

鐵

と

鋼 第四年第四號

大正七年四月二十五日發行

モリブデン鋼に關する二三の研究

大河内正敏  
眞島正市  
佐藤兌

一序

ニ・ケルや、クロームや、タンクスチールを含む鋼は其物理的性質に於て著しく普通鋼と異なる處があるのは周知の事實であつて、多くの場合には等の金屬は著しく鋼の堅さ及び強さを増加するが爲めに、道具鋼若しくは兵器材料として廣く一般に用ひられて居る。然るにモリブデンが鋼に及ぼす影響に就ては從來餘り多くの研究結果が發表されて居ない様に思はれる。通常知られて居る事實としては同量のタンクスチールと比較して約二倍の効果があると謂ふ事が稱へられて居る。已に實際に道具鋼の一成分として使はれて居る例はボーラーの特別高速度鋼であつて多量のタンクスチール及クロームと共に少量のモリブデンが含有されて居る。(同鋼に就ては K. Honda : The Science Reports of the Tōhoku Imperial University, Vol. VI, No. 4, P. 210 參照)

併しモリブデン鋼の注意を著しく呼び起したのは、謂ふ迄もなく今度の戰争であつて、獨逸が砲身材料としてモリブデン鋼を使用して居る爲めに砲身の廢物となる迄の發射弾數(略言して砲の命數と謂ふ)が多く、且其強度が大なる爲めに砲身重量を著しく輕減し、從つて巨砲の運搬が容易であると云ふ報道である。

開戦前に獨逸のクルップ會社でモリブデン鋼を用ひて作りたる砲身に就て各種の試験を試みた事

は確かな事實であるが、其結果は反つて普通鋼と比べて餘り面白くなつたと云ふ事の報道もある。嘗て同社は其以前に普通鋼とニッケル鋼との對照試験を爲す爲めに、此二種の材料で同種同型の砲身を作り比較研究を試みた事がある。而して其結果は同社の言明によれば砲の命數の點に於ては炭素鋼の方がニッケル鋼よりも良好であるとの結論に到着して居る。併し會社の研究は從來純科學的のものでも秘密主義を採つて餘り公表を好まない形跡があるから、果して會社の言明が正しきや否やは直に速断する事は出來ないのである。是れに反して他の方面からの報道は前述の如くモリブデン鋼は砲身材料として甚だ良好な成績を擧げて居る。例へば其最著しい例は米國經由の報告であつて(Rivista di Artiglieria e Genio, XXXIV annata Vol.I, p. 155 參照)「今回の戦争で獨逸軍の有する大口径砲身は、一般に三乃至四%のモリブデンを含有する特種鋼であつて三十糢半の砲身中には三、五乃至四%のモリブデンを含有し、其價格に於ては炭素鋼の砲身よりも二割五分高價であるが其命數(發射し得る弾數)に於ては約二十倍に達す」と云ふ事である。

モリブデン鋼が果して砲身材料として如何なる程度迄優秀なりや否やを判定するには、砲の命數に關する研究を試みなければならぬ。然るに砲の命數、語を換へて謂へば砲腔のエロージョンの問題は今日是れを實驗室内の研究にのみ委る事が出來ない。一二の試験方法があるとは謂へ、十分に完全なる試験は大規模の試験即發射試験に待たなければならない。併し其前の準備試験として、先其物理的性質を十分に究める必要がある。幸にして二三種類のモリブデン鋼を得る機會があつたので夫れに關し二三の研究を試み其結果を爰に報告するのである。

何れにしてもモリブデン鋼が砲身材料としてタンクステン或はニッケル、若しくはニッケル、クローム鋼より著しく優良なりや否やは、一つには其價格にも關連した問題であるが、本邦の如きニッケルを産しない國ではニッケルに代る可き材料を見出さなければ必要に迫られて居る。而もモリブデン

に比較的富んで居る我國では其利用法は單に兵器材料に限らず、何れの方面に於ても研究せられなければならぬと考へる。終りに述べたい事は本實驗に際し、試験材料を供給せられたる八幡製鐵所及日本製鋼所等に對し深き感謝の意を表する者である。

## 二 材 料

本實驗に使用したる材料は、凡てインゴットから是を丸棒に鍛鍊したもの更に適宜の太さに削り仕上げたのである。唯特種の場合に於ては、材料を焼入れし、若しくは焼き鈍まして其影響を調べたのである。何んとなれば是等の作業は其溫度に依りて著しく鋼の物理的性質に變化を及ぼすから、試験の順序としては、普通の方法で鍛鍊された物を先其儘で削り仕上げて試験片とし夫れによつて第一に材料の一般の性質を見定めて置いて、然る後に復雜なる焼入れ及焼き鈍ましの影響を試験するのである。然らざれば徒らに試験の結果が復雜になつて適當の結論に到着する事が困難と考へたからである。

モリブデン鋼のみの物理的性質を探究しては不十分であるから比較の爲めに、炭素鋼ニッケル鋼、ニッケル、モリブデン鋼及タンゲステン鋼等に就ても同様の試験を試みた。然しながら遺憾の事には是等の材料が凡て豊富でない爲めに何れの試験も皆残りなく試みる事が出來ず、唯一二のものに止めた場合もある。是等諸材料の分析表は次に示す通りであつて凡て此結果は材料を供給された工場の分析室で行はれた結果である。

第一表

番號	材 料 名 稱	符 號	C	Si	Mn	P	S	Mo	W	Ni
一	モリブデン鋼	M <sub>1</sub>	○・三五	○・一〇	○・二九	○・三七〇	○・〇〇九	一〇五	○	trace
二 同		M <sub>2</sub>	○・六三	○・五八	○・二三	○・〇〇九	○・〇二四	○・六九	○	○

三 同	M <sub>8</sub>	○・七〇	○・五九	○・一八	trace	○・〇〇六	○・四〇	○	○	○	○
四 同	M <sub>4</sub>	○・六四	○・六九	○・一一	○・〇一三	○・〇一一	○・三一	○	○	○	○
五 同	M <sub>5</sub>	○・五五	○・一五	○・七一	○・〇三六	○・〇〇三	一・五八	○	○	○	○
六 同	M <sub>6</sub>	○・六一	○・三二	○・七八	○・〇三四	○・〇〇三	一・六〇	○	○	○	○
七 同	M <sub>7</sub>	○・六四	○・三六	○・三九	○・〇一七	○・〇一四	一・一四	○	○	○	○
八 ニッケル、モリブデン鋼	NM <sub>1</sub>	○・五四	○・一〇	○・六三	○・〇一七	trace	三・六五	○	○	○	○
ニッケル鋼	N <sub>1</sub>	○・五九	○・一二	○・六六	○・〇一七	○・〇〇三	○	○	○	○	○
一〇 タングス、デン鋼	T <sub>1</sub>	○・六二	○・四一	○・三九	○・〇一三	○・〇〇四	○	○	○	○	○
一一 同	T <sub>2</sub>	○・三七	○・三一	○・一八	○・〇一〇	○・〇一〇	一・八一	○	○	○	○
一二 同	T <sub>3</sub>	○・四三	○・四一	○・一五	○・〇一〇	○・〇一一	一・七七	○	○	○	○
一三 同	T <sub>4</sub>	○・七二	○・三三	○・一八	○・〇一〇	○・〇一三	一・一〇四	○	○	○	○
一四 同	T <sub>5</sub>	○・六四	○・三八	○・一七	○・〇一八	○・〇一二	一・一〇	○	○	○	○
一五 同	T <sub>6</sub>	○・五三	○・四三	○・一三	○・〇一九	○・〇一〇	一・九四	○	○	○	○
一六 炭素鋼	C <sub>1</sub>	○・三一	○	○	○	○	○	○	○	○	○

モリブデン鋼は凡てMで表はしニッケル、モリブデンはNM、ニッケル鋼をN、タングステン鋼をT、炭素鋼をCで表はす事にした。以下本文中若しくは附圖中には凡て是等の符號を用ふる。表中M<sub>1</sub>からM<sub>6</sub>迄の材料は攝氏八百度で一時間焼き鉗ました後で静かに冷却したものである。

### 三 弾性率

弾性率の測定は通常の試験器械によらずに僅少の荷重によりて精密に測定した。材料を直徑1.22cm.に削り長さを45cm.に取つた。其直徑の測定は長さに沿ふて一糸毎に百分の一耗迄測定したのであ

る。此棒の兩端を山形の支臺で支持し、其中央に荷重して其中央が下降する距離  $\epsilon$  を測定して次の式から彈性率 E を計算する。

$$E = \frac{G\ell^3}{12\pi d^4\phi}$$

但し G は中央に荷重した重量、 $\ell$  は兩支點間の距離 d は棒の直徑である。測定の結果は次の第二表に示す通りである。

第二表

材 料	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$	$M_7$	$NM_1$	$T_1$	$C_1$
M. E. kg/mm <sup>2</sup>	111100	111050	111000	111550	111750	111500	111400	111350	111300	111200

#### 四 剛性率

剛性率の測定は嘗て著者が鋼の彈性界限以上の振れの強さに就て實驗した時に使用したのと同じ裝置を用ひた。(M. Ôkôchi and M. Majima Torsional Strength of Steel Bars beyond the Elastic Limit. The Journal of the Society of Mechanical Engineers. Tokyo, Vol. XIX, No. 45, 1916 參照)即試験杆を垂直に立て上端を固定し、下端に直徑の大なる車を固定し、其車の軸を垂直軸承にて支へ、更に細い張り金を車に捲き附け滑車によりて夫れを垂直に導き來り其端に荷重する。勿論此際滑車の摩擦等は夫々の荷重によりて一々異なる故に夫れを一々測定して修正をする必要がある。且杆の直徑を極めて精確に仕上げ、又測定する必要がある。而して試験杆の振れた角度を測定するには試験杆上に適宜の距離を置いて上下二個の鏡を固定し、其各の鏡の迴轉角を二組の望遠鏡と尺度で測定するのである。然る時は上下二個の鏡の相互の迴轉角  $\phi$  から次の如くして剛性率 G を計算する事が出来る。

$$G = \frac{2IC}{\pi d^4\phi}$$

但し式中  $I$  は上下鏡の中心間の距離、C は振れを興へた偶力、d は試験杆の直徑、 $\phi$  は振れの角度で

ある。材料の不足の爲め唯僅かに二種の材料に就てのみ測定した。而して同時に次の式からブッシュンの常數 $\sigma$ を計算し其結果は第三表の通りである。

$$\sigma = \frac{E}{2G} - 1$$

材 料	M <sub>1</sub>	NM <sub>1</sub>
G kg/mm <sup>2</sup>	八六七〇	八三三〇
三 $\sigma$	○・二七五	○・一八一

表  $\frac{1}{\sigma}$ 

三・六四 三・五六

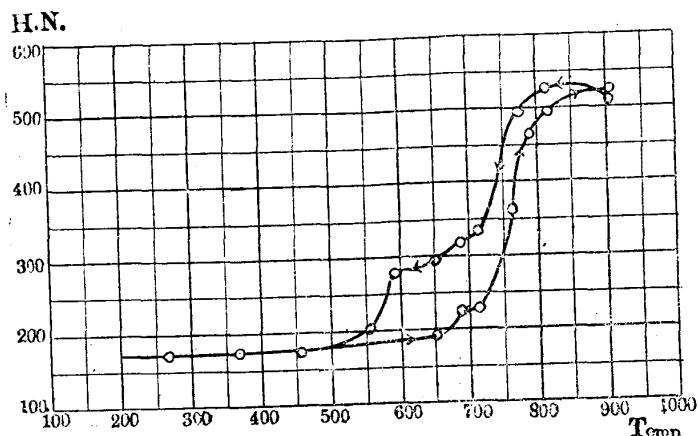
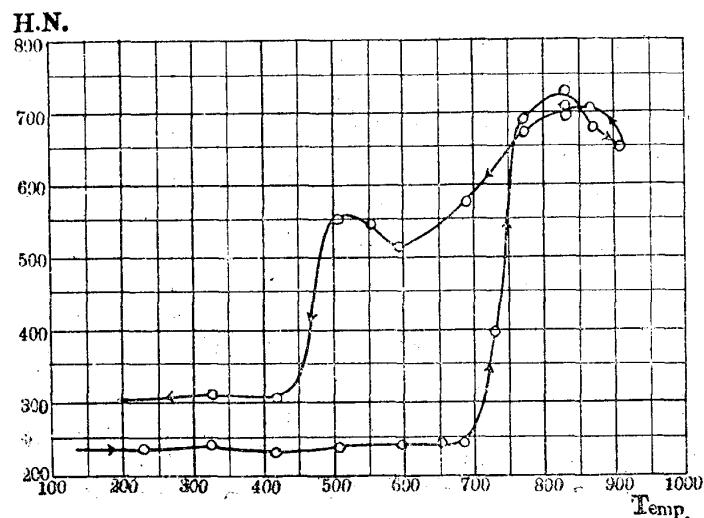
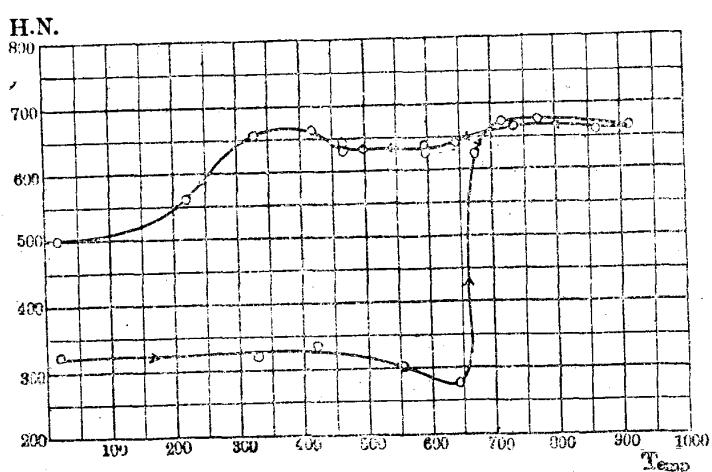
## 五 硬度

焼き入れ温度による硬度の變化を測定する爲めに、ブリネル硬度計を用ひた。併し刃物等の硬度或は切れ味を試験する點に於ては、ブリネル硬度計は不十分であると謂はれて居るが、焼きの入る程度を判定する上に於ては遺憾なしと信ずるのである。今 H をブリネルの硬度數とし、鋼球の直徑を D 精とし、其鋼球を材料面に押し込んだ壓力を P 精とすれば材料面に捺印された圓形の孔の直徑 d 精との關係は次の式で現はされる。

$$H = \frac{\pi D \left( \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}} \right)}{P}$$

試験片の大さは大約直徑 2cm. 高 7mm. の圓柱に作り其表面を最後に水砥石を用ひて磨き上げたのである。而して先づ始めに試験片 加熱せざる前の硬度を測定し、次ぎに種々の溫度に於て焼き入れをなし別々に其硬度を測定したのであるから、同一材料とは謂へ其試験片の取材場處は一様でない。實験には D が 1cm. 若しくは 7,5mm. のもの、壓力 P は 2000 kg ~ 2500 kg を用ひ此壓力を加へ置く時間は三十秒である。

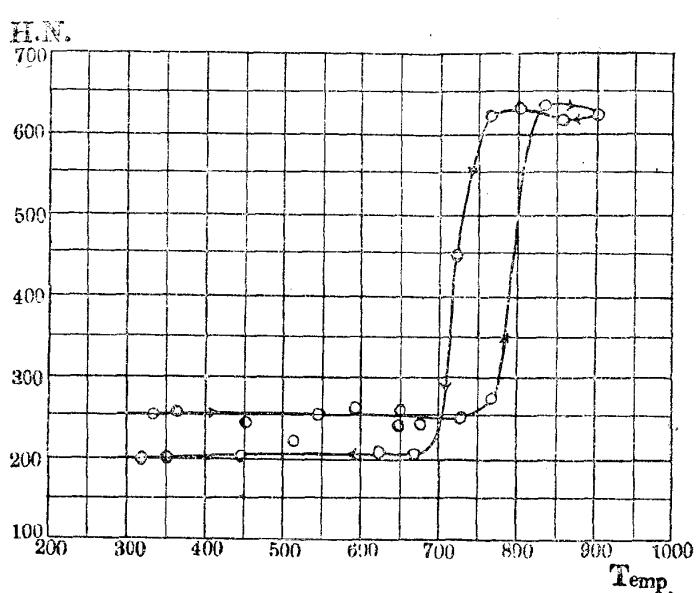
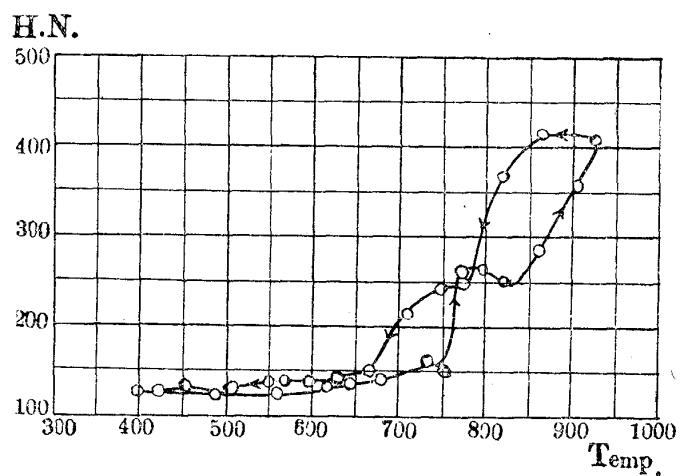
一般に材料の焼き入れは、加熱溫度を精確に測定する事と、材料が一様なる溫度に加熱さるゝ事と

Fig. 1. M<sub>1</sub>Fig. 2. M<sub>6</sub>Fig. 3. NM<sub>1</sub>

が必要である。加熱用には電気抵抗爐を用ひ、温度の測定にはプラチナ及プラチナ、ロヂュムの細線をサルモカッブルとし試験片に接して共に爐中に挿入し、所要の温度に達した後十分間其の温度に保つて材料の温度に不同的の無い様にし、然る後爐の直下に置かれた水槽中の氷氷中に落下せしめるのである。此際の加熱温度は第一の試験片に對しては室内温度次ぎの試験片は百度、其次ぎか二百度と云ふ風に漸々に高温度を撰び遂に變態温度に達し、更に夫れを超えて九百度内外に迄及んだ。次には試験片を必ず一度九百度以上に加熱し十分間放置し、更に電気爐の電流を弱めて爐の温度を漸々に下降せしめ、所要の温度迄下降したる時又十分間其温度を不變に保つ様電流を加減して材料に焼を入れる。此くして次ぎ々の試験片を逐次一層低ひ温度で焼き入れをするのである。其結果は第一乃至第五圖に示す通りで、更に是を越へてより低い温度で焼き入れをするのである。

ある(眞島正市—溫度に對する硬度と磁性のヒステレシス、工業雑誌第六百二號大正六年參照)

以上の結果を通覽すると一般に六百度以下で焼き入れを試みても、ブリネル硬度には殆全く影響がないのであるが七百度附近の溫度からは急に硬度が増す事が明かになつて各材料に對する焼き入れ溫度を精確に定める事が出来る。而してモリブデンの爲めに鋼の硬度が増大する事が認められる。

Fig. 4. T<sub>2</sub>Fig. 5. C<sub>1</sub>

然るに一度加熱した材料を漸々冷却して來た場合には、比較的低い焼き入れ溫度を以て所要の硬度を得られるのであつて、特にニッケル、モリブデン鋼に於ては加熱の時と冷却の時とで焼き入れ溫度は四百七十度の差異が出來る。即此結果ではモリブデンがニッケルと共に存在して居ると硬度のヒステレシスが大きくなる。而して何れの材料にありても以上の如く硬度のヒステレシスがあると云ふ一事は實用上大なる便利が伴ふのである。何となれば通常材料或は工具に焼き入れを爲す場合には

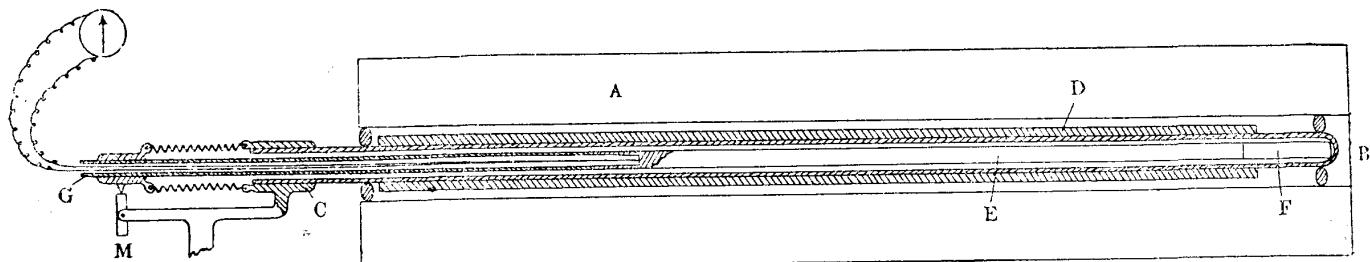


Fig. 6.

