

冷間圧延したオーステナイト系ステンレス鋼の 低温熱処理時の収縮

青山 春男*

Contraction of Cold Rolled Austenitic Stainless Steels during Annealing at Low Temperature

Haruo AOYAMA

Synopsis : Austenitic stainless steel has good corrosion resistance because of its high chromium content. Moreover, it can be hardened significantly by cold-working, though it is not hardened by heat treatment. Cold rolled austenitic stainless steel is, therefore, widely applied in spring parts, transportation equipment, architectural materials and so on. However, this cold rolled austenitic stainless steel has the peculiar behavior during annealing at low temperature which is not observed in annealed stainless steel. (1) It contracts significantly parallel to the rolling direction during annealing without load. (2) Creep occurs at low stress below the proof strength. To study the mechanism of contraction, the effect of stability of austenite, hardness and martensite induced plasticity on contraction were investigated, and 30% reduced austenitic stainless steel was found to contract by $3\sim 17\times 10^{-4}$ during annealing. Contraction is considered to be connected with ϵ -martensite and stress relaxation.

Key words : austenitic stainless steel ; cold work ; annealing ; stacking fault energy ; ϵ -martensite ; stress relaxation.

1. 緒言

オーステナイト系ステンレス鋼は焼入れ硬化性はないものの、極めて大きな加工硬化性を持っているため、冷間圧延を制御することにより、必要とする高強度を容易に得ることができる。これによってオーステナイト系ステンレス鋼は加工性、耐食性に優れた高強度材料として、ばね材料や車両用材、建築金物、プリント基板用プレスプレートなどに広く使用されている。また近年、ステンレス鋼が建築構造用材料に認定されたこともあって、加工硬化状態のオーステナイト系ステンレス鋼を高強度材料として積極的に利用していこうとする動きもある。

ところが圧延状態のオーステナイト系ステンレス鋼には100°C~500°Cの低い温度に再加熱すると焼なまし材とは明瞭に異なっている。

(1) 無負荷の熱処理で圧延方向に大きく収縮する。

(2) 耐力以下の小さな応力でクリープ現象を起こす。

などの特異な現象が認められる。これらの現象は加工したオーステナイト系ステンレス鋼をばね材料として使用する際の低温熱処理などで経験的に知られていたほか、加工硬化したオーステナイト系ステンレス鋼が応力下で小さな変形を起こすこと¹⁾²⁾や、サブゼロ温度で加工した材料が常温で変形すること³⁾が一部に報告されている。しかし、室温で加工したオーステナイト系ステンレス鋼が無負荷の状態

で低温熱処理時に変形することを報告した例は少なく^{4)~6)}、総合的観点からの説明はいまだおこなわれていない。

そのため本報では、まずオーステナイト系ステンレス鋼の冷間圧延材を低温熱処理した際に生ずる収縮現象について、Ni, Cuなどと比較するとともに、オーステナイト安定度の相違する9鋼種を用い、各鋼種の収縮率の相違を明確にし、ビッカース硬さ、加工誘起マルテンサイトとの関係を調査し、その機構を考察した。

2. 実験方法

高強度材として冷間圧延状態でよく使用されるSUS301, SUS304を含むオーステナイト系ステンレス鋼9鋼種と、それと比較する目的でSUS430, 低炭素鋼の体心立方の鋼やNi, Cuの面心立方金属など5種を選んだ。Table 1に化学成分を示す。供試材は板厚0.8~2.0mmの冷延板から $t\times 70\times 300$ mmの形状に切り出したものを素材として、ワークロール径110mmの実験室圧延機により、素材の圧延方向と同じ方向に圧延することにより調整した。圧延は室温、板厚減少率30%を原則としたが、一部鋼種では50°C, 100°Cの加温圧延や板厚減少率10%, 50%の圧延も実施した。

収縮率の測定は、これらの圧延試料より $t\times 70\times 60$ mmの試験片を切り出し、その表面と裏面上に圧延方向ならびに幅方向に間隔40mmのビッカース圧痕(荷重10kg)をつけ、

Table 1. Chemical Composition. (mass%)

