

氏名(本籍)	邊 見 善 三 (福島県)
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	工 第 1 5 8 号
学位授与年月日	昭和47年4月12日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
最終学歴	昭和23年3月 東北大学工学部金属工学科卒業
学位論文題目	ベリリウム銅のばね性に関する研究
	(主査)
論文審査委員	教授 和泉 修 教授 金子 秀夫 教授 平野 賢一

論 文 内 容 要 旨

研 究 目 的

ベリリウム銅25合金は非鉄合金の中で極めて高い引張強さを示し、ばね材料として広く使用されている。しかし、本合金のばね性は著しく秀れることかう、従来のばね試験機の測定条件では、その高いばね限界値は求められず、そのため本合金をばね材料として使用する場合の時効処理も単に引張強さの最高を示す処理条件で行なっていたに過ぎない。

そこで本研究では先ず高いばね限界値の測定法を確立し、次にベリリウム銅の時効処理によるばね限界値の変化を求めて他の機械的性質と比較検討し、さらに熱膨張、電気抵抗、透過電子顕微鏡を用いて析出過程を追跡してばね限界値との関連を把握することを目的とした。

第 1 章 緒 論

ベリリウム銅合金系には高伝導度合金として 10 合金と 50 合金，強力合金として 25 合金 165 合金があるが，電子および通信機器では小型，軽量と長寿命の目的から高性能ばねとして 25 合金が使用されてきた。そこで筆者はばね限界値を解析してその定義を確立し，高いばね限界値を示すベリリウム銅 25 合金も定義に基づき，従来のばね試験機の測定法を改良すれば充分測定が可能であることを明らかにし，時効処理によるばね限界値と機械的性質の変化を対比させ，ばね限界値を金属学的に解釈する目的で，熱膨張および電気抵抗電顕組織による時効過程の解析を行ない，最後に以上の結果をベリリウム銅の実用化試験に適用する前提を示した。

第 2 章 高ばね限界値の測定法に関する研究

ばね性の判定法として従来よりばね限界値が用いられているが，この方法は一端を固定した片持り方式（旧型ばね試験機という）で測定される。この方式で規定された測定条件においては黄銅，りん青銅，洋白，18-8 ステンレス銅などの比較的低いばね限界値しか測定できず，高いばね限界値を示すベリリウム銅や 17.7 PH ステンレス鋼などは測定不可能であった。ばね限界値は材料力学の基本式に測定条件を入れて求まるものであるので，式を誘導して「ばね限界値 K_b とは曲げによる表面最大応力 σ が $\frac{8}{3} \cdot \frac{E}{10^4}$ (kg/mm^2) となるときの塑性変形と同等の永久変形を生じさせる応力」の定義が得られる。一方 1957 年 D I M 規格で両端支持方式（新型という）によるばね限界値を求める方法が示されている。この測定条件の標準測定法（General method）を材料力学の基本式に導入すると前記と同一のばね限界値の定義が導出される。また，D I N に試料の標準長さを $\frac{1}{2}$ にし，永久たわみも標準値の $\frac{1}{2}$ にした Double method の方法も示されているが，これも基本式よりこれらの条件を入れるとやはり前記ばね限界値と同一の定義が得られることが明らかになった。そこで旧型にも Double method 方式を採用することにより高いばね限界値の測定が可能であることを示した。このことは古い J I S に規定されていた誤った測定条件を訂正し，ばね限界値を正常化したものである。一方，ばね限界値 150 kg/mm^2 程度の高いばね限界値を曲げモーメントより直接求める高力型も，測定条件を決めるとばね限界値の定義に合致することがわかった。

基本式より誘導したばね限界値はすべてのばね試験機で合致すべきことを示したが，果して実験的に正しい値を示すかどうか，旧型，および新型を 0.05 mm 厚まで測定出来るように改良した薄板型，高力型の 3 種類のばね試験機を用いて実験を行なった。実験項目として測定者 5 名，ばね材料はベリリウム銅，17.7 PH ステンレス鋼，りん青銅，洋白，黄銅の 5 種類，板厚は 0.2 mm と 0.4 mm の 2 種類で L_{27} の実験計画法に組んで分散分析を行なった。その結果ばね限界値 K_b には差の生じないことがわかり，筆者の提案した定義と方法に基づけば旧型でもベリリウム銅の

