



調質圧延時の板表面創成メカニズム

阿高 松男*・上野 泰司*・綿貫 孝介*・飯野 嘉則*

Mechanism of Surface Transcription in Temper Rolling of Strips

Matsuo ATAKA, Yasushi UENO, Kosuke WATANUKI and Yoshinori IINO

Synopsis : Most of steel products are manufactured through rolling process. Therefore, rolling process is very important for the qualities of rolled products. In the process of rolling, the temper rolling is assumed to be very important process that gives influence on the qualities of products such as the shape and roughness. However, as there is not any reasonable theory to control the surface roughness of steel strips, it is said that actual operations depend on experience and intuition. The surface transcription in temper rolling is an important process to decide the roughness of strips surface as the industrial product. But, the influence of lubricants on the surface of rolled strips and the mechanism of surface transcription have not been understood yet. In this paper, the influence of rolling conditions, such as roll diameters, roll surface processing, lubricants and rolled materials, upon the surface transcription is investigated. As a result, it is found that such rolling conditions have important effects upon the surface transcription.

Key words: temper rolling; steel strips; lubrication; roughness; surface transcription.

1. 緒言

世界の鉄鋼材料の総生産量は、2005年11.3億トンとなり1973年のオイルショック以来7億トンで推移していた生産量が2000年からの5年間で急速に増大している。最大の生産量は中国であり3.5億トンである。生産量は、続いて日本、米国と続くが1億トン程度生産量である。諸外国に対抗する為に、日本の鉄鋼業界は高付加価値の鋼材、汎用材料の高精度、安定加工が求められている。新たに生産される鉄鋼の9割は圧延加工を経て工業製品になり、平均で20回以上圧延を繰り返すため、圧延技術の役割は大きい。圧延工程でも最終圧延工程の調質圧延は、形状矯正、粗度調整など直接製品に影響を与える非常に重要な工程を担っている。しかし、調質圧延は形状矯正や表面粗度転写に関する明確な理論がなく、経験や勘に頼っているのが現状である。調質圧延での表面転写は製品として最終表面性状を決める重要な工程であるが、潤滑方式の違いによる特質や粗度転写そのもののメカニズムの解明はまだ十分といえない状況である¹⁻³⁾。

今回はロール径の異なる2種類のロール($\phi 70$, 20)が板材表面に与える影響、ロール表面加工法(放電ダルロール、ショットダルロール)による影響についても調査したのでその結果について報告する。

2. 実験装置・実験方法

2.1 実験条件

今回使用した2段・4段ロール圧延機的主要仕様をTable 1に示し、ワークロールの実験条件をTable 2に示した。ワークロール表面は放電ダル加工及びショットブラストダル加工を施した。放電ダル加工については小径ロールも実験を行っている。

ロール中央部の円周方向の4点(0° , 90° , 180° , 270°)の箇所からレプリカを採取し、そのレプリカの表面粗さを蝕針式粗さ測定器で測定し、その平均値を求めた。その平均値に近い部分を代表して、レーザ顕微鏡(倍率400倍)により、撮った放電ダル加工、ショットダル加工の表面をFig. 1, Fig. 2に示した。表面粗さは共にRaが $2.0 \mu\text{m}$ である。

Table 1. Rolling mill specifications.

Roll Velocity [m/min]	8.6
Roll Size [mm]	$\phi 70 \times 100$ $\phi 20 \times 140$
Roll Roughness [μm]	Ra:2.0

Table 2. Roll condition.

Rolling mill	Work Roll	Roughness [μm]
2-high	Shot Dull Roll	Ra: 2.0
	Electric-discharged Roll	
4-high	Electric-discharged Roll	

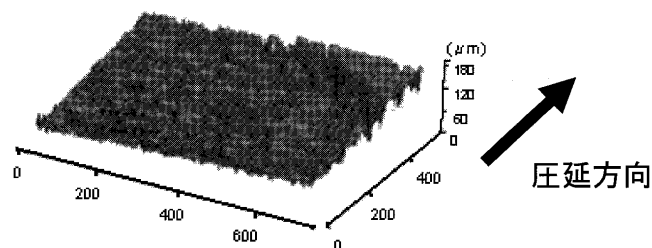


Fig. 1. Electric discharged dull roll surface.

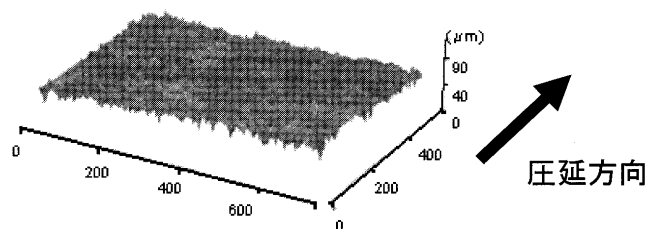


Fig. 2. Shot dull roll surface.

