

— 特別講演 —

鋼の熱処理の基礎的問題*

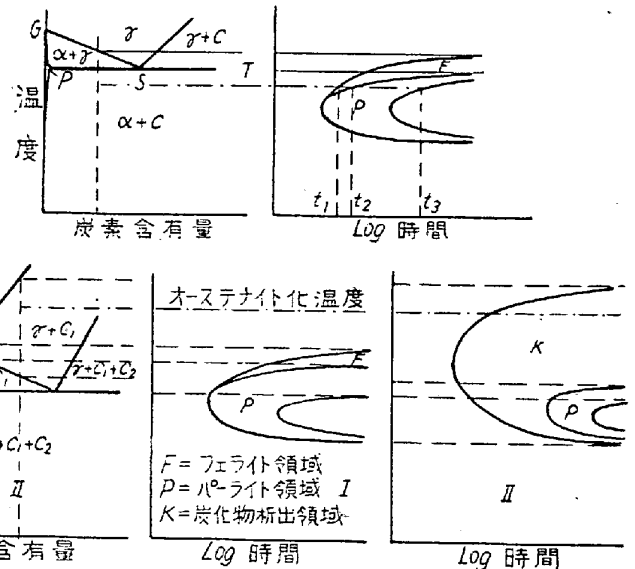
F. Wever **

基礎的な研究とその応用との間の密接な関係を明らかにするのに、鋼の熱処理ほど適当なテーマは見当たらないように思われる。この場合熱処理とは、所定の機械的諸性質を得るための周知の熱処理、オーステナイト化温度への加熱、焼入れと焼戻しをいう。以下の報告では、中でも核心的問題である焼入状態、その生起と存在の条件についての説明に限って話を進めることにしよう。

この考察の始めにあたって、焼入理論の簡単な概要を説明しておくことはきわめて興味深いことであろう。鋼の焼入性に関する知識はすでに古代から存在しているものであって、鋼の焼入れの際に、かくも根本的な、しかも明白な性質の変化が起る理由に対する疑問がすでに古くから人類の心を捉えてきたことは当然のことである。しかしそのような説明では、単に私が知っている西欧諸国における発達だけを包括できるにすぎないだろう。ヨーロッパ人にとっては圧倒的に多くの歴史に富んでいるこの国においては、それは甚しく一方的でまた不完全なものに感ぜられるにちがいないであろう。そこで、私は次のように短い説明だけに止めることにしたい。古い焼入理論は本質的には、状態図によつて確立された安定な状態の間の変態が焼入れの際おきえられて、代りにもつと安定度の低い別の形への変態がおこるという意味で、焼入過程を平衡状態図から説明しようとした Osmond, Ledebur および Le Chatelier の努力によつて確立された。

1930年になつてはじめて、重点が今度は変態の動力学的経過に向けられることになつたので、ここに考察の仕方に基本的な変化が現われたわけである。“変態の結果最後にできたものは何か”という問に代つて、“このような結果はいかなる道順を経て得られるのか”という問が提起された。

この変態の動力学的研究により、最初の重要な結果として、パーライト変態とマルテンサイト変態の間にさらに第三の変態段階が起るといふ確証が得られる。この第三の段階は、ドイツの文献では中間段階、英語の文献で



第1図 状態図と等温変態Z T U図の関係

は、ベーナイト領域と名付けられている。この変態は、それに特有の組織と特有の性質と共に、独特の動力学的経過によつて特長づけられる。

この変態の動力学的研究の結果は、それを時間—温度—変態曲線の形で概観的に表わすことができるようになったので、はじめて材料に関係する人達や現場の興味をひくことになつた。今日ではすべての工業用鋼の非常に多くのものについて、このT T T線図、またはドイツ名ではZ T U線図ができています。それらは、アメリカにおいては U. S. Steel Corp, イギリスでは, Iron and Steel Institute, フランスでは IRSID, またドイツでは Max-Planck-Institut によつて出版されたように、一連の図版の形で多くの個々の研究と共に出版されている。

これらZ T U線図と平衡状態図との間の簡単な関係は第1図の説明によつて判る。この図の上部左側には鉄—炭素系状態図の一部を示した。点線で示した約0.5% Cの鋼は均質なオーステナイトの γ 領域から冷却する際、もし冷却が非常に緩慢で各温度で平衡が成立つと仮定するならば、GS線に到達するとフェライト α を析出する

* 昭和33年11月13日東京都中央区日本相互ホールにおいて講演

** 本会名誉会員、西独マックス・プランク鉄鋼研究所長

ことによつて変態が始まる。鋼はパーライト線PSの温度まで冷却されるまでは、オーステナイト+フェライトの不均質な相になっている。パーライト線を越えると、残っていたオーステナイトはパーライトに変態する。パーライト線以下のすべての温度では、組織はフェライトとパーライトから成立っている。これと並べて示してある同じ鋼についての等温変態曲線では、試験の順序は、中に書きこまれている曲線の助けをかりて次のように行われる：均質なオーステナイトの領域から、GS以下の温度に、平衡状態図上での変態が、全く抑えられているほどの高い速度で急冷される：次にこの温度のまま保持する。この時、時間 t_1 の後にフェライトが析出することによつて変動が始まる。さらに時間 t_2 において、まだ存在しているオーステナイトがパーライトに変態し始める：時間 t_3 においてこの変態は終了する。変態の開始と終了の時間は平衡の温度では無限に大きくなる。

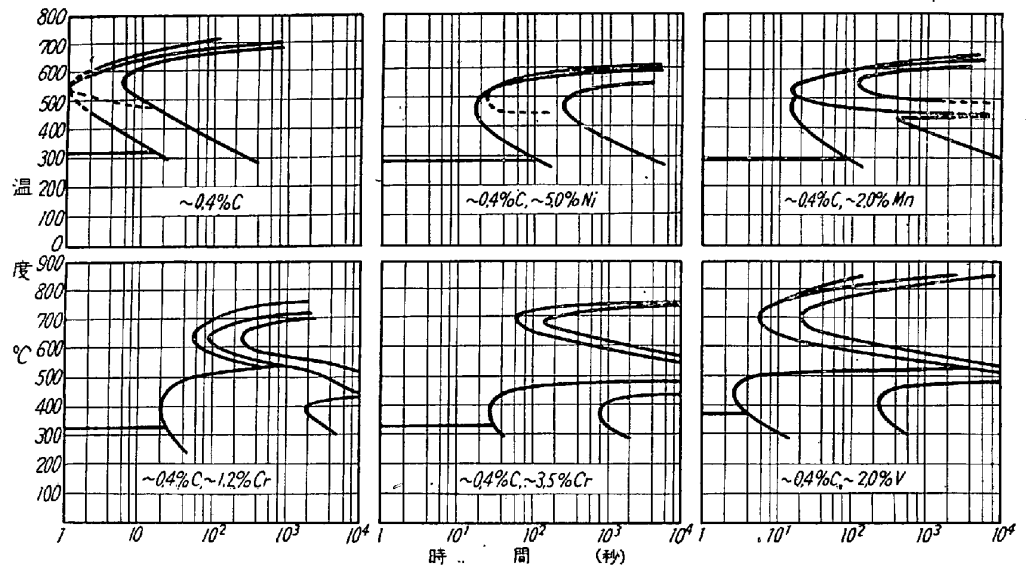
第1図の下の部分では、いろいろの炭素量をもつ二種のクロム鋼について状態図と変態図の関係が示されている。垂共析鋼Iの変態線図はたつた今述べたばかりの炭素鋼の場合と全く異なるところはない：過共析鋼

