



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	デュラルミンの復元現象の實驗的研究
Author(s)	幸田, 成康
Citation	Memoirs of the Faculty of Engineering, Hokkaido University, 8(1), 107-124
Issue Date	1948-02-20
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/37741
Type	departmental bulletin paper
File Information	8(1)_107-124.pdf



デュラルミンの復元現象の實驗的研究

教授 幸 田 成 康

(昭和 20 年 11 月 9 日)

Experimental Studies on the De-hardening Phenomena of Duralumin Alloy

Shigeyasu Kôda

I researched on the de-hardening phenomena of duralumin alloy and got next results.

(1) If the optimum temperature of tempering is chosen, we can see the next five stages of change on prolonging the time of tempering; first, little softening and slow speed of re-age-hardening at room temperature; second, large softening and fast re-age-hardening speed at room temperature; third, large softening and little re-age-hardening; forth, hardening again and no re-age-hardening; fifth, softening again and no re-age-hardening. Softening during the first and second stages is due to the de-hardening, and hardening during the forth and softening during the fifth are due to precipitation of a new phase.

(2) By the low-temperature heat-treatment which results large softening due to the de-hardening (that is so-called "de-hardening heat-treatment"), duralumin alloy gets the most large capacity of the room temperature age-hardening again. This is a characteristic of duralumin.

(3) Slow re-age-hardening speed at room temperature after heat-treatment is explained its cause by considering the de-hardening phenomena microscopically.

(4) Physical and mechanical properties of the de-hardened duralumin are almost the same as the quenched one, however chemical properties are not the same. I concluded that very small amount of solute atoms will precipitate by the so-called de-hardening heat-treatment.

目 次

I 緒 言	108
II 硬度測定による實驗	108
III 抗張力及び電氣抵抗測定による實驗	110
IV デュラルミン復元の特性の考察	114
V 遅い再時効硬化速度に對する考察	115
VI 復元せるものの諸性質	117
VII 定速加熱による實驗	119
III 鑄造デュラルミンに關する實驗	121
K 實 用 的 考 察	123
X 結 言 一 總 括	123

I. 緒 言

アルミニウム合金の復元現象は 1929 年に Freankel u. Marx,⁽¹⁾ Preston and Gayler⁽²⁾, Meissner⁽³⁾ により発見せられたといふが、彼等は單に常溫時効硬化したものを焼戻すと、析出による硬化を示す前に一旦軟化した状態を経過することを認めたのみで、復元 (Rückbildung) といふ言葉の意味する焼入状態への復歸即ち常溫時効硬化能の再獲得をはつきり認めたわけではない。今日言はれる復元に對する研究は、その意味から、1938 年 頃から行はれた Auer⁽⁴⁾, Körter⁽⁵⁾, Sykes⁽⁶⁾, Dreyer⁽⁷⁾, Preston⁽⁸⁾ より始つたと見做すのが至當であらう。その結果、その頃既に定性的説明としては完成したかに見えた時効硬化理論は再考する必要が生じ、又その故に多くの研究者の注意を呼び、わが國に於ても多數の研究があらはれた⁽⁹⁾⁻⁽¹⁸⁾。

自分も驥尾に付して 1940 年 頃よりこの研究に従事して來た者であるが、今回デュラルミンに關し實驗的に明らかにし得たことを述べたい。この種の研究にデュラルミンの如き組成上複雑なものを用ひることは、理論的考察上からは拙いのであるが、衆知の如くデュラルミンは時効硬化性の大きい合金の代表であり、又實用合金としても用途の廣いものなので敢えてこれを第一の研究對象とした。

II. 硬度測定による實驗

デュラルミンの復元現象を硬度測定によつて行つた研究としては 1939 年 の Dreyer⁽⁷⁾, 1940 年 及び 1942 年 の朝倉⁽⁹⁾⁽¹³⁾, 1943 年 の荻野⁽¹⁵⁾ 1944 年 の佐藤⁽¹⁷⁾ があり、今更特記すべき事も無いが、これが出發點となるので繰返してみた。

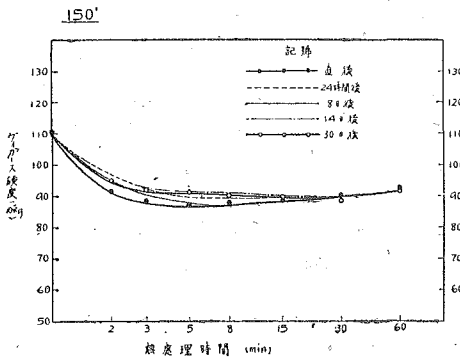
試料は押出及び引拔で製した直徑 25 mm の丸棒より、厚さ 5 mm の半月形の硬度試片を採取、Vickers 硬度計により硬度變化を測つた。試料の化學組成は第 1 表の如し。これを 500° 1 hr 加熱後水焼入し 1 ヶ月以上常溫時効せしめた上、色々の温度で色々の時間油槽中で焼戻を行つた。

- (1) Freankel, W. u. Marx, I., Z. Metallk., 21 (1929) 2.
- (2) Preston, G. D. & Gayler, M. L. V., J. Inst. Metals, 41 (1929) 191.
- (3) Meissner, K. I., J. Inst. Metals, 41 (1929) 234.
- (4) Auer, H. u. Siemens, K. Z. Metallk., 30 (1933) 86.
- (5) Körter, W. u. Kam, K., Z. Metallk., 30 (1938) 320.
- (6) Swindells, N. and Sykes, C., Proc. Roy. Soc. A. 163 (1938) 237.
- (7) Dreyer, K. I., Z. Metallk., 31 (1939) 147.
- (8) Preston, G. D. and Guinier, A., Nature 142 (1938) 539.
- (9) 主なるものを擧げることとする 朝倉潮, 日本金屬學會誌, 4 (1940), 394.
- (10) 幸田成康, 日本金屬學會誌, 5 (1941) 479.
- (11) 山口珪次, 應用物理, 10 (1941) 219.
- (12) 五十嵐男, 住友元夫, 中田兵次, 日本金屬學會誌, 5 (1941) 462.
- (13) 朝倉 潮, 日本金屬學會誌, 6 (1942) 156.
- (14) 住友元夫, 日本金屬學會誌, 6 (1942) 209.
- (15) 荻野尚美, アルミニウム, 3 (1943) A138.
- (16) 篠田軍治, 日本金屬學會誌, 7 (1943) 127.
- (17) 佐藤瑞穂, 日本金屬學會誌, 8 (1944) 459.
- (18) 西山善次, 日本金屬學會誌, 8 (1944) 66.

