Fe-Ni-C マルテンサイトの変形双晶について†

田 村 今 男* 吉 村 博 文**
岩 崎 宣 博*** 茨 木 正 雄****

Imao Tamura, Hirofumi Yoshimura, Nobuhiro Iwasaki and Masao Ibaraki : On the Deformation Twinning in Fe-Ni-C Martensite. A deformed Fe-27.56% Ni-0.44% C martensite was examined by optical and transmission electron microscopy and the micro-hardness test. Optical micrographs showed that numerous parallel striations which would be due to twin faults (transformation twins) were slightly observed in the non-deformed martensite, and the spacing of their striations in the martensite increased remarkably and became clearly observable by 5%-deformation of the specimen. Beyond 5%-deformation, relatively wide parallel and crossed striations presumably due to deformation twins appeared.

Transmission electron micrographs and electron diffraction patterns in the selected area of the deformed martensite showed the following: (1) The wide parallel and the crossed striations observed by a optical microscope were deformation twins formed on {112} planes during deformation. (2) Three types of relationships between the deformation twin and the transformation twin were confirmed: (a) Both the twinning plane and the twinning shear direction were the same. Such a kind of deformation twins was easily formed at the beginning stage of deformation on the martensite, and the growth and the detwinning of the transformation twins occurred. (b) The twinning plane differed from each other and the twinning shear direction was the same, and (c) both the twinning plane and the twinning shear direction differed from each other. (3) In the deformed martensite, the deformation twins crossing with other deformation twins and transformation twins were also observed. (4) The deformation twins which were formed on {112} planes

* 大阪大学産業科学研究所 (現在京都大学工学部)
(The Institute of Scientific & Industrial Research,
Osaka University, Sakai; at the present, Faculty
of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

** 大阪大学大学院 (Postgraduate School of Osaka
University, Sakai)

*** 大阪大学工学部 (現在日本鋼管株式会社技術研究所)
(Faculty of Engineering, Osaka University,

Osaka; at the present, Technical Research Insti-
tute, Nippon Kokan Kabushikikaisha, Kanagawa)

**** 大阪大学産業科学研究所 (The Institute of Scien-
tific & Industrial Research, Osaka University,
Sakai)

† 1964年4月 本会東京大会にて 発表したものに 一部
補足した。

and were different from the twinning plane and shear direction of the transformation twins frequently showed some kinds of habit planes deviated from {112} planes.

The results of micro-hardness tests showed that the deformed martensite was strain-softened by up to 5 % deformation, beyond this, the deformed martensite was strain-hardened rapidly and reached a constant hardness with the degree of deformation of the specimens.

(Received July 1, 1964)

I. 緒 言

Fe-Ni-C マルテンサイトには変態のときに生じた双晶欠陥 (以下変態双晶とよぶ) が $100\sim 400\text{\AA}$ の間隔で {112} に平行に存在している⁽¹⁾⁽²⁾。このようなマルテンサイトを加工した場合, Richman⁽³⁾によれば, その変形は 0.4% C 以上では主に変形双晶によるとしており, その変形双晶の晶癖面は {112} がもつとも多く, その他に {013}, {089} および {0, 1, 13} などがあると報告している。しかしこのような変形双晶と, もともと存在している {112} 変態双晶との間の関係は十分に解明されておらず, ただ Kelly ら⁽²⁾ およびごく最近 Krauss ら⁽⁴⁾ による簡単な報告があるのみである。

マルテンサイトを加工した場合の機械的性質については, 二, 三の研究者によつて研究されており, 実用鋼マルテンサイトを加工すると加工硬化が著しく, しかもその加工硬化は炭素量依存性がきわめて大きい⁽⁵⁾。また Breyer ら⁽⁶⁾によれば, 実用鋼マルテンサイトを加工すると加工硬化および加工軟化現象をおこすと同時に明瞭な上下降伏現象があらわれることを報告している。しかしこれらの実用鋼によるマルテンサイトの加工に関する研究は, いずれもマルテンサイト内の格子欠陥などについての詳細な研究が行なわれておらず, このような現象は今まで未解決の問題としてとりのこされていた。そこで本研究は, まずマルテンサイト内にもともと存在している変態双晶と, 加工による変形双晶との相互関係を主に透過電子顕微鏡法によつて究明し, できうれば加工軟化, 加工硬化および上下降伏現象の出現の原因などを解明せんとしたものである。

