



シリコンマンガン発條鋼の恒温變態について

根 本 正^{*}

On the Isothermal Transformation of Si-Mn Steel for Spring

By Tadashi Nemoto

Hitachi Laboratory, Hitachi, Ltd.

Abstract

The author researched on isothermal transformation diagrams of three kinds of Si-Mn steel at the range of 750~300°C and made clear the transformation mechanism at various temperatures. The results are as follows:

(1) Isothermal transformation diagrams of Si-Mn Steel shown in Fig. 1~4 were determined by the investigation of micro-structure and the measurement of hardness.

(2) In the diagram noses are seen at about 500°C and ferrite lines reach below 500°C, being lowered the temperature at which ferrite and pearlite lines connect and rapid the begining and ending of transformation with decreasing C content at the range of 0.45~0.74%.

(3) At temperatures between 550 and 500°C, firstly ferrite seperates in net work from austenite, secondly acicular ferrite along the cleavage and lastly troostite.

(4) It was considered that there were two transformations, Ar' and Ar'', at temperatures between 400 and 300°C and then it was tried to make the isothermal transformation diagram renewed shown in Fig. 22.

〔I〕 緒 言

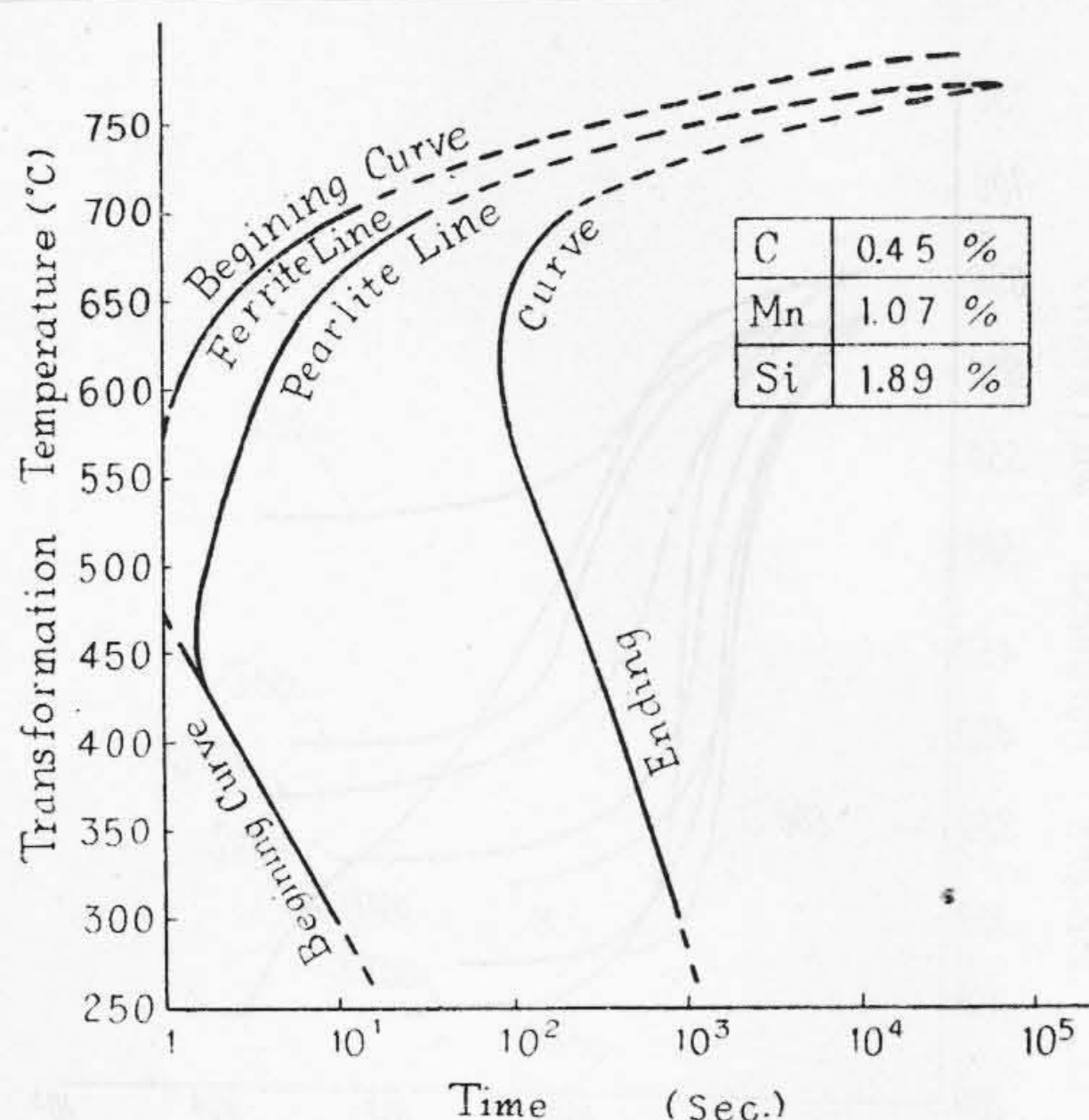
Si-Mn 鋼はバネ鋼として使用せられるが、その機械的性質は熱処理によつて種々變化し、恒温變態處理法によつて、焼入焼戻法に比し靱性を増すため機械的性質を向上させる場合がある。よつて著者は恒温變態處理を行う上に必要な恒温變態圖を 750~300°C の溫度範圍を檢鏡並びに硬度測定により決定した。

