

鐵

と

鋼

第八年第七號

大正十一年七月二十五日發行

健淬鋼の物理冶金的研究

松下徳次郎

本論文は東北帝國大學理學部に提出せる余の學位論文にして本誌に依りて公表するものなり。

本論文を分ちて三編とす。何れも健淬鋼の物理冶金的研究に屬せり。

第一編は健淬後の自發變化に關係し、是によりて健淬鋼の性質の一般を知るを得たり。

第二編は健淬中に起る鋼の變態變化の狀況を探究したるものにして是によりて健淬の進行する有様を明瞭にするを得たり。

第三編は健淬狀態比較法の一つとして健淬鋼の磁氣的硬度の適用を示すものにして本法によりて導出せられたる二三の重要な結果を説明せり。

第一編は東北帝國大學に於て本多教授の指導の下に研究し、第二編、第三編は日本特殊鋼合資會社福壽鐵鋼研究所に於て同社長工學博士渡邊三郎氏の指導の下に研究せるものなり。茲に其懇篤なる指導に對し謹んで滿腔の謝意を表す。

目次

第二編 鋼の健淬狀態に關する研究

緒論

第一章 健淬狀態自記裝置

第二章 實驗

實驗第一 各種炭素鋼の健淬曲線

實驗第二 健淬液(水)の溫度の影響

實驗第三 試料の太さの影響

實驗第四 各種の油の健淬能の比較

實驗第五 二段健淬

結論

第三編 鋼の磁氣的硬度に關する研究

緒論

第一章 鋼の健淬溫度

第二章 液の健淬效果の比較

第三章 結晶粒の發達及歪の消去

第四章 合金鋼の磁氣的硬度

結論

第一編 健淬鋼の自發變化に關する研究

緒論

健淬鋼を其儘放置すれば時日の經過と共に其の長さを變じ又熱を發生す、磁石鋼は健淬後直ちに磁化すれば時と共に磁氣の強さを減ず、故に之を防ぐには適當なる人工成熟を施すを常とす。此等の原因及び相互の關係等に關しては未だ完全なる學術的研究無し。最近 Brush 及び Hadfield は健淬後の發熱現象を研究して次の如き結果に到達せり。

健淬鋼は強大なる歪を受くるが故に、幾分不安定なる状態にあり。此の歪の弛みが發熱の原因をなし同時に緩漫なる收縮を伴ふ。此の現象は試料が室温に於て安定状態に達するまで繼續すと。然し此の發熱量は Brush の考ふるが如く健淬によりて生ぜる歪の弛みに原因すと考ふるには餘りに大なり。されば本現象の根本的性質を一層明瞭に攻究する事は實際上必要なるのみならず理論上にも亦甚だ興味ある問題なり。本研究は此等の問題を攻究せんが爲に行ひたるものにして次の各種の實驗をなしたり。

- 一 健淬鋼の室温に於ける長さの變化
- 二 健淬鋼の高溫度に於ける長さの變化
- 三 健淬鋼の高溫度に於ける電氣抵抗の變化
- 四 健淬鋼の發熱現象

試料としてはクルップ會社製炭素鋼八種をとる。實驗一、二、三に於ては長さ二十纏直徑六糸の丸棒を用ひ、實驗四に於ては長さ六纏直徑一纏の丸棒を用ひ。何れも其の一端には熱電對の融着點に入るゝに足る小孔を穿ちたり。加熱爐は磁製燃燒管にニクロム線を巻き石綿にて包みたる電氣抵抗爐にして其中央二十二纏の間は高溫度に到るまで溫度分布一様なる如く作られたり。而して溫度はルシヤテリエー氏式白金、白金ロデウム熱電對を以て之を測る。

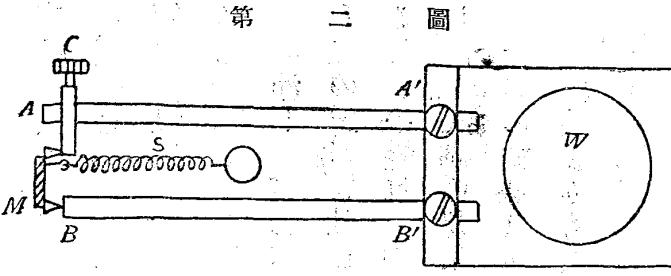
第一章 健淬鋼の常温に於ける長さの變化

健淬したる鋼の室温に於ける長さの自發變化を觀測する爲め次の如き示差裝置を採用す。BB'は健淬したる試料にしてAA'は之と同材料の燒鈍せる同形の棒なり。共に其の右端A及びBに於て金屬臺に固定せらる。Wは是を床上に固定せしむる爲の重き錘なり。Mは三脚を有する平面鏡にして其の一腳はB端に止まり他の二脚はA端に固定したる小板C上にて一垂直線上にある如く安置せらる。小さき發條sによりてMをC及びB上に固定するが故にAA'とBB'との間に長さの變化の差異あればMは垂直軸の周に回轉すべし。同量の長さの變化がAA'及びBB'に同時に起るともMは回轉することなし。故に其の回轉角をMの前方に置かれたる望遠鏡と尺度とを以て觀測すれば AA' BB' の間の相對變化を知り得べし。AA'は燒鈍せる材料なるが故に室温の變化による熱的膨脹及び收縮は起り得れども夫れ以外に長さの自發變化なかるべ

