

燐青銅の壓延板の彈性

所員 村 川 梨

1. 測定方法

1. まへがき 燐青銅の壓延板は彈性金屬板として多量に使用されてゐて、これの性能の改善は目下の急務である。それには壓延板の性能を材料學的に簡単に批判する方法を確立して置かなければならない。所で我々は以前に壓延板の彈性の簡単な試験方法を提唱し、これが學術的なデータを得るのにも役に立ち、又工業的試験方法としても有望らしいといふ結論を得た。

この報告では上述の試験方法を種々の燐青銅板に應用して、この豫想を證明する。第一報では壓延板のヒステレシスを最小ならしめる最適加熱温度の決定にまで手を出す事は出来なかつたが、今度は燐青銅についてそのやうな條件を探究した。又、空盒用材料としては彈性率が如何なる點で重要な役割を演ずるかを明かにする事が出来た。

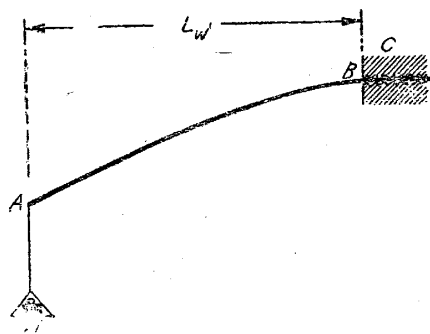
茲で調査した燐青銅板は Sn が 8% のものと Sn を 4.5%, Ni, Fe を少量含むものとなつて、その特性は細かい點で互に異つてゐるから、これを別々に記述する事にした。

試料はすべて中野伸銅所の所長橋本有隣氏及び同所技師臼井明氏の御好意により試作壓延したものであつた。

2. 測定方法 壓延板の撓みのヒステレシスの測定は殘留歪みの測定を以つてこれを代表せしめた。その測定法については第一報に於いて詳しく述べたから、茲では繰返さないけれど、その原理だけを要約すれば次の通りである。

試料は短冊形で厚さ 0.5 mm, 幅 10 mm, 長さ約 150 mm で、厚さが出来るだけ一樣なものを採用する。

試料 AB の一端 B を萬力 C で固定する(第 1 圖参照)とき、他の遊離端 A に於ける切線が水平となす角 θ の變化を測るのがこの實驗の主要點である。重り W を A に 40 秒間かけてから、これを取去り、それから 1.5 分を経て θ を測り、それが重りをかける以前よりも 4θ だけ増加したとする。



第 1 圖 測定方法の原理

4θ を望遠鏡及び物指によつて測定すれば、試料の表面の殘留歪み R がわかる。但し R は試料を一樣に(圓形に)撓ませたと考へたときの表面に於ける殘留歪みである。

(1) 村川梨, 和田達郎, 岩波幸雄: 航空研究所報告, 第 296 號(昭和 19 年)。これを「第一報」と名付けて引用する。

板の厚さを a , 幅を b とすると

$$\frac{3W\Delta\theta}{k(W)\cdot ab} = \int_0^{\sigma_{\max}} R d\sigma,$$

$$k(W) = L_0/L_w$$

を証明する事が出来る。但し σ は表面繊維應力で、 R は σ だけの函数である事が假定してある。

σ_{\max} は試料の固定端 B に於ける σ で

$$\sigma_{\max} = \frac{6WL_w}{ba^2}$$

によつて與へられる。

以上の測定により、 σ の函数として $\int_0^{\sigma} R d\sigma$ を表はす曲線が得られる。この曲線を σ で微分すれば、 σ の函数として R を表はす曲線が得られる。然し微分する操作には不正確が伴ふから、その代りに $\int_0^{\sigma} R d\sigma$ の曲線だけで材料のヒステレシスを批判する。

