

炭素鋼の熱處理に關する理論

(昭和五年十月十二日(室蘭)第四回研究部會にて報告)

本 多 光 太 郎

I 鐵 の 變 態

鐵は高溫度に於て2つの變態點を有つてゐる。1は900°Cで他は1,400°Cである。即ち鐵を常溫から次第に熱すれば900°Cまでは鐵の諸性質は少しづつ、連続的に變化するが此溫度に於て急激に變化し、所謂變態の生ずるを示す。更に之を熱すれば1400°Cに於て鐵は再び急激に變化して第2の變態の生ずるを示す、従て前の變態を A_3 變態と云ひ後の變態を A_4 變態と云ふ又は是等變態の生ずる溫度を A_3 點及び A_4 點と名づける。斯く性質を異にせる鐵を夫々 α 鐵及び γ 鐵と云ふ即ち900°C以下に於て安定なる鐵は α 鐵で900°C以上1,400°C間に安定なる鐵は γ 鐵である、又諸方面の研究によれば1,400°C以上の鐵は900°C以下の鐵と其性質は同一であるから之も α 鐵である。

次にX線を用ひて鐵の原子配列を調査すれば α 鐵は體心立方型の原子配列を有し γ 鐵は面心立方型の配列を有する、又1,400°C以上では鐵原子は再び體心立方の配列を有することになる。

最近 α 及び γ 鐵の内容は斯く明瞭になつたから之が定義を次の如く述べる事が出来る。即ち鐵原子の體心立方型の配列を有するものは α 鐵で面心立方型の配列を有するものは γ 鐵である。

II 鋼 の 變 態

鋼は鐵と少量の炭素の合金である。炭素含量の最小限は0.04%で其最大限度は1.7%であると云ふ事が出来る、鋼中にある炭素は普通鐵と化合してセメンタイトと稱する炭化物 Fe_3C を作つ

て存在する。セメンタイトは非常に硬い物質で焼入鋼以上の硬度を有する、鋼が鐵に比して著しく硬いのは此炭化物の爲である。物理的に云へば鋼は鐵とセメンタイトとの混合物である。

鋼は鐵にない變態點を有し726°Cに於て急速に其性質を變ずる之を鋼の A_1 變態點と名づける。今顯微鏡的研究によつて此變化の内容を調査すれば A_1 點以下では組織は鐵とセメンタイトの混合物であるが此點を越ゆればセメンタイトは炭素として鐵中に溶解し原子的に混合して所謂溶體を作る、一旦固溶體となれる鋼を冷却すれば約700°Cに於て再び鐵とセメンタイトとの混合物となる即ち A_1 變態は鐵とセメンタイトとの混合物が固溶體となり或は固溶體より混合物になる變化である。X線分析によれば此固溶體内に於ける鐵原子の配列は面心立方型即ち γ 鐵と同一である。又炭素原子は何れも鐵格子の内部の最も廣い場所なる立方格子の體心を占有し其濃度に應じ其所、彼所とフロバピリチーの法則に従つて分布してをる。

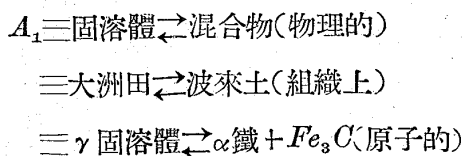
III 鐵 と 鋼 の 組 織

純鐵の一片を取り其一面を平滑に磨いて鏡の如くし之を顯微鏡下で見れば一樣に光りて何等影像を認め得ないが之を暫時薄き酸に浸して後顯微鏡で檢すれば視野は不規則なる多角形に區分せられ、其境界は腐蝕されて黒く見え所謂大洲田式組織を呈する。次に鋼の1片を取り同様に處理して顯微鏡下に於て見るに若し炭素量が微小であれば多角形の境界の所々に黒く染れる島が見える、炭

