オーステナイト系ステンレス鋼の マルテンサイト変態に及ぼす極低温強磁場効果†

掛下知行* 福田 隆* 川村良雄* 佐分利敏雄*
金道浩一** 西村 新*** 山本純也***††

*大阪大学大学院工学研究科マテリアル科学専攻

**大阪大学極限科学研究センター

***核融合科学研究所装置技術研究系

J. Japan Inst. Metals, Vol. 61, No. 12 (1997), pp. 1326-1332

Effects of High Magnetic Field at Cryogenic Temperature on Martensitic Transformations in Austenitic Stainless Steels

Tomoyuki Kakeshita*, Takashi Fukuda*, Yoshio Kawamura*, Toshio Saburi*,
Koichi Kindo**, Arata Nishimura*** and Junya Yamamoto***††

*Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University, Suita 565

**Research Center for Materials Science and Extreme Conditions, Osaka University, Toyonaka 560

***National Institute for Fusion Science, Device Engineering Division, Toki 509-52

Effects of external fields, such as temperature, magnetic field, stress and combination of those fields have been examined on the onset of martensitic transformations in SUS304L, SUS304 and SUS316 austenitic stainless steels. Following results are obtained: an athermal $\gamma \rightarrow \epsilon' \rightarrow \alpha'$ martensitic transformation is not induced in all the steels, but an isothermal $\gamma \rightarrow \epsilon' \rightarrow \alpha'$ transformation takes place in SUS304L. The austenitic γ state in SUS304 and SUS316 exhibits an antiferromagnetic transition at about 40 and 30 K, respectively, and it may also exhibit an antiferromagnetic spin-flip under a magnetic field of about 3 MA/m at 4.2 K. Any magnetic field-induced martensitic transformation does not occur in the austenitic states of SUS304 and SUS316 even when the pulsed magnetic field up to 30 MA/m is applied in the wide temperature range between 4.2 and 290 K. On the other hand, in SUS304L which contains isothermally transformed ϵ' and α' martensites, the magnetic field-induced martensitic transformation from pre-existed ϵ' to α' martensites occurs at 4.2 and 77 K. All the steels easily show deformation-induced martensitic transformation. However, in all the deformed steels, magnetic field does not induce any martensitic transformation in the wide temperature range between 4.2 and 290 K. The above results, especially concerned with the effect of magnetic field on the martensitic transformation, are discussed in view of the magnetic energy previously proposed.

(Received May 28, 1997)

Keywords: austenitic stainless steel, SUS304L, SUS304, SUS316 martensitic transformation, isothermal process, susceptibility, Néel temperature, magnetic field, deformation, morphology

I. 緒 言

オーステナイト系ステンレス鋼は、極低温における機械的性質が優れており、かつ、非磁性であることから、極低温、高応力、強磁場等の複合環境下における利用が増すものと考えられる。しかしながら、このような複合環境下におけるステンレス鋼の安定性⁽¹⁾⁽²⁾ならびに磁気的特性⁽³⁾に関する研究は極めて少ない。これまで、多くのオーステナイト系ステンレス鋼においてマルテンサイト変態(変態様式は $\gamma \rightarrow \epsilon' \rightarrow \alpha'$

であり、 γ ならびに ϵ' は非磁性で α' は強磁性である)が起ることが報告⁽⁴⁾⁽⁵⁾されており、この変態に及ぼす上述したような複合環境効果の研究は特に重要である。なぜならば、もしこの変態がこれら環境下で促進されるとすれば、変態に伴う体積変化のため(4%程度)クラックの発生および成長が生じ、その結果、最終的には材料が破壊することが考えられるからである。また、変態に伴い磁気的性質が変化するとすれば実用上大きな問題である。この意味において、オーステナイト系ステンレス鋼のマルテンサイト変態に及ぼす極低温、応力、強磁場の効果ならびにそれら複合環境の効果を明確にすることは極めて重要である。そこで、本研究では、典型的なオーステナイト系ステンレス鋼である SUS304L, SUS304