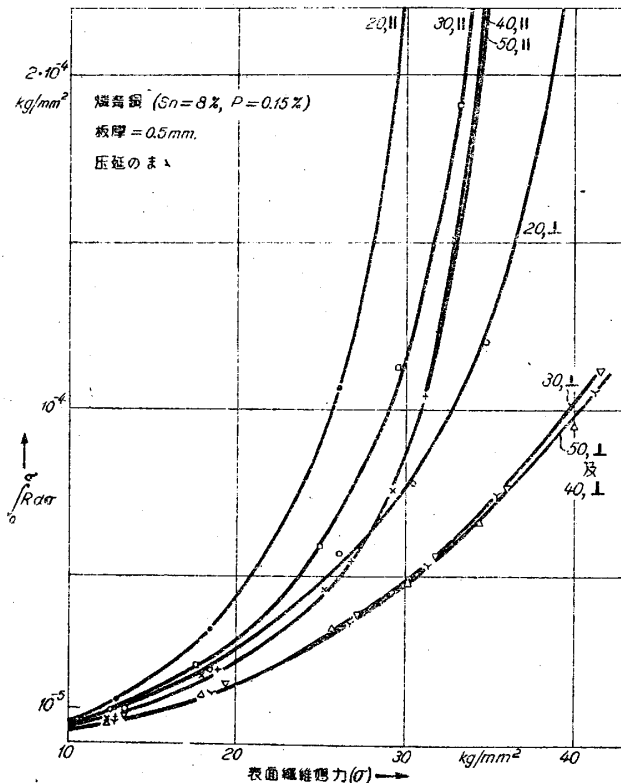
試料は一種類について六枚づつ測定して、六本の $\int_0^{\sigma} R d\sigma$ の曲線を畫き、その曲線のうちで平均位置に位するものを最も代表的なものとして採用した。

猶ほ第一報の實驗では試料の端 A に重りをかけてゐる時間が5分で、これを取去つてから5分を経て $\Delta\theta$ を測る事にしてあつたが、今度からこの時間を夫々40秒及び1.5分に變更した。この變更によつて測定結果に著しい變化は生じなかつた。

この報告では壓延度は通常の壓延度で表はした。即ち壓延前の板厚及び壓延後の板厚を夫々 T, t とするとき、壓延度は $x = (T-t)/T$ を % で表はしたもので與へられる。又、壓延方向及びそれに直角の方向を夫々 \parallel, \perp で表はす事は第一報と同じである。

2. Sn = 8% の磷青銅板

3. 試料 第一報でも Sn = 8% の磷青銅板をしらべたが、他の材料に比してヒステレシスが大きく、もつと良質の磷青銅の入手が望ましかつた。そのやうな希望を抱いてゐる際に丁度、航空技術協會の第五部會で壓延前の熱處理を注意深く行つた磷青銅板を調査する事になり、筆者もその試料の調査に参加する好機に恵まれた。これについて詳しい實驗を行つた結果として今度