素の増すに従ひ黒き島は其大き及び數を増し炭素 0.9%に至れば視野の全部は黒く見える、此の黒き島或は黒き地を更に倍率の大なる顯微鏡によりて見れば鐵とセメントとが幾重にも微細な層状をして相混じることが分かる、此組織を波來土と名づける、波來土組織の炭素濃度は常に 0.9%である波來土島の周圍は勿論純鐵であるが組織上では地鐵と呼ぶことになつてゐる。

炭素が 0.9%を越へて増加すれば顯微鏡上粒の境界は白く見え炭素の増すに従ひ其部分は太くなる、此白き部分は炭素濃度 0.9%以上なる爲餘分のセメントが粒の境界に析出して網状を呈するのである。

次は鋼を熱して組織の變化を見るに A_1 點以下は常に波來土で少しの變化をも認めないが此點を越えれば大洲田組織となり顯微鏡上視野は不規則な多角形より成つて居る、故に鋼の A_1 變態の内容は次の 3 式によつて表はすことが出来る。



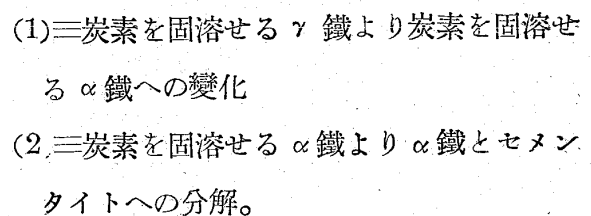
IV 鋼の焼入

鋼を高温度に熱した後水中或は油中に投入して急速に冷却することを焼入と云ふ。適當に焼入された鋼の硬度は焼入前の 3 倍乃至 4 倍に上るが加熱温度は必ず A_1 點を越ゆることが必要である。

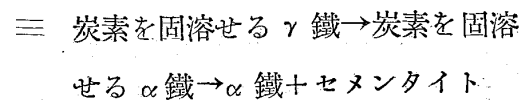
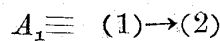
焼入せる鋼を顯微鏡で檢すれば針状或は亞麻の葉の形をなせる微小な針状の結晶の集合より成つてゐる。即ち焼入鋼は 1 種の固溶體であることは明かである。此組織を麻留田と呼で居る。今 X 線によつて麻留田組織の原子配列を研究するに鐵原子に就いては α 鐵と同じく體心立方型である、然

るに麻留田は固溶體であるから炭素原子は鐵原子の格子内にあるべきであるが α 型格子内の最も広い場所は立方格子の面心であるから炭素原子は此位置を占有し濃度に應じプロバビリティーの法則に従つて其所、此所に分布されてゐる。

扱て前記の如く冷却の際の A_1 變態は大洲田より波來土即ち炭素を固溶せる γ 鐵より α 鐵とセメントとの混合物への變化である、従つて此變化は之を 2 つの變化に分解して考ふるが便である即ち (1) 先づ鐵原子の格子か單に γ 型より α 型に變化する、(2) 炭素がセメントとして鐵格子内より分離する、(1) の變化の生ずる結果は炭素を固溶せる α 鐵となる、然し γ 鐵は殆ど炭素を固溶し得ないから (2) の變化は直に起らざるを得ない、故に (1) 及び (2) の變化を式を以て表はせば次の如くである。



故に



然るに 炭素を固溶せる γ 鐵 = 大洲田、
炭素を固溶せる α 鐵 = 麻留田、
 α 鐵 + セメント = 波來土、

故に $A_1 \equiv \text{大洲田} \rightarrow \text{麻留田} \rightarrow \text{波來土}$

即ち A_1 變態を分解して考ふれば右の二段變化より成るものを考ふことが出来る。

焼入鋼の鐵原子の配列は一般に體心立方型であると云つたが若し其表面に X 線を當て、鐵原子

の配列を研究すれば體心立方格子でなく軸比 1.06 位の體心正方格子であることが明らかにされた。即ち焼入鋼の表面の薄い層では格子が體心正方型で其内部は體心立方型である又實測によると體心正方晶の軸比は表面が最大で内部に入るに従ひ急に減少し表面より 1—2mm の深さでは軸比は已に一となり立方型となる。

