

討17 鉄マルテンサイトの格子欠陥と変形挙動

京都大学工学部 田村今男

1. はじめに 表1は鉄マルテンサイトの特徴の相互関係を概括的に示したものである。転位密度の高い転位マルテンサイトと、部分的あるいは全部に変態双晶のある双晶マルテンサイトがある。一般にオーステナイトが安定で M_s 点が低く(大体室温附近以下)、しかもそのオーステナイトの積層欠陥エネルギーがあまり低いとき双晶マルテンサイトが生成されるよう

表1 鉄マルテンサイト変態の特徴

晶界面	結晶方位関係	変態の進行*	マルテンサイト葉の形態	格子欠陥	M_s 点	オーステナイトの積層欠陥エネルギー	鋼種
{111} $_{\gamma}$	KS	S	塊状非はlath	転位	高	低	低碳素鋼 Mn鋼
{225} $_{\gamma}$	KS	S非はU	lath非はレンズ (mid-ribあり)	転位 部分双晶	中	低非は中	中高炭素鋼 ステンレス鋼 Ni鋼
{259} $_{\gamma}$	N	U	レンズ(mid-ribあり) または 板状(mid-ribなし)	部分双晶 非は 完全双晶	低	高	高Ni鋼 極高炭素鋼 高Ni-C鋼

* Sはしゅう動変態, Uは急転変態

である。これらが変形するときすべりで変形したり、双晶で変形したりする。強度とは変形に対する抵抗であるから、これらの変形挙動はマルテンサイトの強さについて考えるとききわめて重要である。

2. 転位マルテンサイトの変形様式と加工硬化 田村ら¹⁾はFe-7.6%Ni-12.7%Cr-0.38%Cマルテンサイトを室温と液体窒素温度で加工した。このマルテンサイトは転位密度の高いlathマルテンサイトで、これらの温度で加工しても変形双晶らしいものは発見できず、全部すべりで変形したものと考えられる。そしてフェライトを加工したときと同じような加工硬化挙動を示した。吉村ら²⁾もFe-6.27%Ni-12.7%Cr-0.38%Cマルテンサイトを室温で加工したが、透過電顕で変形双晶らしいものは認められず、転位だけを観察している。

3. 双晶マルテンサイトの変形挙動と加工硬化

3.1. 一般的傾向 Fe-Ni-C系マルテンサイトでNiがかなり高く M_s 点が室温以下となると、レンズ状のmid-ribのある部分双晶マルテンサイトが生成し、 M_s 点が下るに従って双晶領域が広くなり、 M_s 点が -150°C 以下になるとmid-ribのない板状の完全双晶マルテンサイトが生成される。R.H. Richman³⁾によれば、Fe-Ni-C系双晶マルテンサイトにおいてC量が0.1~0.2%以下のときはすべりで変形し、0.2~0.4%Cの間ではすべりと双晶で変形し、0.4%C以上となると全部双晶で変形する(室温変形)。このような炭素量依存性はマルテンサイトの正方晶性(tetragonality)と密接な関係にある(後述)。もちろん低温になると0.1%Cでも液体窒素温度では双晶変形も混ってくる⁴⁾。

3.2. 双晶マルテンサイトのすべり変形 田村ら¹⁾はFe-32%Ni-0.004%C双晶マルテンサイトを室温で40%圧延して透過電顕観察を行なった。写真1(a)および(b)はそのときの組織と制限視野電子回折像を示す。→EPは変態双晶面($\bar{1}21$)のトレースを示し、↗EPは双晶と母相との共通のすべり面(011)ですべったトレースを示し、この方向に変態双晶の食い違いが観察される。このような場合、すべり方向は母相では(TIT) $_m$ 、双晶では $[\bar{1}\bar{1}1]_{\gamma}$ 方向にすべるわけで、變に変態双晶が存在するマルテンサイトがすべる場合、きわめて小間隔で次々とすべり方向を変えてゆかなければならない(写真1の場合約 70°)。