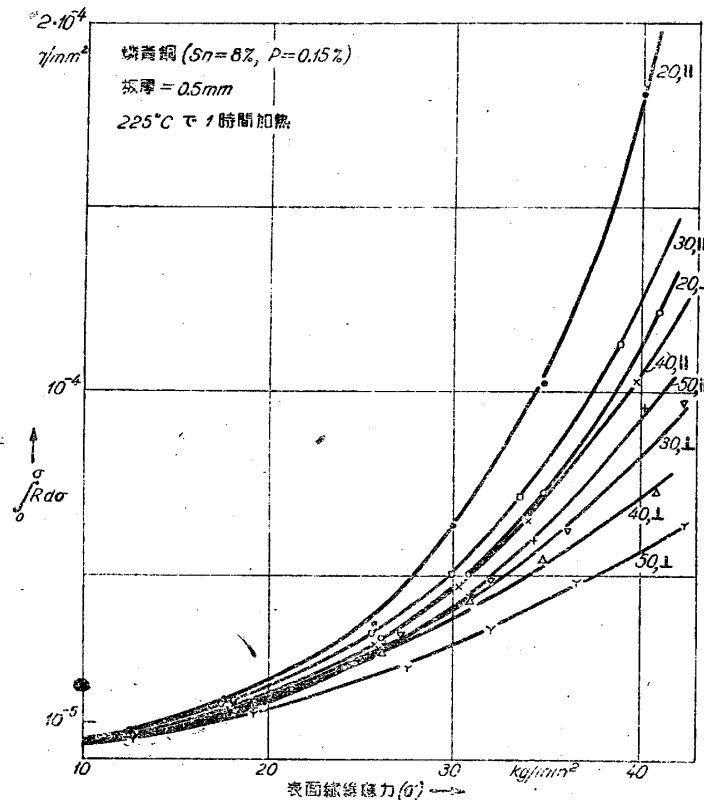


第2圖 壓延したまゝの磷青銅板に於ける應力と残留歪みとの關係

の磷青銅板は第一報の試料に比して遙かに優秀である事がわかつた。

この實驗に用ひた試料の製造過程は次の如きものである。先づ幅 170 mm, 厚さ約 22 mm の鑄塊を厚さ約 10 mm 迄長さの方向に壓延し, 燒鈍後長さの方向と直角の方向に壓延して幅約 230 mm まで幅出しを行つた後に再び長さの方向に壓延し厚さ約 5 mm としてから燒鈍する。この試料4個をとり, 夫々 1.000 mm, 0.834 mm, 0.714 mm, 0.625 mm になるまで壓延する。

但しこの壓延は3回に分けて行ひ, 壓延を行ふ毎に 550°C で 30 分間電氣爐で燒鈍し酸洗ひを行ふ。上記4種の板を, 最後に, 厚さ 0.5 mm まで冷間壓延を行ひ, 壓延度 50%, 40%, 30%, 20% の板を得る。



第3圖 225°C で1時間加熱した磷青銅板に於ける應力と殘留歪みとの關係

試料の成分は

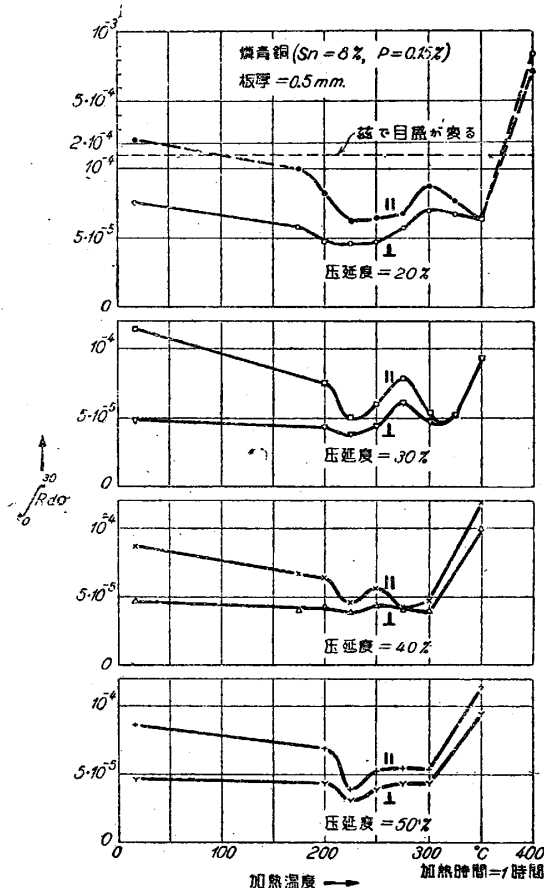
$$\text{Sn} = 8\%, \text{P} = 0.15\%, \text{Cu} = \text{殘部}$$

である。Sn の含有量は試料によつて區々で, 凡そ 5% の不均一を免れない。

4. 測定結果 第2圖は壓延したまゝで燒鈍しない試料の殘留歪みの曲線の代表的なものを示したものである。例へば 50, ⊥ とは壓延度 x が 50% で壓延の方向と直角の方向に切取つた試料を意味する。

低温燒鈍を施した試料に関する曲線を全部茲で報告する事は澤山の場所を必要とするので代表的に 225°C で1時間加熱した場合の曲線だけを第3圖に示した。

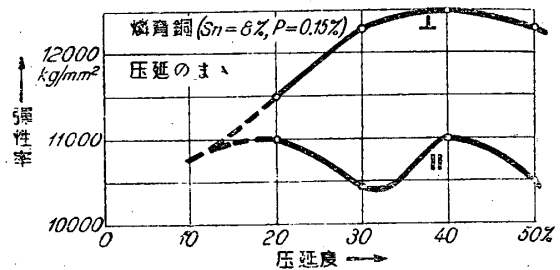
次に一例として $\sigma = 30 \text{ kg/mm}^2$ に相當する $\int_0^{\sigma} R d\sigma$ 即ち $\int_0^{30} R d\sigma$ の値を各種試料及び各焼鈍温度について圖示すれば第4圖が得られる。 $\int_0^{\sigma} R d\sigma$ と σ との関係は簡單であるから、 $\sigma = 30 \text{ kg/mm}^2$ の例によつて焼鈍温度の影響の順序がわかる。これによりすべての壓延度に對してヒステレシスを最小ならしめるには 225°C で1時間の焼鈍が最適である事がわかる。