II. 実 験 方 法

電解鉄および電解ニッケルを真空溶解して Fe-Ni 合金を作製し, その後鍛造および圧延によつて 0.5 mm 厚さの板とし, さらに固形浸炭した後, 真空中で 900°C で 24 時間均一化処理して Fe-Ni-C 合金を作製した。この合金の化学組成は 27.56% Ni, 0.44% C であり, また Ms 点は

常温以下であつた。

これらの試片を真空中で 900°C で 3 hr オーステナイト化し, 空冷後液体窒素に 30 min 深冷した。この処理によつて光学顕微鏡視野で約半分がマルテンサイトに変態した。この試片を圧延によつて 3, 5, 10, 20% 加工し, またこれらと比較のために加工していない試片をも作製し, その光学顕微鏡, 透過電子顕微鏡組織の観察および電子回折図形の解析, および硬度測定を行なつた。光学顕微鏡観察は試片の表面を電解研磨し, Vilella 試薬で腐食して行なつた。透過電子顕微鏡用薄膜は, 氷酢酸, クロム酸および水の混合液を使用して, Bollmann 法 (液温 30°C 以下) にて作製した。電子顕微鏡は日立 HU-11 型を使用し, 組織観察には傾斜装置を併用し, 適宜制限視野電子回折図形および暗視野像の観察を行なつた。硬度測定は, 荷重 50 g でマルテンサイト葉およびオーステナイト部を各々について 10 回測定しその平均値をとつた。

III. 実 験 結 果 お よ び 考 察

1. 光 学 顕 微 鏡 組 織

Photo. 1 はいずれもマルテンサイトとオーステナイトの光学顕微鏡組織で, (a) 加工されないもの, (b) 5%, (c) 10%, (d) 20% 冷間圧延によつて加工された組織である。

まず加工されないもの (a) では, マルテンサイト内に変態双晶によると思われる細かい平行な条が観察されるがあまり明瞭でなく, 概して平滑な組織を示している。しかし 5% 加工された (b) では, この平行な条が加工されない場合よりも巾広くなり, より明瞭に観察される。10% 加工 (c) では, 平行な条以外に巾広い平行あるいは交叉した条が観察され, さらに 20% の強加工 (d) になると, 種々の方向に巾広い交叉した条が明瞭に観察される。この巾広い交叉した条に注目すると, 交叉部を突抜けてマルテンサイト境界に達しているものと, 交叉部で途切れているものがみられる。またマルテンサイト境界はこれら条によつて著しく屈曲している。

2. 透 過 電 子 顕 微 鏡 組 織 と 電 子 回 折 図 形 の 解 析

光学顕微鏡によつて観察された加工された Fe-Ni-C マルテンサイト内の種々の組織を, さらに透過電子顕微鏡によつて詳細に観察した。

Photo. 2 は Fe-Ni-C 合金の加工しない試片の透過電子顕微鏡組織 (a) および組織 (a) の A 部の制限視野電子回折図形 (b) を示す。まず組織 (a) ではマルテンサイト内に $\leftrightarrow$ 方向に約 $100\text{\AA}$ の間隔で平行なバンドが観察される。これら

- (1) 田村, 吉村, 茨木, 多賀谷: Memo. Inst. Scientific, Indust. Res. Osaka Univ., **9** (1962), 67 (Short note); 本誌, **27** (1963), 206.
- (2) P. M. Kelly and J. Nutting: J. Iron and Steel Inst., **197** (1961), 199.
- (3) R. H. Richman: Trans. AIME, **227** (1963), 159.
- (4) G. Krauss and W. Pitsch: Acta Met., **12** (1964), 278.
- (5) S. V. Radcliffe and E. B. Kula: 私信 (Deformation Transformation and Strength) Aug. 28, 1962.
- (6) N. N. Breyer and N. H. Polakowski: ASM Trans. Quart., **55** (1962), 667.