ごとき高いばね限界値を示す材料も他のばね試験機と差がなくばね限界値の求まることが実験的にも確かめられた。

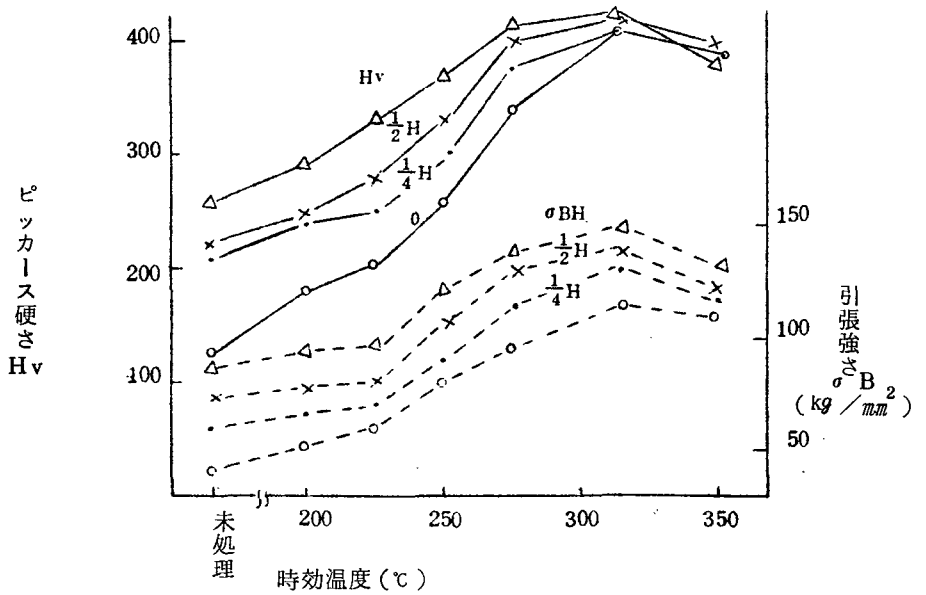
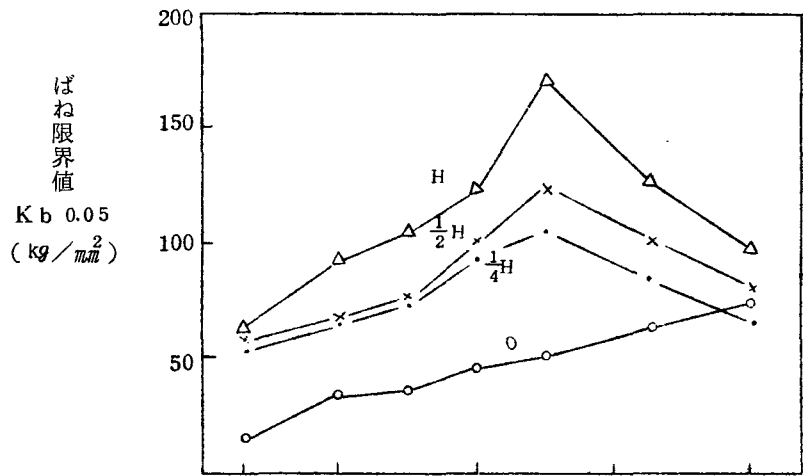
第3章 ばね性の熱処理依存性に関する研究

