U. D. C. 539.434 : 669.45 : 621.315.221.5

ケーブル使用温度における各種鉛被用合金のクリープ特性

Creep Resistance of Various Lead Alloys for Cable Sheathing at Cable Operating Temperature

大　内　敬　次*
Keiji Ōuchi

内　容　梗　概

ケーブル鉛被用合金としては，現場作業が容易であり機械的性質，耐食性，および耐疲労性などにすぐれた性質を要求されているが，常温における耐クリープ性および高温における耐クリープ性も重要な因子の一つである。本研究では先に各種鉛合金の常温におけるクリープ性について報告したので，今回は定常状態におけるケーブルの使用温度が約70℃と考えられるため，その温度における各種鉛合金の耐クリープ性について検討した。

結果を要約すると次のようである。

（1）　実際の使用状態に近い低荷重クリープでは，純鉛は Pb–Sn，Pb–Sn–Sb 系合金と同程度のクリープ特性を示している

（2）　Pb–Te–Cu 系合金は純鉛および Pb–Sn，Pb–Sn–Sb 合金に比べ非常にすぐれたクリープ特性を示しており，また Pb–As 系（F–3合金），および Pb–Te–As 系（Tellurium Lead Alloy）合金と比較して，現在までの実験結果では大体同程度の傾向である。

（3）　ケーブル使用時の鉛被温度と考えられる70℃のクリープ過程中において純鉛，Pb–Sn および Pb–Sn–Sb 合金などは著しく結晶粒が成長している。しかし Pb–Te–Cu，F–3合金および Tellurium Lead Alloy などはあまり結晶粒の成長を起していない。

1. 緒　　言

最近電力需要の増大に伴う送電網の拡充とともに 60 kV 以上のOFケーブルが多量に布設されるようになり，また従来ソリッド形ケーブルの分野であった 10～30kV 系統にも保守管理の容易さなどから，低ガス圧ケーブルが使用されてきている。

これら内圧形ケーブルではケーブル内部に油またはガスにより圧力を加えているため，ソリッド形ケーブルとは異なって鉛被に円周応力 (Hoop Stress) およびケーブルの長さ方向の引張り応力を生ずる。このため鉛被の耐クリープ性が重要な問題となってきた。またソリッド形ケーブルにおいても布設ルートに高低差がある場合は絶縁油が次第に低部に移動して鉛被に圧力がかかり，鉛被の膨脹さらに破壊にいたる事故を生ずる場合がある[1][2]。

このため耐疲労性および耐クリープ性にすぐれ，またケーブル使用状態で負荷の増大により，鉛被温度が上昇しても上記の諸性質が変化しない性質を示すケーブル鉛被用合金の研究が数多く行われている[3]~[11]。

これらの報告の中で Pb–As 系[3][4] (F–3合金)，および Pb–Te–As 系合金[5] (Tellurium Lead Alloy) が比較的すぐれた合金であると発表されている。これらの合金は純鉛をはじめ現用の鉛被合金に比べ耐クリープ性および耐疲労性にすぐれている。またこれらは再結晶温度（軟化温度）が高いため，ケーブル布設状態において導体温度の上昇によって鉛被温度が高くなっても結晶粒の成長を起さない。

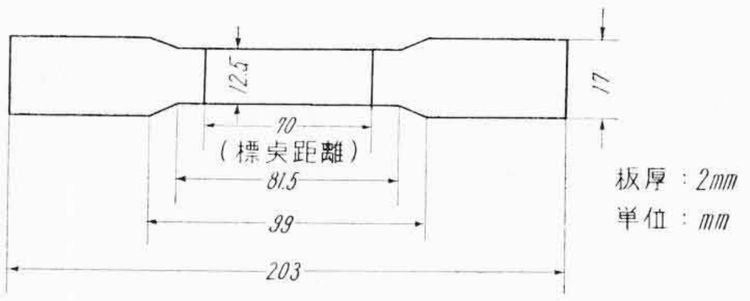
このため結晶粒成長に伴う機械的強度の低下はもちろん，高温における耐クリープ性もすぐれているといわれている。以上のように常温および高温クリープについては数多くの研究が行われている。ケーブル鉛被用合金としてのクリープ現象は特に重要な問題であるが，ほかの諸性質も同様に要求される。すなわち耐疲労性，時効硬化性，現場作業上の問題(溶解，鋳造，接続)，耐摩耗性および耐食性などが良好なことも必要である。したがっていかに耐クリープ性が良好であっても，前記諸条件を満足する合金でなければ実用化することは問題である。

筆者は数年前より新しい鉛被用合金の研究を[12]~[16]行ってきた。その結果 Pb–Te–Cu 合金が機械的性質はもちろん耐食性，および押出性などにすぐれた性質を示していた。今回はケーブル使用温度付近における耐クリープ性について，Pb–Te–Cu 系合金と F–3，および Tellurium Lead Alloy ならびに現用合金についての実験結果を報告する。

*　日立電線株式会社電線工場

第1表　供試鉛地金の分析結果

種　類	分　析　結　果　(%)						
	As	Cu	Fe	Ag	Bi	Zn	Sn+Sb
供試鉛	0.002	0.002	0.003	0.001	0.001	0.002	0.005
第1種鉛	<0.005	<0.003	<0.004	<0.002	<0.01	<0.002	<0.007



第1図　クリープ試験片の形状

2. 試料および実験方法

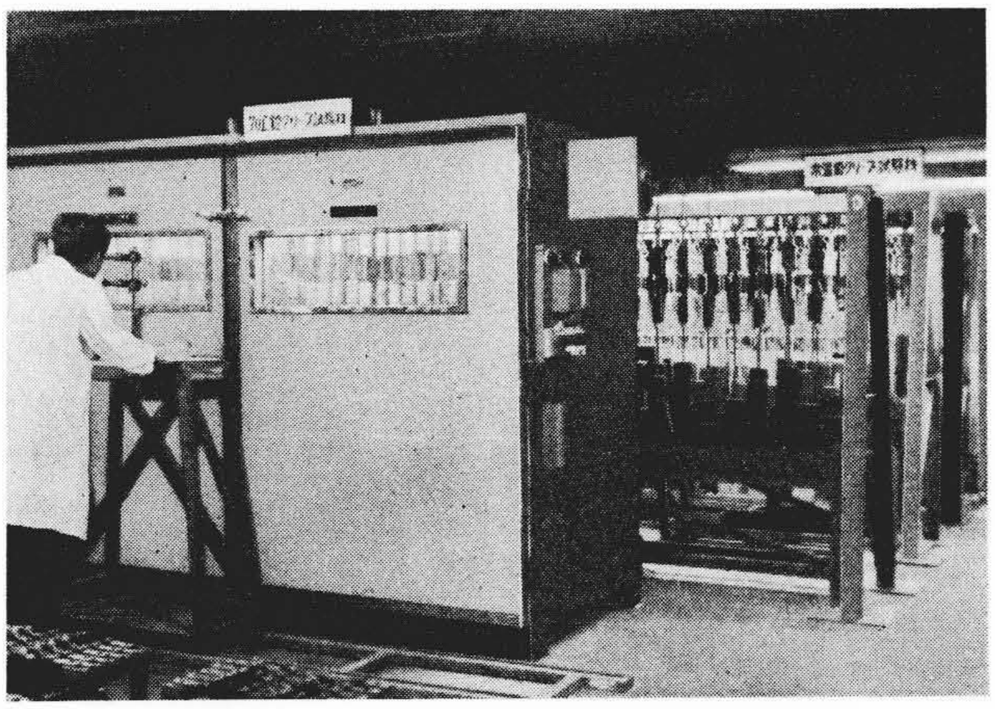
2.1 試　　料

第1表は使用した鉛地金の分析結果である。この表よりわかるように供試鉛は日本標準規格第1種鉛に相当する純度 99.98％のものであり，一般にケーブル鉛被用として使用されているものである。

添加元素はすべて高純度のものを使用した。Te, Cu, Sb, および As, はそれぞれ Pb–1％ Te, Pb–0.98％ Cu, Pb–11％ Sb, および Pb–1％ As の各母合金をそれぞれ使用して溶解を行った。