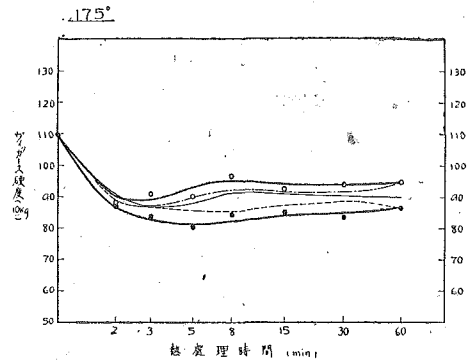
第1表 試料の組成

成分	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Al
%	4.10	0.50	0.40	0.26	0.26	殘

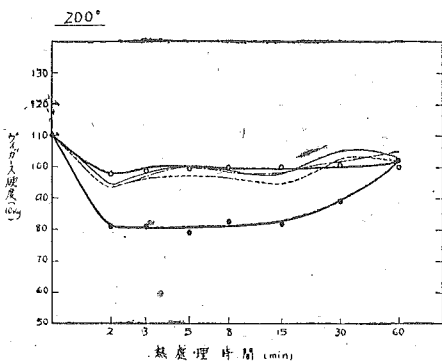
その結果は第1~6圖で、横軸が焼戻時間、曲線中最下のものは焼戻直後水冷直ちに測つた硬度、その上の四つの曲線はそれを 30° に1日乃至30日放置した結果である。本實驗試料の 500° 以上の水焼入直後の硬度は 62 位故、復元軟化は完全とは言へないが、 $200^{\circ} \sim 275^{\circ}$ のものには明らかに相當の復元軟化とそれに次ぐ著しい再時効硬化があらはれてゐる。變化の傾向は次の抗張力による場合と相似であるから、考察はそこで行ふことにする。



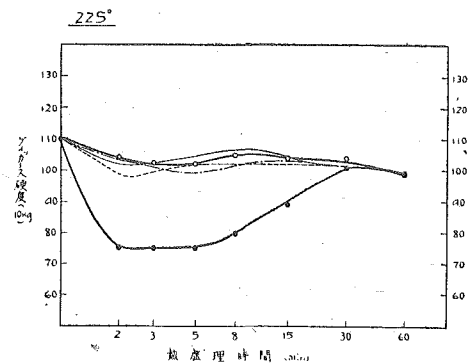
第1圖 常溫時効硬化せるデュラルミンを 150° に焼戻處理せる場合



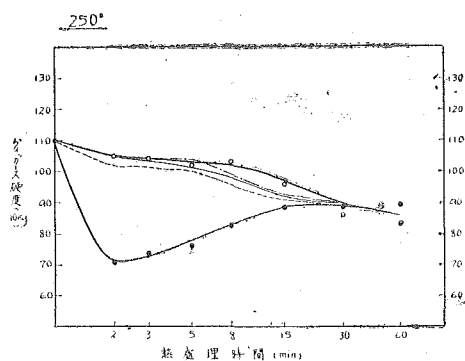
第2圖 175° に焼戻處理せる場合



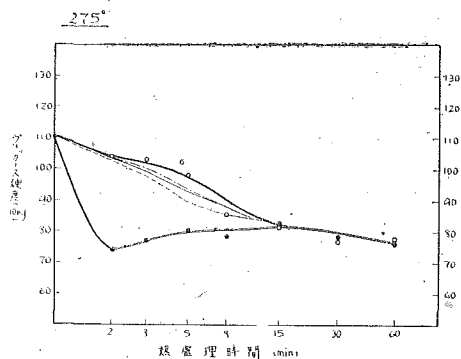
第3圖 200° に焼戻處理せる場合



第4圖 225° に焼戻處理せる場合



第5圖 250° に焼戻処理せる場合



第6圖 270° に焼戻処理せる場合

III. 抗張力及び電気抵抗測定による實驗

電気抵抗による實驗は、硬度測定と共に朝倉⁽⁹⁾、佐藤⁽¹⁷⁾が行つてゐるが、抗張力は行つてゐない。硬度測定に比して抗張試験は試片が細い故、加熱時間が正確な爲め測定上の誤差が少いことと、同時に求められる伸が組織變化を知る有力な手懸りになるといふ利益がある。

用ひた試料は 2 mm のデュラルミン線で、第2表の如き組成及び第3表の如き性能を有してゐる。

第2表 試 料 の 組 成

成 分	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Al
%	4.11	0.49	0.44	0.30	0.27	残

第 3 表

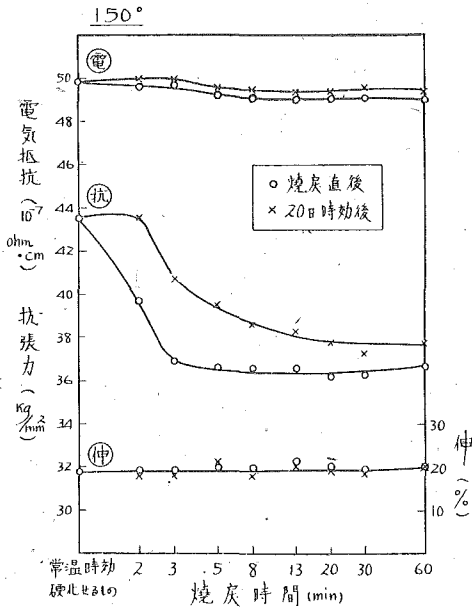
	抗 張 力 kg/mm ²	伸 %, 250mm	電 氣 抵 抗 x10 ⁻⁷ ohm cm, 20°
焼 入 直 後	32.0	19.6	47.8
常 温 時 効 硬 化	43.5	19.0	49.8

かゝる線の充分常温時効硬化したものを、150°, 175°, 200°, 225°, 250° で夫々 2, 3, 5, 8, 13, 20, 30, 60 min 焼戻後直ちに水冷して先づ直後に抗張試験、電気抵抗測定を行ひ、なほこれを 30° に 20 日間常温時効せしめて再び測定を行つた。これに依り復元による軟化とそれから再時効硬化の有無及び程度が知られる。

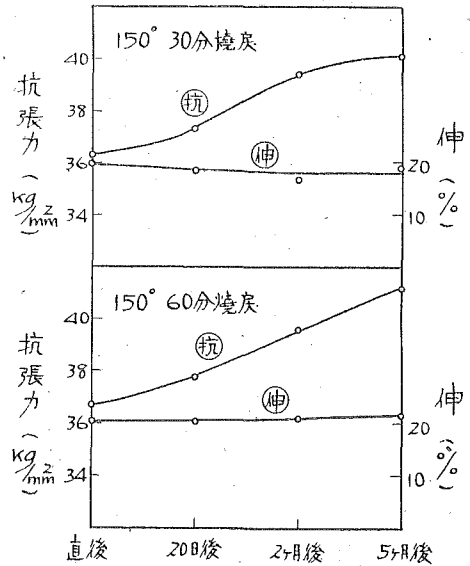
次にその實驗結果を見やう。

(1) 150° 焼戻處理の場合 (第7圖 参照)

150° の熱處理でも相當に抗張力が低下するが、焼入直後の 32 kg/mm² には至らない。又 20 日間の 30° の放置によつても余り再時効をしない。硬度測定の場合の第1圖にはこの傾向が尙一層強くあらはれてゐる。然しこれは回復する能力が無いのでは無く、第8圖の如く再時効硬化の速度が極めて遅い爲めである。



第7圖 150° 焼戻



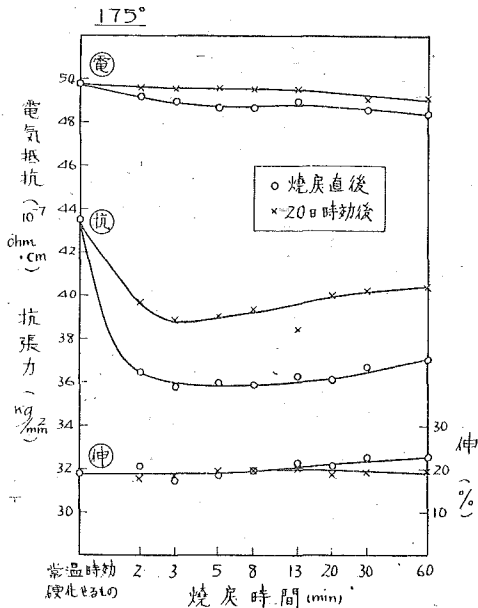
第8圖 150° に 30分 或は 60分 焼戻せるものの再時効硬化 (放置温度 30°)