く BB' には同様の熱的膨脹收縮の外に時間と共に進行する長さの自發變化あり。而して熱的膨脹係數は健淬鋼と焼鍔鋼に於ては全く同一ならざるも其の差は極めて小にして第二次

の微小なるが故に此の観測したる相對變化は健淬鋼 BB' の長さの自發變化と見るを得べし。此の自發變化の量は室温變化の爲めに起る熱的膨脹と略同じ程度なるが故に

室温變化の甚だしき場所に於ては其の観測不正確なるを免れず。又自發變化の進行速度は其温度によりて著しく相異なるを以て室温變化は此點に於ても觀測の結果を不規則ならしむるに至る。依て本實驗は常に地下室に於て之を行へり。其晝夜の溫度變化極めて小なるが故に觀測結果は正確なるを得たり。



第一圖

實驗を行ふに當りては、先づ試料 BB' を加熱爐内にて所要の健淬溫度に熱したる上水又は油中に急冷

より油及び水に投じて急冷したる場合の(e.t)曲線なり。此油

中健淬の場合は第一圖と同様にして其量稍小なれども○・五六%の炭素を含むものまでは膨脹し其れ以上は初め膨脹して後收縮す。然るに水中健淬に於ては油中健淬の場合よりも冷却急速なるが故に健淬度著しく強く○・四四%及び○・五六%の炭素鋼に於ても既に收縮を表はす、○・七五%の炭素鋼に於

置す。空氣流の影響を避くる爲め全裝置を木箱を以て蔽ひ、M の前方に三種平方の平行平面の硝子板にて窓を作り之を通じて外部より望遠鏡にて觀測するを得。上記の取附けを終りてより約二十分間に於ては全裝置が周圍と熱平衡の状態に達するが故に是より時間と共に尺度の読みを觀測するなり。

斯くして各種炭素鋼に就き油又は水中に健淬したる後長さの自發變化を觀測したる結果は第一圖乃至第四圖に示すが如し。縱軸は試料の膨脹(+)又は收縮(-)を表はし横軸は時間を表はす。之を(e.t)曲線と云はん。第一圖は炭素含有量を異にする八種の鋼を九百度より油中に健淬したる場合の(e.t)曲線なり。曲線が互に重り合ふを避くる爲め何れも其基點を移して表はせり。此の結果より次の事實を知る、急冷によりて健淬不十分なる低炭素鋼に於ては常に長さの膨脹を觀るに反し強く健淬せらるゝ高炭素鋼に於ては其の收縮を見る。中間の炭素鋼に於ては最初に膨脹し終りに收縮に變す。膨脹は數時間に止まれども收縮は然らず著しく長時間に亘りて繼續す。

第二圖、第三圖は炭素低き三種の試料を別々にとり八百度より油及び水に投じて急冷したる場合の(e.t)曲線なり。此油中健淬の場合は第一圖と同様にして其量稍小なれども○・五六%の炭素を含むものまでは膨脅し其れ以上は初め膨脅して後收縮す。然るに水中健淬に於ては油中健淬の場合よりも冷却急速なるが故に健淬度著しく強く○・四四%及び○・五六%の炭素鋼に於ても既に收縮を表はす、○・七五%の炭素鋼に於ては其の收縮度更に大なり。此等の結果より次の結論を得

る二原因の同時に存在するに依る。若し第一の原因が第二の原因より著しく大なるときは膨脹を生じ、之に反する時は收縮を生ずべく若し又第一の原因が第二の原因より速に進行し且つ其の大さ同程度なるときは初めに膨脹を生じ後收縮に變化すること上記實驗に見るが如し。此の二原因が如何にして生するかは次章に於て説明せんとす。

第二章 健淬鋼の高溫度に於ける長さの變化

室温に於ける前記自發變化の速度が溫度高き程急速に進行する事實を認めたるにより健淬鋼を徐々に加熱して其の長さの變化を觀測したり。是に用ひたる裝置は本多教授が各種の鋼の高溫度に於ける長さの變化を測定せる際に使用せられたるものにして試料の酸化を防ぐ爲め常に真空中にて行へり。

健淬して室温に於ける前記長さの變化を見たる後其の試料を此の裝置に仕掛け、徐々に加熱し或は冷却して溫度に對する長さの變化を測定せり。第五圖及び第六圖は前記油中健淬したる八種の炭素鋼に就きての觀測の結果なり。