ばね材料には黄銅，りん青銅，洋白，キュプロニッケル，1 8.8 ステンレス鋼，1 7.7 ステンレス鋼などの低温焼鈍硬化型ばね材料と1 7.7 PH ステンレス鋼，エルジロイ，Cu-Ti 合金などの析出硬化型合金が使用されている。これら合金はそれぞればね限界値および引張強さや硬さがすべて同一熱処理により最高を示すものでなく，各機械的性質の熱処理条件依存性が異っている。一方，ベリリウム銅は，従来ばね限界値が正確に求められないために引張強さが3 1 5℃ 2時間の時効により最高値を示すということから，ばね材料として使用する場合にも，この時効処理条件が単純に採用されていた。そこで本研究では第2章で記述したごとくベリリウム銅のばね限界値の測定法を確立したので，板厚0.2 mm，質別0（溶体化のまま）， $\frac{1}{4}$ H（加工率1 1%）， $\frac{1}{2}$ H（加工率2 0%），H（加工率3 6%）について各種時効を行ない引張強さ硬さとともにばね限界値を測定した。その結果の代表例として第1図に示す。この図より時効時間2時間で引張強さおよび硬さは3 1 5℃の処理で最高を示すが，ばね限界値は2 7 5℃の処理のときに最高値を示していることがわかる。この傾向は3 5 0℃の温度で時効時間との関係を見ると（第2図），最高値を示す順序はばね限界値が最短時間で，ついで硬さ，引張強さの順序であることから，ばね限界値の最高を示す処理は，引張強さ，硬さの最高を示す時効処理の前段階の時効処理条件にあることがわかる。

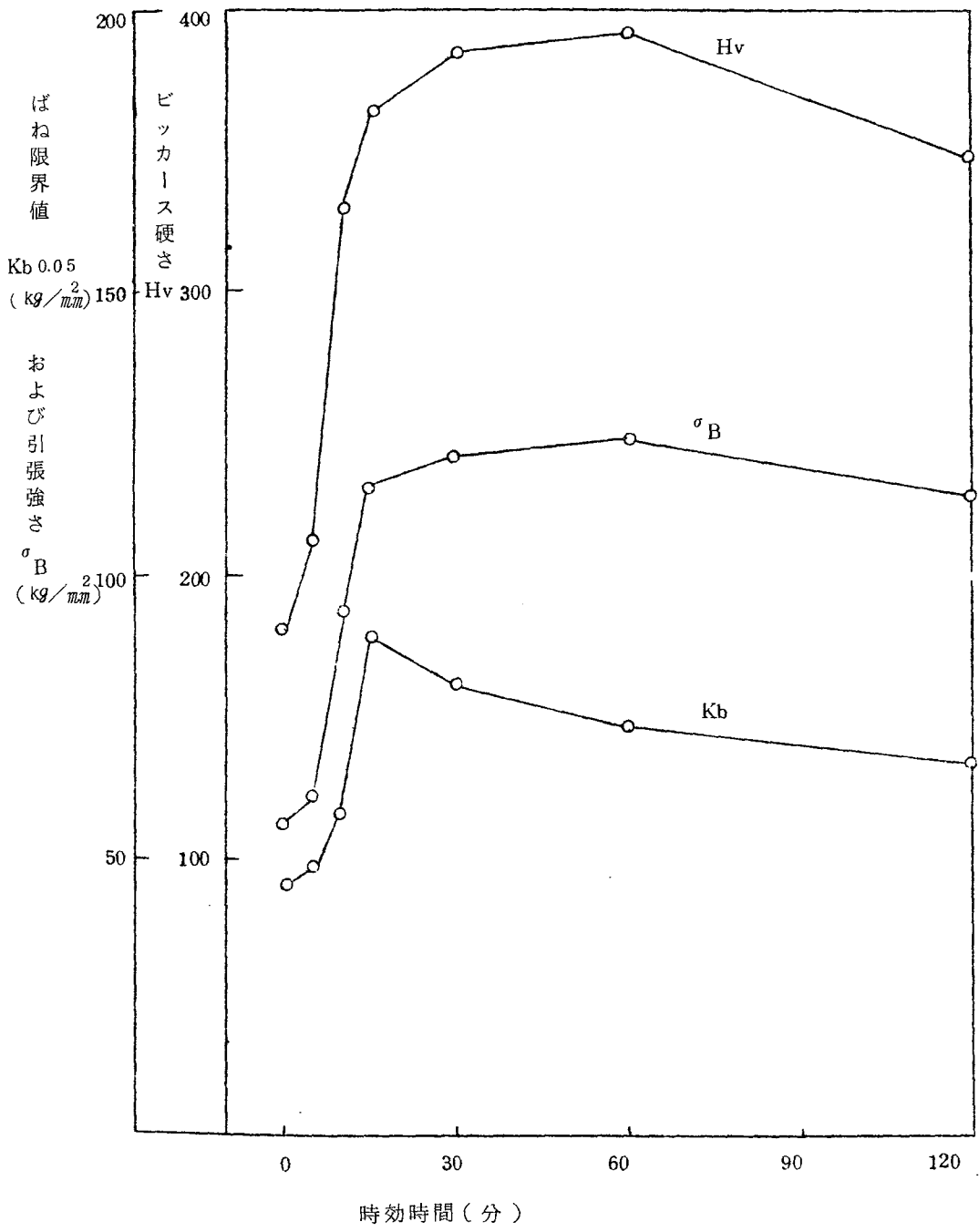
また，ベリリウム銅は溶体化後冷間加工が加えられることにより，圧延による方向性を生じ，これが機械的性質にどの程度影響を及ぼすか，試料を圧延方向，圧延と4 5°方向，圧延と直角方向に採取し時効処理を行なって引張強さとばね限界値とを測定した。その結果は第3図に示すごとく，ばね限界値は引張強さの最高を示す時効処理条件よりも前の段階の処理において最高を示すことは前述と同様であるが，引張強さおよびばね限界値の方向依存性の現われるのは質別 $\frac{1}{2}$ HとHで，圧延と直角方向が高い値を示している。