冷却される表面と、内部の高熱の部分との間には、初めの瞬時に於ては大なる温度差がある爲めに、非常なる温度内力が起り、或場合には此内力が材料の破断力以上に達し、其一部に割れ若しくは破壊が起るのである。然るに焼き入れ温度が低い場合には、温度内力も亦従つて小さいから、以上の様な恐れが渺いのである。故に吾人が若し此硬度のヒステレシスを利用するならば、完全に焼入れの目的を達して、而も割れの出來る恐れを渺くする事が出來るのである。(急速冷の場合に温度内力が實際如何に大なるかは M. Okôchi Ueber die Wärme-spannung im Geschüttrohre. Proceed. of the Tokyo Mathematico-Physical Soc., 2nd Ser., Vol. VIII, No. 18, 參照)

## 六 溫度に對する膨脹

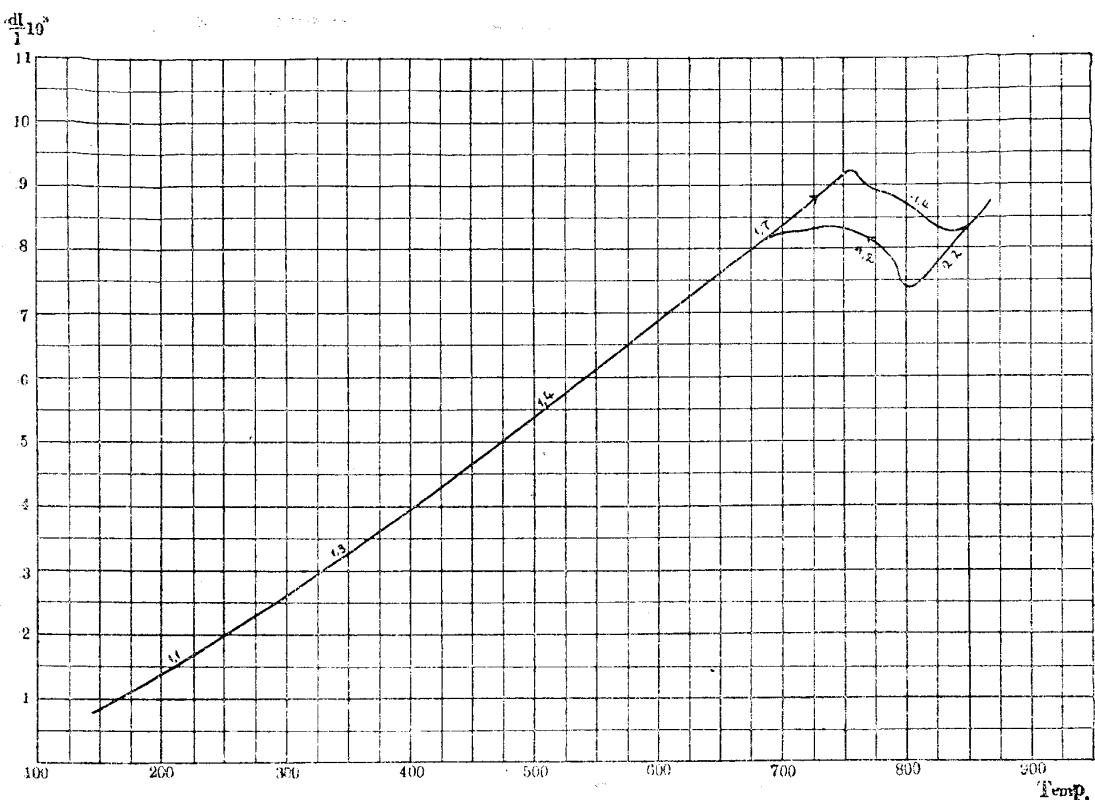
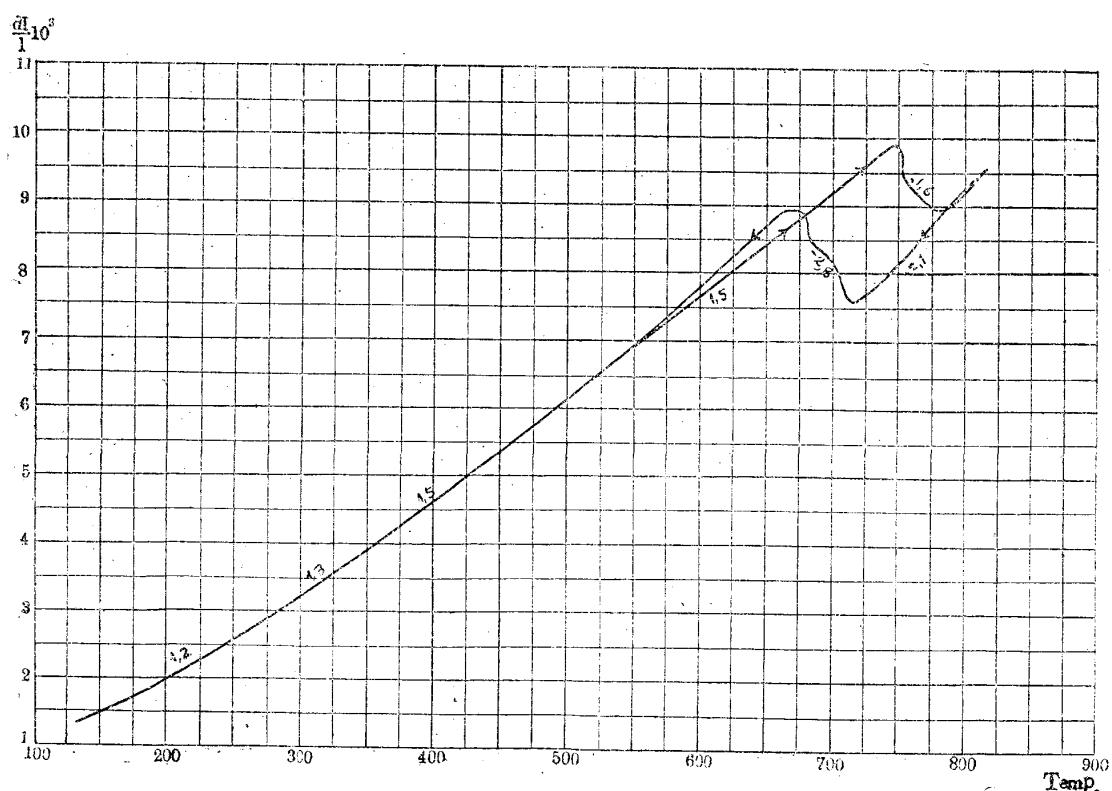
通常温度に於ける熱膨脹の測定は、普通の方法に従つて先材料を直徑 1cm. 内外、長さを 40cm. 内外の大さに削り、是を中空圓筒内に入れ、其中に蒸気を通じて、材料全部を一様に百度近くの温度に加熱し、其時の膨脹をカセットメーターを用ひて測定した。其結果は第四表に示す通りである。

第四表

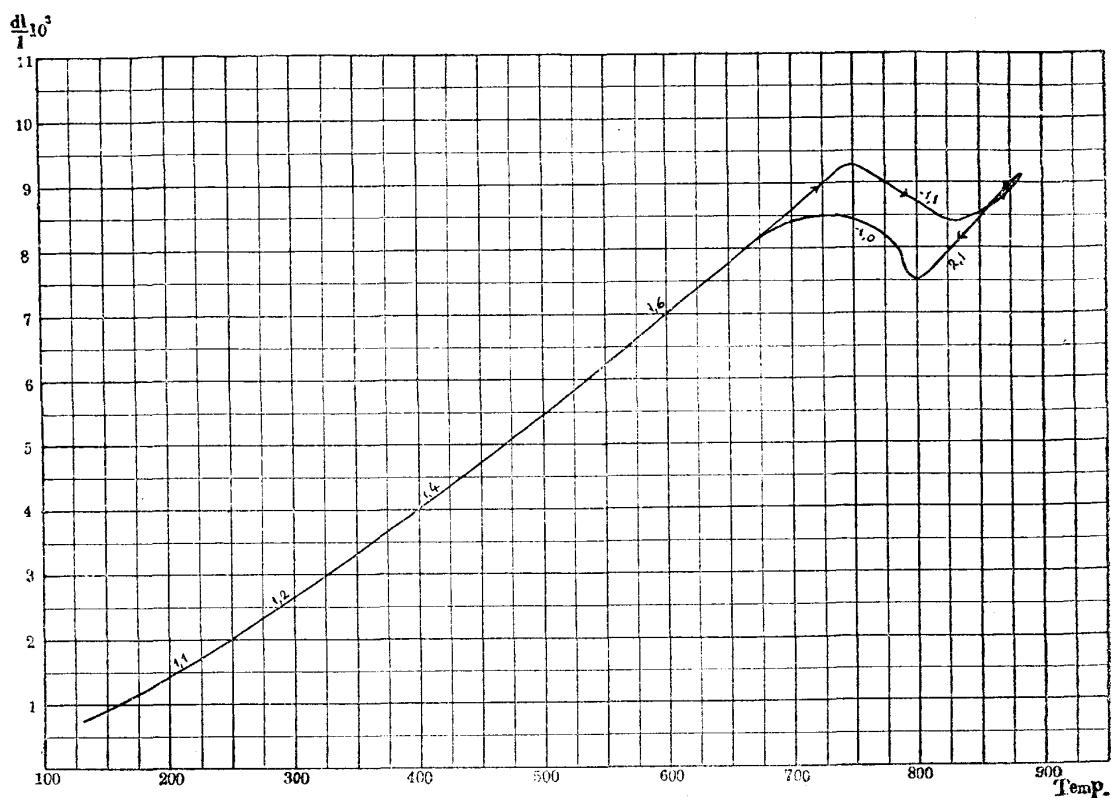
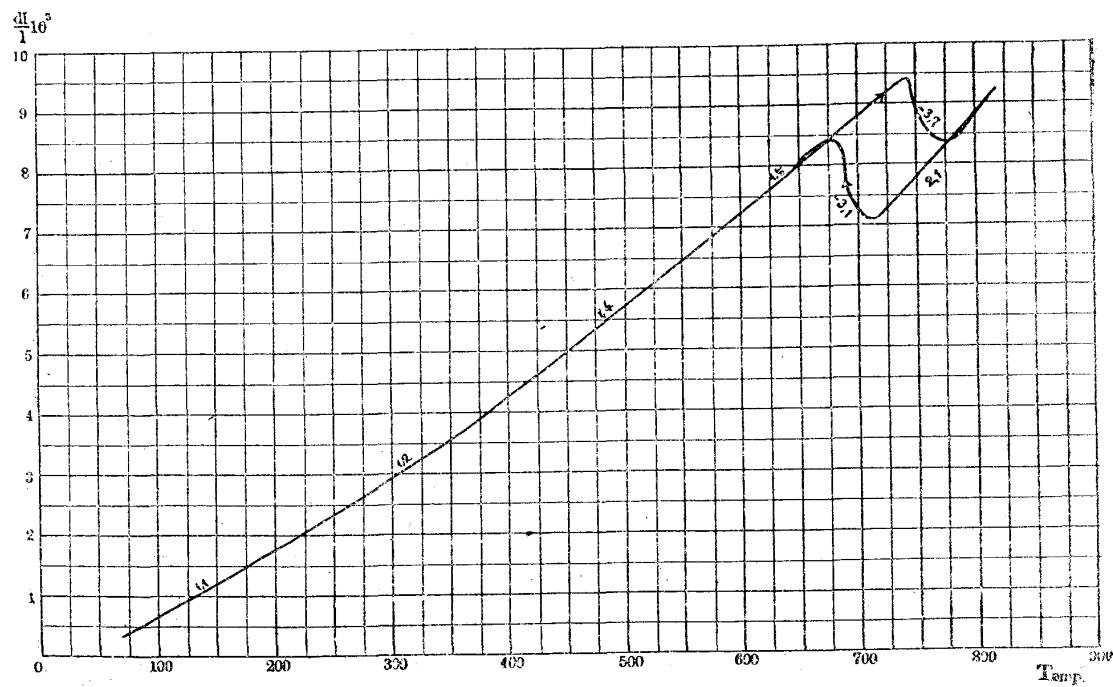
材 料	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$	$M_7$	$NM_1$	$N_1$	$T_1$	$C_1$
熱膨脹係數	$1.1 \times 10^{-5}$	$1.111$	$1.17$	$1.18$	$1.18$	$1.19$	$1.19$	$1.19$	$1.19$	$1.18$	$1.18$

高溫度に於ける熱膨脹に關しては、鋼の磁性に於けるが如き現象のある事が、已に G. Neelézex-S. Chevalier 及本多教授によりて明に述べて居る。(Chevallard—Contribution à l'Etude des Aciers au Nickel, Rev. de Metallurgie, 11, 1914, p. 841. Kôtarô

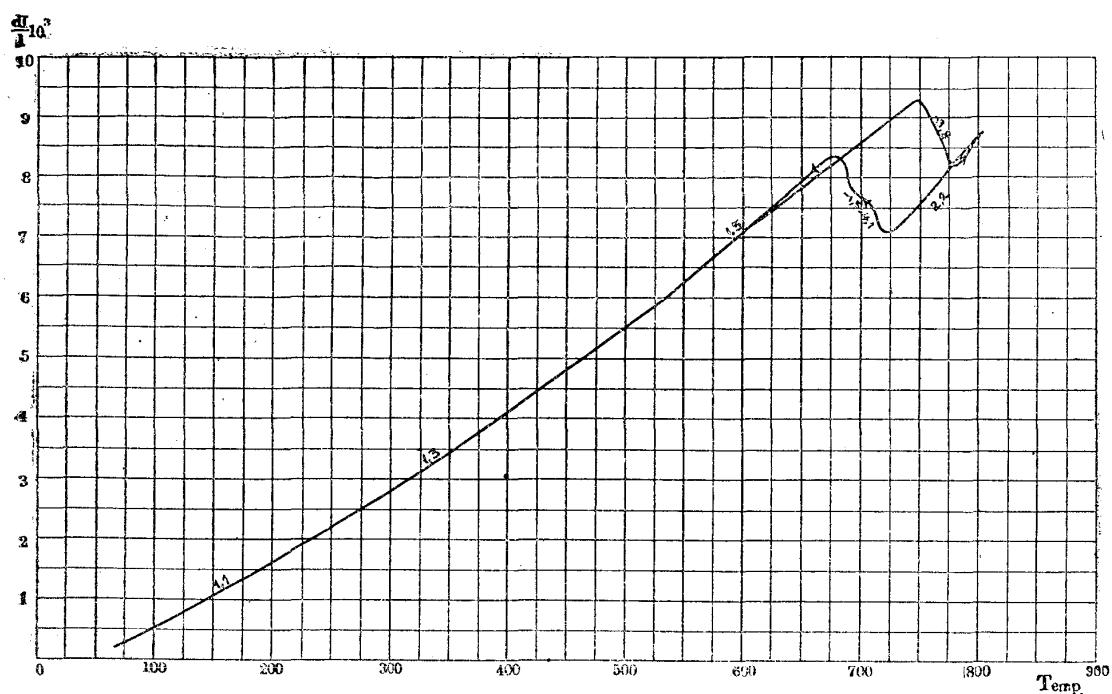
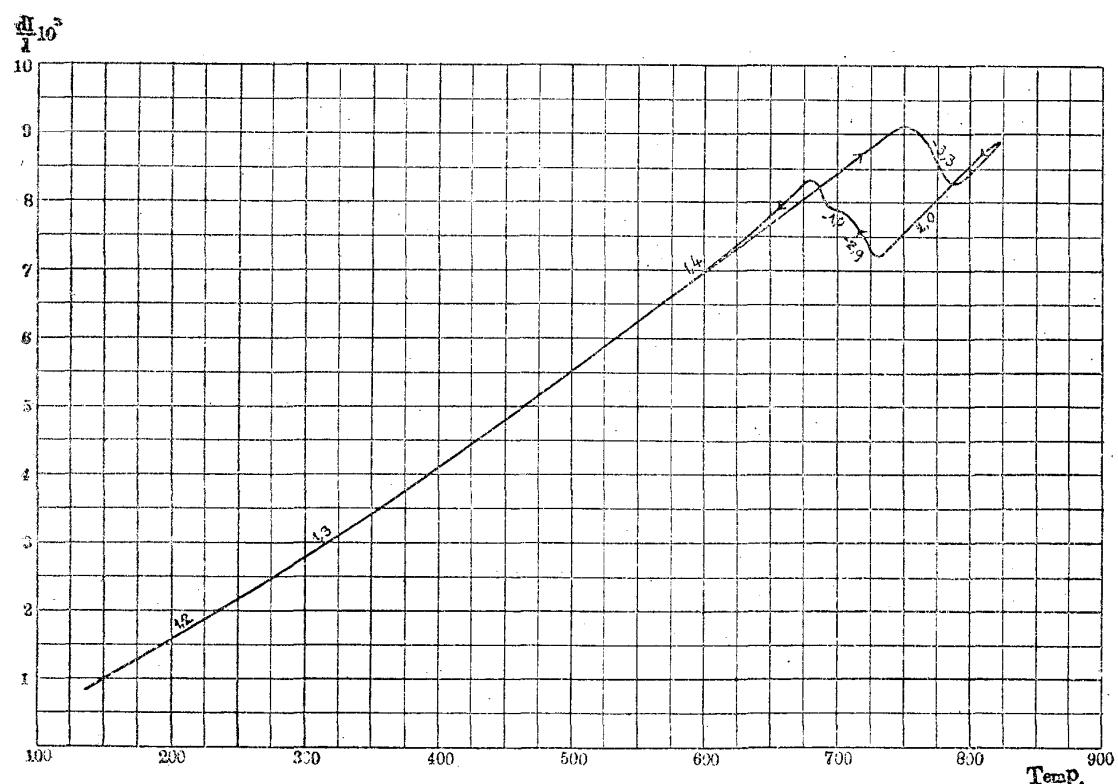
10 Honda-On the Thermal Expansion of Different Kinds of Steel at High Temperatures. Science Rep. of Tôhoku Imp Univ., Vol. VI. No. 4. p. 203. (參照)本實驗に於ては材料の高溫度に於ける熱膨脹の現象と同時に九百度に於