(2) 175° 焼戻處理の場合 (第9圖 参照)

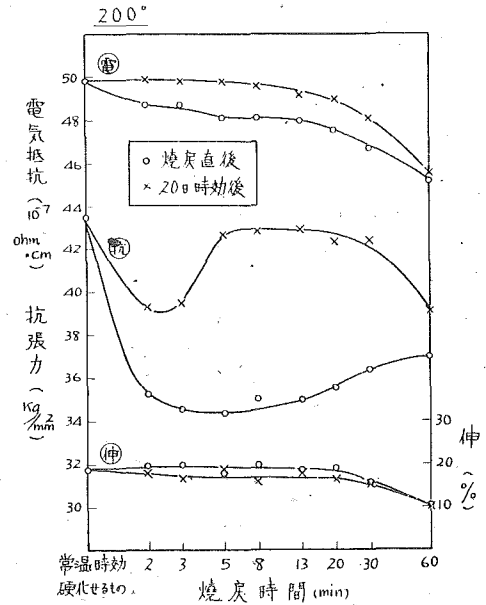
復元による軟化は 150° の場合と大體同じであるが、再時効硬化速度が前より増した爲め 20 日後の抗張力が稍増してゐる。硬度測定の方も同じ傾向を示してゐる。尙第9圖の 60 分焼戻で熱處理直後の抗張力が稍増加の傾向を見せてゐるのは、200° 焼戻の場合より考へて所謂析出硬化即ち硬化に都合のよい様な大さの析出粒子 (中間相であつてもよい) が、組織の一部に出来はじめた爲であらう。そこで電気抵抗が稍下るのもこれを裏書するものと思ふ。

(3) 200° 焼戻處理の場合 (第10圖 参照)

復元による軟化は相當に著しい。然し焼入直後の 32 kg/mm² には達していない。150°, 175° で見られた再時効硬化速度のおそいところが、200° では 2~3 min の處理のところにあはれ、それに次ぐ 5~20 min のところは復元軟化も再時効硬化も共に盛で、再時効後は略はじめに近い値に達し



第9圖 175° 焼炭



第10圖 200° 焼炭

てゐる。又直後の抗張力が 30 min より 60 min へと増してゆくが、これは 60 min のもので再時効能の少いこと及び電気抵抗の低下から推察される様に、析出硬化を作用する粒子が組織一部に出来はじめたことを意味する。復元処理の前期のことは後で論ずるとして、少くとも後期には相當局部的の析出現象が伴はれてゐると考へられる。

(4) 225° 焼炭処理の場合 (第11圖参照)

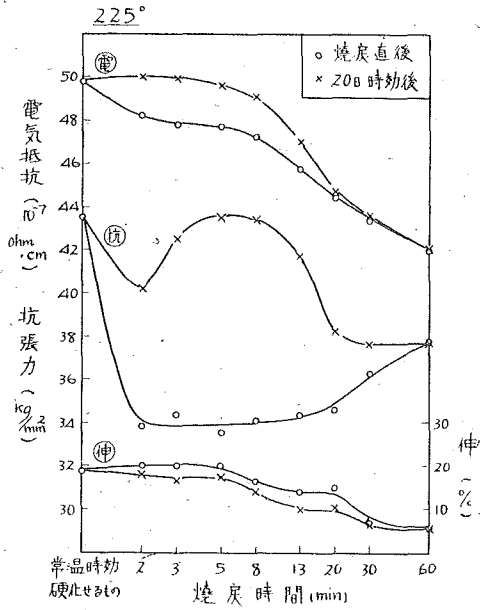
こゝらが最適の復元温度らしく、復元軟化も再時効に依る硬化も共に顯著な個處が見られる。又析出による抗張力の山もはつきりし、そこでの電気抵抗と伸の減少はこれを裏書きし、60 min では再時効能無く完全な析出硬化であることを示してゐる。硬度に於ても傾向は同様。たゞ析出硬化の山は硬度測定では伸の減少の影響で強くあらはれてゐる。

(5) 250° 焼炭処理の場合 (第12圖参照)

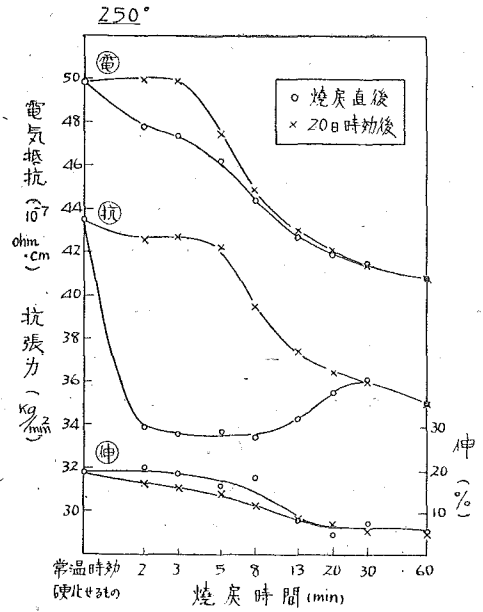
最適の復元処理が 2~5 min のところにあはれ、30 min に析出硬化の山が見られる。傾向としては 225° の時の後半と同じであるが、たゞ温度が高い爲め析出粒子の凝集がはげしく、析出硬化の山が前より低い。硬度測定の結果も略同様である。

(6) 275° 及び 300° の焼炭処理の場合 (第13, 14圖参照)

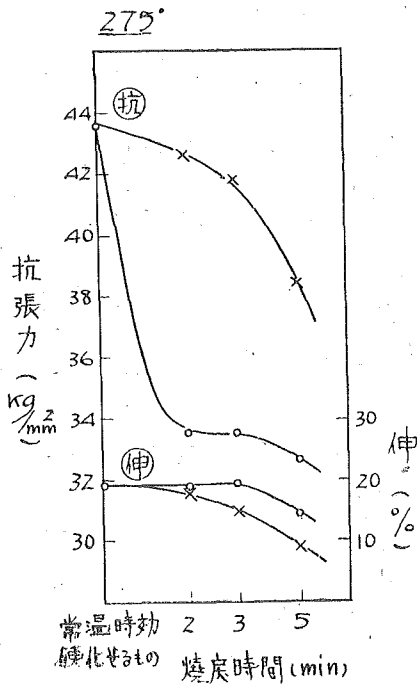
再時効能より見ると復元軟化も相當の様であるが、一方析出粒子の凝集も極めて著しい。