No.	Grade	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
1	301	0.095	0.66	1.00	0.032	0.006	7.18	17.16	0.18	0.14	0.052
2	304	0.057	0.65	1.01	0.033	0.005	8.07	18.02	0.16	0.19	0.064
3	Cu-304	0.056	0.70	0.95	0.032	0.002	8.13	18.01	0.25	0.99	0.066
4	316	0.042	0.50	0.94	0.033	0.007	11.22	17.25	2.10	0.35	0.021
5	310S	0.056	0.77	1.18	0.019	0.001	19.35	24.57	0.04	0.04	0.030
6	304J1	0.020	0.68	1.26	0.031	0.005	7.10	15.69	0.19	2.08	0.057
7	Hi.Mn	0.188	0.41	14.60	0.022	0.002	1.28	17.32	0.07	0.08	0.367
8	XM7	0.036	0.51	1.72	0.032	0.001	9.08	18.23	0.08	3.25	0.038
9	Sub-Z.	0.115	0.98	0.65	0.023	0.003	4.87	14.72	0.99	2.10	0.029
10	630	0.046	0.64	0.63	0.031	0.007	4.05	16.15	0.09	3.70	0.039
11	430	0.058	0.36	0.46	0.025	0.003	0.20	16.13	0.03	0.06	0.025
12	Ni	0.018	0.15	0.25	0.001	0.003	98.79	0.04	<0.01	<0.01	0.001
13	Cu	0.001	<0.01	<0.01	0.001	0.001	<0.01	<0.01	<0.01	99.96	<0.01
14	Steel	0.018	<0.01	0.13	0.013	0.009	<0.01	<0.01	<0.01	0.03	0.002

相互の間隔を二次元微測器により測定した後に、300°C、400°C、500°Cの各温度に60分保持し、再度ビッカース圧痕の間隔を測定する方法によった。なお、ビッカース圧痕を用いた長さ測定で得られる繰返し測定誤差は4μm程度であり、各測定値のもつ標準偏差は収縮率にして 2×10^{-4} 以下であった。

また、熱処理中に起こる収縮反応を解析するためにビッカース硬さ、 α' マルテンサイト量をFischer社製フェライトスコープにより、また熱膨張をセイコー電子工業(株)製熱機械分析装置により測定した。熱膨張は $t \times 2 \times 20$ mmの試験片を用い、0°C~600°Cの間を2回以上加熱・冷却を繰返し、その昇温時にサンプリングした。熱サイクルは昇温速度、冷却速度ともに6°C/min、最高温度と最低温度で10分保持するパターンをとった。

3. 結果

3.1 オーステナイト安定度と収縮挙動

室温にて30%圧下し、300°C~500°Cの低温熱処理した各材料の圧延方向と幅方向の収縮をTable 2に示す。各データの標準偏差が 2×10^{-4} に収まっていることを考慮すると、すべての材料で幅方向にはほとんど収縮しない。これに対し圧延方向では材料により大きく異なり、No. 1鋼(SUS301)やNo. 2鋼(SUS304)のオーステナイト系ステンレス鋼は $10 \sim 17 \times 10^{-4}$ のかなり大きな収縮率を示すのに対し、SUS 430、低炭素鋼、NiやCuは幅方向と同様にほとんど収縮しない。SUS301やSUS304で測定された収縮率は一見小さいように見えるが、2000mmの板が3mm程度収縮することに相当し、製品寸法を狂わせたり、平坦度を劣化させたりするに十分な大きさである。

オーステナイト系のいずれの鋼種も圧延方向にのみ収縮するが、収縮率自体には鋼種による差が明瞭に認められる。SUS301やSUS304が大きく収縮し、No. 5鋼(SUS310S)やNo. 8鋼(SUSXM7)の収縮が小さいことから、一見して収縮現象はオーステナイト安定度と関係するものと予想

Table 2. Anisotropy of Contraction during annealing at low temperature. ($\times 10^{-4}$)

