

冷間圧延したオーステナイト系ステンレス鋼を レベラ矯正した時観察される収縮

青山 春男*

Contraction of Cold Rolled Austenitic Stainless Steels Induced by Leveling

Haruo AOYAMA

Synopsis : Austenitic stainless steels are sometimes used for high tensile applications in cold rolled condition. However, it is difficult to manufacture sheets of those steels with good flatness, because they are rolled in high strength. Generally it is difficult to improve the flatness of a high yield strength material satisfactorily through leveling. It was found that pre-cold rolled austenitic stainless steels contract in the rolling direction through leveling. It was considered that the contraction of the sheets can be used for the improvement in flatness, although the contraction strain is small (approximately 0.1%). This study was carried out to reveal the effect of steel grades and reduction in thickness on the contraction. The experimental result showed that the contraction increases as stacking fault energy increases and the amount of martensite decreases. Stress relaxation occurs simultaneously with the contraction, but the contraction strain by leveling is larger than that by stress relaxation. It is considered that the contraction is also related with Bauschinger effect.

Key words : austenitic stainless steel ; flatness of sheet ; leveling ; Bauschinger effect ; stress relaxation.

1. 緒言

オーステナイト系ステンレス鋼は優れた耐食性とともにより大きな加工硬化性を有することから、圧延状態で高強度材料として使用される。高強度領域で圧延するため、板を一様に伸ばすことが難しく、良好な平坦さをもつ板を圧延することは極めて困難になっている。平坦さを求められる用途では、テンションアニーリングやテンションレベラにより形状矯正を施した材料が用いられる。これらの装置の使用は比較的薄い材料に限定され、材料の寸度によってはローラレベラの矯正に頼らなければならない。一般に、高耐力の板材はレベラ矯正で曲げ一曲げ戻し加工を受けても、板厚の大部分が弾性変形するだけで、形状の改善を図ることは難しい。レベラ矯正の可能性を探るため、冷間圧延したSUS304をレベラ矯正し、板寸法の変化を調査したところ、平坦度が改善されるだけでなく、板材自体が圧延方向に収縮することを見出した。板材が収縮すること自体は平坦度の改善と直接結び付かないが、レベラ矯正は各部の張力差とそれにもなう塑性変形の相違によって可能になる。張力差は平坦でない板材を一様に曲げ一曲げ戻しすることにより生ずるので、高耐力の板材をいかにして塑性変形領域に入れるかが重要である。レベラ矯正による収縮歪みは0.1%前後の小さなものであるが、平坦度を改善するには十分な量の塑性変形であり、冷間圧延状態にあるオーステナイト

系ステンレス鋼の平坦度改善に深く関わっているものと考えられる。そこで、本研究ではレベラ矯正した時に観察される収縮歪みを定量化するとともに、この収縮歪みに及ぼす鋼種、圧延率の影響を調査し、その機構について若干の考察をおこなった。

2. 実験方法

オーステナイト安定度が異なる4鋼種とSUS430の厚さ1.5mmのNo.2 B仕上げ板を素材とし、ワークロール径110mmの実験室圧延機で、25°Cに保温しながら、素材の圧延方向に平行に10%と30%の冷間圧延を施した。供試材の化学組成をTable 1に、圧延平行の機械的性質をTable 2に示す。圧延後、 $t \times 50 \times 1000$ mmの形状に試験片を切り出し、圧延方向平行に40mm間隔にビッカース圧痕をつけ、歪み測定の際の標点とした。(株)理工社製J4型レベラ(ロール径:38.5mm, ロールピッチ:40mm, ロール本数:11本)を用い、入り側インターメッシュ:0.0mm, 出側インターメッシュ:-1.0mmで加工をおこなった。加工前後に二次元微測器で標点距離を測定し、歪み量を算出した。歪み量は同一試料内でもかなり変動するが、測定位置との相関は認められない。すなわち、レベラ矯正時に11本のロールが同時にかかる部分は試料中央の200mm程度であるが、歪みの平均値は600mm以上の広い領域で一定である。そこで、試料長手中

平成8年2月27日受付 平成8年7月15日受理 (Received on Feb. 27, 1996; Accepted on July 15, 1996)

