

焼入液の冷却作用に就て (第1報)

(日本鐵鋼協會第 17 回講演大會講 演昭和 12 年 4 月)

篠田 軍 治*

A RESEARCH ON THE COOLING EFFECT OF HARDENING LIQUID. (I)

Gunji Shinoda

SYNOPSIS:— In the majority of researches hitherto carried out for hardening liquid, the specimen was hardened in the liquid, and its cooling state was investigated by means of the cooling curve, etc. In the present research, however, the observation was directed to the liquid, and the condition of ejecting hot current of the liquid and that of the convection were photographed by Schrieren's Method, the results of the preparatory experiments having been published in the Journal of the Society of Mechanical Engineers, Japan in the names of Mr. Tachibana and the author. In the present paper, the results of research on the state of hot current at the instant of hardening, and the relation between the surface temperature of the specimen and the heat quantity lost in unit time, etc., are dealt with.

I. 緒 言

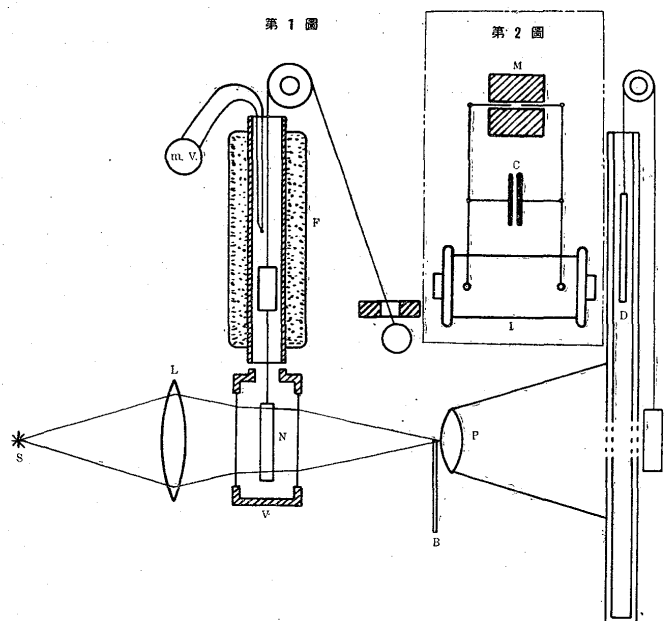
金属材料を種々の液體の中に焼入した場合に液の如何なる物理的性質が材料の焼入効果に影響を與へるかといふ問題は現象が複雑なだけに定性的には相當に明かになつてゐても定量的には全く解決がついてゐないと言て差支ない。今迄多くの人々が焼入液の作用に関する研究を行つてゐるが(佐藤氏)のものを除いては大抵焼入試料の冷却曲線とか又は硬度などの測定を行つて其れから液の物理的性質が冷却効果に及ぼす影響を推定してゐるやうであるが現象が複雑なものであるだけに斯様な一方的觀察だけでは容易に真相をつかみ難いものと思はれる。其處で筆者は反對に液の方に着目して液が試料の熱を奪ふ機構の方を調べて見ることにして既に豫備的の實驗結果を發表した¹⁾。其の方法はシュリーレン法によつて焼入によつて試料から液の中に噴出する熱流並びに其の後に生ずる對流の有様を寫眞にとる方法であつて其れによつて材料の熱が液によつて奪はれる過程を 2 つに分けて第 1 を焼入瞬間に於ける主として蒸氣噴出による冷却、第 2 を其の後に生ずる稍定常的の對流によつて熱の失はれる過程の 2 つとする方が便利であることを見出した。而して常溫附近の水、水溶液のやうな粘性の小さい液體に於ては、焼入瞬間に於ける熱流の噴出が著しく之によつて大部分の熱が失はれる。即ち第 1 の過程で殆んど冷却を終るがグリセリンのやうな粘性の大き

