厚に対するひずみ分布を示したものである。一般の圧延の場合 ( $\theta=0^\circ$ )、板厚方向に対して圧延方向のひずみ  $\varepsilon_{xx}=1$  でほぼ一定であり、板厚方向のひずみ  $\varepsilon_{yy}$  は  $-1.25 \sim -1.83$  の範囲で分布を持ち、板厚中央に近づくにつれ絶対値は大きくなる。それにより、幅方向のひずみ  $\varepsilon_{zz}$  も中央に近づくにつれ大きくなる。せん断ひずみ  $\gamma_{xy}$  は、ロールと鋼板の摩擦の影響によって発生しており、中央でゼロとなり、そこを境にして正負が異なる。これらのひずみ成分によって決定される相当ひずみ  $\varepsilon_{eq}$  はほぼ均一であり、 $\varepsilon_{eq} \approx 2.16$  である。一方、せん断付与圧延の場合 ( $\theta=1.5^\circ$ )、板厚方向に対して圧延方向のひずみ  $\varepsilon_{xx} \approx 1$  であり、板厚方向のひずみ  $\varepsilon_{yy}$  は  $-1.22 \sim -1.75$  の範囲で分布を持ち、中央に近づくにつれ絶対値は大きくなる。同様に、幅方向のひずみ  $\varepsilon_{zz}$  も中央に近づくにつれ大きくなる。ロールと鋼板の摩擦の影響によって発生するせん断ひずみ  $\gamma_{xy}$  だけでなく、ロールをクロスしたことによってせん断ひずみ  $\gamma_{yz}$  が生じているのがわかる。しかも、そのせん断ひずみは板厚に対してほぼ一定であり、その値は  $0.67$  である。相当ひずみ  $\varepsilon_{eq}$  はほぼ均一であり、 $\varepsilon_{eq} \approx 2.16$  である。

クロス角度  $\theta=0^\circ$ ,  $1.5^\circ$  のひずみ分布を比較すると、 $\theta=0^\circ$  で生じないせん断ひずみ  $\gamma_{yz}$  が  $\theta=1.5^\circ$  のときに板厚に対して均一に生じていることがわかる。これは、Fig. 3 で示したペアクロス圧延を用いることによって  $y-z$  平面上にせん断ひずみを均一に導入できる考えと Fig. 7(b) で示したスリットの均一な傾きの結果を、数値解析でも確認したことになる。その他の圧縮ひずみ  $\varepsilon_{yy}$ , 引張りひずみ  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{zz}$ , せん断ひずみ  $\gamma_{xy}$  は  $\theta=0^\circ$ ,  $1.5^\circ$  に対して分布・大きさに大きな違いはないが、 $\theta=1.5^\circ$  の方が  $\theta=0^\circ$  に比べて絶対値がわずかに小さくなっている。これはせん断ひずみ  $\gamma_{yz}$  の影響によって、各方向の変形が緩和されたと推測できる。これにより、各ひずみ成分を考慮したスカラー量である相当ひずみはクロス角度によらず同じ値になったと言える。

以上から、クロスロールを用いたせん断付与圧延により、 $y-z$  平面上に均一なせん断ひずみを板厚全体に導入することができる。ただし、せん断付与によらず相当ひずみは同じである。

### 3.2 引張試験とシャルピー衝撃試験結果

圧延材より、Fig.10(a) に示したように引張試験用に JIS14A 号試験片 (Fig.10(b)), シャルピー衝撃試験用に JIS4 号試験片 (Fig.10(c)) を切り出した。

#### (a) 引張り試験結果

Fig.11 は、クロス角度  $\theta=0^\circ$ ,  $1.5^\circ$  のそれぞれに対する引張試験結果を示す。クロス角度  $\theta=0^\circ$  のとき、降伏強さ LYS は  $588 \text{ MPa}$ , 引張強さ TS は  $642 \text{ MPa}$  であり、一様伸び U.EI は  $12\%$  である。一方、 $\theta=1.5^\circ$  のとき、LYS は  $615 \text{ MPa}$ , TS は  $675 \text{ MPa}$  であり、U.EI は  $10.5\%$  である。降伏強さおよび引張強さと共に、せん断付与の  $\theta=1.5^\circ$  のときの方が大き