第4圖 磷青銅板に於ける加熱温度と残留歪みとの關係

又、第4圖からわかるやうに、磷青銅の壓延板を徐々に高温に加熱して行くときの軟化は2段に分れて行はれる。 225°C はその最初の谷に相當するものである。次の谷は壓延度が $20\sim 40\%$ のものについては明瞭であるが、 50% のものではこれがあらはれてゐない。壓延度の大きなものはヒステレシスの急

激増加の温度が壓延度の小さいものよりも低い事は軟化に關する常識と一致する。



第5圖 壓延したまゝの磷青銅の壓延度と弾性率との關係

次に各種材料を 225°C で1時間加熱した場合にこれをヒステレシスの大小によつて順序をつける工夫をして見よう。板の撓みは應力が與へられると $1/E$ (E は弾性率) に比例する。空盒材料は撓みが大きくてヒステレシスが小さい事を必要とする。従つて一定の撓みを與へた場合のヒステレシスを比較する事が最も簡単な合理的方法と考へる事が出来る。

そこで何を基準にしても宜いのであるが、壓延度 40% の II 方向の試料を 225°C で1時間加熱したものを基準とし、これが $\sigma = 30 \text{ kg/mm}^2$ で受ける撓みと同じ撓みを各種試料に與へた場合のヒステレシスを比較して見よう。そのやうな撓みによつて生ずる應力を σ' と書く事にする。

σ' を求めるには弾性率を求める必要がある。弾性率の簡単な測定法については既に第一報で述べたから、茲では測定法の説明を省略する。その結果だけを書けば第1表の通りで、そのうち壓延のまゝの試料の弾性率を圖示すれば第5圖のやうになる。これによれば壓延度が 30% と 40% との間で壓延方向の弾性率が極小値を取る。第一報に記載した磷青銅の彈

性率の簡単な測定法については既に第一報で述べたから、茲では測定法の説明を省略する。その結果だけを書けば第1表の通りで、そのうち壓延のまゝの試料の弾性率を圖示すれば第5圖のやうになる。これによれば壓延度が 30% と 40% との間で壓延方向の弾性率が極小値を取る。第一報に記載した磷青銅の彈

第1表 Su=8%の燐青銅板の彈性率 (kg/mm²)

壓 延 度	方 向	壓 延 の ま た	225°C で 1 時間 加熱	225°C で 2 時間 加熱
20 %	∥	11000	11000	11000
	⊥	11500	11500	11500
30 %	∥	10450	10450	10450
	⊥	12300	12200	12100
40 %	∥	11000	11000	11000
	⊥	12500	12500	12600
50 %	∥	10500	10500	10500
	⊥	12300	12700	12800

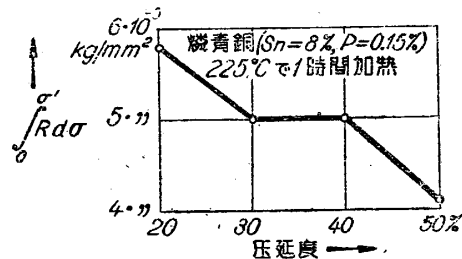
性率も第5圖の曲線に大體載せる事が出来る。

さて第1表の彈性率を用ひて225°Cで1時間加熱した試料の σ' を計算し、これに對應する $\int_0^{\sigma'} R d\sigma$ を第3圖から求めて、各壓延度について∥と⊥とを平均すれば第2表のやうに

第2表 Su=8%の燐青銅板の殘留歪み

壓 延 度	方 向	σ' (kg/mm ²)	$\int_0^{\sigma'} R d\sigma \times 10^5$ (kg/mm ²)	平 均
20 %	∥	30.0	6.3 ₅	5.8
	⊥	31.4	5.3	
30 %	∥	28.5	4.6 ₅	5.0
	⊥	33.3	5.2 ₅	
40 %	∥	30.0	4.7 ₅	5.0
	⊥	34.1	5.1 ₅	
50 %	∥	28.6	3.7 ₅	4.1
	⊥	34.7	4.3 ₅	