Table 3. Viscosity of lubricants.

	Viscosity [mm ² /sec]
Mineral oil	90.51
Skin pass oil	0.69

Table 4. Measurements and Roughness of specimen.

Steel Sheet	Measurements [mm]	Roughness (Ra) [μ m]
SPCC-AB	0.6 ^t × 40 ^w × 150 ^l	0.31
S65C		0.31

Table 5. Mechanical properties of specimen.

Steel Sheet	Hardness [HV]	Tensile Strength [MPa]
SPCC-AB	95.4	314
S65C	153.2	504

今後、放電ダルロールはEDロール、ショットダルロールはSDロールと表記することにする。Fig. 1, Fig. 2より、同じ粗度(Ra)でもEDロールのほうが凹凸が大きいのが分かる。

2・2 実験材料および潤滑剤

今回使用した潤滑剤の粘度を Table 3 に示した。潤滑剤は粘度の高いものを1種類、低粘度の調質圧延液を1種類用意して実験を行った。今回、無潤滑条件でも実験を行っているので無潤滑時の表記を DRY とする。

今回の実験において使用した圧延材料は炭素含有量が約0.08%の低炭素鋼板と炭素含有量が約0.65%の高炭素鋼板である。各圧延材料の寸法及び表面粗さを Table 4 に示し、使用した材料の機械的特性を Table 5 に示した。

本研究で使用したロールは大径ロール($\phi 70 \times 100$), 小径ロール($\phi 20 \times 120$)で大径ロールは2段、小径ロールでは4段ロール圧延機で実験を行っている。小径ロールでは圧延

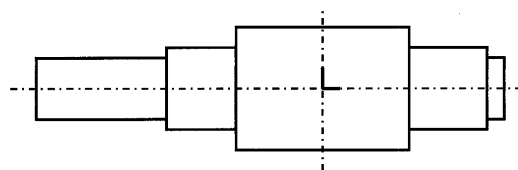


Fig. 3. Location of "L" mark curved on the surface of roll.

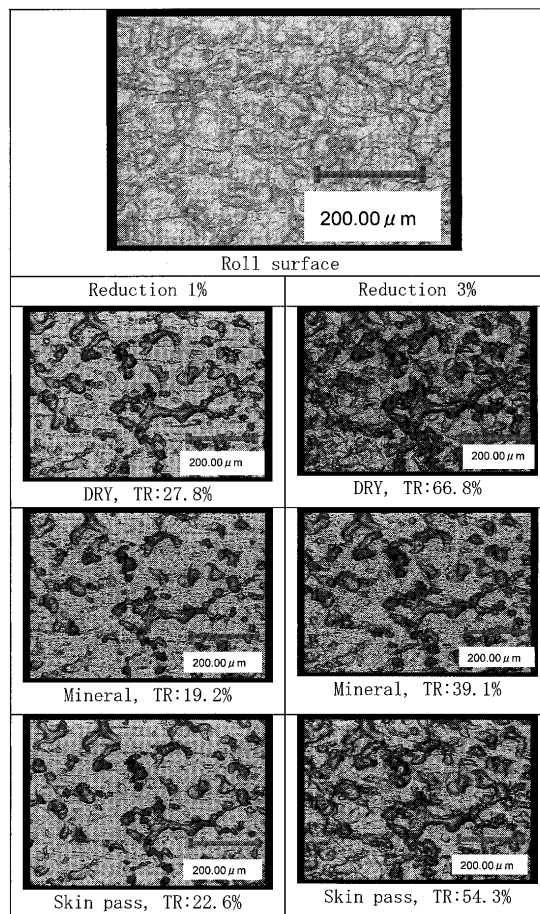


Fig. 4. Influence of lubrication on transcription.

荷重を測定するロードセルが構造上設置することが出来なかったため、小径ロールを使用した圧延結果ではロール粗度の転写性および転写率の結果のみで評価を行っている。ロール表面と圧延された板の観察面との対応をとるために、1本のロール中央部に Fig. 3 に示したように『L』字のマークを付けた。『L』字は太さ0.5 mm、各一辺の長さ5 mm、深さ0.5 mmとなっている。

2・3 粗度転写

圧延材料表面のレーザ顕微鏡で撮った写真を Fig. 4, Fig. 5 に示した。Fig. 4 は潤滑剤の影響を示し、Fig. 5 は材料の材質の影響を示した。図中の TR は転写率を示す。板の塑性変形が進むにつれて、板とロールの界面の隙間は急速に埋め立てられていき、最終的にロールの表面の凹凸模様が出来上がる。それはロール接触弧内において圧下が増すにつれてロール表面粗さの凸部が板材表面に食い込み、板材はロール表面粗さの溝に入り込んでいくことによって、板

