

## 空盒用壓延板の弾性\*

Über die Elastizität der Membran der Druckmessdose.

K. Murakawa, T. Wada und Y. Iwanami.

所員	村	川	梨
研究生	和	田	郎
	岩	波	幸
			雄

## 目次

1. まへがき	341
2. 実験方法と試料	341
3. 実験結果	347
4. 磷青銅板の撓み匍匐	353
5. 結語	353

## 1. まへがき

空盒用の金属壓延板の機械的性質は今迄に多くの人によつて調べられてゐるが、その撓みに關する性質は、エリクセンの試験<sup>(1)</sup>を除いては、殆ど研究の對象となつてゐなかつたやうである。<sup>\*\*</sup>所が空盒は實際には撓みと見做し得る状態で使用されてゐるから、その撓みに關する弾性を調べて置く事は大切と思はれる。空盒の使用に際して外部から作用する力によつて破斷するやうな事は殆ど無いから、空盒用壓延板の抗張力とか伸びを測定する事はそれ程重要ではない。

このやうな見方をすると、空盒用材料としての優劣を判断するにはその撓みのヒステレシス(履歴)を測る事が最も望ましい。然かも應力が餘り大きい場合のヒステレシスの測定は不必要である。この要求に沿うて我々が行つた測定の結果について以下報告し度い。但し茲で主として調査したものはヒステレシスそれ自身でなく、ヒステレシスを最もよく代表する殘留歪みである。

## 2. 実験方法と試料

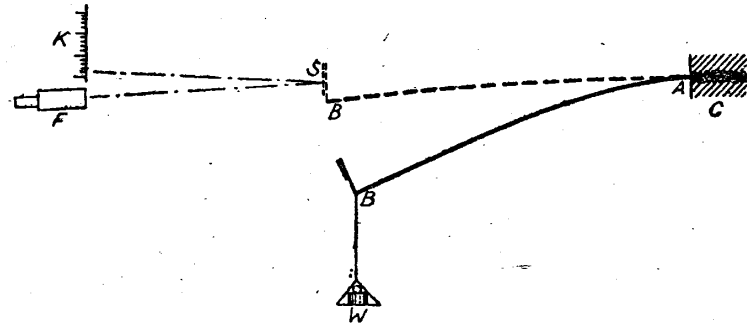
## a. 実験方法

実験方法は極めて簡單で、第1圖はその原理を圖示してゐる。厚さ 0.8 mm~0.2 mm,

\* 昭和18年12月2日の航空研究所定期講演會に於いて講演

(1) 橋本有隣, 白井明, 菊地利雄: 大日本航空技術協會報告 1(昭和18), 35

\*\* 但し茲で調べたものよりも Sn の%の少い磷青銅の撓みについては次記の研究が發表されてゐる; 田邊友次郎, 小磯五郎: 日本金屬學會誌 3(1939), 153.



第 1 圖 實 験 装 置

幅 10 mm, 長さ約 160 mm の短冊形の試料の一端 A を万力 C で固定せしめ, 鏡 S をつけた遊離端 B に重り・W を吊して撓ませてから, 重りを取去り, 物指 K の像を望遠鏡 F で覗いて, 撓みを與へる前に對する後に於ける (重りを取去つたときの) 像の位置の變化から B に於ける切線の方角の變化がわかる。

B 端は微小な撓み振動を起し易く, そのために K の像が読み難くなるから, 重り及びそれを載せた皿はいつでも油に漬けて振動を制止せしめた。但し應力を計算する際には, 油による浮力の補正を施した。

重りのかけられてゐる時間が測定結果に影響を及ぼすかも知れないので, 我々の場合には條件を一定にするために, 次のやうにした。即ち試料に一度も重りをかけないうちに望遠鏡で物指の位置 ( $s_0$ ) を読んで置き, 次に重り ( $W_1$ ) を 5 分間かけてから, これを取去る。それから 5 分を経て再び物指の位置 ( $s_1$ ) を読み,  $s_1 - s_0$  から試料の端 B の残留撓み角  $\theta_1$  を計算する。 $\theta_1$  は  $W_1$  による残留歪みに關係した角である。次に  $W_1$  よりも重い重り  $W_2$  について同様の操作を行つて  $s_2$  を読み,  $s_2 - s_0$  から  $W_2$  による試料の残留撓み角  $\theta_2$  を計算する。このやうにして  $W_3, W_4, \dots$  の順に  $s_3 - s_0, s_4 - s_0, \dots$  を測る。但し  $W_1 < W_2 < W_3 < W_4 < \dots$  である。 $s_n - s_0$  が小さければ,  $\theta_n$  は  $(s_n - s_0) / 2D$  に等しい。但し  $D$  は物指と鏡との距離である。

上述の實驗の結果から, 残留歪みを如何にして計算するかを考へて見度い。一樣な梁の一端を万力で止めて他端に重りをかける場合には, よく知られてゐるやうに, 梁は一樣に撓まない。表面纖維應力を  $\sigma$  とすれば, それは

$$\sigma = \frac{E}{\rho} \frac{a}{2} \dots \dots \dots (1)$$

によつて與へられる。但し  $E$  は弾性率,  $a$  は試料の厚さ,  $\rho$  は曲率半径である。又、 $\sigma$  は板の上下二つの表面に於いて同じ値であると假定してある。我々の場合には  $\rho$  が一樣でないから,  $\sigma$  も一樣でない。第 2 圖 a のやうに  $x'$  軸を取るならば,

$$\sigma = \frac{6Wx'}{ba^2} \dots \dots \dots (2)$$

(従つて 
$$\sigma_{\max} = \frac{6WLw}{ba^2} \dots \dots \dots (2')$$
)

と書換へる事が出来る。但し  $b$  は試料の幅である。  
この式は弾性限を超えた所では厳密には成立しない  
けれど、我々は 2% の誤差はすべての場合に無視し  
てゐるから、上式は近似的に正しいと假定する。