* 日本金属工業(株)研究開発本部 (Research and Development Headquarter, Nippon Metal Industry Co. Ltd., 1-30 Oyama-cho Sagami-hara 229-11)

Table 1. Chemical Composition. (mass%)

Grade	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	N
301	0.094	0.60	0.97	7.17	17.12	0.11	0.23	0.051
304	0.063	0.63	0.98	8.19	18.37	0.27	0.34	0.063
316	0.057	0.74	1.02	10.16	17.11	2.21	0.25	0.034
Hi. Mn	0.17	0.39	14.43	1.28	17.06	0.11	0.10	0.35
430	0.063	0.24	0.46	0.24	16.55	0.07	0.06	0.020

Table 2. Mechanical properties of pre-cold rolled austenitic stainless steels.

Grade	Reduction %	Tensile strength	Yield strength	Elongation
		MPa	MPa	%
301	10	1039	647	29
	30	1421	1147	18
304	10	784	549	36
	30	1088	931	14
316	10	784	627	31
	30	1058	960	10
Hi. Mn	10	990	784	35
	30	1352	1137	11
430	10	539	519	15
	30	676	647	5

央付近の表裏, 左右(端から15mmの位置)の20カ所の平均値を矯正による材料の歪み量とした。また, レベラ矯正と応力緩和の関係をみるために, 圧延材とレベラ矯正材を低温熱処理し, その収縮歪みを測定した。なお, 低温熱処理は300°C, 400°C, 500°Cの各温度で1時間加熱した。

3. 実験結果

3.1 レベラ矯正による収縮

レベラを1パスかけた時に生ずる歪みを20カ所測定し, その平均値と標準偏差をTable 3に示す。ピッカース圧痕を標点とする測定方法で, 同じ距離を測定した場合の繰り返し誤差は4 μm (1.3×10^{-4})以内であり, 低温熱処理での標準偏差は 2×10^{-4} 以下である。レベラで生ずる歪みは同一試料内で低温熱処理の場合より大きく変動するので, 測定箇所を20カ所に増やし, 測定値の信頼性を確保した。オーステナイト系の4鋼種は, 標準偏差より平均値の方が大きく, 明らかに圧延方向に収縮する。標準偏差は 4×10^{-4} 程度であり, 繰り返し測定誤差の約3倍になる。幅狭の試料であるが, レベラ矯正で平坦度が改善されているので, 標準偏差が測定誤差より大きくなった理由の1つは周長差が改善されたことにある。同様に, 同一条件でレベラを5パスかけた時の歪みの平均値と標準偏差をTable 4に示す。レベラ5パスで得られる収縮歪みは1パスの収縮歪みとほぼ等しく, 標準偏差にも変化は見られない。他方, 比較に用いたSUS430は標準偏差が比較的小さい5パスで得られた平均値も標準偏差よりかなり小さく, 試料全体では収縮しないものと判定される。このことから, レベラ矯正による収縮は圧延材の特徴でなく, オーステナイト系鋼種の特徴であり, 1パスの曲げ加工の繰り返して収縮反応が完了すると考えられる。なお, SUS430の1パスでの標準偏差が大きくなった理由の1つはレベラ矯正により表面光沢が上がり, 標点の境界が不鮮明になったためであり, 5パスの測定では表面を

Table 3. Contraction by 1 pass leveling.

Grade	Reduction	Average of contraction $\times 10^{-4}$	Standard deviation $\times 10^{-4}$
	%		
301	10	9	4
	30	3	2
304	10	19	5
	30	4	2
316	10	24	3
	30	9	4
Hi. Mn	10	20	3
	30	5	2
430	10	3	9
	30	-2	8

Table 4. Contraction by 5 pass leveling.