II の場合には、各温度での等温変態は炭化物の析出によつて始まる。

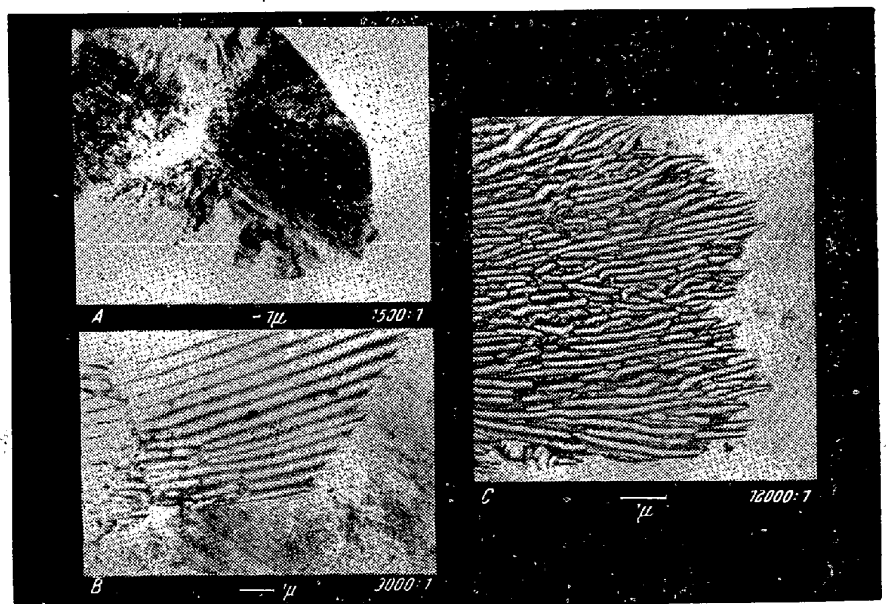
第1図の図式の変態図は、同時にすべての工業的合金鋼の大部分について、パーライト段階の変態の挙動の典型となるものである、炭素鋼および低合金構造用鋼および調質鋼は上部の部分図に典型として示したような変態線図をもっている。高合金鋼のうちでも特に炭化物を形成する合金元素をもっている鋼は下部の部分図に示したような変態線図をもっている。

実験的に求められた一連の変態線図を第2図に示す。この図は、ほぼ同じ0.4%という炭素量をもち、合金元素としてそれぞれ Ni, Mn, Cr, V, をもつ鋼に

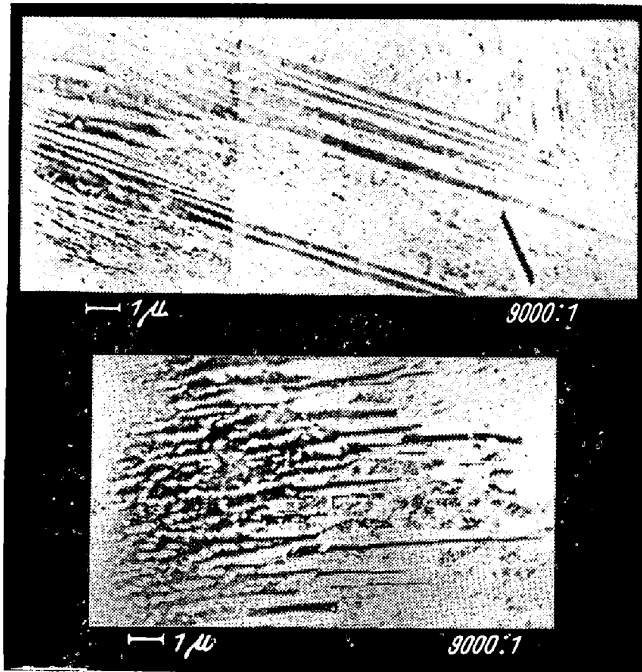
ついでのものである。合金元素の炭素に対する親和力は上に並べた順に増加している。このように対照して見ると、第1図に示したような簡単な形の変態図は、合金鋼ことに炭化物形成元素を含むものでは、特徴のある変化をうけ、しかも炭素との親和力および合金元素の濃度がふえるに従つて第二の変態の極大すなわち中間段階の極大がますますはつきりと現われてくることが明らかとなる。変態の起りにくい領域によるパーライト段階および中間段階の相互の間隔はますます広げられ、パーライト段階は合金元素の炭素との親和力および濃度が増加するに従つて高温側へ押しやられ、中間段階は低温側に追われて、ついに一部分は、一番低い冷却温度に向つて終結するマルテンサイト段階によつて被われるに至る。温度



第2図 等温変態図ZTU図の種々の型式



第3図 パーライト領域において不完全変態させた後の組織



鋼: 0.48%, 1.98Mn
475°C のベイナイト領域において不完全変態
させた後の組織

第 4 図

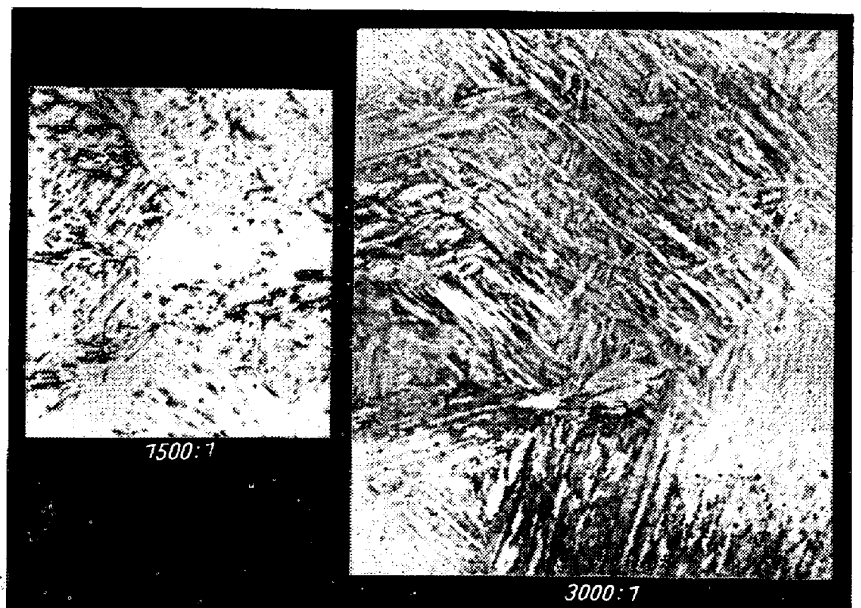
の降下に伴う反応経過の変化についての定性的な説明は、今日の知識によれば、ほぼ次のようにいい表わすことができる。

A_1 点以下の温度におけるオーステナイトの分解反応は、本来ならばもつと高温で起つている筈のものを取り返すわけである。すなわち Fe-C 状態図を借りれば(共析点の左では)同素変態 $\gamma \rightarrow \alpha$ (共析点の右側では)炭化物の析出 $\gamma \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$ が起こり、続いて残留オーステナイトのパーライトへの変態が起る。パーライト段階では反応はまだ平衡状態に似た形で進行する。何故ならばすべての関係元素はまだ拡散することが可能だからである。炭化物析出の可能性は溶解度曲線 ES の A_1 以下、C 含量の低い側への延長線に対応して移動する。パーライト形成は、一般の工業用鋼では炭化物の形成によつて力学的に始まる。このことはオーステナイトの中へ成長して行くセメンタイトの薄層を示す第3図の電子顕微鏡写真に示されている。温度が低くなり、合金中での金属原子の拡散能力が低下するに従つて変態の開始および継続時間はますます長くなる。500°C 以下では、実際上まだ動き得るのは炭素のみとなる。中程度の炭素鋼では核はマ

ルテンサイトを生成するよりも高い温度でオーステナイト中の炭素の少ない部分で形成される。必要な炭素の拡散は Ms 線に対応して、変態温度が低くなる程少くなる。ベイナイト組織の針状晶の成長と合金分の少い炭化物の析出(第4図)は炭素の拡散の可能性によつてのみ決定される。しかしこれも最後には止つてしまう。最後に変態の可能性として残されるのはマルテンサイト段階における拡散をとまなわないうムクラップ (umklapper) 過程となる。もつとも α 鉄の格子の中での炭素の拡散が容易である場合は、早くから緩和過程が起つており、これは適当に固溶したサンプルの電子顕微鏡写真によつて部分的にやつと認められる程度である。(第5図)

