

Fe-0.5%C合金の過冷オーステナイト/ フェライト変態に及ぼす加工の影響

松浦 清隆*・伊藤 洋一*・成田 敏夫*

Effect of Strain on Ferrite Transformation from Super-cooled Austenite in Fe-0.5%C Alloy

Kiyotaka MATSUURA, Youichi ITOH and Toshio NARITA

Synopsis : Fe-0.51wt%C alloy was cooled from 1000°C at 0.3°C/s and rolled at 710°C, at which austenite was super-cooled by 55°C. The isothermal transformation behavior at 710°C from the super-cooled and strained austenite to ferrite was investigated. It has been found that the nucleation rate of the ferrite particles increases with strain and that the rate constant for the growth of the ferrite particles remains constant regardless of the strain. The time required for the transformation and the average size of the ferrite particles decrease with increasing strain.

Key words : carbon steel ; ferrite transformation ; super cooling ; controled rolling ; particle size.

1. 緒言

鋼の冷却中、オーステナイトに歪を与えると、その付与温度の低下¹⁾および歪量の増加²⁾に伴って、その後起こるフェライト変態温度が上昇する。一方、過冷したオーステナイトに歪を与えるとフェライト変態が短時間で終了する³⁾。

このような加工による変態促進の効果は、変態組織の微細化を目的として鋼の製造工程において応用されている。しかしながら、この挙動を速度論的に検討した報告は少ない。

梅本らは加工されたオーステナイトからのパーライト変態およびフェライト変態の速度論について優れた検討を行い³⁾、パーライト変態については加工による変態促進の効果を実験的にも示した⁴⁾。

本研究では、過冷した状態で歪を加えられたオーステナイトがフェライトに等温変態する過程を調査し、変態中のフェライト粒子のサイズと体積率の増加挙動に及ぼす歪量の影響を速度論的に検討した。

2. 方法

本実験で用いられた鋼は、その組成をTable 1に示すように炭素以外の元素をほとんど含まない。Fe-C二元系状態図⁵⁾によれば、この鋼のA_{e3}変態温度は765°Cである。しかし、0.3°C/sの速度で冷却すると、Fig. 1に示したようにA_{r3}変態温度は690°Cであった。この結果に基づいて、過冷したオーステナイトに歪を与えるべく圧延温度710°Cを選んだ。

Table 1. Chemical composition (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Sol. Al
0.51	0.03	0.003	0.003	0.005	0.039

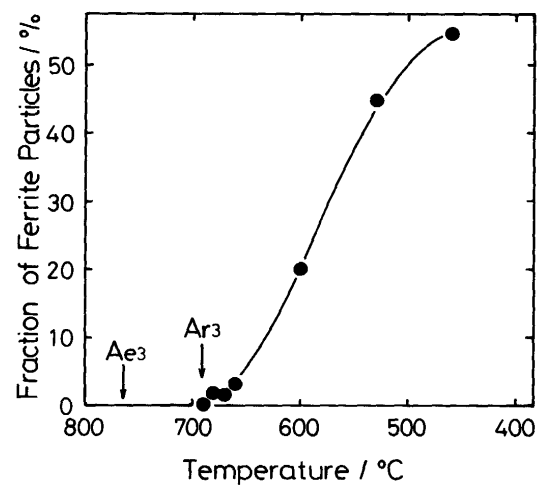


Fig. 1. Increase in the volume fraction of ferrite particles during cooling at 0.3°C/s.

Fig. 2に示した熱および加工の履歴を、試料に与えた。すなわち、0.6°C/sの速度で試料を加熱して1000°Cで1.8ks保持し、その後0.3°C/sの速度で冷却して710°Cで圧延し、同温度で所定時間保持後、氷水中で急冷した。

実験装置の模式図をFig. 3に示した。加熱と冷却用の赤外線炉、歪を付与するための圧延機、保温用の抵抗炉、急冷用の水槽を鉛直方向に配列し、鋼線で吊した試料をそれぞれ

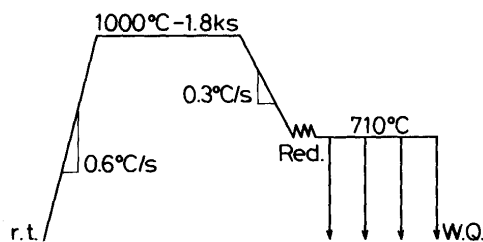
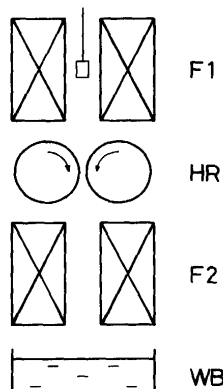


Fig. 2. Thermal history.