試料溶解の際溶剤として塩化アンモンを使用した。

鋳造はすべて 450℃ とし，20mm×50mm×150mmの100℃に予



第2図　クリープ試験機の外観

第2表　供試合金の分析結果と機械的性質

合金名	分析結果（%）							引張強さ（kg/cm²）		伸び（%）	
	Te	Sn	Bi	Cu	As	Sb	Zn	常温	70°C	常温	70°C
純鉛	—	—	—	—	—	—	—	139.4	85.3	30.0	32.3
Pb-Te	0.069	—	—	—	—	—	—	300.0	239.2	24.1	14.2
Pb-Sn	—	2.45	—	—	—	—	—	245.6	162.2	45.9	48.5
Pb-Sn-Sb	—	1.40	—	—	—	0.32	—	242.3	172.0	45.0	30.0
Pb-Zn-Cu	—	—	—	0.045	—	—	0.65	208.2	153.1	26.1	24.3
F-3 合金	—	0.12	0.072	—	0.18	—	—	239.6	170.1	40.1	24.7
Tellurium Lead Alloy	0.062	0.10	0.098	—	0.17	—	—	240.9	180.2	38.0	26.4
Pb-Te-Cu	0.064	—	—	0.065	—	—	—	270.5	190.9	39.5	29.0

熱した金型鋳型に鋳造した。この鋳造材を常温において2mm厚に加工し，2週間室内に放置してから，第1図に示すような試験片を打抜き供試材とした。

2.2 実験方法

すでに各種現用合金とそのほかの合金について常温におけるクリープ特性を報告した[15]。今回は70°Cにおける試験結果をのべる。

第2図は高温および常温クリープ試験機を示す。

試験方法は試片に一定荷重を加え標点間の伸びを読取り顕微鏡（読取精度：$^1/_{100}$）で測定した。測定は試験開始時より1箇月間は2日に1回，2箇月目より週1回測定を行った。70°Cクリープは一連50個試験できる恒温槽を作成し測定を行った。なお恒温槽内の温度調整にはセンスビー温度調節計を用い温度差を±0.5°Cに保つようにした。測定試料および測定方法はすべて常温クリープの場合と同じである。

2.3 供試材の分析結果

第2表に供試合金の分析結果とその機械的性質を併記する。供試材としては純鉛，Pb–Sn，Pb–Sn–Sb 系合金など現在使用している合金，および Pb–As 系（F–3合金），または Pb–Te–As 系合金（Tellurium Lead Alloy）などを使用し，またわれわれの見出した Pb–Te–Cu 系合金などを使用した。なお機械的性質および顕微鏡組織はすでに報告[16]したので省略する。

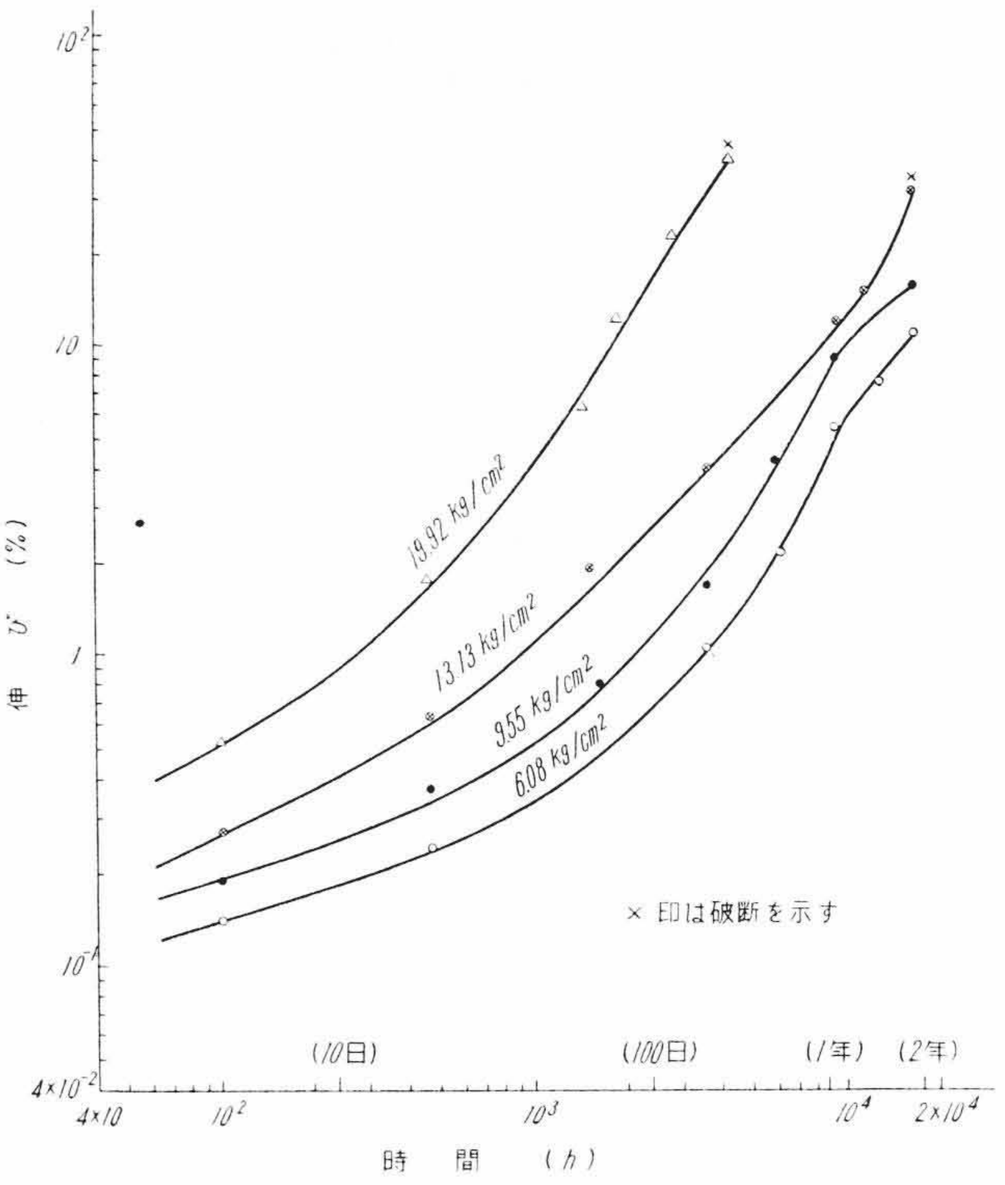
3. 供試合金のクリープ

クリープ条件 70°C，6～20 kg/cm² の各種鉛合金に関する約2年6箇月にわたる実験結果について報告する。

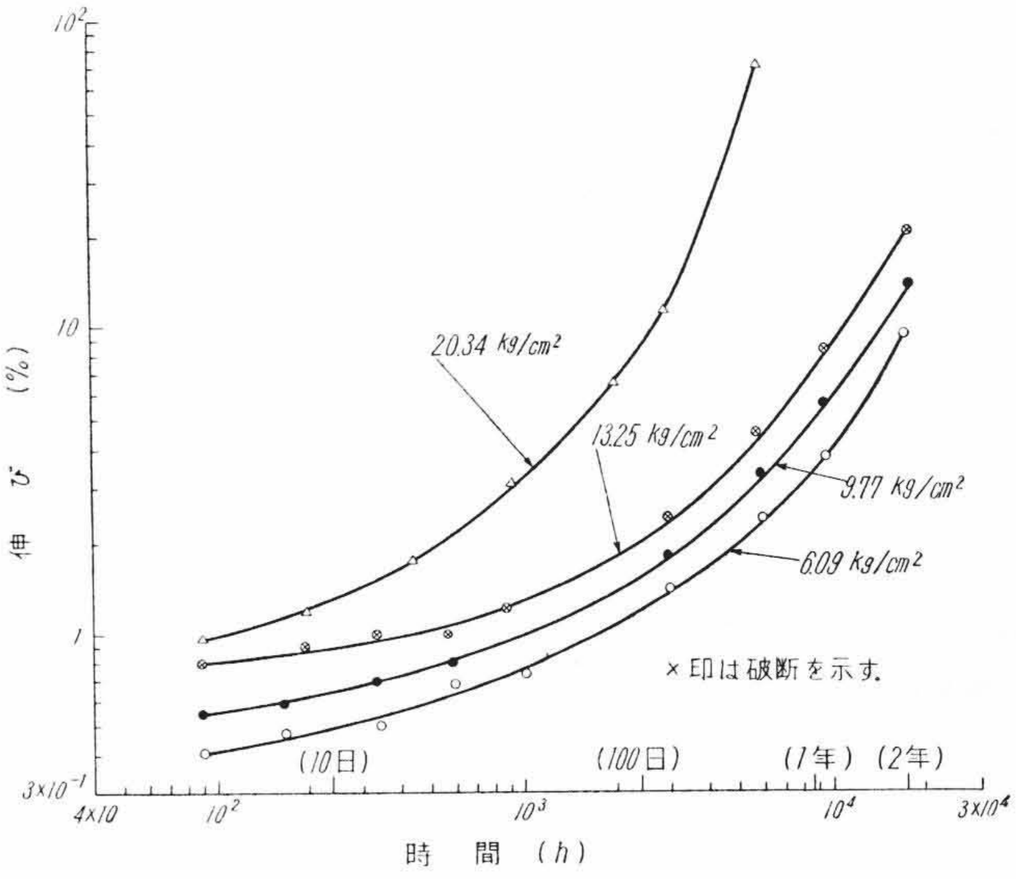
なお低荷重クリープは現在も実験続行中である。

（1） 純鉛，Pb–Sn 系合金のクリープ曲線

第3図は純鉛の70°Cにおけるクリープ実験結果を示し，第4～5図はそれぞれ Pb–Sn, Pb–Sn–Sb 系合金の実験結果を示す。クリープの初期においては実験誤差が大きく，かつ低荷重では量がきわめて少なく，あまり問題とはならないので，常温クリープ試験の場合と同じように10時間以上よりの測定結果を示した。