のバンドはすでに変態双晶であることが認められており⁽¹⁾
⁽²⁾ (7), 光学顕微鏡 (Photo.1 (a)) で観察された細かい平行な

はかなり広く $600\text{\AA}$ に達しているものもあり (Photo.3 (a)
 の C' 参照), 加工されないものに比して明らかに巾が広く

Photo. 1 Optical micrographs of Fe-Ni-C martensite. (a) Non-deformed, (b) 5%-deformed, (c) 10%-deformed, and (d) 20%-deformed. ($\times 1,500$) Etchant: Vilella reagent.

条に対応するものであり, 回折図形 (b) でも $\{112\}$ 双晶関係を示している. この場合の双晶面は試料面 $\{1\bar{3}1\}$ に垂直で, 組織 (a) に観察されるバンドの巾は実際の変態双晶の巾を示しており大体 $100\text{\AA}$ 程度である.

つぎにこのような試片を圧延によつて 20% 加工し, その組織観察および回折図形の解析を行なうと, 光学顕微鏡で観察されたマルテンサイト内の巾広い平行なあるいは交叉した条は, 後述のように加工の際に生じた変形双晶であることがわかり, その変形双晶は Photo. 3~6 に示すように, もともと存在していた変態双晶と同一あるいは異なった $\{112\}$ で双晶変形しており, 変態双晶と変形双晶との間の関係として典型的な三つの型が観察された.

Photo. 3 はその第一番目の特徴ある組織で, 20% 加工された組織 (a) および組織 (a) の A 部の回折図形 (b) である. 組織 (a) ではマルテンサイト内に $\longleftrightarrow$ 方向に平行なバンドが観察され, A 部の回折図形 (b) により, この平行なバンドは (112) に生成した変態双晶であることがわかつた. この場合も双晶は試料面 $(1\bar{1}0)$ に垂直で, バンドの巾がそのまま変態双晶の巾を示しているが, マルテンサイトの境界 B および C に注目すると, これらの部分では明らかに境界が屈曲しており, かつその屈曲に対応している双晶の巾

なっている. これは加工によつてもともと存在していた変態双晶と同一の双晶面 (112) および双晶剪断方向 $[\bar{1}1\bar{1}]$ に地を双晶変形し, したがつて一つの変態双晶を成長させ (twin growth), 両隣の変態双晶と合体して巾広くなつたものか, あるいはこれとは逆に変態双晶と正反対の剪断方向 $[\bar{1}\bar{1}1]$ に剪断応力がかかつて, 変態双晶がもとの地の状態にもどされ, いわゆる変態双晶の消滅 (detwinning) が起こり両隣の地が合体して巾広くなつたか, いずれかによるものと考えられる. しかしこの二つの過程はいずれを地にとり, いずれを双晶にとるかによつて全く同じことを意味し, 結果的には一つのマルテンサイト内に存在する変態双晶の数が減少し (detwinning), したがつて双晶境界が減少する結果となる. このように加工によつて変態双晶と同一の双晶面および双晶剪断方向をもつ双晶変形がおこることが認められた. なお, オーステナイト部では転位密度が高く明らかに加工硬化していることを示している.

同様の 20% 加工の場合でも, 変態双晶と変形双晶が交叉した場合が観察され, **Photo. 4** はその組織 (a) と回折図形 (b) を示している. 組織 (a) において, マルテンサイト内に $\longleftrightarrow$ 方向に平行な細いバンドと $\longleftrightarrow$ 方向に平行な巾広いバンドが互いに交叉しているのが観察される. この組織 (a) における A 部の回折図形 (b) を解析すると, (112) , $(\bar{1}21)$ および $(2\bar{1}1)$ のいずれかを双晶面とする双晶関係を示して

(7) K. Shimizu: J. Phys. Soc. Japan, 17 (1962), 508.