3.3. 双晶マルテンサイトの双晶変形 変態双晶が變に存在するマルテンサイトが双晶変形をするとき、変態双晶と変形双晶とがどのような関係にあるかということは、その変形機構、加工硬化、強度、破壊の問題と関連して非常に重要である。田村ら^{1),4)}はこの問題について系統的な研究を行なった。すなわちFe-7.56%Ni-0.44%C双晶マルテンサイトを室温で圧延加工すると、低加工度(数%)で変

態双晶に平行な変形双晶が現われ、加工度が上昇するに従って、変態双晶と交差するもの、変形双晶相互に交差するものも現われる(写真2)。これらの変形双晶と変形前から存在する変態双晶との間の関係を分類すると図1のようである。

図1(a)に示す関係は変態双晶と同じ面で同じ方向に変形双晶が生成したもので、このような変形双晶を生成することによって変態双晶が消滅してゆく。変形初期の小加工で変態双晶に平行に生成する変形双晶はこの種のものである。(b)に示す関係は両者の双晶面が異なり、剪断方向が同じ場合であり、(c)に示すものは双晶面も方向も異なる場合である。この場合交差線が屈折する。変形が進むに従って(b)、(c)のような変形双晶を作ると同時に変形双晶相互の交差もおこる。

図1(a)に示したような変形双晶が生成して変態双晶を消滅(detwinning)するような場合には軟化をおこす。すなわち双晶マルテンサイトが双晶で変形する初期には、図2に示すように数%の加工で加工軟化を示す。写真3はこのようなdetwinningをおこしたときの透過電顕組織で、変態双晶の幅が広がっている。加工度が大きくなると、多重双晶変形(multiple twinning)のために加工硬化をおこす。

4. 正方晶性(tetragonality)とマルテンサイトの強さ

4.1. マルテンサイトの正方晶性と双晶変形 マルテンサイト晶中で侵入型固溶原子(たいていの場合C原子)が選択的にある一つの八面体の位置にのみ位置すれば正方晶になる。すなわちC原子が規則配列することによって正方晶となる。

田村ら⁶⁷⁾は正方晶マルテンサイトが双晶変形する場合、双晶面 $\{112\}$ の $\{hkl\}$ の l 指数が2または2の面、すなわち (112) 、 $(11\bar{2})$ などにおいて優先的に起こることを提唱した。すなわち正方晶マルテンサイトにおいては、C原子は図3のX印の位置にあり(長軸はc)、このような結晶のFeおよびC原子の配列を(110)面に投影すると図4(a)⁶⁷⁾のようになり、その結晶が (112) 面で $(11\bar{1})$ 方向に双晶変形した場合も炭素原子はやはり一つの八面体位置に入り、安定に位置し得る。このような双晶変形はおこしやすい。ところがもしこのマルテンサイトのC原子が図3の△印の位置に入っていたとすると(長軸はbとなる)、(110)面へ投影された炭素原子の位置は図4(b)に示すようになる。すなわち図4(a)の場合と同じ (112) 双晶をおこすと、双晶内ではC原子位置は狭い所に無理に入った不安定な位置に入り込む。この位置は図5に示すような本本本で示される正規でない位置である。⁶⁷⁾ Mageeら⁶⁸⁾はこの位置をxenohedral位置と呼んでいる。また双晶剪断量も少しくなる。そのためこのような双晶変形はおこしにくい。