† 1996年10月日本金属学会秋期大会において一部発表
†† 1997年1月逝去(Passed Away in January, 1997)

ならびに SUS316 鋼の複合環境下における相安定性を明らかにすることを目的とする。

II. 実験方法

本研究で用いた SUS304L, SUS304 ならびに SUS316 ステンレス鋼の化学組成を **Table 1** に示す。これらのステンレス鋼から、以下に述べる種々の実験に適する大きさの試料を切り出した。切り出した試料はいずれも 1323 K で 1.8 ks 溶体化処理を施し、溶体化処理の際に生じた試料表面の酸化膜を電解研磨(研磨液; エタノール85%と過塩素酸15%の混合液)により除去した。得られたこれらの試料について以下の実験を行った。

まず、熱誘起 $\gamma \rightarrow \epsilon' \rightarrow \alpha'$ 変態(時間にあらわに依存しない非等温マルテンサイト変態)の有無を調べるために、直流四端子法による電気抵抗測定(試料の大きさ: 2 mm × 12 mm × 0.5 mm)を行った。また、時間に依存する等温 $\gamma \rightarrow \epsilon' \rightarrow \alpha'$ 変態の有無を調べるために、77 K で等温保持実験(試料の大きさ: 2 mm × 12 mm × 0.5 mm)を行った。保持時間は、0, 10¹, 10², 10³, 10⁴, 10⁵, 10⁶ s とした。等温保持により生成した α' の量を磁化測定⁽⁶⁾により求めた。さらに、これら試料の磁性を磁化振動法(VSM)による帯磁率測定により調べた。試料の大きさは 3 mm × 4 mm × 0.5 mm とした。

磁場誘起 ϵ' および α' が生成するか否かを調べるために、これら試料に強磁場を印加し、磁化挙動を調べた。用いた磁場は阪大極限科学研究センターのパルス強磁場で、その最大磁場は約 30 MA/m である⁽⁷⁾。また、測定温度は、290, 77, および 4.2 K とした。なお、試料の大きさは 2 mm × 12 mm × 0.3 mm であり、これは強磁場印加に伴うジュール熱による発熱や表皮効果が無視できるように調整し決めたものである。

加工誘起により、 ϵ' および α' が容易に生成することは既に報告⁽⁴⁾⁽⁵⁾があるので、本研究では与えた歪と α' 量の関係を調べた。歪は引張試験機で与え、その大きさは 1, 3, 5, 10, 15, 25, 30% とした。その他に、破断まで変形した試料も準備した。歪速度は約 $2.6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ で、歪を与えた温度は 77 K である。生成した α' の量は磁化測定により求めた⁽⁶⁾。

複合環境下、すなわち加工を受けた材料の極低温強磁場下、におけるマルテンサイト変態について調べるために、予め引張変形を与えた試料を 77 K あるいは 4.2 K に保持し強

磁場を印加して、その磁化挙動を調べた。

さらに、上で述べた条件下で生成したマルテンサイトの組織を走査型電子顕微鏡(SEM, HITACHI X-650S)ならびに電子顕微鏡(H-800, 加速電圧 200 kV)で観察した。電解研磨液は過塩素酸(15%)とエチルアルコールの混合液である。

なお、オーステナイト系ステンレス鋼は多元素で構成されており、どの元素がどの程度磁気モーメントを有するのかわからない。そこで、本研究では、構成元素すべてが磁気モーメントを持つとして 1 原子当たりの平均磁気モーメント($\mu_B/\text{f.u.}$ (f.u.: formula unit))を求め、これを試料の磁化とした。