おり、さらにこの回折図形(b)に組織(a)の $\longleftrightarrow$ および $\longleftrightarrow$ 方向を対応すると、 $\longleftrightarrow$ 方向は試料面(311)に垂直な(112)

双晶面も双晶剪断方向のいずれも異なる変形双晶が観察された。Photo.5 がその一例で前述と同様に 20% 加工さ

Photo.2 (a) Transmission electron micrograph of Fe-Ni-C martensite in the non-deformed specimen and (b) diffraction pattern at the selected area A indicated in the micrograph (a).

トレースに、また $\longleftrightarrow$ 方向は試料面(311)と約 42° 傾いた(211)トレースに一致した。さらに回折図形(b)で双晶の(101)面による回折斑点で暗視野像を撮ると、組織(a)のB部はB'のように $\longleftrightarrow$ 方向に平行な巾広いバンドおよび明瞭ではないが $\longleftrightarrow$ 方向に平行な細いバンドのいずれもが反転し、明らかにこれらは双晶であることを示している。組織から判断して $\longleftrightarrow$ 方向に平行なバンドが変態双晶であり、 $\longleftrightarrow$ 方向に平行な巾広いバンドが変形双晶であると考えられ、変態双晶は加工しない場合と同様に約 $100\text{\AA}$ 間隔であるのに対して変形双晶は $1000\sim 5000\text{\AA}$ 間隔で不均一に生成している。この場合の変形双晶面(211)は変態双晶面(112)と同一の双晶剪断方向[111]を有し、したがってこの場合の加工による変形双晶は変態双晶と同一の双晶剪断方向で違った双晶面で生成されたもので、組織(a)に示すごとく変態双晶は変形双晶によつて屈曲していない。マルテンサイトの加工では以上の型の他に、変態双晶と

Photo.3 (a) Transmission electron micrograph of Fe-Ni-C martensite in the 20%-deformed specimen and (b) diffraction pattern at the selected area A indicated in the micrograph (a). C' shows the enlarged photograph of part C in (a).

れた組織(a)および組織(a)のA部の回折図形(b)を示す。組織(a)を回折図形(b)の解析結果に対応すると、組織(a)のマルテンサイト内の $\longleftrightarrow$ 方向に平行して(112)変態双晶(試料面(131)に垂直)が存在していることがわかり、またこの変態双晶と $\longleftrightarrow$ 方向に平行な巾広い不明瞭ではあるが変形双晶が交叉しており、その交叉部では変態双晶が約 8° 屈曲しているのが観察される。変形双晶の境界($\longleftrightarrow$ 方向に平行)に注目すると、その境界は直線性が悪く変態双晶との交叉部で複雑に屈曲している。これはFig. 1に示すごとく、その晶癖面はもとの双晶面からかなりずれていることを意味するもので、 $\longleftrightarrow$ 方向を基準として双晶面を決定することは不合理である。そこで組織(a)で観察される変態双晶と変形双晶との交叉部における変態双晶の屈曲に注目して変形双晶面の決定を試みた。すなわち変態双晶の存在しているところへ変形双晶ができる際に、変態双晶は2次

的に双晶変形させられると考え、そのときの試料面における屈曲の角度を求め、実際に観察された約 8° の屈曲角と

もと存在している変態双晶との間の関係として、(a) 双晶面および双晶剪断方向のいずれもが一致する場合 (このと

合致するような双晶面を探した。その結果 $(211)[\bar{1}11]$ 双晶は試料面における屈曲角と非常によく一致し (約 8.2°)、これが実際の変形双晶であると考えられる。この $(211)[\bar{1}11]$ 変形双晶は、 $(112)[11\bar{1}]$ 変態双晶と双晶面および双晶剪断方向のいずれもが異なっている場合である。なお本多⁽⁸⁾は珪素鉄中に生成される変形双晶の交叉について研究し、変形双晶の交叉をその交叉線によって $\langle 110 \rangle$ 型と $\langle 012 \rangle$ 型に分類し、 $\langle 110 \rangle$ 型は交叉できないといっているが、本研究の場合、双晶が互いに交叉しているものはすべて $\langle 110 \rangle$ 型以外のものに属し、本多の考えと矛盾しない。