此等の結果より健淬鋼は四百度以下に於ては、加熱曲線が冷却曲線よりも上位にあるを知る。是れ健淬鋼が其の燒鈍状態よりも膨脹状態にあること即ち鋼がマルテンサイト組織なる場合にはパライト組織よりも小なる比重を有するものなることを示すに外ならず。又同一狀況にて健淬されたる場合には此の膨脹度は炭素含有量と共に増加し、ユーテクトイド鋼に於て極大値をとり更に高炭素鋼に於ては幾分減少するか

或は變化無きが如し。又〇・五六%以下の炭素鋼に於ては加熱曲線が三百四十度に一つの階段を有するに反し〇・七五%以上の炭素鋼の加熱曲線は四百度以下に於て二段の收縮を表す。此の百七十度及び三百四十度の階段はセメンタイトが其の固溶態より析出するに基因するものと解釋するを得。マルテンサイトはα鐵にセメンタイトが溶解したる固溶態にして四百度以上に反淬して得らるバーライトは顯微鏡的にも明かなるが如くα鐵とセメンタイトとの交互に入混りて存在する混合物なればマルテンサイトがパーライトに變する行程即ち四百度までに起る一段の收縮は固溶態よりセメンタイトの析出に基くものに外ならず。加熱に於てセメンタイトの析出遊離が此の二つの異なる溫度に於て大部分行はれ更に高溫度に於て殘部の析出が極めて緩漫に起ることは注意すべき現象なり。七百度乃至八百度の間に起る異常の收縮及び膨脹は本多教授によりて説明せられたる如くA₁及びA₃變態に伴ふ長さの可逆的變化なり。第五圖の最下部にある曲線は〇・七五%の鋼を九百度より油中健淬をなしたるものより得られたるものにして、先づ徐々に百五十五度に熱し直に冷却して室温に到らしめ次に二百五度まで加熱して冷却し最後に四百九十度まで熱して冷却したる場合の曲線なり。第一の加熱に由りて殆ど完全にマルテンサイトの收縮の第一階段をとり去り最後の加熱によりて第二階段をとり去れり。又別に同様の試験をなし百度に二時間保ちて冷却したる場合に於ても殆ど完全に第一

階段を除去するを得たり。而して是等の場合第一階段を除去したる後室温に於ける長さの變化を觀測したるに數日間に於ては自發變化の認むべきもの無し。之に反し其の硬度に於ては認め得べき差異を表はざす。

百七十度に於てマルテンサイトより析出せるセメンタイトは比較的不安定なるが故に室温に於ても徐々に析出す。此分離は温度高き程速にして二百度に於ては直ちに完了するも百度に於ては二時間要し室温に於ては數箇月乃至一二年を要す。第一圖乃至第四圖に示す曲線は此事實を長さの收縮にて表はす者なり。第四圖は室温に於ける $1\cdot11\%$ 炭素鋼の長さの變化の長時間に亘りて起る概要を示す。曲線(1)は健淬後五十時間内に七個の觀測値より得たる曲線を指數函數の法則に従ふものと假定して五百時間に延長せるものにして曲線(2)は之を更に二千時間に延長したもの、(3)は又(2)を一萬時間に延長したものなり。曲線(3)より一萬時間に起る收縮として 9×10^{-4} を得。勿論此等の數値は正確なるものにあらず、單に其の大きさの程度を示すものに過ぎざれども其の收縮量は不定セメントタイトが全部析出し終りたると起るべき全收縮量と殆ど同程度にあるが故に、或る試料を室温に放置して完全に安定なる形をとらしむる迄には健淬後少くとも數ヶ月乃至一二年を要するを知る。然れども此の變化は試料を八十度乃至百度に加熱することによりて人工的に促進せしむるを得。

例へば百度に二時間保存すれば收縮は殆んど完全に除去せ

らるべし。而して此の程度の加熱は三百四十度に於て起るべく安定なるセメントタイトの分離には何等影響すると無く且つ健淬鋼の硬度は主として後者によりて支配せらるゝが故に此の熱鍊によりては健淬條件には何等差支を生ずること無し。上記の結果は次の如く總括せらる。百七十度に於て析出せらるゝ不安定なるセメントタイトは健淬鋼の室温に於ける自発收縮の原因をなし、固溶態として比較的安定なるセメントタイトは主として其の硬度を支配す。健淬鋼を百度に二時間位加熱することにより其の硬度を減ずること無くして實用上不收縮の状態をとらしむるを得。温度が百度より低ければ低き程度の收縮をとらしむるを得。其の時間は長きを要す。次に前章に述べたる膨脹及び收縮を生ずる二原因に就て説明すべし。本多博士の説に従へば變態は單に

オーステナイト \leftrightarrow パーライト

なる單一なる變化にあらずしてオーステナイトよりパーライトに變化する途中に鋼は一旦マルテンサイトに變じ次にパーライトに變す。又逆に鋼を加熱すればパーライトはマルテンサイトを經てオーステナイトに變化すと即ち

オーステナイト \leftrightarrow マルテンサイト \leftrightarrow パーライト
なる關係あり。又實驗の結果によればオーステナイトよりマルテンサイトへの變化は膨脹を伴ひマルテンサイトよりパーライトへの變化は收縮を伴ふ即ち體積に就ては