Fig. 3. Schema of the apparatus.
F1, F2: furnace HR: roller WB: water bath

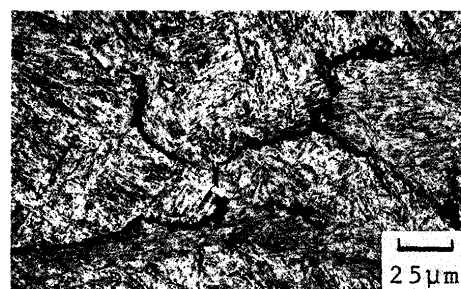
れの装置間を自由落下により移動させた。各装置の中心間距離は約500mmとした。赤外線炉内はAr雰囲気、他は大気雰囲気とした。圧延機のロール径は132mm、その表面速度は1.5m/s、ロール・ギャップは3.6mmとした。試料は約10mm×10mmの板状で、その厚さは6.0、4.5および3.5mmとし、1パスで圧下率0.4、0.2および0の圧延を行った。ロールの加熱は行わなかったが、これに試料が接する時間は0.01s以下と短いので、この間の試料の温度変化を無視した。

急冷した試料を圧延面に対して直角で圧延方向と平行に切断し、この断面上におけるフェライト粒子の数と面積率および平均直径を、画像解析機により測定した。

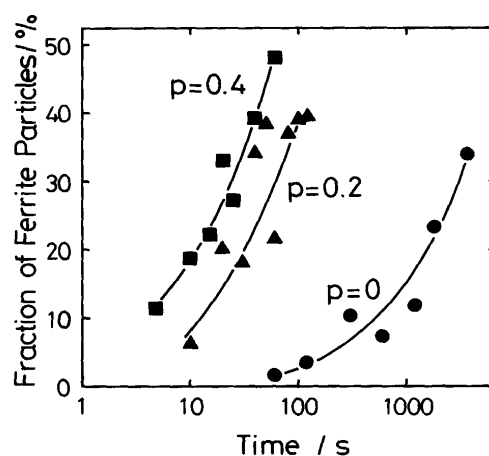
3. 結果

Fig. 4に、圧延直後の組織を示した。平均直径約200 μ mのオーステナイト結晶粒にはわずかな延伸が認められたがフェライト粒子は観察されず、圧延中には変態していないことが確認された。この写真は圧下率0.2のものであるが、他の圧下率においても圧延中の変態は認められなかった。

Fig. 5に、フェライト粒子の体積率の増加挙動に及ぼす圧下率 p の影響を示した。 $p=0$ では圧延後60s経過してフェライト粒子が観察され、その体積率が30%に達するのは3600s後であった。 $p=0.2$ では、10s後に体積率約7%のフェライト粒子が観察され、これが30%に達するには100sを要さなかった。 $p=0.4$ ではさらに短時間で変態が進み、25sで体積率30%に達した。このように、圧下率の増加は変態を著しく



Rolling Direction

Fig. 4. Structure of the sample quenched soon after rolled at 710°C, showing no evidence of ferrite transformation during rolling.
Rolling reduction: $p=0.2$.Fig. 5. Transformation behavior for different rolling reduction, p .

促進させた。

Fig. 6に、変態中の組織変化を示した。圧延されなかった試料(a, b, c)では粗大なフェライト粒子がオーステナイト粒界上に析出し、時間経過とともにそのサイズと数および体積率が徐々に増加した。これに対して20%圧延された試料(d, e, f)では、微細なフェライト粒子がオーステナイト粒内にも多く析出した。40%の圧下率(g, h, i)ではさらに短時間で多くのフェライト粒子が微細に析出した。

