研 究

炭素鋼の恒温變態によつて生成せる波來土の顯微鏡組織*

近 藤 正 男**

Masao Kondo: The Micro-Structure of Pearlite formed by the Isothermal Transformation of Carbon Steel. The pearlite in carbon steel appears in different forms according to the conditions cooling from γ -phase. Using three carbon steels, I have obtained different micro-structures by the isothermal transformation in several temperatures quenched from several maximum heating temperatures (below 950°) and its results are shown in charts. The forms obtained are the globular pearlite, lamellar pearlite, sorbite, sorbitic globular, sorbitic lamellar, dotted lamellar, Atols (named by Osmond) and the mixture of these forms. In this study is discussed the formation of these different structures.

In hypereutectoid steel, the upper limit of the maximum heating temperature, from which the globular pearlite is formed on cooling, reaches to the temperature immediately below the A_{cm} point, and the lower limit of the transformation temperature is 710° in pearlite steel previously globulized and 700° in those of the other structures. The uniform globular pearlite is obtained by transformation at 710° on cooling from 825° .

The form of pearlite is remarkably influenced by the form of the cementite in steel before heating. In 0.76% C steel, globular pearlite is formed at the maximum heating temperatures below 825° in globular pearlite steel, but does it not occur in lamellar pearlite steel. In 0.40% C steel, fine globular cementite is formed from globular pearlite and martensite steels heated, but in those of the other structures the coarse globular cementite is formed.

(Received December 14, 1942)

I. 緒 言

鋼を變態點以上の溫度から冷却する場合に、共析するセメントイトの形狀は、その冷却條件によつて異なり、一定成分の鋼に於ても、最高加熱溫度と冷却速度とが異なれば著しい差を生じ、或る場合には層狀となり、或る場合には球狀となる。このセメントイトの形狀は鋼の性質に大きい影響を及ぼすので、この生成條件についての研究は早くから行はれた。最高加熱溫度の影響については、本多・齋藤兩博士⁽¹⁾、石原富松博士⁽²⁾、横田工學士⁽³⁾の研究があり、冷却速度の影響の大なることは、Hanemann & Morawe⁽⁴⁾、Portvin & Vernard⁽⁵⁾その他の研究者によつて指摘せられてゐる所である。

著者は、この生成條件を組織的に研究する爲に炭素含有量、處理前の顯微鏡組織、最高加熱溫度を變じて種々の溫度に於て恒温變態を起さしめ、室溫に冷却後、波來土が如何に異なるかを觀察し、同一形狀を示す範圍を決定し

て圖表となし、尙かくして得られた代表的顯微鏡組織を示して、その生成機構を考察した。

II. 測定装置及び測定方法

恒温變態の研究には、從來無定位磁力計法、精密電磁石法、Anisometer 法、熱膨脹計法等が用ひられてゐるが、本研究はその目的上、試料の多數を要する爲、又變態時間の測定はさほど重要な意味を持たない爲、これら測定法を用ひないで、最高加熱溫度に熱した爐中にて、所要時間加熱した後、變態溫度に保つた鉛槽爐中へ手早く投入し、その爐中に所要時間保持した後水冷した。かくして得た試料について、顯微鏡組織を検査した。

(1) 最高溫度加熱爐には内徑 5cm、長さ 35cm のニクロム管狀電氣爐を用ひ、溫度誤差 5° の溫度均一部分の長さを 10cm とした。950° 加熱の場合には、脱炭を防ぐ爲に、その爐中に石英管を挿入し、兩端に硬質ガラス製のキャップを嵌め、眞空度 10^{-4} mm Hg の眞空中で加熱した。

(2) 鉛槽爐は内徑 7cm、深さ 14cm のニクロム管狀電氣爐で、その溫度差 $\pm 4^\circ$ の部分の長さは 6cm である。底部から同一高さの部分は器壁のごく近傍を除き同一溫度を示したから、熱電對の熱接點は試料と同一高さの部分に置く様にした。溫度の調節は手働で行ひ、 $\pm 5^\circ$ 範圍

** 不二越研究所

* 昭和17年10月本會第12回富山大會に發表

(1) 本多、齋藤、東北帝大理科報告, 9 (1920), 311.

(2) 石原、金屬の研究, 2 (1925), 88.