〔II〕 實 驗 結 果

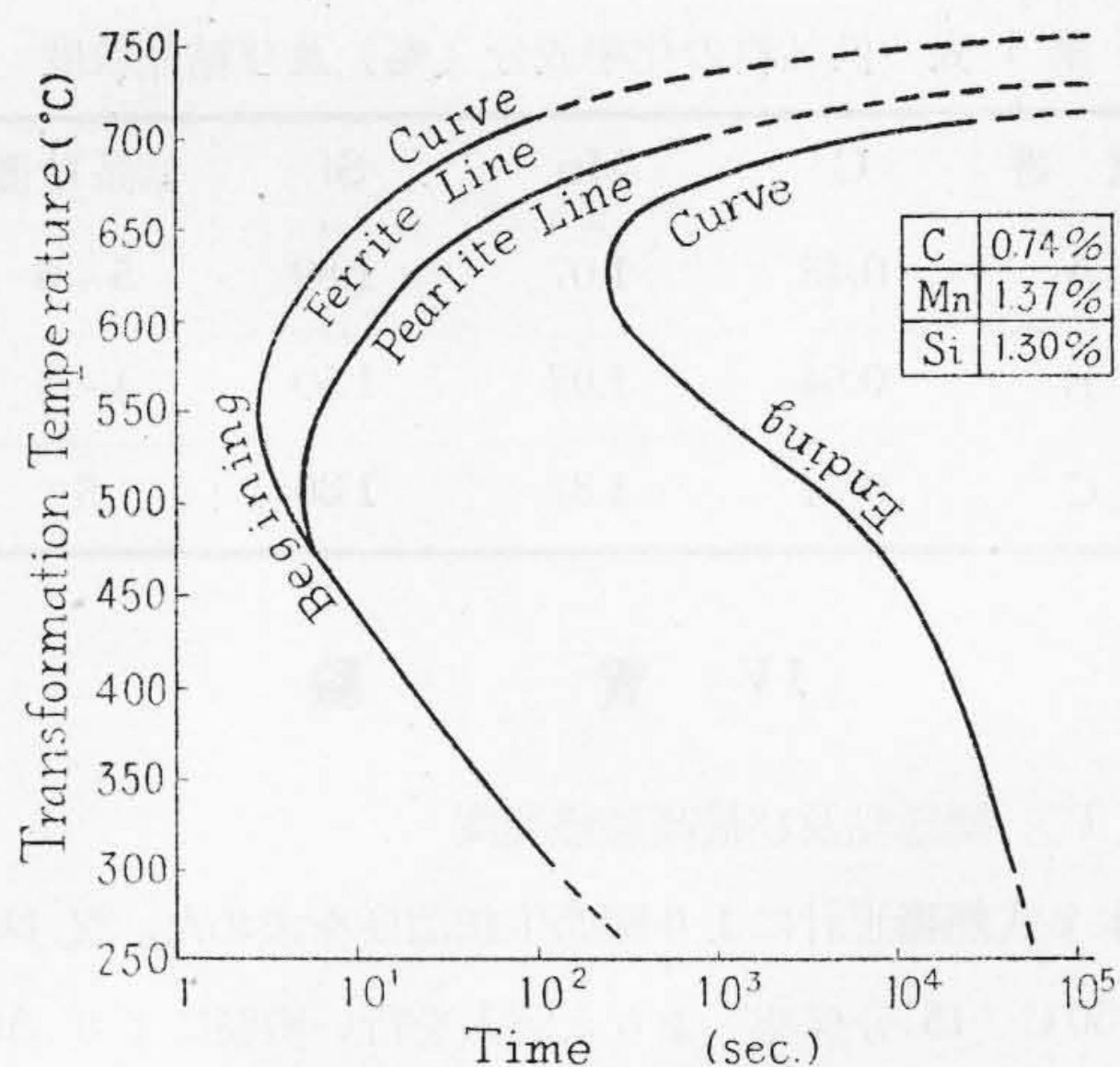
第1圖~第3圖は本研究の結果得た3種の Si-Mn 鋼

の恒温變態圖で、第4圖はC量の相違による變態の開始及び終止時間の變化を明らかにしたものである。これによると 750~300°C の範圍に於ては何れも 500°C 附近に一つのノーズ (nose) を有し、フェライト線はC量の低い程、低溫度迄延び、パーライト線と接續する。又變態速度はC量の増加と共に減少し大洲田の安定度を増し、即ちS曲線は右方に移行することがわかる。然しパーライト生成範圍 (變態生成物が網狀フェライト及びパーライト或はトルスタイト) に於ては恒温變態速度に及ぼすC量の影響は小であるが、Ar' 變態點以下に於ける影響は著しく、特にC量 0.5% 以上のものは 400~300°C の範圍では變態終止に數時間以上を要する。以下本結果を得た實驗について記述しよう。