若し試料を一様に撓ませて表面繊維應力が一様に  
 $\sigma$  となつてから荷重を取去つたとすれば、そのとき  
には表面にどれだけの伸びが残るであらうか。この  
場合の残留歪みを  $R$  とするとき、簡単のために  $R$   
は  $\sigma$  だけの函数であると假定する。即ち

$$R=f(\sigma)\dots\dots\dots(3)$$

であると假定する。

この式を我々の薄板の表面の各部に適用せしめる。重りを取去つた後の板について第 2 圖  
b のやうに  $x$  軸をとれば、我々が観測したものは

$$S=\int_0^L Rdx\dots\dots\dots(4)$$

なる量である。この式の  $x$  は (2) 式中の  $x'$  とは幾らか異つたもので、重りをかけたときと  
これを取去つたときとで、板の各點の  $x, x'$  を相對應せしめて

$$x=k(W)x'\dots\dots\dots(5)$$

と置けば  $k(W)\geq 1$  である。簡単のために

$$k(W)=L/L_w\dots\dots\dots(6)$$

と假定しても著しい誤差を生じない。(5), (2) を (4) に代入すれば

$$S=k(W)\frac{ba^2}{6W}\int_0^{\sigma_{\max}} R d\sigma\dots\dots\dots(7)$$

と書き直す事が出来る。但し  $\sigma_{\max}$  は  $x'=L_w$  の所の  $\sigma$  即ち最大繊維應力である。

所が我々が観測する残留撓み角  $\theta$  は

$$\theta=\int_0^L \frac{dx}{\rho}\dots\dots\dots(8)$$

に他ならない。但し茲の  $\rho$  は重りを取去つたときの薄板の形に關する曲率半径である。他  
方、 $S$  は

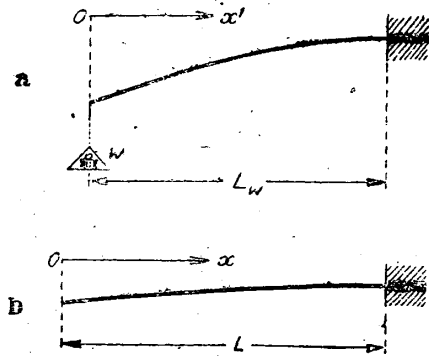
$$S=\frac{a}{2}\int_0^L \frac{dx}{\rho}\dots\dots\dots(9)$$

で與へられるから、

$$S=\frac{\theta a}{2}\dots\dots\dots(10)$$

が得られる。(10) によつて  $S$  は観測し得る量だけで表はされる。これを (7) 式に代入すれ  
ば

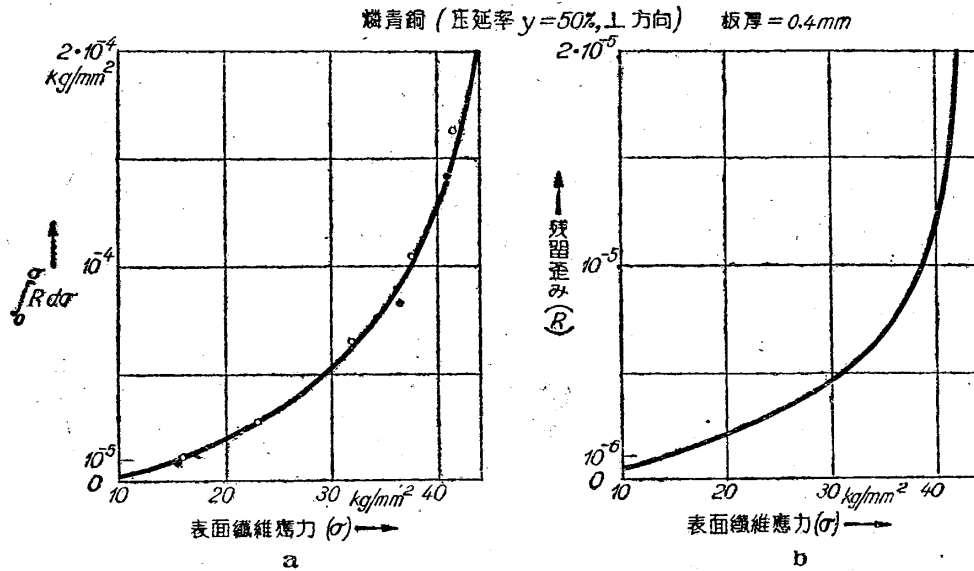
$$\frac{3W\theta}{k(W)ba}=\int_0^{\sigma_{\max}} R d\sigma\dots\dots\dots(11)$$



第 2 圖

となる。この式によつて  $R$  を  $\sigma$  の函数として表はす方法がわかる。即ち  $W$  を種々變へて實驗した場合に、 $\frac{3W\theta}{k(W)ba}$  を  $\sigma_{max}$  の函数として表はす曲線を畫き、その曲線の各點に於ける微分係数を縦軸にとり、横軸として  $\sigma_{max}$  を改めて  $\sigma$  と書けば、それが  $R$  を  $\sigma$  の函数として表はす曲線である。

例を燐青銅板にとつて見ると、壓延率  $y=50\%$  で板厚  $0.4\text{mm}$  のものについて測定した。



第 3 圖 殘留歪みを算出する方法

$\int_0^{\sigma} R d\sigma$  を  $\sigma$  の函数として表はせば、第 3 圖 a のやうになる。これに各點で切線を引いて微分係数を計算すれば、第 3 圖 b のやうに  $R$  を  $\sigma$  の函数としてあらはす曲線が得られる。第 3 圖 a に於いて白圓は同一の試料について  $\sigma_{max}$  を順次に大きくして 5 種類の  $\sigma_{max}$  に對して測つたときの實驗値を表はし、黒圓は或る一つの値の  $\sigma_{max}$  に對して測定を行つたら他の値の  $\sigma_{max}$  については試料を取換へるといふ具合にして測つた實驗値を表はしてゐる。これらの  $\int_0^{\sigma} R d\sigma$  と  $\sigma$  との間の關係を表はす曲線について實測點の散らばり具合を見るのに、誤差は凡そ 5% 以内であらうと思はれる。