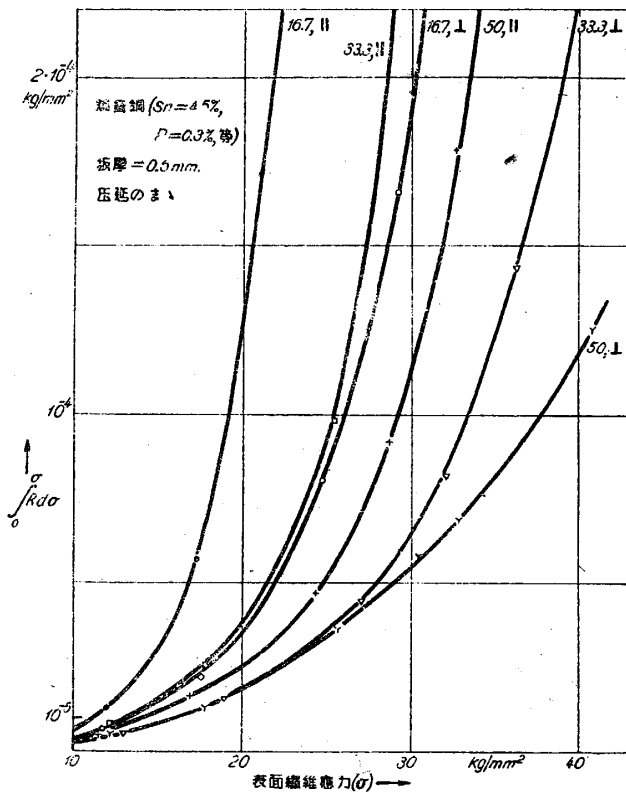
なる。これを曲線であらせば第6圖となり、これによつて殘留歪みの大きさを壓延度によつて順序をつける事が出来る。先づ30%よりも小さい壓延度の板は殘留歪みが大き過ぎて空盒用としては不適當である。50%の板はこの點では合格するけれど、實際の空盒として波型を付ける際に割目を生ずる恐れがあるので、問題にならない。結局、空盒用燐青銅板としては壓延度が30%乃至40%が良いのではないかと思はれる。



第6圖 225°Cで1時間加熱した燐青銅板に於ける壓延度と平均殘留歪みとの關係

3. Sn=4.5%の燐青銅板

5. 試料. Snの含有量が8%の燐青銅は彈性率が小さいので、一定の撓み應力に對して撓みの量が大きく、彈性材料としては優れてゐるが、インゴットを作る際にSnが偏在し易く、一樣な製品といふ點では、餘り感心出来ない。それではSnの含有量をもつと少くした燐青銅の成績はどうかといふのに、これは壓延し易く、Snの偏析も少く、我が國でもこれを用ひた製品は少くない。既に大東亞戦争よりも以前に米國の計器用彈性材料にはSnの含有量が5%乃至4%でこれに少量のFe又はNiを添加した燐青銅を用ひたものが少くな



第7圖 壓延したまゝの磷青銅 (Sn=4.5%) 板に於ける應力と残留歪みとの關係
Fe=0.3%, Cu=殘部

この試料を 150~350°C の種々の温度で1時間加熱してヒステレシスの減少の程度をしらべた。

6. 測定結果. 第7圖は壓延したまゝの試料の残留歪みの曲線を示す。豫期したやうに、壓延度が16.7%のものは残留歪みが極めて大きい。低温焼鈍を施した試料に関する多数の曲線のうちで、275°Cで1時間加熱したものの曲線を第8圖に掲げる。焼鈍によつて特に||方向が改良される事はこの圖から明かである。

第9圖は $\sigma = 30 \text{ kg/mm}^2$ に於ける $\int_0^\sigma R d\sigma$ の値を各種壓延度の試料を各温度で1時間加熱した場合について圖示したもので、第4圖と極めてよく似た形をしてゐる。壓延度16.7%の試料の||方向だけは他のものと異つて稍