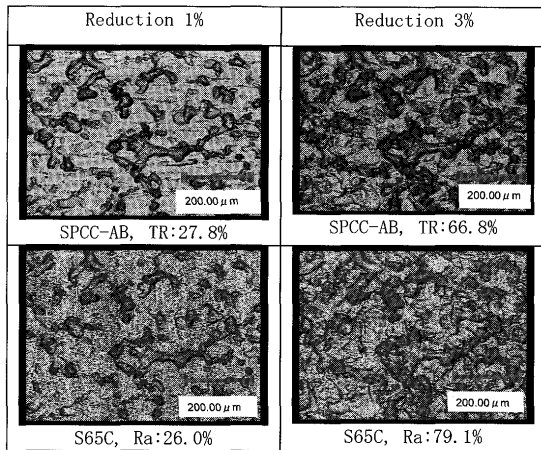


Fig. 5. Influence of materials on transcription.

材表面を形成していくためである。圧下率が増すと圧延荷重が増えるため、1%と3%とではFig. 4のレーザ顕微鏡写真からも分かる通り、明らかに3%の方が転写されロールの表面に近づくことが分かる。Fig. 4において、各潤滑剤での影響を比較したところ、圧下率1%ではレーザ顕微鏡写真ではあまり差は見られないが、転写率で比較すると、多少の差があることが分かる。圧下率が上がると転写はレーザ顕微鏡写真からも顕著に見られ、DRY、調質圧延液、高粘度油の順で転写率が良くなっていることが分かる。次に各材料による比較において圧下率1%ではレーザ顕微鏡写真を見る限り、転写はあまり変わらず、圧下率3%では若干ではあるがS65Cのほうが転写性が良いことが分かる。これは同じ圧下率ではS65Cのほうが表面硬度が高いため、圧延荷重がS65Cでは高くなり、接触弧長が大きくなり、大径ロールでの圧延と同じ効果で、その分、転写され易くなったものと考えられる。

3. 実験結果

本実験では圧延された後の板材の表面粗さについて、考察しており、その評価方法として、表面粗さ、転写率、圧延荷重を使用している。転写率は以下の式で求めた。転写率の表面粗さについては算術平均粗さであるRa[μm]を使用している^{4,5)}。

$$\text{転写率}[\%] = \frac{\left(\begin{array}{l} \text{圧延後の板材表面粗さ} \\ - \text{圧延前の板材表面粗さ} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{l} \text{ロール表面粗さ} \\ - \text{圧延前の板材表面粗さ} \end{array} \right)} \times 100$$

3・1 材料の違いによる圧延荷重、転写率への影響

大径ロール、小径ロールともに、低炭素鋼材のSPCC-ABと高炭素鋼材のS65C材を使用し、材料が圧延荷重、転写率に及ぼす影響について比較した。小径ロールに関しては転写率のみの評価である。比較は主に放電ダル加工の

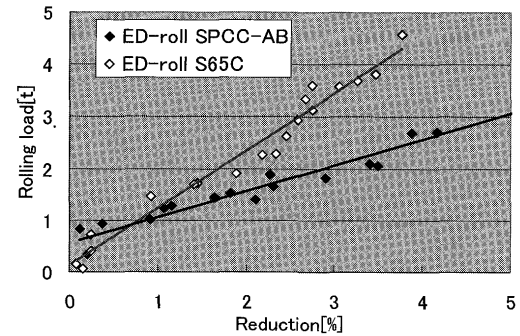


Fig. 6. Influence of specimens on rolling load (φ70-roll, DRY).

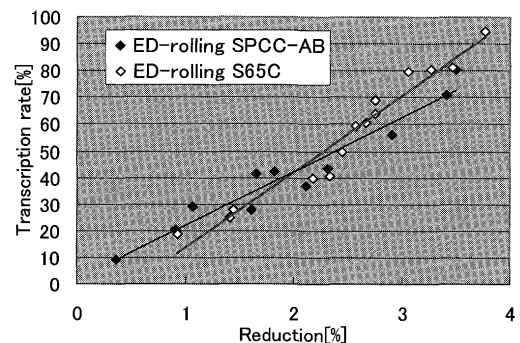


Fig. 7. Influence of specimens on transcription rate (φ70-roll, DRY).

