

# 炭素鋼の変態膨縮に関する研究

近 藤 正 男

Dilatometric Measurement of the Transformation of Steel.

Masao KONDO

In this research, dilatation of the hypereutectoid steel at  $A_{r1}$  point was measured. Increment of the specimen's length cooled from  $750^{\circ}\text{C}$  is almost twice of it cooled from  $900^{\circ}\text{C}$  at  $A_{r1}$  point. The reason is that the proeutectoid cementite precipitates at the same time with the  $A_{r1}$  transformation. Cooling speed and the dilatation of the various carbon steels were measured. And the author noticed that the cementite precipitation of the abnormal steel was slow than that of the normal steel.

## 1. 緒 言

炭素鋼の変態膨脹収縮に関する研究は、鉄鋼の研究に於ては最も基礎になるものであるから、百来多くの研究が発表されて居る。1899年、G. Svedelius & H. Lechatelier の研究以来、G. Charpy & L. Grenet、Rosenhain & Humfrey、W. Broniewsky、Benedicks、日本でも今野、本多、菊田、佐藤、佐藤、の研究があり、 $A_1$ 、 $A_3$ 、 $A_4$  変態点及び変態量について測られて居り、更に1943年には木戸の測定がある。これらの殆んど大部分は平衡状態の決定を目的としたものであるが、そうでなければ  $A_{r'}$  変態の研究であつて、 $A_{r'}$  の挙動については殆んど触れて居らない。1940年前後に於ける鋼の変態理論に関する華かな討議の際に、例えば H. Lange はその  $A_{r'}$  変態理論に関して変態膨縮曲線を求めて居るが、高炭素鋼については極めて簡単に過ぎている。筆者は高炭素鋼の研究中に認めた特異な現象について既にその要旨を日本金属学会誌に報告して置いたが、以下、その報告を行うと共にその現象について考察した結果について述べる。

## 2. 研究装置及び試料

研究装置は Leitz 製熱膨脹計で、その要部は図-1 に示した様に、試料の膨脹によつて、プリズムを傾斜させ、光源からの光線の方向を変え、その変化をプロマイド紙上に記録する様になつている。図-1 a は全膨脹曲線を描かしめる場合、図-1 b は示差膨脹曲線を求める場合の装置を示す。示差曲線を求める場合には、中性体として下記膨脹係数を有するニツゲル、クロム合金を用いた。 $(20^{\circ}\sim 250^{\circ}\text{C}$  に於て  $13.9 \times 10^{-6}$ 、 $250 \sim 500^{\circ}\text{C}$  に於て  $16.0 \times 10^{-6}$ 、 $500 \sim 738^{\circ}\text{C}$  に於て  $18.9 \times 10^{-6}$ )

試料は表-1 に示す成分と結晶粒度の炭素鋼を径 5 mm に線引した後径 3.6 mm 長さ 50 mm に機械加工を行い、之を  $A_1$  変態点直上から徐冷によつて焼鈍し、均一な球状セメンタイトとしたもので、セメンタイト粒度は  $2\mu$  である。

表-1 試 料

試 料	成 分 (%)					結晶粒度 No.
	C	Mn	Si	P	S	
No. 1	1.19	0.30	0.17	0.016	0.008	8
No. 2	0.76	0.57	0.16	0.021	0.013	7
No. 3	0.40	0.52	0.17	0.028	0.015	7.5

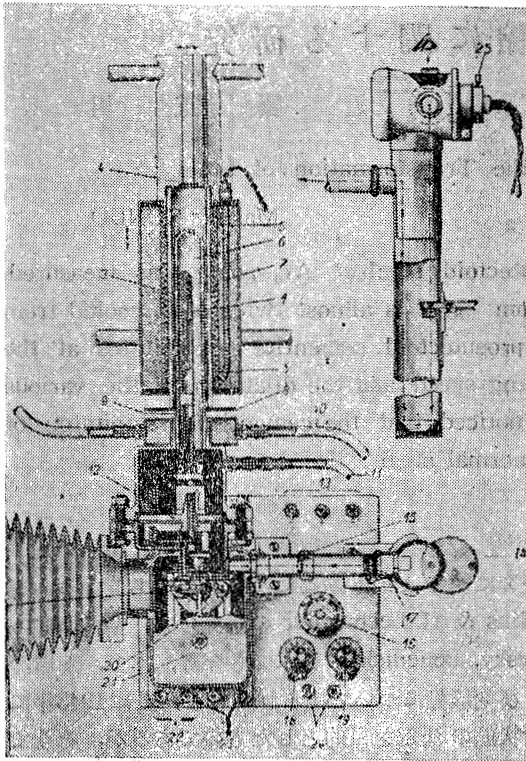


図-1a

- 1 試料 3 熱電対 5 電気炉  
14 光源 15 レンズ 20 電流計反射鏡

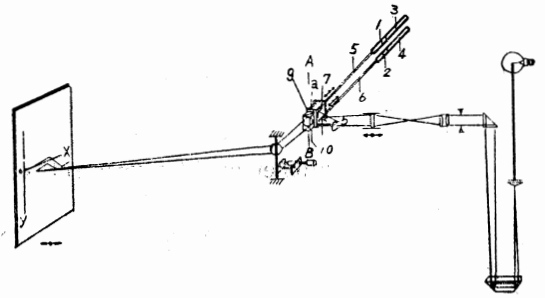


図-1b

- 2 中性体 1 試料

### 3. 炉中冷却の場合

#### (1) 過共析鋼 (試料 No.1) について

過共析鋼の球状パーライト組織のものを加熱徐冷すると、最高加熱温度が低ければ球状パーライト、高ければ層状パーライトが得られるのであつて、加熱前の顕微鏡組織がパーライトでもソルバイトでも、その最高加熱温度が低ければ球状パーライトを得る事は明かである。それ故今最高加熱温度を  $950^{\circ}\text{C}$ 、 $820^{\circ}\text{C}$ 、 $760^{\circ}\text{C}$  にとり、各温度に20分保つた後1分間  $10^{\circ}\text{C}$  の冷却速度を以て冷却せしめ、それぞれの場合に於る  $\text{Ar}'$  点附近の膨脹収縮

曲線をしらべた。図-2a 曲線 I は  $760^{\circ}\text{C}$  から冷却し、均一な球状パーライトを得る場合、曲線 II は層状パーライトを混ざる場合、曲線 III は網目状セメントイトと層状組織を得る場合で、 $\text{Ar}_1$  点は約  $5^{\circ}$  づつの差があり、 $\text{Ar}_1$  変態膨脹量は曲線 I が最大で、曲線 III が最小である。しかもその差は実験で誤差範囲を遙かに越えている。よつてこの原因を検せんとして次の実験を行つた。

(a) 試料脱炭の影響——試料はごく軽微ではあるが脱炭するから、これらの曲線を同一試料で描かせた後、即ち  $760^{\circ}\text{C}$ 、 $820^{\circ}\text{C}$ 、 $900^{\circ}\text{C}$  から徐冷した後再び  $760^{\circ}\text{C}$  からの冷却による曲線をとつたが図-2 曲線 IV の様に再びその膨脹量は大きくなった。更にその試料を  $10^{-1}\text{mm Hg}$  の真空中で  $900^{\circ}\text{C}$  より徐冷させると図-2b の様になり、 $\text{Ar}_1$  変態膨脹量は少くなる。以上によつて、この  $\text{Ar}_1$  変態膨脹量は最高加熱

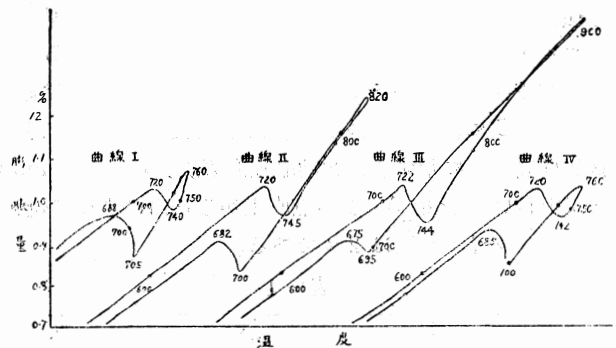


図-2a 試料1の変態曲線(加熱冷却  $10^{\circ}/\text{min}$ )