Grade	Reduction	Average of contraction $\times 10^{-4}$	Standard deviation $\times 10^{-4}$
	%		
301	10	11	3
	30	3	2
304	10	23	3
	30	6	2
316	10	23	4
	30	9	2
Hi. Mn	10	19	2
	30	3	3
430	10	0	5
	30	-1	2

軽く研磨し, レベラ矯正後も標点の境界が明瞭になるよう改善した結果, 比較的小さい標準偏差が得られた。SUS430は収縮しないが, 試料の平坦度が改善され, オーステナイト系鋼種と同じ程度の標準偏差が認められる。

3.2 収縮とオーステナイト安定度

収縮に及ぼす鋼種の影響を見るのに圧延後の α' マルテンサイト量とレベラによる収縮歪みの関係をFig. 1に示す。なお, レベラ矯正による収縮歪みはレベラ1パスと5パスでほぼ同じであり, 今後1パスの結果についてのみ検討する。10%圧延材でも30%圧延材でも α' マルテンサイト量が増加するにしたがって収縮歪みは小さくなる。10%圧延材は大きく収縮するがマルテンサイトが少し生成するだけで急速に収縮量が減少する。一方, 30%圧延材では収縮量が小さいだけでなくマルテンサイトの増加による収縮歪みの減少も小さい。また, 高Mn鋼とSUS316はともに α' マルテンサイトが生成しないが, 高Mn鋼はSUS316より収縮歪みは小さく, 少量の α' マルテンサイトが生ずるSUS304と同程度の収縮である。なお, 高Mn鋼は加工により α' マルテンサイトが生じないが, ϵ マルテンサイトが少量生成する。

転位運動に強い影響を及ぼす積層欠陥エネルギーとレベラ矯正による収縮歪みの関係をFig. 2に示す。積層欠陥エネルギーはR.E.Schramm¹⁾らの[Ni-Cr-Mo-Mn]の式に藤倉ら²⁾の報告に基づきCuの係数を加えた(1)式より算出した。Cuの項を単純に加えただけで, 定数項を補正していないので, 積層欠陥エネルギーの実際の数値とは異なるが, 鋼種間の比較に使用することはできると考えられる。

$$SFE \text{ (mJ/m}^2\text{)} = -53 + 6.2[\text{mass}\% \text{Ni}] + 18.6[\text{mass}\% \text{Cu}] + 0.7[\text{mass}\% \text{Cr}] + 3.2[\text{mass}\% \text{Mn}] + 9.3[\text{mass}\% \text{Mo}] \quad (1)$$

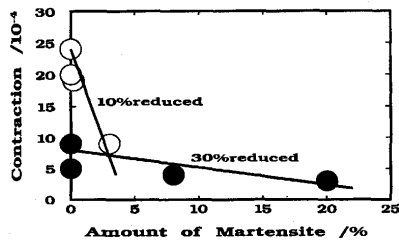


Fig. 1. The effect of martensite induced by pre-cold rolling on the contraction of stainless steel sheets during 1 leveling pass.

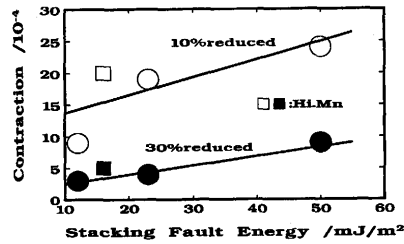


Fig. 2. The effect of stacking fault energy on the contraction of pre-cold rolled stainless steels induced by leveling.

10%圧延材の場合も30%圧延材の場合も積層欠陥エネルギーが高いほど収縮歪みは大きくなる傾向を示す。30%圧延材はかなりよい相関性を示すが、10%圧延材では α' マルテンサイトと収縮歪みとの相関より劣る。30%圧延材で積層欠陥エネルギーと収縮歪みの相関がよくなるのは、 α' マルテンサイトを生成しない高Mn鋼が適当な位置に納まることにある。積層欠陥エネルギーと α' マルテンサイトの生成量の間にも相関があり、積層欠陥エネルギー単独の効果を評価することはできないが、 α' マルテンサイトが生じない高Mn鋼も積層欠陥エネルギーで評価できることから、積層欠陥エネルギーがレベラによる収縮歪みに影響を及ぼすと考えることができる。

3.3 収縮と応力緩和

オーステナイト系ステンレス鋼の冷延板を低温熱処理すると圧延平行方向に収縮する。この収縮現象は応力緩和や ϵ マルテンサイトの逆変態などが関与するが、300°Cでの熱処理による収縮はその大部分が応力緩和に起因すると考えられる³⁾。300°Cに1時間保持した時の収縮とレベラによる収縮との関係をFig. 3に示す。10%圧延材も30%圧延材も熱的緩和による収縮が大きいほどレベラによる収縮が小さくなる。また、SUS301を除く10%圧延材やSUS316の30%圧延材は熱的緩和による収縮歪みよりレベラによる収縮歪みが大きい。

