

フェライト温度域にて熱間圧延した 極低炭素鋼の板厚方向の組織変化

松岡 才二*・森田 正彦*・古君 修*・小原 隆史*

Structural Variation along Thickness Direction
of Extra-low Carbon Sheet Steels Rolled in Ferrite Region

Saiji MATSUOKA, Masahiko MORITA, Osamu FURUKIMI and Takashi OBARA

Synopsis : The application of an EBSD technique in an SEM reveals a new approach to analyze a structural variation along the thickness direction of extra-low carbon sheet steels rolled in the ferrite region. The fine recrystallized grains in the sheet steel rolled without lubrication are observed near the surface due to a strong additional shear strain between a material and a roll, and those grains are considered to recrystallize dynamically by means of image-quality imaging with EBSD. The nonuniform recrystallization texture through the thickness are formed in the sheet steel rolled without lubrication by means of orientation imaging with EBSD, $\langle 110 \rangle // ND$ recrystallized grains being formed near surface, $\langle 111 \rangle // ND$ and $\langle 100 \rangle // ND$ recrystallized grains being formed at the mid plane. On the other hand, $\langle 110 \rangle // ND$ recrystallized grains are not formed preferentially near surface and $\langle 111 \rangle // ND$ and $\langle 100 \rangle // ND$ recrystallized grains are formed uniformly throughout the thickness in the sheet steel rolled with lubrication. The orientation imaging also reveals the tolerance of $\langle 110 \rangle // ND$ recrystallized grains around $\langle 110 \rangle // ND$ axis in the sheet steel rolled without lubrication, resulting in the $\langle 110 \rangle // ND$ grains with small tolerance being formed at the 1/10 plane from surface and the $\langle 110 \rangle // ND$ grains with larger tolerance being formed at the thickness location toward the surface and center from 1/10 plane. The image-quality imaging and orientation imaging allow a more visual and intuitive understanding of the nonuniformity of a microstructure and texture formation in the sheet steel rolled without lubrication than conventional method such as optical microscopy and X-ray diffraction measurements.

Key words : rolling ; low carbon steel ; recrystallization ; texture ; formability.

1. 緒言

薄鋼板の絞り性はその集合組織によって大きく影響を受けることが知られており、これまで再結晶集合組織の制御に関する多くの研究がなされてきた^{1,2)}。従来、再結晶集合組織の研究は主に冷間圧延から焼鈍工程におけるものであるが、最近、フェライト域で熱間圧延後再結晶焼鈍を施した時の集合組織の研究が行われている³⁻¹³⁾。フェライト域熱延に関する研究は、冷間圧延に比べて高温域での圧延であり、圧延と再結晶とがほぼ同時に進行するため、再結晶集合組織の研究分野において学術的に興味あるとともに、冷間圧延工程を省略して従来と同等の絞り性を有する高r値熱延鋼板製造の可能性を示すものであり¹⁴⁾、工業的にも重要である。

フェライト域熱延材の圧延および再結晶集合組織は、潤滑条件に強く依存する。圧延材とロールとの間の摩擦係数の高い無潤滑圧延時には、板厚表層部に $\langle 110 \rangle // ND$ を主方位とする集合組織が優先的に発達することが報告されてい

る^{3,8,11)}。一方、潤滑圧延を施すことにより、鋼板表層部の $\langle 110 \rangle // ND$ 方位の発達が抑制され、板厚方向に均一に $\langle 111 \rangle // ND$ 再結晶集合組織を発達させることができる^{3,8,11,15)}。また斎藤ら^{11-13,16,17)}は、フェライト系ステンレス鋼板および極低炭素鋼板のフェライト域熱延時の再結晶挙動を調べ、無潤滑圧延時には鋼板表層部に動的またはメタダイナミック再結晶により微細粒が生成することを報告している。

ところで、無潤滑圧延時に形成される $\langle 110 \rangle // ND$ 方位に関しては、板厚方向における強度分布を測定した結果が報告されているものの、板厚方向に対してどのような方位分散を有するのか、といった点は明らかではない。また斎藤らによる微細再結晶粒に関しては、それが動的またはメタダイナミック再結晶によるものであることが示されているものの、微細粒が板厚方向でいかなる転位密度(または下部組織)を有するのか、といった点に関しては必ずしも明らかではない。これらの点を明らかにすることは、 $\langle 110 \rangle // ND$ 再結晶集合組織形成機構および板厚方向の組織の不均一性