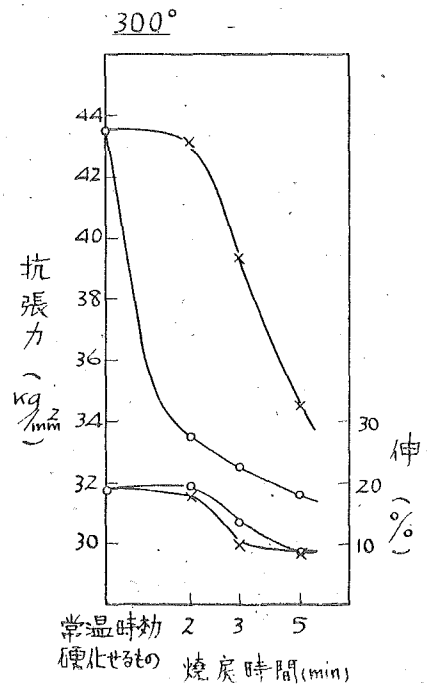
第11圖 225° 焼戻



第12圖 250° 焼戻



第13圖 275° 焼戻



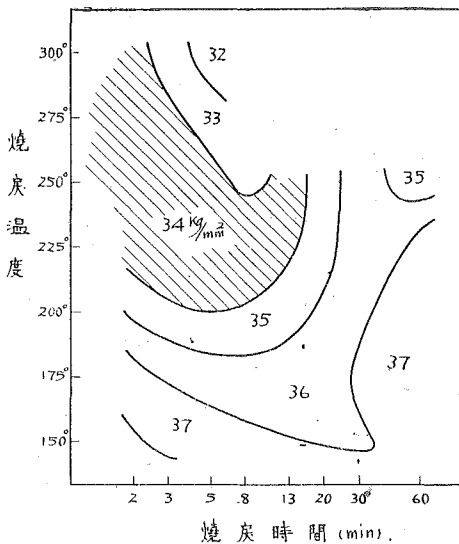
第14圖 300° 焼戻

IV. デュラルミン復元の特性の考察

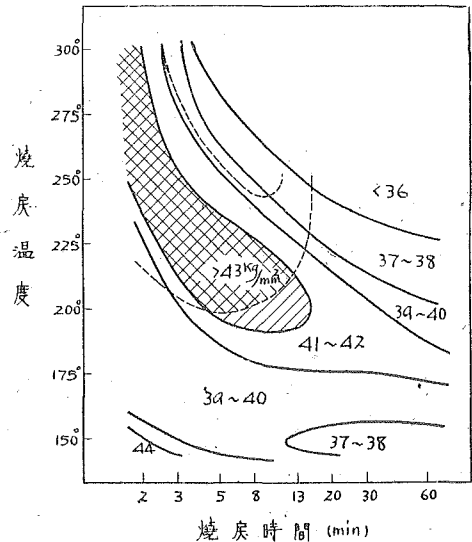
以上実験をもとにデュラルミンの復元の現はれ方を考へるに次の諸點に特性が見られる。特にこゝにデュラルミンの特性とあらためて言ふのは、他種の合金では必ずしもデュラルミンの場合の如き復元の現はれ方をしない故である⁽¹⁹⁾。

(1) デュラルミンの焼戻處理に伴つて生ずる變化は、第1, 復元軟化小, 再時効硬化遅, 第2, 復元軟化大, 再時効硬化大, 第3, 軟化大, 再時効硬化小, 第4, 析出硬化, 再時効硬化無し, 第5, 析出に伴ふ軟化, 當然再時効能なし, の5段階が順次あらはれて來ると見られる。但しこの各段階をすべての焼戻溫度で認めることは勿論出來ず, 例へば本實驗で第1段階のみを示した 150° 焼戻では更に長時間焼戻せば恐らく第2, 第3を経ないで第4の析出硬化に至るかも知れないし, 300° などでは純粹な第1段階や第4段階はとても得られない。然し適當な焼戻溫度を選べば, これ等の段階に應じて順次性質が變つてゆくのが認められることは, 他の合金と比較して矢張り一つの特性と考へられる。

(2) 次に以上の實驗結果をもとに焼戻處理直後の抗張力の等しい範圍を, 溫度を縦軸に, 時間を横軸にして求めると第15圖を得る。これに對し20日時効したものを描けば第16圖で, 20日時効後の抗張力最大の範圍が丁度 34 kg/mm^2 といふ第16圖の軟い範圍と大體重なる。この軟い範圍中



第15圖 熱處理直後の抗張力の等しい範圍



第16圖 20日時効後の抗張力に等しい範圍

--- 前圖 34 kg/mm^2 の範圍

(19) 詳細は追つて發表するが, この意味については次の報文参照されたい 幸田成康, 應用物理, 11 (1924) 12.

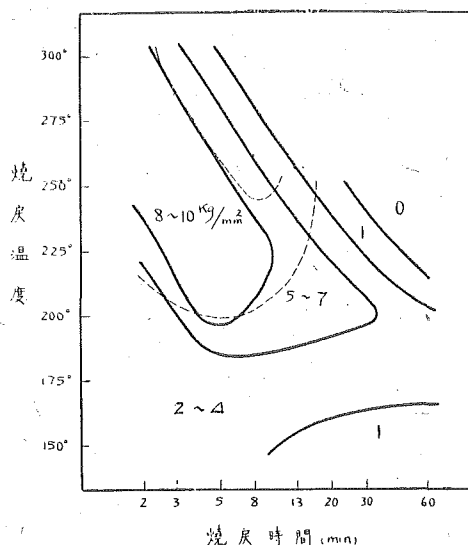
再時効能を持つところは復元に原因する軟化である。又焼戻直後と再時効後の抗張力の差をとつて同様の圖を作れば第 17 圖で、結局デュラルミンに於ては次の特性が認められる。即ち“デュラルミンは復元による軟化の著しい個處が丁度再時効硬化能も大きく、又再時効硬化後の抗張力も大きい。”

V. 遅い再時効硬化速度に對する考察

焼入したデュラルミンは不安定な過飽和固溶體なので、常溫に於ては、化合物の析出した平衡状態に移行しようとする動因を内在する。この内在した動因に由來する移行はデュラルミンでは化合物析出といふところ迄に至らずに、化合物を作る可き溶質原子が局部的に集合する状態までで止まつてしまふ。これがデュラルミンの常溫時効硬化の現象で、移行がこゝで止まつてしまふのは、局

部的集合に起因する歪が移行をさまたげる作用をするからと言はれてゐる。局部的集合の存在は Calvet, Jacquet and Guinier⁽²⁰⁾ その他の研究で確かであるし、又その原因で歪が生ずることも Hengstenberg u. Wassermann⁽²¹⁾ その他の研究で確かである。しかしその歪が原子の移動即ち一種の擴散を妨げるといふのは、一般的見解に反する⁽²²⁾。むしろこの説明は Becker の如き理論⁽²³⁾ を局部的に集合した原子の群に對し多少無理ではあるが適用してその自由エネルギーより説明す可きものと思ふ。

この事はさておきかゝる常溫時効硬化した状態を原子的に即ち微視的に見る時、所謂局部的集合と言つても、その發達の程度は決して一樣と言ふことは出來ぬ。ことに實際の結晶では場所による相違も考へられる故、一つの結晶粒中でも相當進んだ集合状態にあるところもあるし、低度の集合状態にあるところもあらう。従つてかゝるものに對し復元せしむる處理をした時に、必ずすべての集合状態が解散してしまふとは限るまい。デュラルミンは性質變化より考へて適當な焼戻溫度と時間を選ぶと所謂復元處理によつて、微視的にも略完全な復元が行はれるらしい。しかし焼戻溫度が低いと、微視的な復元は低度の集合状態のもののみに行はれ、高度の集合状態のものはそのまゝに



第 17 圖 焼戻直後と再時効後の抗張力の差

--- 焼戻直後に 34 kg/mm²
以下になる範圍

(20) Calvet, J., Jacquet, P. and Guinier, A. J. Inst. Metals, 65 (1939) 121.

(21) Hengstenberg, J. u. Wassermann, G. Z. Metallk. 23 (1931) 114.

(22) Brick, R. M., Trans. A.I.M.E. Metals Div., 117 (1935) 100; 橋口隆吉, 日本金屬學會誌, 7 (1943) 313.

(23) Becker, R., Ann. Physik, 32 (1938) 128; 篠田軍治, 日本金屬學會誌, 7 (1943) 127.