然し微分係数をとる事は更に正確度を悪くするもので、このやうにして求めた  $R-\sigma$  曲線は一般に 8 乃至 4% の誤差が伴ひ、最悪の場合には 15% の誤差を生ずるかも知れない。そこで空盒材料として種々の壓延板の優劣を比較するには、 $R-\sigma$  曲線を比較する方が簡單であるけれど、それよりも正確度の良い  $\int_0^{\sigma} R d\sigma$  と  $\sigma$  との關係を表はす曲線を比較しても目的を達するから、我々は後者だけを茲で報告する事にした。何となれば  $R$  は  $\sigma$  の増加と共に單調に増加するので  $\int_0^{\sigma} R d\sigma$  の小さなものは  $R$  も小さいからである。

猶ほ、 $R$  自身でなく  $\int_0^{\sigma} R d\sigma$  が測定されるといふ事は測定方法として片梁式撓みを採用したのに基因する。若しも薄板の或る部分だけを圓形に撓ませる方法を採用すれば、 $R$  自身が測

(2) C. Bach : Forsch.-Arb. V.D.I., Heft 1 (1901); Heft 39 (1907).

定されるわけであるが、この方法を薄板に適用すれば、摩擦の影響のために片梁式の場合と同程度又はそれ以下の正確度しか得られない。

**b. 薄板の弾性率の測定**

我々の残留歪みの測定に於いて、最も気に掛かるのは試料の一端 A に於ける境界条件である。第 1 圖に示すやうに、A 端は万力 C で止めてある。これが通常の片梁の固定といふ条件を満足してゐないと、今迄書き並べた式は極めて不正確になるわけである。

そこで一端固定の条件を次に述べるやうな方法で間接に試験して見る。即ち第 2 圖 a の  $x'$  軸のやうに  $x$  軸をとり、これに直角に  $y$  軸をとると、撓みの方程式は

$$\frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} = -\frac{W}{EI}x \dots\dots\dots (12)$$

となる。但し  $I = ba^3/12$  である。これを一回積分して  $x = Lw$  で  $dy/dx = 0$  なる条件を入れれば

$$\frac{\frac{dy}{dx}}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} = -\frac{W}{2EI}(x^2 - Lw^2) \dots\dots\dots (13)$$

が得られる。これを簡単にすれば

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-W(x^2 - Lw^2)^2}{\sqrt{4E^2I^2 - W^2(x^2 - Lw^2)^2}} \dots\dots\dots (14)$$

となり、解は楕圓積分によつて得られる事がわかる。

撓みが小さい場合には  $\left(\frac{dy}{dx}\right)^2$  は 1 に對して無視出来るから、(12)の積分は

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{W}{2EI}(Lw^2 - x^2) \dots\dots\dots (15)$$

となり、もう一度積分して

$$y = -\frac{W}{6EI}(x^3 - 3Lw^2x + 2Lw^3) \dots\dots\dots (16)$$

が得られる。従つて撓みの量は

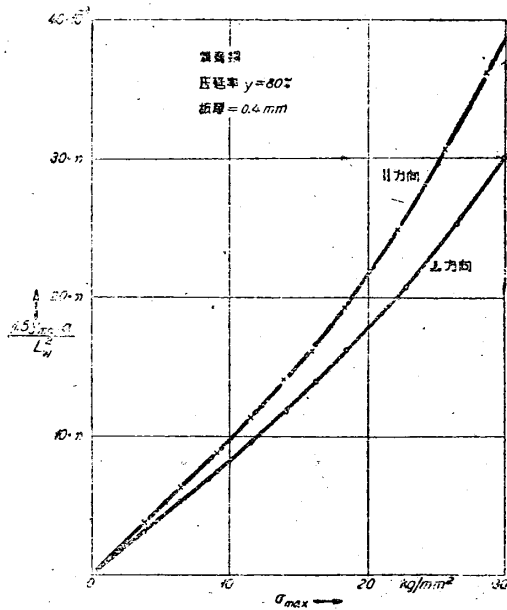
$$y_{max} = -\frac{WLw^3}{3EI} = -\frac{2}{3} \frac{Lw^2}{Ea} \sigma_{max} \dots\dots\dots (17)$$

によつて與へられる。

今、種々の  $W$  の値に對して實驗的に撓みを測り、 $\sigma_{max}$  の函数として  $\frac{1.5 y_{max} a}{Lw^2}$  を表はすグラフを書くと、原點の附近では (17) の示すやうに直線となり、その傾きが弾性率  $E$  を與へる。

この方法によつて薄板の弾性率を求めて見ると他の方法で求めた値と極めてよく一致する事がわかつた。これは試料の一端固定といふ境界条件が我々の要求する精度の範圍で滿されてゐる事の間接的證據と見做す事が出来る。

又、この方法は逆に薄板の弾性率の極めて簡単な測定法として利用する事が出来る。板厚



第4圖 最大繊維應力と撓みとの関係

原點から遠い所では第4圖の曲線は直線から上向きに離れてゐる。その部分の  $\sigma_{max}$  に対しては  $(\frac{dy}{dx})^2$  が1に対して無視出来ないで(14)に従つて計算すべきであるからである。

c. 實驗に用ひた試料

この實驗に用ひた試料はすべて中野伸銅所に於いて同所所長橋本有隣氏及び技師臼井明氏、菊地利雄氏の御好意により壓延試作したものである。

試料の成分を表記すれば第1表の通りである。

第1表 試料の成分

名 稱	成 分 (%)					
	Ni	Zn	Si	Sn	其 の 他	Cu
燐 青 銅	—	—	—	8.2	P=0.15	殘 部
洋 白	18.0	25.5	—	—	—	”
アルミ真鍮	1.0	17.2	0.1	—	Al=1.7 ; Fe=0.5	”
マンガン青銅	—	21.0	0.3	—	Mn=13.5	”
銀 銅	—	—	—	—	Ag=7.3	”
ベリリウム銅	—	—	—	—	Be=2.3	”