い液では最初の熱流の噴出はあまり目だたなくて其の後に生ずる對流即ち第 2 の過程で大部分の熱が失はれるものであらうといふことを結論した。

本研究では焼入瞬間の模様を活動寫眞的に撮影して熱流の噴出の機構を明かにし且又焼入液の冷却作用を數量的に取扱ふ方法を考察してみることにした。

II. 焼入瞬間に於ける熱流

焼入瞬間に於ける熱流噴出の模様を第 1 圖のやうな装置を使ってシュリーレン活動寫眞法で撮影した。圖の S は光源で之から出た光を焦點距離の長いレンズ L で集め寫眞用レンズ P の直前に其の像を結ぶやうにした。S と L



* 大阪帝國大學工學部應用理學教室

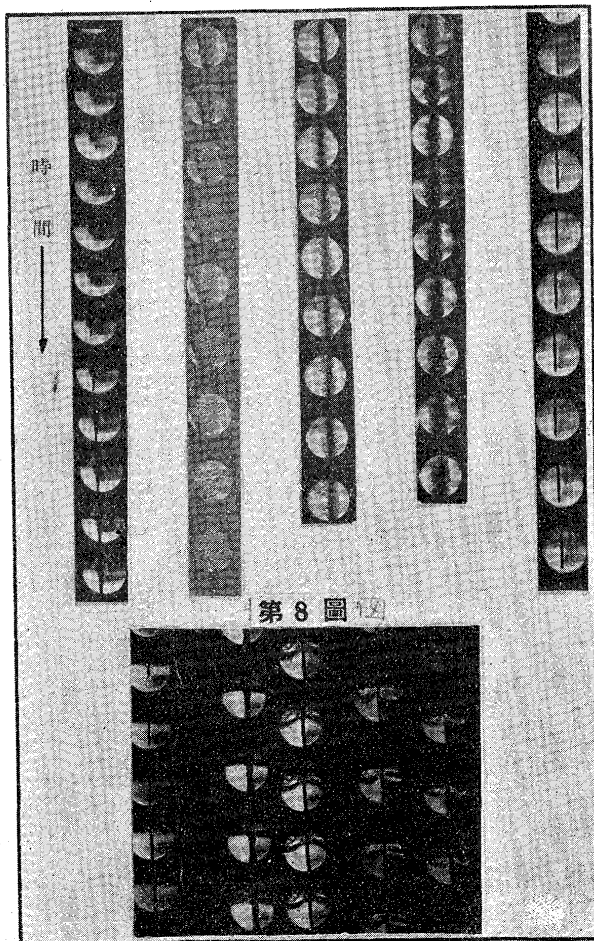
¹⁾ 金屬の研究 10 (1933) 63

²⁾ 篠田, 橋, 機械學會論文集 3 (1937) 151

の距離は 42 cm, L と P の距離は 165 cm で別に P の直前に B の障害物を置いて S の像を半分程隠すやうにした D は手札型乾板で暗箱中を自由に落下するやうにし V は焼入液を入れる器で L から 15 cm の處に置き F は電気爐 N は焼入試料である 光源 S は第 2 圖 M のやうに 2 本のマグネシウム・リボンを 2 個の陶器の面で押へたもので之を感應コイル I につなぎリボンの間に電気火花を飛ばすのである C は 1 個のライデン瓶で火花を瞬減させるために入れたのである 感應コイルは 1 秒間に 72 個の火花を飛ばすので放電を行ひながら寫真乾板を落し同時に試料を液の中に焼入すれば 焼入のある瞬間に於ける有様が 1 秒間 72 齣の活動寫眞のやうなものとして撮影される譯である

焼入試料は径 4 mm, 長さ 15 cm のニクロム棒で之を電

第 3 圖 第 4 圖 第 5 圖 第 6 圖 第 7 圖



第 3 圖	水	200°C	焼入温度 600°C
第 4 圖	アルコール水	20°C	焼入温度 700°C
第 5 圖	アルコール水	20°C	焼入温度 700°C
第 6 圖	食鹽水	20°C	焼入温度 700°C
第 7 圖	グリセリン	20°C	焼入温度 700°C
第 8 圖	變壓器油	20°C	焼入温度 700°C