温度が高い場合は小さく、低い場合には大きくて、酸化脱炭量には無関係である事は明かである。

(図-2b,  $\text{Ar}_1$  変態開始直前に於て、ほぼ垂直に、曲線が下つているが、この点については後の項に述べる。)

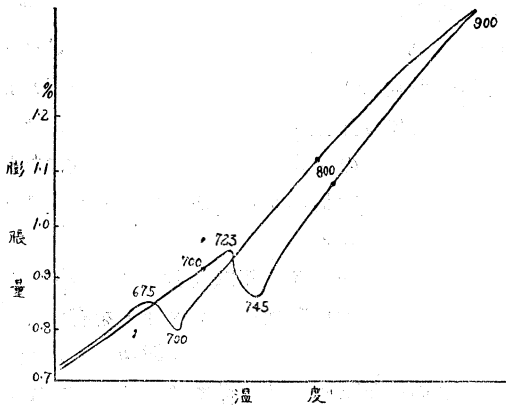


図-2b 試料1真空中加熱(冷却速度 $10^{\circ}/\text{min}$ )

表-2 Ar' 変態量に及ぼす圧力

試料にかかる 圧力 kg/mm <sup>2</sup>	Ar' 変態膨脹量 (mm)		
	750°C 冷却	820°C 冷却	950°C 冷却
38.7	40.0	37.0	21.0
6.7	12.5	12.0	7.1

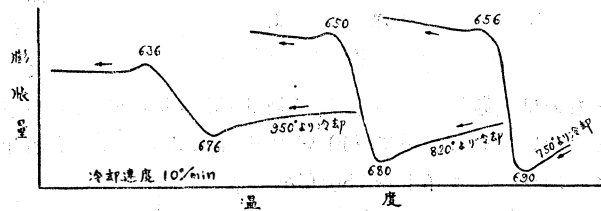


図-3 示差膨脹曲線による変態膨脹曲線  
(圧力 38.7kg/mm の場合)

(c) この膨脹量の差は単に見掛けに

過ぎないものかをを吟味する。先づ炉の温度分布であるが、これは図-4の様に60mmの長さ

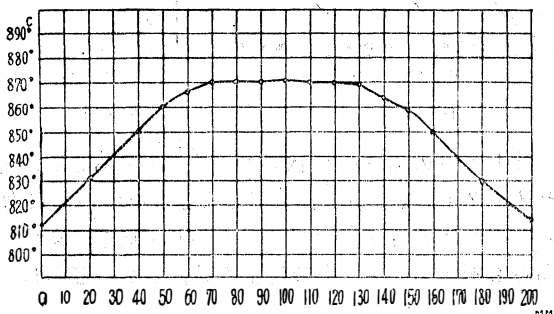


図-4

で変態して居ないが、その温度範囲を縮めることが出来た。若し一定温度で起つたならば、その変態膨脹量は曲線 I の AB' より小さいであろう。(ここに B' 点は DC 線の延長と AB 線の延長との交点である) この値は同図曲線 II、最高加熱温度 760°C のものよりも明かに小さい。よつて単に見かけの差ではない事が言える。

(d) 最高加熱温度の相異によつて Ar<sub>1</sub> 変態膨脹が異なるのは、初析セメンタイトが Ar<sub>1</sub> 点に至る迄は析出しないで、Ar<sub>1</sub> 点に於てパーライトと同時に析出するのではないかとされる。

て  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  であつて、温度の不均一によるものではない。次に図-2aを見ると曲線 I は Ar<sub>1</sub> 変態開始温度と終了温度との差が  $17^{\circ}\text{C}$  で曲線 II はその差が  $18^{\circ}\text{C}$  である。変態に要する温度区間の大きいものの方が全体として小さく見えるかを吟味するために、注意して一定温度で変態が完了する様にした。即ち、図-5 曲線 I は  $900^{\circ}\text{C}$  より冷却し、 $695^{\circ}\text{C}$  で変態せしめたものである。厳密には一定温度