オーステナイト \rightarrow マルテンサイト \rightarrow パーライト

なる關係あり。今鋼を高溫度より健淬する場合を考ふるにオーステナイトの大部分はマルテンサイトに變化すと雖も其の少量は常溫に於ても猶オーステナイトとして存在すべし。此のオーステナイトは常溫に於ても徐々にマルテンサイトに變化して其の體積を増す。是れ第一の原因にして鋼の膨脹を生ずる所以なり。又マルテンサイトは元來パーライトに變化すべきものなるが故に常溫に於ても徐々にパーライトに變化して其の體積を減す。是れ第二の原因にして鋼の收縮を生ずる所以なり。實際にはオーステナイトよりマルテンサイトへの變化はマルテンサイトよりパーライトへの變化よりも速に進行するが故に此の二つの原因の爲に鋼は初に膨脹を生じ最大を経て收縮に變化す。

低炭素鋼を軟に健淬する場合に於てもオーステナイトよりマルテンサイトへの變化は多少阻止せらるるが故に常溫に於けるオーステナイトよりマルテンサイトへの變化に伴ひ鋼の膨脹を生ず。然るに此の場合に於けるオーステナイトよりマルテンサイトへの變化は比較的高溫度に生ずる（第二編第二章實驗第一參照）が故にマルテンサイトは常溫に達する迄に多少反淬せらる。從て容易に變化し得るマルテンサイトは常溫に達するまでに變化し終るべきが故に常溫にて更に變化すること無く從て鋼の收縮を生ぜず。是れ軟なる健淬に於て低炭素鋼が常溫に於て單に膨脹のみ生ずる所以なり。故に低炭素鋼にても之を高溫度より水中へ強く健淬するときはオース

テナイトよりマルテンサイトへの變化は低溫度に起るが故に反淬せらることなく從つて第三圖に示せるが如く膨脹に收縮を伴ふものなり。高炭素鋼を健淬するときは膨脹收縮の原因共に存在すれども炭素量の多き爲めマルテンサイトよりパーライトへの變化も大にして收縮の效果著しく從て膨脹は之を見ること能はざるなり。

第三章 健淬鋼の高溫度に於ける電氣抵抗の變化

上記の結論によればセメンタイトが固溶態より析出する現象には健淬鋼の收縮を伴ふ。同一原因是勿論他の物理的性質例へば電氣抵抗、比熱、磁氣の強さ等にも同様の變化を起さざるべからず。高溫度に於ける健淬鋼の磁氣の強さがセメントサイトの析出と共に變化する状況に關しては既に本多教授及び理學博士石原寅次郎氏の研究ありて上記の結果と一致せり。以下本章に於て述べんとするものは健淬鋼の高溫度に於ける電氣抵抗の變化なり。

建淬鋼の電氣抵抗に就ては既に C. Benedicks, T. Simidu 及び E. D. Campbell 諸氏の研究ありて何れも電氣抵抗が健淬によりて增加することを示す。Campbell は健淬鋼を各溫度に反淬して其の抵抗の變化を觀測し、反淬溫度の高まるに應じて次第に減少するを見たり。本實驗に於ては本多教授が高溫度に於て炭素鋼の電氣傳導度を研究する爲に使用せられたる裝置を用ひたるが故に加熱及び冷却の各溫度に於ける抵抗