Fig. 7に、フェライト粒子の平均直径 $\bar{d}$ (μ m)と圧延後の経過時間 t (s)の関係を示した。この図から、フェライト粒子の成長は圧下率によらず1つの放物線則に従うことが認められ、その回帰式は、

$$\bar{d} = 0.78\sqrt{t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

となった。

Fig. 8に、フェライト粒子数 N (μm^{-3})と圧延後の経過時間 t (s)の関係を示した。粒子数は時間に対して直線的に増加し、その勾配は圧下率の増加に伴い著しく増大した。各圧下率でのこの関係はそれぞれ、

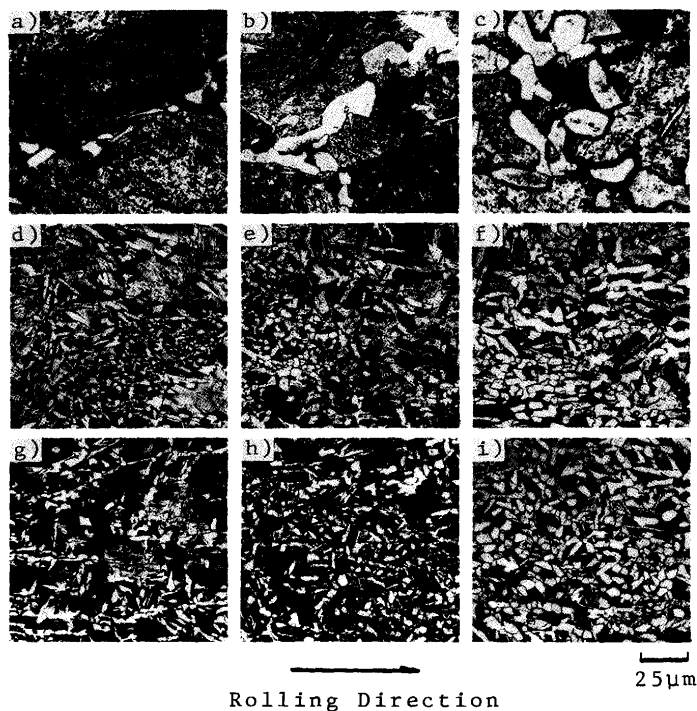


Fig. 6. Change in the ferrite structure during the transformation.

(a) $p=0, t=120$ (b) $p=0, t=300$ (c) $p=0, t=1200$
(d) $p=0.2, t=20$ (e) $p=0.2, t=50$ (f) $p=0.2, t=120$
(g) $p=0.4, t=15$ (h) $p=0.4, t=25$ (i) $p=0.4, t=60$
 p : rolling reduction
 t : time from rolling (s)

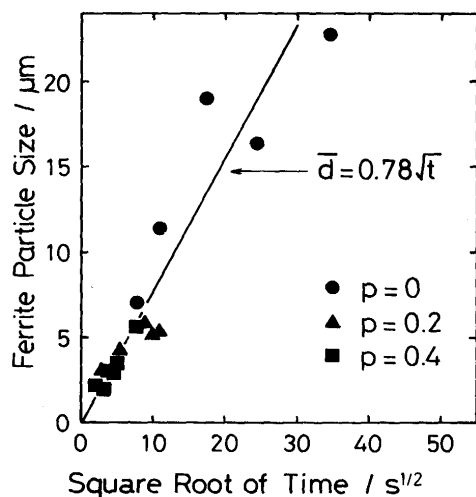


Fig. 7. Relation between the ferrite particle size, $\bar{d}$, and time from rolling, t .
 p : rolling reduction