此體心正方格子は其形に於て體心立方格子に近く單に立方格子が一方に 6% だけ延びてゐるに過ぎないから其性質もよく類似してゐる、従て之も麻留田と呼ぶが此 2 つを互に區別する爲體心正方のものを α 麻留田、體心立方のものを β 麻留田と呼ぶことにする。何れも炭素原子は鐵格子内に侵入してゐる。 α 及び β 麻留田の性質は互によく似てゐるが前者は後者より不安定で酸に腐蝕され易く硬度も少し低い、又 α 麻留田の比容及び電氣抵抗は β 麻留田のそれよりも大である。

終りに焼入によつて何故に麻留田を生ずるかを説明する。前に述べた如く A_1 變態は次の二段の變化より成つて居る。即ち

$A_1 \equiv$ 大洲田 \rightarrow 麻留田 \rightarrow 波來土。

故に鋼を先づ A_1 點以上に熱して大洲田とし之を徐冷すれば A_1 點で大洲田は先づ麻留田に變じ直に波來土に變ずるから其結果は

大洲田 \rightarrow 波來土

と同一で波來土が得られる、然し水中に焼入せる場合の如く急冷すれば凡て變化には多少の時間を要するから第 1 の變化即ち大洲田より麻留田への變化は遅延せられ漸く 300°C 以下の溫度で起り始め、此變化が終る頃には試片は冷却して殆ど室溫に達する故に第 2 の變化、即ち麻留田より波來土への變化は室溫に於ける試料の粘性の大なる爲

起ることが出来ないで麻留田が得られるのである。若し冷却速度が上記の場合よりも少し小なれば麻留田より波來土への變化も一部進行する、然るに大洲田、波來土、麻留田の硬度を比較すれば麻留田は最も硬く波來土は著しく軟く、大洲田は尙軟かである。故に冷却速度が少し小で麻留田より波來土への變化が一部進行する場合には常溫に於ける成生物は麻留田に多少の波來土を交へたものであるから硬度は純麻留田の場合よりも小である。又冷却速度が極て大であれば第 1 の變化即ち大洲田より麻留田への變化も一部阻止される、勿論第 2 の變化麻留田より波來土への變化は全然阻止されるのである、此場合には大洲田を交へた麻留田が得られるから硬度は純麻留田の場合よりも小である。

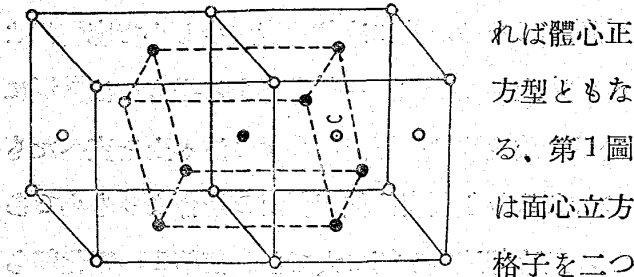
上記の考によれば鋼の最大硬度は冷却速度が適當の大きさを有し、第 1 の變化、大洲田 \rightarrow 麻留田が完結し、第 2 の變化、麻留田 \rightarrow 波來土が完全に阻止せらるゝ時に得らるゝのである、冷却速度が之より大であるも或は小であるも何れも硬度は充分でない。従て焼入によつて最大の硬度を得るは頗る困難の作業である。實測によれば焼入鋼が 5 乃至 10% の大洲田を含有することは普通である。

尙此所に注意すべき重要事項は大洲田 \rightarrow 麻留田の變化が内部歪力によつて著しく催進さるゝことである、例へば焼入の際試片各部の冷却速度の差によつて生ずる熱的歪力は此變化の進行を容易ならしめる。例へば水焼入の場合は油焼入の場合に比して冷却速度が大であるから單に速度の關係より云ひば前の場合は後の場合よりも多くの大洲田を含むべきであるが X 線的定量測定の結果によれば事實は反對である、之は油焼入に比して水焼