壓延前の板厚を  $T$ 、壓延後の板厚を  $t$  とするとき、壓延度を表現する方法は種々あるが、 $x = (T-t)/T$  を%で表はしたものが最も普通である。中野伸銅所では便宜上  $y = (T-t)/t$  を%で表はしたものを壓延度としてゐる。この場合に、 $x$  と  $y$  との関係は

\* 撓み振動によつて弾性率を測る方法の精度もこの程度と思はれる。次記論文参照：

E. Goens: Ann. d. Phys. [5] 11 (1931), 649.

\* 壓延率を表はすためにも  $y$  なる文字を用ひたが、これは座標とは関係がない。第2節c参照。

の變化の少い試料をとり、撓み  $y_{max}$  をカセットメーターで念入りに測定すれば、弾性率を0.5%の誤差以内で測定する事は容易である\*。但しこの場合には重りを油に漬けないで測る方が宜い。重りの目方は出来るだけ正確である事が必要である。

例へば燐青銅の壓延率  $y=80\%$ \* なる板について撓みを測定して  $\frac{1.5y_{max}a}{Lw^2}$  と  $\sigma_{max}$  との関係を図示すれば第4圖のやうになる。原點の附近の直線部分から弾性率を計算すれば次の通りである。

燐青銅 ( $y=80\%$ ) の弾性率

$$= \begin{cases} \text{壓延方向に } 10490 \text{ kg/mm}^2; \\ \text{壓延と直角の方向に } 12580 \text{ kg/mm}^2. \end{cases}$$

$$x = \frac{y}{1+y}$$

によつて與へられる。その實際の數值的例を擧げれば第2表の通りである。

第2表 壓延度  $x$  と  $y$  との關係

$x$	16.7	23.1	28.6	33.3	37.5	44.4	52.4
$y$	20	30	40	50	60	80	100

茲でも試料を壓延度によつて分類するときには中野伸銅所の壓延率  $y$  を用ひた。例へば燐青銅 50 とは  $y=50\%$  即ち  $x=33.3\%$  なる壓延を施した燐青銅を意味する。

空盒用壓延板は製型後に低温焼鈍を施すのを通例とする。低温焼鈍により製型後の残留歪力を取去り、時効せしめ、又、時期割れを防止すると考へられてゐる。我々も亦低温焼鈍のヒステレシスに及ぼす影響を調べたが、その温度及び保持時間は我々が實驗によつて定めたものはベリリウム銅だけで、他は空盒製作者が夫々の合金板について採用してゐる焼鈍温度及び時間をそのまま採用し、材料としてのヒステレシスを最小ならしめる低温焼鈍の條件を探す事は他日の問題として残す事にした。

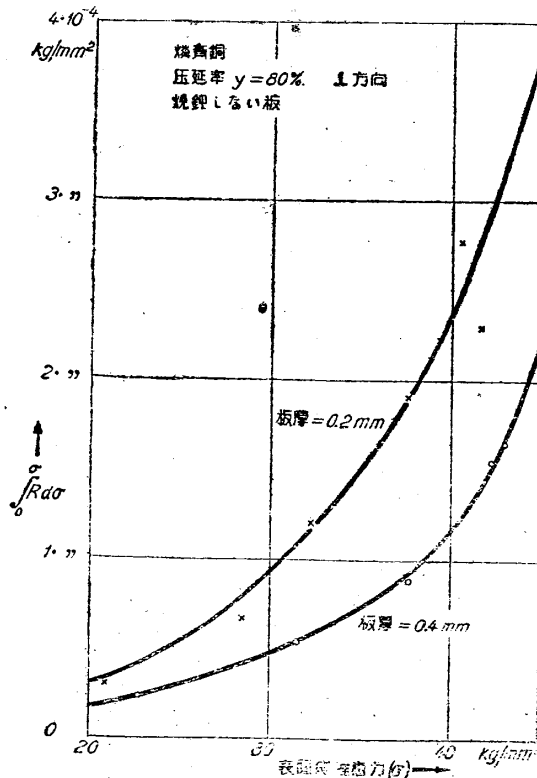
次に最も注意すべき事は試料の厚さである。一例として燐青銅の  $y=80\%$  なるものを取り、板厚 0.4mm のものと板厚 0.2mm のものについて測定結果を圖示すれば、第5圖の通りであるが、0.2mm の方が測定誤差が大きいのみならず、残留歪みも大きい。板厚 0.4mm のものと 0.5mm のものとは實驗誤差の範圍で残留歪みは同じである。

板厚に關したこれと同じ現象は他の試料についても驗證する事が出来た。従つて測定結果は板厚 0.2mm のもの同志では比較しても宜いけれど、0.4mm 以上のものと比較して優劣を判斷する事は出来ない。それ故に我々は成る可く板厚 0.5mm  $\pm$  0.1mm の試料について詳しい測定を行ふやうに努めた。

### 3. 實驗結果

測定はすべての試料の壓延方向及びそれに直角の方向について行つた。この報告ではこの二つの方向を夫々  $\parallel$  及び  $\perp$  なる符號であらした。第6-15圖は實驗結果を示してゐる。すべての圖に於いて壓延度  $y$  及び測定方向が記入してある。例へば 80,  $\parallel$  とは壓延度  $y=80\%$  の試料の壓延方向を意味する。