No.	Grade	α' Ms		300°C		400°C		500°C	
		%	°C	R.D.	T.D.	R.D.	T.D.	R.D.	T.D.
1	301	22	18	11	-1	15	-3	17	-1
2	304	12	-8	10	0	11	1	12	1
3	Cu-304	3	-35	9	2	10	2	9	2
4	316	0	-101	5	1	7	1	8	1
5	310S	0	-	4	2	4	1	5	2
6	304J1	31	14	5	1	8	-1	9	3
7	Hi.Mn	0	-105	11	1	13	0	14	0
8	XM7	0	-110	3	0	3	1	2	1
9	Sub-Z.	52	48	5	2	8	0	6	2
10	630	75		3	2	2	0	2	3
11	430	(79)		2	1	2	1	1	2
12	Ni			2	0	2	-1	3	0
13	Cu			0	0	0	0	-3	-1
14	Steel	(94)		1	0	-1	1	0	1

Specimens are reduced 30% in thickness at room temperature. R.D.=rolling direction. T.D.=transversal direction

される。この関連を見るため、各鋼種のオーステナイト安定度を圧延後の α' マルテンサイト量と Md_{30} で評価し、Table 2に付記した。

その結果、No. 3鋼(Cu添加SUS304)が3 vol%程度の少ないマルテンサイトで大きく収縮すること、No. 6鋼(SUS304J1)やNo. 9鋼(サブゼロ硬化型ステンレス鋼⁷⁾)はオーステナイト安定度が著しく低く、マルテンサイトが多く生成するが、収縮量はSUS301よりかなり少なくなっていることなどから、収縮率と α' マルテンサイト量や Md_{30} との相関は直接的には認められないことがわかった。なお、 Md_{30} はオーステナイトの安定度を評価するのに一般的に用いられているAngel⁸⁾の提唱式を野原ら⁹⁾が改良した次式で算出した。

$$Md_{30}(\text{°C}) = 551 - 462[\%C + \%N] - 9.2[\%Si] - 8.1[\%Mn] - 29[\%Ni + \%Cu] - 13.7[\%Cr] - 18.5[\%Mo] - 68[\%Nb] - 1.42[\nu - 8.0] \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 ν は結晶粒度番号を表し、8として計算した。

α' マルテンサイト量と収縮率の相関が弱い³⁾が、 α' マルテンサイト量が多い領域では α' マルテンサイトが増えるにし

たがって収縮率は減少する傾向がある。SUS304J1の収縮率がSUS301の収縮率より小さく、さらに α' マルテンサイトが90%以上存在するNo.10鋼 (SUS630) がフェライト単相のNo.11鋼 (SUS430) と同様にほとんど収縮しないのがその事例である。このことから、収縮反応はオーステナイト相内で起こると推定される。なお、Table 2でSUS630の α' マルテンサイト量が70%~80%になっているが、これはFeの飽和磁化基準のまま測定し、補正をおこなっていないことによる誤差である。

3・2 板厚減少率と収縮

室温で圧延した6鋼種の板厚減少率と収縮率の関係をFig. 1に、熱処理温度と収縮率の関係をFig. 2に示す。全体の傾

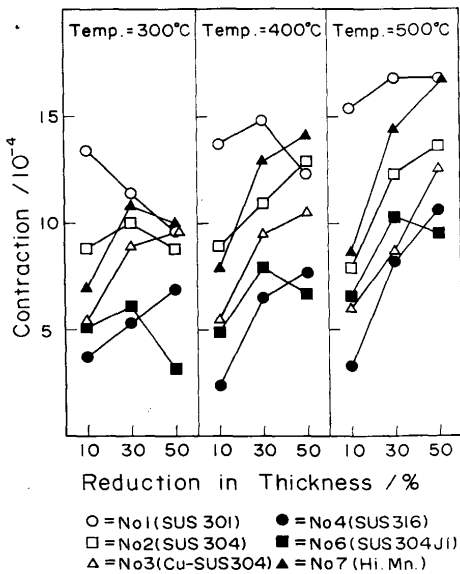


Fig. 1. Relationship between contraction during annealing and reduction in thickness at room temperature.