* 日立製作所日立研究所



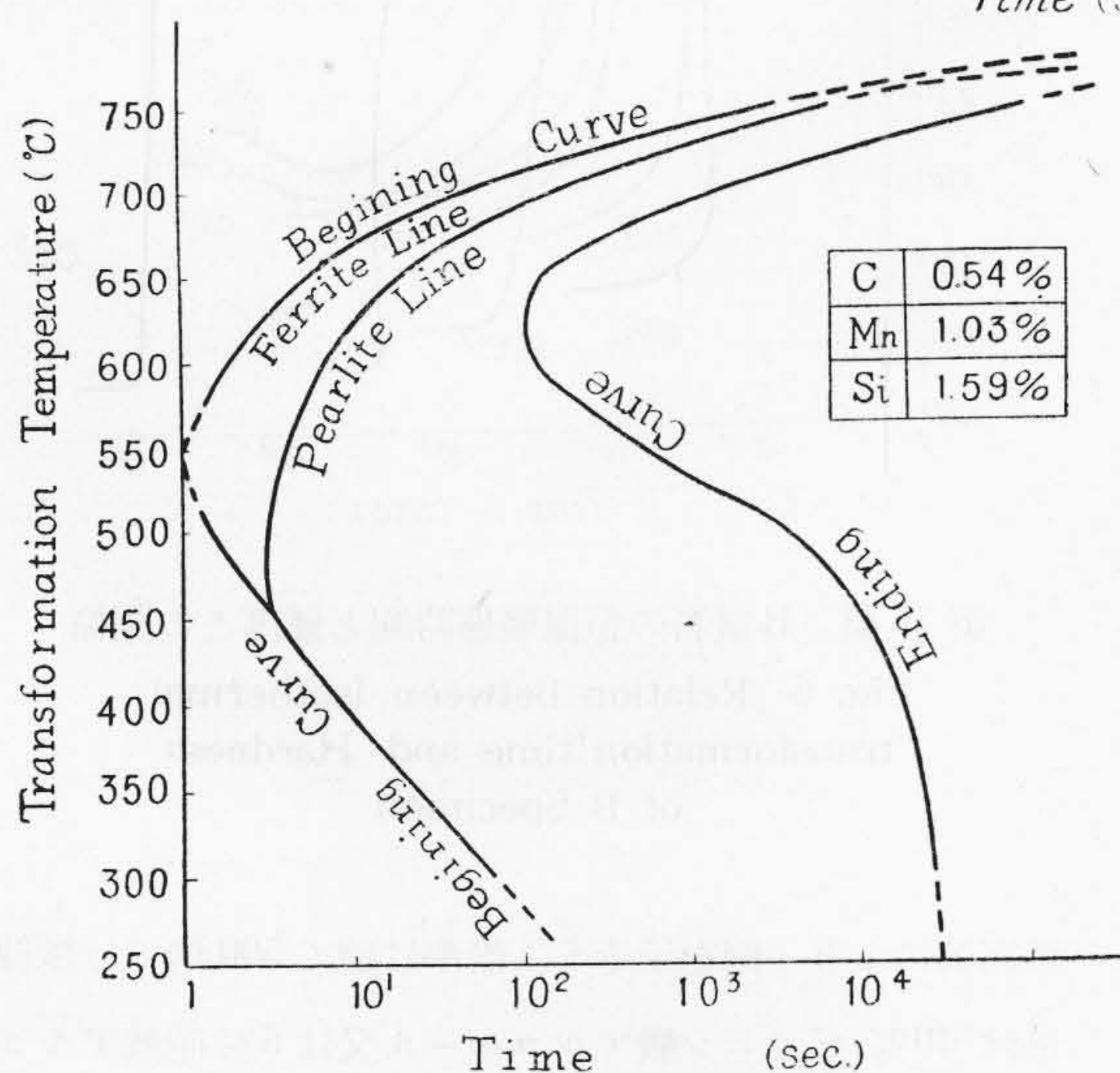
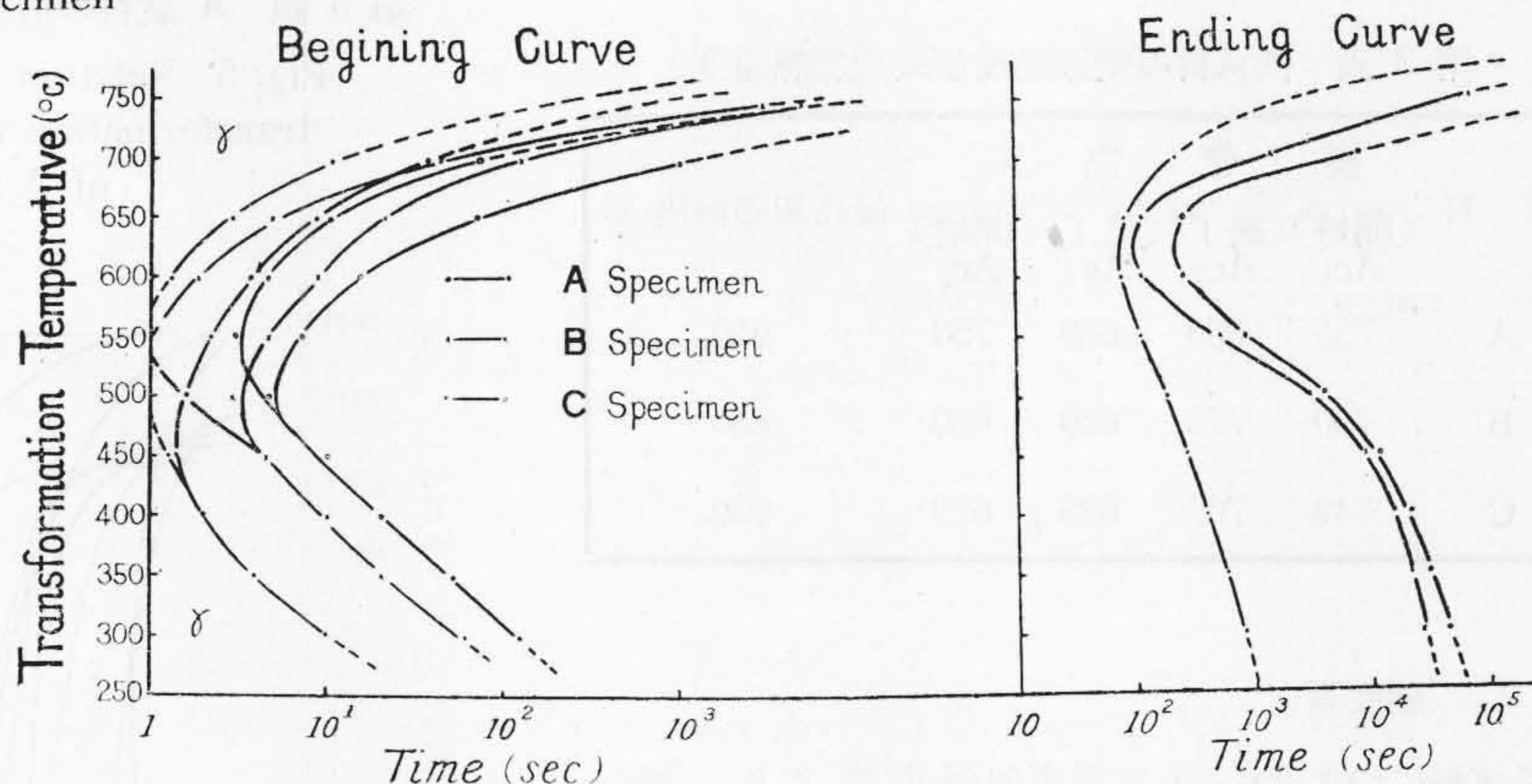
第 1 圖 A 試料の恒温變態圖
Fig. 1 Isothermal transformation Diagram of A Specimen



第 3 圖 C 試料の恒温變態圖
Fig. 3 Isothermal transformation Diagram of C Specimen

第 4 圖 A, B 及び C 試料の恒温變態圖

Fig. 4 Isothermal transformation Diagrams of A, B and C Specimens



第 2 圖 B 試料の恒温變態圖
Fig. 2 Isothermal transformation Diagram of B Specimen

(III) 試 料

第 1 表 に示す組成の 3 種の C 量の異なる Si-Mn 鋼を 35 k.V.A. 高周波電気爐により熔製し、20 耗角に鍛造後 8 耗丸に熱間壓延を行い實驗に供した。特に變態速度の大なる範圍については 8 耗丸より 5 耗及び 1.5 耗丸に冷間伸線又は 0.5~1.0 耗厚さの板にした。通常 Si-Mn 系バネ鋼としては C 量 0.6% 附近のものが用いられるが、恒温變態圖の作成上必要なためその附近の C 量を有するものを製作した。

第 1 表 供試料の化学成分 (%) 及び結晶粒度

試 番	C	Mn	Si	結晶粒度
A	0.45	1.07	1.89	5~6
B	0.54	1.03	1.59	4~5
C	0.74	1.37	1.30	5

〔IV〕 實 験

(1) 變態點及び最高加熱温度

本多式熱膨脹計により變態生起温度を求めた。又 800~950°C (15 分保持) より水焼入を行い、檢鏡により Ar' を生起しない最高加熱温度を決定した。第 2 表はこれらの結果を示す。

第 2 表 供試料の變態點及び最高加熱温度

試 料	變 態 點 (°C)				最高加熱温度 °C
	(開始) Ac ₁	(終了) Ac ₃	(終了) Ar ₁	(開始) Ar ₃	
A	755	850	650	750	950
B	750	775	630	680	850
C	749	767	625	679	930