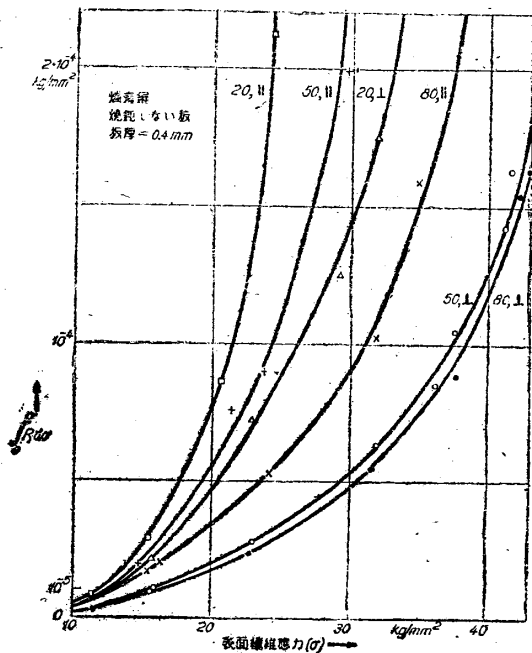
茲でしらべたすべての銅合金に於いて低温焼鈍を施さないものでは  $\parallel$  方向は  $\perp$  方向より



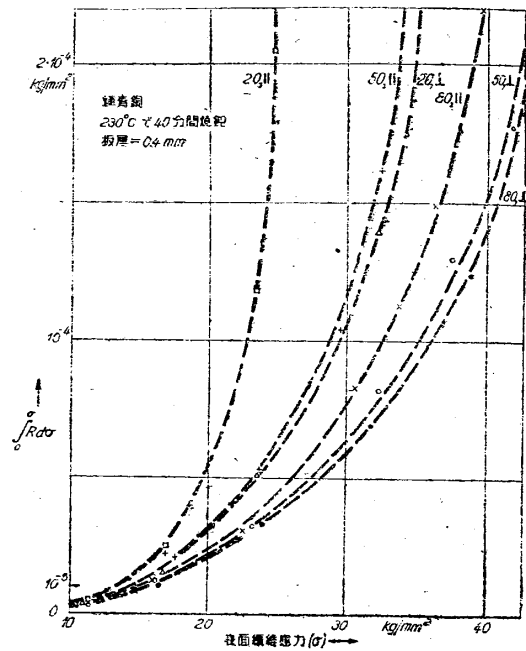
第5圖 板厚の残留歪みの大きさに及ぼす影響

も残留歪みが大きい。然し低温焼鈍を施せば一般に残留歪みが小さくなると共に、 $\parallel$ 方向と $\perp$ 方向との相違が少くなる。

$\parallel$ 方向は $\perp$ 方向よりも撓みの残留歪みが大きいために、撓みの弾性限は小さい。これは純粹の引張り試験の結果と一見矛盾するかも知れないけれど、撓みの場合には残留歪みを測るときの残留応力の分布が関係するもので、中性層の附近の応力の小さい部分の元に戻らうとする力（ $\parallel$ 方向の弾性率は $\perp$ 方向よりも小さい）が相當の影響を有し、純粹引張りの試験に於ける応力の分布状態とは異つてゐるから、何等の矛盾をも生じない。



第6圖 壓延したまゝの燐青銅板の残留歪み



第7圖 低温焼鈍を施した燐青銅板の残留歪み

次に各種材料の特徴について述べて見よう。

a. 燐 青 銅

第6圖は壓延のままの板について測定したもの、第7圖は230°Cで40分間焼鈍した板について測定したものを示す。兩者を比較して著しい差は無いが、低温焼鈍によつて壓延方向の残留歪みが僅か減小する。低温焼鈍の効果が少い事は恐らく現在の試料が最適でない事を示してゐるやうに考へられる。我々はおつと良質の燐青銅を詳しく研究するやう準備中である。

猶ほ、燐青銅だけで壓延度の影響を比較すれば、 $y=80\%$ のものが残留歪みが最小であるが、この材料は空盒の波型をつける際に割れ目を生ずる恐れが無いでもないから、それより少し柔い  $y=60\%$ の程度のものが空盒用の材料としては最適と考へられる。

各壓延率の材料の弾性率は第3表の通りである。



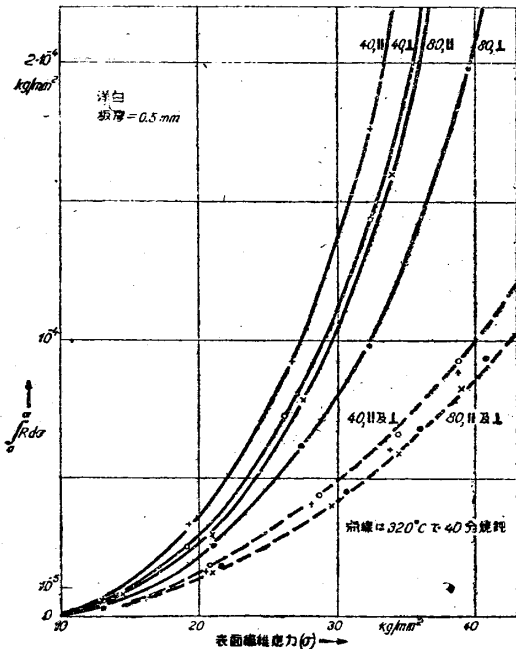
第3表 燐青銅の弾性率(板厚 = 0.4mm).