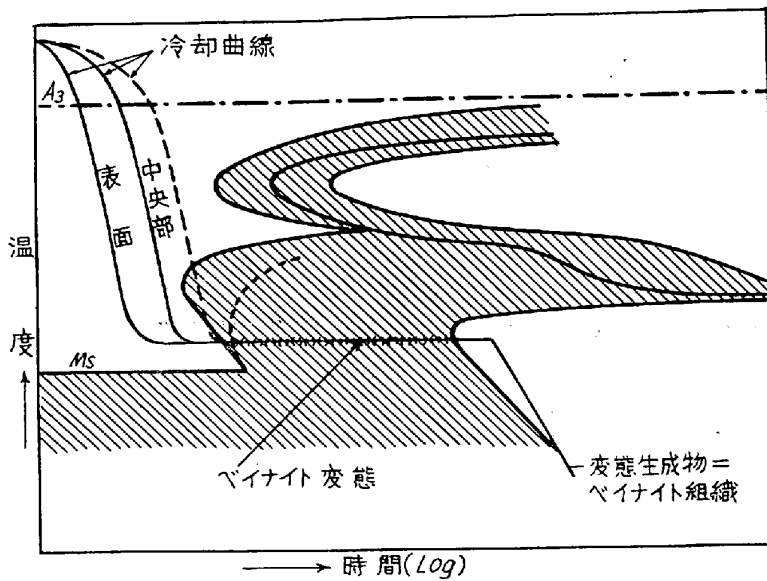
等温変態線図を実際的に応用することは、温度-時間経過について、ほぼ等温的実験の仕方に似た仕方のものに限られる。ベイナイトを得るための技術的可能性について、こゝでは図式的な説明、第6図、だけを掲げることにしてしよう。他の今一つの利用可能性は、パーライト段階の極大における等温変態である。一定温度で層状パーライトをうるための熱処理は、材料の機械的強度とともに加工性の問題が重要となつてくる場合には、ただちに重要性を持つてくる。このことは肌焼鋼や加工度の大きい大型鍛造用鋼の場合には本質的に重要な役割を演じる。

等温 ZTU 線図は他の熱処理には、限られた範囲しか適用することが出来ない。それは多かれ少かれ、たえず冷却が起つているような工業的な熱処理の大部分に対して、限られた範囲でしか利用できない。この欠点を救うために、我々はこゝ数年来、等温の場合のほかに、連続冷却の場合の時間-温度変態線図をも取上げるようにし

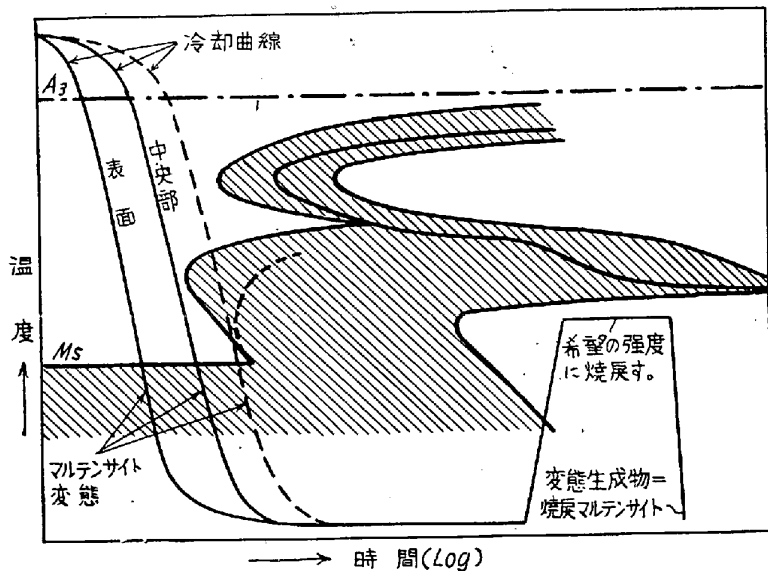


鋼: 0.43% C, 3.52% Cr, 1050°C 水冷. マルテンサイト組織

第 5 図



第6図 ベイナイト領域における調質 (図解)



第7図 硬化焼入 (図解)

た。

Max-Planck-Institut の鋼の熱処理のための図表はすでにすべての鋼について両方の図を含んでいる。

連続冷却に対する時間—温度変態線図は、一連の冷却曲線に変態の開始と終了が収録され、時間—温度図表に再現されることででき上っている。第8図は16Mn Cr5という鋼のこのような連続冷却線図を、同じ鋼の等温変態線図(第9図)と対照させて掲げたものである。等温線図の場合と同じように、この場合にも、フェライト析出、パーライト形成、ベイナイト形成、マルテンサイト形成の領域が存在する。このように類似しているために残念なことにしばしば取違いを生じる。二つの線図の表わし方は、根本的には非常にことなつた過程を書き表わしているものであつて、したがつて、いつもそれらが取

入れられた方向でしか読んではいけないということをおぼえてはならない。

変態線図の仕事は興味ある遊戯ではないだろうかという非難があるだろう。人は問うであろう——その際、現場の役に立つ何が生まれて来たのかと。焼入の操業にとつて ZTU 線図の持つ意義はどのようなものであるか? 一体それは応用のための何らかの意味があるのかと。こゝで地位と名声ある鉄鋼の専門家たちが、今日 ZTU 線図のすべての応用的な価値を否定することに対して沈黙するべきではない。それは正当と認められるだろうか、このような否定的批判はわれわれは反対しなければならないことをもう一度よく考えてみよう。

こゝで、変態線図をよく観察し熟考するということは若干の労力をとまなうということをも多分認めなければならない。しかしこのような苦勞を一度やつてみたならば、変態線図中でも連続冷却変態線図が、一つの鋼についていやくも考えられるだけのすべての熱処理によつて得られるであろう組織の状態、したがつて同時に機械的諸性質に対して、実際に最も完全な最も概観出来る記述を含んでいるといふことを認めざるを得ないであろう。それは単に定性的記述を与えるばかりでなくすべての熱処理の過程が演ぜられる温度—時間空間の中での組織状態の変化について正確な数値的な手引となるものである。第8図で判るように種々の状態領域の下の端に冷却に

よつて、その瞬間までに形成されたそれぞれの状態分布が数量的(%)に記載されている。焼入技術に対しては、この記述は定つた断面積をもつ材料を定つた冷却条件で冷却する際の硬化を直接読取ることが出来るばかりでなく、一般に合金鋼について、材料の寸法や冷却方法の選択に係りなく焼入性に関する間に一般的に答え得る可能性をも提供するものである。