入の場合の大なる熱歪力が大洲田→麻留田の變化を催進し速度の影響を稜駕するからである。

次に大洲田より麻留田の生ずる機構に就て述べ

る。大洲田の鐵原子の配列は面心立方型であるが



見方を変へれば體心正方型ともなる、第1圖は面心立方格子を二つ縦に重ねたものであるが其中黒點・で記せる鐵原子のみに着目すれば體心正方型であるは明で其長軸と短軸との比 c/a は $\sqrt{2}$ である、又體心立方格子は軸比1の體心正方晶と見ることが出来る故に大洲田→麻留田の變化は次の順序に起るものと考へられる。即ち

$$\text{正方晶} \left(\frac{c}{a} = \sqrt{2} \right) \rightarrow \text{正方晶} \left(\frac{c}{a} = 1.06 \right) \rightarrow$$

$$\text{正方晶} \left(\frac{c}{a} = 1 \right)$$

或は

大洲田→ α 麻留田→ β 麻留田

従て大洲田より麻留田に變化する機構は甚だ簡單である、即ち先づ軸比 $\sqrt{2}$ の體心正方晶を長軸の方向に一様に壓縮し之に直角の方向に一様に膨脹せしめて軸比1.06となれば α 麻留田を得。更に同様に壓縮膨脹して、軸比1となれば β 麻留田を得るのである。大洲田内の炭素原子は體心に又麻留田内の炭素原子は面心になるのであるから上記の變化に際して炭素原子は鐵原子に對して其位置を變ずるに及ばないことは上圖によつて明らかである、即ち炭素原子は其儘其位置に止まるので

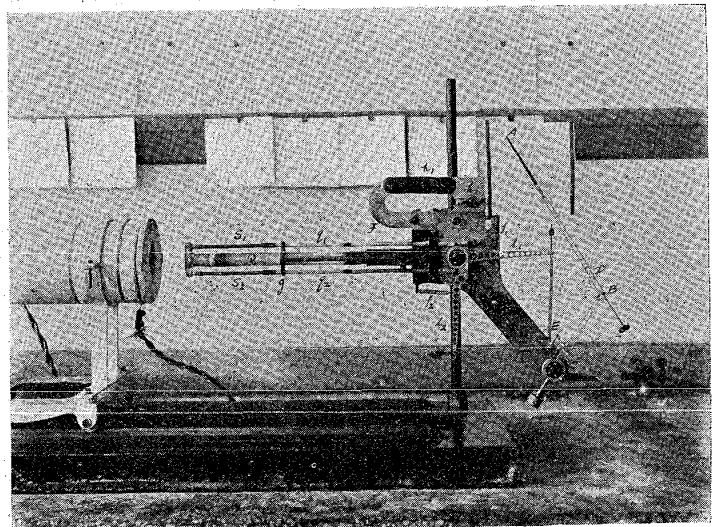
あるから大洲田より麻留田への變化は一層簡單である。之れ急冷によるもこの一見複雑なる變化が起り得る所以である。

尙焼入の際の熱的歪力は或結晶粒に對しては軸の方向に壓縮する作用をなし上記の變化を助ける、従つて大洲田→麻留田の變化はかゝる結晶を核として進行すべきである、即ち歪力が大洲田→麻留田の變化を催進する所以が了解される。

純炭素鋼に於ては急速冷却によつて大洲田→麻留田の變化を阻止することの困難なる所以、又此變化は低温にても起り得る所以は上記の事實より容易に了解される。之に反して麻留田→波來土の變化は炭素原子が鐵原子の格子内を粒の境界まで移動するを要する現象、即ち擴散を伴ふ變化であるから高温度にあらざれば進行し難い、之れ麻留田より波來土への變化が常溫で殆ど進行し難い所以である。