第3図　純鉛のクリープ曲線（70°C）



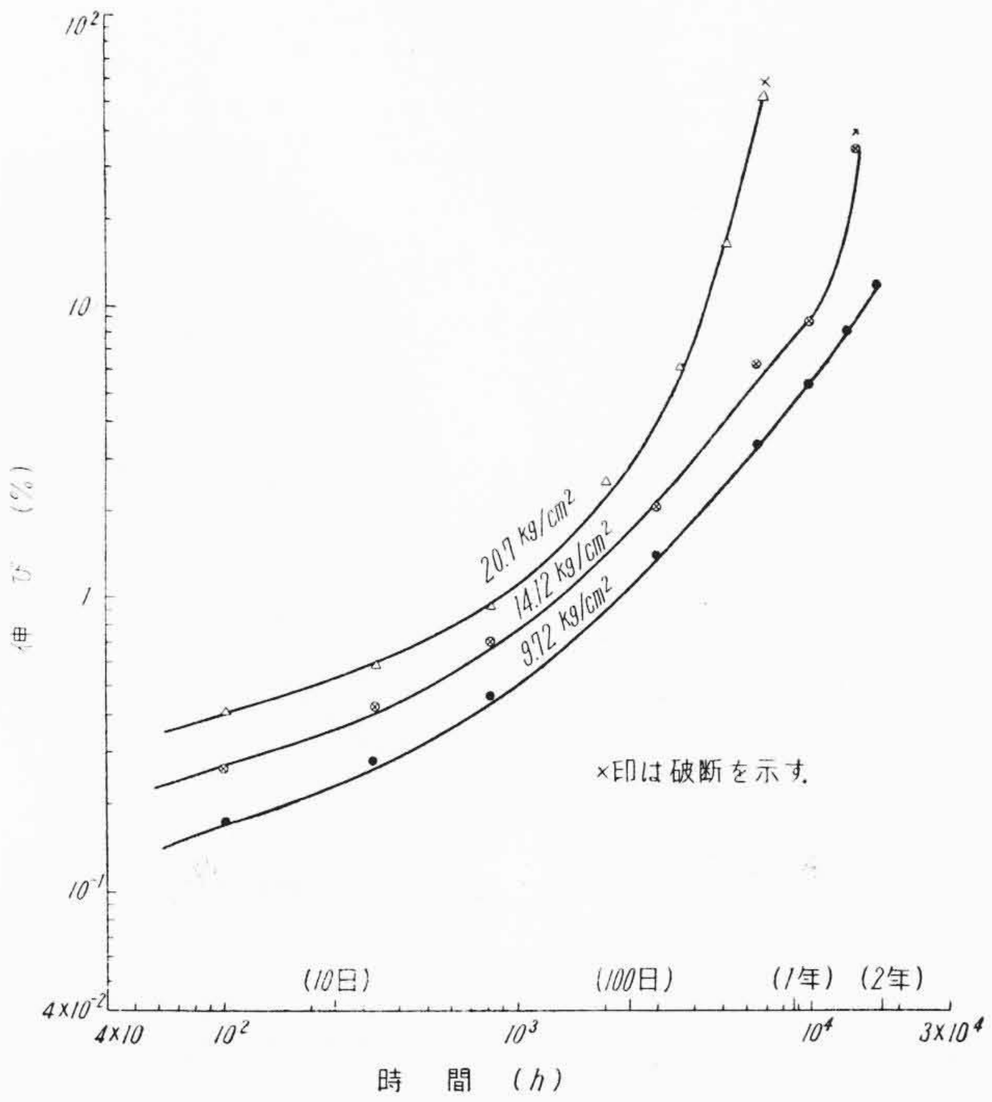
第4図　Pb—2.45% Sn 合金のクリープ曲線（70°C）

常温クリープ試験の場合には11～50 kg/cm² までの広範囲にわたり試験を行ったが，70°Cの場合には試験機の都合により，6～20 kg/cm² の範囲にわたり実験を行った。

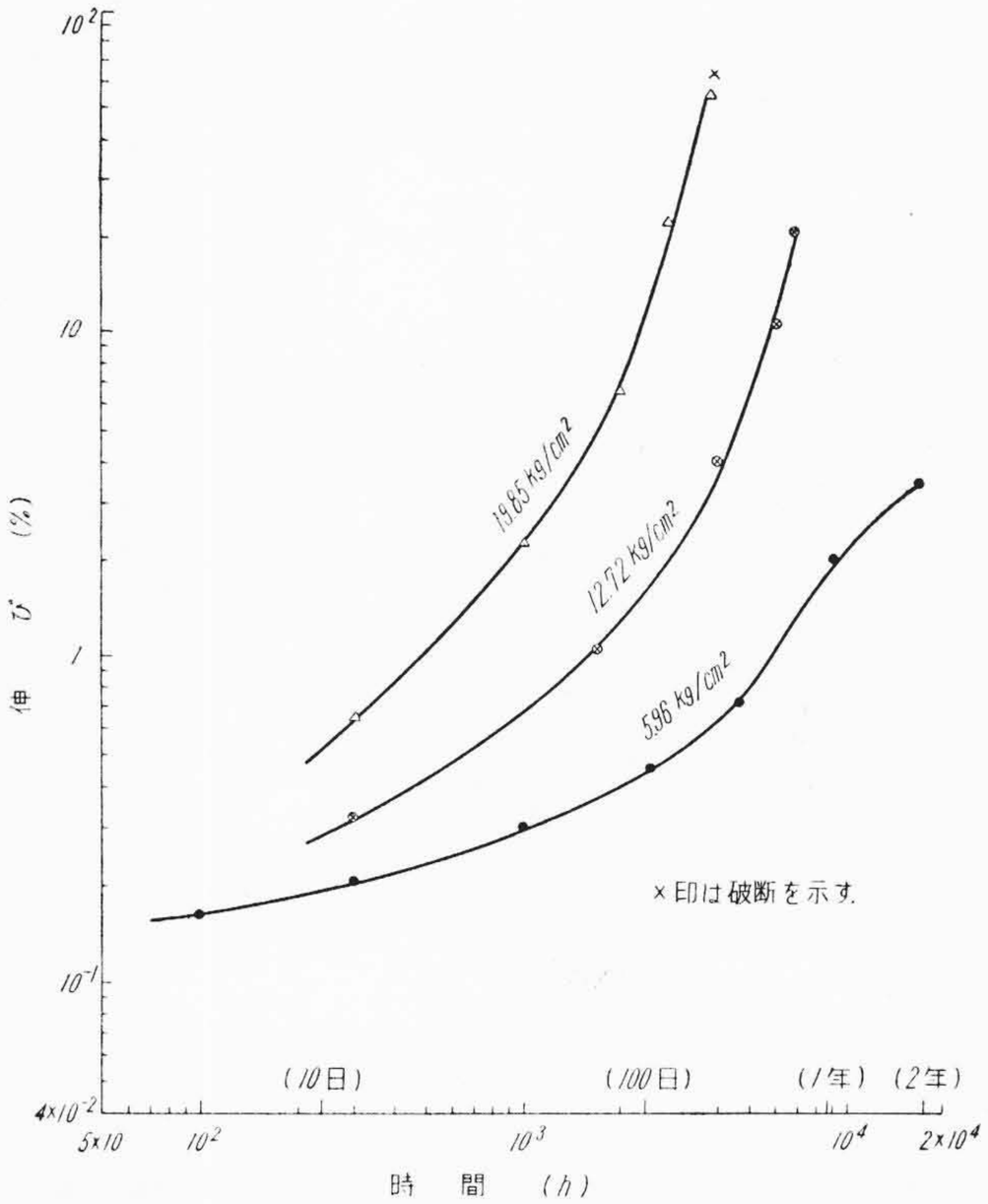
まず第3図の純鉛の場合であるが，曲線の傾向はほぼ直線的であり，常温クリープの場合高応力においては第1，2，3期クリープは明りょうに認められたけれど，70°C クリープの場合，約20 kg/cm² の応力においては，直線的傾向であり，第1，2，3期クリープは認められなかった。