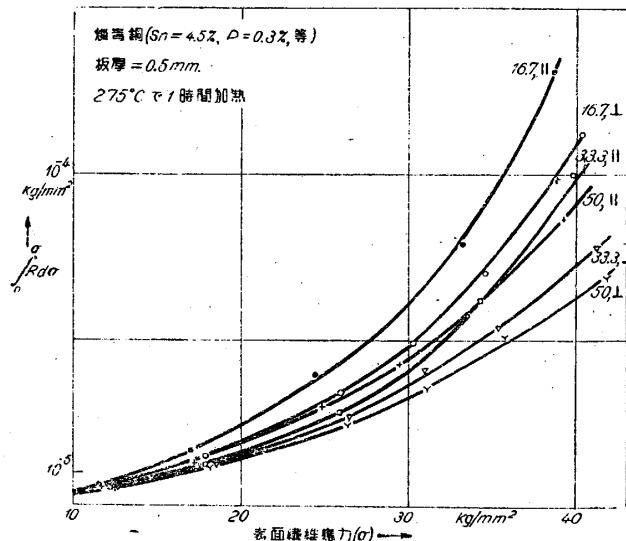
かつた。又、鹵獲計器にもこのやうな成分の磷青銅が屢々見受けられる。Fe又はNiを少し添加した目的は結晶粒を出来るだけ小さくする事にあると思はれる。

茲でもSuの含有量の少い磷青銅を研究する事になり、そのうちで最も代表的と見做されるSu=4.5%の磷青銅を調査した。

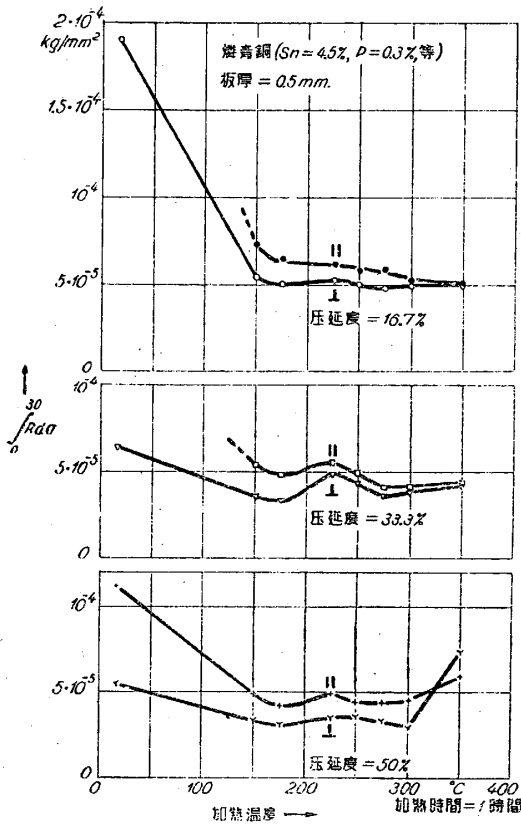
試料の製造過程は8%Suの磷青銅板の場合と大差無く、三回の壓延の後に厚さ1.00mm, 0.75mm, 0.60mmの三種の板を作り、これを550°Cで1時間焼鈍して酸洗ひをした後に何れも0.5mmまで冷間壓延をして夫々50%, 33.3%, 16.7%の壓延度の板を得た、

これらの板の豫定成分は次の通りである。

Sn=4.5%, P=0.3%, Ni=0.5%,



第8圖 275°Cで1時間加熱した磷青銅板に於ける應力と残留歪みとの關係

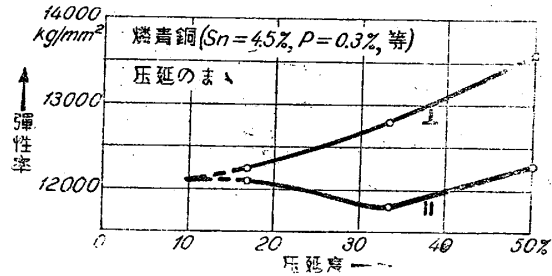


第9圖 磷青銅 (Sn=4.5%) 板に於ける加熱温度と残留歪みとの關係

々なだらかな形をしてゐて、第一の谷が明瞭でない。Su=4.5%の磷青銅では175°CがSu=8%の磷青銅の225°Cに相當するらしいけれど、前者に於いては第一の谷よりも第二の谷の方が低い。第二の谷はすべての壓延度に對して凡そ275~300°Cの所に存在する。