DRY圧延で比較する。

3・1・1 材料の違いによる圧延荷重比較

まず、はじめに大径ロールで圧延した際、低炭素鋼材SPCC-ABと高炭素鋼材S65Cの圧延荷重を比較した結果をFig. 6に示した。

材料による影響については、高炭素鋼材であるS65Cの圧延荷重が低炭素鋼材のSPCC-ABの圧延荷重に比べて大きい結果を示した。材料の機械的性質を示したTable 5より、表面硬度、引張強さともにS65Cの方が大きいため圧延荷重に差が見られた。また、圧下率の小さいところでは軟らかいSPCC-ABの方がロールとの接触面積が大きくなるので荷重が高くなっていると思われる。

3・1・2 材料の違いによる転写率比較

放電ダル加工での大径ロールで転写率の比較をSPCC-ABとS65Cで比較した結果をFig. 7に示した。

転写率での比較では、圧延荷重比較ほど顕著には現れていないが、圧下率0~2%ではS65C材の方がわずかながら転写率が低くなっていることがわかる。圧下率の小さいところでは材料の凸部のみが部分的に圧延されるので、軟らかいSPCC-ABの方が早くロールに馴染んでいくので、圧延荷重、転写率が多少大きくなる。しかし、圧下率が大きくなるとロールの谷部に馴染んで出来た材料の凸部が削ぎ落とされるので、材料の軟らかいSPCC-ABでは転写率が小さくなっていると考えられる。

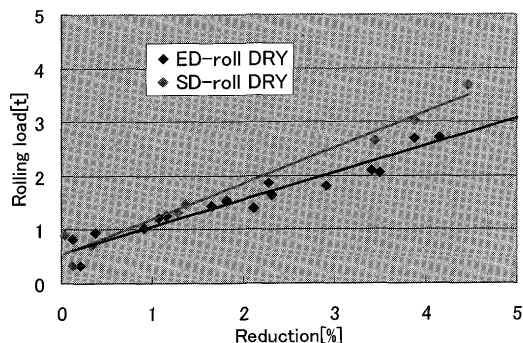


Fig. 8. Influence of surface processing on rolling load (φ70-roll, DRY, SPCC-AB).

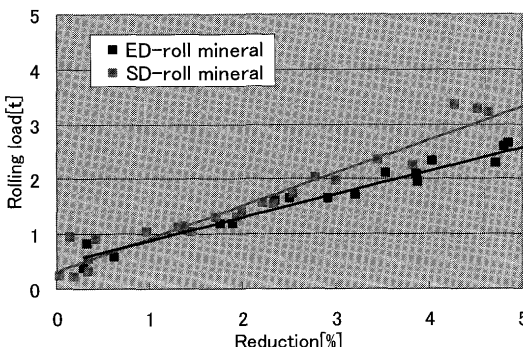


Fig. 9. Influence of surface processing on rolling load (φ70-roll, mineral, SPCC-AB).

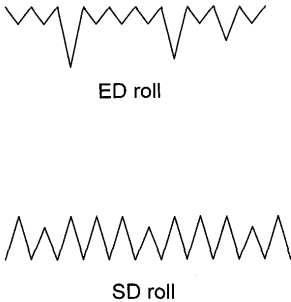


Fig. 10. Schematic diagram of roll surface.

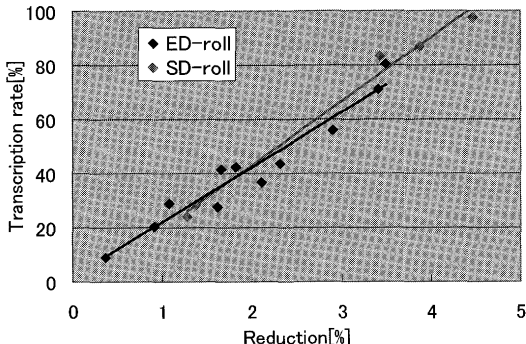


Fig. 11. Influence of roll surface processing on transcription rate (φ70-roll, DRY, SPCC-AB).

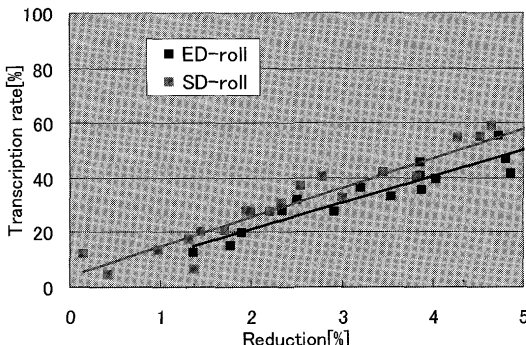


Fig. 12. Influence of roll surface processing on transcription rate (φ70-roll, mineral, SPCC-AB).