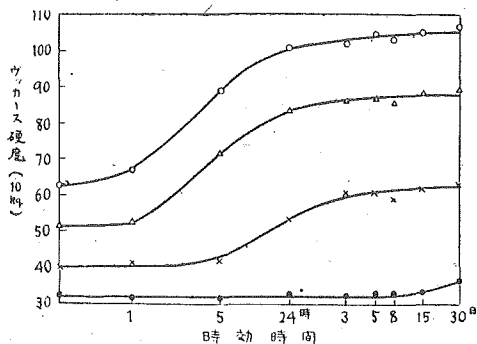
止るか或は更に高度の方へ進行する。その結果として例へば 150° 焼戻直後のものに於ては、その組織は微視的に復元したところとさうでないところの重疊したものとなつてしまふ。それ故かゝるものの焼戻後の再時効は當然復元したものによつて行はれるわけで、一方に復元しないものが存するのであるから不安定度或は過飽和度は焼入状態のものよりも低いといふことが出来よう。従つてこの様なものの再時効硬化速度のおそいのは、過飽和度の減少によつて説明されなければならない。

この考へのもとに前記のデュラルミンをうすめた試料を作り 500° より焼入して時効硬化速度を調べてみた。第4表はその組成で第18圖は實驗結果である。

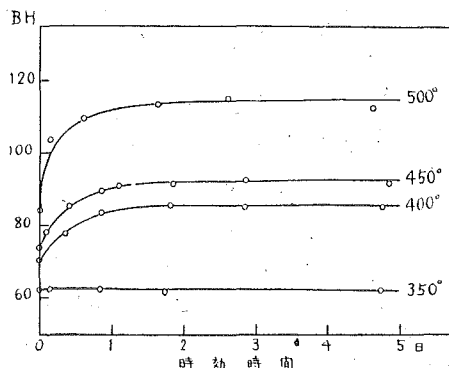
第 4 表 試 料 組 成

試料記號	<i>Cu</i>	<i>Mg</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Si</i>	<i>Al</i>
G 1	1.14	0.17	0.11	0.37	0.28	殘
G 2	2.04	0.28	0.21	0.37	0.27	〃
G 3	3.00	0.42	0.31	0.37	0.32	〃
G 4	4.09	0.50	0.40	0.38	0.30	〃

又過飽和度を變へる方法として焼入温度を變へてもよく、古い今野⁽²⁴⁾の研究にこの場合に好都合な實驗結果がある。(第19圖)



第18圖 うすめたデュラルミンの常温時効硬化速度



第19圖 焼入温度を變へた時の常温時効硬化速度(今野)

いづれに於ても上の考へを肯定する結果が得られてゐる。

以上で 150° 乃至 175° の時のことは説明出来たが、 200° 乃至 225° の極く短時間の復元軟化の著しいものに於ても尙再時効硬化のおそい個處があらはれるのは何故か。これに對しても矢張り同

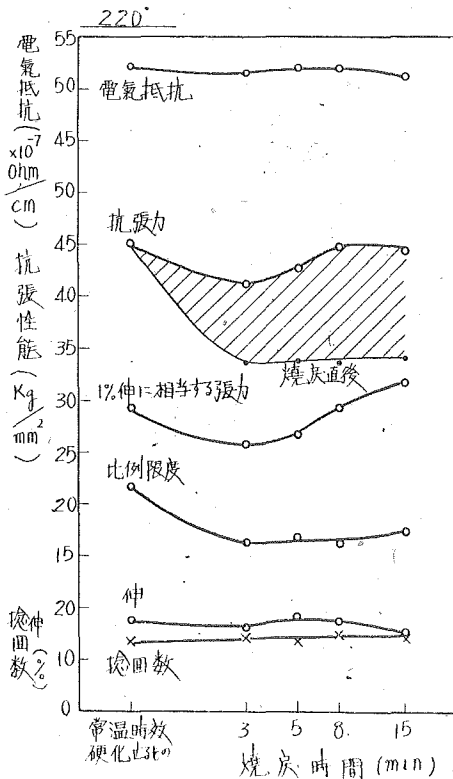
(24) 今野清兵衛, Science Rep. Tohoku Imp. Univ. 11 (1922) 269.

様の説明でよいと思ふ。たゞ焼戻温度が高いだけに今度は相當高度の集合状態のものまで微視的に復元するであらうが、たゞこの様な高度のものは餘り硬化の作用をしないと考へればよい。即ちこの場合にも餘り硬化に影響を持たない高度の集合状態のものが残存する爲め、前と同様の理由により再時効硬化速度がおそいのであらう。

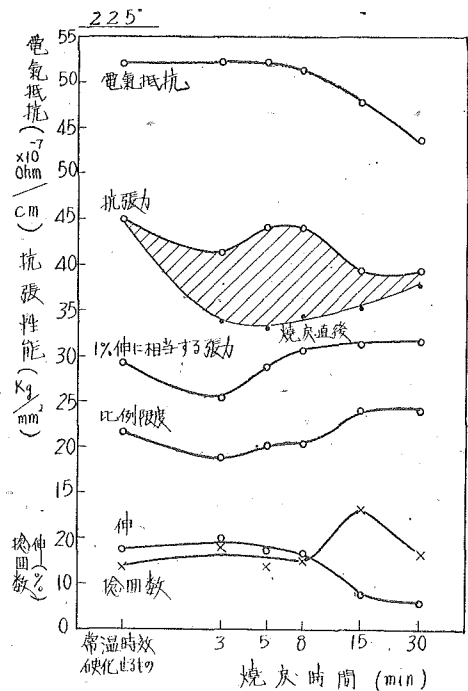
VI. 復元せるものの諸性質

デュラルミンが所謂復元處理によつて焼入状態に近い性能のものに復歸し、再度の時効硬化によつて再び普通の焼入常溫時効硬化のものと似た性能になる事は、從來の研究或は上述の實驗によつて一應確められてゐる。然し他の性質が總て同じになるかどうかは、上の考察で述べた根據より見てなほ疑問の餘地がある。この問題の解決法としては、復元した状態での色々な性質を焼入した状態のものと比較すればよいわけであるが、これは共に常溫時効硬化能を持つ故實驗が困難である。依つて再度の時効硬化をしたものと普通の焼入常溫時効硬化したものとの性質比較を行つた。本實驗に對する詳細は既に發表⁽¹⁰⁾した故、こゝではその結果のみを述べる。

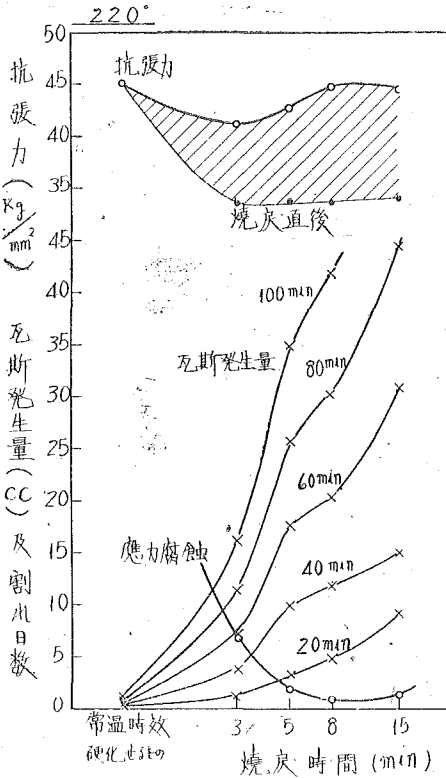
試料は 2 mm デュラルミン線で、抗張試験、捻回試験、電氣抵抗測定、應力腐蝕試験、腐蝕による