(3) 横田、金屬の研究, 5 (1928), 119.

(4) H. Hanemann, F. Morawe, Stahl u. Eisen, 33 (1913), 350.

(5) A. Portvin, V. Vernard, J. Iron & Steel Inst., 104 (1921), 145.

にて一定となすことは容易で、大部分 $\pm 2.5^\circ$ の範囲で一定となし得た。Fig. 1 は鉛槽の温度変化を自動記録計にて自記したものゝ一例である。

Fig. 1 Temperature of the Lead Bath.

(3) 最高加熱温度保持時間は本多・齋藤⁽¹⁾、石原⁽²⁾諸博士の研究と一致せしめる爲 20 分とし、変態温度保持時間は村上博士及び今井工學士⁽⁶⁾の研究を参照して決定した。変態完了迄の時間は、試料の顕微鏡組織と最高加熱温度とによつて異なるが、各変態温度に於ける保持時間の最大値を Table 1 に示した。変態によつて一旦生じた層状波来土は長時間加熱しても、その形状に著しい変化のないことが認められてゐるから⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁷⁾、変態温度に於ける保持時間が長きに過ぎても誤りを生じない。本試験では変態完了迄の時間と保持時間との差は 30 分以下の筈である。

るが、念の爲変態途中に水焼入してその形状を検したものもある。

Table 1 Maximum Holding Time at Temperature of Transformation.

Specimen	Temperature of Transformation (min)					
	710°	700°	680°	660°	640°	up to 620°
1	300	120	30	10	10	5
2	420	300	120	10	10	5
3	480	300	240	30	20	5

(4) 試料を鉛槽爐に投入してより、試料が変態温度になる迄の時間を測定する爲に、徑 5mm、長さ 20mm の試料 2 個を平行に接觸せしめ、その接觸部中央に孔を穿つて、熱電對の熱接點を挿入し、その温度変化を懸垂型ミリボルトメーターによつて讀取つた。Fig. 2 はその結果である。これによれば、試料を鉛槽爐中に投入してから 20 秒以下で、試料は爐の温度と一致するが、660°以下の變態温度では 20 秒以内に Ar₁ 變態が生ずる結果、變態完了して始めて爐の温度と一致する。この變態完了時間は他の研究結果⁽⁶⁾とほぼ一致してゐる。

(5) 鉛槽爐の温度が上下すれば、一旦共析變態を完了せる部分も再び逆に γ 相への變態を起す虞がある。若しこの變化が起れば、最初層状に現れた波来土も再び γ

(6) 村上, 今井, 本誌, 6 (1942), 145.

(7) C. H. Desch, A. T. Roberts, J. Iron & Steel Inst., 107 (1923), 249.

相となり、再度共析する場合球状として現れることもあり得るから、温度が僅かに上下しても變態が逆方向に進行しないことを確めて置く必要がある。この爲に Leitz 製 Universal Dilatometer を用ひ、試料(長さ 50mm 平

行部の徑 3.6mm)の先端に穿つた孔へ熱電對の熱接點を挿入し、温度の變化による試料の寸法變化

Fig. 2 a

Fig. 2 b

Fig. 2 Temperature Change at this Experiment. (Max. Heat Temp. $\rightarrow$ Temp. of Transformation) Specimen 1-19% C Carbon Steel.

を scale によつて讀み得る様に裝置した。この際用ひた試料は、0.76% C 炭素鋼で、擴大倍率 781 倍に於て Ar₁ 變態量は 46.9mm (裝置による讀み)であつた。先づ試料を 905°迄加熱し、徐冷して變態點に達せしめ、變態途中 670°附近にて約 20°に亙り温度を變化せしめたが、Fig. 3 に示す様に、温度を上昇せしめても逆に變態が進むことなく、膨脹をするのみである。即ち、

Fig. 3 The Change of Transformation Velocity by Temperature.