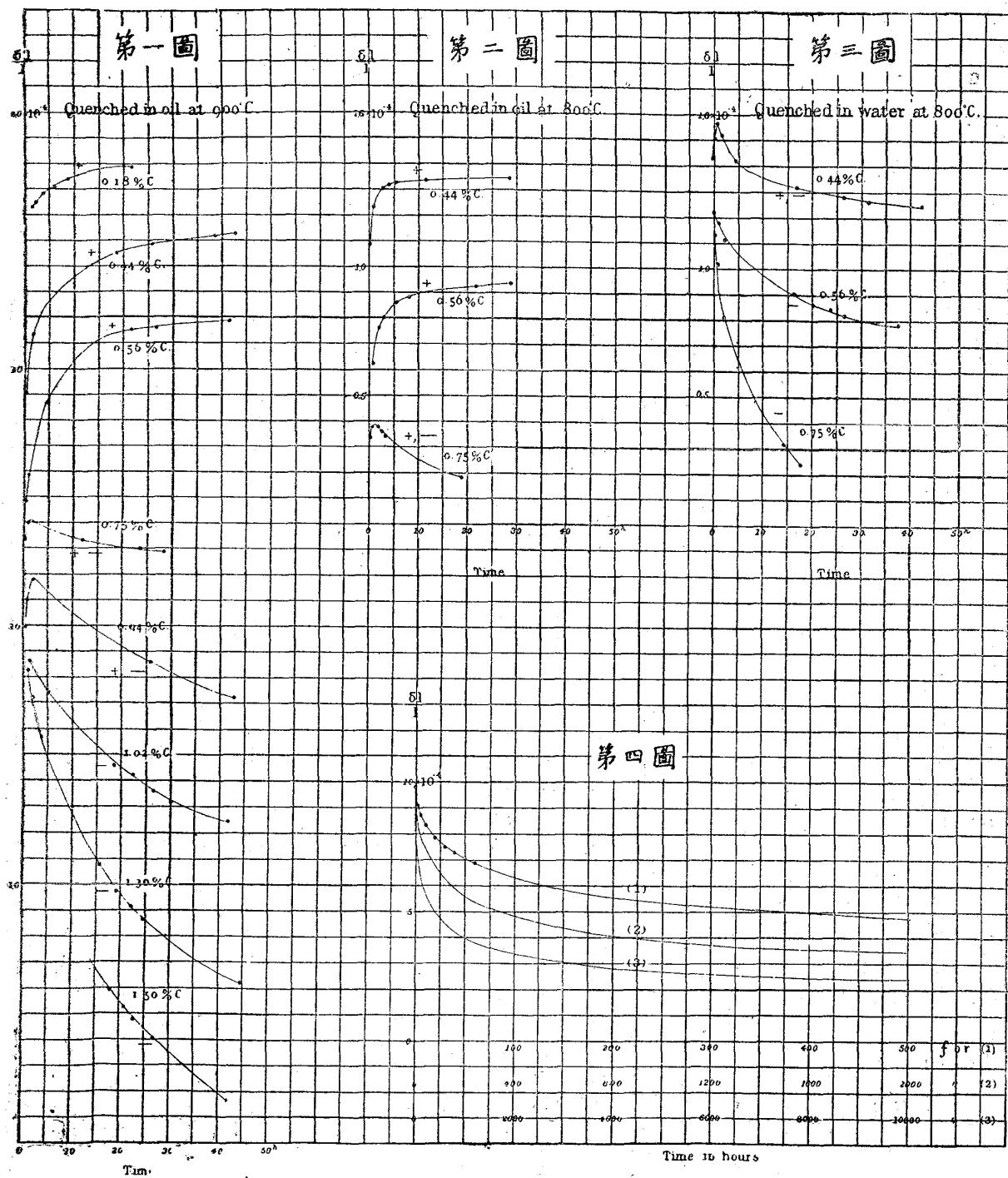
を與へ從て抵抗の異常變化の溫度をも精確に知るを得たり。

本實驗の結果は第七圖に示すが如し。縱軸は抵抗を表はし、横軸は溫度を表はす。曲線の重り合ふを避くる爲漸次下方に移して表はせり。此等の曲線より六百度以下に於て抵抗對溫度の曲線が長さの變化對溫度の曲線と甚だしく相類似するを見る。又 A_{C_1} 又は A_{r_1} 點に於ては抵抗は不連續的に増加又は減少するに反し長さは不連續的に收縮又は膨脹するを知る。本曲線の加熱曲線と冷却曲線との比較によりて健淬鋼の抵抗が著しく増加せること其の増加率は炭素含有量と共に増加することを知る。健淬によりて著しく増加したる抵抗は反淬によりて次第に減少す。此の減少は三階段に起る。第一及び第二階段は前記(2)曲線の二階段と一致すれども第三階段に相當するものは後者には現はれず。健淬によりて電氣抵抗の増加することは次の如く説明せらる。健淬鋼はマルテンサイト組織を有す。マルテンサイトは鐵にセメンタイトの溶解せる固溶態なり。一般に純金屬の電氣抵抗は其れに他の物質が固溶として溶け込むとき著しく増加すれども混合状態に於ては變化少しが故に鐵の抵抗も健淬によりて減少せざるべからず。