以上のように加工によって生成される変形双晶は、もと

(8) R. Honda: Trans. Nation. Res. Inst. Meta, 4 (1962), 4.

Photo. 5 (a) Transmission electron micrograph of Fe-Ni-C martensite in the 20%-deformed specimen and (b) diffraction pattern at the selected area A indicated in the micrograph (a).

きは変態双晶の成長あるいは消滅がおこる)。(b) 双晶面が異なり双晶剪断方向が一致する場合、(c) 双晶面および双晶剪断方向のいずれもが一致しない場合、の三つの型があり、いずれの場合もおこりうるということが認められた。これを図的にあらわすと Fig. 2 のようにあらわせる。交叉部では (b) の場合は変態双晶および変形双晶ともに屈曲しないが、(c) の場合はそのいずれもが屈曲する。しかして (a) のような変態双晶の成長あるいは消滅は加工初期におこり、つぎに (b) のような剪断方向の同じで面の異なるものがおこりやすく、(c) は比較的強加工によらなければ生成されないものであると考えられ、事実、実験的にもその傾向はみとめられた。

以上は加工された一つのマルテンサイト内における変態双晶と変形双晶との間の関係であるが、これらの場合以外に変形双晶同士が交叉している場合も観察された。Photo.

6 がその一例である。組織 (a) においてマルテンサイト内で $\leftarrow$ 、 $\leftrightarrow$ および $\rightarrow$ 方向にそれぞれ平行なバンドが互

な巾広いバンドおよび $\leftarrow$ 、 $\leftrightarrow$ 方向に平行なバンドは $(11\bar{2})$ 、 $(2\bar{1}1)$ あるいは $(\bar{1}21)$ のいずれかを双晶面とする変形双晶で

Fig.1 Schematic illustration of the habit plane of deformation twin deviated from twinning plane by transformation twins.

Fig.2 Three types in relationship between the transformation twin and the deformation twin.

いに交叉しているのが観察される。A部の回折図形 (b) を解析し $(11\bar{2})$ 、 $(2\bar{1}1)$ および $(\bar{1}21)$ のいずれかでの双晶関係を示している、組織 (a) のこれらに対応させると $\leftarrow$ 方向は $(11\bar{2})$ の試料面上のトレースに一致し、また $\leftrightarrow$ 方向に平行なバンドは試料面を電子顕微鏡の傾斜装置によつて数度傾斜させるとマルテンサイト全体に均一にあらわれることから、これはもともと存在していた変態双晶と考えられる。 $\leftarrow$ 方向および $\leftrightarrow$ 方向はどの $\{11\bar{2}\}$ のトレースにも一致せず、 $\rightarrow$ 方向に平行なものはむしろ Richman⁽³⁾ の報告している $\{089\}$ のトレースに近い。しかし回折図形 (b) の双晶の $(211)_t$ による回折斑点で暗視野像を撮ると、組織 (a) のA部はA'のごとく $\leftarrow$ および $\leftrightarrow$ 方向に平行な巾広いバンドが反転し、このことから $\leftarrow$ 方向に平行

Photo.6 (a) Transmission electron micrograph of Fe-Ni-C martensite in the 20%-deformed specimen and (b) diffraction pattern at the selected area A indicated in the micrograph (a). Dark field micrograph A' shows the reversal of contrast of twins parallel to $\rightarrow$ and $\leftrightarrow$, using dark field illumination obtained from a (211) twin reflection.