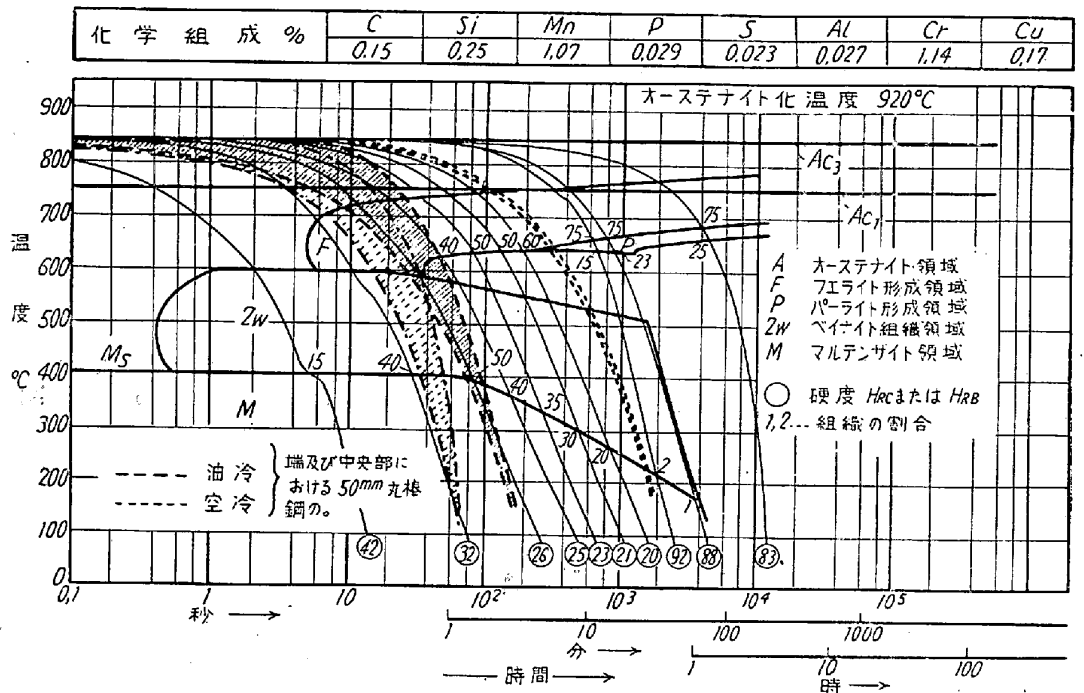
焼入性を判定する場合、到達し得る最高硬度とともに、硬度—深さ曲線も興味あるものである。到達し得る最高の硬度は本質的には鋼の炭素含有量によつてきまるが、焼きの入る深さは変態の起り方に依存している。この両者とも ZTU 線図から読みとることができる。鋼の変態の仕方に影響をおよぼす多くの影響の因子の作用、例えば、合金元素、オーステナイト化処理、溶解の方法など

は、時間—温度—変態線図の中にもれなく捕えられている。

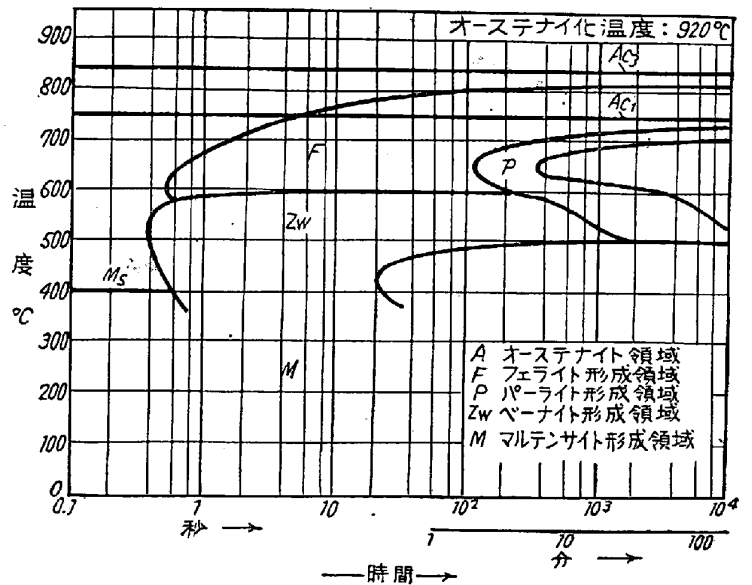
熱処理の実際に対する変態線図の多くの応用の中で、こゝでは二、三のものについてのみ立ち入った議論をすることにしよう。熱処理について、独特のしかも最近になって急に起った問題をもっている鋼の一種に、溶接性構造用鋼がある。第10図は St 42 の典型として鋼 16 Mn 3 を示した。この鋼の変態の

起りやすさはまだ非常に大きい溶接後の冷却に際して、この鋼はフェライトとパーライトに変態します。溶接の際に起る材料としての最も重要な問題は溶接継目の近くの冷却速度の最も速い熱影響部にマルテンサイトが出現することによる割れの傾向である。溶接材料のそのような割れのおこりやすさの判定は、その変態線図にもとづいて、溶接の際臨界領域で起る最大の冷却速度がはかられると言うことを前提とする。このような測定はいろいろの場所について行われた。期待される通り熱を導き去る断面積が大きければ大きい程溶接接合部附近での最大冷却速度は大きくなる。一定の板厚については溶接によつて導入される熱量が大きいほど、すなわち溶接部の厚さ、あるいは、溶接棒の直径、溶接時間の長さが大きいほど、冷却速度が減少する。このことから、外気温度の低い場合に現場で厚板に手溶接する際の最も重要な溶接条件の限界を予期することができるであろう。

この条件の下で進行する冷却過程では、溶接部と母材との間の熱影響部が A_3 の温度領域すなわち約 750°C から 350°C に冷却するのに8秒かかる。これは鋼 16Mn3 については、わずかに5%のマルテンサイトが形成されるに過ぎないことを意味しているので、そのようなあまり好ましくない溶接条件であつても危険は起らない。しかし St 52 に相当する鋼 19Mn5 では、ことなつた様相を呈する。(第11図) この場合には同じ冷却条件でマ



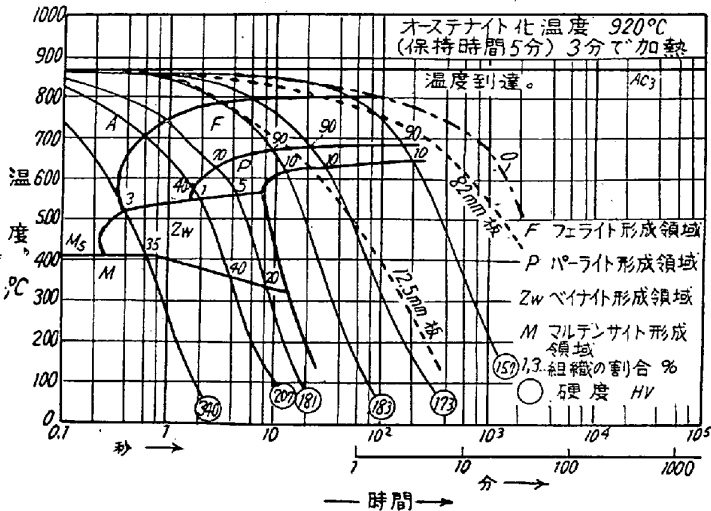
第8図 16 Mn 5 鋼の連続冷却のために丸棒の冷却曲線を書き入れた Z T U 図



第9図 16 Mn Cr 5 鋼の等温 Z T U 図

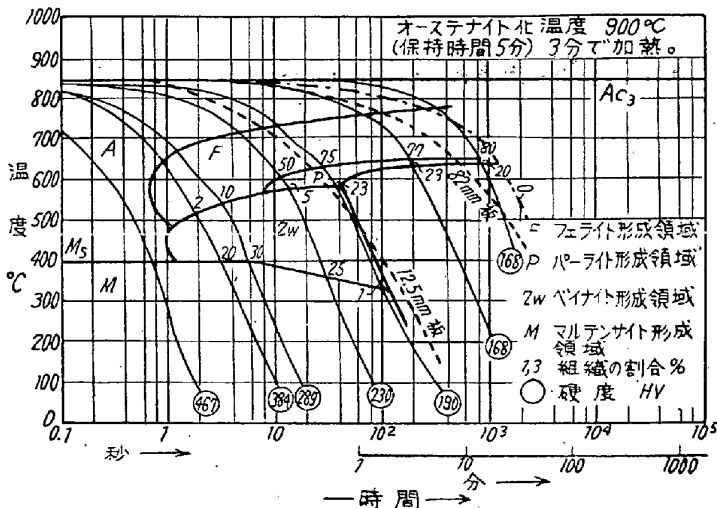
ルテンサイトは50%に達し、鋼は 400°C 以下の温度では、すでに高い強度を持っているので、部分的な体積変化で割れをおこさずに切抜けることは、ほとんど考えられない。冷却についてもつと緩慢な条件、すなわち板厚をより薄くし、溶接部厚さをより厚くする。または材料の子熱を行えば20秒という冷却時間が得られる。このような冷却では高合金鋼 19Mn5 でも約15%のマルテンサイト形成しかひきおこさないの、このような条件の下で溶接した構造部分は、特に不都合な付加的な応力条件が加わらない限りは危険はない。この系列の鋼につい