III. 実験結果

1. マルテンサイト変態に及ぼす温度効果

SUS304L, SUS304 ならびに SUS316 における電気抵抗を室温から 4.2 K まで測定した。例として SUS316 の結果を **Fig. 1** に示す。この図からわかるように、電気抵抗は通常の金属と同様に温度の降下とともに直線的に減少し、昇温過程と降温過程の間に温度ヒステリシスは存在しない。これらのことから、非等温 $\gamma \rightarrow \epsilon' \rightarrow \alpha'$ 変態が起きないことがわかる。この結果は、SUS304L ならびに SUS304 でも同様である。次に、これら合金で等温 $\gamma \rightarrow \epsilon' \rightarrow \alpha'$ 変態が起きるか否かを調べるために 77 K で等温保持実験を行った。保持時間は 10¹, 10², 10³, 10⁴, 10⁵, 10⁶ s とした。生成した α' の量は磁化測定により求めた。この方法で α' の量を求めることができるのは、前述したように γ ならびに ϵ' が非磁性であるのと異なり、 α' は強磁性を示し、その自発磁化がその量に比例するからである。**Fig. 2** に SUS304L の等温保持をしていない試料(図中に A と示した)と 77 K で 10⁶ s 等温保持した試料(図中に B と示した)の磁化曲線を示す。測定温度は 290 K である。測定温度は保持温度(77 K)ではなく 290 K

Fig. 1 Electrical resistivity as a function of temperature in SUS316.

Table 1 Compositions of SUS304L, SUS304 and SUS316. (mass%)

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
SUS304L	0.023	0.48	1.07	—	0.005	8.47	18.20	—	Bal.
SUS304	0.06	0.67	1.01	0.029	0.009	8.50	18.10	—	Bal.
SUS316	0.052	0.67	1.49	0.033	0.005	10.71	16.43	2.12	Bal.

Fig. 2 Magnetization curves at 290 K for SUS304L; A is the specimen without isothermal holding at 77 K and B is the specimen with isothermal holding at 77 K for 10^6 s.

Fig. 3 Amount of α' martensite as a function of holding time at 77 K for SUS304L.

であるが、この温度での磁化曲線を解析することにより 77 K で生成した α' の量を正確に求めることができる。良く知られているように α' の逆変態温度は室温以上にあるので、290 K では 77 K で生成した α' は保持されるからである。これら磁化曲線からわかるように等温保持をしていない試料には自発磁化(自発磁化の大きさは、磁化を高磁場側から直線近似して得られるゼロ磁場での値として評価している)が観察されないが、 10^6 s 等温保持した試料にはそれが観察される。このことは、SUS304L では潜伏時間を伴うマルテンサイト変態、すなわち等温 $\gamma \rightarrow \epsilon' \rightarrow \alpha'$ 変態が存在することを示している。一方、同様な実験を SUS304 ならびに SUS316 において行ったが、いずれにおいてもこのような等温マルテンサイト変態は観察されなかった。生成した α' の量を解析式⁽⁶⁾を用いて計算し、得られた α' の量と保持時間との関係を Fig. 3 に示した。この図から、生成量は保持時間とともに

Fig. 4 SEM micrograph of SUS304L after isothermal holding at 77 K for 10^6 s, where α' martensites are observed in ϵ' martensite.

に増加することがわかる。

また、この 10^6 s 保持した試料の SEM 観察を室温で行った。観察結果を Fig. 4 に示す。以前に発表されたオーステナイト系ステンレス鋼の組織観察結果⁽⁴⁾⁽⁵⁾を参照すると、この図の中央の白色の部分 ϵ' で、この ϵ' の組織の中にある黒い線状の部分 α' であることがわかる。

SUS304L, SUS304 ならびに SUS316 の磁性を調べるために帯磁率測定を行った。得られた測定結果のうち、SUS304 ならびに SUS316 の帯磁率の温度依存性を Fig. 5(a), (b) に示す。印加磁場は 7.94×10^{-2} MA/m である。いずれのステンレス鋼においても、帯磁率の温度依存性にカスプが見られる。これらのカスプの頂点に対応する温度が、母相のネール温度(SUS304 は約 40 K, SUS316 は約 30 K)であり、そこで常磁性-反強磁性磁気転移を示すことを意味している。一方、SUS304L ではこのようなカスプは観察されなかった。これは、強磁性を示す α' が生成し、その帯磁率が母相のそれに比べて著しく大きいので、カスプがマスクされるためであると考えられる。