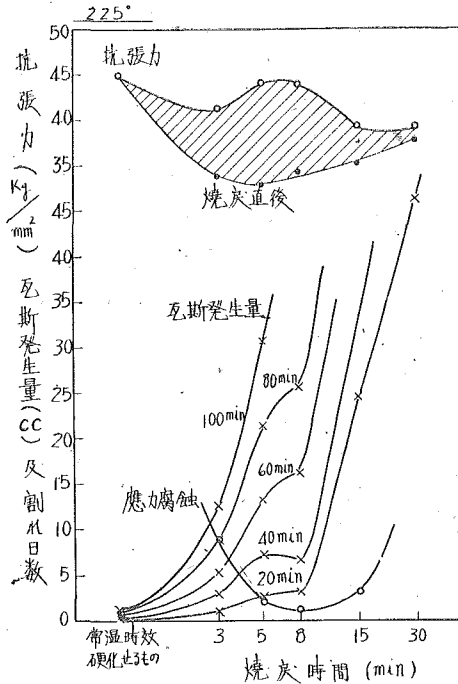
第 20 圖 220° 焼戻の時



第 21 圖 225° 焼戻の時



第22圖 220° 焼戻の時



第23圖 225° 焼戻の時

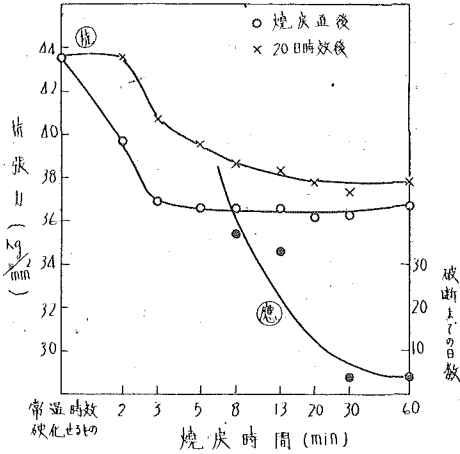
瓦斯発生量試験を行つた。結果を第20～23圖に挙げる。

この結果より先にも結論した如く⁽³⁰⁾，“復元し再時効硬化したものは、焼入時効硬化したものと機械的性質は略等しいにかゝはらず、腐蝕の如き化学的性質に明瞭な差異がある。この事實は復元せしむる熱処理により、勿論部分的にはあらうが、例へば粒界或は粒内滑り面といふところに既に微量の析出が生じてゐると考へざるを得ない。勿論大部分に於て過飽和固溶體への復歸が行はれてゐることには論は無い”といふことになる。この時早期析出の場所として粒界或は粒内滑り面を考へたのは、析出過程の顯微鏡的研究に於て屢々かゝる現象が見られるからである。⁽²⁰⁾⁽²⁵⁾

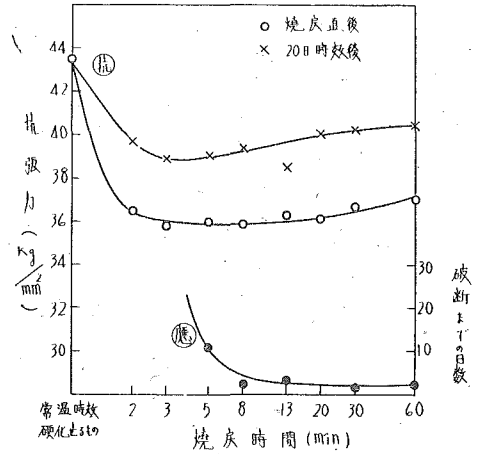
この様に 225° 位で復元処理をしたデュラルミンは明瞭に應力腐蝕性が悪い。依つてこれが他の焼戻温度の時にどうなるかを見る爲め、II に用ひた試料の電気抵抗を測つた試片を用ひて全く同じ方法で應力腐蝕性の試験を行つた。結果は第24～27圖で一般に應力腐蝕性が悪い。これより見ると、復元処理をも含む一般の焼戻処理に於て、高度の集合状態を形成するものの一部は析出（化合物とは限らず中間相でもよい）まで行くと推量される。殊に應力腐蝕が結晶粒界の問題だとすると

(25) Fink, W. L. and Smith, D. W., Trans. A.I.M.E. Metals Div., (1936) 284; Schulz, E. u. Wassermann, G., Z. Metallk. 32 (1940) 415.

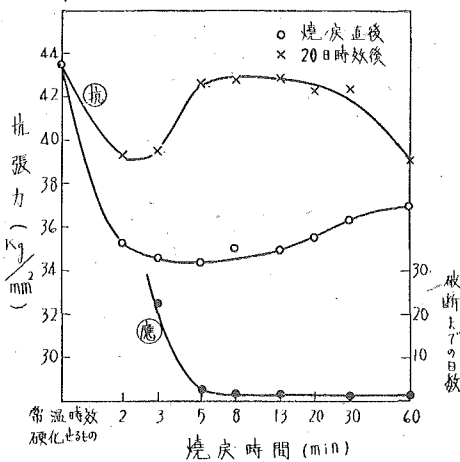
粒界への析出への可能性が濃い様だが、デュラルミンに於ては粒界と滑り面とは略同時であらう。朝倉⁽⁹⁾が認めたデュラルミンの焼戻過程中に滑り面への析出に先立ち結晶粒界が腐蝕され易くなるといふ現象は、以上の應力腐蝕の問題と関連があると思はれる。



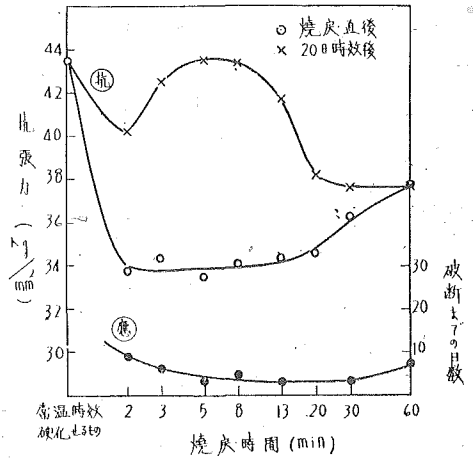
第24圖 150° に焼戻処理せる場合の
應力腐蝕試験結果



第58圖 175° に焼戻処理せる場合の
應力腐蝕試験結果



第26圖 200° に焼戻処理せる場合の
應力腐蝕試験結果



第27圖 225° に焼戻処理せる場合の
應力腐蝕試験結果

VII. 定速加熱による實驗

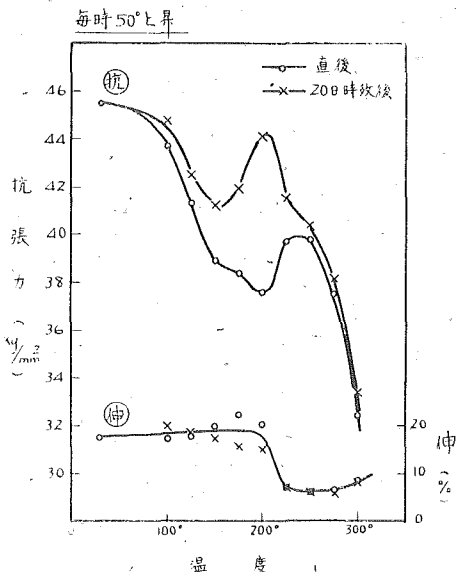
以上の各實驗は、一定温度で時間を変へて熱處理した場合で、従つて加熱方法としては急熱したことになる。こゝでは徐熱した時例へば常溫時効硬化したものを 5° の溫度上昇に 3 min かゝるといふ様に熱していつた時、復元状態が得られるか否かと言ふことである。試料は今迄と同じ 2 mm