つぎに疲れ限度とばね限界値との関係を調べた。板厚0.2 質別 $\frac{1}{4}$ Hと線径0.4 mm 冷間加工率1 1%の材料を各種温度を変え，時間は2時間一定の時効を行なって $1 0^7$ 回での疲れ限度を求め，ばね限界値との関係を求めたところ，第4図に示すごとく，ばね限界値の高い値を示す時効処理で疲れ限度も高い値を示す傾向がある知見を得た。

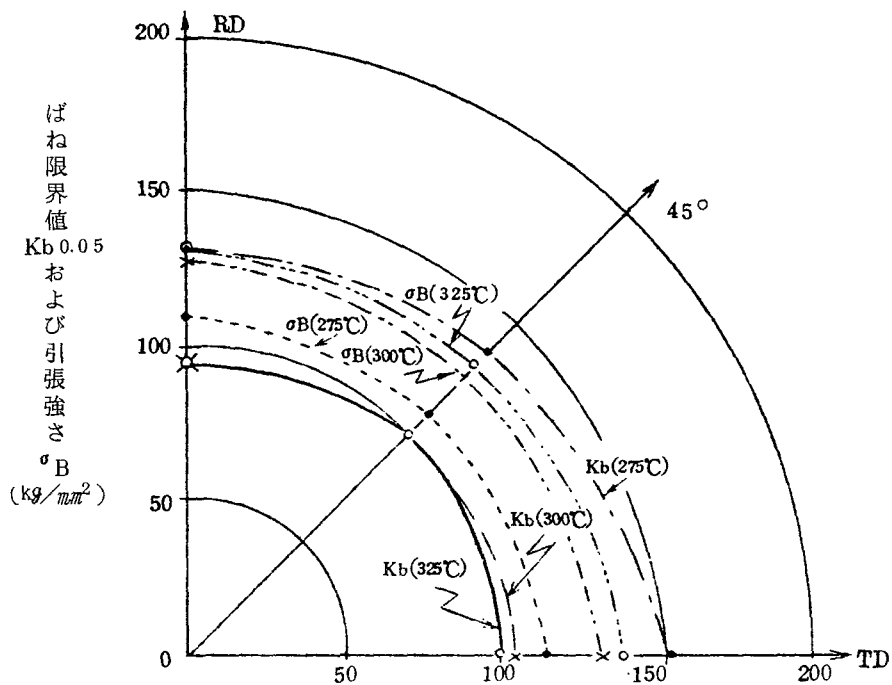
これらのことによりベリリウム銅をばね材料としてみたとき，一般に言われている3 1 5℃，2時間の引張強さの最高を示す時効処理よりも2 7 5℃，2時間の時効処理がよい結果を示すことが明らかにされた。