の要因の解明につながると考えられる。

ところで結晶方位の測定には、通常、X線回折法が用いられている。また、SACP(Selected Area Channeling Pattern)¹⁸⁾や走査電顕とKossel法とを組み合わせた装置も開発され^{19,20)}、結晶のマクロな集合組織のみならず、個々の結晶粒の方位解析が精度よく行われるようになった。最近、Electron Back Scattering Diffraction(以後EBSDと略す、またEBSPと呼ぶこともある)を利用した新しい自動結晶方位解析装置が開発された²¹⁾。これによれば、直径約0.2μmの微小な領域の結晶方位を精度よく、かつより短時間で解析できる。さらにEBSDパターンの鮮明度より、その結晶の転位密度を相対的に評価できる。

本報告では、EBSDを用いた新しい測定手法により、極低炭素鋼をフェライト域にて無潤滑熱間圧延を施した時に生成する再結晶粒の板厚方向の転位密度分布を調べるとともに、これを再結晶焼鈍した時に形成される<110>//ND方位の板厚方向の方位分散を明らかにすることにより、板厚方向の組織の不均一性の要因および<110>//ND方位の形成機構を解明した結果を示す。

2. 実験方法

2.1 供試材

実験に用いた材料は、極低炭素Nb添加鋼(板厚：3.2mm)および極低炭素Ti添加鋼(板厚：5.4mm)で、その化学成分をTable 1にそれぞれ示す。圧延温度を700°C、圧下率を50%または65%(1パス)、圧延速度を600m/min、圧延後の冷却条件を空冷と一定にし、圧延時の潤滑条件のみを変化させて熱間圧延を行った。潤滑条件は、無潤滑および鉱油による

Table 1. Chemical composition of sheet steels tested.(mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Al	N	
A	0.0034	0.02	0.15	0.013	0.006	0.040	0.0019	Nb 0.015
B	0.0020	0.01	0.07	0.013	0.008	0.069	0.0014	Ti 0.036

る油潤滑とした。なお、圧延時の摩擦係数を圧延荷重減少率より計算した²²⁾結果、無潤滑圧延および潤滑圧延時の摩擦係数はそれぞれ0.3および0.1であった。再結晶焼鈍はアルミナ流動層炉を使用し、約10°C/sの速度で850°Cに加熱し、さらに20s均熱した後空冷した。

2.2 組織観察および集合組織測定方法

フェライト域熱延材の変形様式に及ぼす潤滑の影響を明らかにするため、Fig. 1に示す形状の圧延試験材を作製し、圧延後の断面の湾曲状態を調べた。圧延材および焼鈍材の組織は、光学顕微鏡により板厚断面(TD面)で観察した。板厚方向の集合組織は、表面から中心に至る1/10板厚ごとに機械加工と化学研磨を施し、X線回折強度比にて測定した。X線回折強度比は、代表的な面方位である<111>//ND、<110>//ND、<100>//ND、<211>//NDについて求めた。

2.3 EBSD測定方法

EBSDの測定は、圧延板および焼鈍板の板厚断面(TD面)で行い、3μmピッチの間隔で測定した。結晶方位は、代表的な面方位である<111>//ND、<110>//ND、<100>//NDについて解析した。結晶方位はuvw//ND軸に対し、許容角度(Tolerance)以内のものをその方位として同定した。

3. 実験結果

3.1 従来法による組織観察および集合組織測定

フェライト域熱延材の変形様式に及ぼす潤滑の影響をFig. 1に示す。無潤滑圧延材(摩擦係数：約0.3)では、圧延後の断面は大きく湾曲しており、ロールと圧延材との間の摩擦に起因する付加的せん断力が働いている。一方、潤滑圧延材(摩擦係数：約0.1)では、圧延後の断面の湾曲状態は小さく、付加的せん断力がほとんど生じていない。

フェライト域熱延板および焼鈍板の組織に及ぼす潤滑の影響をFig. 2に示す。無潤滑圧延材には、圧延後の表層部に微細再結晶粒が観察され、その領域は表層より約200~250μmの位置まで及んでいる。焼鈍後には中心部に比べ、最表層