また第4図は Pb–Sn 合金のクリープ曲線を示すが，いずれの応力においても曲線の傾向は同じようである。純鉛と Pb–Sn 系合金のクリープ曲線を検討してみると，高応力においては純鉛の破断時間は短いが，低応力側ではあまり差は認められなかった。

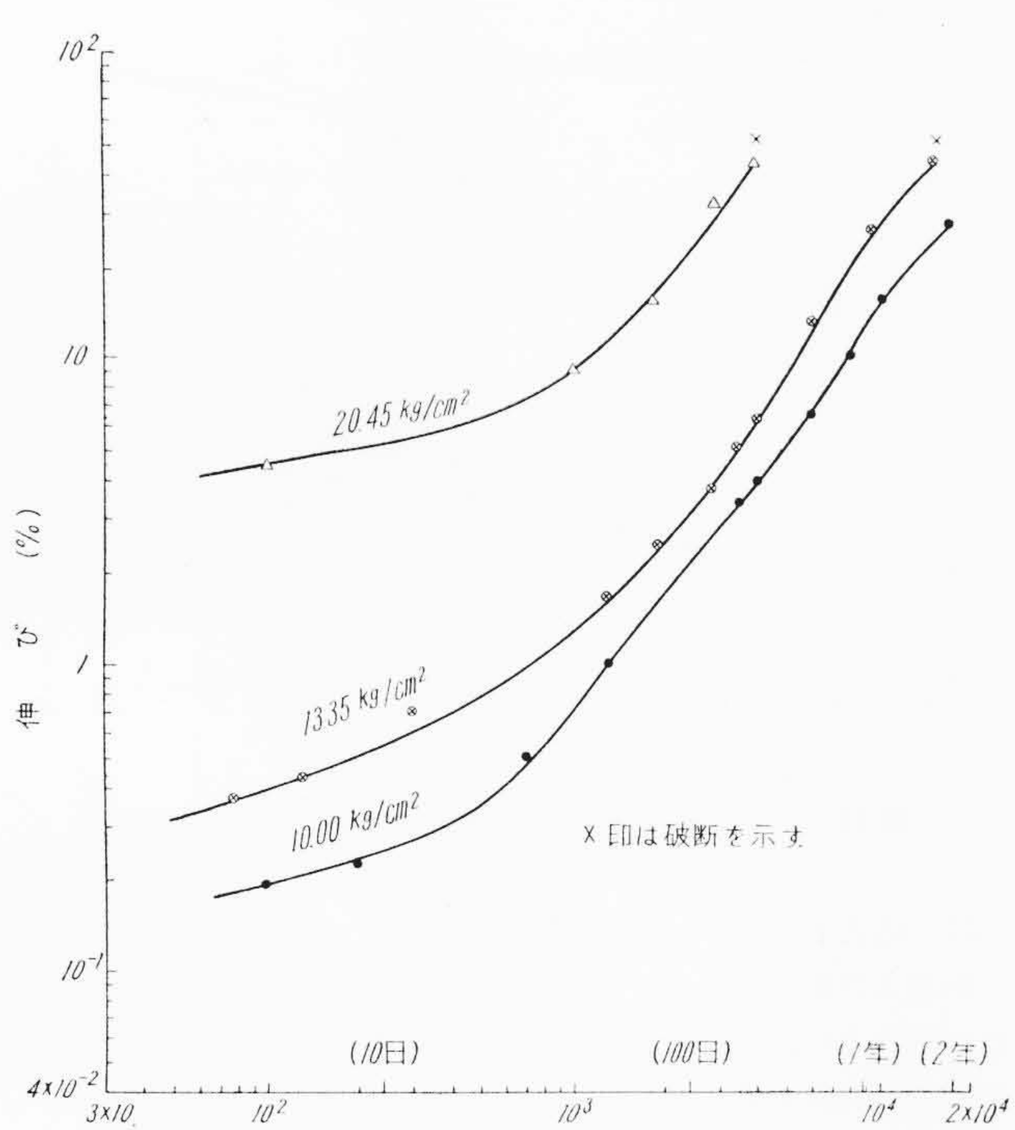
（2） Pb–Zn–Cu，Pb–Te 合金のクリープ曲線



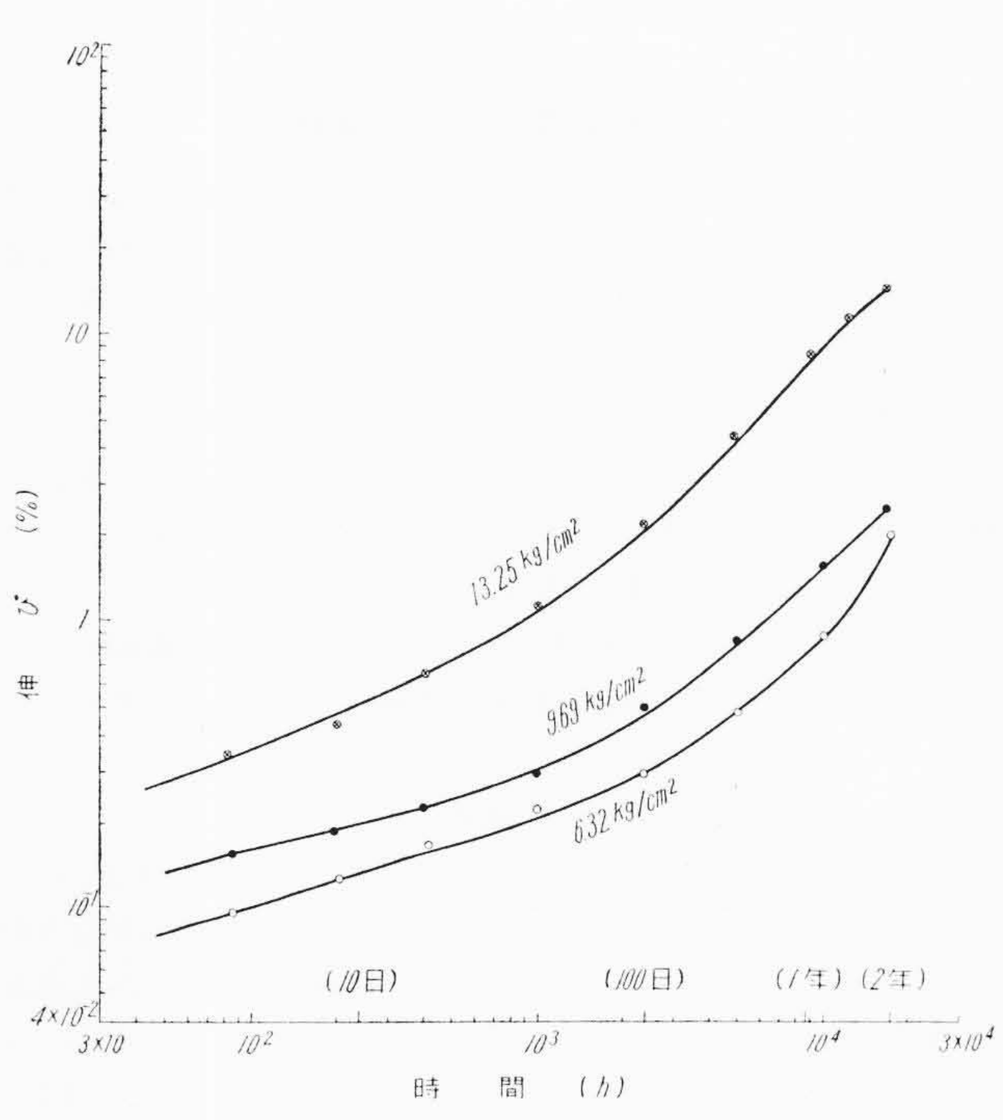
第5図　Pb−1.40% Sn−0.32% Sb 合金のクリープ曲線 (70°C)



第7図　Pb−0.069% Te 合金のクリープ曲線 (70°C)