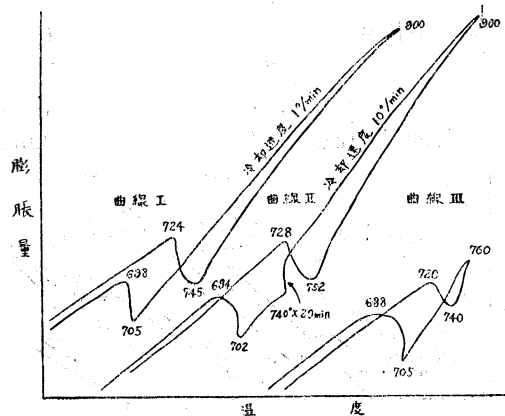


図-5

よつて更に冷却速度を遅くして、 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  で冷却を行つたものは、図-6 曲線 I の様になり、図-5 の曲線 I と比較すれば、膨脹量は増し、変態点も上昇している。更に  $\text{Ar}_1$  点に至る前  $740^{\circ}\text{C}$  に 20 分間保ち初析セメントイトを充分析出せしめたものは更に膨脹量が増加した。(曲線 II)，よつて、図-2 b の曲線は  $\text{Ar}_1$  変態開始直前に初析セメントイトの析出がごく僅かに生じたものであることがわかる。

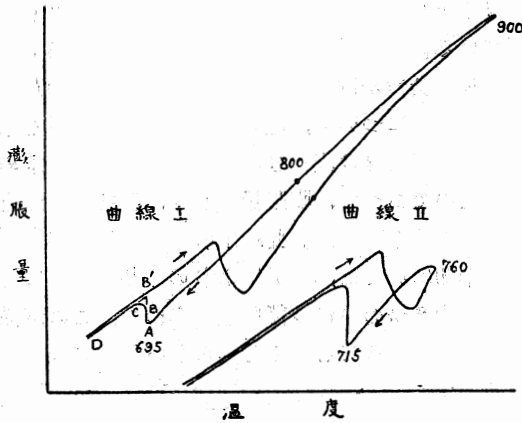


図-6

たものは変態速度が遅くて変態膨脹量が少いが、冷却途中で  $750^{\circ}\text{C}$  に 20 分保つたものは膨脹量が大きとなつている。更に  $740^{\circ}\text{C}$  で充分セメントイトを析出せしめたものは、その膨脹量は更に大となり、球状パーライトを  $750^{\circ}\text{C}$  から冷却して変態させる場合の変態曲線と殆んど一致した。そしてその結果得られた組織は、初析セメントイトが網目状に析出し、層状のパーライトより成る組織であつた。

次に球状パーライト鋼を  $\text{Ac}_1$  変態点直上に加熱して冷却し、 $\text{Ar}_1$  変態

を行わせる場合の変態速度が、初晶が網目状に析出し残りの部分が層状のパーライトである組織を得るよりも変態速度が早いのは、後者では初析セメントイトを充分析出してしまわないで  $\text{Ar}_1$  変態によつて同時に生ずるからであつて、初析セメントイトが  $\text{Ar}_1$  変態前に充分析出して居りさえすれば、その変態速度は、球状パーライトの生ずる場合も層状パーライトの生ずる場合も殆んど等しい。

(2) 0.76%炭素鋼について

上記の球状セメントイトの残つている場合と比較するために、その残つていない共析組成に近い 0.76%炭素鋼について前記と同様の実験を行つた。即ち試料を加熱してゆき、 $\text{Ac}_1$  変態を完了した直後に冷却したもの、 $820^{\circ}\text{C}$  迄加熱して冷却したもの、 $900^{\circ}\text{C}$  から冷却したもの及び、冷却途中  $735^{\circ}\text{C}$  に 30 分間保つて冷却 (冷却速度  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) したものの、変態点と変態膨脹量とを比較した。