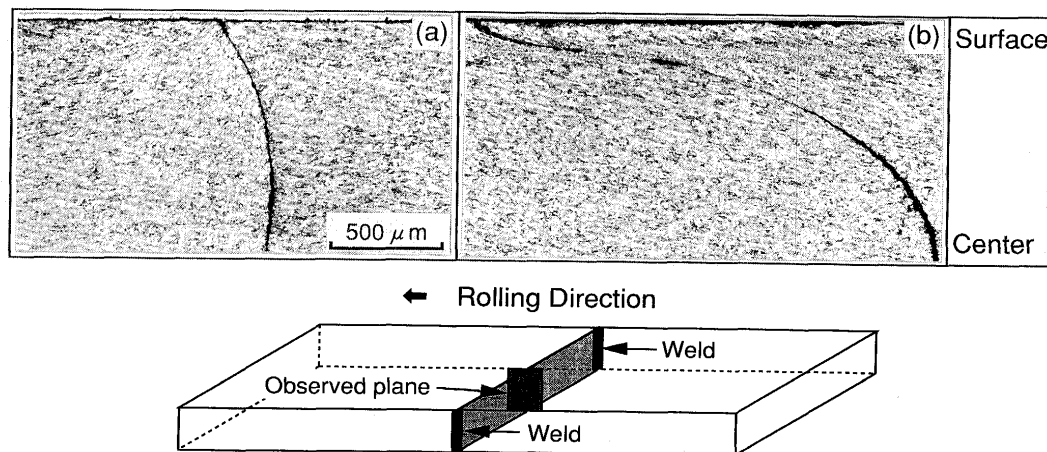


Fig. 1. Optical micrographs showing the effect of lubrication on the flecion of the sheet steel A rolled at 700°C with a reduction of 50%. (a) rolled with lubrication, (b)rolled without lubrication.

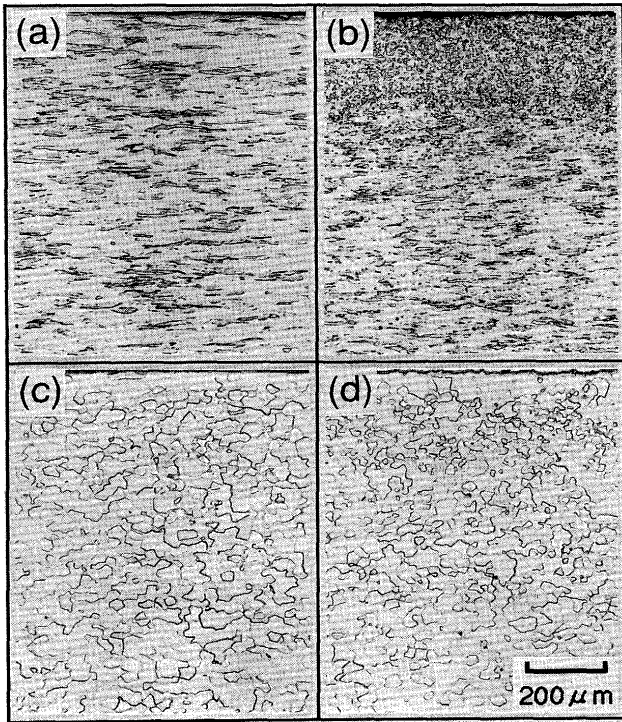


Fig. 2. Optical micrographs showing the effect of lubrication on the microstructure of the sheet steel B rolled at 700°C with a reduction of 65% and annealed at 850°C for 20s. (a)as-rolled with lubrication, (b)as-rolled without lubrication, (c)as-annealed after rolling with lubrication, (d)as-annealed after rolling without lubrication.

部では粗大な組織, 板厚 1/10位置 (表層より約190μm)では微細な組織をそれぞれ示し, 板厚方向に不均一な組織となっている。一方, 潤滑圧延材は, 圧延板および焼鈍板ともに板厚方向に組織が均一である。

フェライト域熱延後再結晶焼鈍を施した試料の, 板厚方向の集合組織に及ぼす潤滑の影響を調べた結果をFig. 3に示す。無潤滑圧延材では, 表層部に<110>//ND方位が優先的に形成され, その強度比は板厚1/10位置で最大となり, 板厚2/10位置より中心部に近づくにつれ急激に減少する。<111>//NDおよび<100>//ND方位は, 表層部近傍ではほとんど形成されず, <111>//ND方位は板厚3/10面より中心部に, また<100>//ND方位は板厚2/10位置より中心部に近づくに従いそれぞれ増加する。一方, 潤滑圧延材では, 板厚方向に均一に<111>//NDおよび<100>//ND方位が形成され, 無潤滑圧延材で確認された板厚方向での集合組織の不均一性は認められない。

以上述べたフェライト域熱延材の板厚方向のミクロ組織および集合組織の均一性に及ぼす潤滑の影響は, 著者らの報告結果³⁾およびこれまで報告されている実験結果^{7,11-13)}と一致する。