第 1 回一變態途中 662 $\rightarrow$ 679°の上昇に於て變態量(膨脹) 21.0mm であつた。この温度に於ける熱膨脹係數を

14.7×10^{-6} とすれば⁽⁸⁾

この場合の單なる溫度上昇による膨脹は 9.7mm となるから、

實變態量は $21.0 - 9.7 = 11.3\text{mm}$ となる。

第 2 回一變態途中 $662 \rightarrow 670^\circ$ の上昇に於て變態量 (膨脹) 5.0mm で、單なる溫度上昇による膨脹 4.6mm であるから、實變態量はその差 0.4mm となる。

即ち、いづれの場合にも變態途中、加熱による收縮は起つてゐないものと認められる。

顯微鏡組織に於ても Fig. 4 に示すが如く、變態速度の小さい部分があつたので、波來土の斷續は認められるが球狀化してはゐない。

(6) 顯微鏡試料は表面研磨後ピクリン酸 5% アルコール溶液にて腐蝕をなし、顯微鏡の倍率 1320 倍 (油浸對物鏡 N.A. 1.25

×1000

Fig. 4 Micro-Structure of 0.76% C Carbon Steel after the Treatment of Fig. 3.

に 12 倍の接眼鏡を用ふ) で觀察した。この際識別し得る最小距離は 0.4μ で、これにより層狀として認め得ないものをすべて粗粒波とした。

III. 試 料

使用せる試料は Table 2 に示す成分を有する市販の炭素鋼で、入手せる試料に Table 3 に示す熱處理を施

Table 2 Chemical Composition of Specimen (%).

Specimen	C	Mn	Si	P	S
1	1.19	0.30	0.17	0.016	0.008
2	0.76	0.57	0.16	0.021	0.013
3	0.40	0.52	0.17	0.028	0.015

Table 3 Heat Treatment of Specimen.

Specimen	Micro-Structure	Heat Treatment
1 a, 2 a, 3 a	Globular Pearlite	950° water quenched, heated to 760° and slowly cooled (velocity 1°/min)
1 b, 2 b, 3 b	Sorbite	950° air-cooled
1 c, 2 c, 3 c	Lamellar pearlite	950° × 25 min → 870° × 10 min → 685° × 5 min air cooled
1 d, 2 d, 3 d	Martensite	950° water-quenched

して、球狀波來土、層狀波來土、粗粒波及び麻留田となして使用した。その顯微鏡組織を Fig. 5~7 に示す。試料記號は Table 2 及び Table 3 より明瞭なる如く、1, 2, 3 を以て炭素含有量の別を示し、a, b, c, d を以て顯微鏡組織の別を示す。

1 a

1 b

1 c

1 d

Fig. 5 Micro-Structure of Specimen 1 (1.19% C).

×1000

2 a

2 b

2 c

2 d

Fig. 6 Micro-Structure of Specimen 2 (0.76% C).

×1000

(8) Amer. Soc. Metals, Metals Handbook, (1939), 486.

Fig. 7 Micro-Structure of Specimen 3 (0.40 % C).

×1000

変態点は磁気分析によつて測定し、又 A_{cm} 点及び A_3 点は各温度より焼入れ、顕微鏡組織の検査により決定した。Table 4 はその結果を示す。表中 min. aus. temp.⁽⁹⁾ とは試料 1c, 2c, 3c を変態点附近の温度迄加熱し、その各温度に 20 分保つて水焼入れ、顕微鏡組織に層状波来土を認め得ない最低加熱温度であつて、 A_{c1} 点と一致してゐる。

Table 4 Critical Point of Specimen.

Specimen	A_{c1} by Magnetic Analysis*	A_{r1}	A_{cm} or A_3 by Micro- Structure	Min. aus. Temp. by Micro- Structure
1	755°	685°	$A_{cm}=900°$	755°
2	745	695	—	745
3	735	695	$A_3=770°$	735

* heating and cooling velocity 0.7°/min.

非金属介在物及び結晶粒度は日本學術振興會制定の方法⁽¹⁰⁾により測定した。Table 5 はその結果である。

Table 5

Specimen	Non-metallic Impurities	Grain Size No.
1	A 0.8, 1.0 μ B 5.0, 1.5 μ	8
2	A 0.8, 1.1 μ B 4.8, 1.8 μ	7
3	A 1.1, 1.2 μ B 2.2, 1.2 μ	7~8

Fig. 8 a Diagram for Specimen 1a (1.19 % C, Globular Pearlite).