壓延度 $g$ (%)	弾 性 率 (kg/mm <sup>2</sup> )	
	壓 延 方 向	直 角 方 向
80	10490	12580
50	10270	12000
20	11010	11210

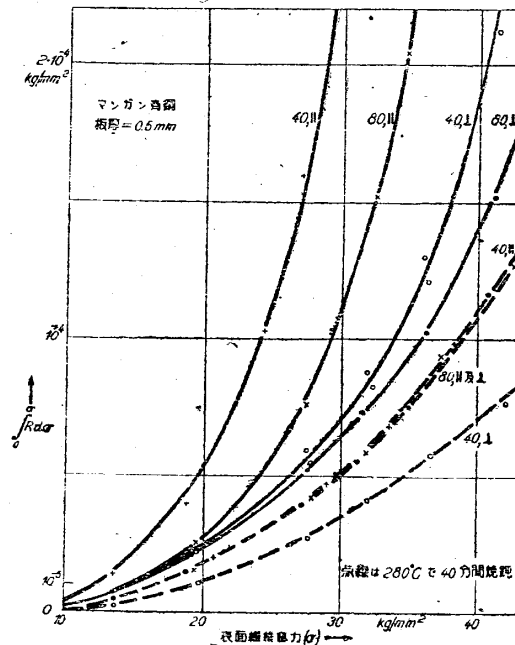
これを 230°C で 40 分間焼鈍しても弾性率に變化が無い。

b. 洋 白

第8圖から明かな如く、洋白は壓延のまゝの板に於いて方向性が少いのみならず、冷間加工度の差の影響が少いといふ利點を有する。我々は 280°C で 40 分の焼鈍と 320°C で 40



第8圖 洋白板の残留歪み



第9圖 マンガン青銅板の残留歪み

分の焼鈍とをしらべたが、後者の方が有効である事を知つた。

洋白は空盒材料として優秀であるが、残念乍ら Ni の含有量が高いために我が國に於ける大量生産には適しない。

c. マンガン青銅

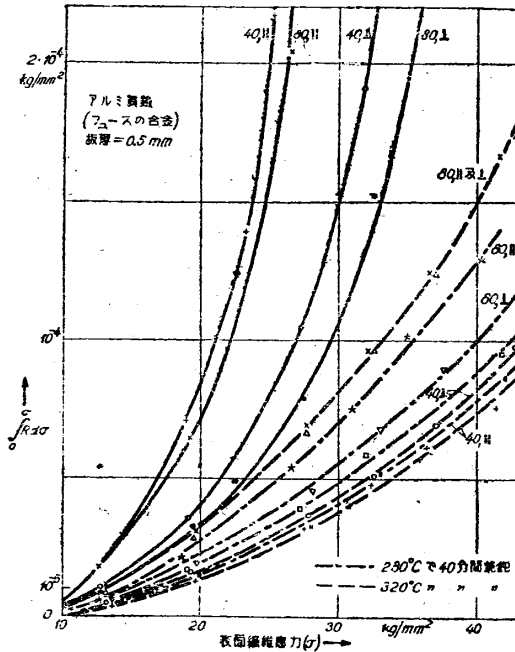
この合金は電気抵抗が大きいから、空盒を熔接するときには便利な材料である。然し半田の附着具合は良好でない。

我々は 220°C, 280°C, 320°C, 360°C で夫々 40 分間焼鈍してその残留歪みに及ぼす影響をしらべたが、その間に大きな差違は認められなかつた。然し 280°C で 40 分間の焼鈍が最も有効のやうに思はれる。

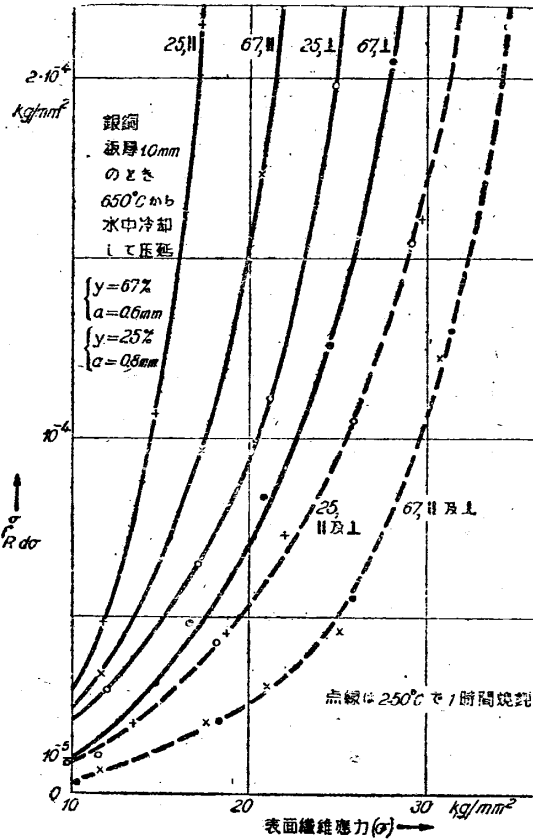
d. アルミ真鍮 (フューズの合金).

この合金は獨逸の Füss 會社でブルドン管の材料として使用してゐるが、空盒用壓延板としても優秀であると考へられる。

第 10 圖でわかるやうに、 $y=40\%$  の板を  $320^\circ\text{C}$  で 40 分間焼鈍したものの残留歪みが最小である。



第 10 圖 アルミ真鍮板の残留歪み



第 11 圖 銀銅板の残留歪み

アルミ真鍮は Ni の含有量も少く、半田の着き具合も良いから、空盒用材料として最適と思はれる。

残留歪みの大小だけで判断すれば、洋白、マンガン青銅、アルミ真鍮の三者には著しい優劣の差は存在しない。

e. 銀 銅

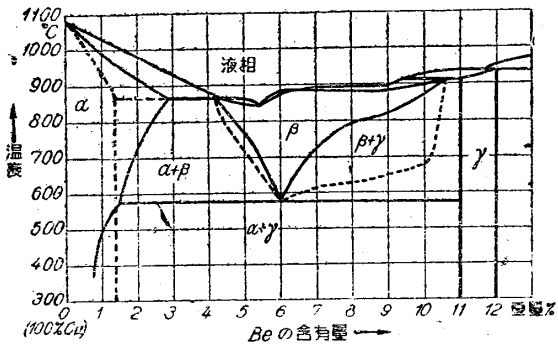
銀銅は電気抵抗が小さいので、電気計器のコイルとして用ひられる。熱処理を施せば析出硬化をする筈であるので、 $250^\circ\text{C}$  で 1 時間加熱して測定を行つた (第 11 圖参照)。他の材料に比して弾性には優れた點は無いやうである。