3・2 EBSDによる組織観察

3・2・1 無潤滑圧延材のミクロ組織と集合組織

Fig. 2に示した鋼板表層に微細再結晶粒が観察された無潤

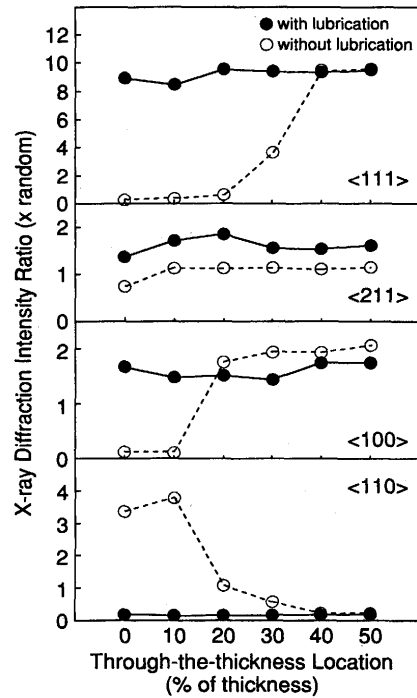


Fig. 3. Effect of lubrication on the variation of X-ray diffraction intensity ratio through the thickness of the sheet steel B annealed at 850°C for 20s after rolling at 700°C with a reduction of 65%.

滑圧延材をEBSD解析した結果をFig. 4に示す。Fig. 4 (a)は, EBSDパターンの鮮明度を濃淡で表わした図 (Image-Quality Imaging)である。白い領域ほどEBSDパターンが鮮明であることを示し, 白い部分が転位密度が低く, 色が黒くなるとともに転位密度が増加していることを表わす。結晶粒界は, 隣接する結晶粒の方位差が15度以上の時に黒線で表わした。鋼板表層には, 粒径が3~10μmの微細等軸粒が観察される。この等軸粒は白い領域として観察されることから, 再結晶は完了していると言える。しかし, 中心部に近づくにつれ等軸粒が黒くなり, 粒内の転位密度が増加していることが分かる。板厚1/8位置 (表層より約240μm)より中心部では, 圧延方向に延びた加工組織が観察され, Fig. 2に示した光学顕微鏡組織とよく対応している。

Fig. 4 (b)は, 結晶方位をカラー表示した図 (Orientation Imaging)であり, <110>//ND, <111>//NDおよび<100>//ND方位をそれぞれ赤, 青および緑で表わした。なお, それぞれの方位粒は<uvw>//ND軸に関して15度以内のものを同一方位粒として色付けしている。表面から約200μm位置の再結晶粒は, その大部分が<111>//NDおよび<110>//ND方位であり, <100>//ND方位もわずかに存在する。一方, 加工組織が存在する板厚1/8位置 (表層より約240μm)より中心に近い領域では, <110>//ND, <111>//NDおよび<100>//ND方位粒が圧延方向に連続して観察され, 圧延方向に延ばされた加工組織を表わしている。

3・2・2 焼鈍材の集合組織に及ぼす潤滑の影響

Fig. 5は焼鈍板の断面をEBSD解析した結果である。結晶

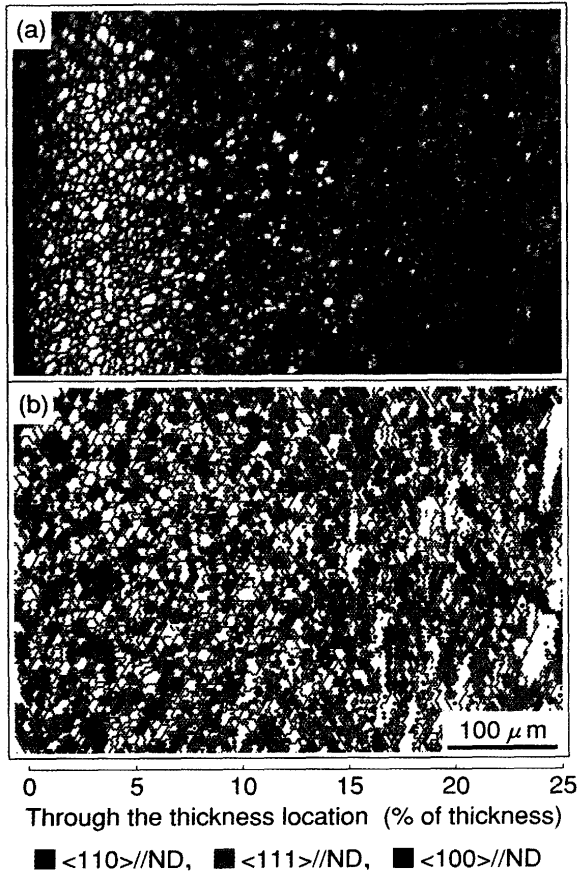


Fig. 4. EBSD analysis of (a) image-quality imaging and (b) orientation imaging of the sheet steel B rolled at 700°C with a reduction of 65% without lubrication.