$$N_{p=0} = 2.0 \times 10^{-8} t \quad (2)$$

$$N_{p=0.2} = 3.3 \times 10^{-5} t \quad (3)$$

$$N_{p=0.4} = 3.5 \times 10^{-4} t \quad (4)$$

と表された。ただし、試料断面上で測定された単位面積当りのフェライト粒子の数から、フェライト粒子を球と見なして単位体積当りの数に換算した⁹⁾。

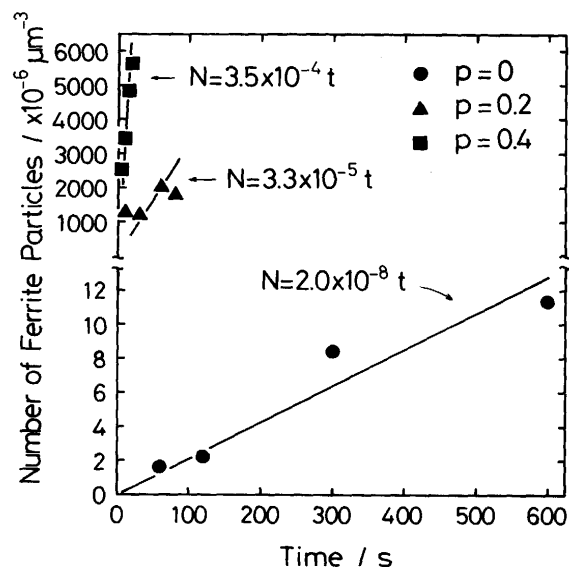


Fig. 8. Relation between the number of ferrite particles, N , and time from rolling, t .
 p : rolling reduction

4. 考察

Fe-0.51%C二元系合金について、冷却中の710°Cにおいて55°C過冷したオーステナイトを最大0.4の圧下率で圧延し、同温度における等温フェライト変態過程を調査した。その結果、圧下率の増加に伴い(1)核生成速度が増すこと(Fig. 8)、(2)変態が短時間で進むこと(Fig. 5)、(3)フェライト組織が微細になること(Fig. 6)がわかった。本章では、これらの結果をもとにして、フェライト粒子のサイズと変態率および圧下率の定量的な相互関係について検討する。

梅本ら³⁾によれば、フェライト変態におけるフェライトの拡張体積率⁷⁾⁸⁾は、

$$X_e = kSt^{1/2} \int_0^1 [1 - \exp\{-9/2\pi k^2 I t^2 (1 - 2x^2 + 4x^4)\}] dx \quad (5)$$

と表される。ここで、

t : 経過時間

k : フェライト粒子の成長速度定数

S : 単位体積当りの核生成サイト面積

I : 単位核生成サイト面積当りの核生成速度

π : 円周率

であり、 X_e は変態率 X との間に、

$$X = 1 - \exp(-X_e) \quad (6)$$

の関係がある⁹⁾。式(5)は、フェライト粒子がオーステナイト結晶粒界面に軸比3:1の回転楕円体の形状¹⁰⁾で析出し、その核生成速度は一定で成長は放物線則に従うものと仮定されて導かれた。これらの仮定を本実験結果から検討すると、フェライト粒の形状は不定形であったので(Fig. 6)その形状についての仮定は厳密には適切とはいえないが、核生

成速度と成長則についての仮定はそれぞれ妥当であった (Fig. 8, Fig. 7)。それゆえ式 (5) に従って変態が進むものとし、式 (5) 中の k と S および I の値を本実験結果から求めることを試みる。

まず、フェライト粒子の成長速度定数 k について考える。Fig. 7 の結果に基づいて、フェライト粒子の成長過程が式 (1) で記述された。しかし、ここでのフェライト粒子径は試料切断面上で測定されたフェライト粒子断面直径の平均値であり、立体としてのフェライト粒子径ではない。従って、式 (1) の係数は正しい成長速度定数を示さない。ある体積中に直径 D の球が充分多く分布するときには、この切断面上に現れる球の断面円の直径の平均値は $0.79D$ となる¹¹⁾。本実験のフェライト粒子は不定形であるが、球の場合と同じ比率でフェライト粒子の切断面直径の平均値が現れるとすると、式 (1) の係数を 0.79 で除して、フェライト粒子の成長速度定数は、

$$k = 0.78 / 0.79 \\ = 0.99 (\mu\text{m s}^{-1/2}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。

次に、単位体積当りの核生成サイト面積 S について考える。フェライト粒子の核生成サイトは通常オーステナイト粒界であるが、加工を受けるとオーステナイト粒内に導入された変形帯も核生成サイトとして機能する³⁾。変形帯の密度は歪 ϵ の 2 乗に比例して増加し³⁾¹²⁾、単位体積当りのオーステナイト粒界と変形帯の面積の総和は、

$$S = A + B\epsilon^2 (\mu\text{m}^{-1}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