レベラ矯正後に低温熱処理を施して得られる収縮歪みをTable 5に示す。10%圧延材はレベラ矯正によって低温熱処理の収縮歪みは極めて少なくなる。300°Cの熱処理ではSUS301以外の鋼種はほとんど収縮しない。一方、30%圧延材はレベラ矯正後の低温熱処理で大きく収縮する。その歪みはレベラ矯正しない場合の50%~80%に相当する。レベ

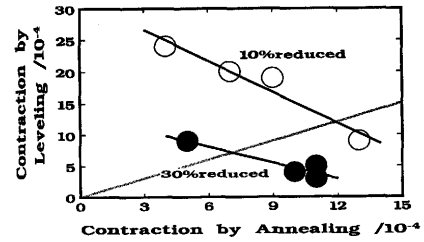


Fig. 3. The relationship between the contraction induced by leveling and the contraction by annealing at 300°C.

Table 5. Contraction of leveled and rolled steels by low-temperature annealing. ($\times 10^{-4}$)

Grade	Reduction %	Contraction of leveled steels			Contraction of rolled steels		
		300°C	400°C	500°C	300°C	400°C	500°C
301	10	4	3	6	13	14	15
	30	8	8	12	11	15	17
304	10	0	0	-1	9	9	8
	30	6	8	9	10	11	12
316	10	1	0	1	4	2	3
	30	3	3	4	5	7	8
Hi. Mn	10	1	5	5	7	8	8
	30	8	11	11	11	13	14
430	10	1	3	1	-2	-3	-6
	30	-1	7	0	-2	-2	-1

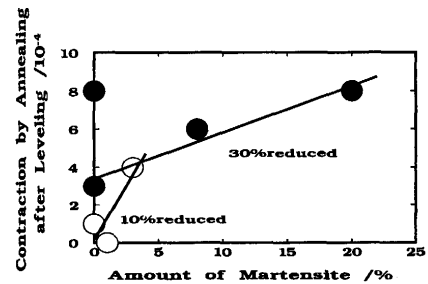


Fig. 4. The effect of martensite on the contraction of leveled stainless steels induced by annealing at 300°C.

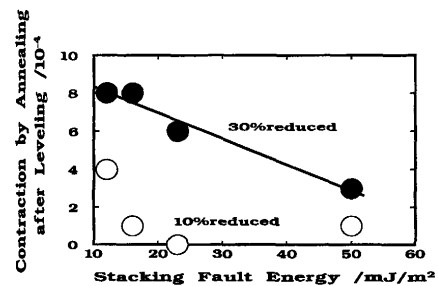


Fig. 5. The effect of stacking fault energy on the contraction of leveled stainless steels induced by annealing at 300°C.

ラ矯正後に300°Cで熱処理した時の収縮歪みと冷間圧延後の α' マルテンサイトの関係をFig. 4に示す。高Mn鋼を除外して見ると10%圧延材でも30%圧延材でも α' マルテンサイトが増えるにしたがい、レベラ後の熱処理による収縮歪みは増大する。また、レベラ矯正後の熱処理による収縮歪みと積層欠陥エネルギーとの関係をFig. 5に示す。30%圧延材では積層欠陥エネルギーが大きいほど、レベラ後の熱的収縮は小さくなる。高Mn鋼も同一線上にあり、 α' マルテンサイ

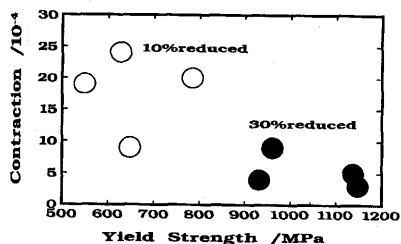


Fig. 6. The relationship between the contraction of pre-cold rolled stainless steels induced by leveling and their yield strength.

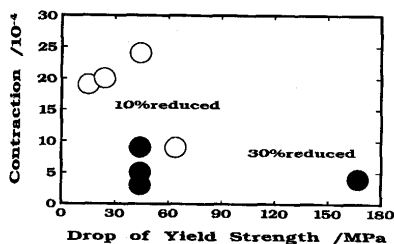


Fig. 7. The relationship between the contraction of pre-cold rolled stainless steels and the drop of their yield strength induced by leveling.