3・2 表面加工の違いによる圧延荷重・転写率への影響

各表面加工を行ったロールの粗度：Ra（算術平均粗さ）は同じ値2.0μmに加工した。放電ダルロールとショットダルロールを使用して、ロール表面加工方法の影響について圧延荷重と転写率について比較を行った。

3・2・1 表面加工方法の違いによる圧延荷重への影響

EDロールとSDロールのロール表面加工方法の違いによる圧延荷重比較をFig. 8, Fig. 9に示した。

DRY圧延では圧延荷重はSDロールの方が若干、高く見られた。高粘度油でもDRYと同様にSDロールの圧延荷重が大きい結果を示した。各表面加工のレーザ顕微鏡写真であるFig. 1とFig. 2をみると放電ダル加工とショットダル加工で施された表面では違いが見られる。EDロールとSDロールのRa（算術平均粗さ）の値はTable 2の通り、Ra=2.0μmで合わせてある。しかし、EDロールのRz（最大高さ）が大きい。Fig. 1, Fig. 2および、Rzの測定値より、Raの値が同じでも、Rzの値が異なる状況を説明し易いようにモデル化したものが、Fig.10である。Fig.10のような部分的に凹凸の大きいところがあるので、その他の部分の凹凸はSDロールより小さいと考えられる。SDロールの凹凸の方が全体的に大きく、摩擦係数が大きいと考えられる。そのため、DRY圧延した際に見かけ粗度が大きいSDロールの方が圧延荷重が高くなったと考えられる。放電ダル加工の方は見かけ粗度が低いことから、高粘度油を使用した

際、潤滑剤の影響が現れやすくなったため、圧延荷重に差が若干出たものと考えられる。

3・2・2 表面加工方法の違いによる転写率への影響

DRY圧延でのロール表面加工方法の違いによる転写率比較をした実験結果をFig.11に示し、高粘度油を使用し比較した実験結果をFig.12に示した。

DRY圧延での比較では、圧延荷重と同様に転写率の差はほとんど見られなかったが、高粘度油ではSDロールの転写率が若干であるが良くロール表面加工方法によって転写率に差が見られた。EDロール、SDロール共にRaは同じであるが、Rzを比較するとEDロールの方が大きい測定結果を得ている。高粘度油での場合は、表面加工された表面の凹凸の大きいEDロールの方がロールによる潤滑剤の機械的捕捉量が大きくなるために、圧延荷重、転写率に差が見られたと考えられる。DRY圧延では潤滑剤を使用し

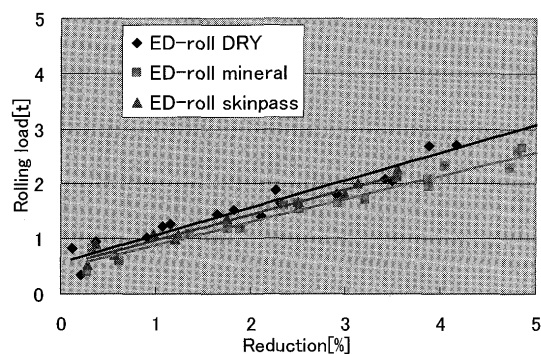


Fig. 13. Influence of lubrication on rolling load ($\phi 70$ -roll, SPCC-AB).

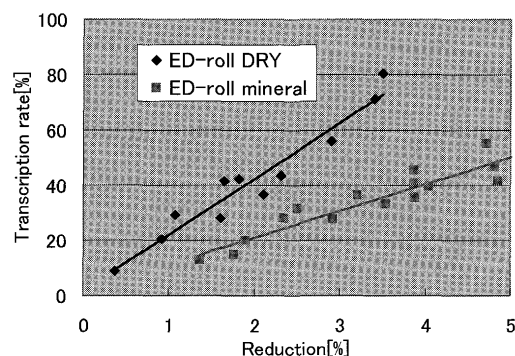


Fig. 14. Influence of lubrication on transcription rate ($\phi 70$ -roll, SPCC-AB).

ていないので高粘度油のような潤滑剤の効果の影響がなく、Rzによる影響が見られなかったのではないかと考える。

3・3 潤滑剤による圧延荷重、転写率への影響

EDロールで高粘度油と調質圧延液を使用し、潤滑剤による影響を調べた。そして、圧延荷重と転写率に及ぼす影響を無潤滑のDRYと比較を行った⁶⁻⁸⁾。

3・3・1 大径ロールの潤滑剤による圧延荷重への影響

大径ロールで潤滑剤を使用した場合の圧延荷重への影響をFig.13に示した。

潤滑剤による圧延荷重への影響は、高粘度油がDRY、調質圧延液に比べて、わずかに低くなる結果になった。しかし、その差はわずかであり、圧下率の小さい領域では潤滑剤による影響はほとんどないと考えられる。DRYではロールと板材との間に潤滑剤のような介入物がないため、ロールと板材が接触しているのに対して、高粘度油、調質圧延液ではロール内に介入し、その各潤滑剤がロールと板材の摩擦係数を軽減させる。そのため、摩擦力が低下した結果、潤滑剤を使用することによって、DRYよりも圧延荷重が低下したものと考えられる。高粘度油、調質圧延液では粘度が異なるので、圧延荷重に差が出ている。流体的には粘度が高いものは流入量が増すため、調質圧延液よりも粘度が高い高粘度油のほうは圧延荷重が下がったものと考えられる。さらに調質圧延液は一般的に粘度が極端に低いので、DRYに近い圧延荷重になっている。