左端は焼入の瞬間
右端は約 10 秒後

氣爐で 700° 或は 600°C に加熱した 第 3 圖は 600°C から 20°C の水中に焼入したものであるが 寫眞から明かなやうに試料尖端が水中に入ると直ちに熱流の噴出があつて試料全體は複雑な輪廓をもつた袋のやうなもので包まれた形になってゐる 而して此の袋は時と共に次第に大きくなり其れの擴がった範圍は其の瞬間に於ける熱流即ち噴出した水蒸氣泡の達した範圍を示すものである 其れから少し時間が経て試料が水中深く入ると 試料尖端が袋を通り抜けた有様が見られる 即ち此の場合には試料尖端部の温度が少し下つた爲めに其處からの水蒸氣の噴出は落下速度には及ばなくなつた爲めである 併し尖端部も完全に冷却を終つてゐないので其の後は最も下の方の寫眞に見られるやうに多少の熱流噴出が行はれ又上部は熱流噴出が益々著しくなつて次第に遠くまで達するやうになる

試料の温度を上げて 700°C にすると却て焼入瞬間(試料が未だ落ちつゝある間)に生ずる熱の袋が著しくなくなる傾向がある 之は多分表面に生ずる蒸氣層の影響であらう 水温を 50°C に上げた場合 熱傳導度をよくする爲めに 10% の食鹽を加へた場合 沸騰點を下げる爲めに 10% のアルコールを加へた場合も試料の落ちつゝある間即ち試料が水面に達してから約 1/10 sec 位の間の模様には大差はないが 5% の砂糖を加へて粘性係数を大にした場合には焼入瞬間の熱流噴出の跡が非常に不明瞭になつてゐることが認められる 第 4 圖は水に 10% のアルコールを加へた液の中に焼入した時に試料を吊てゐたニクロム線が切斷した場合で試料は倒れ乍ら盛に熱を出してゐる有様が明に認められる 以上は試料が水面に達してから 0.1—0.2 sec 程の間のことであるが 之から先は熱流が次第に水平に擴がり其れと同時に周圍にある液の冷い部分を暖め暫くすると對流が起るやうになるのである 又熱流噴出の速度は寫眞から測た處では水及びアルコール水で 5 cm/sec, 食鹽水で 8 cm/sec 程度である 尤も之等は數 cm に達するまでの平均速度である 食鹽水は通常の水に比べると熱傳導度が大であるが此の影響は第 5 圖と第 6 圖を對照すれば明かである 第 5 圖は水 第 6 圖は食鹽水であるが同一時間經過後は食鹽水の方が遙に著しい變化をしてゐる 之は明かに熱傳導度の差によるもので食鹽水の場合の方が噴出した蒸氣泡の熱が早く其の周圍の液に傳はるからである

又此の實驗に於ては蒸氣噴出の模様は直接には現はれて

るないが熱流の噴出といふのは蒸気泡の噴出で之れが達した範圍は即蒸気泡の達した範圍であることは肉眼的觀察によつても認めることが出來 又後述の顯微鏡的研究によつても立證することが出来る

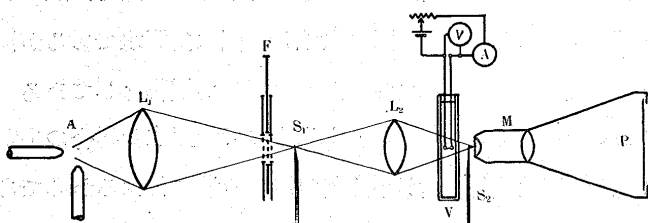
グリセリンの場合には粘性係數が大であるから焼入瞬間に於ける熱流の噴出は僅かであつて第 7 圖の如くである 従て此の場合には焼入瞬間に於て失はれる熱も少部分に過ぎない筈であつて其の後に生ずる對流によつて大部分の熱が運ばれること及び對流の起てゐる範圍は試料を包む圓筒状のものになることは既に報告せる處である¹⁾