4.2. マルテンサイトの正方晶性と強さの関係 上述の事柄を裏返して考えると、C原子が規則配列した正方晶マルテンサイトにおいては双晶変形をおこす優先面があり、その面では低い応力で容易に双晶変形してしまう。ところが炭素原子が不規則に固溶した立方晶マルテンサイトにおいてはそのような優先面がなく、いかなる $\{112\}$ 面で双晶変形しても炭素原子の $\frac{2}{3}$ は正規でないxenohedral位置に入り込むことになり、そのような双晶変形の臨界剪断応力は高いであろうと考えられる。すなわち双晶変形はおこりにくく、すべり変形をおこすことになるであろう。もちろんすべり変形の臨界剪断応力に関係すると同時に、変形温度が低いとすべりの臨界剪断応力が急に上昇するばかりではなく、C原子の規則化の臨界温度以下になると正方晶になり、双晶変形するようになるであろう。とにかく同じ炭素量の場合、立方晶マルテンサイトは正方晶のそれよりも強いと考えられ、立方晶の状態でもできるだけ高炭素のマルテンサイトを作ることができれば一層強いマルテンサイトを得ることができると考えられる。

Fe-Ni-C合金でNi量とC量を適当に調節すると種々なMs点の合金を得ることが出来る。Mageeら⁶⁹⁾はこのMs点とマルテンサイトの形態との関係を図6⁶⁹⁾のように示した。そして針状(lath)マルテン

サイトは立方晶で、レンズマルテンサイトは正方晶であると考えている。そうすると M_s 点、 300°C 程度の合金では炭素量0.5%付近まで立方晶マルテンサイトであるといえる。いまマルテンサイトの耐力と炭素量の関係をとると、図7⁹⁾に示すように M_s 点の低いマルテンサイトでは低炭素で正方晶になり、 M_s 点の高いマルテンサイトは高炭素で正方晶になる。その遷移炭素量を矢印で示している。そしてその炭素量以上になると双晶変形をおこしてしまうので、耐力の上昇割合は小さくなる。そして高炭素まで立方晶を保持するマルテンサイトは非常に高い耐力(300 kg/mm^2)に達することを示した。

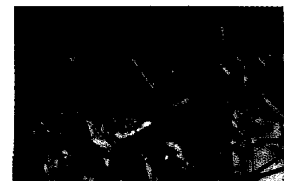
普通、マルテンサイトの正方晶性に関する説明¹⁰⁾では約0.25% C以上では正方晶性を示し、Magee⁹⁾の提唱するように0.5%も炭素を含むマルテンサイトが、たとえlath状であっても立方晶であるという確証はいまだなされていない(立方晶と正方晶の混在という考えもある)。

Magee⁹⁾はさらに立方晶マルテンサイトの臨界剪断応力を測定し、炭素量に依存することを認め、それはxeno-hedral位置に入り込むC原子が多くなるためであると考え、1at% C (約0.22 wt% C) 当り約 30 kg/mm^2 上昇することを示した。また八面体位置からxeno-hedral位置に入り込むときのエネルギーは約 2.39 eV であると推定した。

5. おすび 鉄マルテンサイトの格子欠陥とその変形挙動の関連について述べたあと、正方晶性と双晶変形、ひいてはマルテンサイトの強さとの関連について述べた。正方晶性の原因は普通のマルテンサイトの場合はC、Nの侵入型固溶原子によるわけである。従来、双晶変形などについて考える場合、侵入型原子についてはほとんど全く考慮されないが、案外に大きな役割を果していることに注目される。オーステナイトの双晶変形や、積層欠陥などの生成にも侵入型原子の役割を無視することはできない。

引用文献

- 1) 田村, 大山: 日本金属学会誌, 30 (1966) P.1081.
- 2) 吉村, 茨木: 日本金属学会誌, 29 (1965) P.1120.
- 3) 牧, 下岡, 田村: Met. Trans., 2 (1971) P.2944.
- 4) 牧, 下岡, 梅本, 田村: 日本金属学会誌, 35 (1971) P.1073.
- 5) R.H.Richman: Trans. AIME, 227 (1963) P.159.
- 6) 田村, 吉村, 岩崎, 茨木: 日本金属学会誌, 28 (1964) P.820.
- 7) 田村: Trans. ISIJ, 6 (1966) P.49.
- 8) C.L.Magee, R.G.Davis: Act. Met., 19 (1971) P.345.
- 9) C.L.Magee, D.W.Haffmann, R.G.Davis: Phil. Mag., 23 (1971) P.1531.
- 10) たとえば, 西山: マルテンサイト変態(基本編) (1971) P.13, 丸善.