化学組成	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Cu	%Mo	%Ni	%V
	0.13	0.26	0.56	0.019	0.027	0.07	0.20	0.01	0.05	0.01



第10図 種々の溶接過程 (-----) および熱処理経過 (—) を書き加えた16Mn3 鋼の連続冷却の ZTU 図

化学組成	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Cu	%Mo	%Ni	%V
	0.29	0.42	1.20	0.025	0.025	0.08	0.21	0.01	0.06	0.01



第11図 種々の溶接過程 (-----) および熱処理経過 (—) を書き加えた19Mn5 鋼の連続冷却の ZTU 図

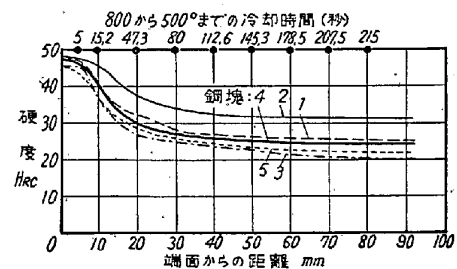
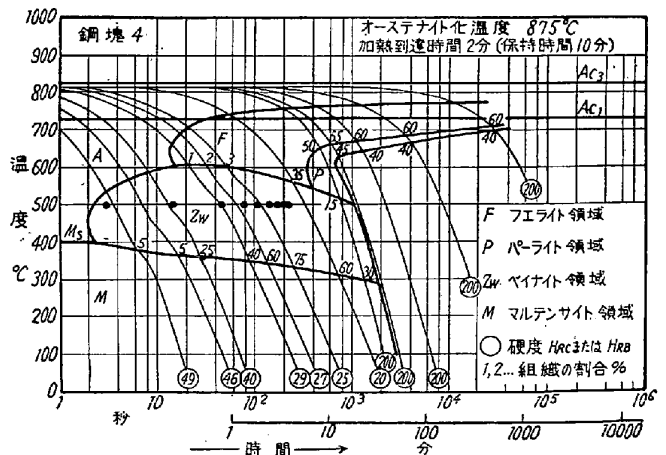
て、炭素およびマンガンの量をそれぞれ 0.26% および 1.75% Mn まで増加した場合の研究が行われた。このような鋼では、同じ 20 秒の冷却時間で 30% のマルテンサイトが形成される。冷却時間が 5 秒の場合には 85% に達する。したがって強度を得るために C と Mn の含量を 19Mn5 の鋼の限界以上に高めんとすれば、溶接に対する敏感性の側から見て、大きな不安が存在することはたしかである。同様のことが 25CrMo4 のとき調質鋼 (第12図) すなわち、C の含量に関しては溶接が可能なものと見なされる鋼の使用についても言える。一つの解決法としては溶接しようとする材料を予熱する方法がある。約 200°C に予熱すると、溶接接合部附近の冷却時

間は約 50% 増加し、マルテンサイトの量はそれに応じて減少する。

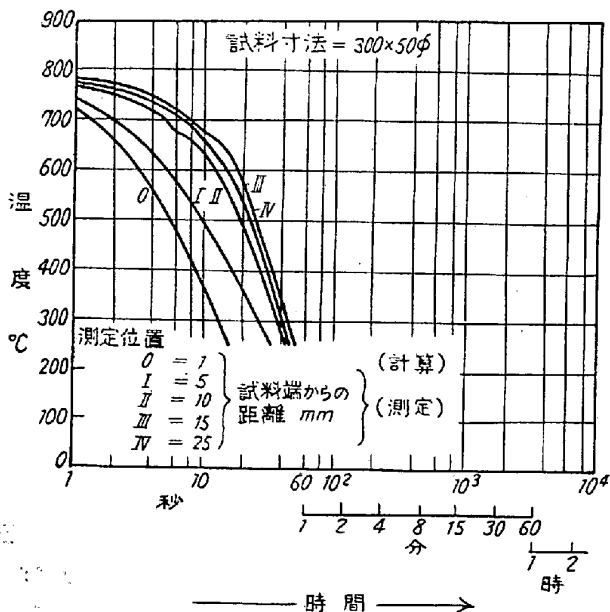
より高い強度をもつ溶接可能な構造用鋼の発展は矛盾に満ちた要求、すなわちマルテンサイトによる溶接割れ敏感性を大きくすることなしに合金成分を多くすることによつて強度を上げると言う要求により根本的に阻害されているように見えた。ここでベイナイトの変態の利用が一つの逃げ道を提供する。きわめて広い範囲の冷却速度でベイナイトの変態が起ることで特徴づけられる変態の仕方をもつた Cu-Ni-Mo 鋼が発達した。これは一方では、ゆつくりした冷却では 80 mm の厚さの板にも焼戻組織に似たベイナイト組織が十分な量形成され、望ましい機械的性質が保証されるばかりでなく、速い冷却の場合でも熱影響部には本質的にはベイナイト組織が形成されることを可能にする。しかし、これは形成されても体積変化がわずかであり、しかも形成温度が高いために、構造部材に有害な応力を引きおこすことはない。

似たような応力はさらにはつきりした形で、ガス切断の際の切断辺のところで起る。ここでは、

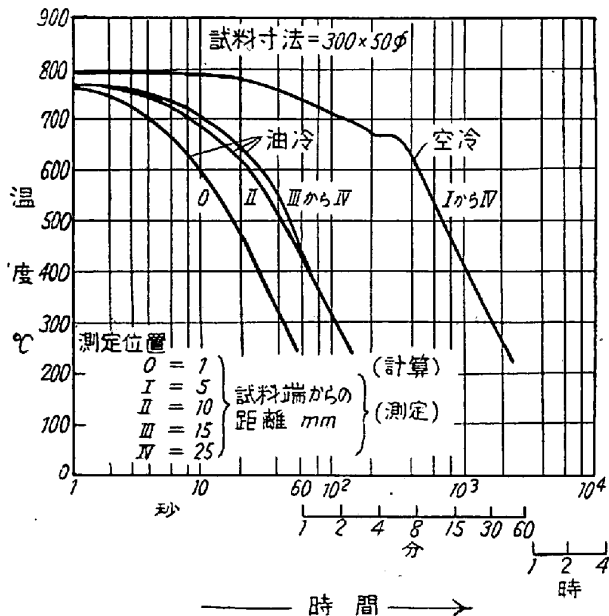
鋼塊	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V
1	0.30	0.28	0.56	0.019	0.023	0.09	0.24	0.22	0.24	0.01
2	0.27	0.21	0.52	0.020	0.009	1.23	0.16	0.29	0.41	0.01
3	0.24	0.14	0.64	0.024	0.017	0.99	0.17	0.17	0.21	0.01
4	0.23	0.25	0.64	0.010	0.011	0.97	0.16	0.23	0.33	0.01
5	0.22	0.20	0.60	0.014	0.013	0.97	0.16	0.23	0.38	0.01