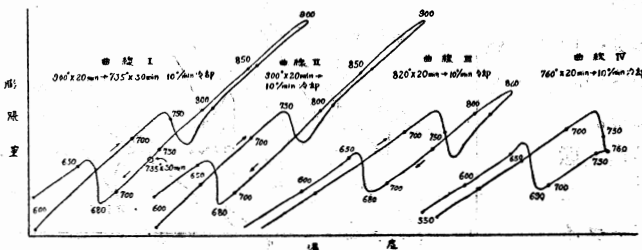


図-8a 変態胡脹曲線 (0.76% C 炭素鋼)

膨脹量はどれも殆んど等しいが、変態点は  $760^{\circ}\text{C}$  から冷却し、球状組織を得る場合が、他の場合よりも  $10^{\circ}\text{C}$  高かつた。又変態速度はすべて同一であつた (図-8)

(3) 0.40%炭素鋼について

初晶が 2 相である場合と比較する

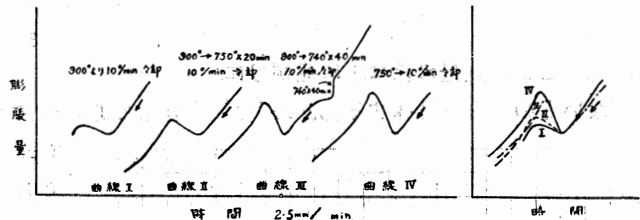


図-7a

図-7b

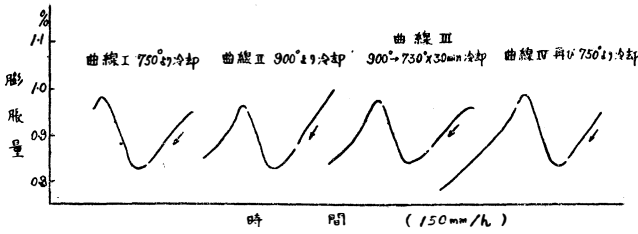


図-8b 変態膨脹速度 (0.76% C 炭素鋼)

冷却した場合の変態曲線を示したもので、いずれも 10°C/min の冷却速度である。又それと比較するために 1°C/min の冷却速度のものを曲線 V に示した。曲線の B 点はほぼ初晶の析出が終つたと考えられる点である。これらを見るといずれも Ar<sub>1</sub> 変態膨脹量に差異がない。即ちこれらの冷却ではすべて初析晶が析出した後に共析変態が行われるからである。又冷却が早いと Ar<sub>3</sub> の開始は等しい温度でも初晶の析出に時間を要するので、冷却の早い方が共析変態点は低くなる。(曲線 III と V とを比較せよ。)

#### 4. 空冷の場合

次に試料を変態点以上から空冷した場合の変態状況について吟味した。本研究に用いた装置では、試料が内径 5.5 mm の石英中に入ったままで空冷されたので、その冷却速度は 700°C に於て 8°C/sec であった。

##### (1) 過共析鋼について

試料 I (1.19% C) について空冷の場合の Ar' 変態膨脹を検した。その結果は図-10 に示した通りで 900°C から空冷したものは Ar' 変態が起る迄にセメントイトの析出がなく、セメントイトは Ar' 変態と同時に析出するから Ar' 膨脹量が著しく小さくなつていて、得られた顕微鏡組織は均一なソルバイトである。次に 900°C から冷却の途中セメントイトを初析出せしめつつ Ar' 変態に至つた場合には、Ar' 変態開始前にセメントイト析出量が大きい程、膨脹量は大きく、変態開始温度は高くなつていく。

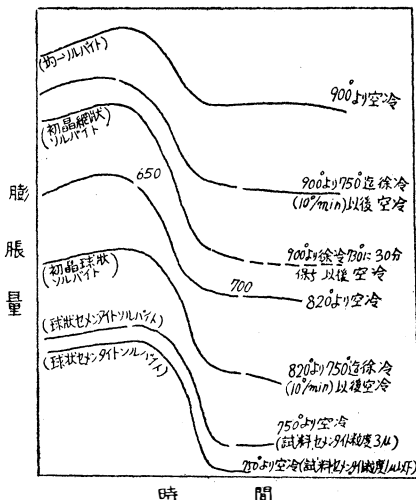


図-10 試料 1 空冷の変態曲線

ために、0.40% 炭素鋼について同様の実験を行った。図-9 は最高加熱温度を種々変化して、Ac<sub>1</sub> 変態の終了した温度 740°C (曲線 I), それより少々高い温度 760°C (曲線 II) Ac<sub>3</sub> 変態の終了した温度 810°C (曲線 III), 及び 900°C (曲線 IV) より