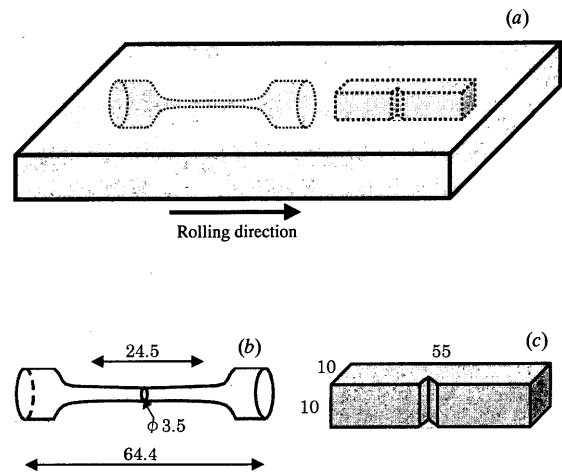


Fig. 10. (a) Rolled plate and sample shape used in (b) tensile test and (c) v-notch sharp impact test.

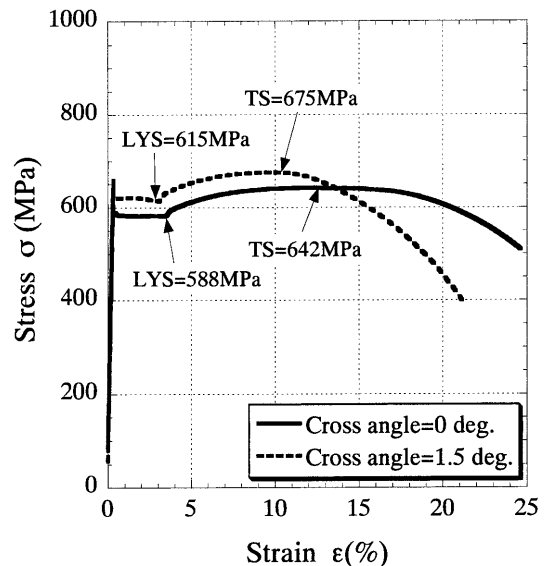


Fig. 11. Stress-strain curves of rolled plate.

くなっているが、伸びは  $\theta=0^\circ$  の方が大きい。

一般的に、強度向上は結晶粒微細化に起因するとされており、クロス角度  $\theta=0^\circ$  に比べ  $\theta=1.5^\circ$  のときの組織が微細になっていることが考えられる。Fig.12 は、圧延材の  $x-y$  断面における板厚中心部分の組織写真の一例を示す。組織は、フェライト、パーライト、セメントライトによって構成され、圧延方向に伸張したフェライト粒となっている。Fig.12(b), (d) の SEM 写真から測定されたフェライトの公称粒径は  $\theta=0^\circ$  のとき  $1.8 \mu\text{m}$ ,  $\theta=1.5^\circ$  のとき  $1.5 \mu\text{m}$  であった。すなわち、せん断付与の方がフェライト粒径  $d_\alpha$  が小さくなっているが、差はわずかであり、Fig.11 で示した引張試験結果の相違が粒径によってもたらされたということは今回の実験結果だけでは断定できない。