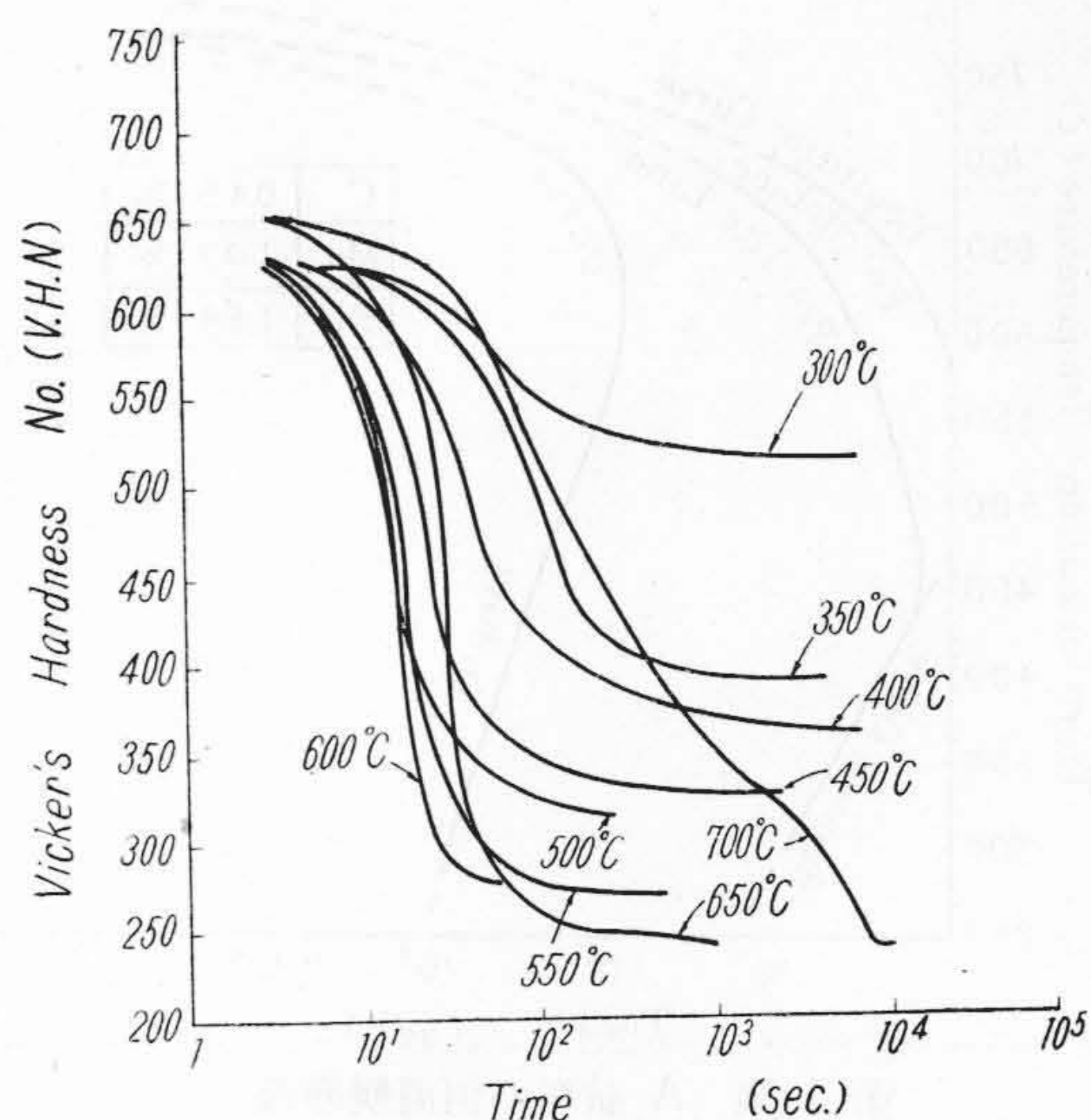
(2) 硬度測定

各試料につきそれぞれの最高加熱温度より 750°~300°C に於ける各温度に焼入し、種々の時間恒温變態を行わせた後直ちに急冷した試片についてヴィイカース硬度を測定した。第 5 圖~第 7 圖はその結果を示す。

これらによると何れも 750°~600°C に於ける硬度の時間による變化は、低下が開始すると急激に降下し變態進行の速かなることが知られる。Ar' 變態點以下と考えられる温度範囲では、温度の低下と共に時間による硬度の低下率は減少するので變態速度が緩慢になることが知られる。特に B 及び C 試料は 400°~300°C の範囲では硬度は時間と共に一旦低下後再び増加を示す。

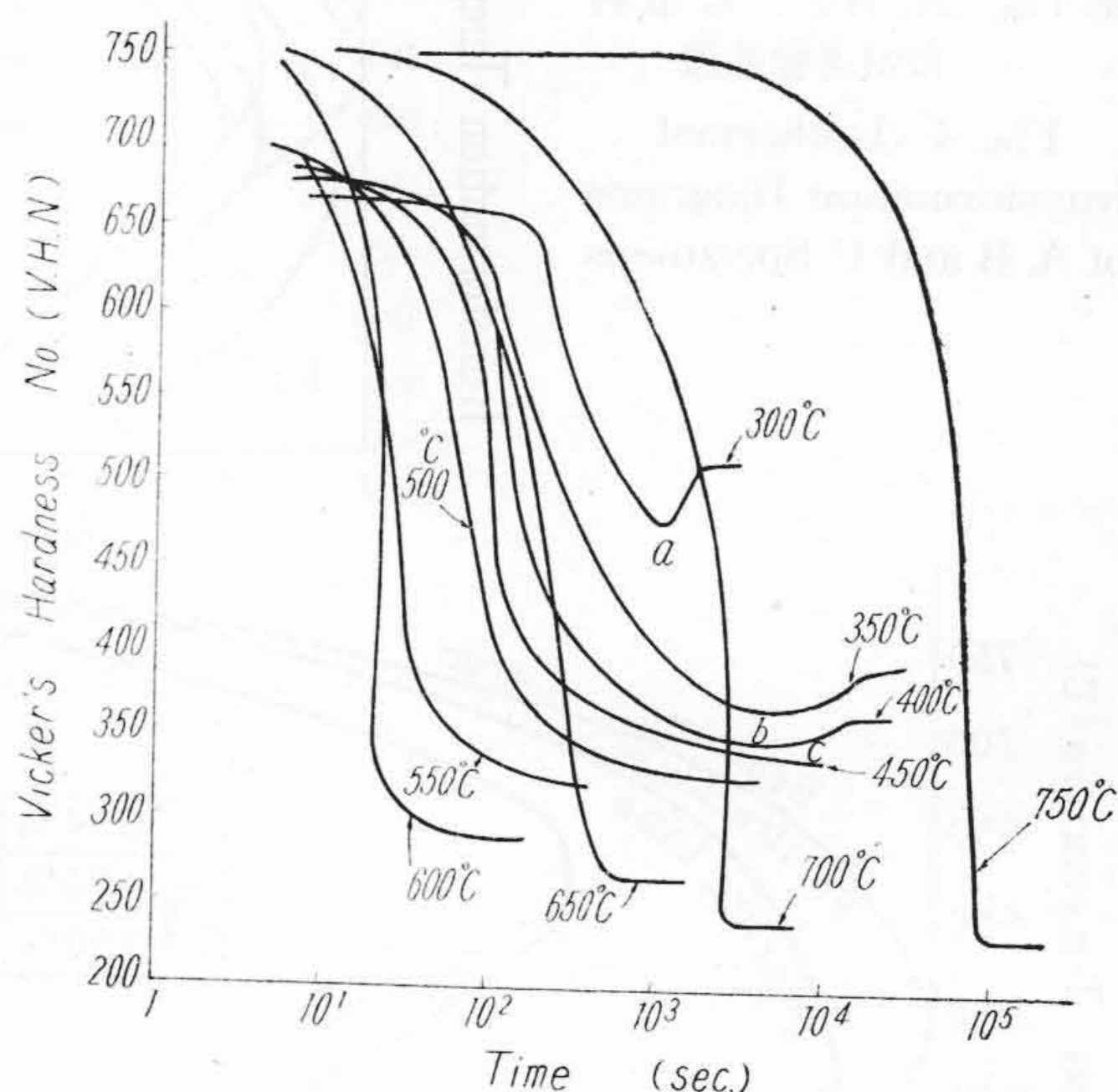
(3) 顯微鏡組織

硬度試験と同様の處理を行つたもの總てについて組織を調査した。その結果を纏め各恒温變態過程に於ける變態生成物を第 3 表に表す。變態の進行状況について顯微



第 5 圖 A 試料の恒温變態時間と硬度との關係

Fig. 5 Relation between Isothermal transformation time and Hardness of A Specimen