トの場合よりよい相関性を示す。ただし、10%圧延材では積層欠陥エネルギーの最も小さいSUS301だけが収縮し、その他は収縮せず、積層欠陥エネルギーとの相関を見ることはできない。レベラによる収縮もレベラ後の熱的収縮も積層欠陥エネルギーとよい相関性を示すがその傾向は逆で、前者は積層欠陥エネルギーとともに増大し、後者は減少する。

3.4 耐力と収縮

レベラ矯正で板厚に対する塑性変形領域の比率に影響を及ぼす0.2%耐力とレベラの収縮歪みの関係をFig. 6に示す。10%圧延材と30%圧延材を含めて見れば耐力が高いほど収縮歪みが小さくなる傾向にあるが、それぞれ単独に見ると耐力との相関性は低い。

一方、レベラを1パスかけると圧延平行の耐力はバラツキが大きい場合もあるが、例外なく低下する。低下量は40MPa程度であるが、SUS301は10%圧延材の方が大きく低下し、SUS304は30%圧延材の方が大きく低下する。レベラによる耐力の低下とレベラによる収縮の関係をFig. 7に示す。耐力の低下と収縮には相関が認められない。

4. 考察

4.1 収縮とバウシinger効果

レベラ矯正では板全体として長手方向に若干の引張応力が負荷されるが圧縮応力が負荷されることはない。張力が負荷されない状態で曲げ-曲げ戻し変形をおこなえば、曲げ中心が板厚中心となり、板自体が伸び縮みすることはない。実際、焼きなまし材のレベラ矯正では板の伸び縮みは

ない。圧延材は①表層と内部で圧延方向の伸びが相違することにより生ずるマクロ的な残留応力と②除荷過程で転位がC, Nや転位との相互作用により停止⁴⁾されて形成されるミクロ的な残留応力を内包する。冷間圧延材のマクロ的残留応力は表層で引張応力、板厚中央で圧縮応力となる。曲げ加工では表層部ほど歪みが大きくなり、マクロ的残留応力を持つ材料は引張変形を受ける表層が反対側の圧縮変形を受ける表層より先に塑性領域に入ることから、レベラ矯正により伸び変形する可能性が考えられるが、縮み変形する可能性は考えにくい。圧延状態のSUS430をレベラ矯正しても収縮しないことも、この考えを支持するものと考えられることができる。マクロ的な残留応力の総和は0となるが、ミクロ的な残留応力の総和は圧縮力となる。圧延状態のオーステナイト系鋼種は低温熱処理で収縮するが、熱処理中に張力を負荷すれば収縮歪みを生じなくなる。収縮歪みを生じなくするのに必要な張力に相当するだけの圧縮応力が残留していると考えられることができる。このようにして求めた残留応力は耐力が高いほど、積層欠陥エネルギーが低いほど大きくなる傾向を示す⁵⁾。岡田⁴⁾はオーステナイト系ステンレス鋼は転位に対する溶質原子との弾性的相互作用は微弱であり、応力緩和は堆積した転位が拡張幅を増大しながら、平衡位置に向かって移動する方法で起きる。転位の移動には溶質原子や他の転位との相互作用が作用し、これに打ち勝つだけの熱エネルギーを与えると平衡位置に向かって再び移動すると考えている。このように熱処理による収縮にはミクロ的な残留応力が関与すると考えられる。同様に、ミクロ的な残留応力を有する材料に圧縮応力を負荷した場合、圧縮応力が耐力以下であっても、除荷過程で転位の移動を阻止しているC, Nなどの摩擦力に打ち勝ち、転位が再び平衡位置に向かって移動し、微少な塑性変形を生ずることになる。逆に引張応力を負荷した場合、耐力に達するまで弾性的に変形するだけとなる。このように、曲げ加工により圧縮応力を受ける部分は応力緩和が関与して、引張応力を受ける部分より先に塑性変形し、収縮歪みを生ずると考えることができる。レベラによる収縮は10%圧延材の方が30%圧延材より大きく、マルテンサイトが多いほど小さいこともこれを支持する。歪み量は活動転位密度と移動距離が関係する。転位密度の高い30%圧延材やマルテンサイトの多い材料では、転位が複雑に絡み合い、相互作用に打ち勝って再び運動できる転位が少ない場合と、再び移動する転位が不動転位やマルテンサイトで停止するまでの距離が短い場合が考えられるが、いずれの場合も応力緩和が関与する収縮歪みであることを支持する。しかし、レベラ矯正による収縮を残留応力の緩和によるものと考え、①残留応力が大きいものほど、低温熱処理での収縮が大きいものほど、レベラによる収縮が大きくなること、また②熱的緩和は板厚全体に及びレベラの応力緩和が曲げ加工の特性上板厚全体に及びにくいので、レベラによる収縮は熱