試料には脱炭防止の爲、佐藤清吉博士が焼入試験に用ひた下記塗料⁽¹¹⁾を塗つた。

木節粘土 75g 黒鉛末 25g 砥の粉 30g
焼 礬 砂 14g 水 200cc

IV. 測定結果

Fig. 8 ~ 10 は測定結果を圖示したもので、縦軸に最高加熱温度、横軸に変態温度を取り、顕微鏡組織を記號にて示した。圖表記號に對する説明を Fig. 11 に示す。これに依つて見る時は次の事實が知られる。

(1) 1.19% C 炭素鋼

球状波来土範圍は 1d (麻留田試料) 及び 1b (粗粒波来土試料) が最も廣く、850°→710°より 760°→690°に及び、1a (球状波来土試料) の球状波来土範圍は、最高加熱温度の上限は高いが變態温度範圍は狭い。

層状波来土範圍に就いて、最高加熱温度の下限は 1c (層状波来土試料) 最も低く、1d, 1b, 1a の順に高くなる。變態温度の上限は 1b 及び 1d は 680°であるが、1a 及び 1c は 700°となつてゐる。

粗粒波来土範圍に就いては、1d の場合を除いては最高加熱温度が高い程、變態温度の上限は高温側へ移動する。

Fig. 8 b Diagram for Specimen 1b (1.19% C Sorbite).

(9) P. Payson, W. L. Hodapp, J. Leader, Trans. Amer. Soc. Metals, 28 (1940), 306.

(10) 學術振興會 19 小委員會決定第 5 號及び第 6 號。

(11) 佐藤, 金屬の研究, 2 (1925), 63.

Fig. 8 c Diagram for Specimen 1c
(1.19% C Lamellar Pearlite).

Fig. 8 d Diagram for Specimen 1d
(1.19% C Martensite).

Fig. 9 a Diagram for Specimen 2a
(0.76% C Globular Pearlite).

Fig. 9 b Diagram for Specimen 2b
(0.76% C Sorbite).

Fig. 9 c Diagram for Specimen 2c
(0.76% C Lamellar Pearlite).

Fig. 9 d Diagram for Specimen 2d
(0.76% C Martensite).

最高加熱溫度 825° より恒温變態を行へば、試料の加熱前の顯微鏡組織の如何に拘らず、初析セメンタイトは球狀に現れる。最高加熱溫度がそれ以下では、試料に於ける加熱前の初析セメンタイトの形狀の影響が著しく、1a 及び 1b では球狀に、1c では網目狀に、1d では微細な球狀をなす。最高加熱溫度がそれ以上では、變態溫度にて析出する初析セメンタイトの影響で、1c 試料は最高

加熱溫度と共に網目狀セメンタイトを生ずる範圍の下限は高溫度側へ移り、その他の試料では最高加熱溫度が A_{cm} 點に在る時最も容易に網目狀セメンタイトを生ずる。

(2) 0.76% C 炭素鋼

この鋼に於ては少量の初析地鉄が本實驗のすべての範圍に互つて殆ど同様に現れて居るが、變態條件は共析鋼

Fig. 10 a Diagram for Specimen 3a
(0.40%C Globular Pearlite).

Fig. 10 b Diagram for Specimen 3b
(0.40%C Sorbite).

Fig. 10 c Diagram for Specimen 3c
(0.40%C Lamellar Pearlite).

Fig. 10 d Diagram for Specimen 3d
(0.40%C Martensite).

Fig. 11 Marks in Diagram Fig. 8~Fig. 10

と近似するものとして差支へない。以下特記せぬ限り、ごく少量の初析地鉄を認めるものである。

各試料に対する球状波来土範囲の關係は Fig. 12 の如くなり、その範囲は 2a 最も廣く最高加熱温度は 825° に及び、2d, 2b これに次ぎ、2c では完全な球状波来土範囲は認められなかつた。變態温度の下限もこれに對應し

て、2a にて 660°, 2d 及び 2b では 700° である。層状波来土範囲は逆に、2a は 950°→710° のみであつたが、

2b, 2d, 2c の順に廣くなる。最高加熱温度の下限は 2b が 780°, 2d が 850°, 2c が 780° で、變態温度の下限は 680° である。

粗粒破組織を得

る變態温度の上限は、2a では最高加熱温度と共に高くなつてゐるが、他のものでは殆ど一致し、640° であつて、最高加熱温度と共に僅かに低温度側へ移動してゐる。

(3) 0.40 % C 炭素鋼

亞共析鋼に於ては試料が加熱前球状波来土組織を有する場合にも球状化は困難である。球状波来土生成範囲

Fig. 12 Temperature required
for Globular Pearlite.