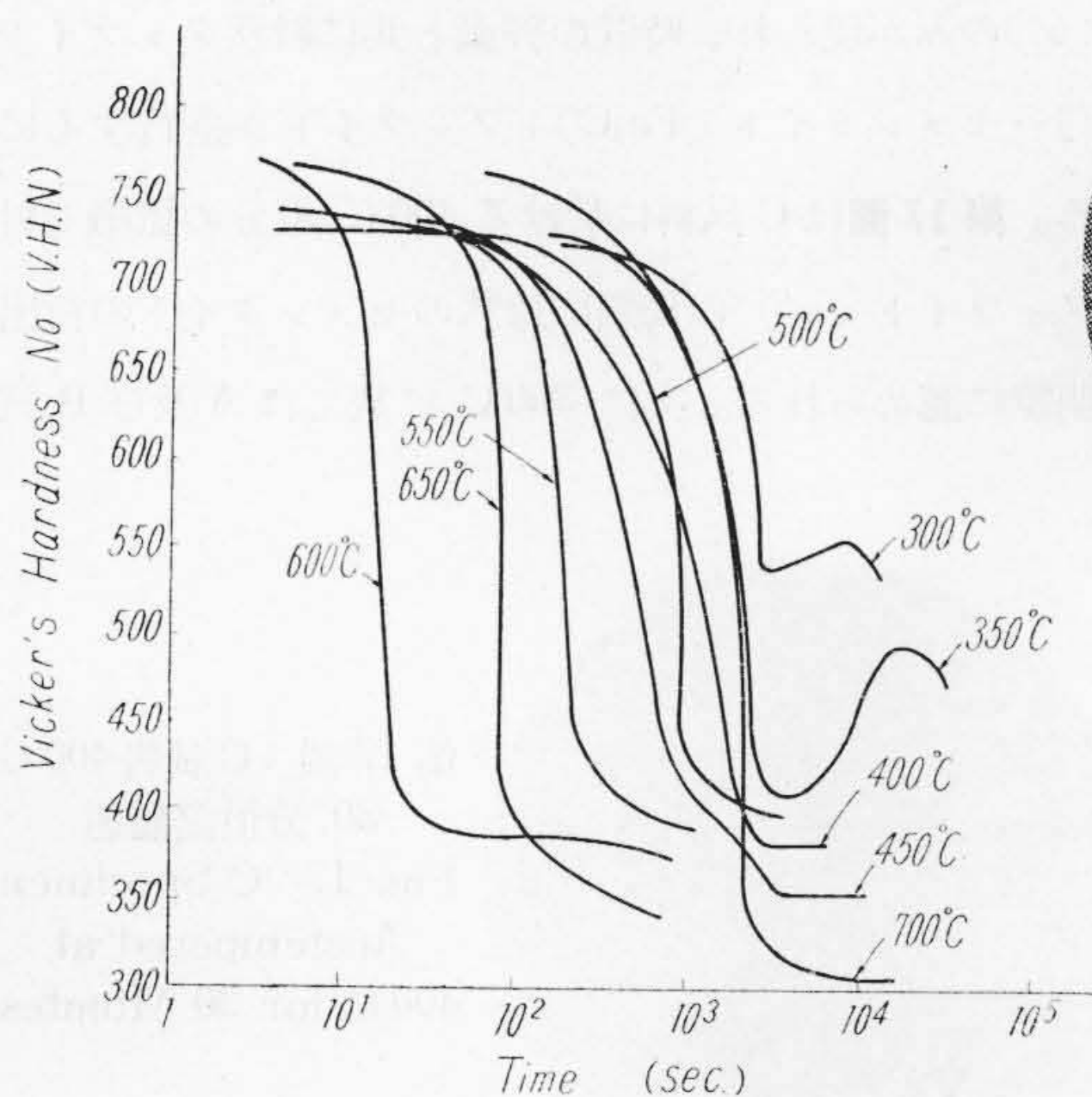


第 6 圖 B 試料の恒温變態時間と硬度との關係

Fig. 6 Relation between Isothermal transformation time and Hardness of B Specimen

鏡寫眞により一例を示そう。倍率は總て 500 倍で、腐蝕液は 10% ピクニン酸アルコール又は 5% 硝酸アルコール溶液を用いた。

600°C 以上はオーステナイト→フェライト+パーラ



第7圖 C 試料の恒温度變態時間と硬度との關係

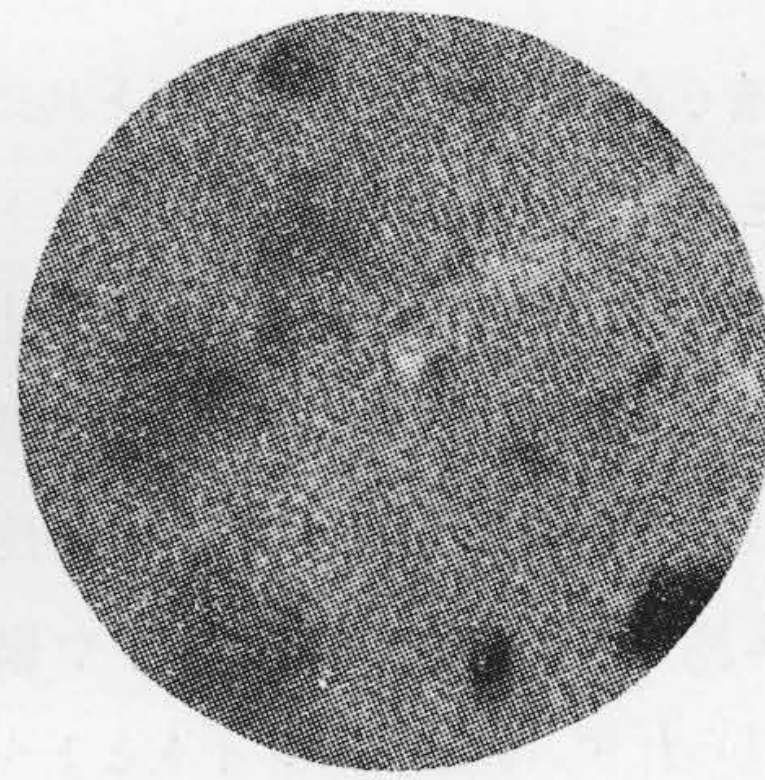
Fig. 7 Relation between Isothermal transformation time and Hardness of C Specimen