と表される。ここで、 ϵ は圧下率 p を用いて、

$$\epsilon = -\ln(1-p) \quad \dots\dots\dots (9)$$

と表される。式 (8) 中の A と B については以下のように計算される。

A はオーステナイト粒界のみの面積であり、粒径から求められる。すなわち、結晶粒の立体形状を正十四面体と仮定し¹³⁾ その体積等価直径を D_{eq} とすると、試料切断面上で測定される結晶粒断面の平均直径は $0.75D_{eq}$ となる¹¹⁾。従って、本試料の切断面上での見かけの平均オーステナイト粒径 $200 \mu\text{m}$ を 0.75 で除して、真の平均粒径は $267 \mu\text{m}$ と見積られる。正十四面体の体積に対する表面積の比は $6.6/D_{eq}$ であり¹⁴⁾、1 つの粒界面が 2 つの結晶粒に共有されることを考慮すると、単位体積当りのオーステナイト粒界面積は、

$$A = 6.6 / 267 / 2 \\ = 1.2 \times 10^{-2} (\mu\text{m}^{-1}) \quad \dots\dots\dots (10)$$

と見積られる。

一方、 B の値は、単位核生成サイト面積当りの核生成速度 I とともに、次のようにして求めることができる。Fig. 8 に

示された直線の勾配から、3 つの歪条件における単位体積当りの核生成速度が求められる。これらの値を単位体積当りの核生成サイト面積 S で除することにより、単位核生成サイト面積当りの核生成速度 I の値が 3 つの歪条件に対応して次のように求まる。

$$\begin{aligned} \epsilon = 0 \text{ のとき,} \\ I &= 2.0 \times 10^{-8} (1.2 \times 10^{-2})^{-1} \\ \epsilon = 0.22 \text{ のとき,} \\ I &= 3.3 \times 10^{-5} (1.2 \times 10^{-2} + 0.22^2 B)^{-1} \\ \epsilon = 0.51 \text{ のとき,} \\ I &= 3.5 \times 10^{-4} (1.2 \times 10^{-2} + 0.51^2 B)^{-1} \quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

I は ϵ の 1 次関数で記述できるので³⁾、式 (11) で示される 3 つの座標点 (ϵ , I) が 1 つの直線上に並ばなければならない。この条件から、

$$B = 0.7 (\mu\text{m}^{-1}) \quad \dots\dots\dots (12)$$

が得られる。また、この B の値を用いて単位核生成サイト面積当りの核生成速度は、

$$I = 1.7 \times 10^{-6} + 4.0 \times 10^{-3} \epsilon (\text{s}^{-1} \mu\text{m}^{-3}) \quad \dots\dots\dots (13)$$

と表される。

以上のように、 k と S および I の値を本実験結果から求め、これらの値を式 (5) に代入して変態過程を計算して変態挙動に及ぼす圧下率の影響を定量的に検討した。

Fig. 9 は、時間と変態率の関係である。圧下率の増加に伴って変態が短時間で進行し、圧下率が 0.8 ではわずか数秒で変態率 50% に達することがわかった。

Fig. 10 に、所定の変態率に達する時間と圧下率の関係を示した。圧延を施さないとき、 50% の変態に要する時間は数千秒である。しかし、わずか 20% の圧延によりこれが $1/10$ まで短縮され、 80% の圧延では $1/1000$ までも短縮されることがわかる。

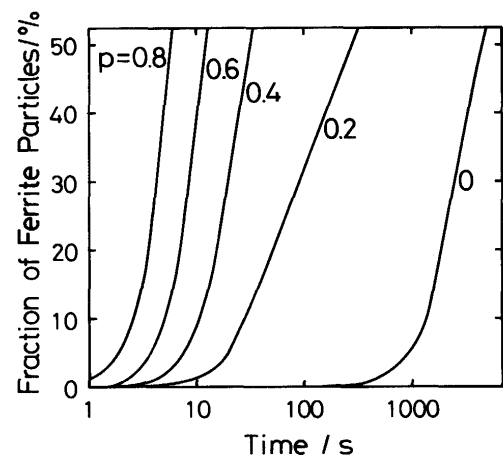


Fig. 9. Calculated transformation behavior for different rolling reduction.