變壓器油の場合には粘性係數が水とグリセリンの間であるために 焼入瞬間に於ける熱流の噴出は水程ではないがグリセリンよりは遙かに著しい 又此の場合熱流噴出の速度は約 2.5 cm/sec で水の約半分程であるから 熱流が擴がるのには相當時間がかかる筈である 又擴がった後の輪廓を見ると第 8 圖のやうに相當明瞭で水の場合のやうな複雑さは認められず且又完全に擴がった時には既に液の表面近くに對流によつて運ばれた熱い部分が相當多く達してゐるので最初噴出した蒸気泡が其の周圍に熱を傳へて對流を起し之が其の後に噴出した蒸気泡の壓力のために次第に外の方へ擴げられて行つたものと考へるのが至當であらう 第 8 圖の左から數へて第 1 行は焼入瞬間 第 2 行は第 1 行よりも 2-3 秒時間が経たしたもの 第 3 行はそれよりも更に 2-3 秒後のもので液面附近の模様が變てゐるのは前述の對流によつて熱が運ばれた爲めである 第 3 行以後で對流部分の幅が狭くなつて試料の形に近いものが現はれてゐるのは既に大體冷却を終て大部分の熱は對流によつて上昇して了つたことを示すものである

III. 熱流の噴出状態の顯微鏡的研究

次に試料表面から熱流の噴出する模様を更に詳しく知るために顯微鏡を用ひて觀察して見ることにした 装置は第 9 圖のやうな一種のシュリーレン法を用ひたものでアー

第 9 圖



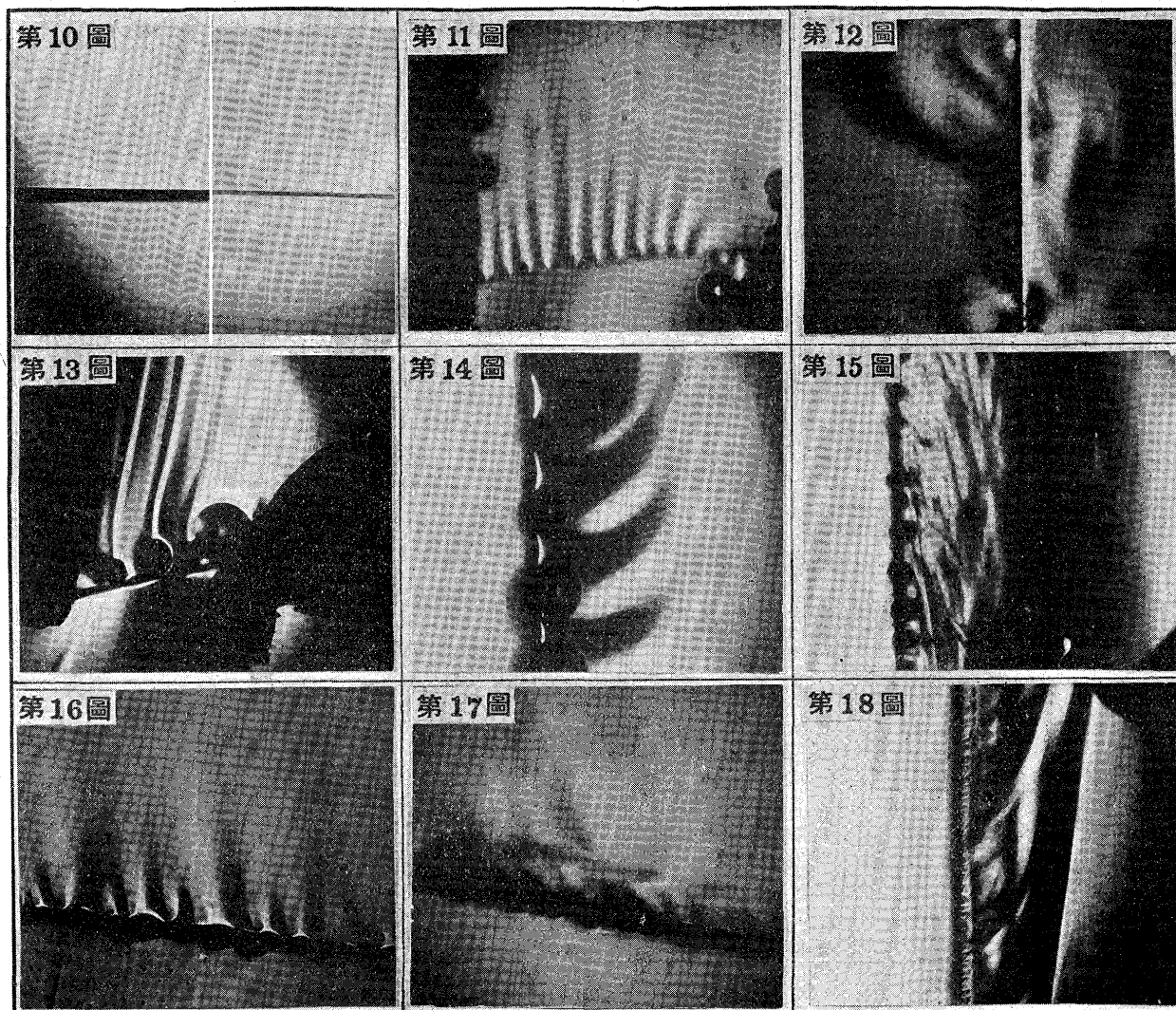
¹⁾ 前出

ク燈 A から出た光を L_1 のレンズで S_1 に集め此處に障害物を置いてアーク燈光源の像を半分程隠し更に L_2 のレンズで再び光を収斂させて顯微鏡の對物レンズの直前に像を結ぶやうにした L_2 としては焦點距離 120 mm , $F:4.5$ のレンズを用ひた S_2 は對物レンズの直前に置かれた障害物で之によつてアークの像の残りの半分を殆んど隠すやうにした V は両面平行な 2 枚のガラスで作られた器で此の中に種々の液を入れ タングステン線を入れて之に電流を通じて線を種々の温度に加熱し其れによつて生ずる對流の有様 熱流噴出の模様等を顯微鏡によつて觀測するのであるが寫眞は F のシャッターによつて $1/30\text{ sec}$ 程の露出を與へ約 20 倍に擴大して撮影することにした

タングステン線は徑 0.04 mm の纖條で之を水平及び垂直に張て電流によつて加熱したのであるが其の結果は何れの場合にも始め纖條の温度の低い時には液體の氣化は起らないで纖條が縦の時には纖條の周りに 横の時には上及び纖條よりも僅か (數分の 1 mm 程度) 下迄の液が熱せられてゐるやうである 第 10 圖に於て纖條の下に暗い部分のあるのは明かに下の方にも温度の高い部分があることを物語てゐる

纖條の温度を上げると氣化が起て來るが其の有様は液の種類によつて大いに異てゐる 先づ水の場合をとつて見ると温度が次第に昇て纖條の温度が 100°C 近くになると纖條の表面に水蒸氣の泡が出來て之が次第に成長して來る 第 11 圖は此の一例である 而して泡が出來ると却て纖條の温度が下る傾向がある 尤も温度は後に述べるやうに電氣抵抗から求めたもので纖條の平均温度を與へるものであるから泡と纖條との接觸點 (之は實際は一點でなくてある長さをもつてゐる) の温度は相當高いのであらう 又泡が出て纖條の平均温度の下るのは水の氣化によつて失はれる熱量が對流によつて失はれる熱量よりも遙に多いためであらう

更に温度を上げて纖條の温度を 100°C 以上にすると最早纖條に附着した儘で次第に成長して行くやうな泡は見られなくなつて泡は出來ても直ちに噴出して了ふやうになる そして纖條温度が 100°C をあまり超えない時には噴出の起る箇所は定まつた數箇所に過ぎない 且温度が高くなるにつれて噴出は益々劇しくなり同時に其の起る場所も次第に増して遂には纖條表面全體から間斷なしに起り同時に劇しい音をも出すやうになる 而して泡の噴出の方向は纖條