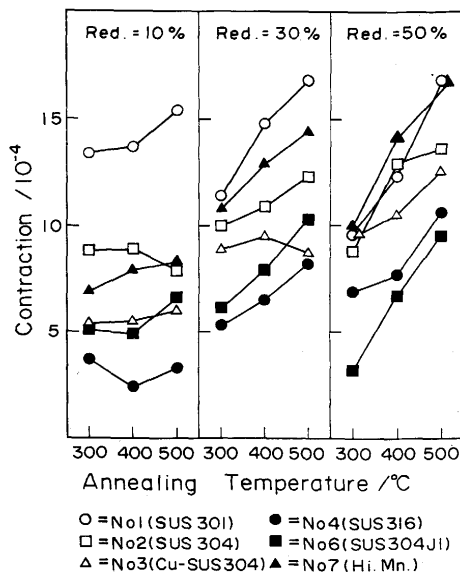


Fig. 2. Relationship between contraction during annealing and annealing temperature.

向として、板厚減少率が增大するほど、また熱処理温度が上昇するほど収縮率は大きくなる。この傾向と異なる挙動を示すのは α' マルテンサイト量が多く生成するSUS301とSUS304J1である。SUS301の場合、500°Cの熱処理では他の材料と同様に板厚減少率が大きくなるほど収縮量が増大するが、300°Cの熱処理では板厚減少率が大きいほどかえって収縮量は減少している。400°Cの熱処理では圧下率30%で最大の収縮となる中間形態を示す。SUS304J1はどの熱処理温度でもSUS301の400°C処理と同じ形態を示すが、高い温度ほど30%圧延材と50%圧延材の収縮率の差が小さくなり、30%圧延材と10%圧延材の収縮率の差は反対に大きくなる。

一方、熱処理温度との関係を見ると、板厚減少率が10%と小さい場合は、いずれの鋼種の収縮も熱処理温度の影響が少なく、板厚減少率が大きくなると熱処理温度の上昇にともない収縮率が大きくなる。これは、板厚減少率が小さい試料においては収縮反応の大部分が300°C以下の低温域で進み300°C以上の高温域での反応が少ないのに対し、板厚減少率が大きい試料においては収縮反応のかなりの部分が300°C以上の高温域で進行することを示している。この高温域での収縮反応を典型的に示しているのが板厚減少率50%の場合のSUS301, SUS304J1および高Mnステンレス鋼である。特に、SUS304J1は収縮率そのものは低いが、300°Cから500°Cの間で起きる収縮はSUS301や高Mnステンレス鋼と等しい。また、高Mnステンレス鋼の場合、板厚減少率10%でその収縮率はSUS301より小さいが、板厚減少率が50%になると収縮率はSUS301に等しくなり、その温度依存性が大きくなる。この鋼種は加工誘起変態により ϵ マルテンサイトが生成し、加工量とともに増加するので、これらの収縮現象は ϵ マルテンサイトと関係すると思われる。

3・3 硬さと収縮

室温にて30%圧延した各試料の熱処理前後の硬さをTable 3に、収縮率と圧延状態でのビッカース硬さの関係をFig. 3に示す。 α' マルテンサイトが多く存在するサブゼロ硬化型ステンレス鋼は離れた位置にくるが、その他のオーステナ

Table 3. Hardness of cold rolled and low temperature annealed specimens. (HV)

No.	Grade	Rolled	300°C	400°C	500°C
1	301	459	460	458	426
2	304	371	383	388	374
3	Cu-304	353	367	367	369
4	316	315	315	313	321
5	310S	281	293	294	302
6	304J1	355	372	387	361
7	Hi.Mn	430	453	452	457
8	XM7	295	307	312	320
9	Sub-Z.	512	497	535	464
10	630	453	492	510	459
11	430	250	257	256	248
12	Ni	199	205	201	185
13	Cu	108	42	40	40
14	Steel	171	180	180	167

Specimens are reduced 30% in thickness at room temperature.

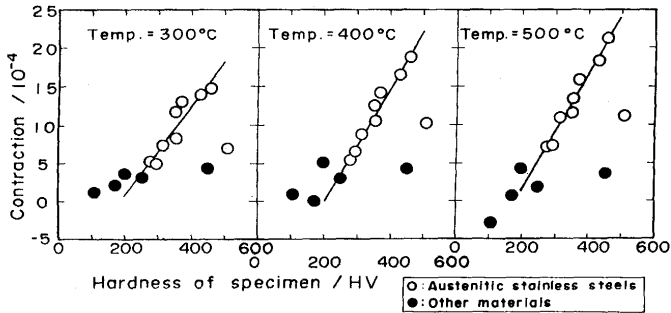


Fig. 3. Relationship between contraction during annealing and Vickers hardness of specimen reduced by 30% at room temperature.