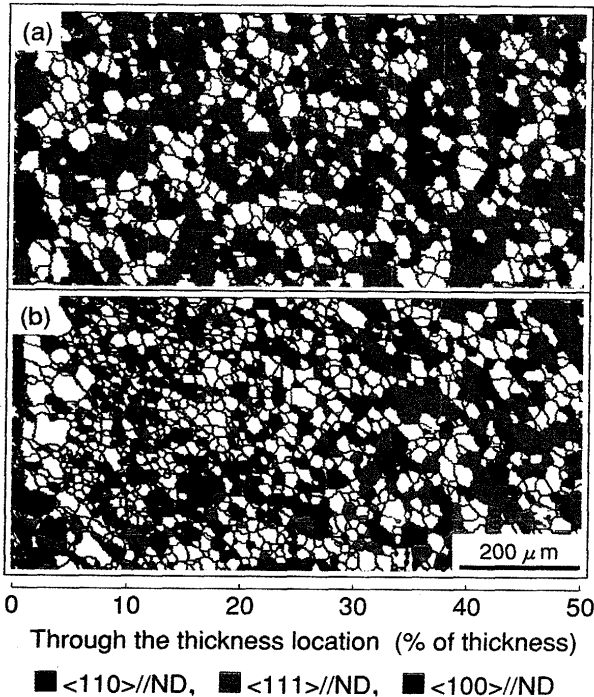


Fig. 5. EBSD analysis of orientation imaging showing the effect of lubrication on the recrystallization texture through the thickness of the sheet steel B annealed at 850°C for 20s after rolling at 700°C with a reduction of 65%. (a) rolled with lubrication, (b) rolled without lubrication.

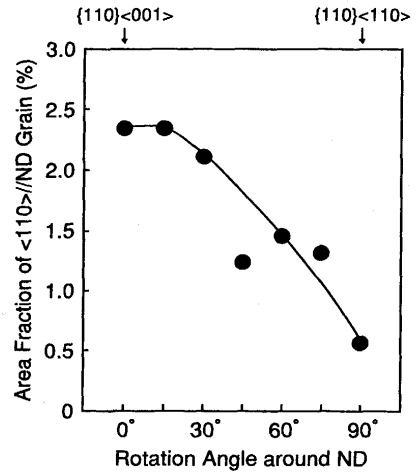


Fig. 6. Distribution of area fraction of <110>//ND grains around ND axis of the sheet steel B annealed at 850°C for 20s after rolling at 700°C with a reduction of 65% without lubrication.

方位のカラー表示はFig. 4 (b)と同様に行った。無潤滑圧延材の集合組織は板厚方向に不均一であり、表層から板厚 2/10 面には<110>//ND方位が優先的に発達し、板厚 2/10面より中心部には<100>//ND方位、板厚 3/10面より中心部には<111>//ND方位がそれぞれ発達している。一方、潤滑圧延材には、強い<111>//ND方位と弱い<100>//ND方位が表面から中心部にほぼ均一に発達し、無潤滑圧延材の表層部に強く発達した<110>//ND方位はわずかししか観察されない。

3・2・3 無潤滑圧延材の<110>//ND再結晶集合組織

無潤滑圧延材を焼鈍した時に形成される<110>//ND再結晶粒が、ND軸回りのどの方位に集積しているかを調べた結果をFig. 6に示す。なお、{110}<001>方位から{110}<110>方位までをND軸回りに15度おきに等分し、それぞれの位置を中心に15度以内の方位粒の面積率を求め、その方位の集積度とした。無潤滑圧延時に形成される<110>//ND方位は、その約60%が{110}<001>よりND軸回りに37.5度以内の方位である。

無潤滑圧延材に形成される<110>//ND方位の板厚方向の集積位置および<110>//ND軸からの方位分散をEBSD解析にて調べた結果をFig. 7に示す。<110>//ND軸からの許容角度(Tolerance)を5度から20度増加させるに従い、<110>//ND方位粒の面積は増加する。ここで特徴的なことは、Toleranceが小さい時には、板厚 1/10位置に<110>//ND方位粒が観察され、Toleranceの増加とともに板厚 1/10位置を中心として表層および中心部に<110>//ND方位粒の占める領域が広がっていくことである。この現象を定量的に評価するため、EBSD測定領域を板厚方向に10等分し、Toleranceを変化させた時の、それぞれの領域における<110>//ND方位粒の面積率を求めた。その結果をFig. 8に示す。Toleranceが小さいほど板厚 1/10位置における<110>//ND方位粒の集積度が鋭く、Toleranceの増加とともに<110>//ND方位粒の面積率