2. マルテンサイト変態に及ぼす磁場効果

77 K で 10^6 s 保持して等温 ϵ' ならびに α' を生成させた SUS304L に、4.2, 77 ならびに 290 K で強磁場を印加することにより磁場誘起 $\gamma \rightarrow \epsilon' \rightarrow \alpha'$ 変態が起きるかどうかを調べた。なお、 10^6 s 間保持した試料を用いたのは以下に述べる理由のためである。すなわち、試料を設定し磁場を印加するまでに要する 1.8 ks の間に等温 ϵ' ならびに α' が生成する可能性があるが、その量は本実験での帯磁率測定では認められない程少ないことがわかっている。したがって、磁場印加に

Fig. 5 Magnetic susceptibility as a function of temperature for SUS304, (a), and SUS316, (b).

より α' が生成した場合、その原因は測定までの 1.8 ks の等温保持によるのではなく磁場による効果であると言える。

Fig. 6 に SUS304L に 77 K で強磁場を印加したときの磁化曲線を示す。図中の A は強磁場を印加する前に低磁場 (1.6 MA/m) を印加して得た磁化曲線であり、図中の B は強磁場 (27.8 MA/m) を印加した後に低磁場 (1.6 MA/m) を印加して得た磁化曲線である。これら両曲線からわかるように、強磁場を印加した後の自発磁化は強磁場を印加する前のそれよりも大きい。このことは、磁場印加で α' が誘起されたことを示している (SEM 観察から、誘起した α' は母相 γ には見られないので、既存の ϵ' の中に生成している)。前と同様の方法で算出した α' の量は、磁場印加により 0.5% 程度増加していた。同様な結果は 4.2 K の場合で強磁場を印加した場合でも得られるが、290 K の場合には異なっている。この温度では、本実験で用いた最大磁場、30 MA/m を印加しても α' は生成しない。また、等温保持をしていない SUS304L を 150 K (この温度では、等温変態するにはかなりの時間が必要であるため γ 単相である) に保持し強磁場を印加したが、マル

Fig. 6 Magnetization curves at 77K for SUS304L after isothermal holding at 77 K for 10^6 s; (A) and (B) are magnetization curves measured before and after applying high magnetic field of 27.8 MA/m, respectively.

Fig. 7 Magnetization curves of SUS316 at 4.2 K, (a), and at 77 K, (b), and their dM/dH curves at 4.2 K, (c), and at 77 K, (d).

テンサイト変態は起こらなかった。これらの理由については後の考察で述べる。

SUS304L とは異なり、SUS304 ならびに SUS316 では、いずれの温度でも磁場誘起 $\gamma \rightarrow \epsilon' \rightarrow \alpha'$ 変態は起こらなかった。しかし、SUS304 ならびに SUS316 の 4.2 K と 77 K で強磁場磁化曲線を詳細に調べると、いずれのステンレス鋼においても 4.2 K の磁化曲線が 77 K のそれと異なっている。**Fig. 7** に SUS316 の測定結果を示す。**Fig. 7(a)** は 4.2 K、**(b)** は 77 K で測定した強磁場磁化曲線である。これら

の図からわかるように、強磁場を印加しても、 α' 生成に伴う磁化の変化は見られない。しかしながら、4.2 K の磁化曲線を詳しく調べると、77 K では見られなかったクニックが、約 3 MA/m 付近に見られる。よりわかり易くするために(a)ならびに(b)の微分磁化曲線をそれぞれ(c)ならびに(d)に示す。これらの図において、4.2 K の磁化曲線には約 3 MA/m 付近にピークがあり、77 K のそれにはピークがないことがわかる。この現象は、先に示したようにこの合金のネール点が 30 K であることを考慮すると、反強磁性磁気秩序のスピントリップによるものであると考えられる。この現象は SUS304 においても観察された。