第6図　Pb−0.65% Zn−0.045% Cu合金のクリープ曲線 (70°C)



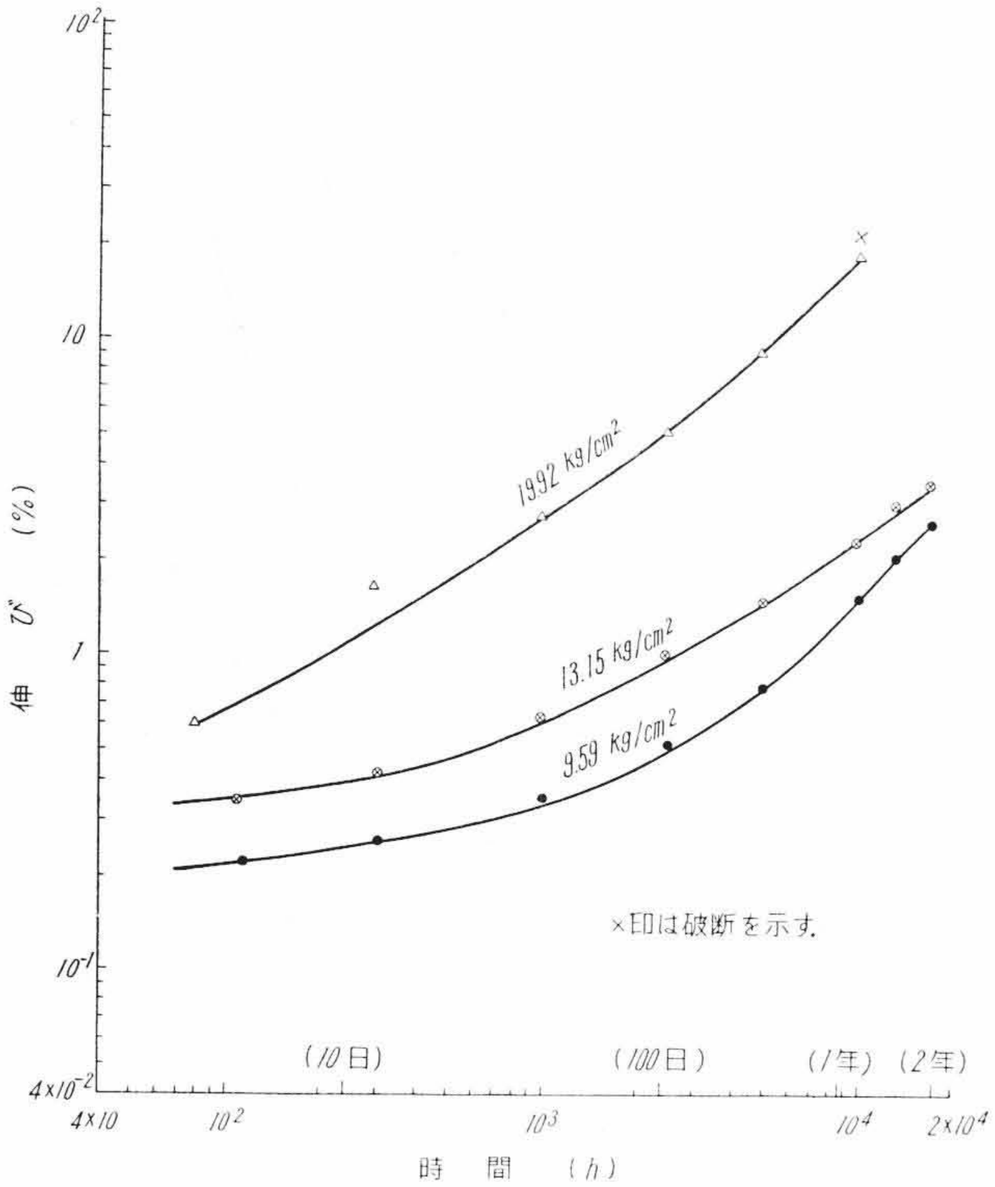
第8図　Pb−0.18% As−0.12% Sn−0.072% Bi 合金のクリープ曲線（F−3合金）(70°C)

第6～7図 に Pb–Zn–Cu 合金，および Pb–Te 合金のクリープ曲線を示す。曲線の形状は高応力側および低応力側も同じような特性を示している。

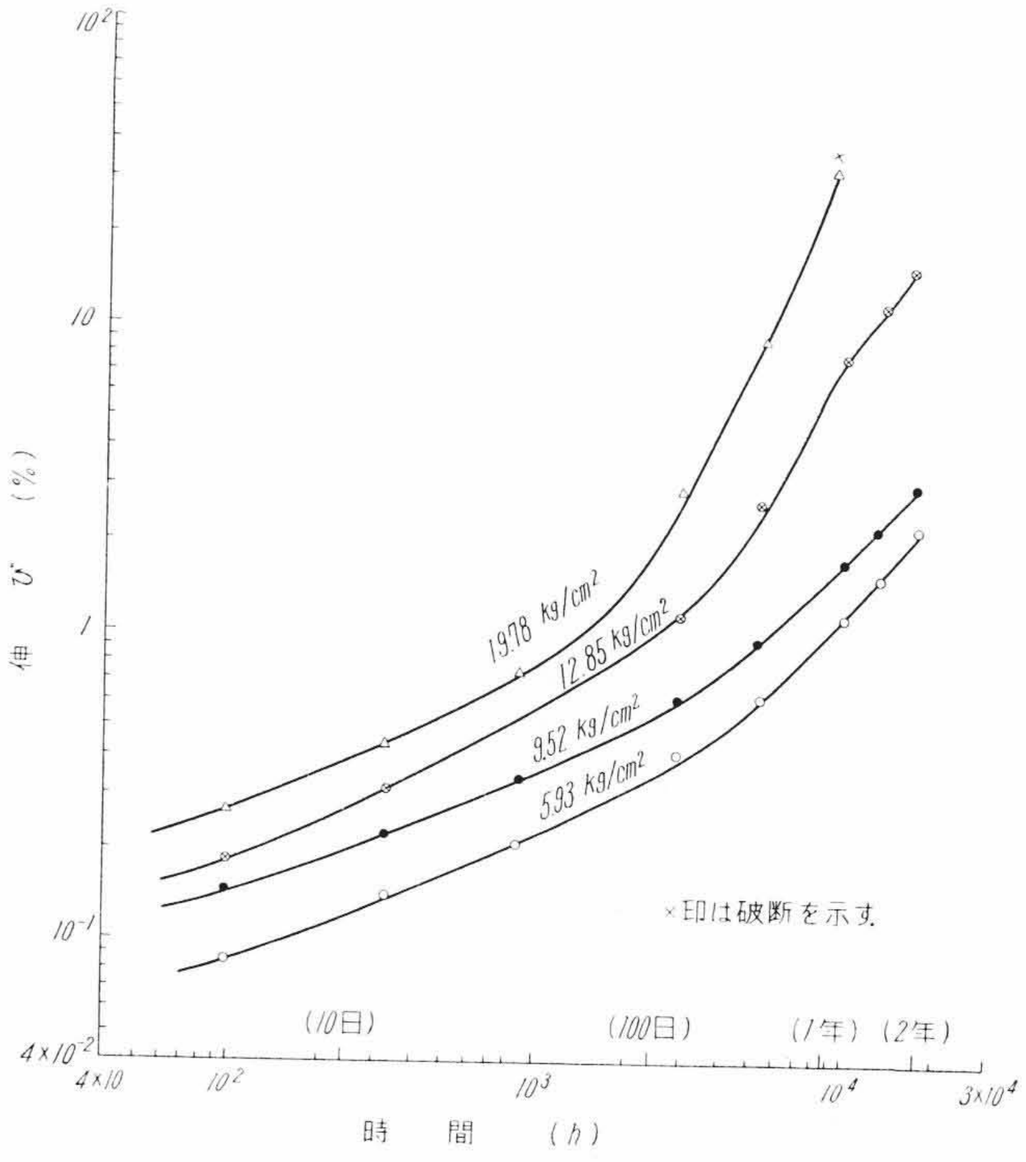
(3)　Pb–As 系，Pb–Te 系合金のクリープ曲線

第8～10図 にそれぞれ Pb–As 系（F−3合金），Pb–Te–As 系 (Tellurium Lead Alloy)，および Pb–Te–Cu 系合金の 70°C におけるクリープ曲線を示す。