第10圖 機械油 14°C
 織條溫度 (左) 161°C (右) 14°C
 第13圖 グリセリン 13°C
 織條溫度 185°C
 第16圖 機械油 14°C
 織條溫度 407°C

第11圖 水 13°C
 織條溫度 78°C
 第14圖 ヒマシ油 17°C
 織條溫度 332°C
 第17圖 グリセリン 17°C
 織條溫度 428°C

第12圖 水 13°C
 織條溫度 106°C
 第15圖 グリセリン 17°C
 織條溫度 217°C
 第18圖 變壓油 17°C
 織條溫度 386°C

に大體直角で織條を横に張た時には下の方へも上の方と殆んど同程度の噴出が行はれる 第12圖は未だ織條の溫度が100°Cを餘り越えない場合であるから噴出の起てゐる個所は少いが之より溫度が高くなると織條全面から劇しい噴出が起るので寫眞撮影が非常に困難になる 要するに水の場合には織條の溫度が上ると先づ水熱氣の泡が出来て更に溫度が高くなると之が噴出するのであるから 先の實驗に於て焼入瞬間に見られた熱流の噴出は蒸氣泡の噴出に伴ふ現象と見て差支ない譯である 又水は斯様に100°Cを僅に超えた丈で蒸氣泡噴出が盛な位であるから焼入の場合に表面状態さへ適當ならば大部分の熱は蒸氣泡噴出即第1

の過程で失はれるものと見て差支なからう

水よりも粘性係數の大なるものでも始め對流だけで熱が失はれて行く間の模様は水と大差ないが表面に蒸氣泡が出来て來ると原則として様子が大いに異て來る ヒマシ油グリセリンの場合には織條の表面に氣泡が出来ると對流が漸く明瞭に見え出し(第13圖)次第に溫度が上ると共に對流も盛になり泡の生成及び消失(即泡の噴出による)も次第に盛になつて來るが水の場合に比すると其の程度とか對流の上昇速度などは問題にならない程小さい 而して又溫度を充分上げて蒸氣泡の噴出を盛にしても噴出は上向きだけに限られてゐて水の場合のやうな下向きの噴出は見ら