これら強度や伸びと粒径の関係に対するせん断付与の影響は、今後せん断付与圧延によって粒径の異なる鋼板を創製し、粒径のアスペクト比、集合組織の影響などを含めて

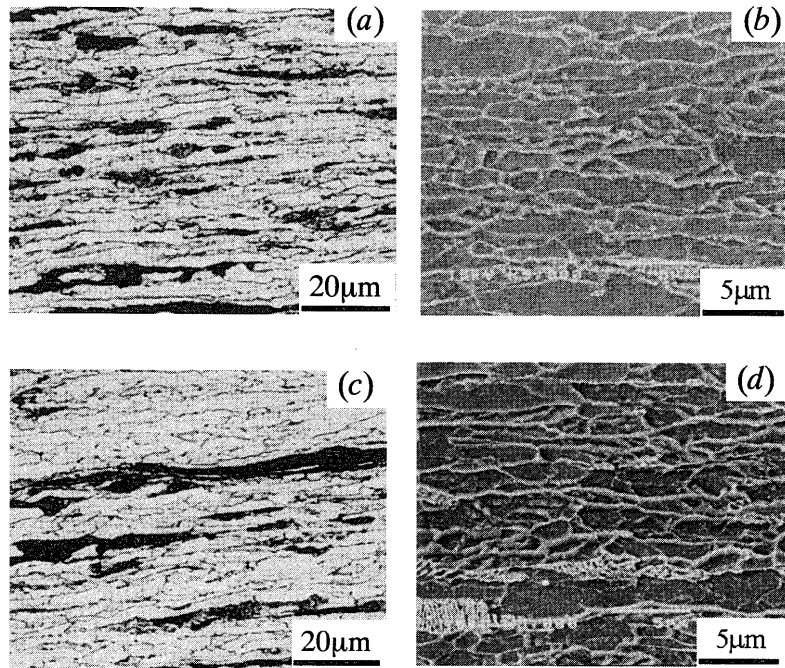


Fig. 12. Microstructures at center of plate thickness on  $x$ - $y$  cross section after rolling in cross of (a) and (b) cross angle 0 degrees and (c) and (d) cross angle 1.5 degrees.

系統的に検討することが必要となる。

(b) シャルピー衝撃試験結果

次に、シャルピー衝撃試験結果を Fig.13 に示す。230K 以下では遷移曲線にほとんど違いはないが、 $\theta=0^\circ$  に比べてせん断付与である  $\theta=1.5^\circ$  のときの方が上部棚エネルギーが低温まで維持されているのがわかる。同様に、エネルギー遷移温度も低温側へ移行している ( $\theta=0^\circ$  のとき  $vT_E=247\text{K} \rightarrow \theta=1.5^\circ$  のとき  $vT_E=235\text{K}$ )。Fig.14 は、クロス角度  $0^\circ$ ,  $1.5^\circ$  のそれぞれ場合におけるシャルピー試験後の破面写真を示す。破面を比較すると、249K ではほとんど同じ程度のセパレーションが観察されるが、温度が上がるにつれて、せん断付与の方がセパレーション発生が抑制されていることがわかる。特に、Fig.13 で吸収エネルギーに大きな差が現れている 273K における破面では、 $\theta=0^\circ$  のときはセパレーションが観察されているが、 $\theta=1.5^\circ$  のときにはほとんど観察されない。一般に、圧延鋼板ではオーステナイトとフェライトの 2 相域で加工されると板面に平行に  $\{100\}$  集合組織が発達し、これがセパレーションを発生させ、吸収エネルギーを低下させていることが報告されている<sup>22,23)</sup>。すなわち、せん断ひずみが付与されることによって従来の圧延組織とは異なる集合組織が発達、あるいは  $\{100\}$  集合組織が緩和され、セパレーション発生を抑制する機構が働いたと考えられる。その結果、上部棚エネルギーが低温まで維持され、エネルギー遷移温度も低温側へ移行したと推測できる。なお、破面はせん断付与によらずどちらの場合も低温まで微細ディンプルが見られた延性破面である。最低試験温度 249K においても、脆性破面率はせん断付与によらずどちらの場合も約 8% であり、破面遷

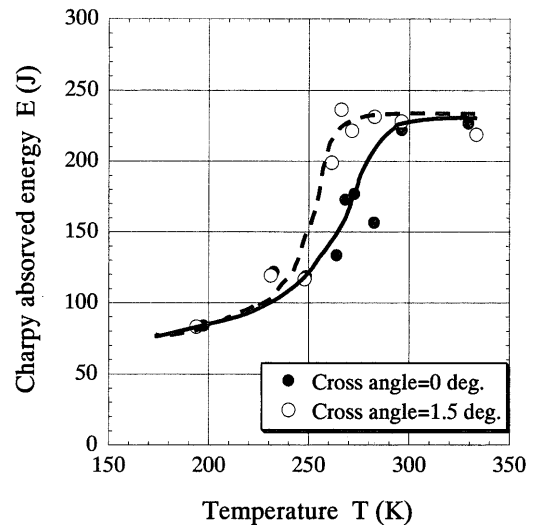


Fig. 13. Relationship between the charpy absorbed energy and the temperature.