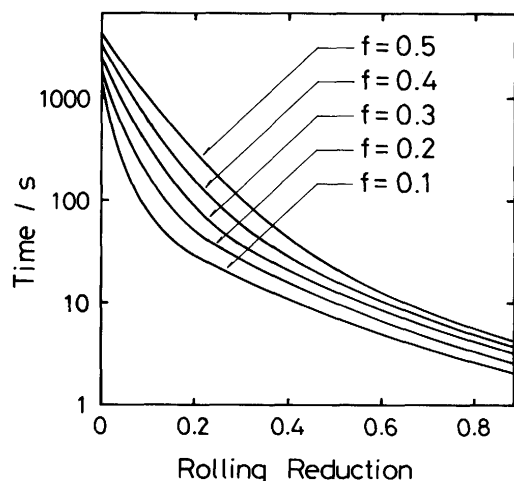


Fig. 10. Effect of rolling reduction on the time required for the transformation.
f: volume fraction of ferrite particles

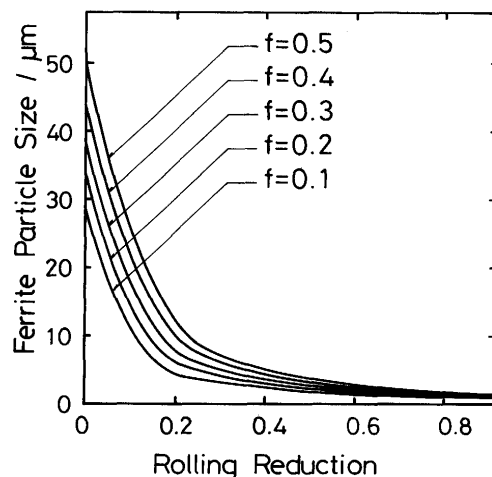


Fig. 11. Relation between the rolling reduction and the average ferrite particle size.
f: volume fraction of ferrite particles

Fig.11に、所定の変態率におけるフェライト粒子サイズと圧下率の関係を示した。変態率50%で比較すると、圧延されない場合には50 μ mの平均フェライト粒径であるのに対し、わずか20%の圧延により10 μ mまで小さくなり、60%以上の圧延では3 μ m以下になることがわかる。

5. 結論

Fe-0.51%C二元系合金について、0.3°C/sで冷却中の710°Cにおいて55°C過冷したオーステナイトに歪を付与し、この温度における等温フェライト変態過程を調査した。その結果、以下の結論が得られた。

1) 歪の付与により変態時間は著しく短縮され、フェライト粒子のサイズはきわめて微細になる。

2) フェライト粒子の核生成速度は、歪量の増加に伴い著しく大きくなる。

3) 変態中、フェライト粒子は時間に対して放物線則に従って成長し、その速度定数は歪量によらず一定である。

終わりに、新日本製鉄(株)室蘭製鉄所から賜った奨学寄

付金が本研究費の一部に充てられたことを記し、同社および関係者の方々に深く感謝の意を表します。また、本稿をまとめるにあたり多くの助言を頂いた北海道大学工学部教授石井邦宜先生に対し、深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) 福田 実, 橋本 保, 国重和俊: 鉄と鋼, **58**(1972), p.1832
- 2) 田中智夫, 田畑綽久: 鉄と鋼, **64**(1978), p.1353
- 3) 梅本 実, 大塚秀幸, 田村今男: 鉄と鋼, **70**(1984), p.557
- 4) 梅本 実, 大塚秀幸, 田村今男: 鉄と鋼, **70**(1984), p.238
- 5) Binary Alloy Phase Diagram, Vol.1, (1986), p.561 [ASM]
- 6) 松村 治, 鶴岡一夫: 日本金属学会誌, **38**(1974), p.708
- 7) W. A. Johnson and R. F. Mehl: Trans. AIME, **135**(1939), p.416
- 8) M. Avrami: J. Chem. Phys., **7** (1939), p.1103
- 9) M. Avrami: J. Chem. Phys., **8** (1940), p.212
- 10) J. R. Bradley and H. I. Aaronson: Metall. Trans., **12A**(1981), p.1729
- 11) K. Matsuura and Y. Itoh: Mat. Trans. JIM, **32**(1991), p.1042
- 12) A. Sandberg and W. Roberts: Thermomechanical Processing of Micro-alloyed Austenite, (1982), p.405 [Met. Soc. AIME]
- 13) F. C. Hull and W. J. Houk: Trans. AIME, **197**(1953), p.565
- 14) K. Matsuura and Y. Itoh: ISIJ Int., **31**(1991), p.366