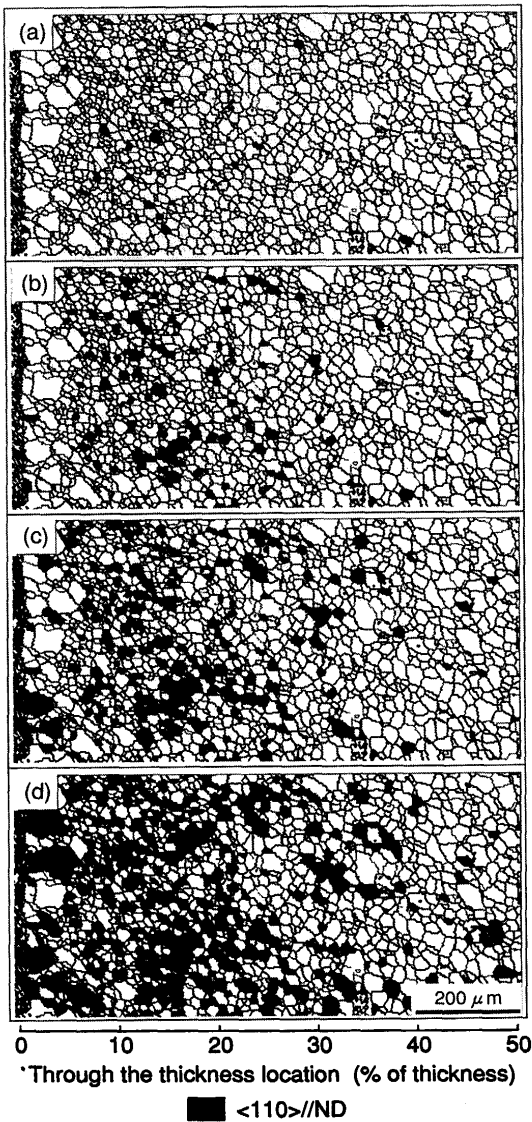


Fig. 7. EBSD analysis of orientation imaging showing the change in $\langle 110 \rangle // ND$ grains with tolerance of (a) 5° , (b) 10° , (c) 15° and (d) 20° from $\langle 110 \rangle // ND$ axis for the sheet steel B annealed at $850^\circ C$ for 20s after rolling at $700^\circ C$ with a reduction of 65% without lubrication.

が増加し、かつ板厚 1/10位置を中心に表層および中心に $\langle 110 \rangle // ND$ 方位粒の占める領域が広がっている。

一方、潤滑圧延材の再結晶集合組織は、板厚方向に均一であり、かつ無潤滑圧延材で観察された $\langle 110 \rangle // ND$ 方位の板厚方向での方位分散は認められなかった。

4. 考察

4・1 $\langle 110 \rangle // ND$ 再結晶集合組織形成機構

Fig. 3 および Fig. 8 に示したように、無潤滑圧延材においては、 $\langle 110 \rangle // ND$ 方位は板厚方向でその強度が異なるだけでなく、 $\langle 110 \rangle // ND$ 軸からの方位分散も板厚位置により異なる。これら板厚位置による $\langle 110 \rangle // ND$ 方位粒の変化は、無潤滑圧延時に加わる付加的せん断ひずみが板厚方向にお

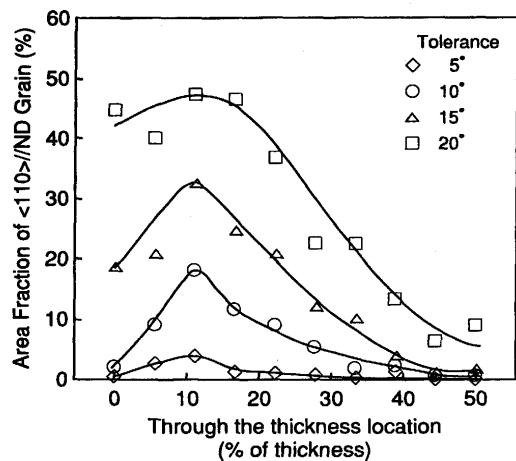


Fig. 8. Effect of tolerance from $\langle 110 \rangle // ND$ axis on the distribution of area fraction of $\langle 110 \rangle // ND$ grains through the thickness of the sheet steel B annealed at $850^\circ C$ for 20s after rolling at $700^\circ C$ with a reduction of 65% without lubrication.