(a) 0%

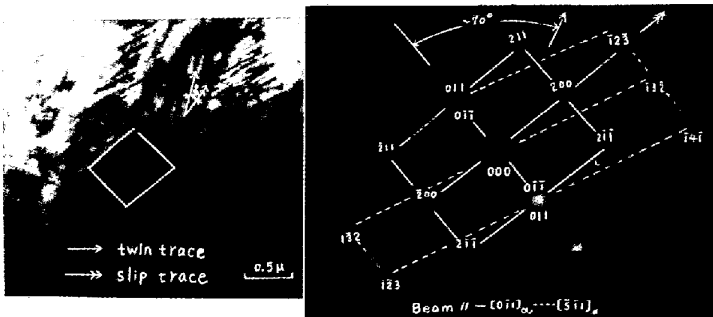


(b) 5%



(c) 20%

写真2 双晶マルテンサイト(Fe-27.6%Ni-0.44%C)を室温圧延したときの双晶変形顕微鏡組織 (a)加工前,(b)5%圧延,(c)20%圧延



(a) (b)

写真1 双晶マルテンサイト(Fe-32%Ni)を室温で40%圧延した試片のすべり変形 (a)透過電顕組織,(b)制限視野電子回折図形

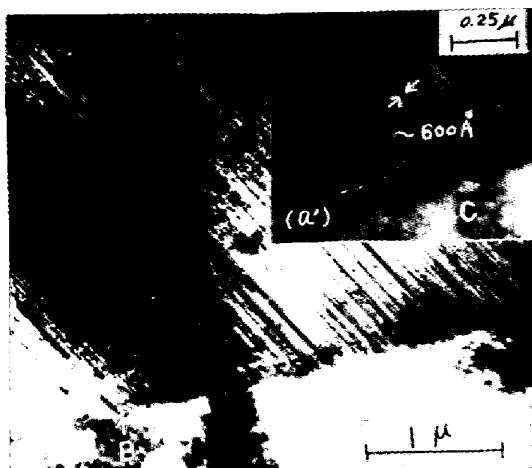


写真3 双晶マルテンサイト(Fe-27.6%Ni-0.44%C)の双晶変形による変態双晶のdetwinning

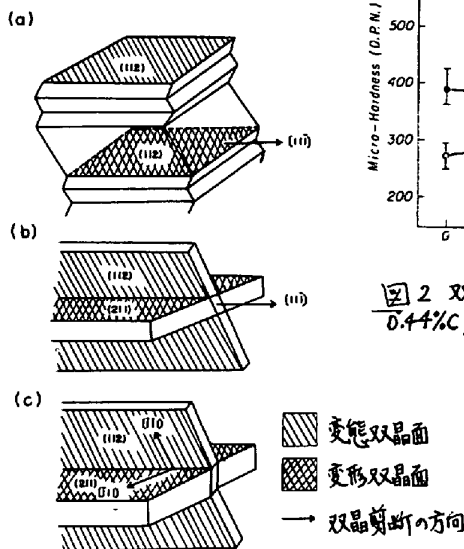


図1 変態双晶と変形双晶の関係

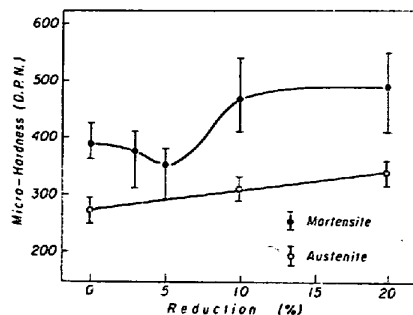
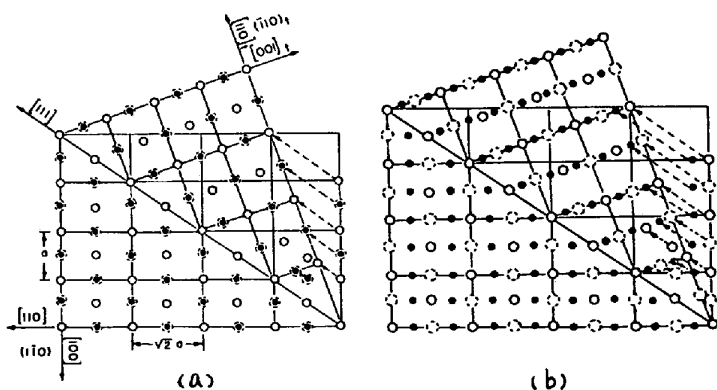
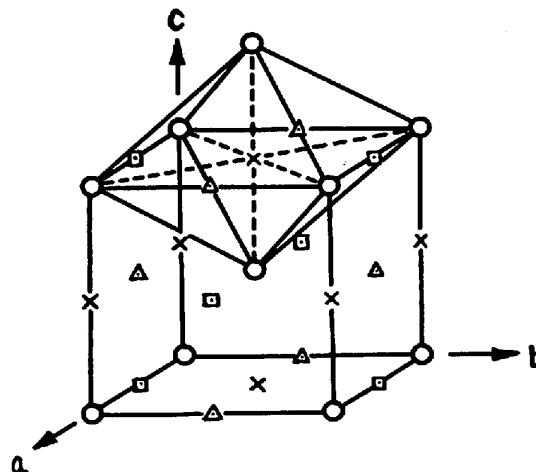