イト系ステンレス鋼はいずれの熱処理温度でもかなり良い相関を示す。これに対し、熱処理による硬さの上昇は高Mnステンレス鋼やSUS304J1が大きく、SUS301やSUS316が小さい。収縮率の大きい高Mnステンレス鋼とSUS301で異なる挙動を示すので、収縮率と硬さの上昇との間により相関は見られない。

板厚減少率が一定の材料間で、収縮率は硬さと強い相関を示し、硬さに強い影響を与える α' マルテンサイト量との関係が弱いことから、収縮に関係する硬さはミクロ的な応力の影響を受けていると考えられる。さらに、収縮現象が圧延材だけでなく、単軸引張りを与えた材料にも認められる¹⁰⁾ことから、加工後の除荷過程に形成される圧縮応力などが収縮に関与しているものと推定される。

3・4 圧延温度と収縮

SUS301, SUS304, Cu添加SUS304の3鋼種を室温, 50°C, 100°Cの3温度で30%圧延し、低温熱処理で得られる収縮との関係を調べた。収縮率と圧延温度の関係をFig. 4に、各試料の圧延状態での α' マルテンサイト量をTable 4に示す。一般に加工温度が高いほど α' マルテンサイト変態量は減少するが、収縮率はかならずしも減少しない。

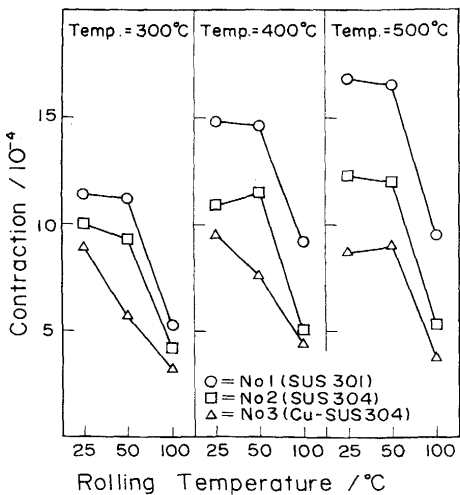


Fig. 4. Relationship between contraction during annealing and rolling temperature. Specimens were reduced by 30% in thickness.

Table 4. Amount of α' Martensite after rolled in different temperature. (vol%)

No.	Grade	Rolling Temperature		
		25°C	50°C	100°C
1	301	22	13	2.0
2	304	12	3.5	0.5
3	Cu-304	3.3	0.8	0.2

SUS301とSUS304はともに、いずれの熱処理温度でも室温圧延材と50°C圧延材の収縮率がほぼ等しく、100°C圧延材で急速に収縮率が減少する形態を示す。これに対して、Cu添加SUS304は500°C処理ではSUS304と同じ傾向を示すが、それより低温の熱処理では圧延温度が上昇するにしたがい収縮率が減少する。

一方、300°C以上での収縮率の増加に注目すると、SUS301は圧延温度によらず大きな増加を示し、SUS304はどの圧延温度でも少しの増加にとどまる。また、Cu添加SUS304は50°C圧延材のみ収縮率の増加が大きい。

α' マルテンサイト量が大きく減少する100°C圧延材の収縮率は大きく減少するが、高温での収縮に影響を及ぼさないこと、50°C圧延材も α' マルテンサイト量が減少するが、室温材と等しい収縮率を示すことから、 α' マルテンサイトが収縮に直接関与しないことがうかがえる。