Fig. 7.  $M_1$ Fig. 8.  $M_2$

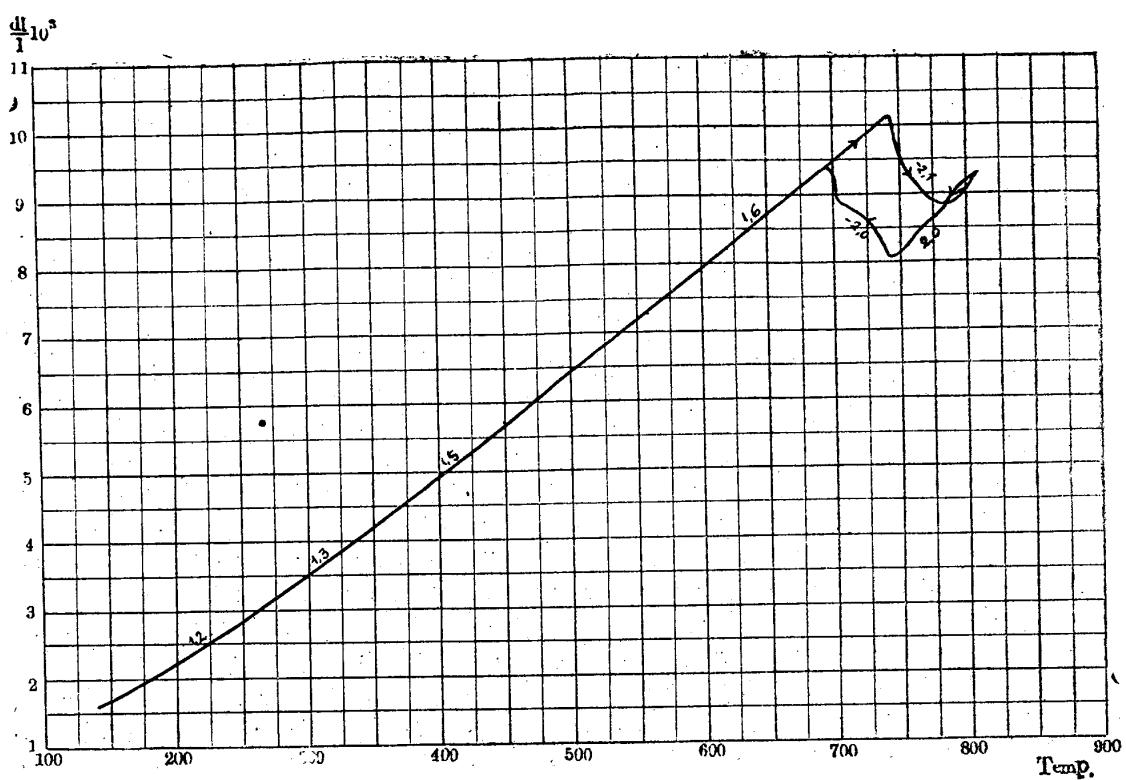
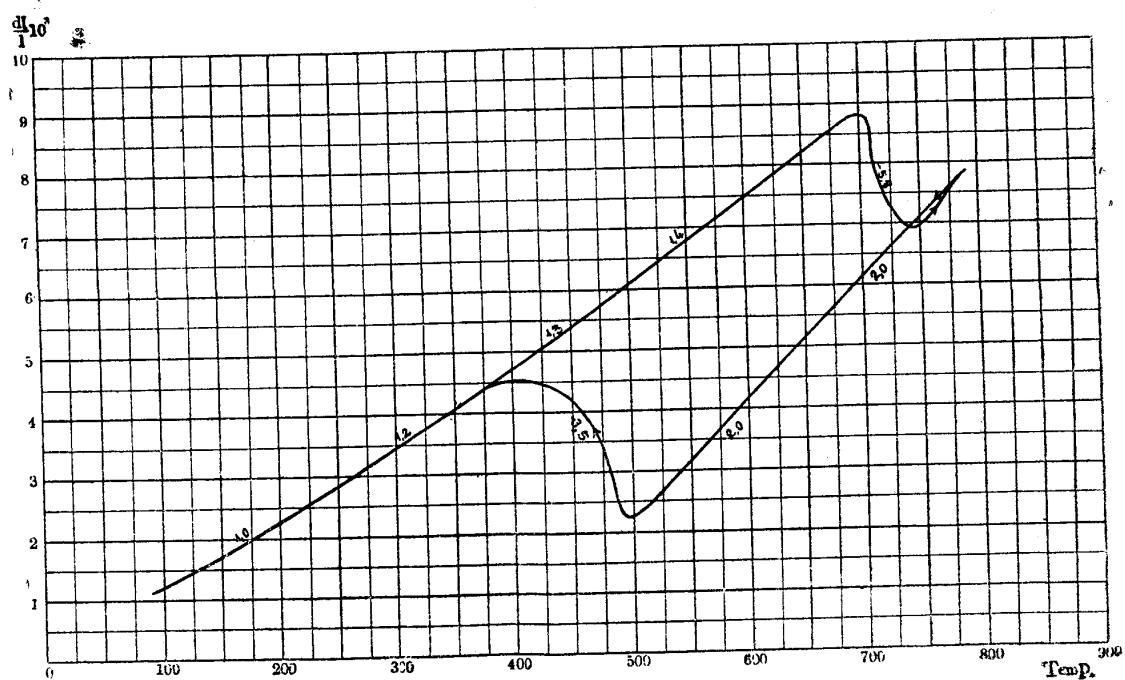
て水中に焼き入れされた材料の熱膨脹に就て膨脹の模様を測定したのである。其装置はシユヴナー  
ル氏の方法を稍變形したる第六圖に示すが如きものである。即 A は電氣抵抗爐で其中に一端 B に於

Fig. 9.  $M_3$ Fig. 10.  $M_4$

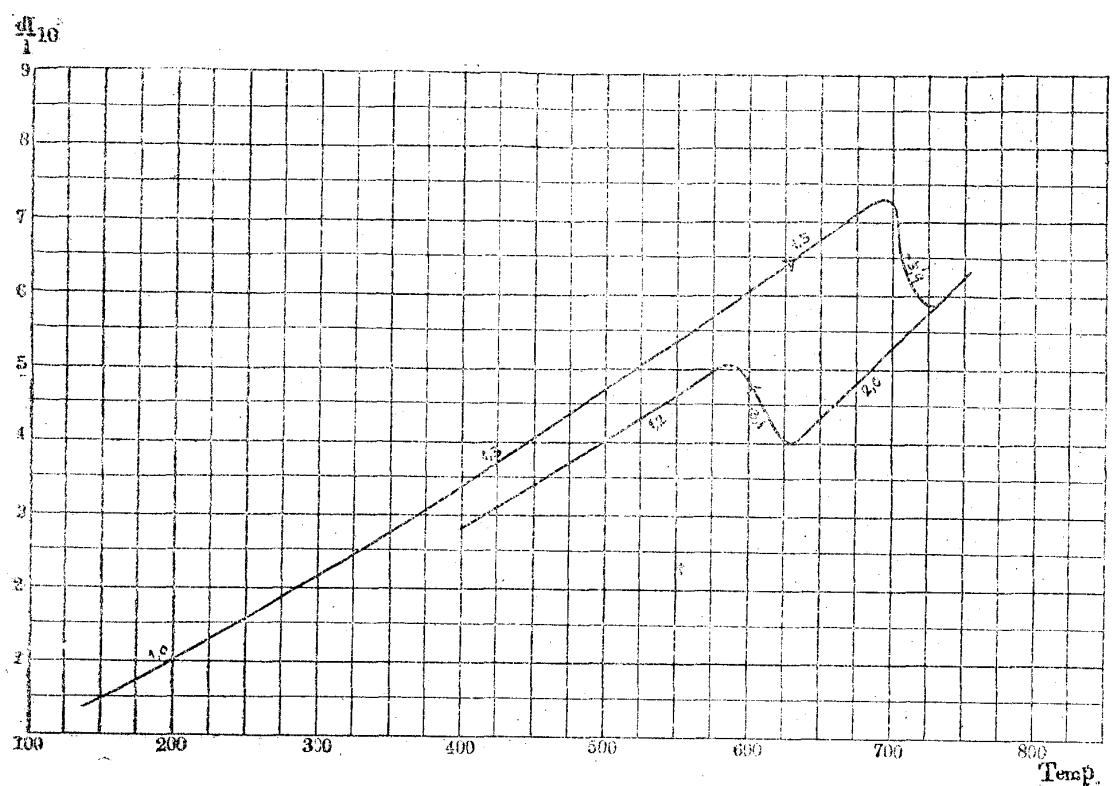
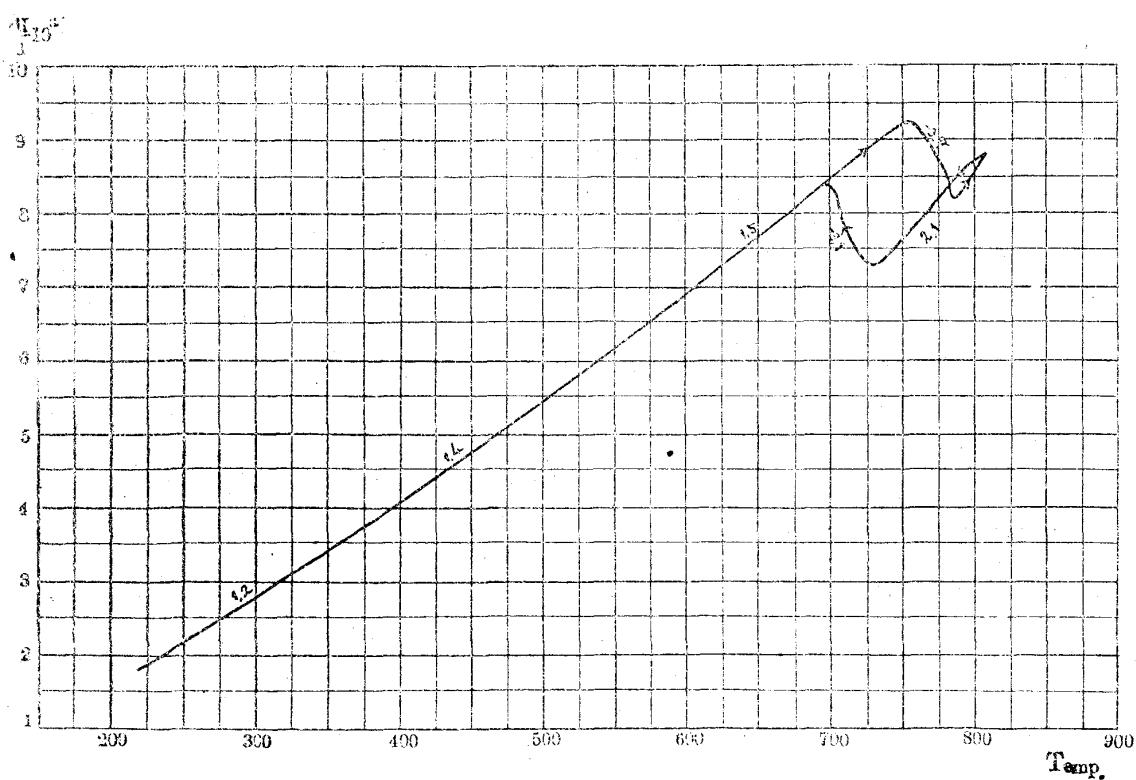
て封ぜられて居るシリカ管を挿入し、其他端は C で全く固定されて居る。而して爐内の溫度が一様になる様にシリカ管の外部に銅管 D を蓋せる。試験片 E は其長さを 15cm に取り、一端は小シリカ管 F で

Fig. 11. M<sub>5</sub>Fig. 12. M<sub>6</sub>

固定され、他端は細い孔が軸方向に穿たれ、検熱用のサルモカップルが挿入される様にする。而して同時にシリカ管Gが此サルモカップルを蓋ひつ、試験片に接して居る。而して此シリカ管は一端に取り附

Fig. 13.  $M_7$ Fig. 14.  $NM_1$

けられた機械によりて固定部に常に引かれて居るから絶へず試験片を押して居るのである。故に加熱された試験片が膨脹すれば此シリカ管Gを押し出す事になり、其爲めに鏡Mが水平軸の周囲に廻

Fig. 15.  $N_1$ Fig. 16.  $T_1$

轉するのである。而して其廻轉した角度は望遠鏡と尺度で讀む事が出來るのである。此方法によりて觀測した結果、材料が溫度の上昇と共に膨脹する有様は圖の様な曲線で表される。

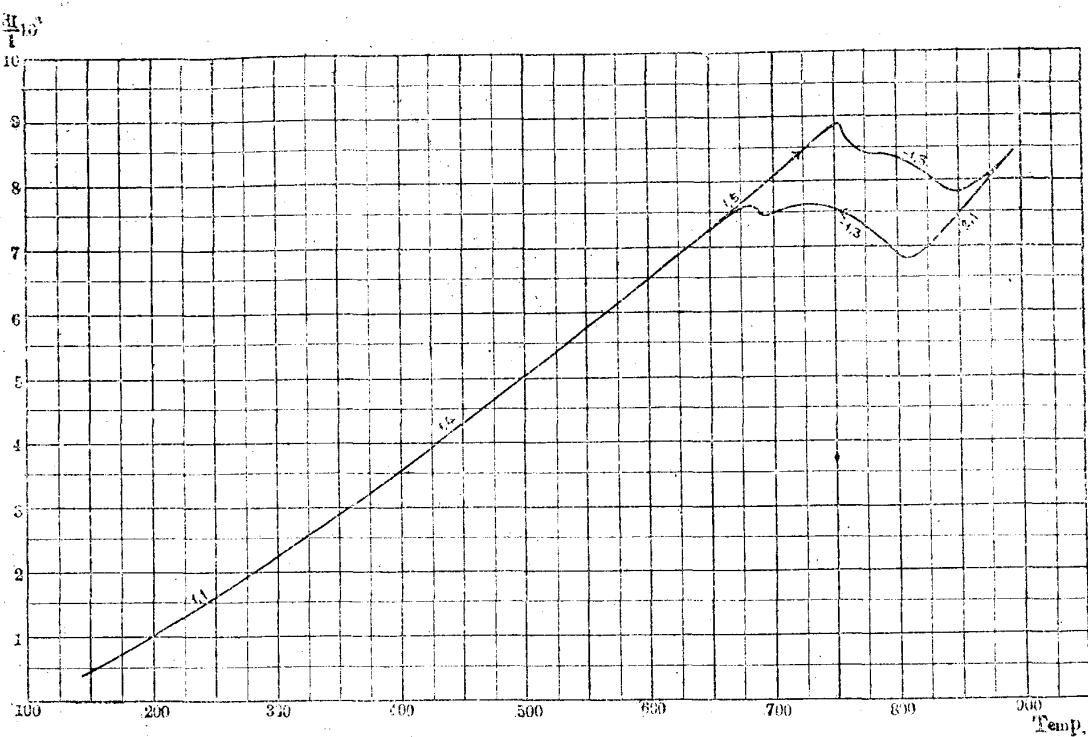
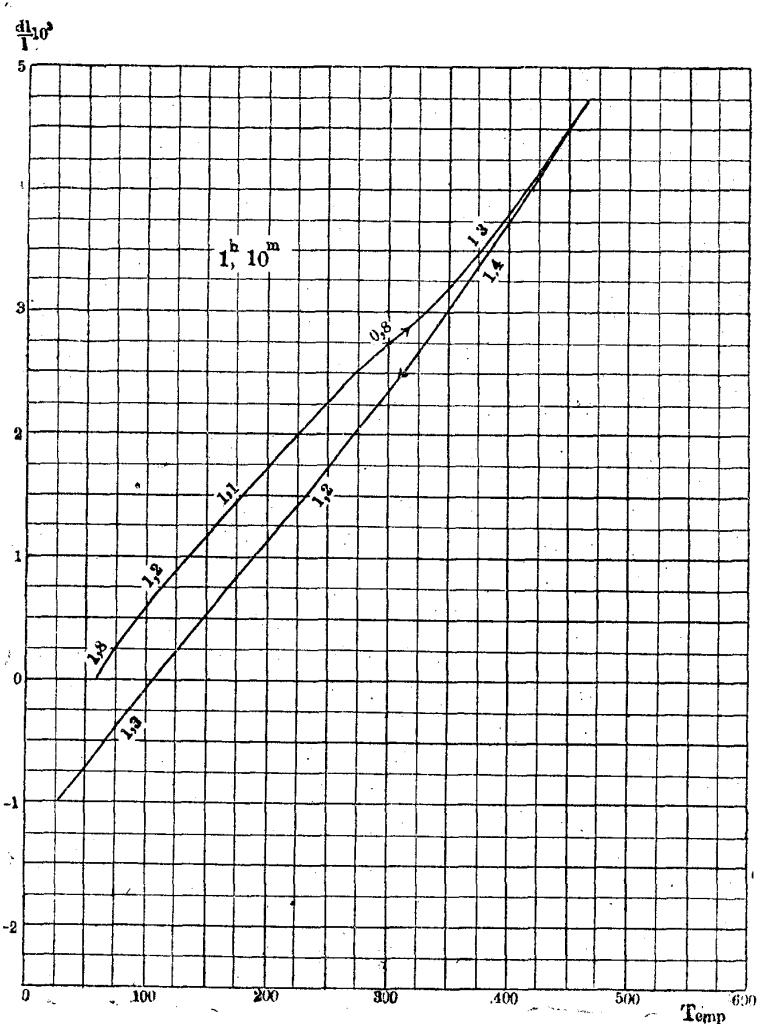