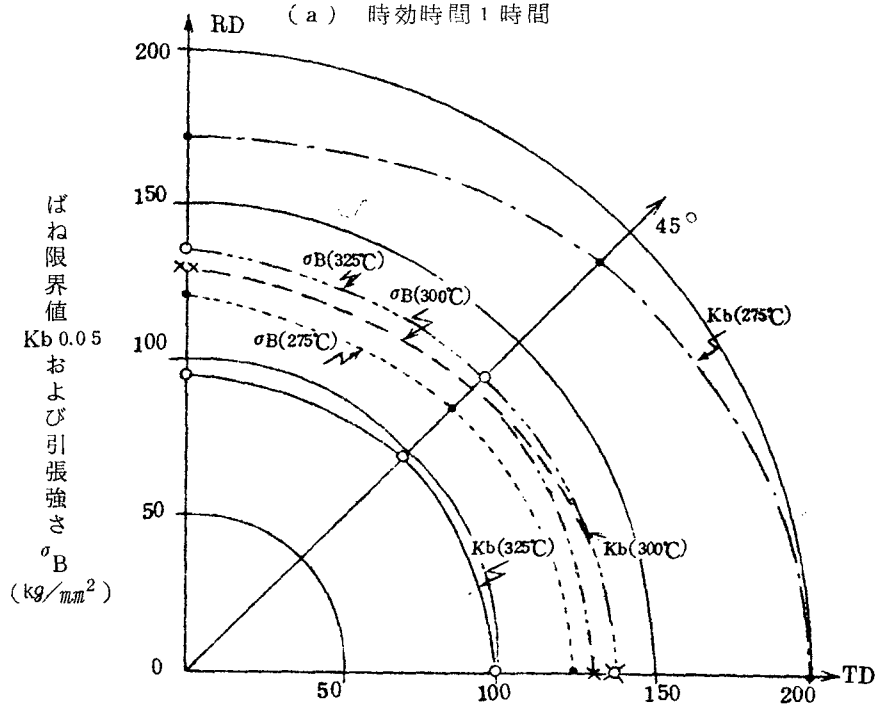
第1図 ベリリウム銅板の時効処理による機械的性質
(時間2時間)



第2図 ベリリウム銅350℃時効による機械的性質の変化(質別 $\frac{1}{4}$ H)