は、すべて最高加熱溫度 800° 以下、變態溫度 $3a, 3d$ では 680° 以上、他では 700° 以上である。

層狀波來土も生成し難く、 $3d$ に於てのみ明瞭である。

粗粒波の生成する變態溫度の上限は $3a$ に於ては、最高加熱溫度と共に高溫度側へ移動し、その他に於ては 640° 附近である。

V. 測定結果に対する考察

以上の結果に基づき次の如く考察せられる。共析變態によつて現れる波來土の形狀は、變態前の γ 相中に於ける炭素原子分布の狀態によると共に、變態時に於ける炭素原子の移動狀態によつて決定される。前者は試料の最高加熱溫度によつて著しい影響を受け、後者は變態速度によつて著しく左右せられる。變態速度の遅い場合には、變態前 γ 相中の炭素原子分布が不均一ならば球狀波來土を生じ、均一ならば層狀波來土を生ずる⁽¹⁾。そして又炭素原子分布の如何に拘らず、變態速度が大ならば粗粒波となる。更に各試料について詳説しよう。

(1) 1.19% C 炭素鋼について

過共析鋼に於ては、加熱に際して波來土が γ 相へ變態する場合、共析組成の部分が γ 相となるのみならず、初析セメンタイトも又最高加熱溫度に應じた溶解度迄 γ 相中に固溶する。それ故恒温變態に於て變態溫度迄冷却された時、共析組成より以上に固溶してゐる炭素原子が先づセメンタイトとして、炭素濃度の大きな部分に析出する。 $1a, 1b, 1d$ 試料にして、最高加熱溫度の低い場合の如く、 γ 相中の炭素濃度の不均一の著しい場合には先づ初析セメンタイトが球狀に析出し、次いで析出する共析セメンタイトは、變態溫度の高い場合にはその初析セメンタイト及びその核を中心として球狀に析出し、變態溫度の低い場合には初析セメンタイトへ凝集し得ない炭素原子は層狀波來土又は粗粒波としてその間隙へ析出するが、この場合完全球狀波來土を生ずる變態溫度範圍が比較的狭いのは注目に値する。 $0.76\% C$ の場合と比較して最高加熱溫度の上限は高く、 $1c$ を除き A_{cm} 點直下に至つてゐるが、變態溫度の下限は意外に高く $1a, 1c$ で $710^{\circ}, 1b, 1d$ で 700° である。

共析變態直前に初析セメンタイトが網目狀に結晶粒界に析出すれば結晶内部は共析組成に近くなり、共析鋼の場合の如く層狀波來土が現れ易くなる。 $1c$ の波來土析出部分が $0.76\% C$ 炭素鋼のそれとよく似てゐるのはその爲である。

γ 相に於ける炭素分布の不均一な場合には、炭素濃度の大きな部分にセメンタイトの核が生じ、冷却の早い場合その核より層狀の波來土が發達するから、炭素原子分布の不均一程度の著しい程、かくして生じた波來土は比

較的粗となる筈である。 $1a, 1b, 1c$ に於て最高加熱溫度が低くなれば粗粒波を得る變態溫度の上限が低溫度側へ移るのはその爲である。

試料に存在する初析晶は、加熱溫度を高めると共に次第に γ 相中に固溶し、 A_{cm} 點に至つて全部固溶してしまふが、恒温變態に際しては、逆に最高加熱溫度が高い程容易に網狀として析出するから、その中間に於て初析網狀セメンタイトが殆ど認められず、共析セメンタイトと區別のつかない範圍が存在する。 $Fig. 8c$ に於ける 825° 附近の部分がこれである。試料に於て初析晶が球狀の場合には最高加熱溫度がこの部分より低い場合球狀に、高い場合網目狀に現れる。そして A_{cm} 點直上の最高加熱溫度より冷却すると、網目狀セメンタイトは最も析出し易い。