的収縮より小さくなることが期待される。しかし、①についてはFig. 3に示すように熱的収縮が大きい材料ほどレベラの収縮が小さく、②についてもSUS316に見られるように、熱的収縮よりレベラによる収縮が大きい場合もあり、圧延で形成された残留応力の緩和だけでは説明がつかない。

レベラ矯正では変形方向が繰り返し反転する。収縮には変形方向が反転すると変形応力が変わるバウシinger効果の関与が考えられる。バウシinger効果は前工程の変形方向と同じ方向には切り合う林立転位が密に分布し可動転位の移動が妨げられ、逆方向には転位が粗であり可動転位が容易に移動することより起きると考えられている⁶⁾。したがって、変形方向が逆転する度にバウシinger効果が繰り返し起きる。オーステナイト系ステンレス鋼は積層欠陥エネルギーが低く、バウシinger効果が強く現れる材料^{7,8)}である。SUS 316の10%圧延材は熱的な応力緩和で得られる歪みよりレベラによる収縮が大きい(Table 3, Table 5)。残留応力を緩和するのに必要な歪みより多く収縮することを意味し、曲げ変形で繰り返し収縮することを示唆するので、バウシinger効果の関与を支持する。焼きなまし材はレベラ矯正で収縮しないが、曲げ加工により一部が塑性領域に入り、バウシinger効果が生ずると考えられる。バウシinger効果が生じても収縮しない理由は、引張変形でも圧縮変形でも同じ程度のバウシinger効果が現れ、両者で相殺されるためと考えられる。このことは、今回の実験でレベラを5パスかけても、1パスの場合と収縮歪みがほとんど変わらなかったことにも適用される。したがって、バウシinger効果で収縮歪みを得るには、圧縮変形応力の低下が引張変形応力の低下より大きいことが必要である。圧延材は引張変形を受けて、除荷された状態と考えることができるから、少なくとも第1回目の曲げ変形では圧縮側でバウシinger効果が現れ、引張側は前工程と同じ方向の歪みを受けするためバウシinger効果が生じないと考えることができる。

4・2 バウシinger効果を加味したモデル計算

引張-圧縮の繰り返し試験よりオーステナイト系ステンレス鋼のバウシinger効果を詳細に表現した今仲⁹⁾のSUS304の関係式を用いる。

軟化部分は(2)式で表現される。

$$\begin{aligned} \sigma &= \left(\frac{-0.358}{\varepsilon^*/\varepsilon_s + 0.28} + 1.28 \right) \sigma_s \\ \sigma_s &= \text{MAX}(\sigma_{\max p}, \sigma_{\max m} \cdot k_s) \\ \varepsilon_s &= \sigma_s / E_s \end{aligned} \quad (2)$$

- σ : 軟化部分の応力度(t/cm²)
- ε^* : 軟化部分の始点を原点としたときの歪み(%)
- σ_s : 軟化部分の終点応力度(t/cm²)
- ε_s : 軟化部分の始点を原点としたときの終点の歪み(%)
- E_s : 軟化部分の割線剛性(t/cm²)

スケルトン(加工硬化)部分は(3)式で表現される。

$$\begin{aligned} \sigma(\varepsilon) &= k \cdot \sigma_m(\varepsilon_s) - \Delta \\ \Delta &= k \cdot \sigma_m(\varepsilon_{SA}) - \sigma_s \\ \varepsilon - \varepsilon_a - \varepsilon_{SA} & \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