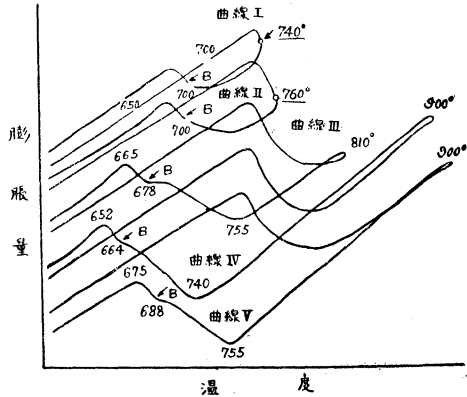


図-9 0.40% C 炭素鋼変態曲線

曲線 I, II, III, IV, は冷却速度 10°C/min  
V は 1°C/min

820°C から冷却し、初晶が球状をしている場合も同様であり、750°C から空冷して残留球状セメントイトの著しく多い場合も変態速度には殆んど差が認められないが、残留球状セメントイトの著しく多いものは、変態開始直後の変態速度が他のものに比べていくらか大きい傾向を持つている。

次にセメントイト粒度が変態速度に及ぼす影響を見るために、加熱前セメントイト粒度 3 μ のものと、900°C から焼入焼戻をして微細なセメントイトの分布したもの

とについてその空冷による変態曲線をとつた。図-10の下部の曲線はそれであつて、後者の方が変態開始が少々早く、開始直後の変態速度が少々大きい様な傾向を持つているが、全体としては変態速度にあまり差が認められない。

## (2) 0.40% 炭素鋼について

比較のために、0.40% 炭素鋼を 820°C 及び 900°C より空冷した場合の変態曲線をとつた。図-11 はそれであつて、820°C より空冷したものは変態曲線の間際に僅かではあるが折点があつて、最初主として初析晶が析出し、次いで共析晶の析出する事が認められる。900°C より空冷したものは更に過冷し、初析晶の析出が急激であり、全体として、後者の方が冷却変態速度は急激ではあるが、初析晶と共析晶との量を合わせると膨脹量は両者殆んど同量である。

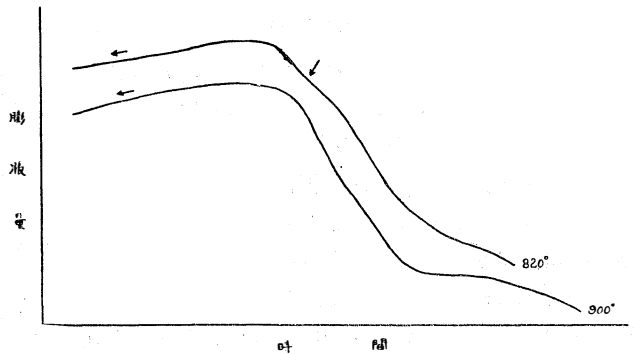


図-11 試料3 (0.40% C) 空冷の変態曲線

## 5. 滲炭した過共析鋼について

電解鉄を固体滲炭剤(木炭60+炭酸バリウム40)で滲炭し、経約4mm、長さ50mmの試験片を作り、上記と同様の試験を行つた。試料は外周が1.3% C中央部が0.9% Cであつた。図-12はこの試料を最高加熱温度910°C及び810°Cから冷却した場合、冷却速度10°C/min、1°C/minと