f. ベリリウム銅

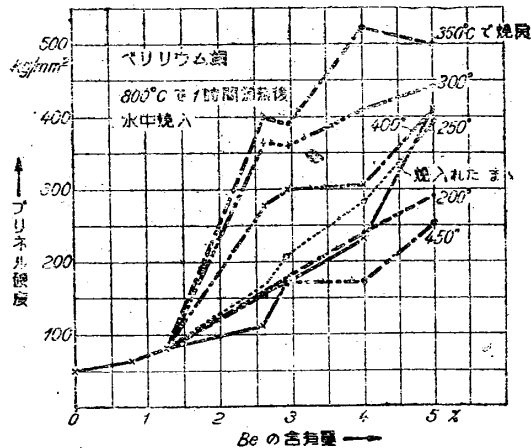
ベリリウム銅が弾性材料としても優秀であることは數年來よく知られた事實である。第 12

(3) 1931 年以前の文献は大體次の單行本にまとめられてゐる。Siemens Konzern : Beryllium, Its Production and Application. Chem. Catalog Co. (Rheinhold Publ. Co.), 1932. 又ベリリウムに関する事柄は次の綜合報告にも記載されてゐる。平松良雄 : 大日本航空技術協會報告 1 (昭和 18), 67. L. L. Stott : Metals Technology 3(1936), T. P. No. 738.

圖の Be-Cu 系状態圖が示すやうに、Be が凡そ 2% のベリリウム銅を約 800°C から常温に焼入れると過飽和の状態になるから、これを適當の温度で焼戻せば硬くなつて残留歪みも減小するわけである。Masing 及び Dahl は實際に硬度曲線を測定し、又顯微鏡組織の變化をしらべて析出硬化を證明した。第 13 圖は Masing 及び Dahl の發表した曲線のうちの一つで、これによれば凡そ 1.3% 以下の Be を含むベリリウム銅は析出硬化が見られない事になり、第 12 圖の溶解度曲線の範圍と一致する。更に第 13 圖によれば 800°C から水中焼入れをしたベリリウム銅 (Be > 1.3%) は凡そ 350°C で焼戻す事が硬化に最も有効である。



第 12 圖 Be-cu 系合金の狀態圖 (G. Masing 及び O. Dahl による)

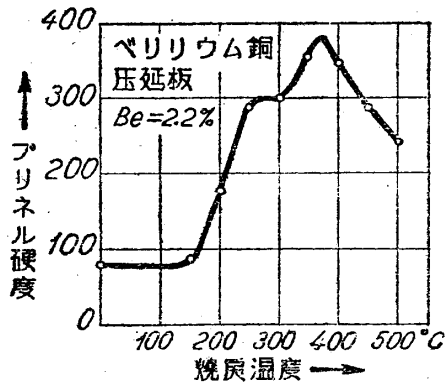


第 13 圖 ベリリウム銅板の硬度曲線 (G. Masing 及び O. Dahl による)

ベリリウム銅の壓延板に關しては香取氏の研究があつて、同氏の發表した多くの測定曲線のうち我々の研究と關係のあるものを第 14 圖に掲載する。これによれば、2.2% Be の壓延板は凡そ 380°C の焼戻しによつて最大の硬化が得られ、250°C で硬度曲線に瘤があらはれる。

ベリリウム銅板の撓みの匍匐に關しては、Carson<sup>(5)</sup>の研究があるが、記載が餘り簡單なので、我々の測定と比較する事が出来ない。

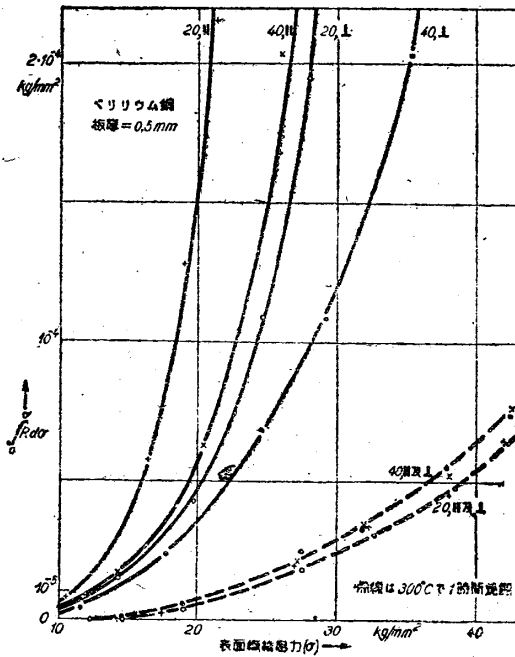
我々の測定に使用したベリリウム銅板は次のやうにして作った。即ち板厚が 1.00 mm 及び 0.85 mm の二種類の板を焼鈍後先づ夫々 0.7mm 及び 0.6mm まで壓延してから 20 分間 800°C で加熱し、次にこれを水中で急冷し、更に何れも 0.5 mm の厚さになるまで壓延した。この材料を種々の温度で焼戻してから残留歪みを測定したが、その結果は第 15 及び 16 圖に示す通りである。第 16 圖でわかるやうに、残留歪みの曲線も 250°C の附近で瘤が出来る。これは香取氏の硬度曲線に於ける瘤の位置と一致する。然し残留歪みの最小値は凡そ 320°C で焼戻す事によつて得られるやうである。



第 14 圖 ベリリウム銅板の硬度曲線 (香取三郎氏による)

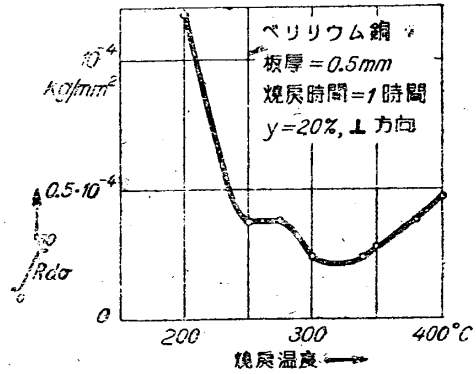
(4) 香取三郎：日本金屬學會誌 6(1942), 16.