3・3・2 大径ロールの潤滑剤による転写率への影響

放電ダル加工を施した大径ロールでの潤滑剤による転写率への影響について、DRYと高粘度油との比較をFig.14に、DRYと調質圧延液との比較をFig.15に示した。DRYと高粘度油との比較では、高粘度油の転写率が低く、潤滑剤による潤滑効果が確認することができた。調質圧延液を使用した際のDRYとの比較においては、転写率に高粘度油ほど大きな差が見られなかったが、調質圧延液による潤滑効果が若干確認することができた。高粘度油、調質圧延液で転写率に差が見られた要因としては、潤滑剤の粘度が影響していると考えられる。Table 3から見てわかるように、調質圧延液の粘度は高粘度油の粘度に比べ、明らかに低いこと

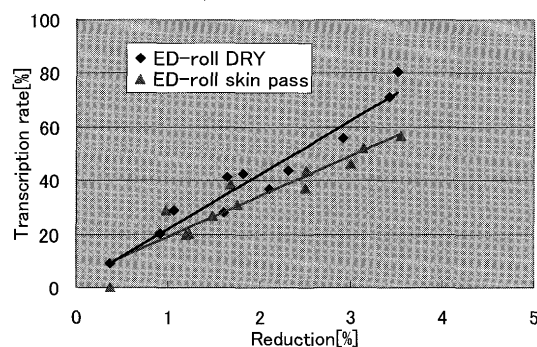


Fig. 15. Influence of lubrication on transcription rate ($\phi 70$ -roll, SPCC-AB).

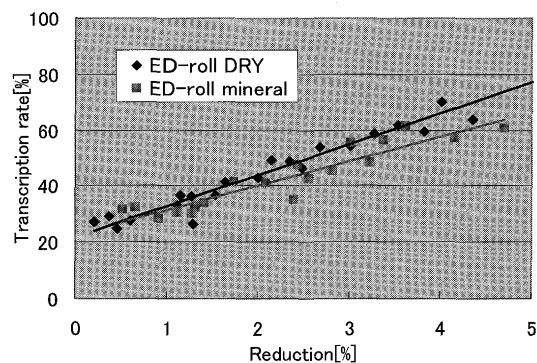


Fig. 16. Influence of $\phi 20$ -diameter roll on transcription rate ($\phi 20$ -roll, SPCC-AB).

が分かる。潤滑剤のロール間への流入量は粘度に比例するので、高粘度油の流入量が多くなりロールと材料との油膜厚が厚くなることによって、接触率が低くなり、潤滑効果が調質圧延液よりも大きく現れたと考えられる。また、DRYと調質圧延液での比較では、調質圧延液の粘度が低く、流入量が少ないためDRYとあまり変わらない結果になったと考えられる。

3・3・3 小径ロールでの潤滑剤による転写率への影響

放電ダル加工を施した大径ロールの場合、潤滑剤によって転写率に影響が見られたように小径ロールにおいても潤滑剤による転写率への影響が見られるかを調査した。DRYと高粘度油の比較をFig.16に、DRYと調質圧延液と比較を

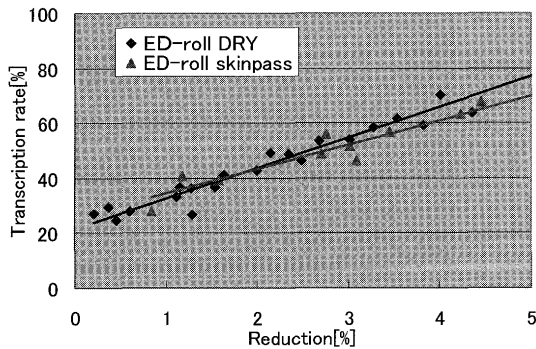


Fig. 17. Influence of $\phi 20$ -diameter roll on transcription rate ($\phi 20$ -roll, SPCC-AB).