あることがわかった。そしてそれらは、 $\leftarrow$ 方向に平行なものは $(11\bar{2})$ 双晶面トレースにもつとも近く、試料面 (311) 上で時計まわりに 5° だけずれているだけであり、また $\leftrightarrow$ 方向に平行なものは、 $(2\bar{1}1)$ 双晶面トレースより時計まわりに 11° だけずれている。それ故 $\leftarrow$ 方向に平行な変形双晶は $(11\bar{2})$ で、また $\leftrightarrow$ 方向に平行な変形双晶は $(2\bar{1}1)$ で双晶変形するときにそれぞれ Fig.1 で示したように $(11\bar{2})$ $[1\bar{1}1]$ 変態双晶 ($\leftrightarrow$ 方向に平行) と交叉部で屈曲されながら生成し、それぞれ $(11\bar{2})$ および $(2\bar{1}1)$ よりかなりずれた晶癖面をもつた $(11\bar{2})$ $[1\bar{1}1]$ 変形双晶および $(2\bar{1}1)$ $[1\bar{1}1]$ 変形双晶になったものと考えられる。この場合 $\leftarrow$ および $\leftrightarrow$ 方向に平行な変形双晶は双晶剪断方向が同じで双晶面が異なる場合である。このように変形双晶は変態双晶によつてかなり屈曲させられて生成することから、Richman⁽³⁾ の報告している $\{0,1,13\}$ 、 $\{0,8,9\}$ などの晶癖面をもつ変形

双晶もやはり $\{112\}$ 変形双晶であつて、細かい変態双晶との交叉によつて晶癖面は双晶面よりかなりずれて観察されたものと考えた方が妥当である。

本研究においては電子回折図形の解析にあつてマルテンサイトの正方性 (Tetragonality) は考慮していないが、0.44% C のマルテンサイトでは $c/a \approx 1.02$ であり⁽⁹⁾、この場合の $\{112\}$ 面での双晶剪断変形量を考えてみると、 $\{hkl\}$ の l が 2 となる (112) グループの面で双晶変形するときは 0.70 であり、 l が 1 となる (211) および (121) グループのときは 0.73 となり (112) グループの方が剪断変形量がより少なくてすむ。さらに侵入型に固溶している C 原子の移動について考えてみると (211) グループのたとえば $(2\bar{1}1)$ での双晶剪断変形では、地の $00\frac{1}{2}$ にある C 原子は双晶の $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$ に、また地の $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$ にあるものは双晶の $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$ に移動することになり、これは双晶変形後 C 原子はさらに双晶の $00\frac{1}{2}$ および $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$ にそれぞれ再移動しなければならないことを意味している。これに対して (112) グループで双晶剪断変形するときの Fe 原子および C 原子の移動は Fig. 3 に示すように地の $00\frac{1}{2}$ にあるものは双晶の $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$ に、また地の $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$ にあるものは双晶の $00\frac{1}{2}$ にそれぞれ移動し、C 原子の位置は地と双晶とで (112) を境界として鏡面对称であつて C 原子の再移動を必要とせずきわめて都合がよい。したがつてマルテンサイト変態の際に accommodation のために生成されるマルテンサイト内の変態双晶は (112) グループの面に生成されることが考えられる。加工による変形双晶の場合には $\{112\}$ の各面への剪断応力のかかり方によつて種々の $\{112\}$ で双晶変形することが考えられるが、それでもなお $\{hkl\}$ の l が 2 になるような (112) グループの変形双晶の生成が優先されることが推測される。このことは本研究における変態双晶と双晶面および双

Fig. 3 Atom movements by twinning on (112) in the tetragonal martensite.