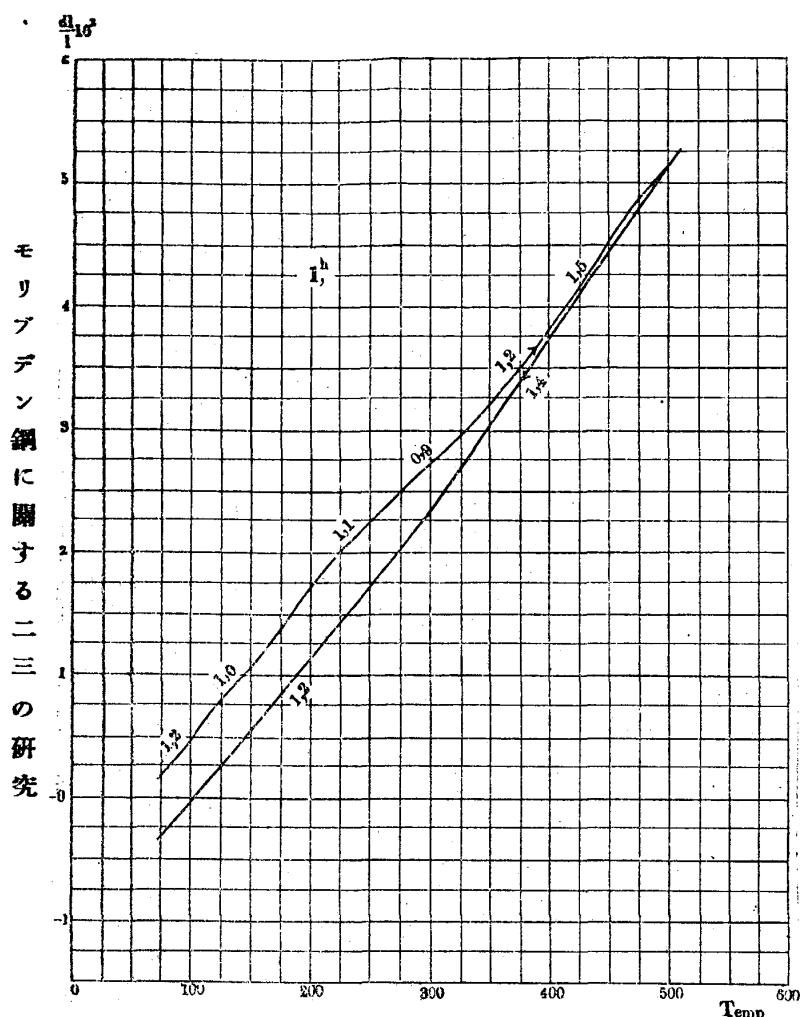
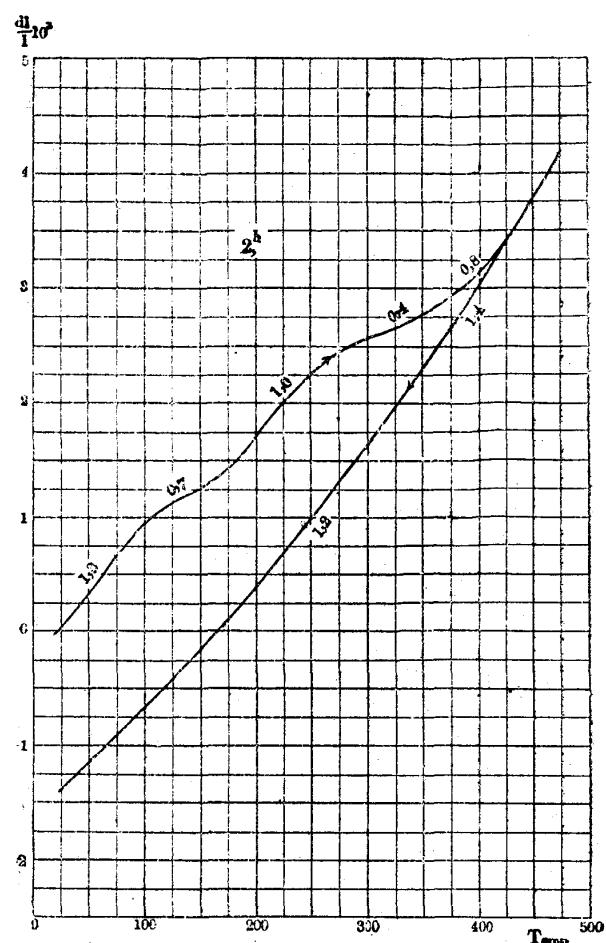
Fig. 17.  $C_1$

第七乃至第十七圖に於て曲線に沿ふて記入された數字に、 $10^{-5}$  を乗じたものが膨脹係數であつて、モリブデン鋼、タンクステン鋼及炭素鋼にありては七百五十度附近迄は殆溫度の上昇に直接比例して膨脹するが七百五十度内外の溫度で變態を起し、急に收縮を始めて七八十度乃至八百三十度位迄は其狀態を持続し、 $\gamma$  狀態に移れば更に膨脹を始める。但し此時は一般に膨脹係數が大きい。即  $\alpha$  狀態に於ける係數は一般に  $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.7 \times 10^{-5}$  の間であるが  $\gamma$  狀態にありては  $2.0 \times 10^{-5} \sim 2.2 \times 10^{-5}$  である。而して  $\gamma$  狀態になつてから漸々に冷却せしめると、加熱の際に  $\gamma$  になつた溫度よりも必ず低い溫度迄其狀態を持続する。即ヒステレスの現象が認められる。此くて  $\alpha$  狀態に戻る時に又著しく膨脹するが、此際先きに收縮した時の係數よりも一般に少い率で伸びるのである。併し  $\gamma$  狀態の熱膨脹係數が大なる結果として此際の延伸する量は先きの收縮した長さよりも必ず大なる長さ丈け延伸する。

モリブデンが鋼の熱膨脹に對し何程の影響があるかは確實なる斷定を爲し得ないが、ニッケルとモリブデンが兩者同時に鋼中に存在する時は其影響が著しく窺はれる。第十四圖のニッケル、モリブデン鋼はヒステレスが特に著しく、先きの焼き入れの場合の硬度の變化と同様な現象を認める事が出来たのである。又ニッケルのみ存在した場合には第十五圖に示す如く  $\gamma$  から  $\alpha$  に變つても元の長さに戻らない收縮がある。是は數回操り返した丈けでは何時も收縮が伴つて來るのである。

Fig. 18.  $M_1$ 

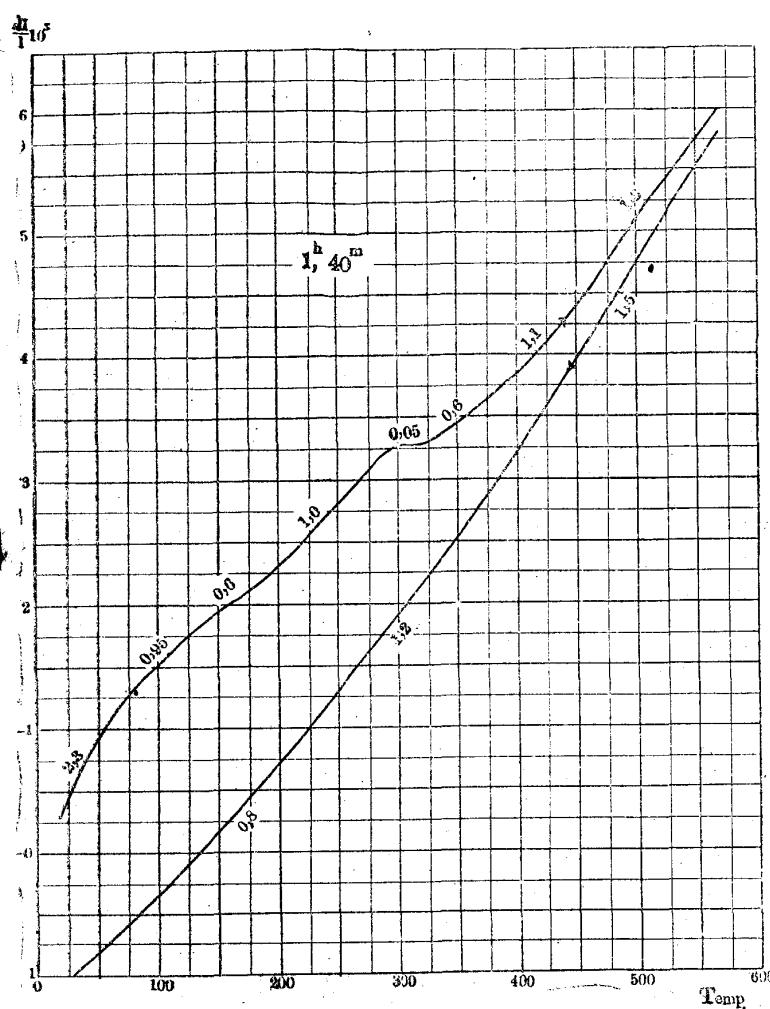
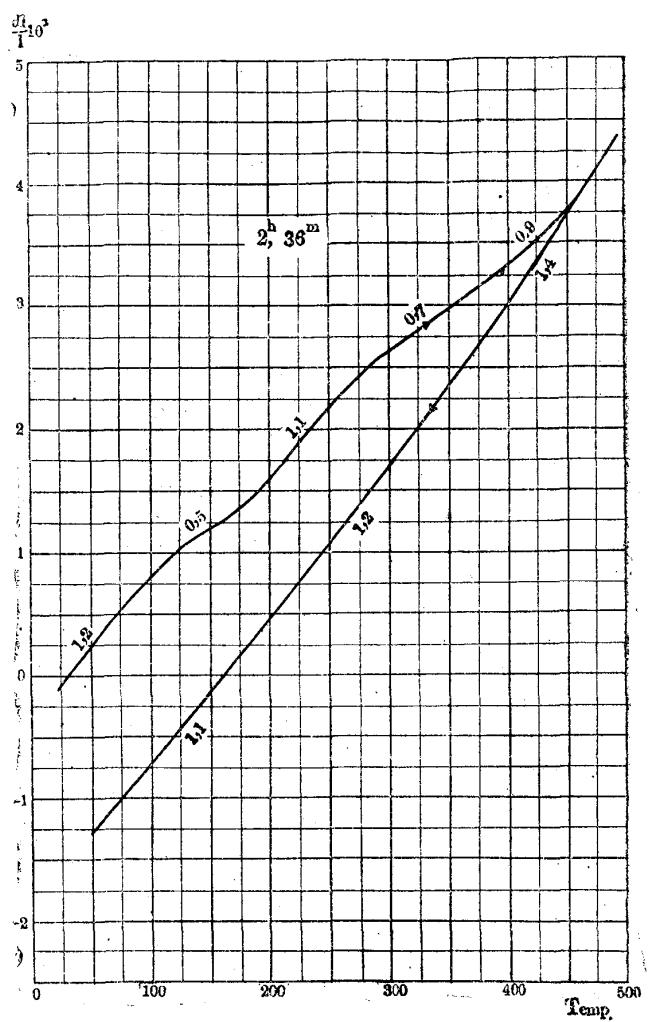
是等の材料を九百度に加熱して十分間其溫度に保ち急に水中に冷却したものの、即完全に焼き入れしたものの熱膨脹を測定すると第十八乃至二十六圖に示す様な結果が得られる。此結果で面白い事は炭素鋼  $C_1$  の如き炭素の量が少くて焼きの十分に入らないものを除いては、皆或溫度即百度乃至百二十五度迄は  $\gamma$  狀態に於ける熱膨脹率よりも小なる率で溫度の上昇に伴ひ伸びる率が減少する。而して再び溫度の上昇に供ひ膨脹する其割合は  $\alpha$  狀態に於ける膨脹率よりも小さい値を持て居る。而して再び普通の焼き戻しの利く溫度即三百度乃至三百二十五度に達すると再び延伸率が減ずる後又元の延伸率で伸びる。尙更に加熱すると遂に全く  $\alpha$  狀態の

Fig. 20.  $M_3$ Fig. 19.  $M_2$ 

モリブデン鋼に関する二三の研究

熱膨脹と同じ状況に移るのである。以上の事實はγ状態で焼き入れしても材料が其状態には残り得ない證となるが、是等に關しては別に研究を發表する考へである。但し圖面の中に記した數字は加熱の爲めに費した時間を示すものである。而して是等の温度は其初めが金屬組織學で謂ふトルースタイトの現はれる温度に相當し、第二回の收縮がオスモンダイトイト若しくはソルバイトの現はれる温度に相當して居る。此現象は尙炭素量の異なる炭素鋼に就て他日委しく研究の上發表する考であるが、念の爲め〇・九パーセントの炭素を有する所謂ユーテクトトイド鋼に就て實驗して見た處、二段に收縮する現象が極めて著しく現はれたのである。通常道具鋼等に極めて緊要な焼き戻し温度は、從來檢微鏡検査による外精確な判定方法がなかつたのである。即磁性の温度に對する變化等では此

が其状態には残り得ない證となるが、是等に關しては別に研究を發表する考へである。但し圖面の中に記した數字は加熱の爲めに費した時間を示すものである。而して是等の温度は其初めが金屬組織學で謂ふトルースタイトの現はれる温度に相當し、第二回の收縮がオスモンダイトイト若しくはソルバイトの現はれる温度に相當して居る。此現象は尙炭素量の異なる炭素鋼に就て他日委しく研究の上發表する考であるが、念の爲め〇・九パーセントの炭素を有する所謂ユーテクトトイド鋼に就て實驗して見た處、二段に收縮する現象が極めて著しく現はれたのである。通常道具鋼等に極めて緊要な焼き戻し温度は、從來檢微鏡検査による外精確な判定方法がなかつたのである。即磁性の温度に對する變化等では此

Fig. 22. M<sub>7</sub>Fig. 21. M<sub>6</sub>

現象が十分に現はれて來ないのである  
が熱膨脹では明に認める事が出来る。

焼き入れしたる鋼材が必ず延伸して  
居る事は圖面の上で明であるが更に焼  
き入れ溫度と材料の密度との關係を測  
定すると第二十七乃至二十九圖の如き  
結果が得られる。但し測定方法は化學天  
秤を用ひ、材料の重さを水中と空氣中と  
で測定して其密度を計算したのである

## 七 热傳導

熱傳導率を精確に測定する事は簡単  
な問題ではないが、砲身材料としては熱  
傳導の良否が重要な問題である。砲身の  
内面は發射の度毎に二千度以上の高熱  
の瓦斯で吹かれるから、連續發射をした  
場合には砲身は意外の溫度に迄熱せら  
れる。例へば十五粍砲を百二十發連發し  
た場合には砲口に於て攝氏三百六十度  
藥室(發射火薬を裝填する室)に於て百十

三度である。(吉田太郎——火兵學會誌第一卷百二十八頁參照)故に若し砲身が熱傳導の不良な材料で作られてあると、高熱の瓦斯に接觸する部分が多く加熱され其熱が容易に放散しない爲めに、撃滅が早く起り、且砲身の内外兩面の溫度の差が大きい爲めに、大なる溫度内力が起り破壊の危険が伴ふのである。

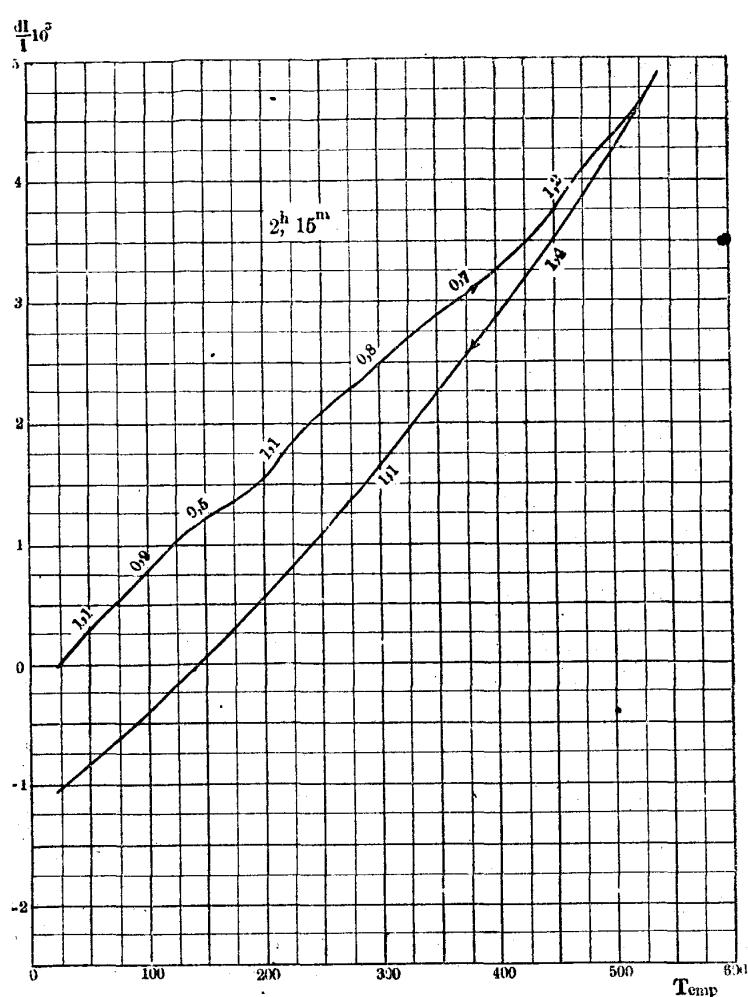


Fig. 23. NM<sub>1</sub>

砲身材料としての熱傳導率を測定するには以上の如く高溫度の場合が必要であるが、適當の設備が無い爲めに常溫度に於て測定した。(高溫度の炭素鋼の熱傳導に就ては K. Honda and T. Simidu On the Thermal and Electrical Conductivities of Carbon Steels at High Temperatures. Science Rep. of the Tohoku Imp. Univ., Vol VI No. 4, 1917, 參照)本實驗では絶對的に測定する方法と、傳導率已知の材料と比較して測定する方法とを混用したのである。先絶對的に測定するには材料を直徑 3cm. 長さ 15cm.