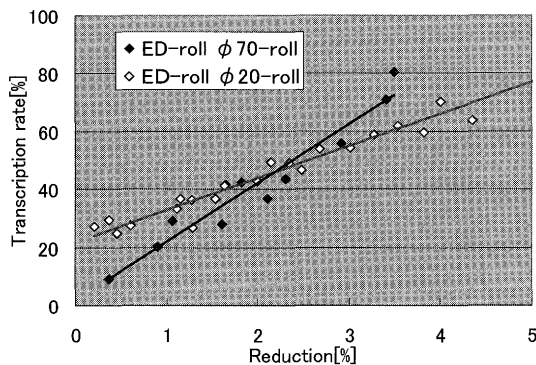


Fig. 18. Influence of roll diameter on transcription rate (SPCC-AB, DRY).

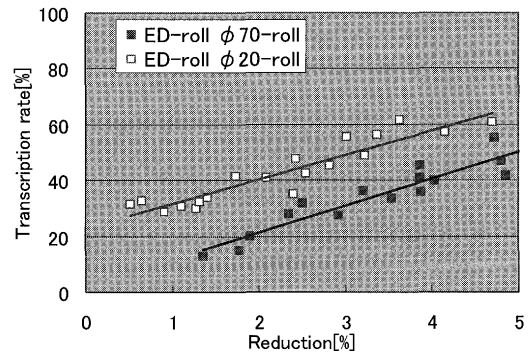


Fig. 19. Influence of roll diameter on transcription rate (SPCC-AB, Mineral).

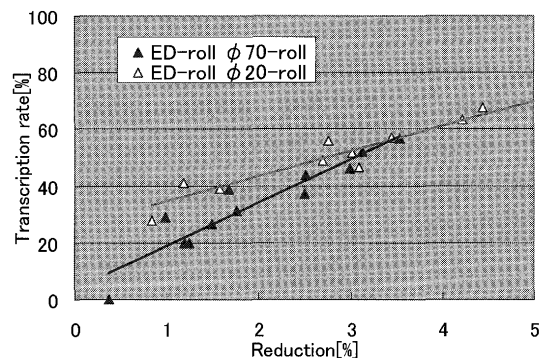


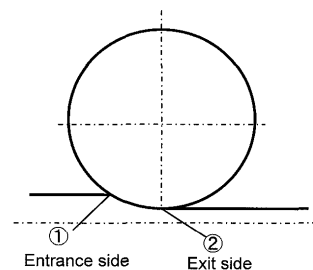
Fig. 20. Influence of roll diameter on transcription rate (SPCC-AB, Skinpass).

Fig.17に示した。

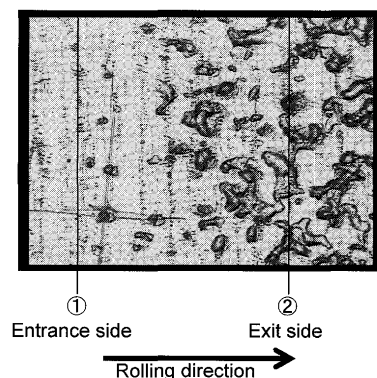
小径ロールでは大径ロールの場合と異なり潤滑剤による転写率への影響は顕著には現れなかったが、多少の差は見る事ができた。そして、小径ロールにおいて、潤滑剤の影響がなかった原因としては、大径ロールに比べて小径ロールの咬み込み角が大きいことによって、潤滑剤自体の流入量が少なくなったため、転写率に差が見られたものと考えられる。そのために、高粘度油を使用した場合、潤滑剤を使用した際に見られる影響が見られず、DRYとの転写率に差が現れなかったものと考えられる。また、DRYと調質圧延液での比較でも差が現れなかったのは、高粘度油と同様に流入量が少ないためと考えられる。しかし、高粘度油と調質圧延液では調質圧延液の方が粘度が低いいため、高粘度油よりも転写率は良い。

3・4 ロール径による転写率比較

EDロールの大径ロールと小径ロールの径の違いによる転写率について、DRYでの比較をFig.18、高粘度油での比較をFig.19、調質圧延液での比較をFig.20に示す。DRYでの転写率の比較では、圧下率が低いところではロール径による影響が見られた。そして、圧下率が高くなるにつれ大径ロールの転写率が良くなっていることがわかる。次に高粘度油を使用した潤滑圧延では、圧下率が変化しても小径ロールの転写率が良い。調質圧延液での比較では圧下率が低いところでは小径ロールの転写率が良く、圧下率が大



(a) Diagram of roll and strip



(b) Photograph of strip surface in roll gap

Fig. 21. Schematic diagram and photograph of strip in roll gap.