- $\sigma(\varepsilon)$: スケルトン部分の応力度(t/cm²)
- σ_m : 単調引張の応力-歪み関係式から得られる応力度(t/cm²)
- Δ : 単調引張の応力-歪み関係式から得られる応力度と繰り返し曲線での応力度の差分(t/cm²)
- ε_a : スケルトン部分の始点歪み(%)
- ε_{SA} : スケルトン部分の始点歪みに相当する単調引張の応力-歪み関係式の歪み(%)

この関係式は焼なまし材に単軸応力を繰り返し与えて求められているので圧延材に適用するよう一部変更した。①耐力は圧延材の耐力を用い、その他の弾性係数、軟化指数、加工硬化係数は変更しない。②圧延材は耐力までの引張変形を受けた後除荷されたものとする。この仮定のもとに材料に引張-圧縮の変形を与えるとFig. 8に示すような応力-歪み曲線を描く。最初に引張応力を受けると弾性変形を通して加工硬化領域に入り、除荷で応力0まで弾性変形し、圧縮応力を受けると軟化領域を経て加工硬化領域に入る。他方、最初に圧縮応力を受けると弾性変形することなく直接軟化領域を通り耐力に相当する応力に達すると加工硬化領域に入る。除荷は弾性的に進行し、次の引張応力では軟化変形から加工硬化領域に入る。

レベラ矯正によって材料に加えらる歪みは(4)式に示す木村ら¹⁰⁾の曲げ半径の式から求める。

$$\begin{aligned} \xi_i &= 15 \times (0.785 h^{0.782} \times \theta_i^{-1} - 1) R_i^{-1} \\ \rho_i &= R_i (1 + \xi_i) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 ρ : 板の曲げ半径(mm), R : ロール半径(mm), ξ : 板の曲げ半径のロール半径に対する偏差, h : 板厚(mm), θ : 板のローラに対する巻付角(rad)である。

この式は張力を負荷した時の曲げ曲率を測定して求めたものであるが、40MPaの低い応力でも成立するので張力を負荷しないレベラ矯正にも対応すると考える。この式には張力項が含まれないのでロール間隔とインターメッシュ、

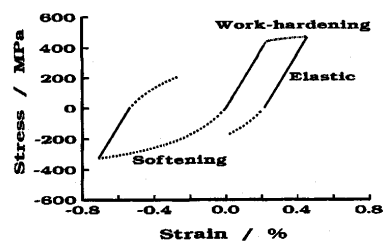


Fig. 8. The schematic stress-strain curve of Bauschinger effect in pre-cold rolled stainless steel.

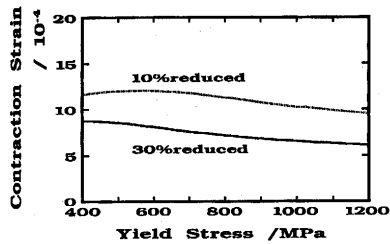


Fig. 9. The contraction strain calculated by Imanaka's stress-strain curve which describes Bauschinger effect in SUS304.

板厚の幾何学的関係から曲げ半径が求まる。今回の実験に適用すると10%圧延材の最小曲率半径は116mmであり30%圧延材のそれは124mmとなる。この曲げ半径でバウシinger効果を考慮せず曲げ中立軸が板厚中央にあるとすれば、耐力1000MPaの30%圧延材では板厚全域が弾性領域にあることになる。

板は上式で算出した曲げ半径で曲げられるが、引張応力を受けないので板断面の応力合が0になる。曲げ半径と中立点から歪みを求め、今仲の関係式⁹⁾から応力を計算し、その和が0になるよう繰り返し計算により中立点を定める。

除荷は板厚各部の応力が0になるまで弾性的に進行し、その時の歪みの平均値を材料の塑性変形量とする。次のロールで逆曲げが加えられ、同様な計算を繰り返す。ロールの本数だけ繰り返した後、板厚各部の歪みの平均値を求めレベラ矯正による歪みとする。