3・5 熱膨張測定

収縮における熱処理温度依存性を別の観点から調べるために熱機械分析装置により熱膨張測定をおこなった。50%と15%圧延したSUS304の圧延方向の熱膨張率と熱膨張の変化をFig. 5, 6に示す。1回目の昇温時に測定される熱膨張係数と2回目に測定される熱膨張係数に明確な相違がある。2回目の熱膨張係数は温度の上昇にもなって単調に大きくなるのに対し、1回目の熱膨張は70°C付近から低下し、130°C付近で極小値をとり、200°Cまでかなり回復し、200°C以上では単調に増加するものの2回目より低い値となる。板厚減少率の影響を見ると、15%圧延材の熱膨張係数は130°Cで極小値が極めて低く2回目との差は大きいものの、200°C以上では2回目との差が小さくなっている。これに対し、50%圧延材では130°Cでの極小値はそれほど低くならず、200°C以上での2回目との差が大きくなっている。15%圧延材では100°C~200°Cの低温域で大きく収縮し、50%圧延材では200°C以上で大きく収縮することを表している。これは1時間熱処理試験で得られた、板厚減少率の低い材料より高い材料の方が熱処理温度依存性が大きいという結果と良い一致を示しており、収縮現象がいくつかの複合プロセスを経ていることを示唆している。なお、2回目以降の熱膨張は2回目と同じ軌跡を描くこと、および最高温度で1回目と2回目の熱膨張が等しくなることから、1回目の昇温過程で観測される反応は1回の熱サイクルの昇温過程で完了すると判定される。熱膨張は6°C/minの昇温速度で測定して

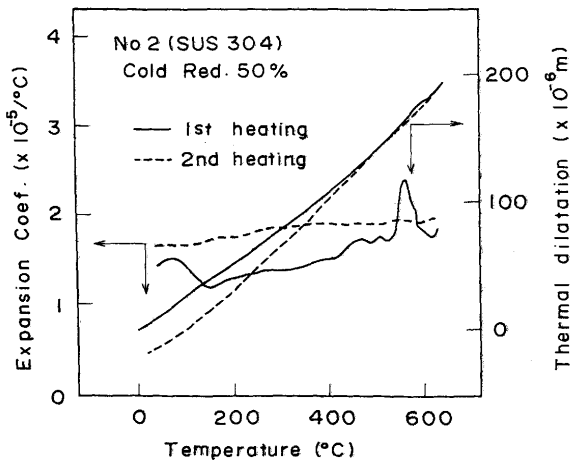


Fig. 5. Expansion coefficient and thermal dilatation of 50% reduced SUS304 parallel to the rolling direction.

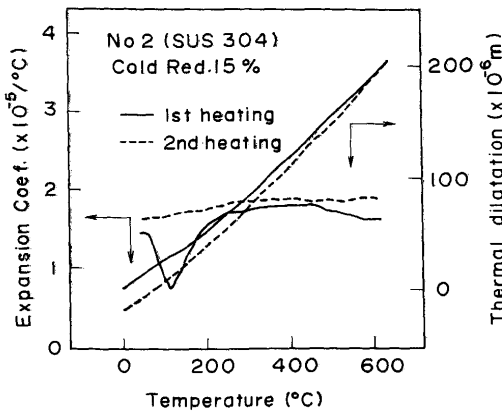


Fig. 6. Expansion coefficient and thermal dilatation of 15% reduced SUS304 parallel to the rolling direction.

いることから、収縮反応は極めて短時間に完了することを示している。

4. 考察

材料が熱処理中に微小な収縮を起こす機構については次のようなさまざまな形態が考えられる。

- ① 予ひずみを与えた鋼の炭化物析出による収縮¹¹⁾。
- ② α' マルテンサイトの焼戻しによる収縮¹²⁾。
- ③ α' マルテンサイトのオーステナイトへの逆変態による収縮¹³⁾。
- ④ ϵ マルテンサイトの逆変態による収縮¹⁴⁾。
- ⑤ 応力緩和による収縮⁴⁾。

このうち、①炭化物の析出による収縮については、炭素量レベルあるいは熱処理温度から見ても炭化物の析出量が少なく、主要因とならない。② α' マルテンサイトの焼戻しによる収縮については、低炭素材であるので焼戻しによるマルテンサイトの体積変化が小さく、マルテンサイトの存在

量自体少ないことから、主要因とはなりえない。③ α' マルテンサイトのオーステナイトへの逆変態による収縮については、逆変態温度が高温であることや、 α' マルテンサイト量と収縮に相関が認められないことから、これも主要因とはなりえない。したがって、残される有力な仮説は④ ϵ マルテンサイトの逆変態あるいは⑤応力緩和である。