次に何故焼入鋼の試片の表面近くに α 麻留田を生じ内部に β 麻留田を生ずるかを説明する。鋼を焼入すれば表面は最も急速に冷却するから前記第1の變化、大洲田→ α 麻留田は大部分進行する

第 2 圖

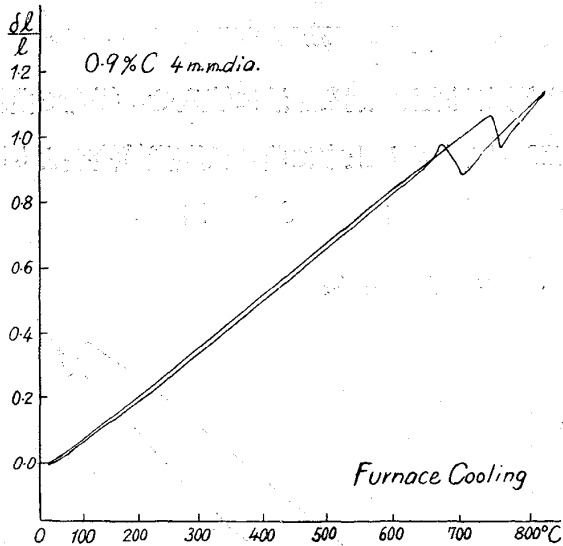


が一部は阻止される、又第2の變化、 α 麻留田 $\rightarrow\beta$ 麻留田は全然阻止さるゝから表面近くには多少の大洲田を交へる。 α 麻留田を生ずるのである、又内部は比較的緩漫に冷却するから第1及び第2の變化とも充分に進行して内部に β 麻留田を生ずるのである。

V. 焼入研究装置

最近我研究所助教授佐藤清吉氏は特殊の焼入装置によつて焼入の際に生ずる試片の長さの變化と溫度の關係を自記せしめ有益なる結果を得られた、次に装置の大要を述べるが大體は第2圖に示してある、 Q は薄き石英管で作つた撞木型の支柱で f なるデュラルミン製の臺板に取付けられてある。 g はニッケル、クロム、合金で作つた案内片で2本の棒によつて f に固定されてある。 s_1 はニッケル、クロムの如く耐熱的で變態を有せざる金屬

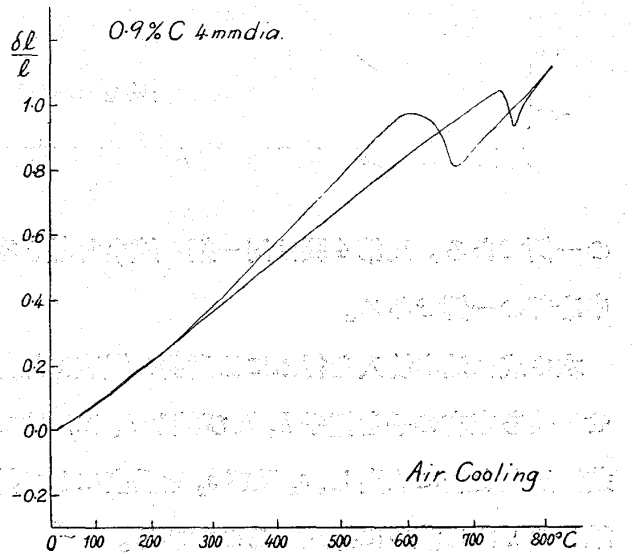
第 3 圖



棒(長さ 70mm、直徑 4mm)で其膨脹を利用して溫度を記させる、 s_2 は焼入試片で s_1 と同形、同大に作る、 s_1 、 s_2 が同時に加熱或は冷却せられる時は其膨脹收縮は夫々石英管 q_1 q_2 によりて挺子 l_1 及び l_2 に傳はり 7 倍に擴大せられる。 l_1 、 l_2 は各々