なお前報告において1年6箇月間の常温クリープの実験結果を示したが，その後10箇月後の実験結果もほぼ同じような傾向を示しており，F−3，Tellurium Lead Alloy および Pb–Te–Cu 系合金などはほぼ同じような傾向であった。**第8～10図** までに示してある各種合金の70°Cにおけるクリープ曲線であるが，常温の場合と同じように，Pb–Te–Cu 系合金のクリープ曲線は高応力側ではF−3合金，Tellurium Lead Alloy などと比較して，若干劣る耐クリープ性を示しているが，低応力側では同じ程度の耐クリープ性である。この結果から，70°Cにおける約2年6箇月間の前記合金類の耐クリープ性はほぼ同じような特性を示すものと考えら



第9図　Pb−0.062% Te−0.17% As−0.10% Sn−0.098%Bi 合金のクリープ曲線(Tellurium Lead Alloy) (70°C)



第10図　Pb−0.064% Te−0.065% Cu 合金のクリープ曲線 (70°C)

れる。

4. 実験結果に対する考察

以上の実験結果の考察については，まずクリープ曲線の形状，クリープ速度と応力との関係，1%および3%伸びるまでの時間と応力との関係，および各種合金のクリープ中における結晶粒度の変化，などについて検討を行った。

まず曲線の形状であるが，常温クリープの場合と同じようであり，E. N. Andrade 氏[18]の実験式を用いて計算を行った結果，純鉛は2,000時間までは大体同程度の β，および k の値が求められた。しかしそれ以上のクリープでは β，および k，が非常に大きくなる。このような傾向はほかの合金でも同じようであり，E. N. Andrade 氏の式は長時間のクリープ曲線を表わすには適していないと考えられる。

(1)　クリープ速度と応力との関係

ケーブル鉛被のクリープにおいては，そのクリープ速度と応力との関係は非常に重要な因子である。この点についてはかなりの研究が行われているが，一定温度において次式が適用されるとR. W. Bailey 氏[19]は述べている。

$$v = A\delta^n \quad \cdots\cdots (1)$$

ただし　v:　クリープ速度

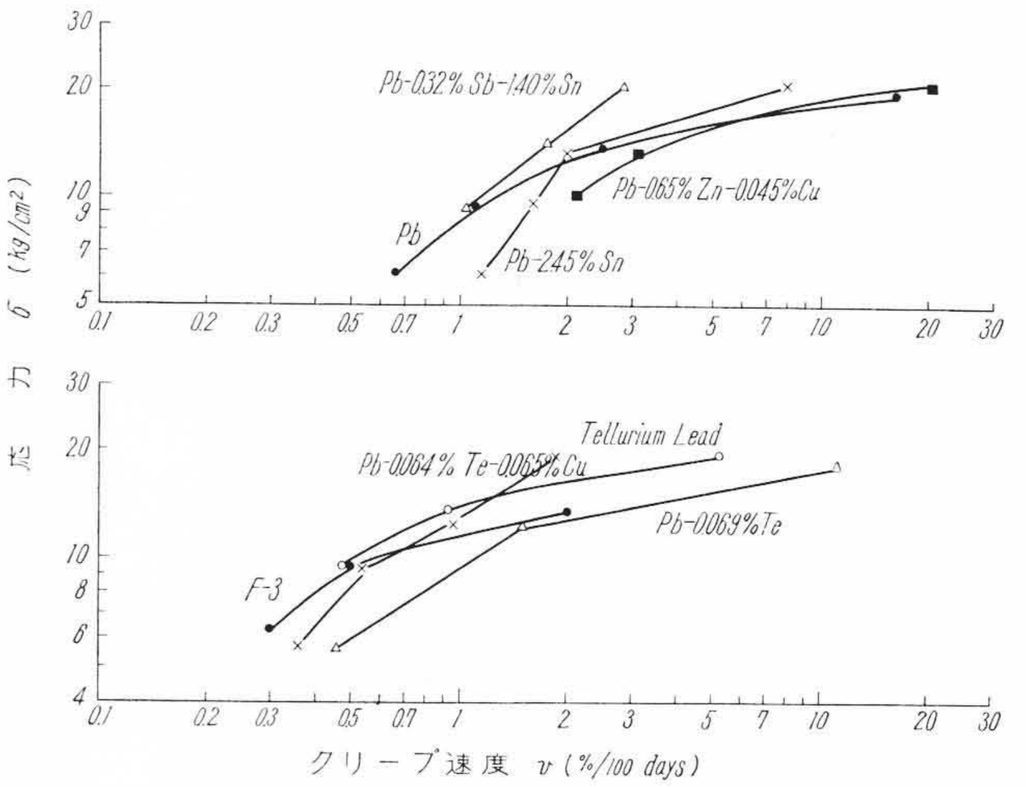
A, n:　恒数

δ:　応力

われわれが今回行った70°Cクリープの実験結果が(1)式に適用できるかどうかについて検討を行った。

第11図は100日間の実験結果よりクリープ速度の対数 log v と log δ との関係を示したものである。

この結果から明らかなとおり直線的な関係を示す合金もあるが，いずれの合金も低応力側では曲線の傾向は曲がっていることが明らかとなった。常温クリープ試験結果と同じように R. W. Bailey 氏の式は低応力側では適用することはできないと思われる。



第11図　クリープ速度に及ぼす応力の影響(70°C)

(2)　応力とクリープ破断時間との関係

鉛および鉛合金のクリープ試験結果から H. F. Moore 氏[10]らは一定応力においてのクリープによる破断時間 t とその応力 δ との間には次式が成立つと述べている。

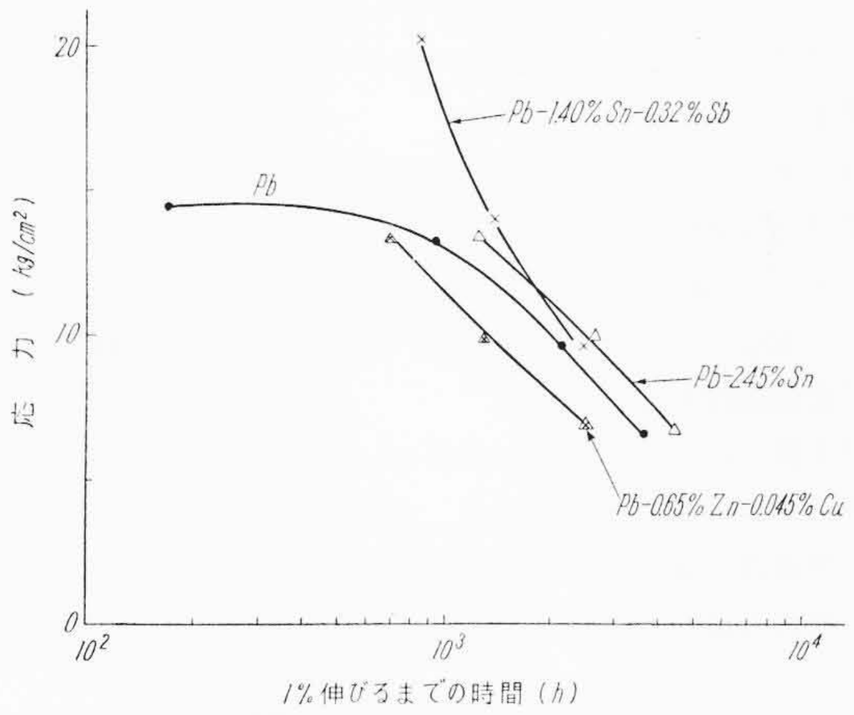
$$\delta = B(1 - C \log t) \quad \cdots\cdots (2)$$