一般に、オーステナイト系ステンレス鋼は加工誘起変態により α' マルテンサイトを生成する時、その中間相として ϵ マルテンサイトが生成する¹⁵⁾。そこで、 ϵ マルテンサイトの生成とも密接な関係をもつオーステナイトの積層欠陥エネルギーと収縮との対比を試みた。(2)式により算出した積層欠陥エネルギーの値と室温で30%圧延した試料の収縮率との関係をFig. 7に示す。なお、(2)式の積層欠陥エネルギー(SFE)の値はR.E.Schrammら¹⁶⁾の[Ni-Cr-Mn-Mo系]の式に藤倉ら¹⁷⁾の報告に基づきCuの係数を加え、算出した。単純にCuの項を加えたので積層欠陥エネルギーの絶対値と相違するが、鋼種間の比較に十分使用できると思われる。

$$\text{SFE}(\text{mJ}/\text{m}^2) = 16.7 + 2.1[\% \text{Ni} + 3 \times \% \text{Cu}] - 0.9[\% \text{Cr}] + 3.2[\% \text{Mn}] + 9.3[\% \text{Mo}] \quad \dots \dots \dots (2)$$

いずれの熱処理温度でも積層欠陥エネルギーの値と収縮率とはかなり良好な相関関係を示し、収縮に及ぼす鋼種の効果を、積層欠陥エネルギーで説明できることがわかる。

収縮が熱処理前に受けた加工の影響により異方性を示すことは、 ϵ マルテンサイトの逆変態によって引き起こされる形状記憶効果と対応しており、 ϵ マルテンサイトが収縮に関わっていることを支持する。また、300°C以上の収縮率の増加に鋼種による差があるにもかかわらず、いずれの熱処理温度でも積層欠陥エネルギーと収縮に良い相関が認められることから、高温域での収縮には積層欠陥エネルギーと関係する ϵ マルテンサイトの関与が示唆される。 ϵ マルテンサイトが少量存在する高Mnステンレス鋼の熱膨張を測定すると、収縮反応が200°C以上の高温領域で顕著である(Fig. 8)こと、および一般に ϵ マルテンサイトの逆変態が100数十°C~400数十°C広い温度域で起こること¹⁸⁾か

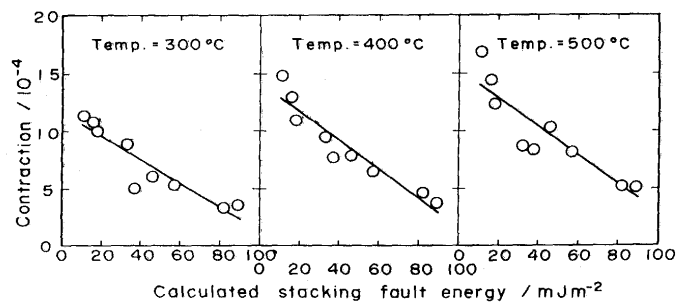


Fig. 7. Relationship between contraction during annealing and value of stacking fault energy calculated by eq.(2).

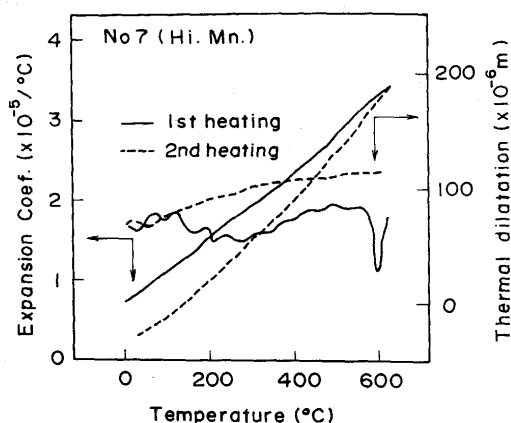


Fig. 8. Expansion coefficient and thermal dilatation of high manganese stainless steel.