3. マルテンサイト変態に及ぼす加工の効果

SUS304L, SUS304 ならびに SUS316 を 77 K でそれぞれ 1, 3, 5, 10, 15, 25, 30% の歪を与えた試料および破断するまで変形した試料を作製した。これらの試料に生成した α' の量を磁化測定により求めた。例として、77 K で 5% (図中に A で示した) ならびに 15% 引張変形を与えた SUS304L 試料 (図中に B で示した) の 77 K における磁化曲線を Fig. 8 に示す。この図からわかるように、いずれの磁化曲線においても強磁性 α' による自発磁化が観察される。また、その自発磁化の大きさは与えた歪が大きいくほど大きい。このことは、加工によりマルテンサイト変態が容易に起きることを示している。この結果は、いずれのステンレス鋼においても同様である。磁化測定により求めた α' の量を与えた歪で整理した結果を Fig. 9 に示す。この図からわかるように、加工誘起 α' の量は、いずれのステンレス鋼においても与えた歪に比例して増加する。

加工誘起したマルテンサイトの組織を室温で SEM 観察した結果の一例として、Fig. 10 に 77 K で 1% の歪を与えた SUS304L の SEM 写真を示す。この写真からわかるように母相に筋状組織が数多く存在している。この筋状組織はこれ

Fig. 8 Magnetization curves at 77 K for SUS304L deformed at 77 K by 5% (A) and 15% (B).

Fig. 9 Amount of α' martensite as a function of strain given at 77 K in SUS304L (●), SUS304 (■) and SUS316 (▲).

Fig. 10 SEM micrograph of SUS304L deformed by 1% at 77 K.

までの研究で α' マルテンサイトであることがわかっている (母相のすべりもある⁽⁴⁾⁽⁵⁾)。この組織をさらに詳しく調べるために電子顕微鏡観察した結果を Fig. 11 に示す。この写真で見られるバンド状の組織が α' である。この α' の中に小さなブロック状の領域が観察される。このブロック状の領域から得た回折図形は bct で指数付けされることから、この領域は α' 晶であることがわかる。

4. マルテンサイト変態に及ぼす複合環境の効果

複合環境下すなわち加工を受けた材料の極低温強磁場下におけるマルテンサイト変態について調べるために、予め引張変形を与えた SUS304L, SUS304 ならびに SUS316 に 77 K

あるいは 4.2 K に保持し強磁場を印加して、その磁化挙動を調べた。Fig. 12 に 77 K で 10% 引張変形を与えた SUS304L の 4.2 K における磁化曲線を示す。(a) は低磁場 (4.5 MA/m), (b) は強磁場 (27.8 MA/m), (c) は強磁場印加後に低磁場 (4.5 MA/m) を印加したときの磁化曲線である。(b) からわかるように強磁場を印加しても磁化の急激な増加は見られない。このことは、磁場により α' 変態が誘起されないことを示している。この結果は、強磁場印加前後の磁化曲線 ((a), (c)) が全く一致することからも確かめられる(もし、磁場により強磁性 α' が誘起されるなら自発磁化が変化するため、磁場印加前後の磁化曲線は異なるはずである)。同様な結果は 77 K あるいは 4.2 K で 10%, 15%, 30% 引張変形

を与えた試料および破断まで変形した試料においても得られた。また、これらの結果は SUS304 ならびに SUS316 でも同様であった。

ところで、この結果の中で SUS304L に関する結果は少し奇妙である。というのは、Fig. 6 で説明したように熱誘起した ϵ' および α' が存在する試料に強磁場を印加すると α' が ϵ' 晶の中にさらに誘起されるが、上述したように加工誘起した ϵ' および α' が存在している試料に強磁場を印加しても新たに α' は誘起されないことである。この違いは考察で述べる。

IV. 考 察

本研究で得られた実験結果の中で、以下に示す 2 つの特徴的な事項に関して考察する。

(1) SUS304L, SUS304 ならびに SUS316 の母相 γ の単相試料に強磁場を印加しても $\gamma \rightarrow \epsilon' \rightarrow \alpha'$ 変態は生じない。