第12図 種々の 25CrMo4 鋼についての硬化性と変態性との関係



第13図 37MnSi5 鋼の 50mm 丸棒試料の水冷の際の冷却経過



第14図 37MnSi5 鋼の 50mm 丸棒試料の油冷および急冷の際の冷却経過

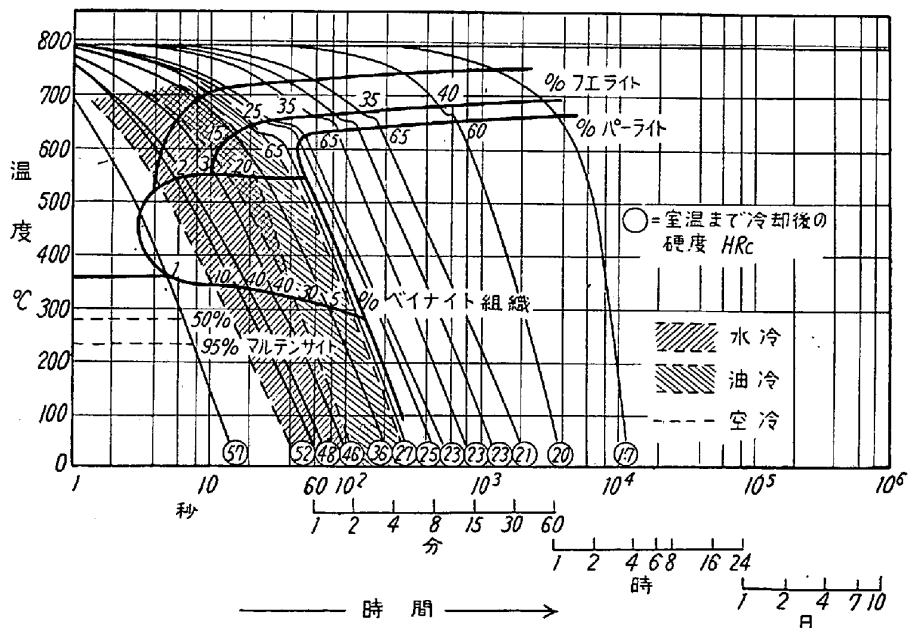
冷却は最も不都合な溶接条件の場合よりも遙かに速い。マルテンサイトがこの部分に形成されることをさまたげる一つの興味ある方法は、やはりZTU線図の知識から得られる。すなわち切断トーチの後から加熱トーチを走らせることによつてパーライト段階(等温的)の最も変態速度の大きい温度に保たれるように、充分長い間冷却を押えておくことが出来るので切断の際オーステナイト領域にいたるまで加熱された領域はパーライトを形成する。マルテンサイトの形成およびそれによる割れ発生の可能性はさけることができる。

しかし何といつても変態線図の最も大きな利用分野は、たとえば溶接とかガス切断の際におけるような止むを得ないあるいは望ましくない熱処理の分野ではなくて、鋼の調査の分野である。

ある定つた鋼種の硬化はいろいろの冷却材における当該断面の冷却の経過がわかれば、連続冷却の場合のZTU線図を利用してきわめて簡単に判断することができる。第13図、第14図は50mmφの断面をもつものについて、水冷、油冷、空冷の場合のそのような測定結果である。次の第15図にはこれらの冷却曲線を空冷、

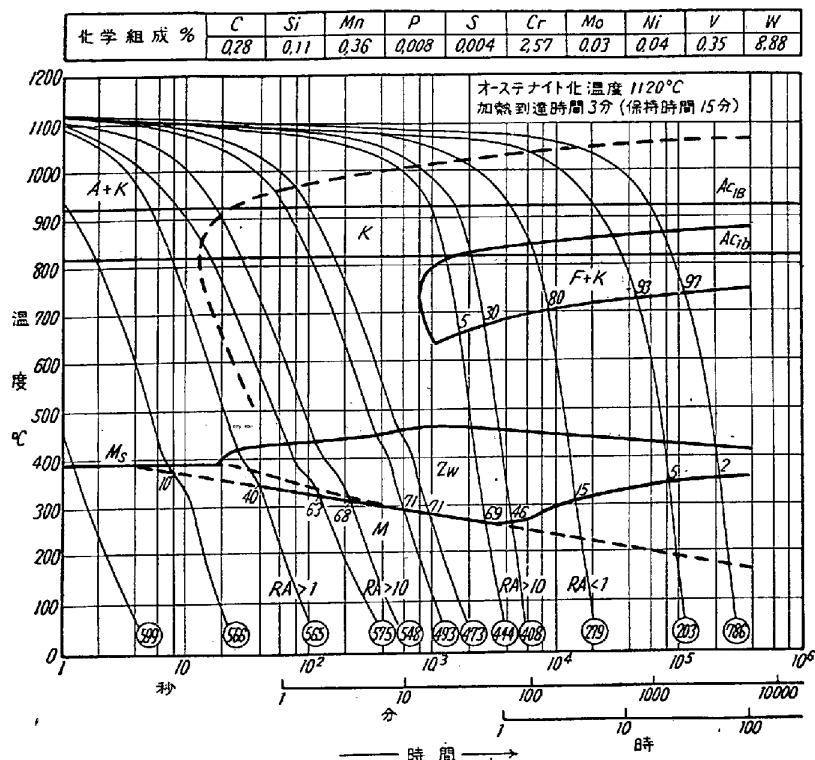
Bez.	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%V	溶解法	粒度 (ASTM) McQuaid-Ehn
B	0.38	1.05	1.14	0.041	0.019	0.23	0.02	b. S.-M.	4 と 5

焼入温度 = 860°C

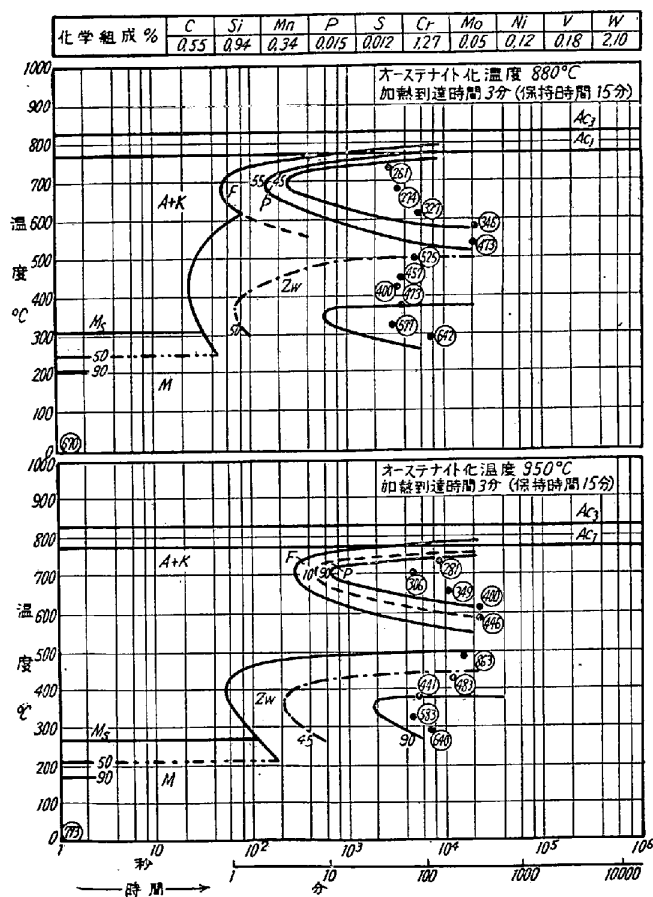


第15図 種々の冷却剤を用いた場合の 50mmφ 丸棒試料の冷却経過を書き加えた 37MnSi 5/1 鋼のZTU 図 (連続冷却)

油焼入、水焼入の領域にまとめて構造用鋼 37 MnSi 5 の変態線図の中に記入した。これによれば、空冷のものは全断面がフェライト-パーライト組織の領域に入り、油焼入の場合はすべての4つの変態段階——フェライト、パーライト、ベイナイト、マルテンサイト——の混り合つた組織となるが、水焼入の場合のみは表面の外縁部は正に純粋にマルテンサイト的な焼きが入る。工具鋼 30



第16図 30WCrV3411 鋼の連続冷却の場合の変態性



第17図 オーステナイト化温度を変えた場合の 55WCrV7 鋼の等温変態性

WCrV3411 (第 16 図) は序論で第 1 図のように状態図との関連において行つた分類にしたがえば、過共析領域に入る。オーステナイトの分解は、ここで点線と区域 K で示したように炭化物の析出によつて始る。パーライト段階 F + K は特殊カーバイト形成合金元素の含有量が高く、W 9.0%，Cr 2.5% を含むので、非常に大きく右側に寄つており、高温の部分に位置している。パーライト段階とベイナイトの間には、広い変態の起らない領域が生ずる。ベイナイトの変態はかなり冷却速度の大きいところまで拡つている。