イトの變態に於て、まずフェライト次いでパーライトが現われる。即ち二段階の變態を起すことが認められた。第8圖はB試料の750°Cに於けるパーライト變態開始直後のフェライト+パーライトの現われた組織を示し、第9圖は變態終止後の組織で、Si 10%以上を含むためにパーライトの間隔は廣く又長時間加熱によるセメンタイト (Fe_3C) の球狀化の進行が知られる。次に第10圖~第13圖はA試料の550°Cに於ける三段階に起る變態様相を示す。即ち第10圖に見るように第一段階に網狀フェライトが現われ、第11圖には第二段階として粒内に針狀フェライト (Acicular Ferrite) の發達が見られ網狀フェライトと針狀フェライトの共存組



第8圖 B 試料 750°C 1時間 恒温變態

Fig. 8 B Specimen Austempered at 750°C for 1 Hour



第9圖 B 試料 750°C 23時間 恒温變態

Fig. 9 B Specimen Austempered at 750°C for 23 Hours



第10圖 A 試料 550°C 2秒 恒温變態

Fig. 10 A Specimen Austempered at 550°C for 2 seconds



第11圖 A 試料 550°C 5秒 恒温變態

Fig. 11 A Specimen Austempered at 550°C for 5 seconds



第12圖 A 試料 550°C 30秒 恒温變態

Fig. 12 A Specimen Austempered at 550°C for 30 seconds



第13圖 A 試料 550°C 3分 恒温變態

Fig. 13 A Specimen Austempered at 550°C for 3 Minutes

第3表 恒温變態過程に於ける變態生成物

試料	恒温變態溫度 (°C)										
	750~600	550	525	500	475	450	425	400	375	350	300
A	F+P	F+A•F+T	F+A•F+T	F+A•F+T	F+A•F+T	F+A•F+T	A•F+T	A•F	A•F	A•F+B	B
B	F+P	F+A•F+T	F+A•F+T	A•F+T	A•F+T	A•F+T	A•F+T	A•F	A•F+B	B	B
C	F+P	F+A•F+T	A•F+T	A•F+T	A•F+T	A•F+T	A•F+T	A•F	A•F+B	B	B

F: 網狀フェライト

P: パーライト

A•F: 針狀フェライト (a')

T: トルスマイト+ソルバイト

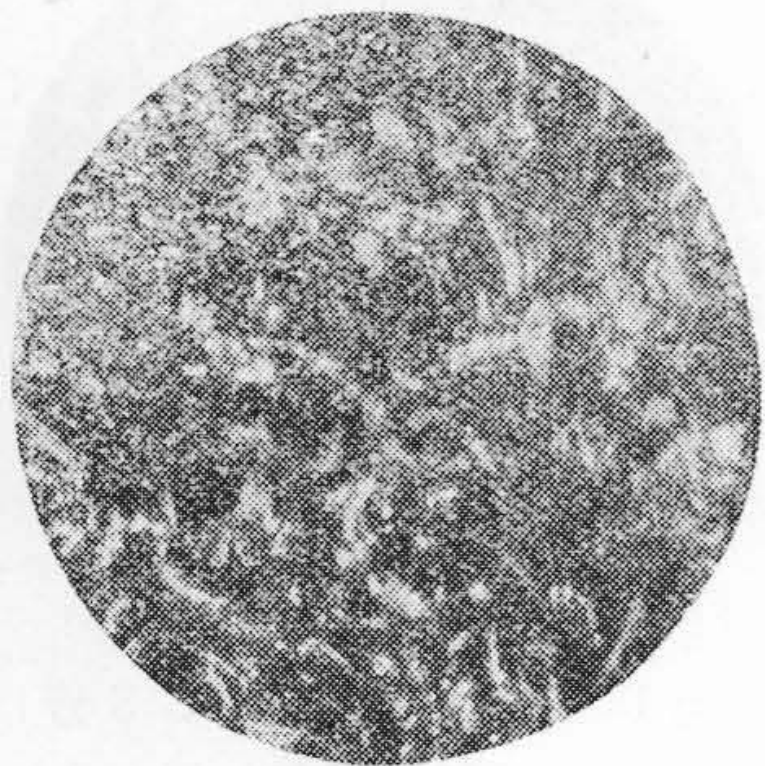
B: ベーナイト

織である。更に時間の経過と共に變態は進行し第三段階として腐蝕し易いトルースタイトが生成される。(第 12 圖)次に第 13 圖は三段階變態終止後のフェライト+トルースタイトの組織を示すが、初期に於て析出せる變態生成物は分解して明瞭でない。溫度 500°C では C 量の最も高い C 試料に於ては最早や網狀フェライトの析出は見られず、針狀フェライトとトルースタイトの二段階の變態のみとなる。即ち第 14 圖は C 試料の 500°C に於て現われる針狀フェライトとトルースタイトの組織を示す。又第 15 圖は B 試料の 500°C に於ける變態終止後のフェライト+トルースタイトの組織を示す。第 16 圖は C 試料の 450°C 30 分 恒溫變態後の組織で二段階變態が見られる。更に變態溫度が 400°C に降下すると、まず針狀フェライ

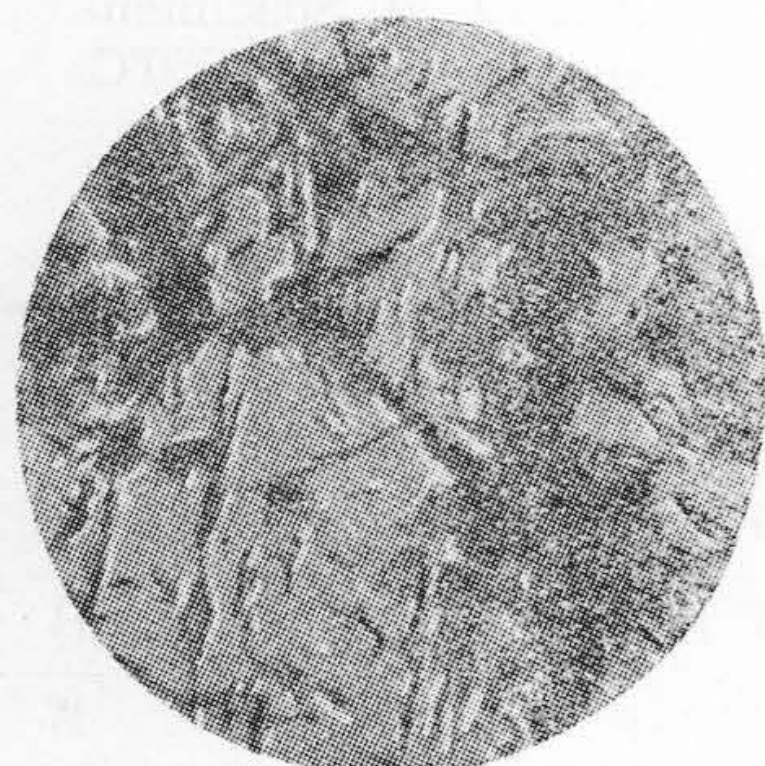
ト(α')のみが現われ、時間の経過と共に針狀フェライト(α')→セメンタイト(Fe_3C)+フェライトが進行するに至る。第 17 圖は C 試料に於ける 400°C 30 分の組織で針狀フェライト(α')の周圍に球狀のセメンタイトの析出が明瞭に認められる。次に 350°C に於ては A 及び B 試