(2) 等温保持して ϵ' および α' を生成させた SUS304L 試料に強磁場を印加するとわずかではあるが新たに α' が生成する。一方、加工により ϵ' および α' を生成させた SUS304L 試料に強磁場を印加しても、新たに α' は生成しない。

これら特徴的な現象を、母相とマルテンサイト相の磁場下でのエネルギー変化の観点から説明を試みる。一般に磁場を印加した場合、母相とマルテンサイト相の Gibbs 自由エネルギーは変化し、その変化は以下の式で表されることが知られている⁽⁸⁾。

$$\Delta G(T) = -\{M_0^p(T) - M_0^m(T)\} \cdot H - 1/2 \cdot \chi_{\text{hf}}^p(T) \cdot H^2 + \epsilon_0 \cdot (\partial \omega / \partial H) \cdot H \cdot B, \quad (1)$$

ここで $\Delta G(T) (= G^p(T) - G^m(T))$ は温度, T , における母相の Gibbs 自由エネルギー ($G^p(T)$) とマルテンサイトのそれ ($G^m(T)$) との差である。また, M_0^p は母相の自発磁化, M_0^m はマルテンサイトの自発磁化, H は磁場強度, χ_{hf}^p は母相の高磁場帯磁率, ϵ_0 はマルテンサイト変態時の体積変化,

Fig. 11 Bright field image of TEM micrograph for SUS304L deformed at 77 K by 1% and the diffraction pattern taken at the area indicated by a circle.

Fig. 12 Magnetization curves at 4.2 K for SUS304L deformed by 10% at 77 K; (a) in low magnetic field, (b) in a high magnetic field of 27.8 MA/m, (c) in low magnetic field but once a high magnetic field of 27.8 MA/m is applied prior to measurement.

ω は母相の強制体積磁歪, B は母相の体積弾性率を表す. この式(1)の右辺の第1項, 第2項および第3項はそれぞれ静磁エネルギー, 高磁場帯磁率ならびに強制体積磁歪によるエネルギーを表している. 本研究で用いたステンレス鋼はインバー効果を示さないで強制体積磁歪による効果は無視できる. また, 高磁場帯磁率の値も小さいのでこれも省略することができる. したがって, 第一項の静磁エネルギー差による項を考慮するだけで良い. マルテンサイト変態を起こすには G^m が G^p よりも小さくならなければならない. このため右辺の静磁エネルギー差が正の値になることが必要となる. ところで, 初めに述べたように本研究で用いたオーステナイト系ステンレス鋼のマルテンサイト変態様式は $\gamma \rightarrow \epsilon' \rightarrow \alpha'$ であり, γ ならびに ϵ' は非磁性で α' は強磁性である. このことを考慮すると母相と ϵ' マルテンサイトの静磁エネルギーの差は0(厳密には0ではないがほとんど無視できる値となる)となり, その結果, 磁場誘起 $\gamma \rightarrow \epsilon'$ マルテンサイト変態は起きないことになる. したがって, 引き続き起こる $\epsilon' \rightarrow \alpha'$ マルテンサイト変態も生じないことになる. これが, 上述した(1)に対する説明である.

次に, (2)の説明を以下に示す. まず等温保持した試料には前に述べたように $\gamma \rightarrow \epsilon' \rightarrow \alpha'$ マルテンサイト変態が生じている. ϵ' は非磁性で α' は強磁性であるので静磁エネルギーの差は正となる. したがって, この状態の試料に磁場を印加すると, 既存の ϵ' から α' が誘起される可能性があり, これは本研究で実際に観察された. しかしながら, Fig. 11 ならびに12で示したように加工した試料においても $\gamma \rightarrow \epsilon' \rightarrow \alpha'$ 変態が生じているので, さらに磁場を印加すれば磁場誘起 $\epsilon' \rightarrow \alpha'$ 変態がおきるはずである. 実際には, この変態は観察されないので, 静磁エネルギーだけで, (2)の現象を解釈することは困難である. 一つの可能性として以下のことが考えられる. すなわち, 本研究の電子顕微鏡観察において, 加工誘起 ϵ' 晶は大きいもので幅が約 $0.5 \mu\text{m}$ であるのに対し, 熱誘起 ϵ' 晶はそれ以上のものが観察されたことから判断して, 熱誘起 ϵ' 晶は加工誘起 ϵ' 晶よりも大きいと考えられる. もしそうであれば, 一般に同じ組成でも結晶粒の小さいものほどマルテンサイト変態温度は低くなり(これは変態に要する過冷度が大きくなることに対応する), マルテンサイト変態が起きにくくなることが知られていることから考え, α' は加工誘起 ϵ' よりも熱誘起 ϵ' からの方が生じ易いことになる. このように考えると, 本研究において, ほぼ同じ磁場エネ