- Positions of Fe-atom
 - Possible located positions of C-atom
 - Positions of Fe-atom
 - Possible located positions of C-atom
- Original lattice
- Twinned lattice

晶剪断方向が同一であるような変形双晶を生成しやすいという結果によつても期待されることである。

3. 光学顕微鏡組織との対応

光学顕微鏡で観察された組織で、まず加工されないものにおけるマルテンサイト内の細かい平行な条 (Photo. 1 (a)) はマルテンサイト変態のときに生じた変態双晶によるものであり、5% 加工 (Photo. 1 (b)) でそれらの巾が広くかつ明瞭に観察されるのは前述したごとく加工によつて変態双晶の成長あるいは消滅がおこつたため、すなわち変態双晶と双晶面および双晶剪断方向に一致して双晶変形したためである。また 10% および 20% 加工 (Photo. 1 (c), (d)) で観察された交叉した条はもともと存在する変態双晶と双晶面を異にする変形双晶ができたり、一つのマルテンサイト内で変形双晶同志の交叉がおこつたためである。

4. 硬 度

加工されたマルテンサイトおよびオーステナイトの硬度と加工度との関係を Fig. 4 に示す。マルテンサイトの硬

Fig. 4 Micro-hardness of martensite and austenite in deformed Fe-Ni-C alloy measured by a load of 50 g. Each point-10 readings. I represents spread.

度は 3% 加工まではほとんど変化しないが、これは本研究でもちいた試片は約 50% オーステナイトの試片であるために最初の 3% 加工では主にオーステナイトが加工されてマルテンサイトはほとんど加工されないためであろう。5% 加工すると加工しないものに比して約 30 DPN の硬度低下がおこり明らかに加工軟化を示し、さらにそれ以上の 10% 加工で急激に加工硬化し、加工しないものに比して約 80 DPN および 5% 加工の場合に比して約 110 DPN 上昇している。そしてそれ以上の加工ではほとんど加工硬化せず一定値に飽和している。このように Fe-Ni-C 合金のように変態双晶のあるマルテンサイトを加工した場合の特徴は、わずかの加工によつて加工軟化の現象があらわれ、さらに加工度を増すと急激に加工硬化し、そしてある一定値に飽和することである。また加工されたマルテンサイトの硬度の測定値がかなりばらついていることも見逃すことはできない。

(9) 西山：金属熱処理技術便覧，26。

5% 加工の場合の加工軟化現象に関しては光学顕微鏡組織 (Photo.1 (b)) で変態双晶が加工しないものに比して巾広くしかも明瞭に観察され、そしてそれは透過電子顕微鏡観察によつて解明されたように、変態双晶と同じ双晶面および双晶剪断方向をもつ双晶変形をおこすことにより、変態双晶が成長したりあるいは消滅したりして変態双晶が減少するという事で説明できる。すなわちマルテンサイト内に存在する変態双晶の数が減り、それにともなつて双晶境界が少なくなり、変形に対する障害が少なくなつたためと考えられる。しかし 10% 加工では光学顕微鏡で変態双晶と交叉した変形双晶が多く観察され (Photo.1 (c))、さらに 20% 加工ではその頻度は著しく、また変形双晶同志の交叉も観察された (Photo.1 (d) および Photo.6) ことから、10% 程度の加工になると、前述の加工軟化の効果も存在するけれども、それ以上に双晶同志の交叉が頻繁におこり、したがつてそれだけ双晶境界が増加する。しかも交叉する双晶が互いに衝突した場合、その双晶の交叉線によつては、交叉出来る場合と出来ない場合がある⁽⁸⁾。交叉出来る場合においても、その交叉部では多重双晶 (multiple twinning) をおこし、そこを中心にかんがりの応力が集中し、また交叉出来ない場合 (交叉線が $\langle 110 \rangle$ 型の時) は、その交叉部では、それ以上の変形が出来ないことを意味し、その部分に強力な応力が作用するわけである。その部分に強い強い力を与えれば結局は破壊にいたるわけで、このような交叉部は決定的な変形の障害となる。すなわち硬度上昇の原因となるわけである。このようなことと前述の変形双晶だけ双晶境界の数がますということが、10% 程度の加工における急激な加工硬化の原因であろうと考えられる。10% 以上の加工では硬度が飽和して加工硬化があまり顕著ではないのは従来の体心立方晶金属の加工硬化の傾向とよく似ているが、本研究の場合は一つのマルテンサイト内で前述の加工硬化と加工軟化に原因する双晶変形が同時におこっている状態にあるためであり、また本研究で用いた試片は多結晶であり、オーステナイトとマルテンサイトが混在しているため、マルテンサイト一つ一つの加工度は種々異なっていることが考えられ、これらのことが硬度の測定値のばらつきが大きい原因であろう。