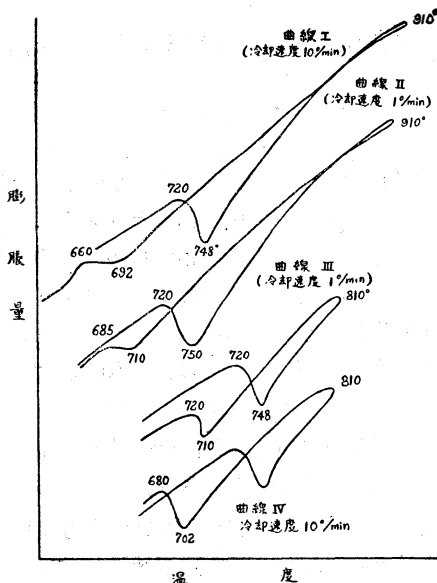


図-12 滲炭せる電解鉄の変態膨脹曲線

についての冷却曲線であつて、最高加熱温度910°Cのものでは冷却速度が1°C/minのものでもAr<sub>1</sub>変態膨脹量は非常に小さい。これは初析セメンタイトが析出し難いためであろう。910°Cから冷却したものはいずれも明瞭な異常組織を示していた。810°Cから冷却したものは、いずれもAr<sub>1</sub>変態膨脹が910°C冷却のものより大きくなつている。そしてその結果得られた顕微鏡組織は大きいセメンタイト粒と細いセメンタイト粒との混合している球状パーライトであつた。

この様に曲線の形状が冷却速度によつてあまり変わらないで、最高加熱温度によつて異なるのは、加熱温度が高いと、初析セメンタイトの核が出来難くなることを示している。R. F. Mehl & C. Wellsの高純度鋼<sup>(14)</sup>についての研究によるも1.2% Cでは加熱冷却速度2°C/minでAc<sub>cm</sub> 920°C Ar<sub>cm</sub> 850°Cで70°Cの差を得て居り、変態曲線も、本研究の結果とよく一致している。

又この様に異常組織を得る電解鉄の滲炭したもの、正常組織を得る市販鋼とでは、セメンタイト核の生成の難易に非常な差のある点が注目される。変態温度は電解鉄の方が5°C高いだけであり、又変態曲線は異常組織を得る場合も、正常組織を得る場合も、本研究装置の精度範囲内では全く差が認められない。これらの結果はH. Corneliusがカーボニール鋼と坩堝鋼とについて比較した場合にも認めている所である。<sup>(15)</sup>

## 6. 結 論

最高加熱温度が低くて  $Ar_1$  変態によつて、球状パーライトを生ずる場合の  $Ar_1$  変態膨脹量は、 $A_{cm}$  点以上から冷却して層状パーライト組織を生ずる場合の  $Ar_1$  変態量より著しく大きく 1.19% C 炭素鋼に於ては前者 (750°C より 10°C/min で冷却した場合) は、後者 (900°C より 10°C/min で冷却した場合) の約 2 倍になつてゐる。その原因は、最高加熱温度が高い場合には、冷却の際初析セメントタイトの析出速度が遅くて、 $Ar_1$  変態点に至つて同時に析出する為である事を実験的に確かめ、 $Ar_1$  点に達する前に初析セメントタイトが充分析出していない場合には  $Ar_1$  変態速度も小さい事を認めた。結晶粒度 8 の 1.19% C 炭素鋼を冷却速度 10°C/min 乃至 1°C/min で冷却する場合、 $Ar_1$  変態点に達する前に初析セメントタイトが球状に分布していても網目状に分布していても、その  $Ar_1$  変態膨脹量及び速度には差が認められなかつたが、空冷の場合には前者の方が変態開始直後の変態速度が少々大きく、又セメントタイトの微細なものの方が粗なものよりも変態開始が少々早く、又変態開始直後の変態速度もごく僅かに大きい様である、亜共析鋼では、初析  $\alpha$  相の析出が容易であつて、徐冷では初析が認められるが、空冷に於ても変態曲線に初晶の析出が認められる場合がある。

電解鉄に滲炭した鋼は高温から冷却すると、異常組織が得られるが、この  $Ar_1$  変態曲線は正常組織を生ずる市販鋼の  $Ar_1$  変態曲線に比べて差異が認め難く、本研究に使用した鋼では前者が 5°C 高いのみであり、唯前者では 900°C からの冷却速度が 1°C/min の場合でもセメントタイトの析出が非常に困難な点が注目された。