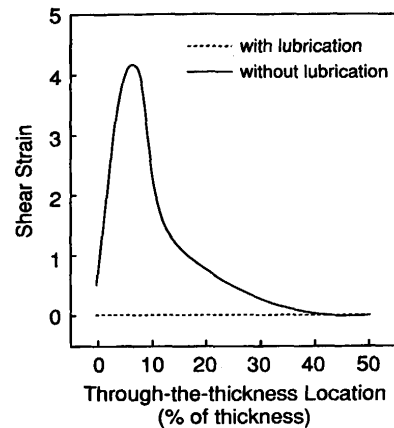


Fig. 9. Effect of lubrication on the distribution of shear strain of the sheet steel A rolled at $700^\circ C$ with a reduction of 50%.

いて不均一であることに起因すると考えられる。

斎藤らの手法¹⁷⁾を用いて、Fig. 1 に示した圧延材の断面の湾曲状態より、付加的せん断ひずみ量の板厚方向分布を求めた。Fig. 9 より、板厚 1/10位置に最も大きな付加的せん断ひずみが働き、表層および板厚中心部に近づくとともに付加的せん断ひずみ量が急激に減少することが分かる。

Fig. 3 に示した $\langle 110 \rangle // ND$ 方位の板厚方向の強度変化は、従来の研究結果と一致し、せん断ひずみ量の増加とともに $\langle 110 \rangle // ND$ 方位が増加する。一方、Fig. 8 に示した $\langle 110 \rangle // ND$ 方位の $\langle 110 \rangle // ND$ 軸からの方位分散もせん断ひずみ分布とよく対応し、せん断ひずみが最も強く働く板厚 1/10面でも $\langle 110 \rangle // ND$ 方位からのずれの少ない再結晶粒が生成する。本研究結果は、 $\langle 110 \rangle // ND$ 方位は、その強度のみならず、 $\langle 110 \rangle // ND$ 軸周りの方位分散もせん断ひずみ量に依存し、せん断ひずみ量の増加とともに $\langle 110 \rangle // ND$ 軸からの方位分散の小さい再結晶粒が形成することを示す。その結果、無

潤滑圧延材には、せん断ひずみが最も強く作用する板厚 1/10 面にて $\langle 110 \rangle // ND$ 軸からの方位分散の小さい $\langle 110 \rangle // ND$ 再結晶粒が多数形成され、せん断ひずみが減少するに従い、 $\langle 110 \rangle // ND$ 軸からの方位分散の大きい再結晶粒が形成したと言える。

4・2 無潤滑圧延材の表層組織変化

フェライト域にて無潤滑圧延を施すと、鋼板表層部に強い付加的せん断ひずみが生じ、これを利用することにより、フェライト域においても動的あるいはメタダイナミック再結晶が起こる可能性が、斎藤らによって報告されている^{11-13,16,17}。本研究では、EBSDを用いた新しい解析手法により、無潤滑圧延時に形成される微細再結晶粒および加工組織が観察され、光学顕微鏡および電子顕微鏡を用いた従来手法よりも板厚方向の組織の不均一性がより詳細に評価できた。とくにFig. 4 (a)に示した無潤滑圧延材のImage-Quality Imagingには、板厚表層より200~250 μm の位置まで等軸粒が観察されるものの、白い領域として観察される再結晶が完了した部分は、表層から100 μm の位置までであり、それより中心部では灰色の等軸粒が観察される。すなわち光学顕微鏡にて観察された再結晶粒も、板厚位置により粒内の転位密度が異なることがEBSD解析結果より明らかになった。

斎藤らによれば^{12,13}、フェライト域熱延後の保持時間とともに、微細再結晶粒内の転位密度が減少することが報告されている。本研究では、圧延材の冷却条件は空冷であるため、圧延後の空冷中に表層部の加工組織が静的に再結晶した可能性がある。しかしながら、Fig. 4 (a)に示した灰色の等軸粒の存在は、下部組織を有する結晶粒の存在を示すものであり、かつそれらが隣接粒に対して15度以上の方位差を有することから、灰色の等軸粒はサブグレインではなく、下部組織を有する再結晶粒であると言える。すなわち、フェライト域において無潤滑圧延を行った試料の表層部に観察される微細再結晶粒は、静的なものではなく動的あるいはメタダイナミック再結晶により生成したと推定できる。

5. 結言

極低炭素鋼を用い、圧延温度を700 $^{\circ}\text{C}$ 、圧下率を50%または65%(1パス)、圧延後の冷却を空冷と一定にし、圧延時の潤滑条件のみを変化させた時の、フェライト域熱延材の圧延板および焼鈍板の板厚方向のマイクロ組織と集合組織変化を調べた結果、以下のことが明らかになった。