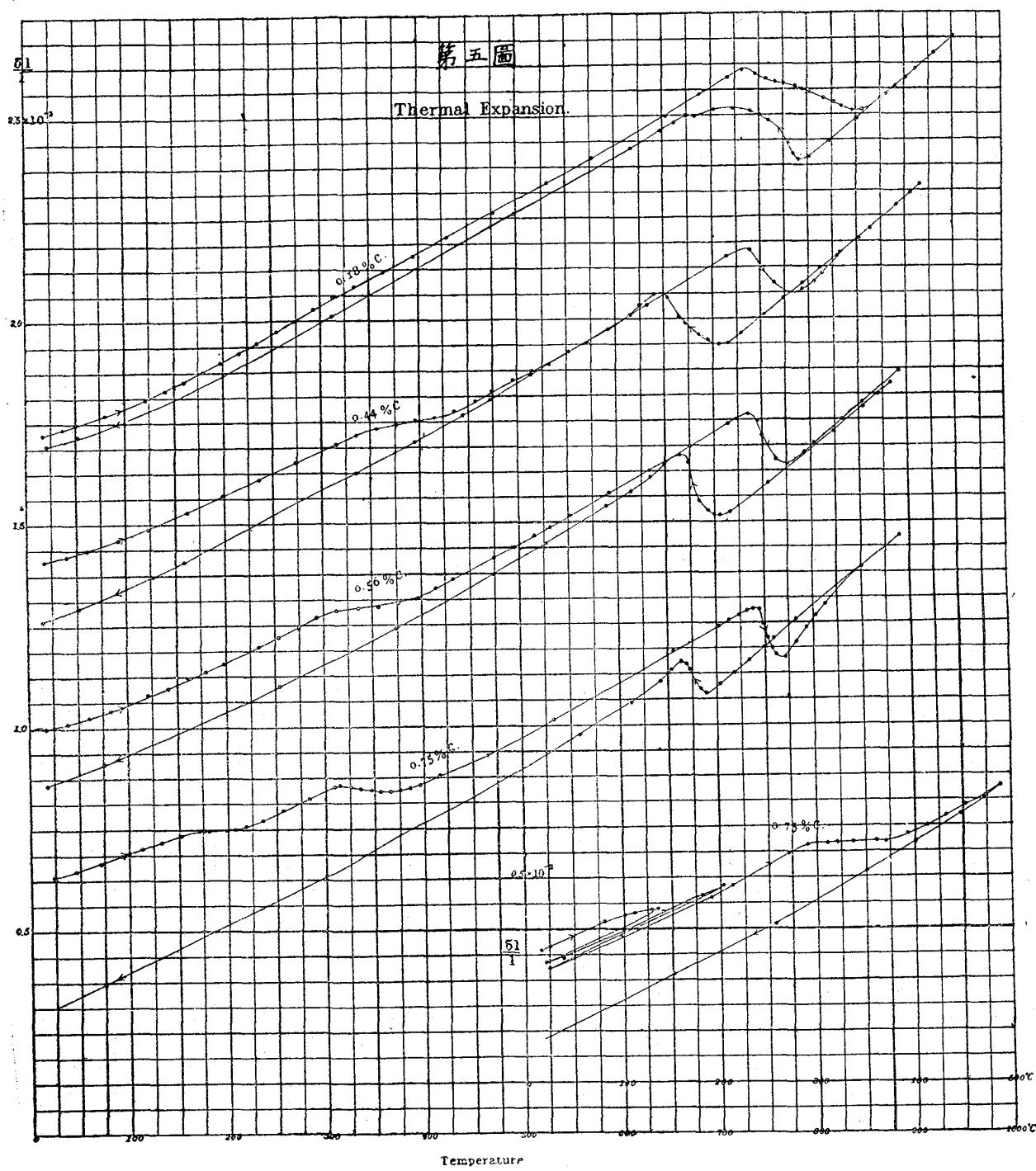
第四章 健淬鋼の發熱現象

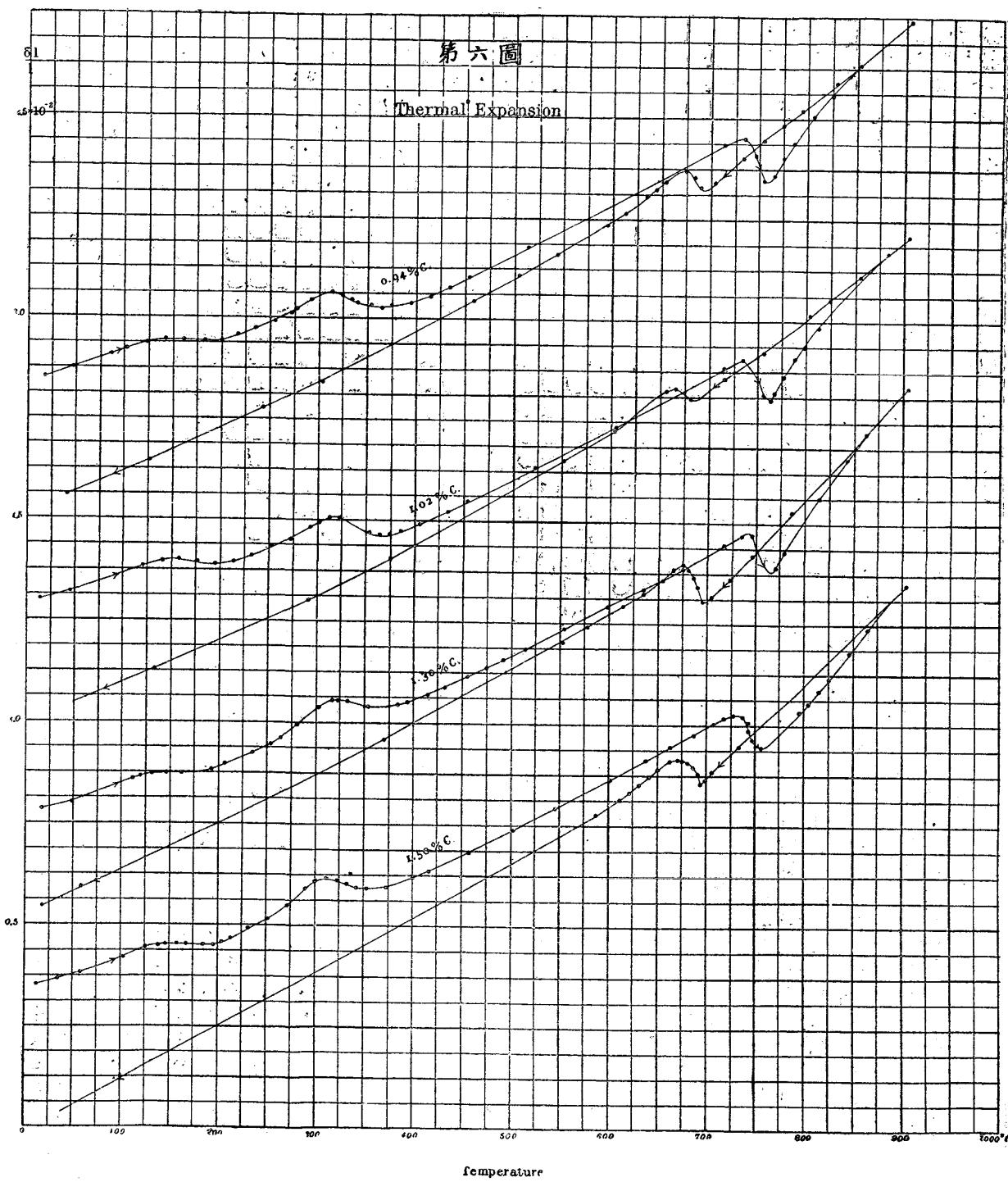
前に説明したるが如く健淬鋼の長さの變化に對して二つの相反する作用あり。第一作用(膨脹)は殘留せるオーステナイトよりマルテンサイトへの緩漫なる變化にして其際熱の發生