に削り其一端は熱蒸氣中に挿入して不變溫度に保ち、他の一端に一定量の水を巡回せしめて冷却する、而して二個の溫度計を適宜の距離を置いて材料中に挿入して二點の溫度を測定する。今熱の流れが定常になるのを待ち、一定時間  $t_2$  秒に巡回したる水の量  $W$  と流入する時の水の溫度  $t_1$ 、流出する時の水の溫度  $t_2$ 、材料内に挿入したる二個の溫度計の示す溫度を夫々  $t_3$  及  $t_4$  とし、其二個の溫度計の間

隔を1とすれば材料の熱傳導率 $k$ は次の式で現はされる。

$$k = \frac{W(t_2 - t_1)l}{q(t_3 - t_4)z}$$

但し $q$ は材料の横断面積で $l$ は材料中に挿入せる二箇の温度計間の距離である。

次ぎに熱傳導率已知の材料と比較するには、已知材料と測らんとする材料とで同じ大きさの棒を作

り、二本の棒を平行に置き各の一端を同溫度に保つ爲め蒸氣中に挿入し、他端は放置する。而して二本の棒に各同一の距離を置いて三個づゝ、即合せて六個のサルモカップルを固定する。是等の温度計の示す溫度が不變になり、棒中を流れる熱

が全く定常になつた時の溫度を讀めば次の式から熱傳導率を測定する事が出来る。

$$k = k' \left[ \frac{\log(a' + \sqrt{a'^2 - 1})}{\log(a + \sqrt{a^2 - 1})} \right]^2 \quad a = \frac{t_1' + t_3'}{t_2} \quad a' = \frac{t_1' + t_3'}{t_2}$$

但し式中 $k'$ は標準となる可き棒の熱傳導率で已知。 $t_1'$ 、 $t_2'$ 及 $t_3'$ は其棒の上に高溫度の點から順々に取り附けた溫度計の示す溫度であつて $t_1$ 、 $t_2$ 及 $t_3$ は傳導率を測定せんとする棒の夫れである。

以上の如き方法で測定した熱傳導率は第五表に示す通りである。

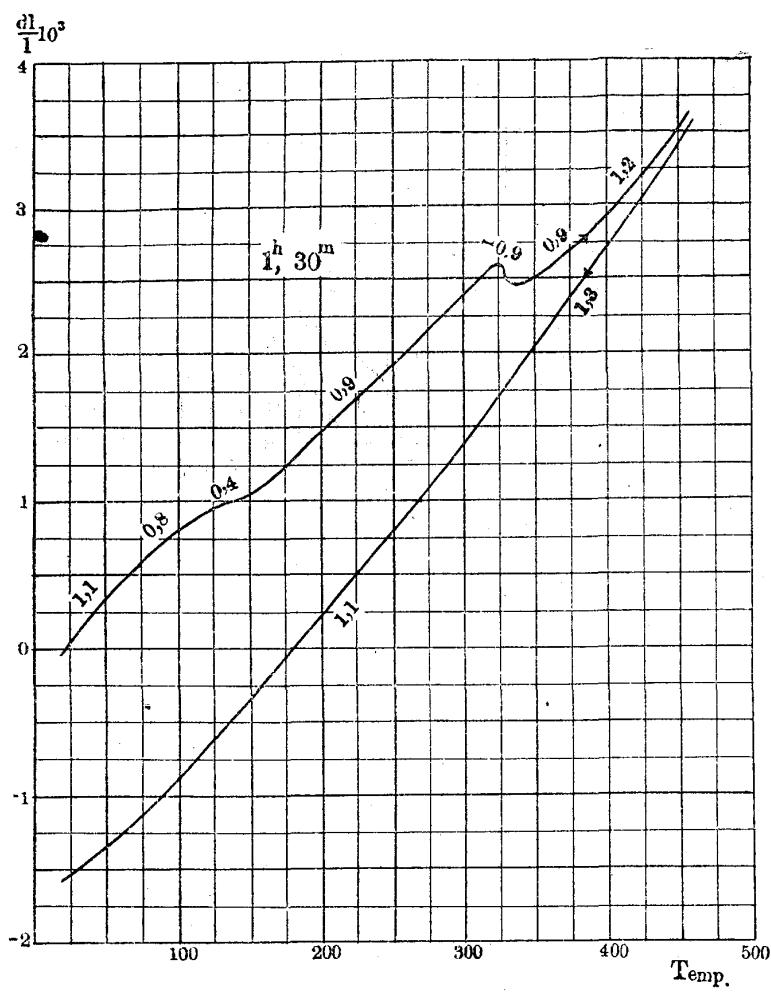
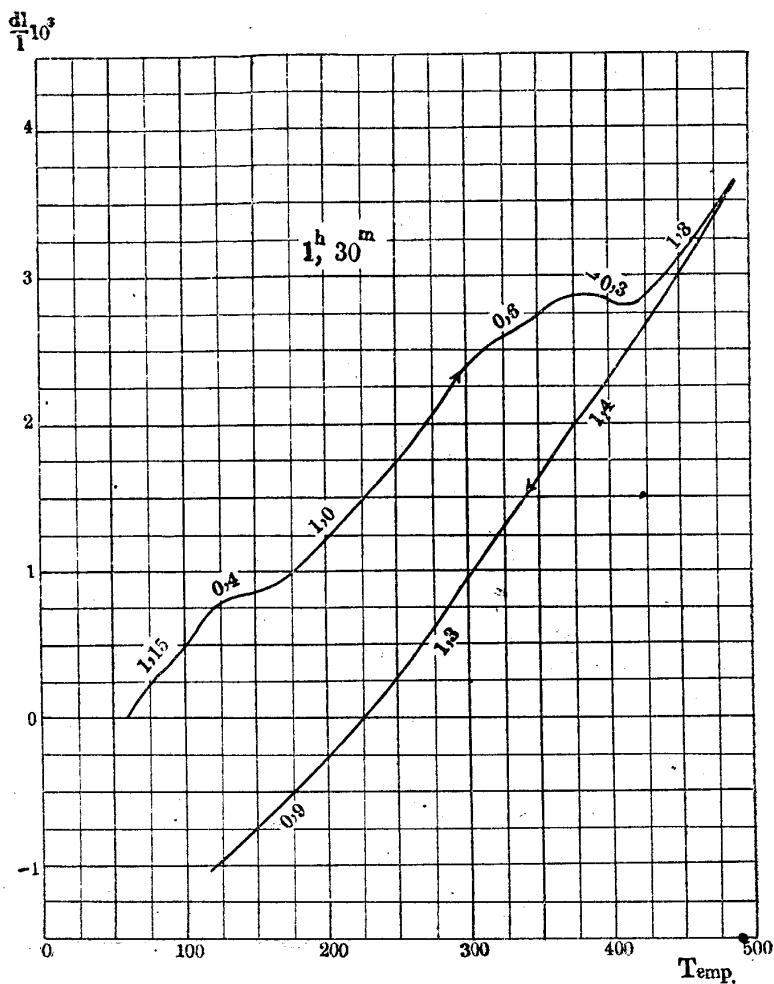


Fig. 24. N<sub>1</sub>

材 料

M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>	M <sub>7</sub>	NM <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	T <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>
熱傳導率 k. C.G.S.cal. 0.1159	0.0533	0.1147	0.1059	0.1011	0.0811	0.0557	0.0533	0.0557	0.1147	0.1159

是等の結果が如何なる程度迄信用し得るやを知らん爲めには、各試験片に就て電氣抵抗を測定する必要がある。即熱傳導率の測定には種々の點から誤差が入り易いから、一方に於て同時に電氣抵抗を測定して見ると、是は可なり精確の測定が容易であつて、又ウィーデマン・フランツの法則(G. Wiedemann und R. Franz—Poggendorf, Annalen der Physik, 89, p. 498, 1853 參照)の熱傳導率と電氣傳導率との比が常數であると云ふ事から精粗を判断し得る便宜がある。但しエル・ロレンツの説によれば熱及電氣傳導率の比は絶對溫度に比例すると云はれ(L. Lorenz—Poggendorf, Annalen d. Physik, 147, p. 429, 1872 參照)。其後實驗によりても證據立てゝ居る。且金属電子説によつても此説は裏書きされて居る。今 k 及 L を夫れ々熱及電氣の傳

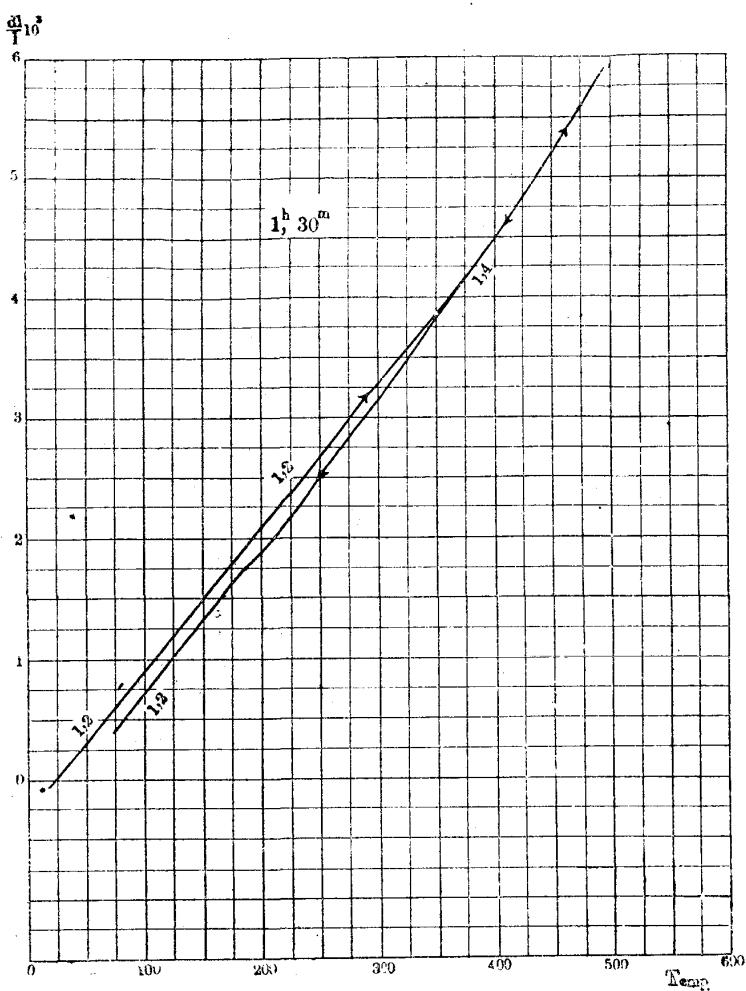
Fig. 25.  $T_1$ 

導率とし、T を絶對溫度、b を常數とすれば如何なる金屬でも  
であるから吾人が k の値の正否を判定する一助となる。併し最近本多教授の研究(前出)によれば上記

$$\frac{k}{L} = bT^{\alpha}$$

の關係は一般に純金屬にありては九百度迄は正確に成立する様であるが合金の場合にあつては此關係は少しく變形を要する。即絶對溫度零度の場合に  $k/L$  が零にならない傾向が認められる。若し式で現はせば  $a$  を他の常數とし

$$\frac{k}{L} = a + bT,$$

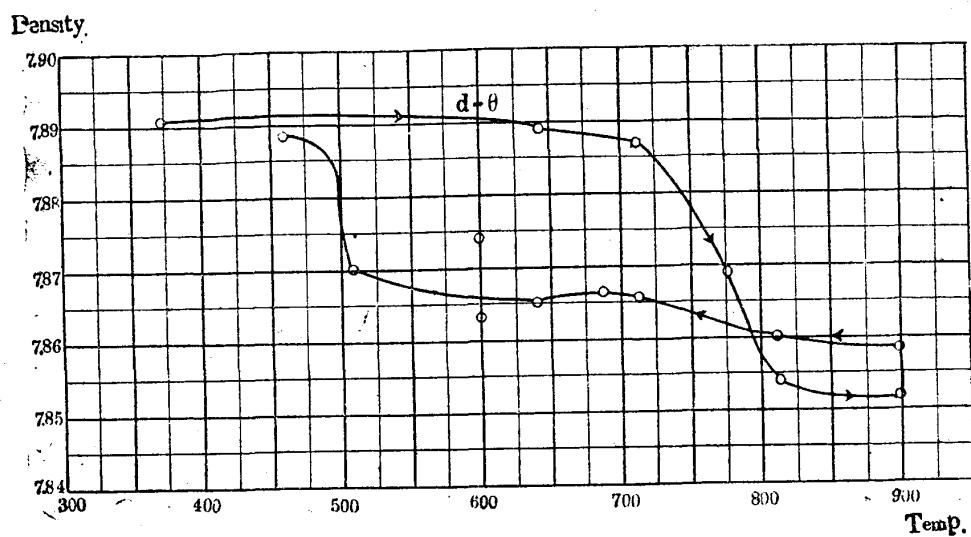
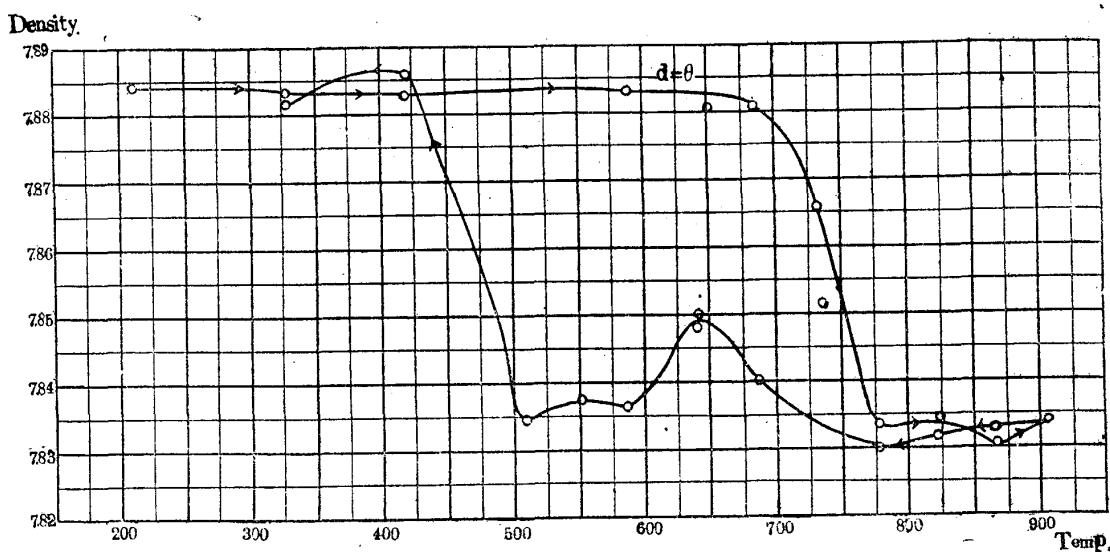
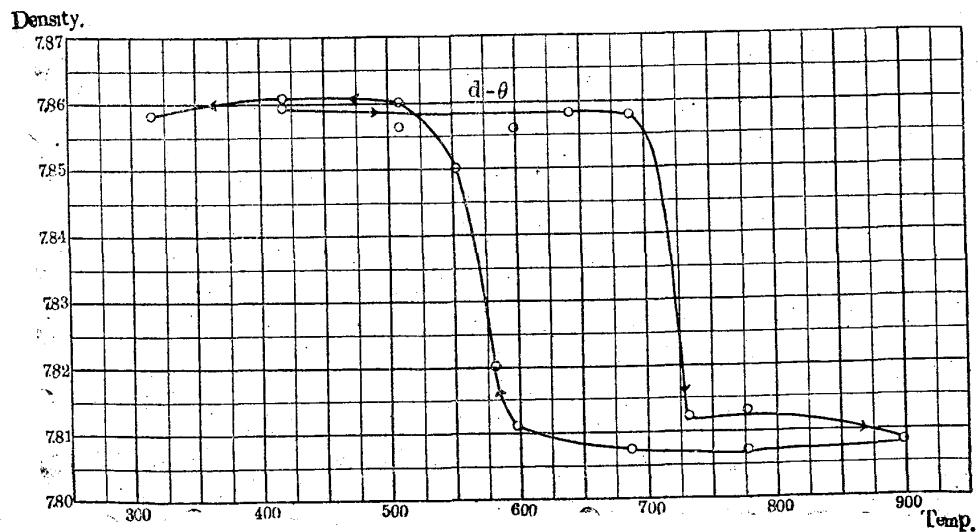
Fig. 26.  $C_1$ 

となる。本實驗では常溫度に於ける傳導率のみを測定したから、遺憾ながら、上式が如何なる程度に迄成立し得るやを慥める事が出來ないが試みに測定した電氣抵抗との比を作つて見ると第六表の如くなる。但し電氣測定にはリーデ及ノースラップのポテンシオメーターを用ひた。(測定方法は清水與七郎著電氣磁氣測定法並測定器具上巻百五十六頁參照)

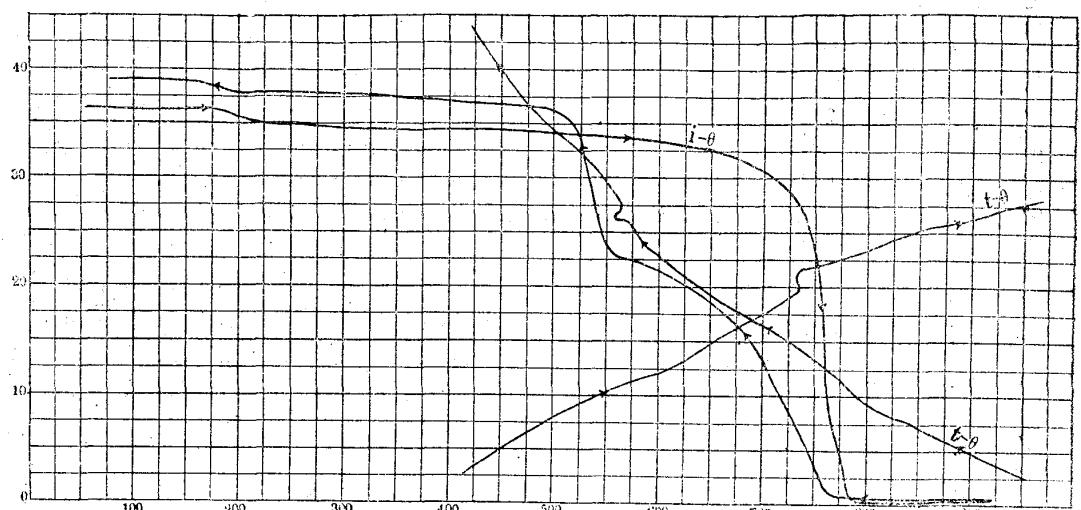
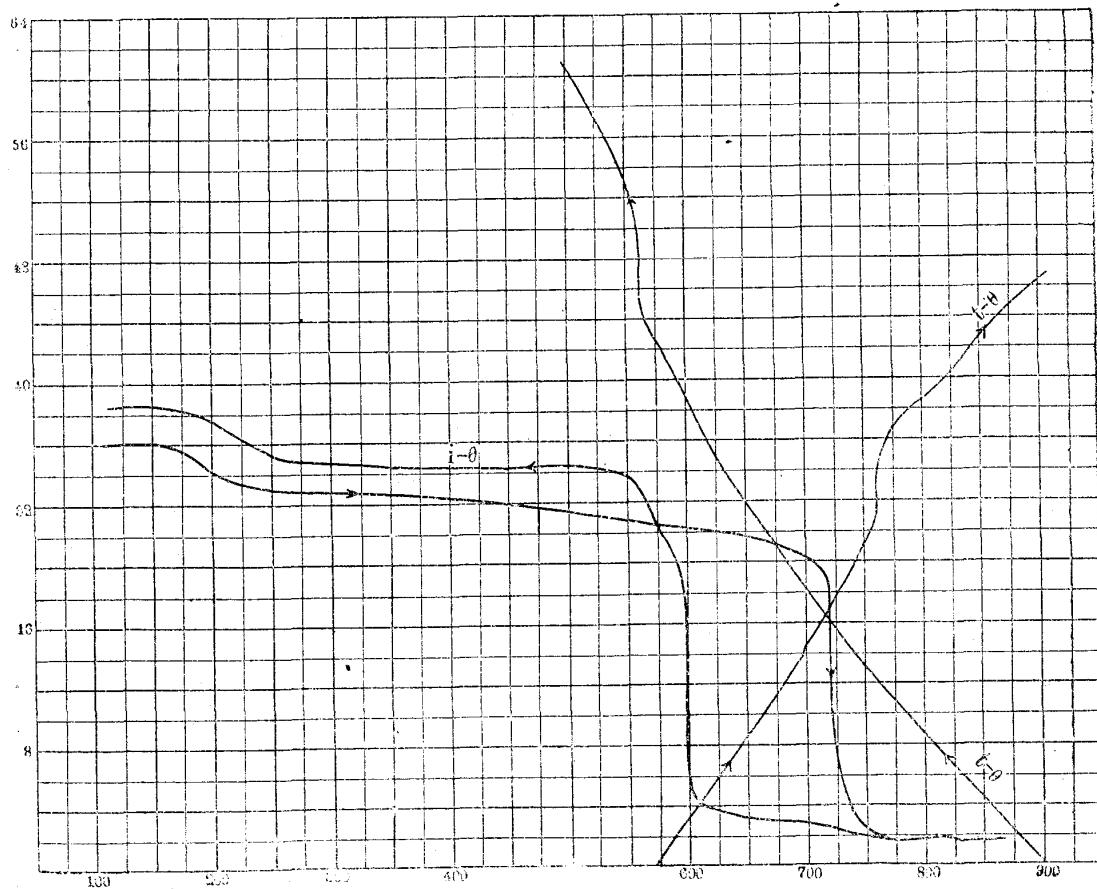
材 料	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$	$M_7$	$NM_1$	$N_1$	$T_1$	$C$
電氣比抵抗 $L$ C.G.S. ohm 15°C	$1.60 \times 10^{-5}$	$1.57$	$1.55$	$1.54$	$1.03$	$1.09$	$1.15$	$3.14$	$2.73$	$2.80$	$1.65$
$k/L$	$1.06 \times 10^{-6}$	$1.79$	$1.91$	$1.00$	$2.07$	$2.13$	$1.79$	$2.73$	$2.54$	$2.40$	$2.39$