レベラ矯正による歪みと耐力の関係を測定結果をFig. 9に示す。バウシinger効果を考慮すると、耐力から弾性域の変形と考えられるレベラ矯正でも収縮歪みが得られることが解る。30%圧延材に対応する繰り返し曲げを与えた時、計算歪み量は $6 \times 10^{-4} \sim 9 \times 10^{-4}$ であり、Table 3に示す実測値に近い値となっている。耐力の影響を見ると低耐力ほど大きくなる傾向を示すが、その効果は 3×10^{-4} と比較的小さい。一方、10%圧延材に対応する繰り返し曲げの計算では $10 \times 10^{-4} \sim 12 \times 10^{-4}$ の収縮歪みとなり、収縮歪みの最も小さいSUS301と同じであり、SUS316などの半分の値である。耐力の影響を見ると600MPaあたりで最大値をとる曲線を描くところに特徴があるが、収縮歪みの変化は30%圧延材の場合と等しい。計算上、10%圧延材と30%圧延材の相違は板厚の相違だけである。この収縮歪みの差はレベラ矯正で加えられる曲げ歪みの差を表している。したがって、曲げ歪みによる収縮歪みの相違は 3×10^{-4} と見積もることができる。

このモデル計算により耐力が高いほど収縮歪みが小さく、曲げ歪みが大きいほど収縮歪みが大きくなる傾向を把握することができる。しかし、バウシinger効果を表現する応力-歪み関係に若干の問題がある。このモデルでは最初の

曲げの時に圧縮側の軟化と引張側の弾性変形の差が収縮歪みの大部分をなし、その後の繰り返し曲げでは圧縮・引張とも軟化が起き、得られる収縮は小さい。これはどんなに小さな圧縮応力でも1度で圧延の残留応力を緩和し、次の引張変形では弾性領域を持つことなく軟化すると仮定していることに対応している。30%圧延材がレベラ矯正後も低温熱処理で収縮することから解るように、曲げ歪みが小さい領域では弾性的に変形し応力緩和しないと考えられる。また、今仲関係式から求めた10%圧延材収縮歪みはレベラ矯正による収縮歪みより小さい。このことから、圧延材においては、単軸変形の繰り返しと異なり、圧縮変形が引張変形より低い応力で塑性変形することが何度か繰り返し現れると考えられる。さらに、レベラ1パスによる歪みと5パスによる歪みがほぼ等しいことから、圧縮変形が引張変形より低い応力で塑性変形することが持続しないと判断される。

5. まとめ

冷間圧延したオーステナイト系ステンレス鋼をレベラ矯正した時の材料の変形挙動を調査した結果、次の知見が得られた。

(1) オーステナイト系4鋼種はいずれもレベラ矯正すると収縮し、SUS430が収縮しない。収縮は圧延材のもつマクロ的な残留応力ではなく、応力緩和と関係するミクロ的な残留応力によるものと考えられる。

(2) レベラによる収縮歪みは鋼種により異なり、SUS316 > SUS304 > 高Mn鋼 > SUS301の順に小さくなる。これは積層欠陥エネルギーの大きさの順と同じである。また、10%圧延材の方が30%圧延材より大きく収縮し、マルテンサイトが少ないほど収縮が大きい傾向を示す。

(3) レベラ矯正により材料は応力緩和されるが、レベラ矯正による収縮は低温熱処理で応力緩和した時の収縮量より大きく、応力緩和とともにバウシinger効果も関与すると考えられる。

文 献

- 1) R.E.Schramm and R.P.Reed: Metallurgical Transaction, **6A** (1975), 1345.
- 2) 藤倉正国, 阿部直弘: 電気製鋼, **43** (1972), 34.
- 3) 青山春男: 鉄と鋼, **81** (1995), 577.
- 4) 岡田 実, 渡辺統市: 日本金属学会誌, **22** (1958), 440.
- 5) 青山春男: 鉄と鋼, **81** (1995), 900.
- 6) 五弓勇雄, 岸 輝雄: 塑性と加工, **10** (1969) 107, 863.
- 7) 岸 輝雄, 柳原安英, 小幡義彦, 堀内 良: 日本金属学会誌, **41** (1977), 890.
- 8) 柴田浩嗣, 藤田利夫, 岸本康夫, 名村夏樹: 鉄と鋼, **69** (1983), A93.
- 9) 今仲伸郎: 佐藤工業(株)技術研究所報, **18** (1992), 28.
- 10) 木村智明, 芳村泰嗣: 日立評論, **57** (1975) 5, 433.