デュラルミンにて作られ出るだけ駄肉を取去り且各支點には球軸承を装置して同一の心棒に相重ねて配列してある。石英管 q_1 、 q_2 の右端は頭部を平滑に磨いた硬化鋼製の栓で閉され、 l_1 、 l_2 に設けられた同じく硬化鋼製の調節螺子の尖端に接して發條 f_1 及び f_2 の張力に依り s_1 及び s_2 を絶へず左方に押しおる。

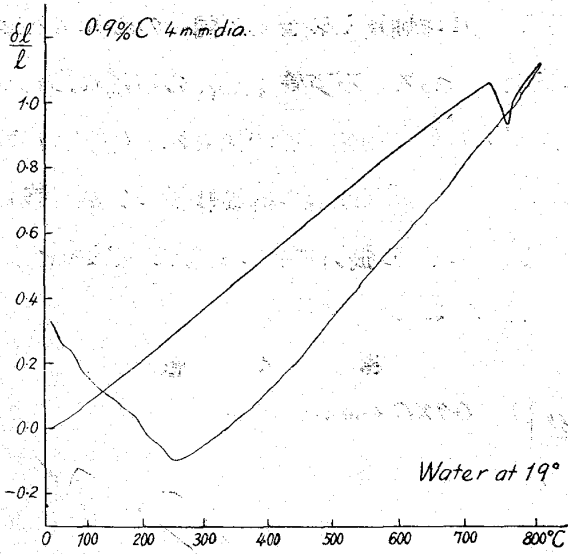
第 4 圖



A、B、C、D、E はデュラルミンで作つたパントグラフで極度にその駄肉を取去り、且つ分銅によつて充分バランスを取つてある。パントグラフの A、E、C なる 3 點は一直線上にある様に作られてあるから A 端に備へたペンの畫く圖畫は E 點の畫く圖形と相似形である。かくして s_1 の伸長は l_1 によつて其方向を變じ E 點を下方に動かし従てペン A は之と平行に 70 倍に擴大されて下方に動き溫度を紙上に記録する。又 s_2 の伸長は l_2 を經て E 點を右方に動かすに依り同じく 70 倍に擴大されてペンは紙上を右方に動く。従つて此装置によつて試片の伸長對溫度曲線は紙上に畫かる。

以上の方法によつて爐中加熱及び冷却曲線は容易に取ることを得。第3圖は 0.9% 炭素鋼に就て

第 5 圖

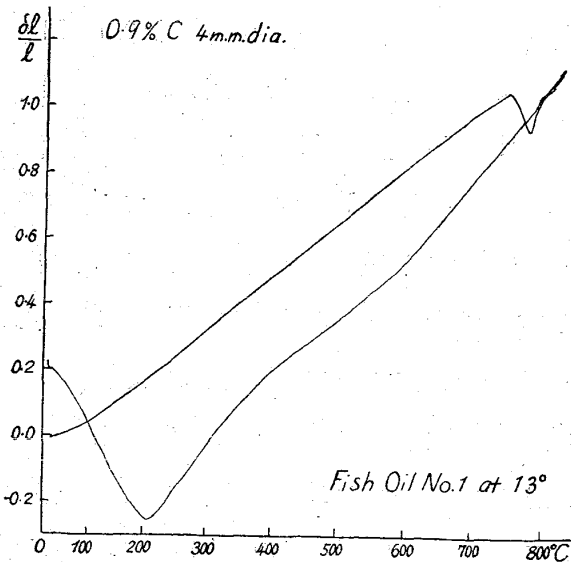


の一例である。又第4圖は同一鋼の爐中加熱と空中冷却の一例である。

水中或は油中焼入を行ふには所要の温度に加熱せる後ち左右の手を把手 h_1 及び摘み h_2 にかけて装置全體を急に取出し、 s_1 及び s_2 を垂直にして攪亂しつゝある液中に挿入するのである。