の線で必要数の線を電気爐中に入れ、定速度で加熱し、所定温度になる毎に取出して水冷して一組は直後に、一組は 20 日 30° 放置後に抗張試験を行つた。加熱速度は毎時 50° (6 min 間に 5°), 100° (6 min 間に 10°), 150° (6 min 間に 15°), 200° (6 min 間に 20°) の 4 種類行つた。なほ毎時 100° のものに對しては、高温電気抵抗の實驗をも行つてみた。

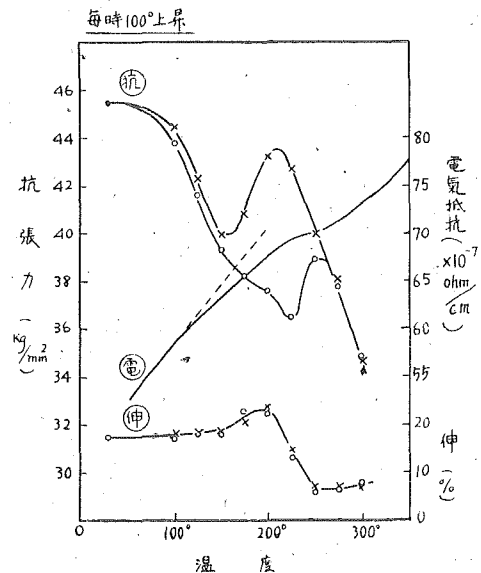
第 28~31 圖は實驗結果で、孰れに於ても 175°~225° の範圍で、焼戻直後と 20 日放置後の抗張力とが異り、明瞭な再時効硬化能を示してゐる。従つて焼戻直後の抗張力曲線の示すこの所の軟化は復元による軟化であり、それに次ぐ 250° 位の山は析出硬化たることが推察される。このことは第 26 圖の電気抵抗の曲線からも明らかで、250° あたりの電気抵抗減少は析出の直接的な證據である。

以上の如く如何なる加熱速度でも復元状態が得られてゐるが、4 つの圖を細く調べると、復元軟化は毎時 200° のものが著しく、“復元状態は相當おそい加熱速度でも得られるが、少しでも早く加熱された方がよい”ことを示してゐる。又この場合にもデュラルミンの特性として挙げた 5 つの段階及び復元軟化の著しいところが最も再時効も著しいのが認められる。ただ再時効硬化速度については、定速加熱で得られた復元状態は餘り純粹な状態（微視的にみて完全でない）で無いらしく再時効硬化をしらべてみるとおそい傾向を持つてゐる。

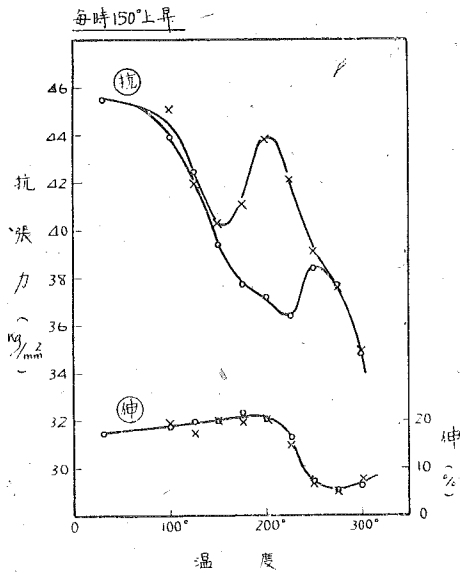
一方析出硬化と加熱速度の關係は、加熱速度のおそい方が析出硬化の山が高く、析出硬化に都合のよい析出粒子の状態になることを表はしてゐる。結局復元状態を得るには急熱がよく、析出硬化を示すには徐熱が適當してゐると言へよう。



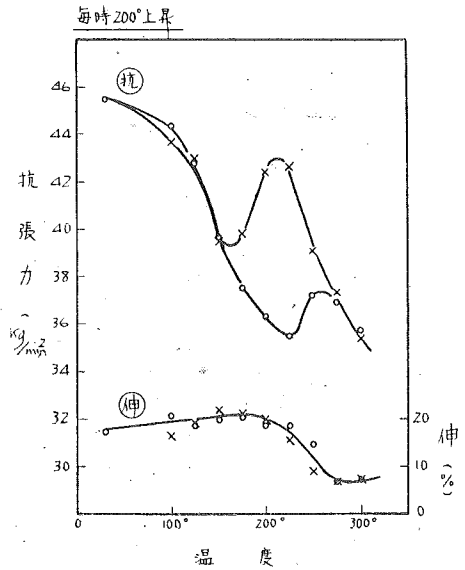
第 28 圖 毎時 50° で定速加熱せる場合



第 29 圖 毎時 100° で定速加熱せる場合



第30圖 毎時150°で定速加熱せる場合

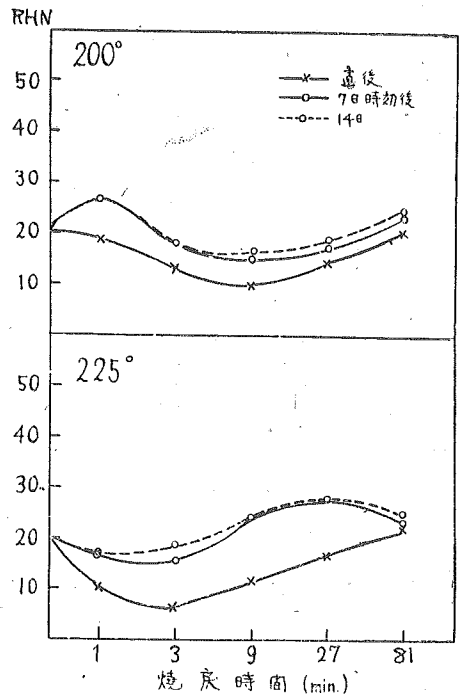


第31圖 毎時200°で定速加熱せる場合

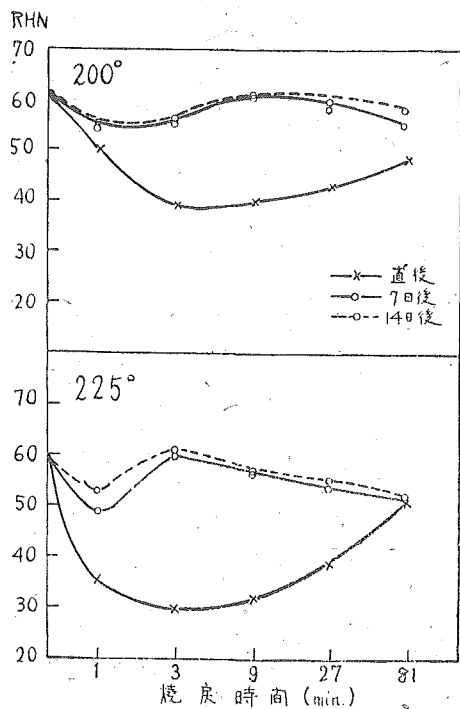
なほ温度、電氣抵抗の曲線であるが、よく注意してみると上昇の勾配が100°を經過する項から緩くなつて來てゐるが、これは復元により抵抗が減少したことを示すもので、常溫時効中の抵抗増加の逆で、組織の大部分で焼入状態に近い状態に戻つたこと表はしてゐる。