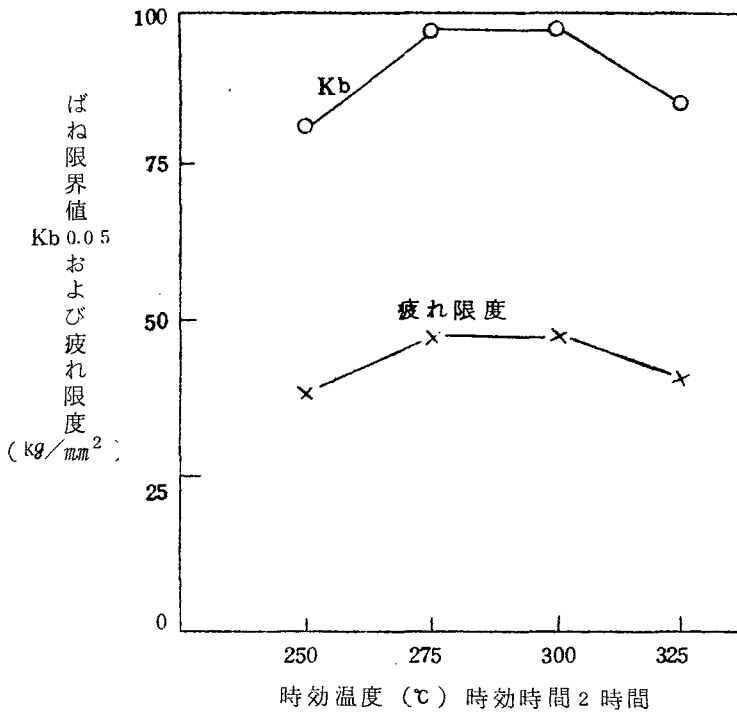


(a) 時効時間 1 時間

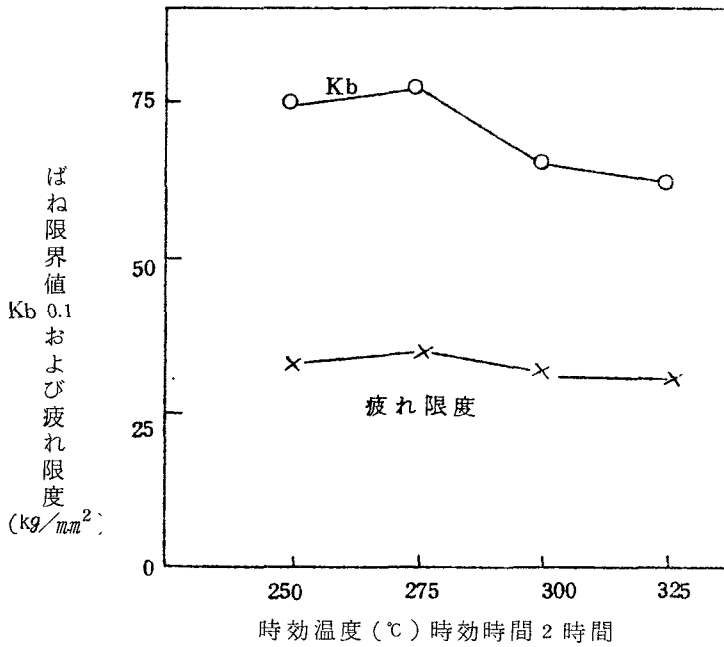


(b) 時効時間 2 時間

第 3 図 ベリリウム銅板質別 $\frac{1}{2}$ H, 時効処理後の異方性



(a) ベリリウム銅板厚 0.2 mm



(b) ベリリウム銅線径 0.4 mm

第4図 ばね限界値と疲れ限度との関係

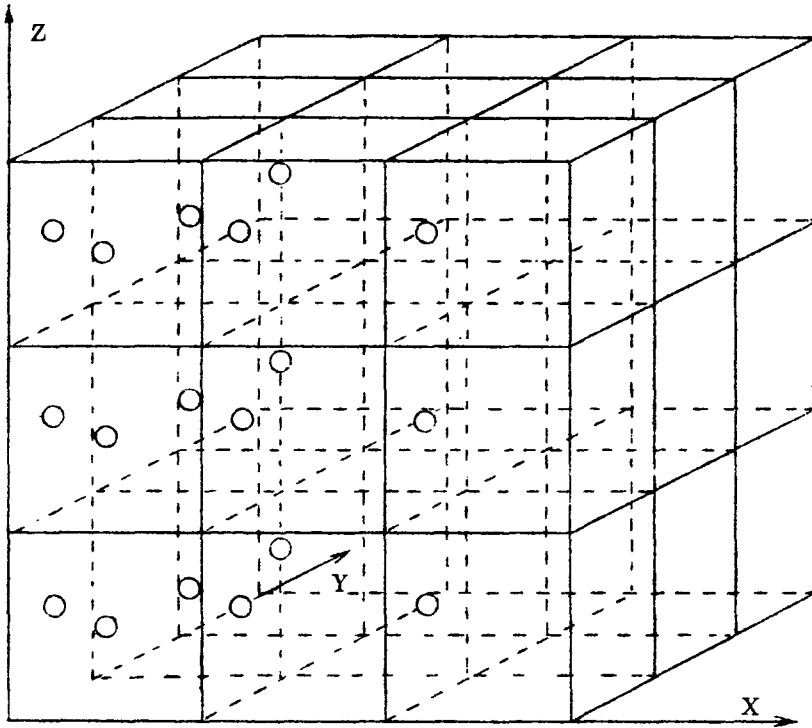
第4章 析出過程とばね性との関連に関する研究

時効処理によるばね限界値を含めた機械的性質の上昇の様相は前章のとおりであるが、種々のばね材料の熱処理によるばね限界値上昇の金属学的な統一した見解はない。

また、一方ベリリウム銅の析出に関して従来より α 相 \rightarrow G・P・Zone \rightarrow r相の析出であるとする説と、 α 相 \rightarrow G・P・Zone \rightarrow r'相 \rightarrow r'相の中間にr'相の析出を認める説の二つが提案されていた。そこで筆者はベリリウム銅の等時および恒温による熱膨張および電気抵抗の変化より析出相の追跡と、時効処理後透過電顕組織より析出相の追跡を行ない、ばね限界値との関連を考察した。