空盒用材料としての適否を見るために、その第一歩の手段として以前と同様に各種材料の彈性率を測定し、これを第3表に示す。

壓延のままの試料の彈性率を壓延度の函數として示せば第10圖の通りである。||方向では



第10圖 壓延したまゝの磷青銅 (Sn=4.5%) の壓延度と彈性率との關係

凡そ33%に極小値がある事は8% Snの磷青銅の場合と同様である。

次に壓延度が40%の8% Snの磷青銅の||方向の $\sigma = 30 \text{ kg/mm}^2$ に於ける撓みと同じ撓みを與へる應力(σ')を275°Cで1時間加熱

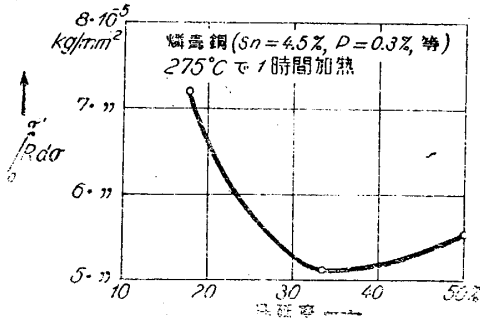
第3表 4.5% Suの磷青銅板の彈性率 (kg/mm²)

壓延度	方向	壓延のまま	175°Cで1時間加熱	275°Cで1時間加熱
16.7%		12100	12200	12100
	⊥	12250	12500	12350
33.3%		11800	12000	11900
	⊥	12750	12800	12800
50%		12200	12200	12200
	⊥	13600	13700	13900

第4表 4.5% Snの磷青銅板の残留歪み (275°Cで1時間加熱の場合)

壓延度	方向	σ' (kg/mm²)	$\int_0^{\sigma'} R d\sigma \times 10^5$ (kg/mm²)	平均
16.7%		33.0	7.9	7.2
	⊥	33.7	6.5	
33.3%		32.2	5.0	5.1 ₅
	⊥	34.9	5.3	
50%		33.3	5.6 ₅	5.5 ₅
	⊥	37.6	5.4 ₅	

した 4.5 % Sn の燐青銅について計算し、それに対応する $\int_0^{\sigma'} R d\sigma$ の値を列挙し、各種壓延度について \parallel と \perp とを平均すれば第 4 表の通りになり、これを圖示すれば第 11 圖となる。



第 11 圖 275°C で 1 時間加熱した燐青銅板に於ける壓延度と平均残留歪みとの關係

第 11 圖により、4.5 % Sn の燐青銅では壓延度は凡そ 33 % でヒステレシスが最小になる事がわかる。そしてそれに対応する $\int_0^{\sigma'} R d\sigma$ の値は $5.1 \times 10^{-5} \text{kg/mm}^2$ であるから、壓延度 40 % の 8 % Sn の燐青銅のそれと實驗誤差の範圍で同程度になる。

猶ほ第 9 圖の第一の谷に當る 175°C で 1 時間加熱する事の影響を見るのに、先づ彈性率を測り (第 3 表参照)、これによつて σ' を求め $\int_0^{\sigma'} R d\sigma$ を残留歪みの曲線から測り、 \parallel と \perp についてそ

第 5 表 4.5 % Sn の燐青銅板の残留歪み (175°C で 1 時間加熱した場合)

壓 延 度	方 向	σ' (kg/mm ²)	$\int_0^{\sigma'} R d\sigma \times 10^5$ (kg/mm ²)	平 均
16.7 %	\parallel	33.3	11.2	} 9.5 ₅
	\perp	34.1	7.9	
33.3 %	\parallel	32.7	6.8 ₅	} 5.8
	\perp	34.9	4.8	
50 %	\parallel	33.3	5.6	} 5.4 ₅
	\perp	37.4	5.3	

の平均を取れば、第 5 表のやうになる。これと第 4 表とを比較すれば、矢張り 275°C で 1 時間加熱する方がヒステレシスを小さくする事に對してもつと有效である事がわかる。

以上述べた所を要約すれば次の通りである。4.5 % Sn の燐青銅板では凡そ 275°C で 1 時間加熱する事が最適で、壓延度は 33.3 % のものが空盒用材料として最も優れてゐる。然かもこれは 8 % Sn の燐青銅の最良のものと同程度の性能を持つてゐる。それ故に一樣な製品を作る事が容易な 4.5 % Sn の燐青銅の方が 8 % Sn の燐青銅よりも多量生産に適してゐる。