ただし　$B. C.$:　恒数

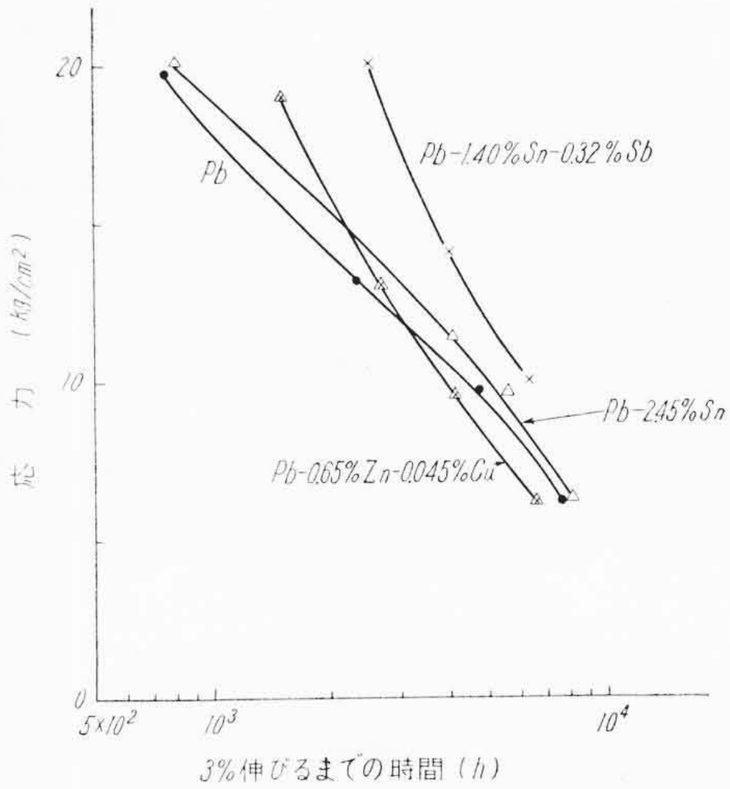
われわれの行った今回の70°Cクリープ試験においては比較的低応力で行ったため，各試料とも破断試料が少なく，各合金の比較検討を行うことができなかった。この点は現在も実験中であるので追って考察を加える予定である。

(3)　1%および3%伸びるまでの時間と応力との関係

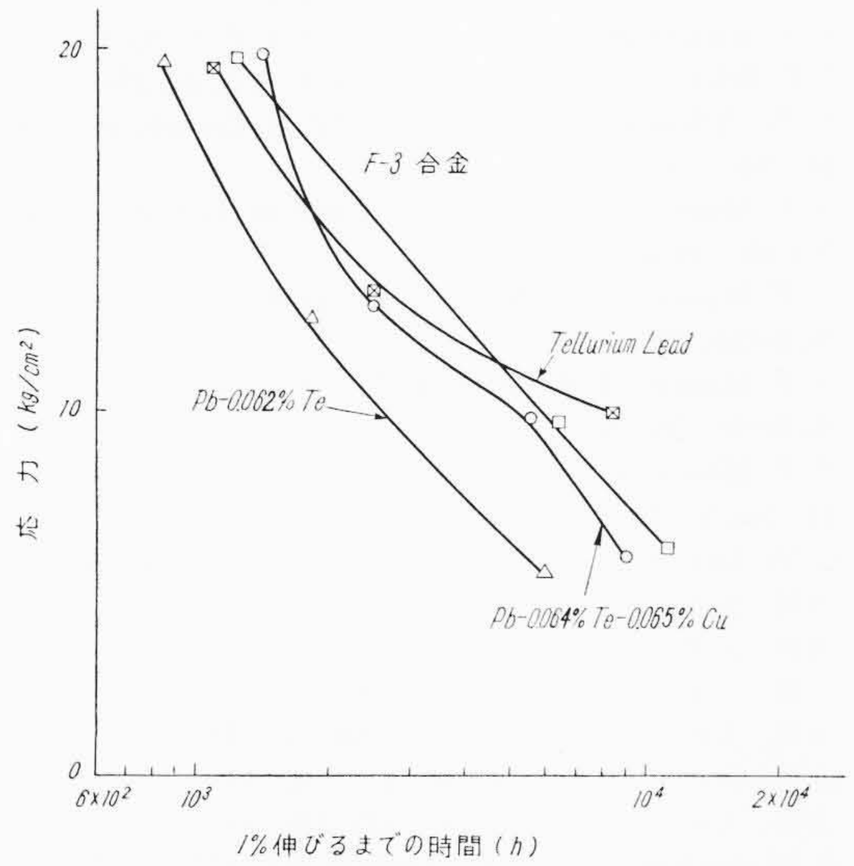
各合金の許容ひずみ (Permissible Creep Strain) を1%および3%とそれぞれ仮定して，おのおのの伸びを生ずる時間と応力との関係を第12～15図に示す。図面が複雑となるため純鉛および現用合金と Pb–As 系合金および Pb–Te 系合金とを別にした。



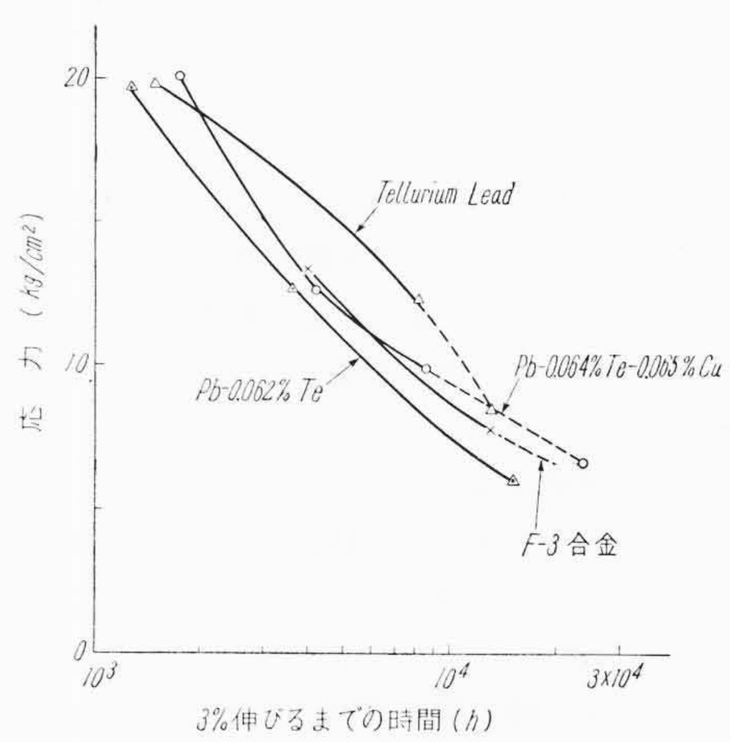
第12図　1%伸びるまでの時間と応力との関係(70°C)



第14図　3%伸びるまでの時間と応力との関係(70°C)



第13図　1%伸びるまでの時間と応力との関係(70°C)



第15図　3%伸びるまでの時間と応力との関係(70°C)

第3表　供試材のクリープによる結晶粒度の変化 (70°C)

種類	結晶粒の大きさ (mm)	
	クリープ前	クリープ破断後
純鉛	0.14	(13.13)* 1.02
Pb-0.069% Te	0.036	(19.85)* 0.092
Pb-2.45% Sn	0.092	(13.25)* 0.72
Pb-1.40% Sn-0.32% Sb	0.085	(14.12)* 0.67
Pb-0.65%Zn-0.045%Cu	0.076	(13.35)* 0.14
F-3 合金	0.034	
Tellurium Lead Alloy	0.041	(19.92)* 0.054
Pb-0.064%Te-0.065%Cu	0.047	(19.78)* 0.053

*（ ）内は応力 kg/cm² を示す

第12図および**第13図**には各合金の1%伸びるまでの時間と応力との関係を示し，また**第14図**および**第15図**は3%伸びるまでの時間と応力との関係である。

まず**第12図**についてみると常温クリープの場合，純鉛は高応力側では劣り，また低応力側ではすぐれた結果を示していた。しかし70°Cクリープにおいては，高応力側および低応力側のいずれにおいても，Pb–Sn，Pb–Sn–Sb 系合金などよりやや劣る特性を示していた。

つぎに**第13図**に示すように Pb–Te–Cu 系合金は高応力および低応力側のいずれにおいても，F–3，Tellurium Lead Alloy と比較してみると，曲線の傾向としてはこれらの合金より，高応力側では良好であるが，あまり差異は認められなかった。次に**第14図**から明らかなとおり，純鉛は1%伸びの場合と同じように高応力の場合は劣っているが，低応力側においては，Pb–2.45% Sn 合金と同程度の特性を示している。

次に**第15図**は Pb–As 系および Pb–Te 系合金の実験結果を示す。Pb–Te 二元合金はほかの合金に比較して劣る性質を示している。

また Pb–Te–Cu 合金，Tellurium Lead Alloy および F–3 合金などを比較してみると，Pb–Te–Cu 合金は高応力側では3%伸びるまでの特性は良好であるが，低応力側ではあまり差はなく，大体同程度の特性を示している。なお図中の点線部はクリープ曲線より推定した結果であり，この点現在も実験中であるので追って報告する予定である。