きくなるにつれてロール径による転写率への影響は見られなくなった。このように、DRYでは圧下率が高くなると大径ロールの転写率が良くなることは、ロールと材料の接触する接触弧長による影響と考えられる。圧下率が低いと凹凸が部分的に潰されていくため、小径ロールの方が大径ロールに比べ凹凸が早く潰され易くなる。それはFig.21(a)より分かるとおり、小径ロールでは①から②へと急激に圧下される。そのため、早く潰される小径の場合、圧下率が低いときは大径よりも転写率が良くなったと考えられる。圧下率が高くなると低いときは逆に小径ロールに比べ大径ロールの方が転写率が良くなる。Fig.21(b)に示したように、ロール接触弧中では出側に近い所で、転写率が急激に上昇しているのが分かる。ロール径が大きい場合にはロールの偏平変形によって、最下点近傍が広がると考えられるので、転写率が大きくなったと思われる。そのため、小径ロールの転写率よりも大径ロールの転写率が大きくなったものと考えられる。潤滑剤を使用した圧延でも、使用しているロール径は同じであるため、同様に接触弧長の影響はあると考えられる。しかし、圧下率が変化しても小径ロールの転写率が良くなった原因としては咬み込み角の影響と考えられる。大径ロールに比べ、小径ロールの咬み込み角は大きくなる。そのため、潤滑剤の流入量は小径ロールの方が少なくなり、潤滑効果が弱まったために転写率に差が見られたと考えられる。調質圧延液での比較では、低圧下率では調質圧延液の粘度が低いため、咬み込み角による流入量に差ができたため、小径ロールの転写率が良くなっている。しかし、圧下率が高くなるにつれ、その差はなくなることから、DRYで見られたように接触弧長による影響が現れたと考えられる。以上のことから、無潤滑圧延では接触弧長の影響が大きく見られ、潤滑剤を使用した圧延では粘度がある潤滑剤では、潤滑効果が咬み込み角の差で見られる。しかし、粘度が低いと潤滑効果よりも接触弧長が強く影響すると考えられる⁹⁾。

4. 結言

今回の結果を以下にまとめる。

(1) 材質の影響については、圧延荷重に大きな影響を及ぼし、転写率にはわずかな影響を与える。

(2) ロール加工方法による圧延荷重、転写率への影響はDRY圧延ではEDロールとSDロールではRzの影響によって、見かけ粗度が高いSDロールの方が摩擦力を受けるため、圧延荷重が高い。さらに転写率でもSDロールは圧延荷重が高いため、転写率も高くなっている。潤滑剤を使用した潤滑圧延ではEDロールの方が見かけ粗度が小さいため、潤滑剤油膜が大きくなり転写率が下がった。つまり、ロール粗度が同じであってもロール表面の凹凸などの条件によって圧延荷重および転写率に影響を与える。

(3) 潤滑剤の粘度が高いことにより、ロールへの流入量が増加し、圧延時の油膜が厚くなるため、転写率、圧延荷重共に下がる潤滑効果がある。

(4) 小径ロールでは潤滑効果が現れ難い。ロール径が小さくなると、入り側のロールと材料との角度の咬み込み角が大きくなり、潤滑剤の流入量が減少し潤滑効果も減少する。

(5) 潤滑効果をロール径で比較したところ、DRYの低圧下率では小径ロールの方が大径ロールに比べ凹凸が早く潰され易くなるため、転写率は良いが、圧下率が高くなるにつれ、大径ロールのほうが接触弧長が長くなるため、最下点の近傍領域が増えることによって転写率が良くなる。粘度の大きな潤滑圧延では大径ロールに比べ小径ロールは咬み込み角が大きく潤滑効果が少ないので、小径ロールの転写率が良い。しかし、通常の調質圧延に用いられる粘度の小さな潤滑圧延では潤滑効果は小さく、やはり大径ロールの方が転写率が良いことが分かった。

文 献

- 1) H.Hashimoto: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **47** (2006), 1015.
- 2) I.Aoki: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **20** (1979), 1121.
- 3) M.Yamashita: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **36** (1995), 1116.
- 4) 鈴木 弘: 圧延百話, 養賢堂, 260.
- 5) 日本塑性加工学会: 板圧延, コロナ社, 230.
- 6) 鎗田征雄, 長瀬直樹: 調質圧延のマイクロ変形解析および実機操業技術の最近の進歩, 調質圧延のマイクロ変形解析研究会最終報告, (2007), 45.
- 7) 長瀬直樹, 鎗田征雄: 調質圧延のマイクロ変形解析および実機操業技術の最近の進歩, 調質圧延のマイクロ変形解析研究会最終報告, (2007), 61.
- 8) 長瀬直樹, 鎗田征雄: 調質圧延のマイクロ変形解析および実機操業技術の最近の進歩, 調質圧延のマイクロ変形解析研究会最終報告, (2007), 75.
- 9) 阿高松男, 飯野嘉則: 第57回塑性加工連合講演会講演論文集, (2006), 217.