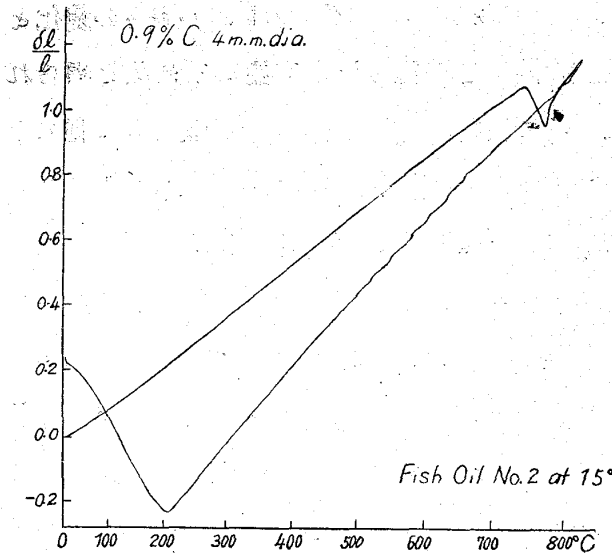
第5圖は 0.9% 鋼を水中に焼入する場合で大洲田→麻留田の變化は 270°C 附近より始まり室温に至るを示してゐる。第6圖は同一の鋼を油中に

第 6 圖



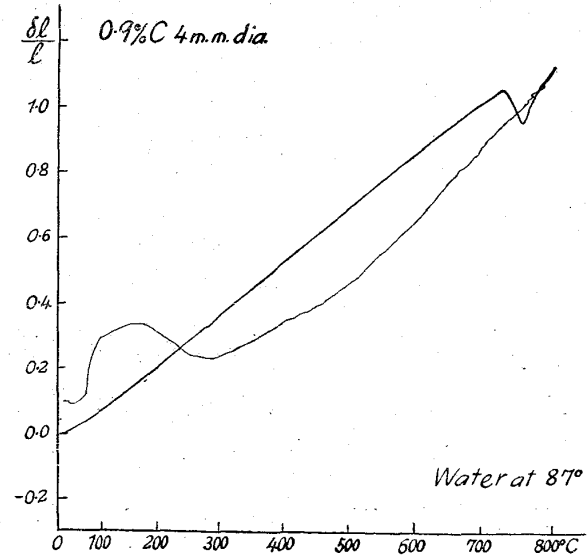
焼入する場合で 大洲田→麻留田の變化は 210°C 附近より始つて居る、又室温に於ける膨脹が水焼入の場合に比して小なるは残留大洲田量の大きなることを示して居る。この變化の始まる温度が水焼入の場合に比して却つて小なること及び残留大洲田の大きなるは共に焼入れの場合の熱的歪力が水焼入の場合よりも小なるが爲である。

第 7 圖



第7圖は同上の鋼を魚油に焼入せる場合で曲線は 550°C より少し上方に曲るは顯微鏡検査より明

第 8 圖



かなる如く多少粒狀吐粒洲の發生せるを示すものである。第8圖は87°Cの水中に焼入せる場合で曲線の500°Cより著しく上方に曲るは粒狀吐粒洲の發達の著しいのを示すものである。

以上の諸圖は何れも焼入硬化に關する前記の理論が正確なることを示すものである。

尙本文を終る前に粒狀吐粒洲の生成に關して一言する。粒狀吐粒洲は不完全の焼入の際生ずるのであるが、何故に斯様な形に表はれるかに就いては信用すべき定説がないが之に關する佐藤助教授の説は次の通りである。

鋼の含有する不純物は多く粒の境界に集り、從て

其部分の空間格子は大なる内部歪力を受ける、從て焼入の際冷却速度が充分でない爲、大洲田→麻留田の變化が600°乃至500°C間に始まるものとすれば此の變化は先づ粒の境界の歪力の大なる點に始まるべきである。然るに溫度は尙充分に高いから生ぜる麻留田は直に分解して鐵とセメントイトとに分れる。尙此溫度が丁度鐵の再結晶の溫度であるから分解と同時に地鐵の再結晶によりて麻留田の特有な形は破壊される。此の如き操作が境界の數多の點を中心として進行し四方に擴がりて粒狀吐粒洲を形成するのである。