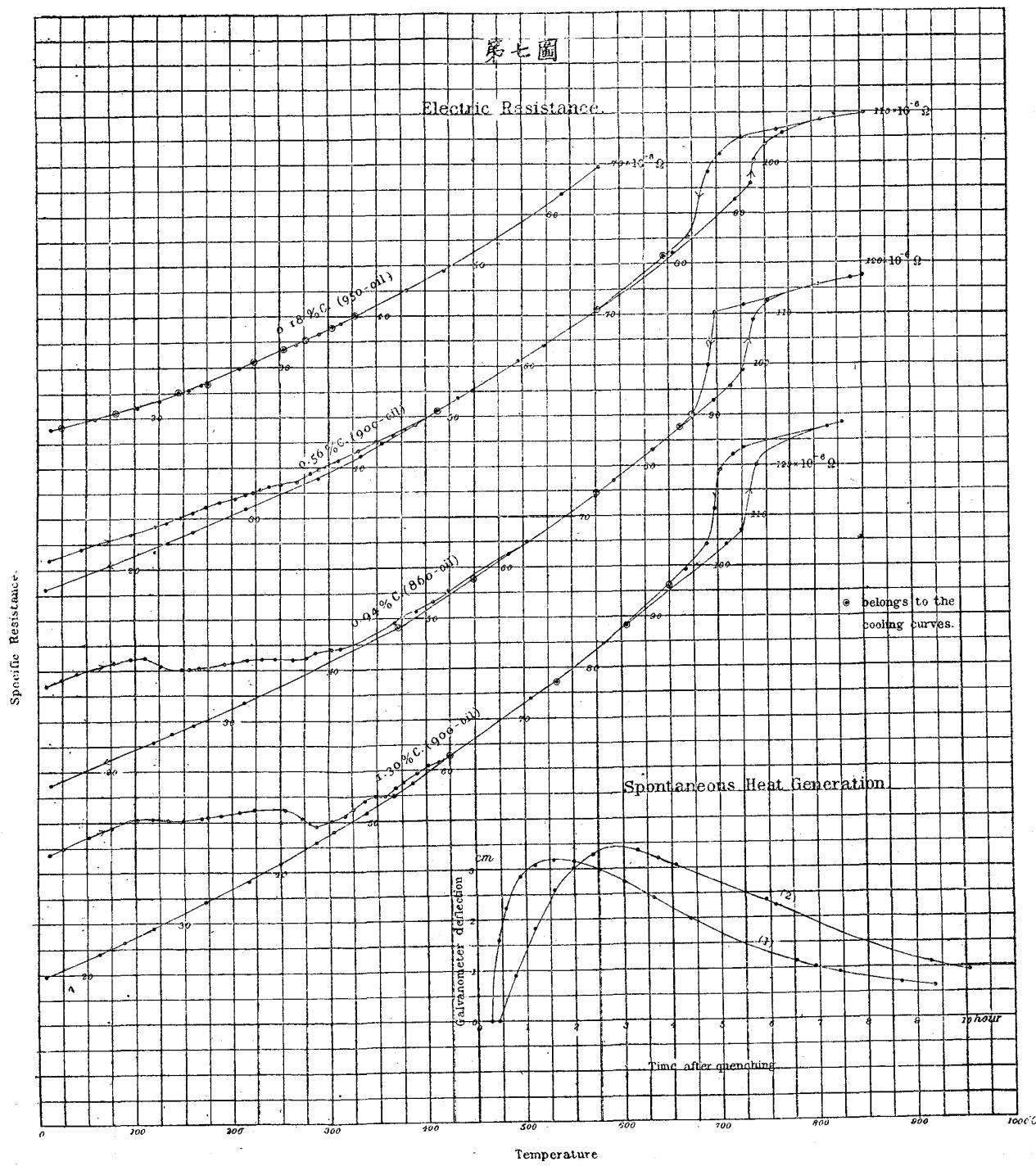
を伴はざるべからず。第二作用(收縮)はマルテンサイトよりセメントイトが析出してペーライトに變するに基くものにして是又熱を發生せざるべからず。從て此等の一つ或は二つが起る場合常に發熱現象を見るべきなり。即ち此の熱は變態に伴ふ熱なるが故に單に試料の收縮の爲め内部の仕事に歸因する熱に比しては遙に大なる値を有するは論を待たず。上記の見解の正當なるを確めんが爲に Brush 及び Hadfield の實驗を繰返したり。其の裝置は兩氏の使用したるものと殆ど同様なり。A Bなる二個の相等しきデュワー瓶を相並列して大なる第三のデュワー瓶内に入れ更に是を大なる木製箱の中央に置き其の周圍には綿をつめ込み充分に外氣溫度の影響を防ぐたる上 Aには健淬したる試料を入れ Bには燒鉋したる同大の同一の試料を入れ。示差熱電對の一接點を A の孔に入れ他接點を B の孔に入れ此等の間に起る起電力をトムソン式ガルバノメーターにて觀測す。豫め溫度差一度に對する振れば測定し置けり。本實驗に於ては銅・鐵熱電對を使用したり。第七圖下部に其の結果を示す。縱軸はガルバノメーターの振れ(六センチメータ一度)を表はすものにして發生したる熱量に比例し、横軸は健淬後の時間を表はす。曲線(1)は○・五六%の炭素鋼を九百度より石油中に健淬したる場合のものにして緩漫なる膨脹のみを起す場合に屬し、曲線(2)は○・九四%の炭素鋼を八百度より水中に健淬したる場合のものにして緩漫なる收縮を起す場合に屬す。此等兩曲線より上記二つの場