ギーを与えているにもかかわらず磁場誘起 $\epsilon' \rightarrow \alpha'$ 変態が起きたり起きなかったりするものは, ϵ' 晶の大きさの相違により変態に要する過冷度が変化したためと考えられる. したがって, α' を加工誘起 ϵ' から磁場誘起するには, それを熱誘起 ϵ' から磁場誘起するよりも大きな磁場(本実験での最大磁場より大きな磁場)が必要であると考えられる. この考えの妥当性は, 今後の課題である.

V. 結 言

本研究で得られた結果は以下のように要約される.

- (1) SUS304L, SUS304 ならびに SUS316 は非等温 $\gamma \rightarrow \epsilon' \rightarrow \alpha'$ 変態を示さない. SUS304L は SUS304 ならびに SUS316 とは異なり, 等温 $\gamma \rightarrow \epsilon' \rightarrow \alpha'$ 変態を示す.
- (2) SUS304 ならびに SUS316 の母相は常磁性-反強磁性磁気転移を示す. それらのネール温度は約 40 K ならびに 30 K である. また, これらステンレス鋼は約 3 MA/m 付近の磁場(4.2 K)で反強磁性磁気秩序のスピンフリップを起こすものと考えられる.
- (3) 等温 ϵ' および α' が生じた SUS304L に強磁場を印加すると新たに $\epsilon' \rightarrow \alpha'$ 変態が誘起される(77 K, 4.2 K). 一方, SUS304 ならびに SUS316 では磁場誘起 $\gamma \rightarrow \epsilon'$ および $\epsilon' \rightarrow \alpha'$ 変態は生じない.
- (4) SUS304L, SUS304 ならびに SUS316 では, 低温での加工誘起 $\gamma \rightarrow \epsilon'$ および $\epsilon' \rightarrow \alpha'$ 変態が生じるが, その後の磁場印加では $\gamma \rightarrow \epsilon'$ および $\epsilon' \rightarrow \alpha'$ 変態は誘起されない.

文 献

- (1) S. Murase, S. Kobatake, M. Tanaka, I. Tashiro, O. Horigami, H. Ogiwara, K. Shibata, K. Nagai and K. Ishikawa: Fusion Engineering and Design, **20**(1993), 451.
- (2) J. W. Chan, D. Chu, A. J. Sunwoo and J. W. Morris, Jr.: Cryogenic Engineering (Materials), **38**(1992), 55.
- (3) Y. Endo and Y. Ishikawa: J. Phys. Soc. Jpn., **30**(1971), 1614.
- (4) B. Cina: J. Iron Steel Inst., **177**(1954), 406.
- (5) R. P. Reed: Acta Met., **10**(1962), 865.
- (6) T. Kakeshita, K. Shimizu, T. Sakakibara, S. Funada and M. Date: Trans. JIM, **24**(1983), 748.
- (7) M. Date, M. Motokawa, K. Okuda, H. Hori and T. Sakakibara: Physics High Magnetic Fields, Ed. by S. Chikazumi and N. Miura, Spring, New York, (1981), 44.
- (8) T. Kakeshita, K. Shimizu, S. Funada and M. Date: Acta Metall., **33**(1985), 1381.