終りに臨み本研究の御指導をいただいた東北大学名誉教授 村上武次郎先生に深い感謝を捧げる。

- (註) (1) G. Svedelius & H. Lechatelier, *Comp. Rend*, 129 (1899), 279, 331  
 (2) G. Charpy & L. Grent, *Comp. Rend*, 134 (1902), 598,  
 (3) Rosenhain & Humfreg, *Proc. Roy. Soc.*, 83 (1910), 220,  
 (4) W. Broniewsky, *Comp. Rend*, 156 (1913), 699  
 (5) Benedicks *Jour. Iron & Steel Inst.*, (1914) I, 419,  
 (6) 今野, 金属の研究, 1 (1924), 375,  
 (7) 本多, 菊田, 金属の研究, 1(1924), 454,  
 (8) 佐藤, 金属の研究, 2(1925), 477,  
 (9) 佐藤, 金属の研究, 6 (1929), 53,  
 (10) H. Lange, *Mitt. K.-W.-I., Eisenforsch.*, 21(1940), 229  
 (11) 近藤, 日本金属学会誌, 11 (1947), 10,  
 (12) 近藤, 日本金属学会誌, 11(1947)17,  
 (13) 近藤, 日本金属学会誌, 7(1943), 193,  
 (14) R. F. Mehl & C. Wells. *Amer. Inst. Min. Met. Eng., Tech. Publ. No. 798*,  
 (15) H. Cornelius, *Arch. Eisen hoeffenwes.*, 8 (1935), 461,

以上

正 誤 表

頁	行目
目次	17
6	下より10
6	下より8
6	下より8
9	下より4
9	下より3
10	5
〃	6
38	9
50	図-6 縦軸の
52	10
53	図-1 横軸の
60	表-2 上段中央
61	下より13
81	3
122	図-4 縦軸の
123	表-2
124	8
Contents	15
〃	〃
〃	22
〃	〃
〃	25

誤

三元系平衡

$r_1$

$r_1$

$r'_2$

$$k = \frac{\omega^2 \text{Loc} - 1}{\omega c}$$

$$= \frac{r^2(1 - \omega \text{Loc})^2 + \omega^2 \text{Lo}^2}{r^2(1 - \omega \text{Loc})^2 + \omega^2 \text{Lo}^2}$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{R_2(R_1 + R_2) + (2x + k)(3x + k)}{R_2(R_1 + R_2) + (2x + k)(3x + k)}$$

$$\phi_2 = \tan^{-1} \frac{R_2(R_1 + R_2) + (2x + k)(3x + k)}{R_2(R_1 + R_2) + (2x + k)(3x + k)}$$

Eng

電流 率

$n_D^{20}$

$\text{AlCl}_3$

h

れの

変態量よりて

剪断応力

焼鈍クロム鋼

焼鈍クロム鋼

Actives

Chloride

Tadatamo

Hetone

Pigiron

正

三元系平衡

$r_2$

$r_3$

$r'$

$$k = \frac{\omega^2 \text{LoC} - 1}{\omega C}$$

$$= \frac{r^2(1 - \omega^2 \text{LoC})^2 + \omega^2 \text{Lo}^2}{r^2(1 - \omega^2 \text{LoC})^2 + \omega^2 \text{Lo}^2}$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{R_2(R_1 + R_2) + 2x^2 + 3kx + k^2}{R_2(R_1 + R_2) + 2x^2 + 3kx + k^2}$$

$$\phi_2 = \tan^{-1} \frac{R_2(R_1 + R_2) + (2x + k)x}{R_2(R_1 + R_2) + (2x + k)x}$$

Eng

電流効率

$n_D^{20}$

$\text{AlCl}_3$

h

(mm)

ると

変態量よりも

剪断応力

焼鈍クロム鋼

焼鈍クロム鋼

Activities

Chloride(V)

Tadatomo

Ketone

Pigiron