(5) R. W. Carson : Proc. Amer. Soc. Test. Mat. 37 (1937); Part II, 661.



第 15 圖 ベリリウム銅板の残留歪み

我々の測定結果によれば、ベリリウム銅に於いては最後の仕上げの壓延に際しては壓延度は餘り大きくない方が宜いやうである。上記の試料は板厚が 0.5 mm であつたから、製作が比較的容易であつたが、實際の空盒の板厚即ち 0.2 mm の程度のものを作らうとする



第 16 圖 ベリリウム銅板に於ける焼戻温度と残留歪みとの關係

と仕事は餘り樂ではないと思はれる。この點については目下研究中である。

我々は板厚が 0.18 mm で Be=2.5% のベリリウム銅の板についても測定を行つたが、定性的には第 15 及び 16 圖と同じ形の曲線を得た。

g. ベリリウム青銅

Masing 及び Dahl は Be を含んだ種々の三元合金を研究したが、そのうちで Be-Sn-Cu 合金については第 4 表に示すやうな結果を得てゐる。

第 4 表 Be-Sn-Cu 合金(壓延する前に 770°C から焼入)の硬度(G. Masing 及び O. Dahl による.)

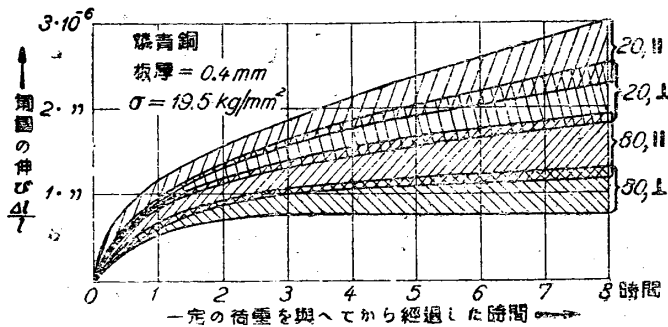
番 號	成 分		焼戻前の硬度 (kg/mm <sup>2</sup> )	焼戻後の硬度 (kg/mm <sup>2</sup> )	焼戻時間 (時間)	焼戻温度 (°C)
	Be	Sn				
1	1.8	1.8	280	412	4	250
2	2.3	2.3	285	420	4	250
3	1.6	3.6	275	410	4	250
4	1.8	4.2	280	425	0.5	250
6	1.6	6.4	285	410	1	300
					8	250
7	0.6	9.0	275	335	0.5	250
					4	300
8	1.3	9.0	285	375	1	250

このうちで第 4 番目の合金が最も有望に思はれる。我々も亦これと同じ成分の板厚 0.18 mm の壓延板を入手して残留歪みの測定を行つた。その結果として 310°C で 1 時間焼戻す事により最小の残留歪みが得られる事がわかつた。然しそのときの値はベリリウム銅(Be=

2.5%) について得られた最小値の凡そ 1.3 倍 ( $\sigma = 30 \text{ kg/mm}^2$  で比較して) であるので、矢張り Be-Sn-Cu 合金よりも Be-Cu 合金の方が優秀であるといふ結論を得た。又、この成分の Be-Sn-Cu 合金板の硬度曲線には  $250^\circ\text{C}$  の附近で何等の瘤もあらはれなかつた。

#### 4. 磷青銅板の撓み匍匐

磷青銅板の匍匐について既に以前に研究した事<sup>(6)</sup>があつたが、そのときに用ひた試料は壓延度も熱処理も不明のものであつた。今度はそれらがよくわかつた試料が得られたので、もう一度第1圖の實線で示したのと同じ装置で壓延板の撓み匍匐をしらべて見た。



第 17 圖 壓延したまゝの磷青銅板に於ける撓みの匍匐

測定結果から、一樣に撓ませたと考へたときの撓み匍匐を計算するのに、適當な假定を設ければ第 2 節 a で述べたやうな微分の操作を用ひないでも済む。然し第 2 節 a で述べた考へ方で計算する方が幾らかでも嚴密に近いやうに思はれるので、茲ではそれを採用した。第 17 圖は壓延したまゝの磷青銅板に關する結果の一例を示してゐる。極めて多くの試料について測定を行つた結果として、磷青銅板の撓み匍匐は決して一義的なものでない事がわかつた。平均的に見れば、壓延方向は直角方向よりも撓み匍匐が大きい。これは残留歪みに關する現象と平行的な結果である。

$230^\circ\text{C}$  で 40 分間焼鈍した磷青銅板についても撓み匍匐を測定したが、壓延したまゝのものに比して幾らか匍匐が増加したのではないかと思はれた。然しこの點に關しては實驗の回数が不充分なので、斷定的な結論に達しなかつた。

何れにしても撓み匍匐の測定は正確度の悪いもので、定性的な事しか云へないやうである。

#### 5. 結 語

空盒用材料の弾性としては先づ波型をつけるときに成型し易い事即ち残留歪みが大きい事及び製型後の熱処理によつて残留歪みが小さくなる事が重要な要素といふ事が出来る。この點に關して我々が行つた撓みの測定によれば、洋白、マンガン青銅及びアルミ眞鍮は何れも優秀で、その間に優劣の著しい差異は存在しない。特に、ありふれた成分のみを含んでゐるといふ點でアルミ眞鍮は最も適してゐると考へられる。ベリリウム銅は上記の三者に比して更に優秀である事がわかつた。

磷青銅は現在採用されてゐる熱処理のままでは洋白及びアルミ眞鍮に劣るやうである。

(6) 村川梨, 烏川秀雄: 航空研究所彙報 226 號 (昭和 18), 165.

上記の研究の一部は大日本航空技術協會の補助によつて行ふ事が出来たもので、この點に關して同協會に謝意を表し度い。