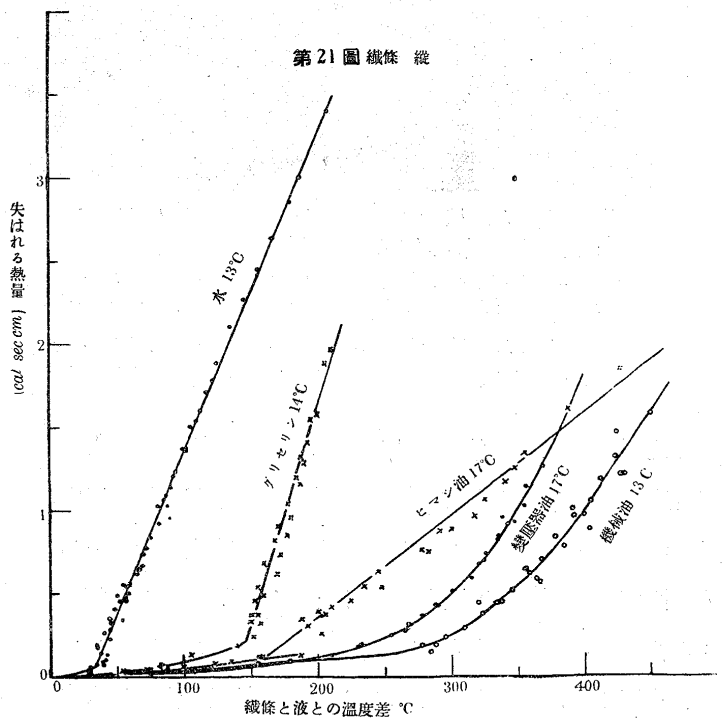
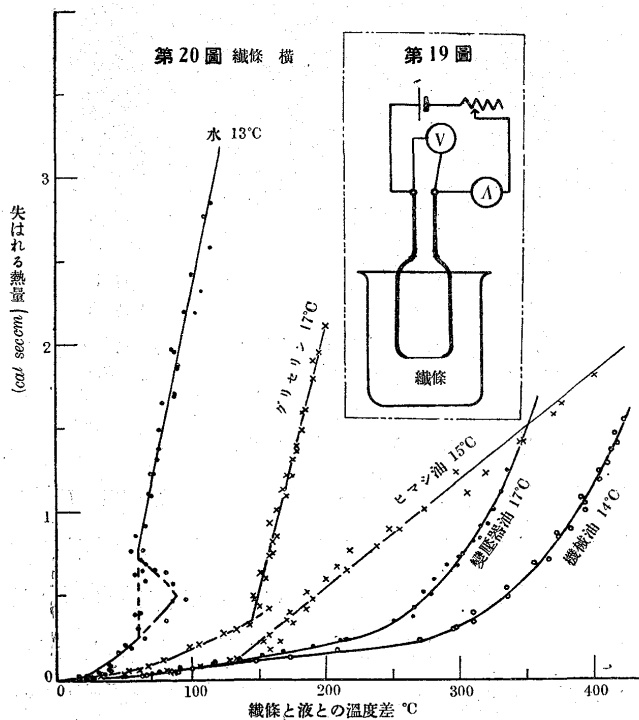
れない 之は始めから上の方は対流によって温度が上り粘性係数が小になつてゐるからである 又織條を縦にすると第15圖のやうに蒸氣泡の横への噴出が見られるが 之も寫眞の右の方にある黒い對流部分までしか達せず且又水の100°C餘りの場合と同程度の噴出を得るためには温度を相當高くする必要があるので電氣的に熱する方法では織條が燃えて不可能であつた 又ヒマシ油の場合には第14圖のやうなものが得られ泡の噴出は殆んど認められなかつたが 織條に沿ふて上昇して行くのが見られた 變壓器油 機械油の場合にも概して蒸氣泡噴出の様相などはグリセリンに似てゐたが之等のものでは泡はあまり大きくならないである 温度以上に上げると急に噴出し出して織條の上には蒸氣泡の生成噴出が絶えず行はれ同時に織條の周圍は常に蒸氣層で包まれてゐるかの如き有様を呈する 勿論之等の場合にも織條が横の時には蒸氣泡の噴出は上向きだけに限られてゐる (第16及び17圖) 又縦の場合には第18圖のやうに温度が充分高ければ織條表面に於ける蒸氣泡の噴出は相當著しいがグリセリンの場合と同様に之が對流部分を越えて冷い部分までも達してゐるやうなことはない

なつてゐるのは之等と同様に其の輪廓は對流部分の限界を示し 其の成因は先に述べた如くであると考へるのが至當であらう

IV. 各種液體の冷却能の比較

各種燒入液の冷却作用を數量的に研究するため次のやうな實驗を行つた 300 cc のビーカーに種々の液を入れ其の中に長さ約 2 cm 直徑 0.04 mm のタングステン織條を縦又は横に張り之に電流を流して第19圖のやうにして電壓及び電流を測つて單位時間に液によって失はれる熱量を計算し同時に電氣抵抗の變化から織條の温度を求めたのである 織條の温度を知るには此の方法では充分正確とは言ひ難いが實驗を比較的短時間で行ふ必要上ポテンシオメーターなどを使はずに斯様な方法をとつたのである

又抵抗から織條の温度を出すには豫めブリッジで電壓計より先の部分の抵抗を計り次に導線部分の抵抗を別に測つて其れを差し引いて織條の抵抗を別にブリッジで測つた値から計算したものとよく一致したので之を基本にして温度の計算をやつたのであるが導線の抵抗及び織條と導線との間の