移温度以上である。すなわち、ここで示したせん断ひずみの有無によるシャルピー衝撃試験の結果は、延性破壊領域での比較を意味する。破面遷移温度  $vT_S$  に対するせん断ひずみの影響を見るためには、更なる低温域での試験結果が必要である。

第 1 章で示した異周速圧延では、せん断ひずみの量を制御する異速比 ( $V_1/V_2$ ) を増加させることによって一般の圧延とは異なる集合組織を板厚全体にわたって発達させることができたことが報告されている。本報告で用いたクロスロール圧延でも同様にクロス角度を大きくすれば、圧延材に大きなせん断ひずみを導入することが可能であり、一般

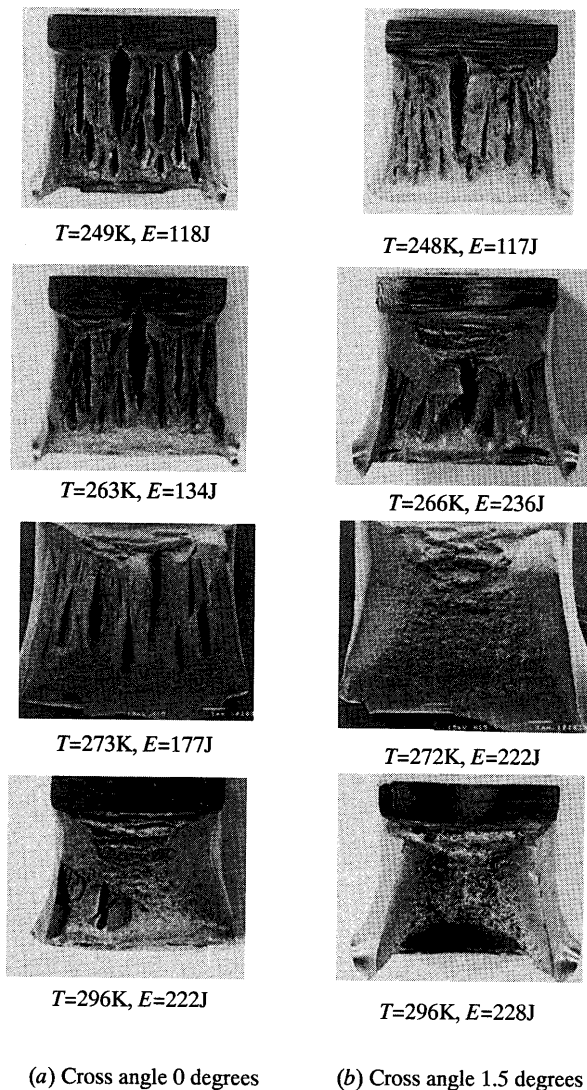


Fig. 14. Fracture surface of Charpy impact test piece for each temperature.  $T$  denotes temperature and  $E$  Charpy absorbed energy.

の圧延とは異なる集合組織を発達させ、機械的性質の向上が見込める可能性がある。

一般に、ペアクロスロール圧延は従来の圧延に比べ、大圧下圧延が可能であり、かつ形状制御特性に優れた圧延方法として多くのミルに採用されている。西岡ら<sup>16)</sup>は、厚板の仕上げ圧延機にペアクロスロールを用い、形状制御だけでなく、大圧下圧延が可能となったことで、強度-靱性バランスが改善されたことを指摘している。しかし、その後の研究の中で、ペアクロスロール圧延による組織と機械的性質の関係に与える影響に関する系統的な研究はなされていないと思える。本論文では、ペアクロスロール圧延により、従来の圧延と同じ条件下で圧延し、比較した結果、強度向上とシャルピー衝撃特性の向上が期待できることを示した。

今後、せん断ひずみが組織形成に与える影響や形成される組織と機械的性質の関係などを詳細に検討することが必要になる。その際には、数値解析技術を利用することに

よってせん断ひずみを定量的に把握し、相当塑性ひずみ、圧縮ひずみ、そしてせん断ひずみの組合わせに対する粒径(大きさ・形)、集合組織の変化を検討することが重要になる。そして、本報告で紹介したクロス角度をさらに大きくできるミルを開発できれば、より大きなせん断ひずみを導入することが可能であり、せん断変形を積極的に利用した鋼板の特性向上が期待できる。つまり、せん断付与圧延が従来のような圧延荷重の軽減だけを目的にただだけでなく、せん断変形を利用した新しい材質制御の発展が期待できる。