熱膨張の変化をみると250℃、275℃で収縮のみられるのはG・P・Zone形成であり電気抵抗の変化で275℃での減少もG・P(Ⅱ)Zoneの形式によるものである。なお、冷間加工を加えるとこの傾向は増加する。つぎに詳細な相の決定を透過電顕組織により検討した(写真1～写真13)。結晶粒界では α 相 \rightarrow r相の中間層のない析出過程であるが、結晶粒内においては従来の二節とも異なった析出相の変化として α 相 \rightarrow G・P・(Ⅰ)Zone \rightarrow G・P・(Ⅱ)Zone \rightarrow r'相 \rightarrow r相であることが見出された。すなわちG・P・(Ⅰ)Zoneは{200}面に $\langle 200 \rangle$ 方向のStreakを示していることからBe原子が1電子層に集まったものである。G・P・(Ⅱ)Zoneはr'相の禁制反射を示すものでなく、G・P・(Ⅰ)Zoneと同じようにStreakを示すが、(000)と(002)点との $\frac{2}{3}$ の位置に電子線反射強度の極大点が現われている。この $\frac{2}{3}$ 班点を示す組織をG・P・(Ⅱ)Zoneとし、結晶解析を行ない、 $\frac{2}{3}$ 班点が禁制反射点であることから規則格子と考え、第5図の如き結晶モデルを得た。一方r'相は明白な禁制反射点を示していることから、結晶解析の結果、GuAu I型であるとの結論を得た。以上の析出過程の相の検討より、G・P・Zoneを2つに分けG・P・(Ⅰ)Zoneと $\frac{2}{3}$ 班点の現われるG・P・(Ⅱ)Zoneに区別したのが筆者の結論である。一方Cuを含まぬCu-2%Be合金の析出過程と比較した。その結果は結晶粒内ではベリリウム銅と同じであるが、粒界はベリリウム銅より早くr相が析出している。

ばね限界値との関連では、恒温における熱膨張の変化で一番収縮した熱処理条件が最高のばね限界値を示している。しかし電気抵抗とばね限界値との関係は把握できない。透過電顕組織よりみると $\frac{2}{3}$ 班点の現われるG・P(Ⅱ)Zoneが最高のばね限界値を示すことがわかった。



○印 Be 原子

他の点は Cu 原子

第 5 図 G・P・(I) Zone 結晶構造モデル

第5章 実 用 試 験

ベリリウム銅は苛酷な成型加工が出来ることが特徴の一つである。そのうえ第3章で記述したとおり時効処理によりばね限界値が上昇するので、プリントジャック，電子交換用コネクタ，有極リレーのばねとして実用化の検討を加えた。このうちジャックおよびコネクタの如き使用の仕方，すなわち静的に応力が長時間加わる時は，ベリリウム銅を成型加工後250℃，2時間の時効処理，すなわち析出相がG・P・(I) Zone のときよい特性を示し，リレーのばねとして動的に応力が加わる時は275℃，2時間の時効処理，すなわちばね限界値が最高を示すG・P・(II) Zone の組織がよいことがわかり長寿命の部品として製品化出来た。

第6章 結 論

(1) ばね限界値の定義が不明確なままばね材料の判定にばね限界値が用いられてきたが，ばね試験機とその測定法よりばね限界値の定義を確立し，この定義に基づき従来使用し，また規格とされている旧型の試験機にDouble methodの採用を可能にし，ベリリウム銅のばね限界値の測定を可能にした。

(2) 熱処理によるばね限界値の依存性は，G・P・(II) Zone の現われる275℃，2時間の時効処理で最高値を示し，従来用いられていた引張強さの最高を示す時効処理，すなわち315℃，2時間よりも高いばね限界値を示すことが明らかにされた。

(3) 析出過程は結晶粒界では α 相 $\rightarrow r$ 相の変化であるが，粒内では規則格子を示すG・P・(III) Zone の現われることを見出し， α 相 \rightarrow G・P・(I) Zone \rightarrow G・P・(II) Zone $\rightarrow r'$ 相 $\rightarrow r$ 相の変化であることを示した。そしてばね限界値の最高を示す析出相はこのG・P・(II) Zone である。