マルテンサイトの加工硬化はこのように非常に複雑であるが、これをオーステナイトの加工硬化と比較してみると、少なくとも 10% 加工ではマルテンサイトの加工硬化はオーステナイトのそれより大きく、これはオーステナイトは加工によつて転位密度が増加することによつて転位同志の相互作用によつて加工硬化するのに対してマルテンサイトは少なくとも 10% 以上の加工の場合には双晶同志の交叉がおこるために加工硬化の度合もオーステナイトの転位のみによる場合よりもかなり大きいものと考えられる。しかしこのような挙動は合金の積層欠陥エネルギーに依存するものと考えられ、仮にオーステナイトの積層欠陥エネルギーの低い合金においては、加工によつてオーステナイト中

に積層欠陥を生成し、マルテンサイトには転位のみが存在し、本研究の傾向とはかなり様子が変つてくることが期待される。

Breyer ら⁽⁶⁾ は AISI 4340 鋼のマルテンサイトのある程度加工すると上下降伏現象があらわれることを報告し、その原因を加工によつて生じたマルテンサイト中の転位の周囲の C 原子の応力誘起規則化 (stress-induced ordering) によつて説明しているが、これについても、この鋼のマルテンサイトを加工した場合に、まずその変形が転位によるすべり変形かあるいは双晶変形であるかを解明してゆけば、より明確な原因がえられるのではないかと考えられ、今後の研究に負うところが大きい。

IV. 総 括

双晶欠陥 (変態双晶) のある Fe-27.56% Ni-0.44% C マルテンサイトを加工し、その光学顕微鏡組織観察、透過電子顕微鏡組織観察およびその電子回折図形の解析、および硬度測定を行なつた。その結果を総括するとつぎのようになる。

光学顕微鏡観察では加工されないマルテンサイト内には変態双晶によるとと思われる多くの平行な条がかすかに観察され、5% 加工ではその巾が広くなり、より明瞭に観察され、さらに 5% 以上の加工では変形双晶と思われる比較的巾広い平行あるいは交叉した条が観察された。

加工されたマルテンサイト内の透過電子顕微鏡組織とその制限視野電子回折図形の解析によりつぎのことが示された。(1) 光学顕微鏡で観察された巾広い平行あるいは交叉した条は加工の際に {112} 面に生じた変形双晶であつた。

(2) 変形双晶と、もともと存在していた変態双晶との間の関係としては、(a) 双晶面および双晶剪断方向のいずれもが一致する場合、この種の変形双晶はマルテンサイトの加工初期において容易に形成され、変態双晶の成長および消滅がおこり変態双晶の双晶境界が減少する、(b) 双晶面が異なり、双晶剪断方向が同じ場合および (c) 双晶面および双晶剪断方向ともに異なる場合がそれぞれ確認された。

(3) 加工された一つのマルテンサイト内で変態双晶および変形双晶のいずれとも交叉している変形双晶も観察された。(4) 変態双晶と双晶面および双晶剪断方向のいずれもが異なつた {112} 面で形成される変形双晶はしばしば {112} 面からかなりずれた晶癖面を有していた。

硬度測定の結果、マルテンサイトは 5% までの加工で加工軟化し、これ以上の加工で加工度が増すにつれ急激に加工硬化しある一定の硬度に達した。

本研究遂行にあたり有益なる御助言をいただいた西山善次教授および同研究室の方々、とくに清水謙一博士には種々御指導いただき感謝の意を表します。また電子顕微鏡観察に種々御協力いただいた是枝淳夫氏に感謝します。