(1)フェライト域熱延材の再結晶集合組織は潤滑条件の影響を強く受け、無潤滑圧延材には鋼板表層に $\langle 110 \rangle // ND$ 方位が発達し、中心部で $\langle 111 \rangle // ND$ および $\langle 100 \rangle // ND$ 方位が発達する。一方、潤滑圧延材には、板厚方向に均一に

$\langle 111 \rangle // ND$ および $\langle 100 \rangle // ND$ 方位が発達する。これら板厚断面の結晶方位をEBSDを用いてカラー表示することにより、板厚方向の集合組織の不均一性が従来手法に比べ視覚的・直感的に理解できる。

(2)無潤滑圧延時に形成される $\langle 110 \rangle // ND$ 再結晶粒は、その約60%が $\{110\}\langle 001 \rangle$ よりND軸回りに37.5度以内の方位である。

(3)無潤滑圧延材に発達する $\langle 110 \rangle // ND$ 再結晶粒は、板厚位置によりその強度および $\langle 110 \rangle // ND$ 軸からの方位分散度が異なり、板厚 1/10位置において $\langle 110 \rangle // ND$ 強度が最大となり、かつ $\langle 110 \rangle // ND$ 軸からの方位分散の小さい方位粒が集積する。そして板厚 1/10位置を中心に表層および中心部へと $\langle 110 \rangle // ND$ 軸からの方位分散度が大きい再結晶粒が発達する。

(4)無潤滑圧延材に発達する $\langle 110 \rangle // ND$ 再結晶粒の板厚位置による方位変化は、付加的せん断ひずみ量が板厚位置により異なるためであり、せん断ひずみ量の増加とともに $\langle 110 \rangle // ND$ 方位に近い再結晶粒が多数形成される。

(5)無潤滑圧延材の鋼板表層部に形成される微細再結晶粒は、動的あるいはメタダイナミック再結晶により生成したと推定できる。

文 献

- 1) 鉄鋼薄板の再結晶及び集合組織, 鉄鋼基礎共同研究会再結晶部会, 日本鉄鋼協会, (1974).
- 2) IF鋼の金属学, 日本鉄鋼協会, (1994).
- 3) 松岡才二, 小原隆史, 角山浩三, 左海哲夫, 斎藤好弘, 加藤健三: 日本金属学会秋季講演大会概要, (1986), 136.
- 4) 松岡才二, 佐藤 進, 小原隆史, 角山浩三: 鉄と鋼, 74 (1988), 2330.
- 5) S.Matsuoka, K.Sakata, S.Satoh and T.Katoh: Texture and Microstructures, 22 (1993), 113.
- 6) S.Matsuoka, K.Sakata, S.Satoh and T.Katoh: ISIJ Int., 34 (1994), 77.
- 7) 瀬沼武秀, 矢田 浩, 松村義一, 山田健二: 鉄と鋼, 73 (1987), 1598.
- 8) 瀬沼武秀, 矢田 浩, 清水 亮: 鉄と鋼, 75 (1989), 782.
- 9) 橋本俊一, 葉師寺輝敏: 鉄と鋼, 74 (1988), 1617.
- 10) 橋本俊一, 鹿島高弘, 趙景 暉: 鉄と鋼, 75 (1989), 2194.
- 11) 斎藤好弘, 左海哲夫, 平野健治, 加藤健三: 日本金属学会秋季講演大会概要, (1986), 134.
- 12) T.Sakai, Y.Saito, K.Hirano and K.Kato: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 28 (1988), 1028.
- 13) T.Sakai, Y.Saito and K.Kato: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 28 (1988), 1036.
- 14) 松岡才二, 古君 修, 小原隆史: 熱処理, 36 (1996), 299.
- 15) 橋本 修: 鉄と鋼, 74 (1988), 1633.
- 16) 加藤健三: 日本金属学会会報, 23 (1984), 996.
- 17) 斎藤好弘, 左海哲夫, 前田 太, 加藤健三: 鉄と鋼, 72 (1986), 799.
- 18) 例えば, 原勢二郎, 清水 亮: 日本金属学会会報, 25 (1986), 1009.
- 19) 井口征夫, 清水 洋, 嶋中 浩: 川鉄技報, 12 (1980), 89.
- 20) 井口征夫, 前田千寿子, 伊藤 庸: 日本金属学会誌, 50 (1986), 874.
- 21) B.L.Adams, S.I.Wright and K.Kunze: Metall. Trans. A, 24A (1993), 819.
- 22) 玉野敏隆, 柳本左門: 日本機械学会論文集, 43 (1977), 2885.