(4) プリントジャック，コネクタの実用化試験において，静的な応力の加わる条件においてはG・P・(I) Zone の析出相のときがよく，ばねとして動的に応力の加わる時はG・P・(II) Zone の析出する熱処理条件がよいことが明確にされ，実用上本合金の熱処理法が大幅に改良された。



写真1 溶体化のまま



写真3 溶体化後 250°C 2時間時効

<110>

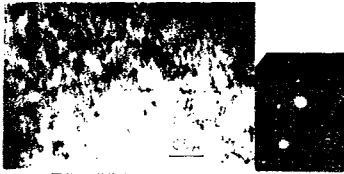


写真2 溶体化後 11%冷間加工のまま <110>



写真4 11%冷間加工後 250°C 2時間時効 <110>

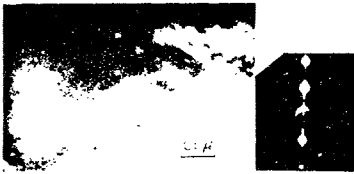


写真5 溶体化後 275°C 2時間時効

<110>



写真7 溶体化後 315°C 2時間時効

[112]



写真6 11%冷間加工後 275°C 2時間時効 <210>



写真8 11%冷間加工後 315°C 2時間時効 <110>



写真9 溶体化後350℃2時間時効 <312>



写真11 溶体化後250℃2時間時効

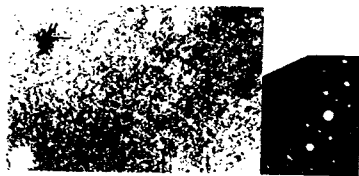


写真10 11%冷間加工後350℃時効 <110>



写真12 溶体化後275℃2時間時効



写真13 溶体化後315℃2時間時効

審 査 結 果 の 要 旨

近年電気・通信機器の高性能化にともない、部品であるばね材料にも高強度合金が使用されるようになった。ベリリウム銅もその一種である。本合金は時効処理することにより高強度が得られる、いわゆる析出硬化型合金である。一方、ばね性の判定はばね試験機によりばね限界値を測定して行なわれるが、従来の方法では高強度材についての測定は不可能で、そのため本合金に対しては引張り強さが最高を示す時効温度をそのままばね性に対しても適用していたにすぎない。

本研究では、まず新しい測定法を確立して高いばね限界値を測定可能とし、ついでベリリウム銅について最高ばね性が得られる時効条件を見出した。さらに、本合金の析出過程を解析して新しい知見を得ると共に、それとばね性との関連を明らかにした。本論文はこれらの研究成果を集めたもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論であり、本研究の目的および従来の研究について述べている。

第2章は、高ばね限界値の測定法を検討した結果である。従来片持梁方式の測定法では比較的低いばね限界値しか測定できないため、まず材料力学的にばね限界値の定義を明確にし、これに基づき高ばね限界値の測定法を確立した。これによりJISの規定が改訂されたのは著者の研究の功績である。

第3章では、ばね性におよぼす熱処理の影響を、板材の方向性ならびに疲労性と併せて比較検討している。すなわち、前章において確立された高ばね限界値の測定法に基づき、各質別時効材のばね限界値を引張り強さの最高が得られる時効温度(315℃)より低い温度(275℃)で示されることが明らかにされた。このことは従来ベリリウム銅に対してとられてきた熱処理条件を大幅に変えるものである。

第4章では、上述の熱処理に関する結果に対し、組織学的対応を求める目的で時効過程の解析を熱膨張、電気抵抗の測定、ならびに電子顕微鏡観察、電子線回折により行なっている。その結果、275℃の時効で従来のG・P・ゾーンとは別個のゾーン形成を見出し、これをG・P・(Ⅱ)ゾーンと名づけた。この時効段階で材料に顕著な収縮が現われ、これらとばね限界値の最大とが対応することが明らかにされた。

第5章は、実用化試験の結果で、プリントジャック、電子交換用コネクタ、有極リレーなどに本研究結果を適用し、性能向上の著しいことを生産現場的にも確認している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は高強度材料のばね性測定法を確立し、ベリリウム銅について従来曖昧とされてきたばね性と熱処理条件ならびに時効過程との関連を明らかにしたもので、金属工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。