図2 双晶マルテンサイト(Fe-27.6%Ni-0.44%C)の双晶変形による硬さの変化



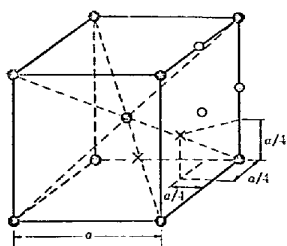
- bcc位置(Fe)
- △A上には下側にあるbcc位置(Fe)
- C原子のはり位置

図4 (112) 双晶剪断によるbcc格子中での炭素原子の位置の変化(C(110)面投影). (a)は双晶変形後も正規の八面体位置に入り込む場合、(b)は双晶変形後はxenohedral位置に入り込む場合。



- Fe原子
- X△□ C原子のはりうる八面体位置

図3 bcc格子中での炭素原子の3つの八面体位置



- bcc格子点(鉄原子)
- 八面体位置
- x xenohedral位置

図5 bcc格子中における八面体位置とxenohedral位置説明図

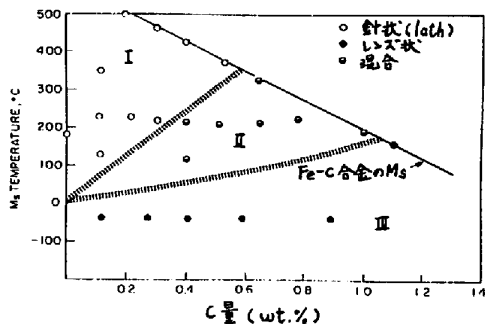


図6 Fe-Ni-Cマルテンサイトの炭素量とMs点および形態の関係

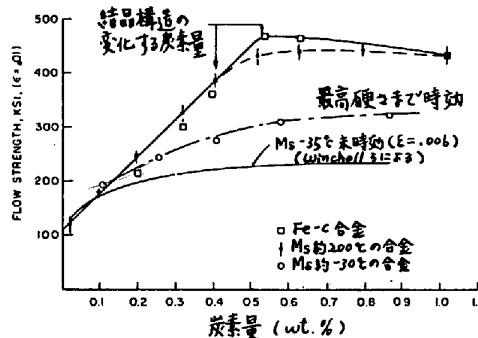


図7 1%塑性ひずみのときの耐力(圧縮)と炭素量の関係。試験温度27℃, ひずみ速度 3.5×10^{-4} /sec.