(2) 0.76% C 炭素鋼について

これについては、初晶の影響は殆ど認められないから共析鋼の如く考察することが出来る。

$2a$ 試料について、球狀波來土を得る最高加熱溫度の上限が A_{c1} 點以上 100° 近くにも及んでゐることから、試料中に存在せる球狀セメンタイトは γ 相中に固溶しても、 γ 相中に於てその炭素原子が一様に分布することの非常に困難なことがわかる。その爲に、粗粒波と球狀波來土の中間組織 ($Fig. 22$) や層狀波來土と球狀波來土の中間組織 ($Fig. 19$) を生ずる。そして粗粒波を得る變態溫度の上限は僅かに低溫度側へ移る。

その他の試料に於ては、最高加熱溫度が高くなるに従つて變態溫度は同一でも生ずる波來土は粗となる爲に粗粒波を得る變態溫度の上限は僅かに低溫度側へ移る。

波來土の構造については既に詳細な研究がなされてゐて⁽¹²⁾ 試料が均一で、變態速度が一定の場合には、波來土薄層間隔は試片全體について同一であるが、薄層の面と試料切断面とが傾斜をなして居れば、顯微鏡下に認められる波來土の層間隔は眞の値より廣く、眞の層間隔を Δ_0 、見かけの層間隔を Δ_ω 、薄層に直角なる方向と試片切断面とのなす角度を ω とすれば $\cos \omega = \Delta_0 / \Delta_\omega$ なる關係がある。

本研究に於ては層狀波來土 5% 以下の場合を均一粗粒波としたから、今波來土結晶粒がすべて同一の大きさで、すべての方向へ均等に向いてゐるものとすれば

$$\omega = 90^{\circ} \times 95/100 = 85.5^{\circ}$$

$$\cos \omega = 0.0785$$

$$\Delta_\omega = 0.4 \mu$$

$$\therefore \Delta_0 = 0.03 \mu$$

故に本研究に於て、波來土の層間隔 0.03μ 以下の場合を粗粒波となして居ることとなる。

(12) N. T. Belaiew, Proc. Roy. Soc. A., 108 (1925), 295.

(3) 0.40% C 炭素鋼について

これは均一な層状波来土の生ずる範囲が非常に狭い。

最高加熱温度が高くて地鉄結晶が大きく発達し得る場合には、共析変態に於て発生するセメンタイト核は地鉄結晶粒界に沿つて成長すると共に、残留 γ 相内にも地鉄の核を生じて成長し、セメンタイトは丁度珊瑚礁の如き形状として顕微鏡下に認められる。これは既に Osmond⁽¹³⁾ により認められ Atols と稱されたものに當る。

最高加熱温度が高くて、変態温度の低い場合には、過冷却状態となり、粗粒波来土の波来土を生ずる。(Fig. 27 参照)。

3a 試料に於ては γ 相中の炭素は分布不均一の著しい爲に球状又は上記珊瑚礁状となり易く、粗粒波来土生成範囲の変態温度土限は低温度側へ移る。その他の試料では地鉄析出後の γ 相中炭素分布がほぼ一定であるから、最高加熱温度が高すぎて、粗粒波来土の層状波来土(次節 Fig. 27 参照)とならない限り、その影響は少い。

VI. 各種波来土の代表的組織について

本研究に於て得られた各種の波来土について、代表的なものを掲げ、その生成機構について簡単に考察しやう。

(1) 均一球状波来土組織、均一層状波来土組織及び均一粗粒波来土組織 については既に幾多の研究があるから省略する。

(2) 球状波来土と層状波来土との混合組織(その 1) (Fig. 13a) 球状波来土が生ずるか、層状波来土が生ずるかは、

Fig. 13 a Specimen 1a
(1.19% C) 760°×20 min
→700°×20 min.

Fig. 13 b Specimen 1c
(1.19% C) 780°×20 min
→700°×120 min.

γ 相中の炭素原子濃度の分布状態と変態速度との相対的關係によるものであるから、変態速度が同一でも、炭素濃度の分布状態が異なれば、その程度に應じて球状波来土の生ずる部分と層状波来土の生ずる部分とが出来る。

過共析鋼の如く、 γ 相中にセメンタイトの微粒又は核が存在してゐる時にはこの組織が現れる。

(13) F. Osmond, Rev. Met, 1 (1904), 349.