從つて先の燒入瞬間に於ける寫眞のやうに縮小したものに於ては遠くまで達してゐるやうな噴出の見られないのは當然である 又第15圖の黒い部分の右端 第18圖の右の明暗の境目を示す明瞭な境界線は共に對流部分の限界を示すものであつて先の寫眞第8圖第2行目の輪廓の最も廣く

接觸抵抗などは極て僅かである等をしりかなくとも温度の値には數度の誤差を生ずるに過ぎない位であつた 又電壓計へ流れる電流の方も全く無視して差支ない程度であつた 斯様な方法で測定を行つた結果第20圖及び第21圖を得た 圖は縦軸に單位時間に織條の單位長さから失はれる熱

量 横軸に織條温度と液温との差を示したものである 液の温度に通常 15°C 内外であつて曲線に示してあるから其等の値をつけ加へると織條の温度が出るわけである 織條を縦にした場合でも横にした場合でも傾向に變りはないが横の場合の方が常に曲線の傾斜が大になつてゐる 言ひかへれば同一温度に於ては横の場合の方が單位時間に失はれる熱量が大である

又之等測定に用ひた液體の中では水が最も冷却能が大でグリセリンが之に次いでゐる 而して水 グリセリン ヒマシ油のやうな比較的成分の簡單なものでは明かに曲線の上に折點が現はれ折點附近が泡の生じ始める温度となつてゐる 之がすべて液の沸騰點よりも低いのは織條中の温度の不均一及びグリセリン ヒマシ油などでは水分其の他を含んでゐるためであらう

機械油及び變壓器油のやうな複雑な成分のものでは圖に示すやうに曲線の折點は明瞭でない 又之等の場合には織條温度が低い時には冷却能は小であるが温度が高くなるとすべての成分が氣化し易くなるためか冷却能は急に増して來る傾向がある ヒマシ油の場合には温度が増しても冷却能の増加の仕方は著しくはない

之等各種液體の温度の低い場合即蒸氣泡を生じない場合の冷却能は Davis¹⁾ が理論的に見出し實驗的に證明した關係即單位時間に織條の單位長さから失はれる熱量 h は $k(ac/kv)^n$, 但し $n=0 \rightarrow 1/3$, に比例するといふ關係を満足するものである 但し此の式中で a は體膨脹係數 k は熱傳導率 v は動的粘性係數 c は熱容量である 勿論此の關

係は温度差の小さい時だけに成立するものであるが 圖の曲線の傾きから想像されることは 温度差の低い場合即上の關係の成立する場合の曲線の傾きと泡を生じて氣化の起りつゝある場合の傾きとの差が氣化によつて運ばれる熱量の一つの目安を與へるものではあらうと思はれるのである

V. 總 括

以上の實驗結果を總括すると次の如くである

1. ニクロム棒を種々の液の中に焼入して焼入瞬間に於ける熱流發生の有様をシュリーレン法で活動寫眞的に撮影した そして水及び水溶液の場合には蒸氣泡(熱流)の放出が特に著しく 食鹽水の場合には噴出した蒸氣泡から熱の周圍に傳はることが早いことを見出した

2. タングステン織條を種々の液體中に入れ之に電流を通じて熱し 熱の奪はれる有様をシュリーレン顯微鏡法で觀察して 蒸氣泡の生成及び放出の機構を明かにし且又水の場合には劇しい蒸氣泡の噴出があつて之が遠くまで達し其の方向も横向き織條では下の方に向ふものも相當多いが他の油等の場合には噴出もあまり遠くには達せず横向き織條の場合には噴出方向は上だけに限られてゐること

3. 電流で熱せられたタングステン織條から單位時間に液によつて運ばれる熱量と織條温度との關係を測定して第 20 及び 21 圖のやうなものを得た

終りに本實驗をなすに當り田中晋輔先生の賜りたる御懇篤なる御指導に對し厚く感謝の意を表する

(昭和 12 年 4 月 21 日)

¹⁾ Phil. Mag. 43 (1922) 329