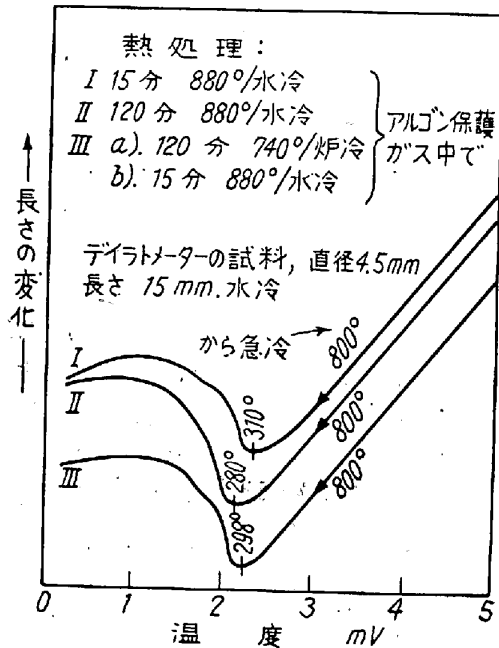
この変態の挙動は、焼入れに対して次のことを意味する。すなわち、空冷の場合には、マルテンサイト組織は全然現われず、ほとんどがベイナイト組織から成り、高温では粒界への炭化物の析出がこれに先行する。油焼入れの場合は全断面にわたつて約 50% 以上のベイナイト組織が形成される。炭化物の析出はまだおさえられていないので、炭素量に相

応した最高硬度を得ることはできない。水焼入によつて始めて断面の大部分が純粋なマルテンサイトに変態し、炭化物の析出は抑制される。しかし中心部にはなお 40% 以上ものベイナイト組織がみられる。

特殊カーバイト形成元素をさらに多く含んだ特殊鋼 60WCrV7 についてこれらの高合金鋼における硬化温度の影響を示すため第 17 図にオーステナイト化温度 880°C (上図) および 950°C (下図) の場合の等温変態線図が取上げられている。この鋼は、どちらの温度でもオーステナイト + 炭化物の不均質の多相領域にある。通常工業的に行われているオーステナイト化保持時間 15 分はどちらの温度でもオーステナイトと炭化物の平衡を達成するためには充分ではない。したがつてオーステナイトは焼入の瞬間に、なおほなほだしく不均質である。高い方の温度 950°C では炭化物の溶解もそれだけ強いのでマルテンサイト点は 310°C から 275°C に下り、パーライトに対するフェライトの比率はパーライトが増す方向に変移する。パーライト段階では変態の最高値は 50 秒から 300 秒といちじるしく長時間側にずれるが、ベイナイト領域ではわずかに約 25 秒から 55 秒までしかずれない。パーライト段階とベイナイトの間の変態の起らない領域はいちじるしく拡がる。

この鋼について注目すべきことはどちらのオーステナイト化温度の場合でもマルテンサイト形成が明らかに二

つに分離した段階をもつことである。880°Cで15分のオーステナイト化の後、マルテンサイト点がこのように分れることは第18図の膨脹計曲線Iでわかる。オーステナイトはこの時になお非常に不均質であつたであろうから、このようにはつきり分れた二つのマルテンサイト点で変態が起つたのである。保持時間を120分に延せば、濃度の平均化が進行して、これに対応した第18図の膨脹計曲線IIに表わされているように、マルテンサイト点の分裂はごくわずかの徴候が見られる程度にまで弱



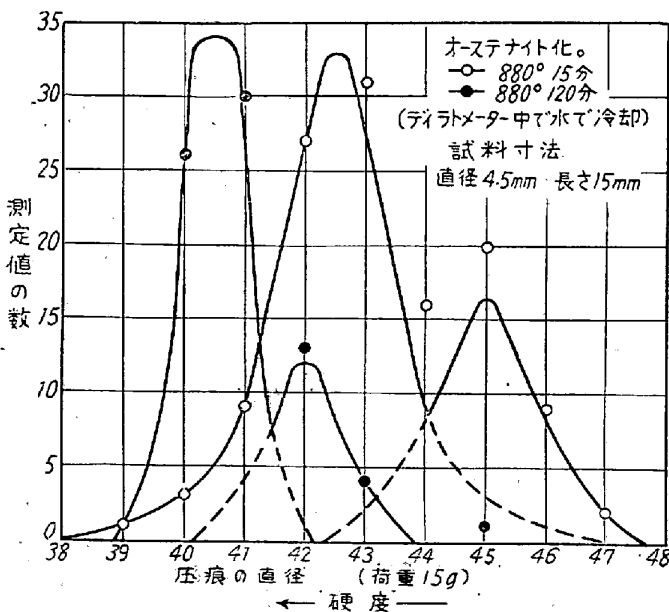
第18図 オーステナイト化温度を変えた後の60WCrV7鋼のマルテンサイト形成経過

くなる。マルテンサイト点は曲線Iに比べ低くなり、硬度は上昇する。同じ試料を740°Cで120分軟化焼鈍したのち、改めて880°Cに15分保持してオーステナイト化されると、マルテンサイト点には第18図曲線IIIに見られるように明らかに分裂がおこる。これはこの焼鈍に際して炭化物の析出と形成が行われかくて実験Iを行う前の出発状態に戻つたわけである。

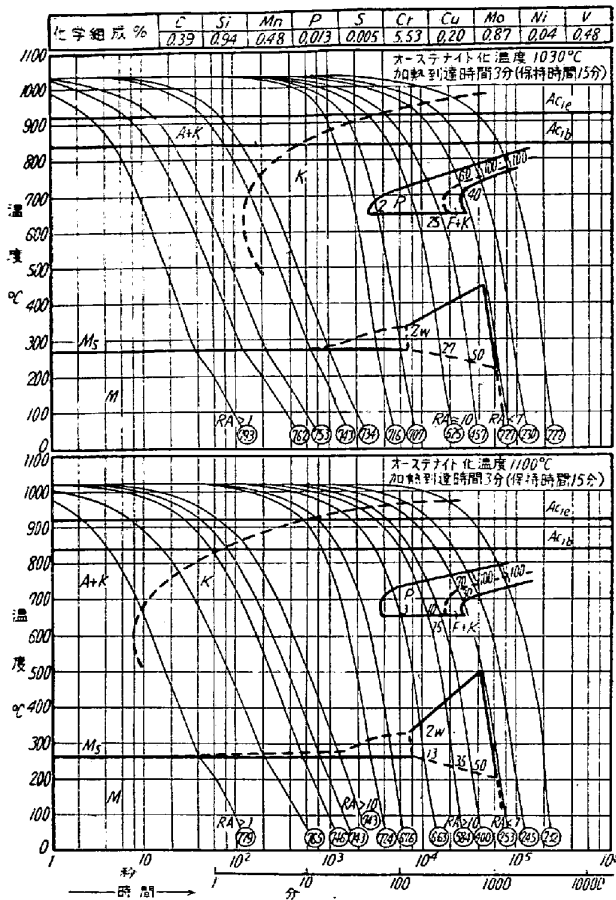
この試料では研磨したエッチしていない光沢面に約100のマイクロ硬度試験が行われた。第19図に圧痕の直径の頻度分布を示した。これはいずれの場合にも二つの極大を持つており、保持時間の短いものでは、長いものに比べて二つの極大の間ははつきりと分れている。保持時間の増加にともなつて硬度が上昇することに対応して保持時間が長い場合は極大は圧痕直径の小さい方、すなわち硬度の高い方に移動している。このことから、オーステナイト領域で非常にことなつた組成をもつものが存在しており、そのおのおののマルテンサイト変態がことなつた温度で起るので、段階的なマルテンサイト形成の経過がおこるといふことはたしかである。この鋼でのオーステナイト化温度および保持時間の大きな影響は、炭化物溶解の温度および時間に対する依存性に由来している。