(3) 球状波来土と層状波来土との混合組織(その 2) (Fig. 13b) γ 相中の炭素原子の分布状態が一様になつてゐる場合でも、変態時に於ける放熱状態の僅かの變化によつて、その変態速度が變化する場合には上記混合組織が得られる。

Fig. 14 は本多式熱膨脹計を用ひて変態による膨脹を

Fig. 14 Transformation Velocity
of 0.76% C Carbon Steel.

観測しつつ、変態を行はせたものである。変態速度が 0.42%/min より 1.3%/min に變化すれば、球状波来土 (Fig. 15) より層状波来土 (Fig. 16) へ移ることは Fig. 14 の各変態量と Fig. 17 の顕微鏡組織に於ける各変態

Fig. 15 Globular Pearlite in Fig. 14 0.76% C.
Fig. 16 Lamellar Pearlite in Fig. 14 0.76% C.

量との割合が一致してゐることにより證明される。Fig. 17 は倍率が小さい爲に粗粒波来土部分は黒く、層状波来土部分は薄墨色及び層状に示され球状波来土部分は球状波来土が認められる。

(4) 層状波来土と粗粒波来土 (Fig. 18) γ 相より生成する波来土と粗粒波来土とはその層間隔を異にせるのみであつて、顕微鏡下に見るその區別は、波来土薄層と試料面とのなす角度によることが大きい。前節に述べた如く、

$$\cos \omega = \Delta_0 / \Delta_w$$

であるから、顕微鏡下に認められる波来土が全視野の $x\%$ なる場合、その薄層間隔は

$$\Delta_0 = 0.4 \cos \left(\frac{\pi}{2} x / 100 \right) \mu$$

となる。又炭素分布が γ 相中に於て一様でない場合、變態中に變態速度が何等かの關係で變化した場合には層間隔が部分的に異なつた波來土を得て、顯微鏡下に層狀波來土と粗粒波との混じた組織が得られる。

Fig. 17

×100

	Globular P.	Lamellar P.	Sorbite
A A in Fig. 17	48.5 mm 16.2	77.0 mm 25.7	12.5 mm 4.2
from Fig. 14	17	25	4

著しくない爲にセメントは平板狀に成長せんとしたが、炭素原子の分布が一様でない爲に、濃度の低い部分が龜裂又は孔として残つたものである。

波來土は最高加熱温度が高い程、粗となることは Fig.

21 によつて示した通りであるが、球狀波來土組織に於けるセメントの直径は、最高加熱温度に對して比較的その直径が大きくなつてゐる。この斷續層狀波來土も、最高加熱温度と變態温度とから豫想せられるよりも

粗である。

(6) 粗粒波狀の球狀波來土

(Fig. 22) 球狀セメントは γ 相中に於ける炭素濃度の異なる部分に生ずるものであるから、處理前試料の組織が球狀波來土であつて炭素濃度が明確な高低を持つてゐるならば、最高加熱温度が同一の場合、變態温度には殆ど無關係に一定の大小と、一定の分布とを有する球狀波來土を生ずる (Fig. 23)。しかし、 γ 相中の炭素濃度差のあまり明確でない共析鋼附近の試料では、變態速度が大なる場合に非常に細くて一見粗粒波狀の顯微鏡組織を呈することがある。これは變態速度が大なる爲に、炭素原子がすべて濃度の異なる部分へ凝集することが出来なくて、その中間にセメントの核を生じたものであらう。

Fig. 18 Lamellar Pearlite and Sorbite. Specimen 2b (0.76% C) 850°×20 min → 640°×5 min.

Fig. 19 Dotted Pearlite. Specimen 2a (0.76% C) 900°×20 min → 700°×360 min.

Fig. 20 Dotted Pearlite (Deep Etch). Specimen and Heat Treatment are Same as Fig. 19.

(a)

(b)

(c)

Fig. 21 Influence of Max. Heat. Temp. (Specimen 2b) ×1000
(a) 900°×20 min → 680°×20 min. (b) 850°×20 min → 680°×20 min.
(c) 760°×20 min → 680°×20 min.