第 14 圖 C 試料 500°C
10 分恒溫變態
Fig. 14 C Specimen
Austempered at
500°C for 10 Minutes



第 15 圖 B 試料 500°C
2 時間恒溫變態
Fig. 15 B Specimen
Austempered at
500°C for 2 Hours



第 16 圖 C 試料 450°C
30 分恒溫變態
Fig. 16 C Specimen
Austempered at
450°C for 30 Minutes



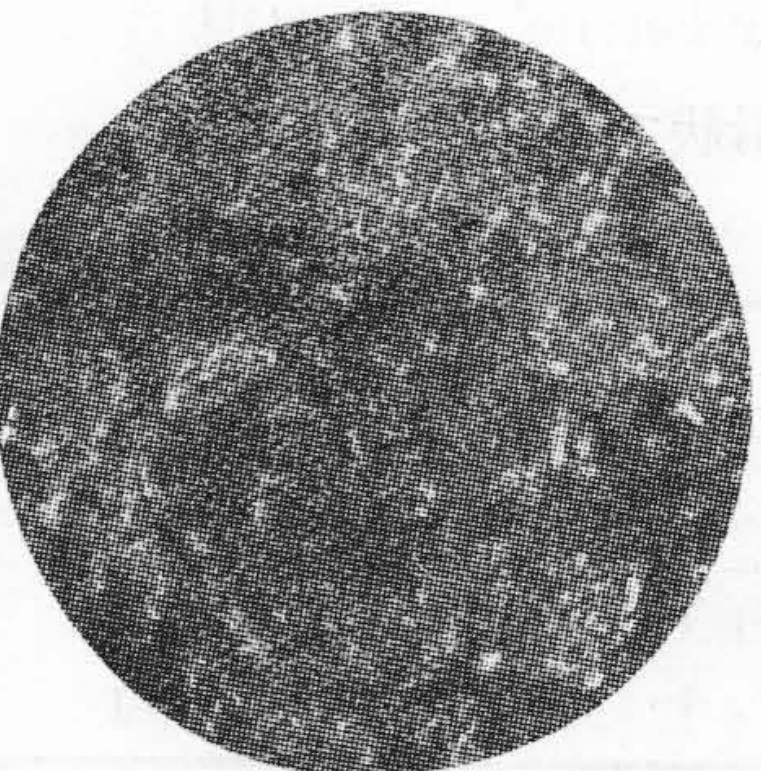
第 17 圖 C 試料 400°C
30 分恒溫變態
Fig. 17 C Specimen
Austempered at
400°C for 30 Minutes



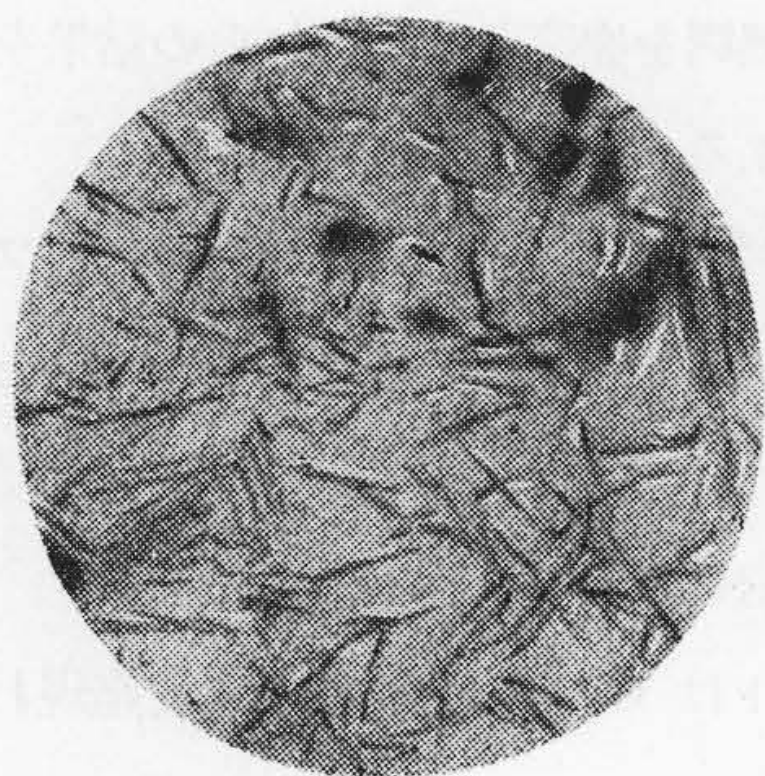
第 18 圖 B 試料 350°C
1 分恒溫變態
Fig. 18 B Specimen
Austempered at
350°C for 1 Minute



第 19 圖 C 試料 350°C
15 分恒溫變態
Fig. 19 C Specimen
Austempered at
350°C for 15 Minutes



第 20 圖 B 試料 350°C
6 時間恒溫變態
Fig. 20 B Specimen
Austempered 350°C
for 6 Hours



第 21 圖 B 試料 300°C
1 分恒温變態
Fig. 21 B Specimen
Austempered at
300°C for 1 Minute

の測定及び檢鏡により變態様相を究明することが出来た。然し第 6 圖～第 7 圖に示されるような 400°～300°C に於て一旦溫度が低下後再び増加する原因については、これを組織的に説明することは困難であるが、著者は次の實驗により、例えば第 2 圖の恒温變態圖は第 8 圖のように表わすのが至當のように考える。

即ち第 6 圖の 400°～300°C に於ける時間による溫度變

第 4 表 各恒温變態溫度に於ける變態開始及び終止時間

溫 度 °C	A 試料の變態開始及び終止時間(秒)			B 試料の變態開始及び終止時間(秒)			C 試料の變態開始及び終止時間(秒)		
	フェライト	パーライト 及び針狀地鉄	終 止	フェライト	パーライト 及び針狀地鉄	終 止	フェライト	パーライト 及び針狀地鉄	終 止
750	—	—	—	2700	4500	82800	—	—	—
700	10	30	240	45	120	2000	60	900	9000
650	3	8	90	5	20	120	10	60	300
600	1～2	4	90	2	8	120	5	15	300
550	—	2～3	120	—	5	600	3	7	900
500	—	1.5	180	—	3	3600	—	5	4500
450		1.0～1.5	300		5	10800		10	12600
400		2	420		10	18000		20	21600
350		7	600		20	21600		50	25200
300		10	900		60	30000		120	32400

料は極少量の針狀フェライトとベーナイト (Bainite) の混合組織であるが、C 試料はベーナイトのみの組織を呈す。これらの組織を第 18 圖～第 19 圖に示す。350°C の變態終止後は何れも第 20 圖の如く明瞭にフェライト＋ベーナイト組織を示している。300°C に於て現われるベーナイトの針は 350°C のそれに比し、尖端が鋭く細い針狀を示し、緩慢ではあるが時間と共にベーナイト→セメントナイト＋フェライト變態が進行する。(第 21 圖)