(正誤 第一圖の $\frac{\delta T}{L}$ は $\frac{SL}{L}$ の誤り、以下同之。第二圖の 1.6×10^{-4} は 1.5×10^{-4} の誤り、第三圖も同上)







合何れも熱の發生あり且つ前者に於ては最初にのみ發生甚だしく後者は長時間に亘りて繼續す。從て上記見解は實驗的に證明せられたるものにして何れも同一原因より起る結果に外ならず。

結論

本研究の結論は次の如し。

一 鋼が不十分に健淬せられたる場合には緩漫なる膨脹あ

り或は膨脹後に收縮を伴ふ。

二 鋼が硬く健淬されたるときは緩漫なる收縮あり。

三 膨脹は阻止されたるオースティナトが室温にて徐々に

マルテンサイトに變化するによる、又收縮は不安定なるセメントタイトがマルテンサイトより析出するに基く。

四 不安定なるセメントタイトの析出が完了するためには室

電氣爐の設計

一 緒言

現今製綱事業に使用せられて居る爐の種類は非常に多いが電氣爐は其の内で最も新しく最も有望なものであるから是に就て論究する事は無益な事で無いと思ふ。電氣爐の特徴や他の爐との比較等は多くの雑誌其他に於て散見する所であるから茲に略し、今回の様な條件の工場に於て鑄鋼作業を爲

荒木彬

さんとする場合の出鋼量頃當の熔鋼費を比較して見よう。

一ヶ月の出鋼量 四百噸乃至五百噸

製品 主として鑄鋼

燃料 石炭は一噸十六圓にて得られる

原料 自家用發電所を建設し一キロワット時二錢にて得られる見込

温に於ては數ヶ月乃至一二年を要すれば之を百度に加へすれば約二時間にて足る。

五 不安定なるセメントタイトの析出は機械的硬度に影響せざれども安定なるセメントタイトが固溶態に溶け込むに基因す。

六 鋼の電氣抵抗は健淬によりて著しく増加し反淬によりて減少す、此増加はセメントタイトが固溶態に溶け込むに基因す。

七 健淬鋼の緩漫なる膨脹或は收縮は常に熱の發生を伴ふ、此の熱は變態の熱にして一般に考へらるゝが如く Yielding Strain に基くものにあらず。

本多教授はマルテンサイトよりセメントタイトの析出が主として百七十度三百四十度の二段に起ることを説明するため $\alpha\beta$ なる二種のマルテンサイトの存在を認めらる、百七十度にてセメントタイトを析出するは α マルテンサイトにして三百四十度にて析出するは β マルテンサイトなり、以下此名稱を採用す。