(5) 斷續層狀波來土について (Fig. 19) これは均一球狀波來土組織と均一層狀波來土組織との中間狀態に於て生ずる。この組織を強く腐蝕して檢鏡すると Fig. 20 の如く小さい平板狀セメントが鱗片狀に重り合つてゐるのが認められる。そして各平板は不規則な形狀をなし、互に連續し、又切斷され、又孔を持つてゐる。これは γ 相中の炭素原子の不均一分布が球狀波來土を生ずる程

(7) 珊瑚礁狀セメント (Atols) (Fig. 24) の生成については前章にて考察した。

(8) 亞共析鋼の球狀波來土 (Fig. 25) 亞共析鋼に於ける球狀波來土は、前記珊瑚礁狀セメント組織の特別な場合で、地鉄結晶粒界に存在する 경우가非常に多い。そして兩者混合せるものや、そのどちらともつかない様な場合がある (Fig. 26)。

(9) 粗粒波状の層状波来土 (Fig. 27) 最高加熱温度が高く、変態温度の低い場合には、初析地鉄が充分大きく発達すると共に、初析地鉄が充分析出し終らない先に過冷状態から粗粒波の生成が起り、細い初析地鉄がその間に析出する為、大きな初析地鉄に比して粗粒波の部分が非常に大きく見える。初析地鉄に囲まれた各區割に於て、周邊は層状波来土の場合が多く、内部になるに従つて層状波来土中のセメントは微粒をなしてゐる様に見える。

Fig. 22 Sorbitic Globular Pearlite Specimen 2a (0.76% C) 780°×20 min →660°×5 min.

Fig. 23 a Specimen 1d (1.19% C) 800°×20 min →710°×480 min.

Fig. 23 b Specimen 1d (1.19% C) 800°×20 min →700°×300 min.

Fig. 24 Atols Specimen 3c 825°×20 min →710°×300 min.

Fig. 25 a Globular Pearlite. Specimen 3b 760°×20 min →710°×300 min.

Fig. 25 b Globular pearlite. Specimen 3d 760°×20 min →710°×300 min.

Fig. 26 Specimen 3d (0.40% C) 780°×20 min →710°×300 min.

Fig. 27 Sorditic Pearlite. Specimen 3b (0.40% C) 950°×20 min →640°×5 min.

VII. 總 括

炭素鋼に於て、炭素含有量、處理前の顯微鏡組織、恒溫變態に於ける最高加熱温度と變態温度とを變へ、 γ 相から生成する波来土の組織を觀測し、層状波来土及び球状波来土の生成範圍を決定して圖表となし、炭素鋼に於ては、層状波来土、球状波来土、粗粒波及びその中間組織(斷續層状波来土、珊瑚礁状セメント組織、粗粒波状層状波来土、粗粒波状球状波来土)及びその混合組織となつて現れることを示し、かゝる組織の代表的のものについてその生成原因を考察し、これ等の組織は最高加熱温度に於ける γ 相中の炭素原子分布状態と、變態速度との相對的關係によつて説明し得ることを示した。

各種の波来土組織につき特異な點を述べれば下記の通

りである。

(1) 過共析鋼に於ては球状波来土を得る最高加熱温度は高く、Acm 點の直下に及んでゐるが、變態温度の下限は高く、層状波来土試料で 710° その他で 700° である。

(2) 處理前に於て試料に存在するセメントの形状は生成波来土に著しい影響を與へる。

(3) 過共析鋼に於ては、セメントの溶解度と恒溫變態に於ける析出状態との關係から、最高加熱温度 825° 附近の場合初析セメントは微細な球状をなして析出

(4) 層状波来土は最高加熱温度の低くなる程密となるが、球状波来土組織及び斷續層状波来土組織は比較的粗である。従つて γ 相中に於ける炭素原子分布が不均一なる程、粗粒波を得る變態温度の上限は低温度側へ移る。

(5) 亞共析鋼に於けるセメントは地鉄結晶粒界に珊瑚礁状に析出する場合があります、球状セメントはその特別の場合であることが多い。

終に臨み、本研究に多大の便宜を與へられ、御鞭撻を賜はつた不二越研究所長杉山金作少將、副所長石田求博士に深く感謝を捧げると共に、御多忙中にも拘らず種々御指導を賜はり、懇切なる御校閲を蒙つた村上武次郎博士に厚く感謝の意を表する。尙本論文の發表を許可せられた不二越研究所理事長井村荒喜氏に謝意を表する。