以上により、ペアクロス圧延による板厚全体にわたるせん断ひずみの導入によって、クロス角度の拡大により、以下の材質上の効果が期待される。

- (1) 強度向上
- (2) セパレーション発生抑制
- (3) 上部棚エネルギー、エネルギー遷移温度の低温側への移行

#### 4. 結言

せん断付与圧延の一つであるペアクロスミルを用いて、微細組織を有する厚さ12mmの圧延鋼板を作製し、せん断変形の有無による鋼板の機械的性質について検討し、以下の結果を得た。

- (1) ペアクロス圧延機を使用することによって、板厚方向に均一なせん断ひずみを導入することができる。
- (2) せん断ひずみの導入によって、上部棚エネルギーおよびエネルギー遷移温度の低温への移行、セパレーション発生の抑制が認められた。

本研究遂行にあたり、独立行政法人 物質・材料研究機構(旧金属材料技術研究所)関係者、および種々の助言をいただいた川崎製鉄(株)水島研究所 林透氏に感謝いたします。

#### 文 献

- 1) Proc. 1st Int. Symp. on Ultrafine Grained Steels (ISUGUS 2001), ISIJ, Tokyo, (2001).
- 2) Proc. WS on New Generation Steel (NG Steel '2001), Chinese Society for Metals, Beijing, (2001).
- 3) Proc. 4th WS on Development of High Performance Structural Steels for 21st Century (HIPERS-21), POSCO, Pohang, (2002).
- 4) Proc. 1st Int. Conf. on Advanced Structural Steels (ICASS 2002), National Institute for Materials Science, Tsukuba, (2002).
- 5) A. Azushima, K. Aoki, Y. Asada and Y. Kimura: *CAMP-ISIJ*, **13** (2000), 450.
- 6) T. Inoue, S. Torizuka and K. Nagai: *Mater. Sci. Technol.*, **17** (2001) Nov., 1329.
- 7) 古林英一: 再結晶と材料組織, 内田老鶴圃, 東京, (2000), 104.
- 8) K.-H. Kim and D.N. Lee: Symp. on Mathematical Modeling in Metal Processing and Manufacturing in COM2000, ed. by P. Martin, S. Macewen, Y. Verreman, W.J. Liu and J. Goldak, The Metallurgical Society, Ottawa, (2000), (CD-ROM).
- 9) T. Yoneme, K. Yoneda, T. Sakai and Y. Saito: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002),

- 372.
- 10) T.Inoue, S.Torizuka and K.Nagai: *Mater. Sci. Technol.*, **18** (2002), 1007.
  - 11) T. Inoue, S. Torizuka and K. Nagai: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 1046.
  - 12) H.Shiozaki, S.Shintani, M.Mikami and S.Koide: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **23** (1982), 1080.
  - 13) 板圧延, 日本塑性加工学会編, コロナ社, 東京, (1993), 262.
  - 14) R.Kurahashi, I.Chikushi, K.Morimoto and J.Yanagimoto: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 1157.
  - 15) T.Kawanami, H.Yamamoto, Y.Itazuri, S.Ohmori and M.Moriya: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **26** (1985), 730.
  - 16) K.Nishioka, Y.Mizutani, Y.Hori, A.Kojima and S.Ogawa: *Shinnitetsu Giho*, **365** (1997), 9.
  - 17) M.Eto, Y.Washikita, S.Kamata and R.Hamada: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 313.
  - 18) K.K.Um, H.T.Jeong, J.K.An, D.N.Lee, G.Kim and O.Kwon: *ISIJ Int.*, **40** (2000), 58.
  - 19) K.Morimoto: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **36** (1995), 1122.
  - 20) R.Hamada, S.Kamada, M.Eto, T.Kajihara, S.Hashimoto and Y.Matsuda: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **38** (1997), 571.
  - 21) S.Omori, H.Tsukamoto, H.Hino, K.Nakajima and K.Nakazawa: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **28** (1987), 1067.
  - 22) E.Miyoshi, T.Terasaki, M.Fukuda and T.Kaneko: *Tetsu-to-Hagané*, **60** (1974), 219.
  - 23) S.Matsuda, Y.Kawashita, S.Sekiguchi and M.Okamoto : *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 435.