クロム-モリブデン-バナジウム鋼 40CrMoV21は第20図によれば通常の焼入温度1300°C(上図)においてすでに共析反応以前に炭化物析出が起ることを示している。クロムおよびバナジウム炭化物のオーステナイト中における溶解度の温度依存性は非常に大きいので、焼入温度で溶けている炭化物が冷却速度が大であつても、オーステナイトが分解する前に析出する程である。オーステナイト化温度を1100°Cに上げることによつても、この鋼のマルテンサイト点はわずかに275°Cから270°Cに下るに過ぎない。これに反して、共析前の炭化物析出はきわめて強い影響をうけ、析出の開始は約150秒から異常に短い時間、10秒にまで変化する。

炭化物の析出にともなつて、他のすべての変態もその経過が変えられるであろうことは予期されることかも知れない。しかし、事實はそうではない。オーステナイト化温度を1030°Cから1100°Cに上げることによつてもパーライト段階およびベイナイト段階の変態領域はその位置にほとんど差異を生じない。オーステナイト化温度の上昇によつて増大した固溶炭化物は、冷却の際にはただちに優先的に粒界に析出する。第21図左に0.55%C, 15%Crの組成をもつ刃物用鋼について示したように、光学顕微鏡ではこの析出は認められない。(上図はオー



第19図 オーステナイト化処理を変えた時の60WCrV7鋼のマルテンサイト組織の微小硬度の頻度分布



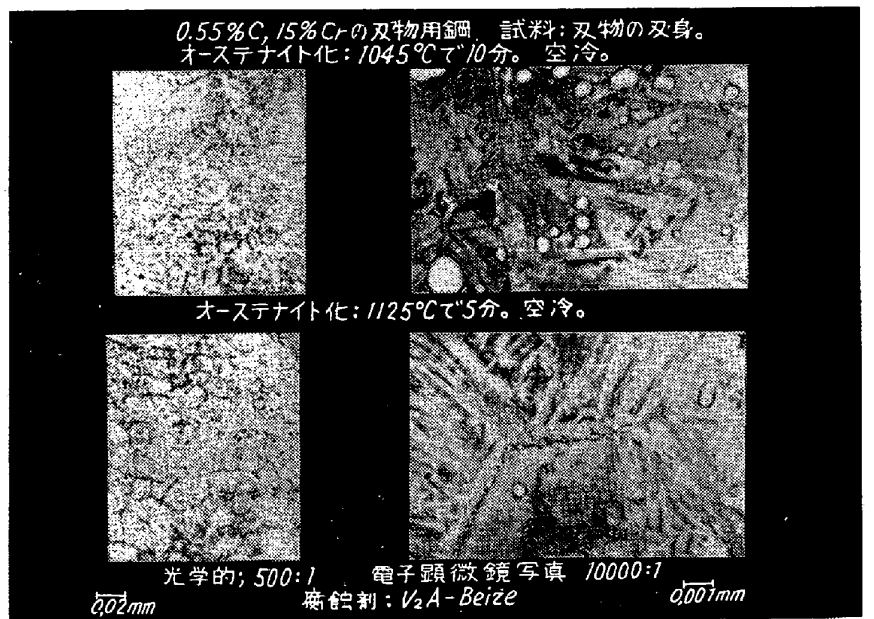
第20図 種々のオーステナイト化温度の場合の40CrMoV21鋼を連続冷却した際の変態性

オーステナイト化温度 1045°C、下図は 1125°C の場合) しかし、電子顕微鏡写真では非常にはつきりした差異がみられる。すなわちオーステナイト化温度の高い場合は、炭化物の溶解が増大し、それに対応して粒界への炭化物の析出も増加する。粒界の周囲では、マルテンサイトの針状晶が発生するが、それは組織が粗いことと、より速やかにエッチされることから、通常のマルテンサイトとは区別される。このことから、炭化物の粒界への析出によつて、炭素と、それとともに合金元素がオーステナイトからとり去られるのであると結論しなければならない。このようにして発生した粒界の部分のより少ない合金元素を含んだ領域では、冷却に際してマルテンサイトの形成が最初に起る。ここに発生した針状マルテンサイトは合金元素含有量が低いことのためによりエッチされやすく、また成長が、まださまたげられていないために粗い組織を示す。

に高速度鋼の場合にも見られる。これは前に述べた二段階に分れたマルテンサイト形成と共通のものであつて、いずれもオーステナイトの不均質なことと関係している。ただ粒界マルテンサイトの方は、共析前の炭化物析出によつて冷却して始めて発生するものであるが、二段階マルテンサイト形成の場合は不完全な炭化物の溶解のために、オーステナイト化の際にすでに不均質が存在しているのである。

変態線図と関係した工具鋼の研究では、マルテンサイト状態の形成が、オーステナイトマトリックスと直接的に関係しているの、熱処理の最終状態としてのマルテンサイト状態についていろいろの貴重な帰結が下されていることを示している。マルテンサイトの形成経過とマルテンサイト組織中での微小硬度のばらつきからオーステナイトの不均質さがはなはだしかつたか、あるいはわずかであつたかの結論が得られる。このオーステナイトは明らかに工業的な焼入条件の下では炭化物の溶解が緩慢であるためにごく不完全にしか平衡状態に達しない。ここで、焼入れ技術にとつて重要な、そしてその解決にはなお多くの研究が要求される場所の新しい問題が打ち出されるのである。

以上によつてZTU線図によつてオーステナイトの変態説明の大要を述べた。まず専ら、純粹に図解的な地図の中にことなつた温度領域では非常にことなつた様相を呈する分解反応の動力学的経過についての今日存在する説明をできる限り広くとり入れて見た。その際、決定されている多くのZTU線図の中で、調質の目的のために、あるいは加工性のために任意的に、あるいはたとえば、



第21図 硬化した刃物用鋼の組織に対するオーステナイト化温度の影響

溶接の場合のように処置方法上止むを得ず熱処理されるすべての鋼の中から若干の例を選んだ。作業現場で生ずる種々の問題にこの線図を利用するための例の数は、この報文のわく内では、わずかでしかあり得なかつた。しかし熱処理専門家が、扱っている材料の変態線図の説明

を充分に受入れ、その熱処理の方法の経過をこの変態線図の中で追究でき、さらに他の方法でのすべての可能性を同時に見きわめることができるならば、数限りない応用の可能性が得られるであろう。

フランツ・ウェーファー博士より来信

私が昨年 10, 11 月に日本旅行の際訪問できた協会、工場、研究所の
会長、所長ならびに重役の皆様へ

心から尊敬する皆様！

日本鉄鋼協会および日本金属学会が準備した周遊旅行に際して数々の事業場を拝見させて頂いた御寛大な御招待に対して、ドイツ帰国に際して心から御礼申し上げます。

この周遊旅行で私は日本の技術および研究の水準が非常に高いこと、および果敢な将来計画について承知するまたとない機会をもちました。諸方における討論に際してマックス・プランク鉄鋼研究所における研究成果について御話しすることができましたことは私の心から喜びに耐えないところであり、かつ私もまた、これらの討論から私自身の将来の仕事に対して様々のきわめて貴重な示唆を受けたのであります。

工場や研究所訪問のかたわら、私は皆様の御好意により北海道から九州にいたる間に日本の歴史上最も重要な場所を訪れ、かつ日本国民の生活を伺うことによつて忘れ得ぬ印象を得たのであります。

どこに行こうといたるところで私を待ちかまえていた誠心に私は最も強く感動致しました。これについて私はもう一度御礼を申し上げるとともに、旅行中御親切に私の面倒を見て下さった皆様方に私の御礼を伝えて頂くようお願い致します。かつまた訪問の際頂いた様々の貴重な贈り物に対し、心から感謝致します。私はそれらを日本の同僚の皆様との結びつきのしるしとして、大切に保存致します。これらの贈り物から見て私の訪問はわれわれ両国民の間の専門的ならびに人的紐帯が一層強化されたことと確信致す次第であります。

日本の冶金業界の方々および研究者の御仕事の一層の御成功を心から祈ります、

敬 具

フランツ・ウェーファー