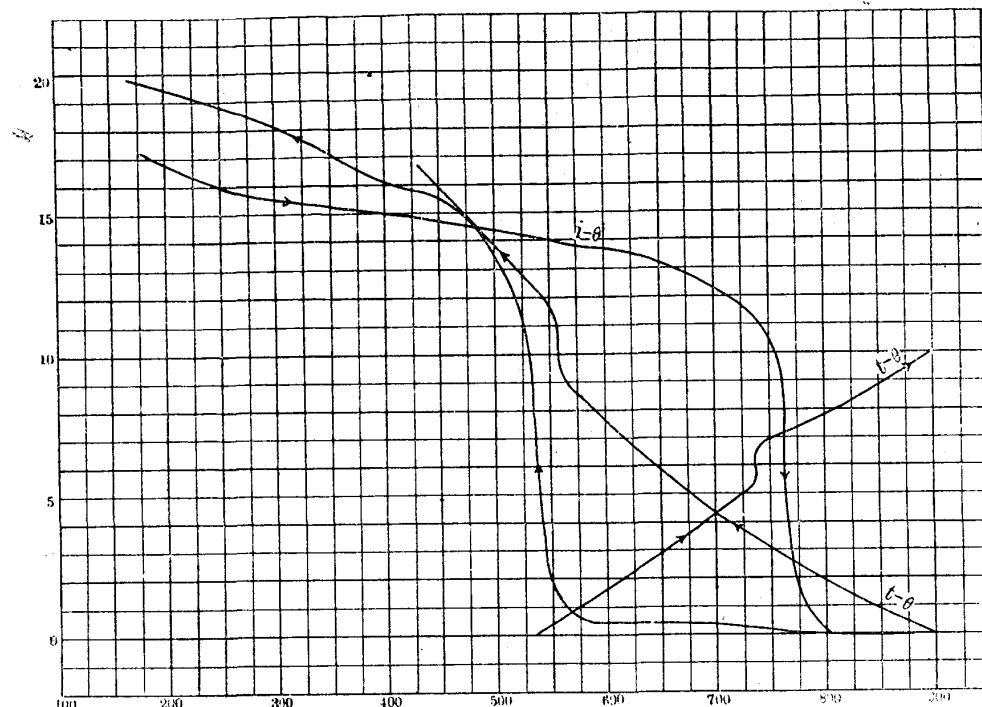
## 八 磁性の溫度に對する變化と變態に伴ふ熱現象

以上の如き物理的性質中温度の影響のあるものの中には、磁性の温度に對する變化と相似の現象を呈して居るものがある。故に是等の物理的性質と相比較する爲めに磁性の温度に對する變化を吟味した。其方法は普通の磁力計法が最簡単である。即二個の起磁コイルを磁力計に對稱に置き、其の一

Fig. 27. M<sub>1</sub>Fig. 28. M<sub>6</sub>Fig. 29. N<sub>1</sub>

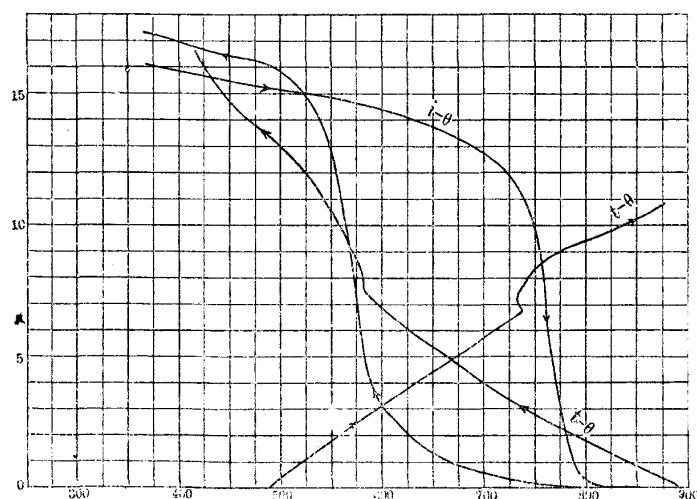
方の内に電氣抵抗爐を入れ、其中に試験片を置き溫度の上昇及下降に伴ふ試験片の磁性の變化は兩起磁コイルの中央に垂下された小磁石に固定されて居る鏡の振れによりて見る事が出来る。而して

Fig. 30.  $M_1$ Fig. 31.  $M_2$

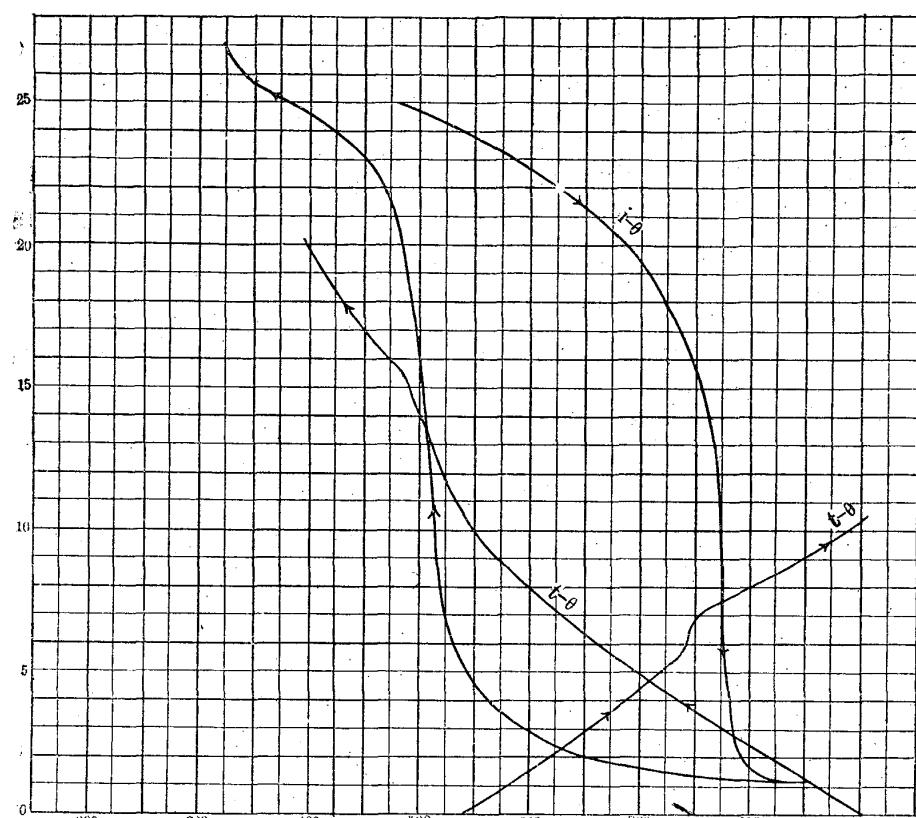
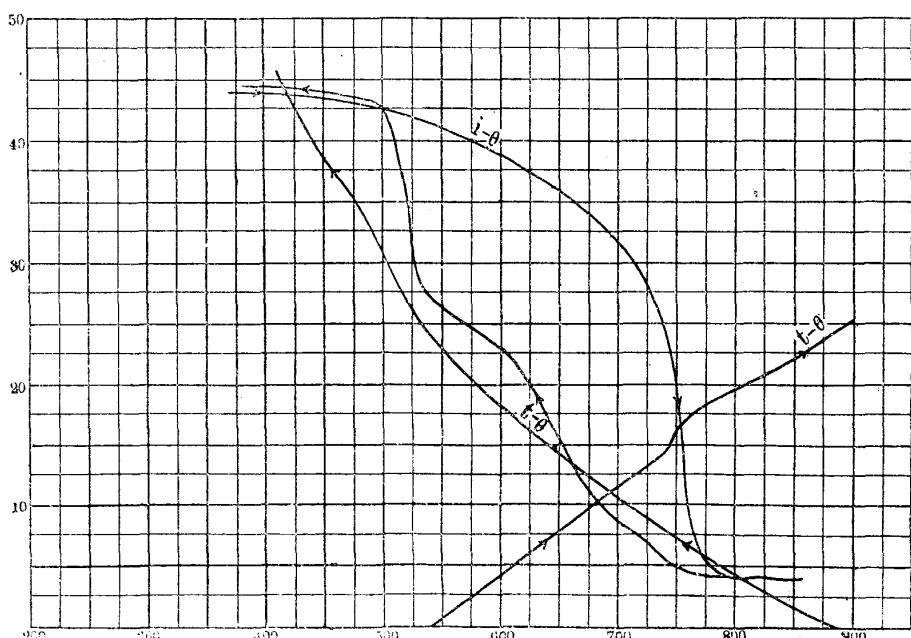
Fig. 32.  $M_3$ 

又鋼の變態に供ふ熱現象も磁性の變化と相待つて鋼の研究に必要であるからロバーツ、オースチンの方法で測定して見た。(本多博士著磁氣と物質二十八頁及百四十七頁參照)其結果は第二十圖乃至第四十四圖に示す通りである。

### 九 モリブデン鋼の一 般 性 質

Fig. 33.  $M_4$ 

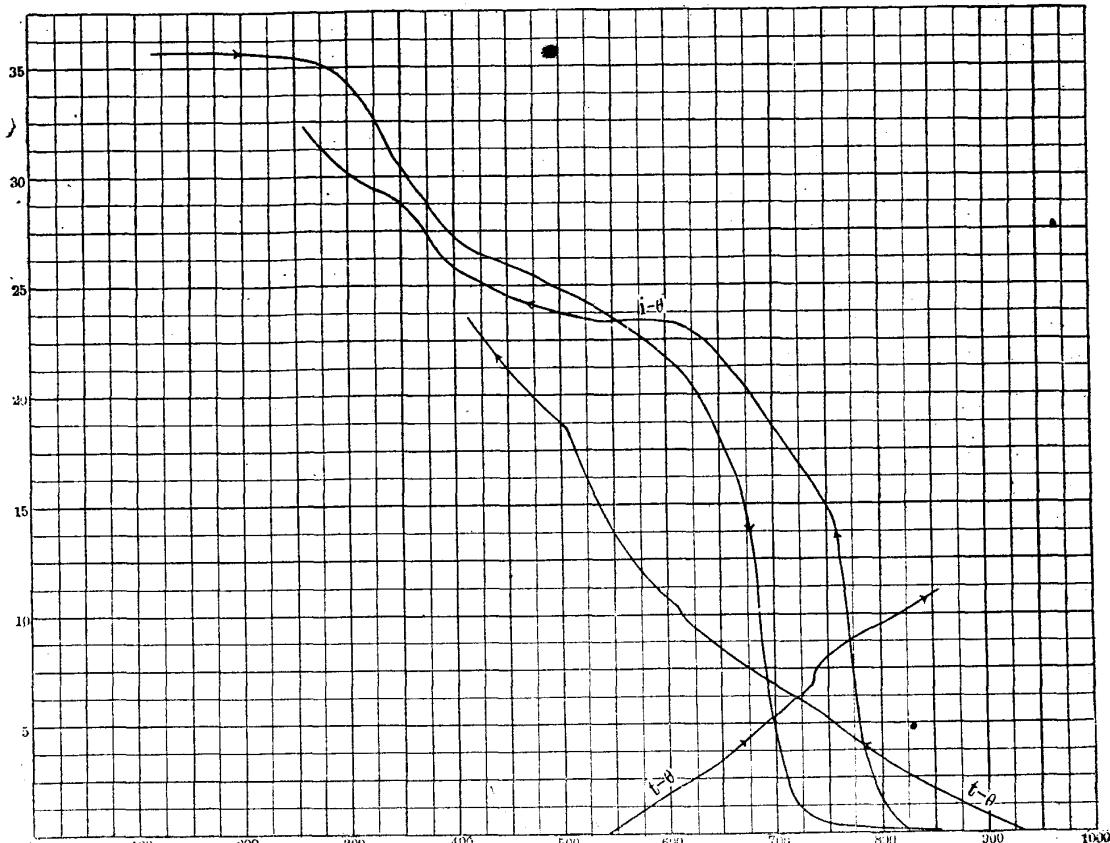
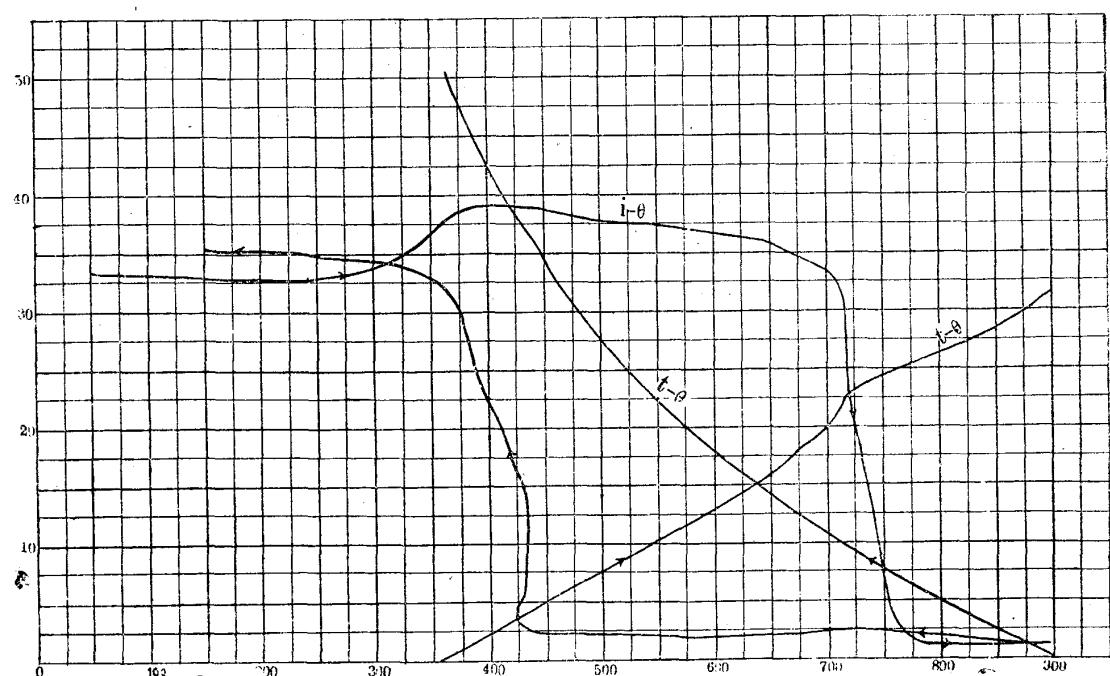
以上の實驗の結果からモリブデン鋼の一般的性質を推論するには、條件が餘り十分でないから誤りたる結論に到着する恐れがある。併しながら以上の結果のみを基礎として大體を觀ると、鋼の彈性率及剛性率はモリブデンの存在の爲めに増加する傾向があ

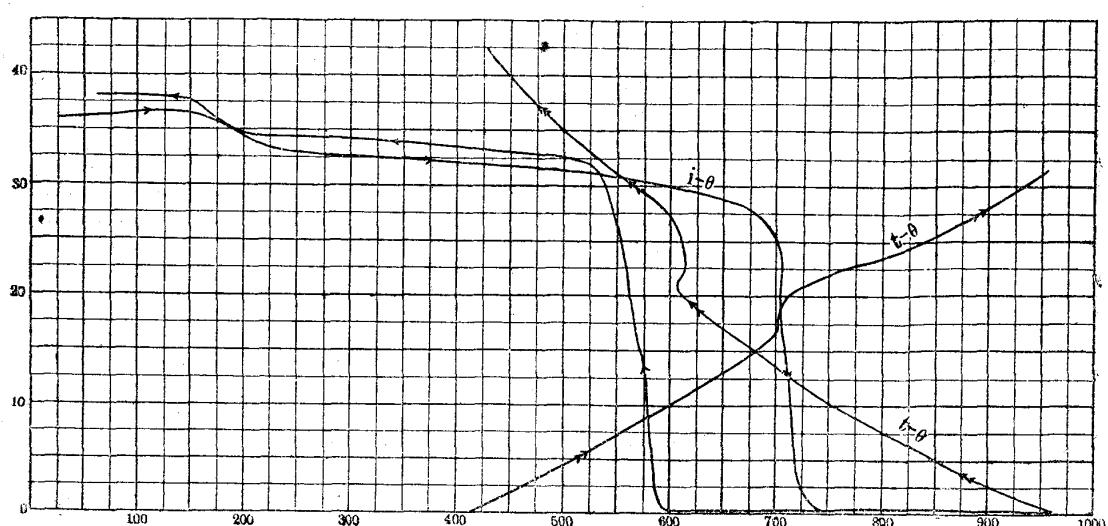
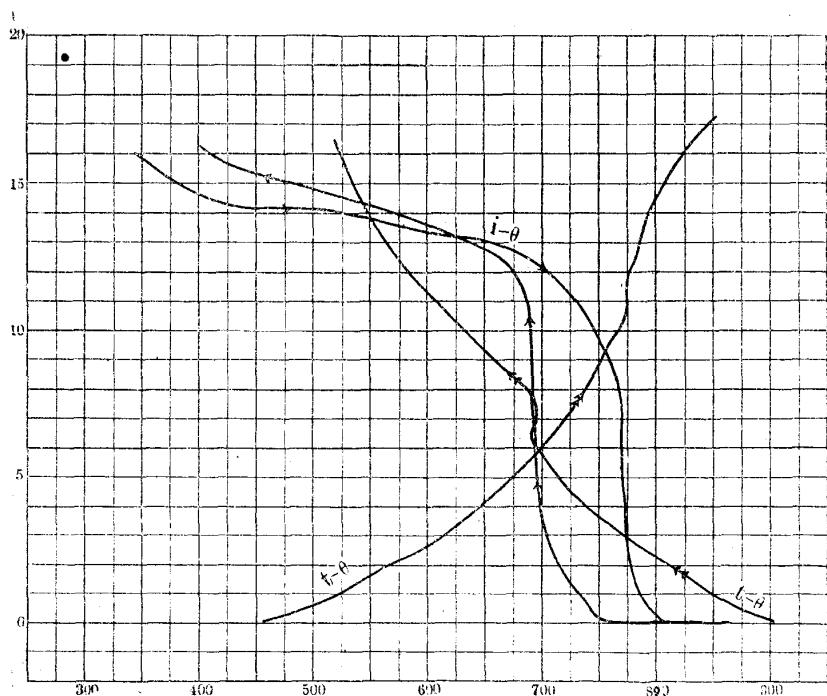
Fig. 34.  $M_5$ Fig. 35.  $M_6$ 