（4）　各種合金のクリープによる結晶粒度の変化

第3表に試験前と70°Cクリープ試験により破断した供試合金の結晶粒の変化を示す。この表で明らかなとおり純鉛はクリープ中に特に結晶粒の成長が大きい。また Pb–Sn 系，および Pb–Zn–Cu 系合金なども結晶粒成長を起している。これに反して Pb–Te 二元系合金は前記合金に比較して結晶粒の成長はやや少ない。また F–3 合金，Tellurium Lead Alloy および Pb–Te–Cu 系合金はクリープ中に若干成長する程度であり，これらの合金はいずれも耐熱性に富む合金であると考えられる。

これら上記のクリープ試験はすべて実験室的方法で試料を作り，化学成分の点から実験を行っているが，鉛被のクリープには化学成分はもちろんのこと，ほかの因子が大きく影響する。たとえば試料

の形状，応力の性質，試料製作条件，および結晶粒度などである。またクリープによって1％伸びるまでの時間が長いものが，クリープにより破断するまでの時間が長いと断定することはできない。試料製作条件の差異によるクリープ特性について G. R. Gohn 氏[20]は被鉛機より押出した試験片と実験室的に作成した試験片とについて実験を行っている。その結果によるとクリープによって破断するまでの時間は被鉛機より押出した試験片のほうが良好であると述べている。

われわれもこの点につき，被鉛機から押出した純鉛，Pb–Sn，Pb–Sn–Sb 合金などについて，この差異を明らかにするため検討中である。

5. 結　　言

ケーブル鉛被用合金としては機械的諸特性，耐疲労性，常温における耐クリープ性および耐食性さらに押出性などにすぐれた性質を要求される。

われわれは新鉛被用合金について研究を続けているが，現在までに Pb–Te–Cu 系合金が前記諸性質にすぐれていることが明らかとなった。

今回はケーブル使用時に負荷の増大により鉛被温度が上昇した場合のクリープ特性について，その実験結果を報告した。

なおケーブル鉛被として問題となる比較的低応力のクリープについては，さらに長時間の試験が必要であるが，現在実験中であり追って報告する。

得られた結果を要約すると，

（1）　70℃クリープにおいて，純鉛は Pb–Sn 系合金などと比較して，高応力においては伸びが大きく，また低応力の場合にもやや劣るクリープ特性を示している。

（2）　ケーブル使用時の温度(70℃)における各合金のクリープ曲線は，2,000時間ぐらいまでは E. N. Andrade 氏の式を適用できるが，長時間クリープの場合には用いることはできない。

（3）　伸びが1％および3％に達するまでの時間と応力との関係において，Pb–Te–Cu 系合金はいずれの応力の場合でも，現用の各合金に比べすぐれた性質を示している。また1％伸びの場合，F–3 合金および Tellurium Lead Alloy と比較すると，高応力側ではすぐれた特性を示しているが，低応力側では大体同程度の結果を示している。

（4）　ケーブル使用時の温度付近のクリープ(70℃)において純鉛および Pb–Sn 系合金は結晶粒の成長を示しているが，Pb–Te–Cu，F–3 合金，および Tellurium Lead Alloy などはあまり成長しておらず，ケーブル使用時の鉛被温度である70℃においては良好な耐熱性を示している。

本稿を終るに当り，終始ご指導をいただいた電線工場久本部長，山本課長，第二研究課山路主任，ならびに種々ご助言をいただいた第一研究課渡辺課員，および本実験に協力された第二研究課の担当各位に深甚な謝意を表する。

参　考　文　献

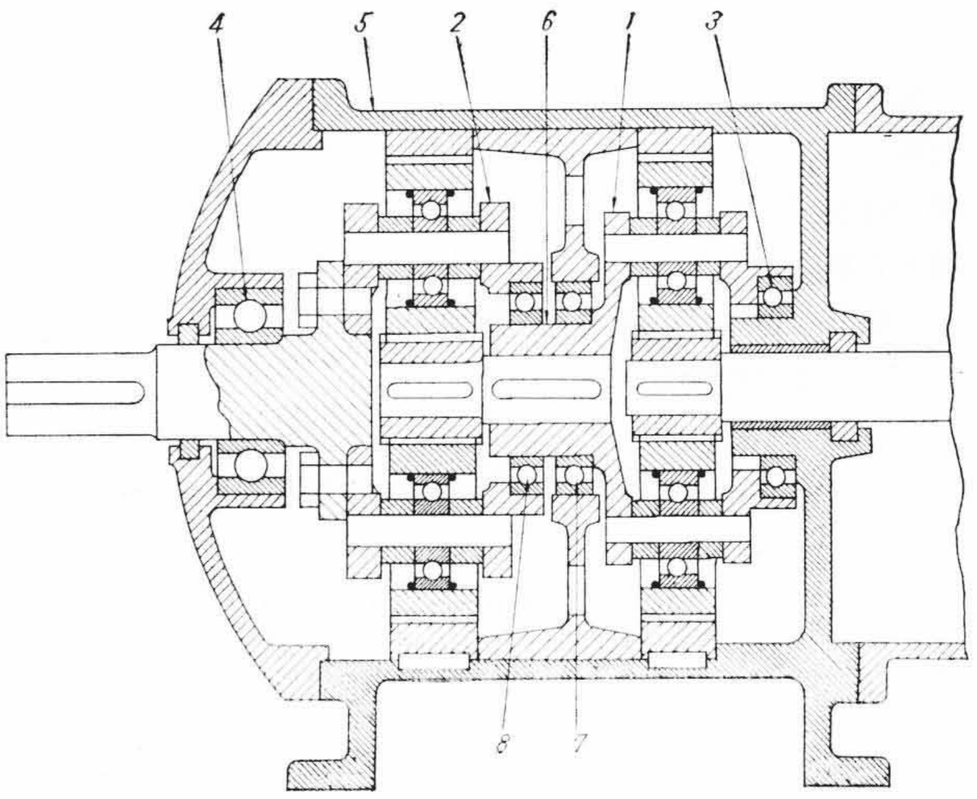
（1） R. Spieser : Bull, Assoc, Suisse, Elect., **24**, 544 (1933)
（2） 高橋： 電学誌, **71**, 249 (昭-26)
（3） L. F. Hickernell, C. J. Snyder : A. I. E. E. **65**, 563 (1946)
（4） L. F. Hickernell; A. A. Jones : A. I. E. E. **70**, 127 (1951)
（5） J. F. Eckell, G. B. Shanklin : A. I. E. E. **67**, 294 (1954)
（6） R. W. Atkinson, L. Meyerhoff, W. H. Cortelyon : A.I.E.E. **66**, 246 (1953)
（7） H. F. Moor, N. J. Alleman : Univ, of Illinois Bulletin, **29**, No. 48 (1932)
（8） H. F. Moore, B. B. Betty, C. W. Dollins : Univ, of Illinois Bulletin, **32**, No. 23 (1935)
（9） H. F. Moore, B. B. Betty, C. W. Dollins : Univ, of Illinois Bulletin, **35**, No. 102 (1938)
(10) H. F. Moore, C. W. Dollins : Univ, of Illinois Bulletin, **41**, No. 9 (1943)
(11) C. W. Dollins : Univ, of Illinois Bulletin, **45**, No. 65 (1948)
(12) 山路，大畠： 日立評論, **37**, 635 (昭-30)
(13) 山路，大畠： 日立評論, **37**, 857 (昭-30)
(14) 山路，大畠： 日立評論, **37**, 1207 (昭-30)
(15) 山路，大内： 日立評論, **39**, 1294 (昭-32)
(16) 山路，大内： 日立評論, **40**, 412 (昭-33)
(17) 山路，大内： 日立評論, **42**, 378 (昭-35)
(18) E. N. Andrade : J, Inst, Metals, **60**, 427 (1937)
(19) R. W. Bailey : Proc, (British) Inst, of Mech, Eng, **131**, 131 (1936)
(20) G. R. Gohn, S. M. Arnarld : Proc, A. S. T. M. **46**, 990 (1946)

新案の紹介

実用新案第514232号

伊　藤　虎　男

減　速　装　置



この考案は遊星歯車式減速機構を2段に配置した減速装置において，第1段遊星歯車支持枠1と第2段遊星歯車支持枠2の一端をそれぞれ軸受3，4をかいして歯車箱5の両端に支持させるとともに，第1段遊星歯車支持枠1の他端に設けたボス6を歯車箱の中間位置に設けた軸受7で支持し，このボス6の延長部に軸受8をかいして第2段遊星歯車支持枠2の他端を支持させたものである。この構造によれば各段の遊星歯車支持枠がいずれも歯車箱によって両持ち式に支持され，しかも軸受7，8が接近した位置にあるため，全体の構造が強固で無理のない安定した運転ができ，減速比の大きい大馬力の伝動に適した減速装置が得られる。　（坂本）