VIII. 鑄造デュラルミンに関する實驗

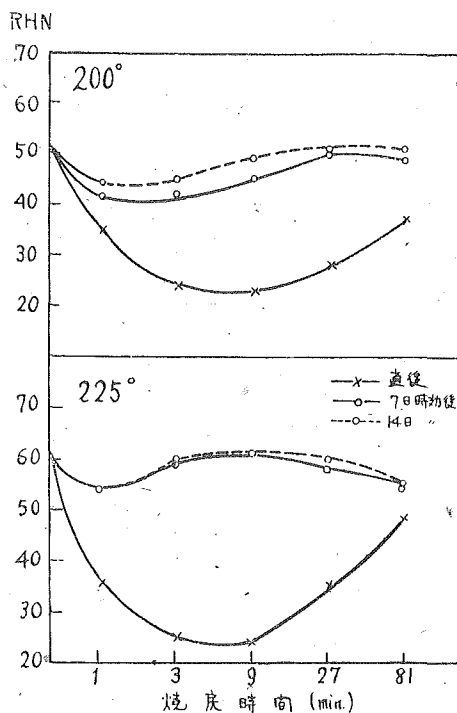
以上の如く、復元處理を含む如何なる焼戻温度に於ても、微視的には一部の原子の集合は析出の方向に移行することを知つた。復元處理は結局大部分の原子が微視的に復元するので、全部が微視的に復元するのではない。この時にも極く少量の原子は大部分の復元原子と反對に析出の方向へ進んでゐるのである。即ちこの意味より復元状態或はその前後の状態の性質は孰れもこの兩者の重疊であらはされる。従つて合金の種類或は状態によつては、析出方向の原子により析出硬化作用をさせ、復元方向の原子に再時効硬化作用をさせ、析出



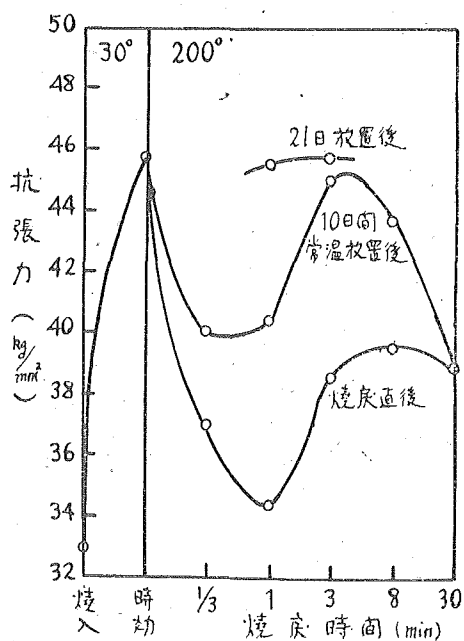
第32圖 鑄造のまま常溫放置せるものの復元



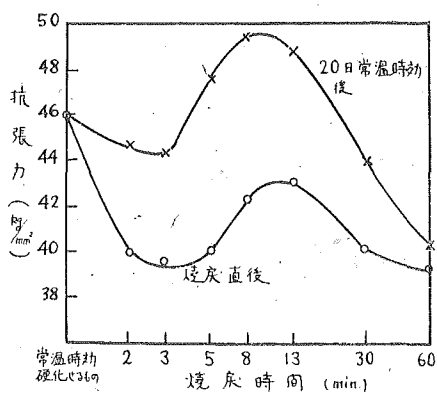
第33圖 鑄造せるものを焼入した時の復元



第34圖 鍛造材の焼入したもの復元



第35圖 超々デュラルミンの復元



第36圖 Cu 3.5 Mg 1.6 Al 残のの合の復元

硬化と再時効硬化との重疊も可能であらう。實際この重疊は超々デュラルミンの復元に於ては簡単に常にはあらはれるものであるが⁽²⁶⁾、デュラルミンでも鑄造組織の如く比較的均質でない状態ではかゝる重疊があらはれないかと思ひこの實驗を試みた。

デュラルミンの組成は第1表の如し。これを再溶解し 20 mm 角の金型 (厚さ 20 mm) に鑄造し、(1) そのまゝ常溫放置したもの、(2) それを 500° 1hr 加熱後水焼入常溫時効硬化したもの、(3) 鍛造後 500° 1 hr 加熱後水焼入常溫時効硬化したものの3種につき、200° 及び 225° に 1~81 min の焼戻を行ひ、直後及びその常溫 (30°) 放置後の硬度を測定した。結果は 第32~34 圖で、鑄造常溫放置した試料の 225° に於て今迄と傾向の變つた析出硬化を稍示すところでの稍著しい再時効硬化を見ることが出來た。

次に比較の爲めこの傾向の著しい合金の例を圖示すれば 第35, 36圖 となる。

IX. 實用的考察

復元現象の實際的應用といふ點で、研究者が第一に考へたことは再時効硬化速度のおそいことの利用で、遲効性紙材としてであつた。これは最も可能性ある應用であるが、以上の研究より見て適度の熱處理溫度及び時間の範圍が狭いといふ所に一寸困難があると思はれる。第二は再焼入の代用としての復元處理で、復元の最適狀態の利用である。これも可能性はあるが、矢張り熱處理の條件がデリケートであるといふ所が實際上面倒であらう。第三は成型の際に於ける復元軟化の應用である。これも實施上は大變デリケートである。第四はデュラルミンでは望みないが、析出硬化と復元再時効硬化の重疊による性能増進で合金の種類によつては可能性ありと考へられるが、未だ成功してゐない。孰れに於てもこの種な處理をしたものは、腐蝕特に應力腐蝕が悪い傾向にあるが、本論の實驗條件は苛酷すぎる故、この點については實際上考慮する必要はない。

X. 結言 — 總括

本實驗的研究に於て明らかにし得た事を列挙する。

(1) デュラルミンは適當な焼戻溫度に於て次の五段階の變化を見ることが出来る。第1 復元軟化小、再時効硬化遲。第2 復元軟化大、再時効硬化大。第3 軟化大、再時効硬化小。第4 析出硬化、再時効能無。第5 析出に伴ふ軟化、當然再時効硬化無。

(2) デュラルミンは復元による軟化の著しい熱處理が、丁度再時効硬化能も大きく、又再時効硬化後の抗張力も大きい。

(3) 最適の復元熱處理の前で、再時効硬化速度のおそいところが現はれるが、これは微視的に復元を考へることによつて説明出来る。

(4) 復元せるものの性質は、化學的性質に於て焼入せるものと異なる。これは最適の復元處理に於

(26) 萩野尙美, アルミニウム 3 (1943) A 138.

でも、微視的に大部分の原子が復元するにかゝらず少數の原子は析出の方向へ進むことを示す。

(5) 相當おそい定速加熱でも復元状態は得られる。しかし復元状態を得るには急熱の方が好ましい。

(6) 一般的結論としては、少しでも性質上に復元軟化の現はれる熱處理に於ては、これを微視的に見る時には復元する原子と析出の方へゆく原子の二群が存し、結局性質としてはこの兩者の重疊したものを見ることになるといふことで、析出の方へゆくものは當然常溫時効に於ける原子の集合状態の進んだもの、復元するのは低度の集合状態を形成するものであらう。

最後に本研究は文部省科學研究費及び學術振興會よりの御援助によつて行ひ得たものであり、研究者として誠に感謝致す次第である。なほ本研究は色々の點で財團法人古河理化研究所員渡邊幸健氏、丸田隆美氏に負ふところが多い。併せて附記して感謝の意を表する。

(1945 年 11 月 記)