るが、ニッケル及タンクステンと比して特に著しい影響は無いのである。而して砲身材料として特に良好と思考される點は、モリブデンの爲めに熱傳導性を善良にする事である。是に反してニッケルは不良にする傾向が認められる。從來二三の實驗ではニッケル鋼の砲身は普通炭素鋼の砲身と比べて命數の短いのは一つには其處に原因して居りはせぬかと考へられる。

從來砲腔面のエロージョンの原因に就ては多くの説があるが十分な説明が付いて居ないのであ

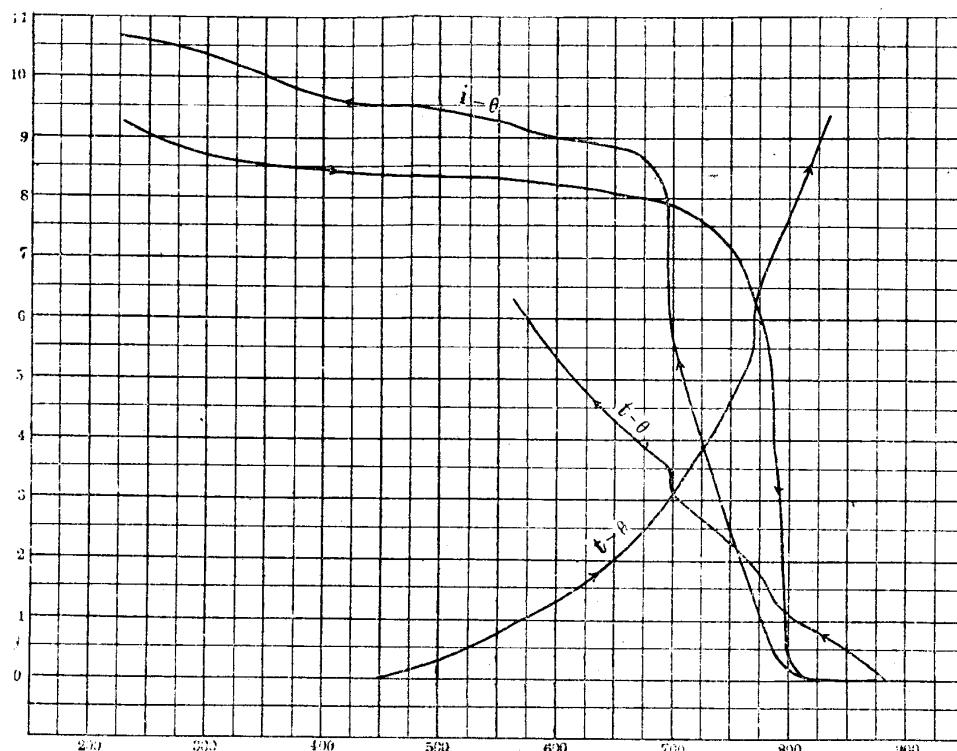
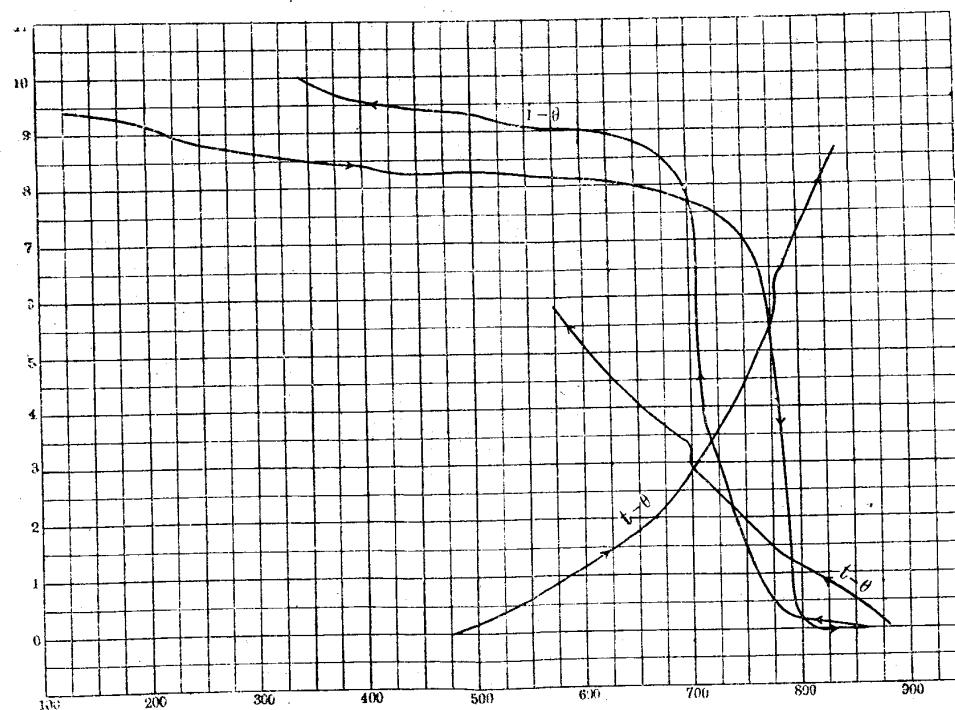
る。併し砲腔面が発射の際に加熱せられて極く薄い層だけは少くも  $A_{c_1}$  變態の起る温度以上に熱せられる云ふ點に於ては一致して居る。而して或場合には其面に焼きが入ると云ふ事も謂はれて居る。

Fig. 36.  $M_7$ Fig. 37.  $NM_1$

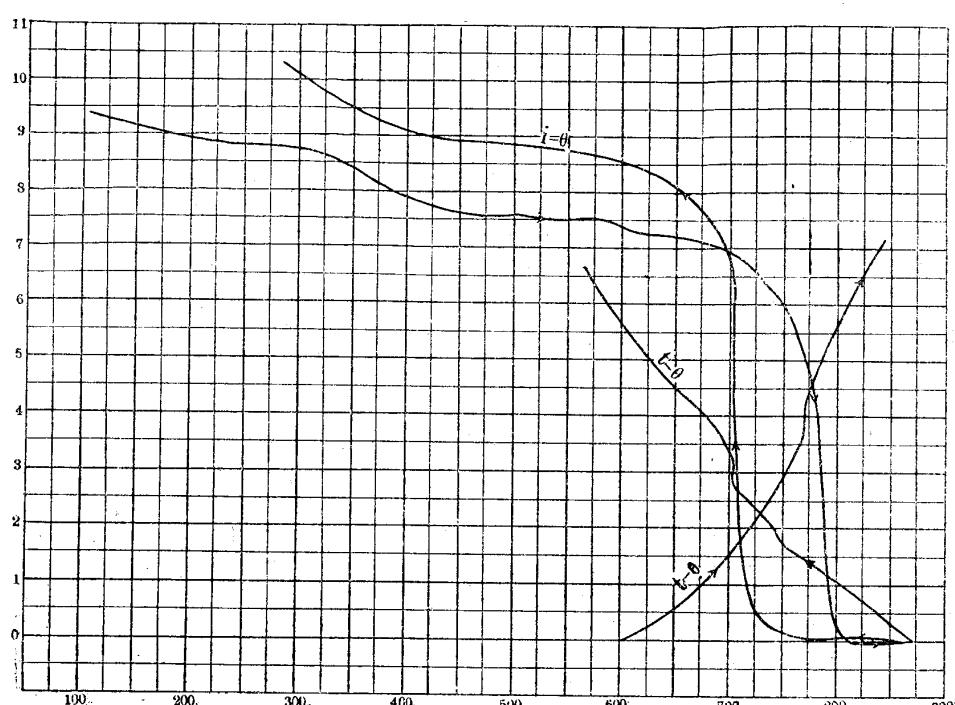
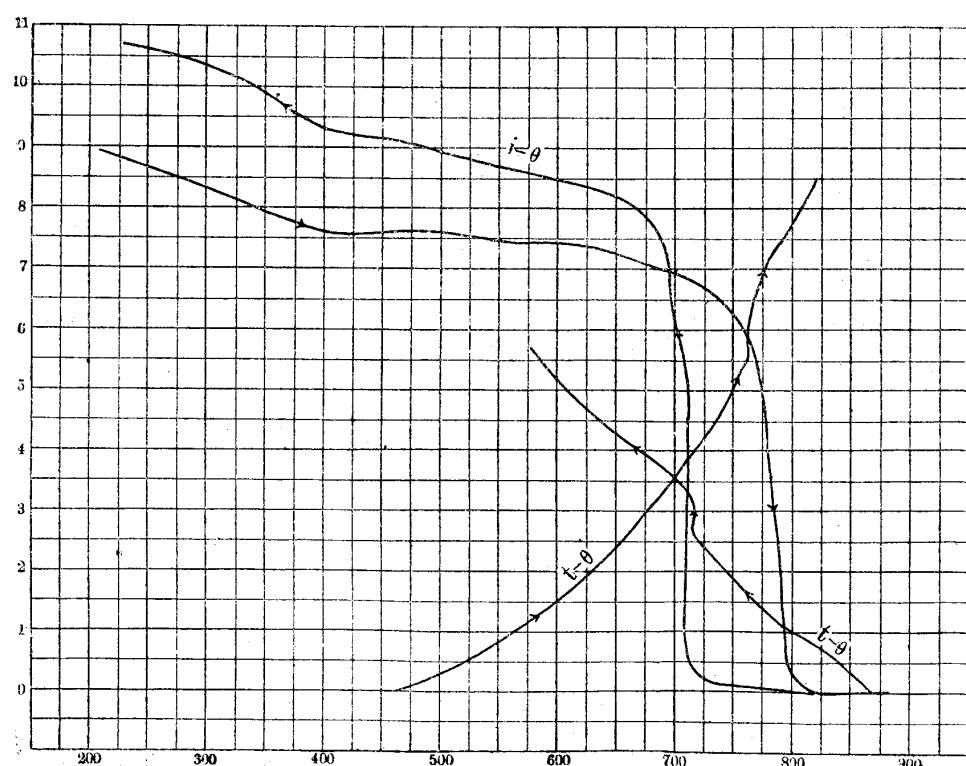
Fig. 38.  $N_1$ Fig. 39.  $T_1$ 

射の際に砲腔面の薄い層が  $Ac_1$  以上に熱せられる時と、焼きの入り居る薄層がテンバーリングの温度に達した時に其薄層丈けが急に各方面に收縮を起す爲めにクラックを起すと説明するのが至當と考へ

其割れ目を見る  
と、砲軸に併行の  
ものも又夫れに  
直角のものもある。  
砲軸に併行な  
割れ目丈であれ  
ば砲身内に起る  
内力の爲めとも  
考へられるが、横  
の割れ目に至つ  
ては説明が付か  
ないのである。著  
者は以上の實驗  
の結果から其原  
因が熱膨脹係数  
の異常なる變化  
に歸する事を正  
當と考へる。即發

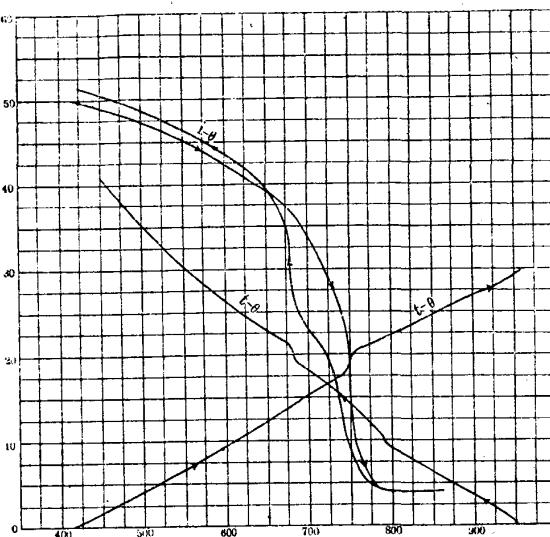
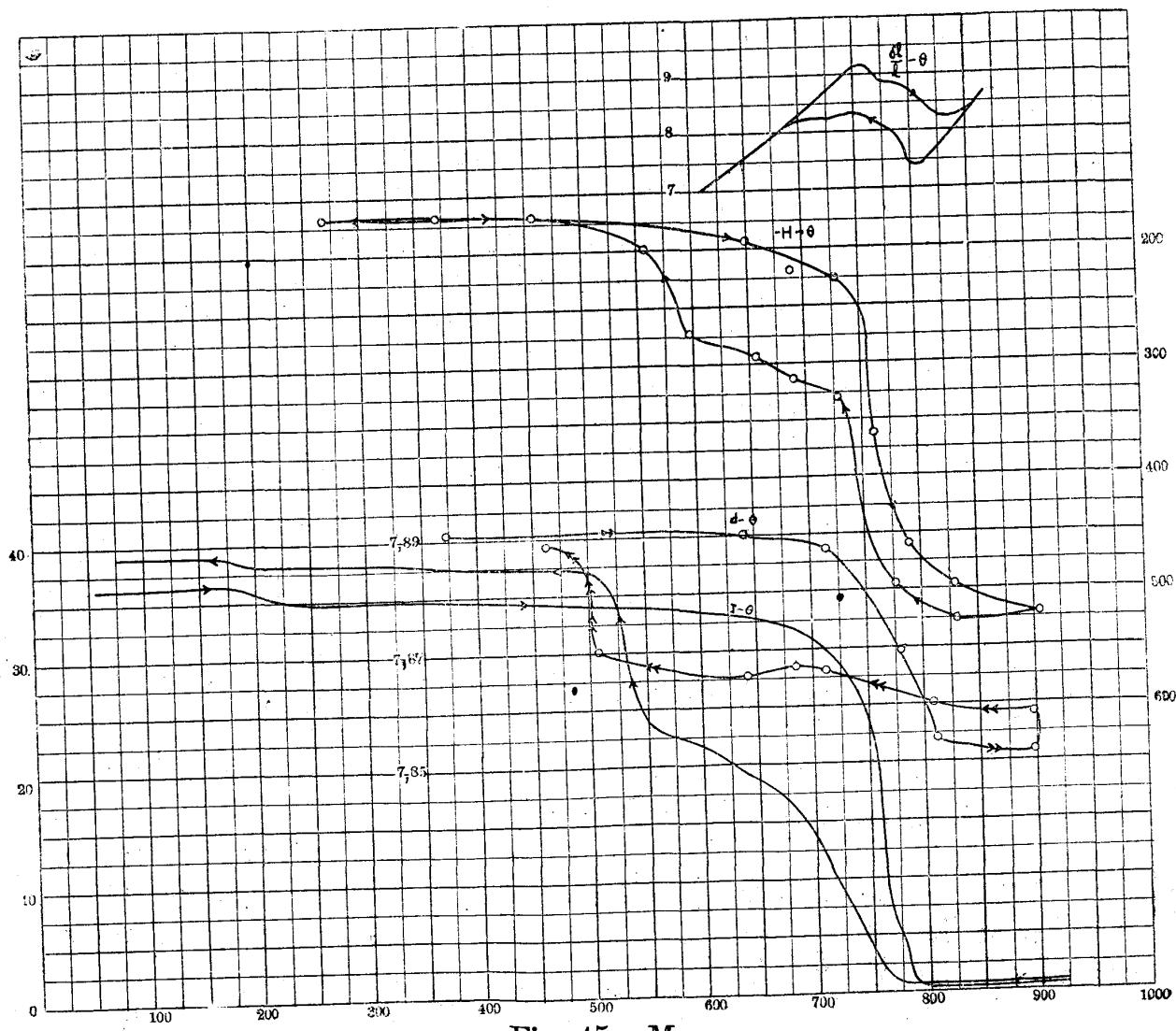
Fig. 40.  $T_2$ Fig. 41.  $T_3$ 

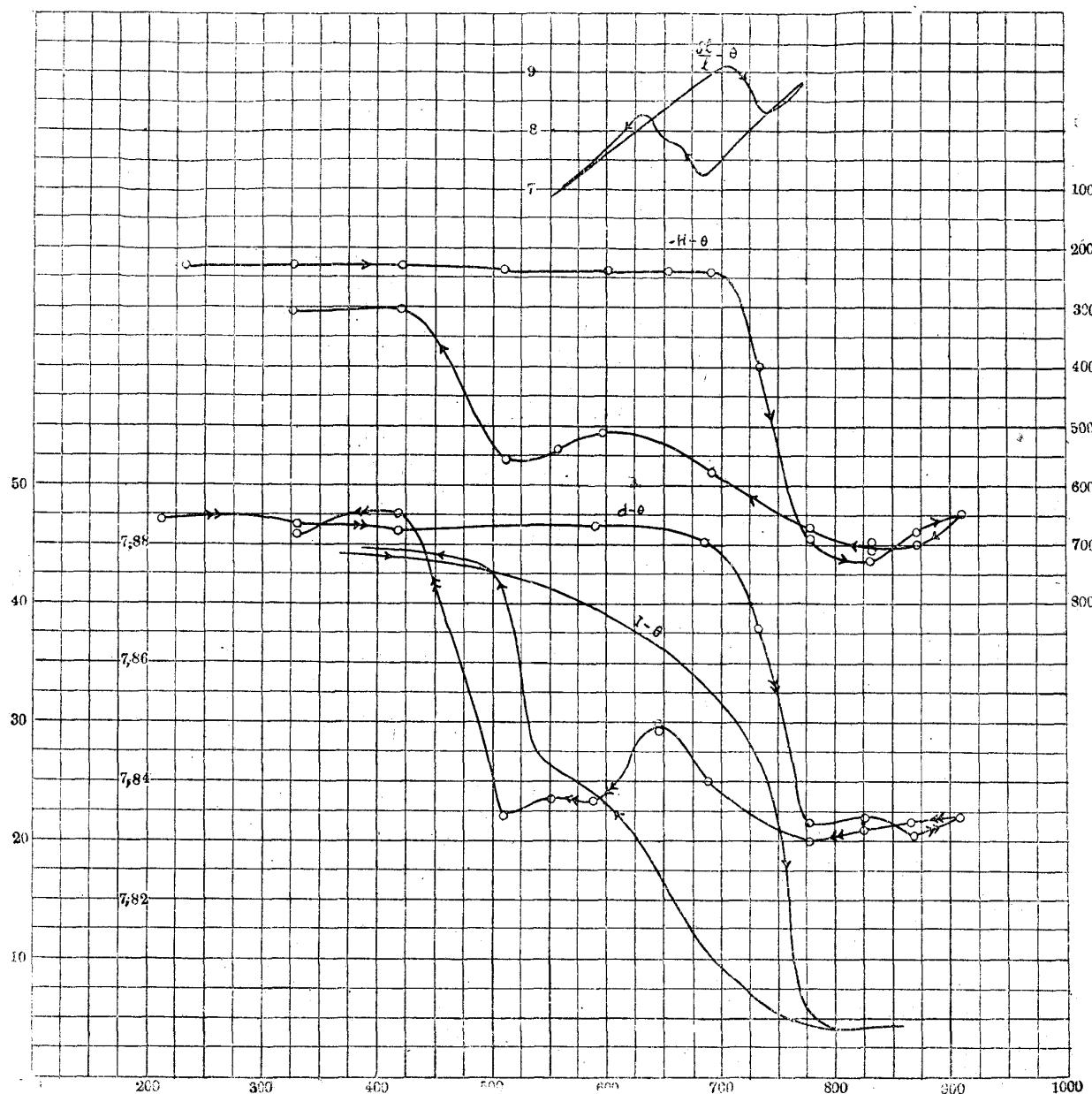
る。さすれば砲腔面に出來る割れ目は單に砲軸方向にのみ限らず、恰もセメントに出來る龜甲の如き一  
クラックと同様のものが出來る場合もあれば、此薄層が加熱と大なる摩擦の爲めに脆弱になつて居て  
夫れが發射の際の圓周方向の延伸内力の爲めに、砲軸方向の割れ目が出來る場合もあるのである。又  
或場合には溫度内力の爲めに割れ目が出來得る。而して是等の現象が夫々エロージョンを起す原因