らも、 ϵ マルテンサイトが関与していると考えることに矛盾がない。

しかし、室温以上の加工で ϵ マルテンサイトの存在を確認しているのはかなりオーステナイト安定度の低い鋼種のみであり¹⁹⁾²⁰⁾、SUS310SやSUSXM7などオーステナイト安定度の高い鋼種では、 ϵ マルテンサイトの存在を想定することは難しい。また、熱膨張測定で板厚減少率の低いSUS304の収縮の大半が200°C以下の低温で起きることや安定な鋼種の収縮が300°C以上であまり増加しないことも ϵ マルテンサイト逆変態と異なる形態である。

一方、オーステナイト系ステンレス鋼は室温で粘塑性挙動¹⁾を示すことから、収縮現象を応力緩和と結びつけることができる。岡田ら⁴⁾は応力緩和を堆積した転位が拡張転位の幅を増大しながら、平衡位置に向かって移動する現象と考えている。この説に従えば、溶質原子などとの相互作用により途中で止まっている転位が熱エネルギーを加えることにより再び動き、収縮をもたらしたことになる。本実験でも、SUS301、SUS304、Cu-304、SUS316、SUS304J1の5鋼種ではC+Nとともに、収縮量が増える傾向を示す。圧延幅方向の収縮が認められないことを含め、応力緩和が収縮に関与しているものと考えられる。

5. まとめ

オーステナイト安定度の異なる9種類のステンレス鋼を

冷間圧延し、300°Cから500°Cの温度で熱処理をした時に発生する収縮率を測定した結果、次の知見が得られた。

1. オーステナイト系ステンレス鋼は圧延状態で低温熱処理すると圧延方向にかなり大きく収縮するが、収縮量は鋼種により大きく変化する。
2. 一般に、加工度が大きいほど、加工温度が低いほど、硬さが高いほど、また熱処理温度が高いほど収縮率は大きくなる。
3. 積層欠陥エネルギーの低い鋼種ほど収縮率が大きくなる傾向があるが、 α' マルテンサイトとの相関は認められない。
4. 2, 3の結果および各温度での反応が短時間で完了することから ϵ マルテンサイトの逆変態や応力緩和が関与する反応と思われる。

文 献

- 1) 吉田総仁, 近藤 丈, 菊池義和: 日本機械学会論文集(A編), 54 (1988) 501, p.1151
- 2) 天藤雅之, 竹下哲郎, 中澤崇徳, 木村英隆, 阿保秀雄: 鉄と鋼, 79 (1993), p.98
- 3) K. Enami, S. Nenno and Y. Minato: Scripta Metallurgica, 5 (1971), p.663
- 4) 岡田 実, 渡辺統市: 日本金属学会誌, 22 (1958), p.440
- 5) 今井勇之進, 齋藤利生: 鉄と鋼, 49 (1963), p.780
- 6) 春日幸生, 神馬 敬, 渡辺三雄: 第42回塑性加工連合講演会, (1991), p.449
- 7) J. Tanioka, M. Katoh, T. Murakami and H. Arai: Proceeding of International Conference on Stainless Steel, Chiba, ISIJ, (1991), p.581
- 8) T. Angel: Journal of the Iron and Steel Institute, 177 (1954), p.165
- 9) 野原晴彦, 小野 寛, 大橋延夫: 鉄と鋼, 63 (1977), p.772
- 10) H. Aoyama, M. Tanaka, M. Tanaka and T. Sasaki: Proceeding of International Conference on Stainless Steel, Chiba, ISIJ, (1991), p.893
- 11) 水野博司, 西尾晴孝, 柳澤民樹: 電気製鋼, 53 (1982), p.241
- 12) 須藤 一, 田村今男, 西澤泰二: 金属組織学, p.187 [丸善]
- 13) 岡本正三, 小高良平: 日本金属学会誌, 18 (1954), p.392
- 14) 村上雅人, 鈴木洋夫: 日本金属学会春期大会講演概要, (1985), p.48
- 15) 片山哲也, 藤田広志: 日本金属学会誌, 52 (1988), p.935
- 16) R. E. Schramm and R. P. Reed: Metallurgical Transaction, 6A (1975), p.1345
- 17) 藤倉正国, 阿部直弘: 電気製鋼, 43 (1972), p.34
- 18) V.H. Schumann: Archiv das Eisenhüttenwesen, 38 (1967), p.647
- 19) C.J. Novak: Handbook of Stainless Steel, McGraw-Hill Book Co., 4-26
- 20) 深瀬幸重, 江波戸和男, 大久保延弘, 村尾誠一: 日本金属学会誌, 32 (1968), p.38