以上述べた硬度測定及び顯微鏡組織より各恒温變態溫度に於ける變態の進行狀況が知られる。第 4 表は以上により求めた各溫度に於ける變態の開始及び終止時間を示し、圖示したものが第 1 圖～第 3 圖である。

〔V〕 結果に対する考察

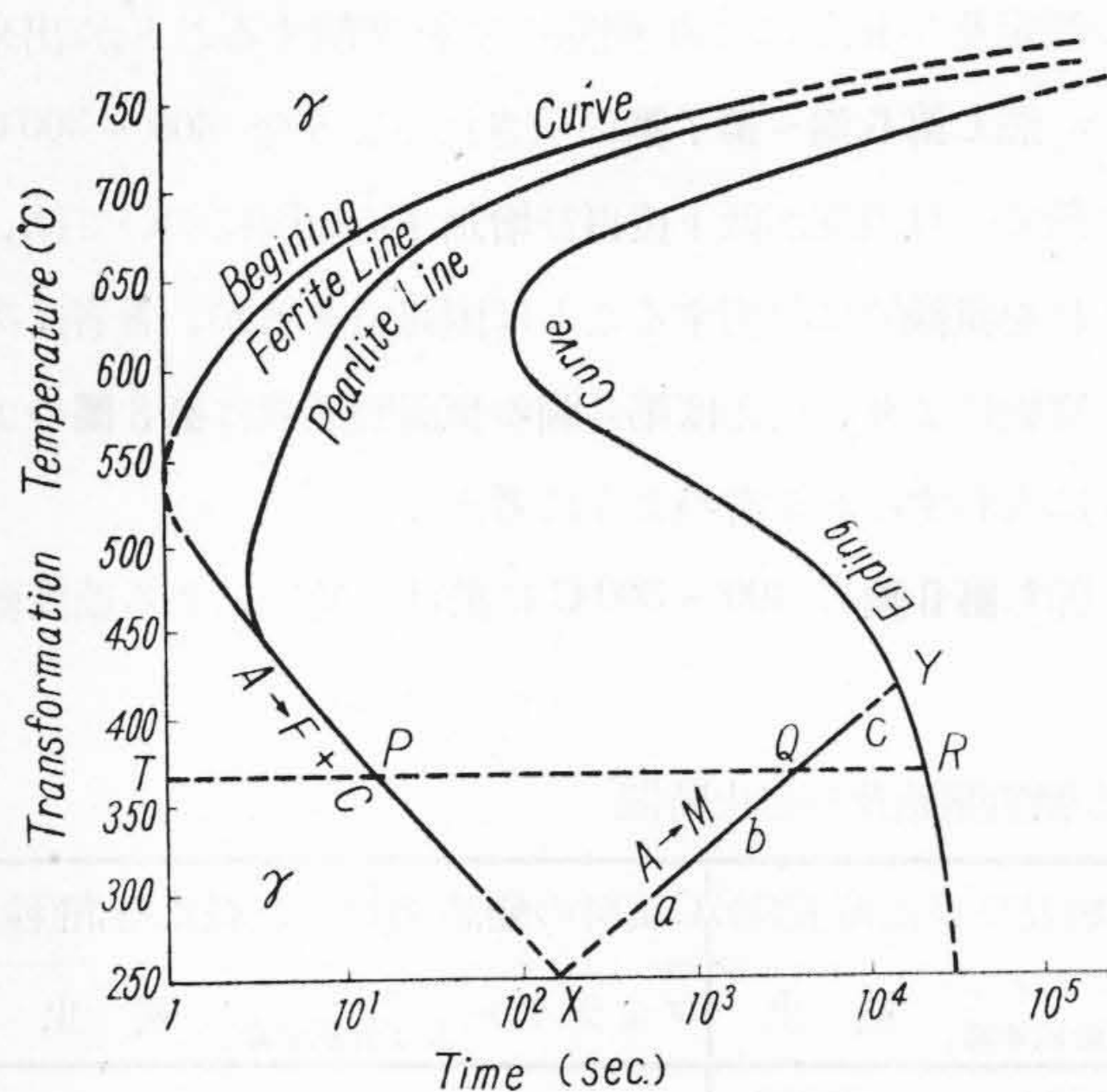
以上述べたように Ar' 變態點以下 300°C 位迄は硬度

化に於て、硬度の極小の見られるのは恒温變態が、溫度が 400° より 300°C に降るに従つておそくなり、硬度増加の起るのは溫度の降るに従つて逆に速くなる—これらは次の二變化が同一溫度で連續して起るによると考えられる。

(1) オーステナイト→フェライト＋セメントナイト (Ar' 變態)

(2) オーステナイト→マルテンサイト (Ar'' 變態)

即ち (1) の進行によつて硬度は低下し、(2) の變態によつて硬度を増す。従つて第 6 圖の 400°C～300°C に於ける溫度上昇點 a, b 及び c を第 2 圖の恒温變態圖上に求めて結べば第 22 圖の如くなる。第 22 圖中の X-Y 線が Ar' 變態の終止を示すと同時に Ar'' 變態の開始を示す。今假りに T なる溫度で恒温變態を行えば P 點で Ar' 變態が起り、Q 點で Ar'' 變態が起り、R 點で終了



第 22 圖 B 試料の訂正恒温變態圖
Fig. 22 Isothermal transformation
Diagram of B Specimen renewed

する。この X-Y なる線は 250°C 以下に於ける Ar'' 變態開始曲線の延長と考えると説明が容易になる。

〔VI〕 總 括

以上 3 種の Si-Mn 鋼の 750°C ~ 300°C に於ける恒温變

態圖を求め、その變態機構を究明した。これらの結果を要約すれば次の如くである。

- (1) Si-Mn 鋼は 500°C 附近にノーズを有し、フェライト線は C 量の低い程低温迄延びパーライト線と短時間で接續する。
- (2) 變態開始及び終止共に C 量の低い程速い。
- (3) 網状フェライトは C 量の低い程低温迄現われる。
- (4) 變態温度 550°C ~ 450°C の範圍では二段階の變態ではあるが、550°C ~ 500°C に於ては三段階の析出様相を示して變態は終止する。
- (5) C 0.5% 以上を含む B 及び C 試料が變態温度 400°C ~ 300°C で時間の経過と共に硬度が一旦低下後増加を示すことは Ar' 變態と Ar'' 變態の二段階變態が起ることによると考えるのが至當のようである。よつて第 22 圖のような恒變態圖を描いた。

終りに臨み研究遂行に當り始終種々御指導を賜つた村上先生に對し御禮申上げ、又御援助を賜つた兼先所長、並びに小野課長の方々に感謝の意を捧げると共に熱心に實驗に従事せられた小林豊治、八重樫敏雄及び赤津康之三氏の勞に對し深謝する次第である。