Fig. 42.  $T_4$ Fig. 43.  $T_5$ 

と考へられるが、先きに記した熱膨脹の異常なる變化が有力な原因の一つである。

然らば  $A_{c1}$  以上に加熱せられて收縮する量の大なる材料及焼き入れした爲めに或溫度で收縮を起す材料と、熱傳導率の小さい材料程クラックが出来エロージョンの起る公算が多いのである。ニッケル鋼は比收縮量 0.015 mm. ニッケル、モリブデン鋼は最大で 0.019 mm. であつて炭素鋼が 0.011 mm. モリブデン

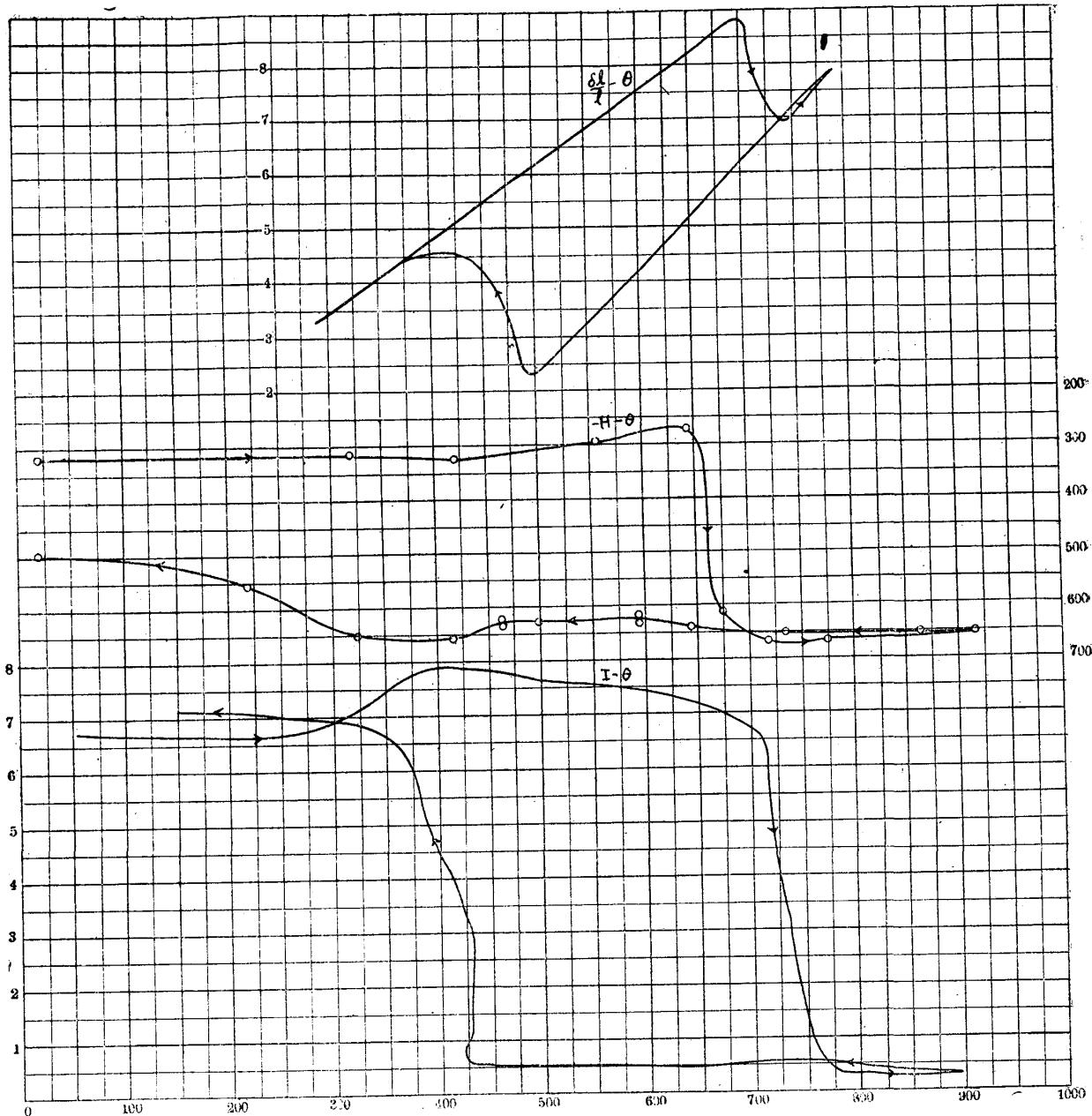
Fig. 44. C<sub>1</sub>Fig. 45. M<sub>1</sub>

Fig. 46.  $M_6$ 

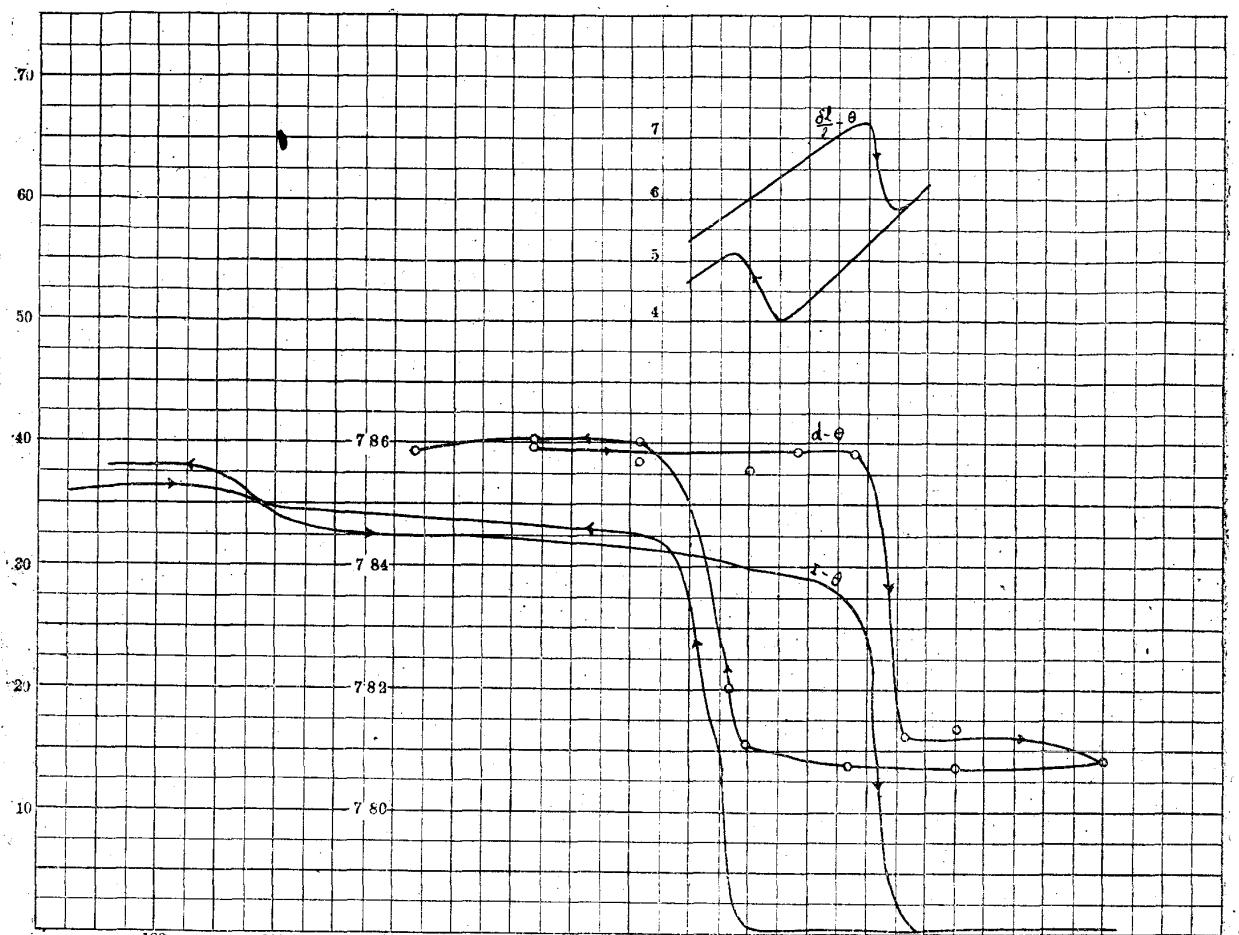
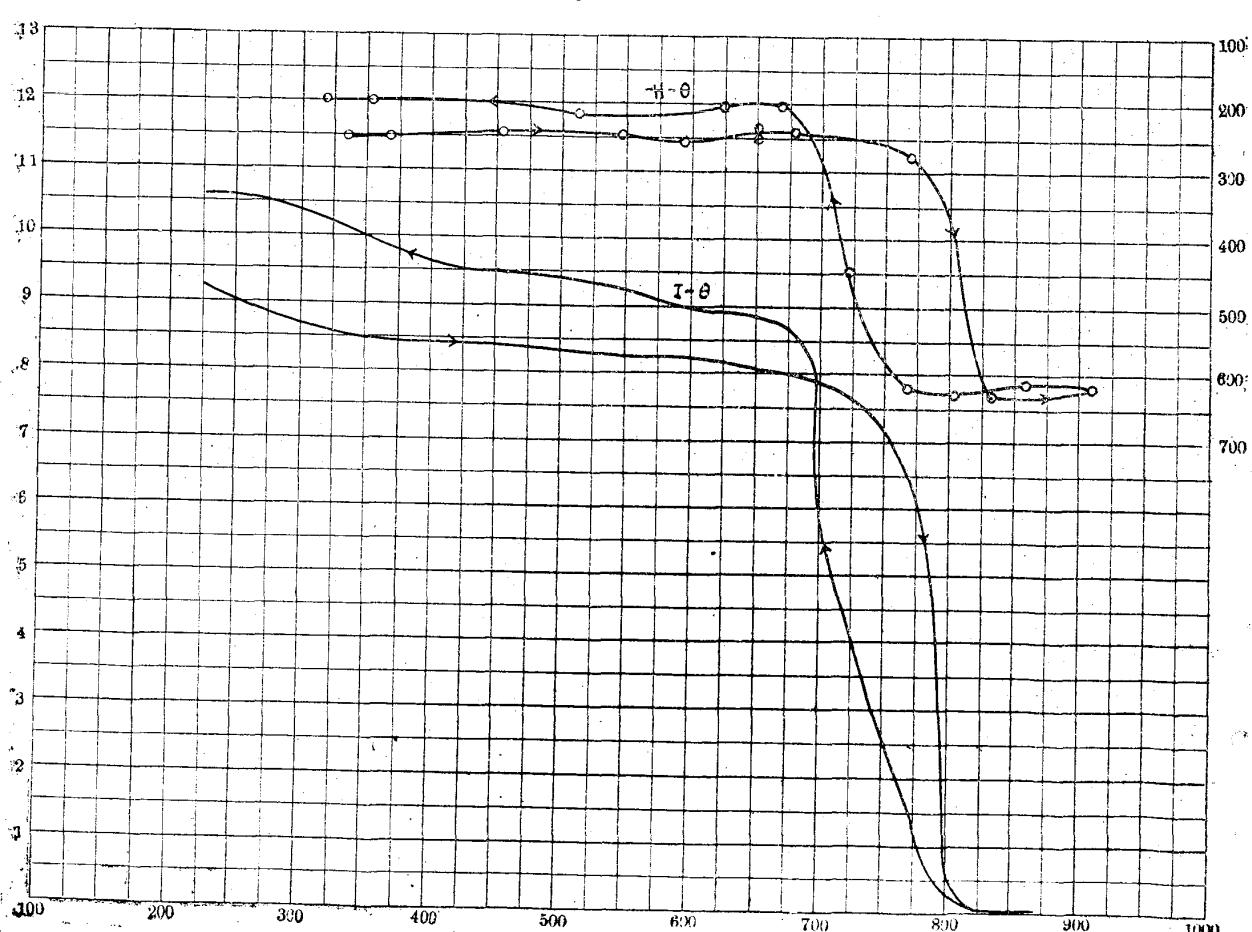
及タンクステン鋼は炭素鋼と同様か若しくは是以下のである。故に此點から論ずるとモリブデン鋼が適當であると謂ふ結論となるが、特にモリブデン鋼の優秀な點は熱傳導以外に於ては餘り認められないものである。但しニッケルの含有量多量な鋼、インバールの如きは常温以上に於て熱膨脹の變態がないから、此點に就ては最適した砲身材料である。

#### 十 高溫度に於ける 磁性と熱膨脹及 焼き入れ温度と 硬度等の關係

今試みに磁性の温度に対する變化の模様と、材料

Fig. 47. NM<sub>1</sub>

が焼き入れによりて其密度及硬度に變化を起す現象と熱膨脹の曲線とを同一温度目盛りの上に重ね合せて見ると、變態を起す溫度の關係が明瞭になる。例へば第四十五圖乃至五十圖に示す通りである。但し圖中硬度は便宜の爲め縱坐標の方向を反対にしてある。是等の圖面中セメンタイトの變態は唯磁氣検査によつてのみ認めることが出来るが、其他は特に磁性、密度及硬度の三者が非常に能く似た變化を示して居る。ヒステレスの大小も勿論凡て同様に現はれて、熱膨脹によりても是れを窺ふ事が出来る。特

Fig. 48.  $N_1$ Fig. 49.  $T_2$

に熱膨脹による時は明かに、 $\alpha$ から $\gamma$ に移り始め、若しくは $\gamma$ から $\alpha$ に移り始むる點を見る事が出来る。而して是等の変態を連續的に見るには熱現象若しくは磁性の變化に依る以外熱膨脹に依るのが便利であつて、特に後者にありては焼き入れされた材料内に起る百度附近及三百五十度附近に起る変態を正確に吟味し得る便宜がある。(大正七年三月造兵學實驗室に於て) 終

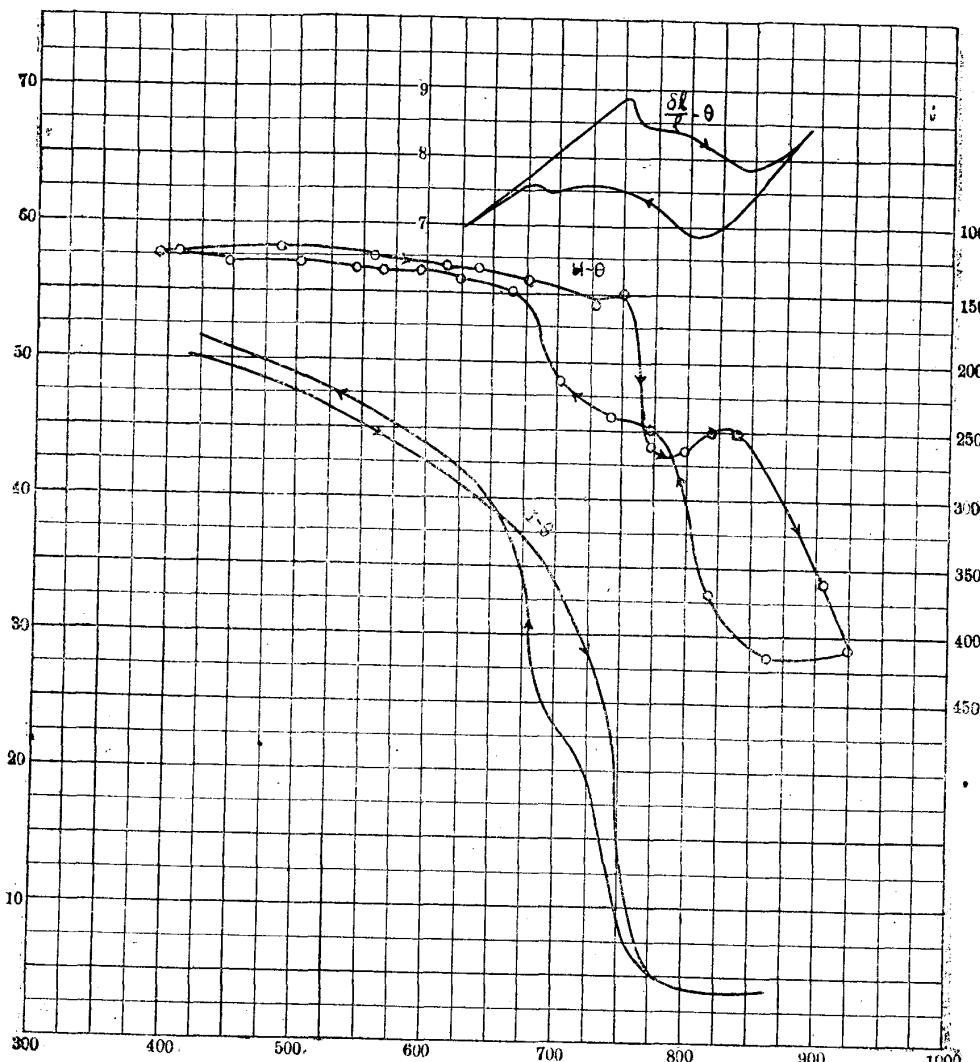


Fig. 50. C<sub>1</sub>