

ケーブル鉛被用合金の繰返し曲げ特性

Repeated Bending Characteristics of Various Lead Alloys for Cable Sheathing

山 路 賢 吉* 大 内 敬 次*
Kenkichi Yamaji Keiji Ōuchi

内 容 梗 概

ケーブル鉛被用材料としては、各種の性能を要求されており、それらの目的に適する鉛被用合金が使用されている。われわれはすでに各種鉛被用合金について、機械的性質、耐クリープ性および押出し加工性など広範囲にわたり報告してきた。今回は繰返し曲げひずみを0.37%および0.97%とし、10~660 c/hの曲げ速度にわたって、各種鉛合金の繰返し曲げ特性を試験した。その結果を要約すると次のようになる。

- (1) Pb-Cu および Pb-Te 二元合金などは、繰返し曲げ試験において0.37%ひずみの場合、Cu または Te を0.06%含んだ共晶合金が良好な曲げ特性を示している。
- (2) Pb-Te 系合金、Pb-As 系および Pb-Te-Cu 系合金などは、いずれのひずみにおいてもほかの合金に比較して良好な特性を示している。
- (3) 結晶粒度と曲げ疲労とは密接な関係があり、結晶粒度が粗大化するにしたがって、曲げ破断回数は低下する。

1. 緒 言

電力ケーブルの絶縁体としては戦後ブチルゴム、各種プラスチックなどが開発され、かなり広範囲に使用されるようになった。特に10 kV 以下の電圧ではこれら新しいケーブルの進出はめざましく、従来の紙絶縁鉛被ケーブルにとって代ろうとしている。しかしながら20 kV 以上のケーブルでは依然として紙ケーブルがその大部分を占め、電力需要の急激な増加とともに、これら高電圧ケーブルの布設亘長も急激な伸びを示している。

これら紙ケーブルのシース材料としては鉛および鉛合金が使われているが、紙ケーブルでは外部からの湿気、じんあいの侵入が絶縁体にとって致命的であるために、これらシース材料の研究は重要である。

事実紙ケーブルの事故の多くは鉛被の破損を原因としているのが現状である。

鉛被事故は電食、化学腐食、虫害および外傷と繰返し伸縮疲労などに区分することができる。このうち繰返し伸縮疲労はマンホール内、オフセット部分や、橋梁添架したケーブルなどで負荷や、周囲温度、日射状況の変化により発生するケーブルの伸縮の際に起きるものである^{(1)~(5)}。この問題はケーブル布設法、あるいは保守の点から重要であり、ケーブル布設法とともにシース材料の十分な検討が必要である。

鉛被の伸縮疲労破壊の原因としては数多くあるが、そのおもなものは下記のとおりである。

- (1) ケーブルの直径および長さ
- (2) ケーブルの構造と剛性
- (3) 鉛被の材質および厚さ
- (4) ケーブルの布設方法
- (5) 負荷の変動状態およびケーブルの動き

などであり、これらの原因はたがいに関連性をもっている。実際問題として上記の因子の中で最も重要な因子は鉛被の材質とケーブルの布設法である。すなわち疲労限の高い鉛合金を使用することと、ケーブル全体にわたって均一なひずみ分布を示すようなケーブルの布設方法を採用することが重要な対策である。われわれはこの点につきケーブル布設方法の検討として、600V 3×100 mm² 紙ケーブルを用い、各種ループにおける鉛被ひずみに関する諸問題はすでに

数年前に実験を行った⁽⁶⁾。その結果、ケーブルの温度変化によって鉛被に発生するひずみをできるだけケーブルの全長にわたって均等に分布させる布設法としては、楕円形ループがもっとも良好であることを見いだした。

鉛の疲労に関する報告はかなりの数に上っており、種々の鉛合金について疲労限が明らかにされている。しかしこの数値は試験方法および試料の履歴などによって一致しておらず、疲労限の取扱いには、困難をきたす場合がしばしばある。したがって実験結果については、従来までの結果およびほかの資料とを参考として検討するかまたは各合金を同じ試験機で併行して実験を行い、各合金間の疲労強度を比較する場合が多い。

ケーブル鉛被の振動疲労および曲げ疲労としては、架空ケーブル、橋梁添架ケーブルおよび鉄道に沿って布設したケーブルなどが受ける振動、さらには負荷の変動による温度変化などによって起る伸縮が局部的に繰返し曲げとして作用する場合疲労の問題が発生する。

現在までに疲労限の高い多くの鉛合金が発表されているが、L. F. Hickernell氏ら⁽⁷⁾⁽⁸⁾はF-3合金(Pb-As系)、J. F. Eckel氏ら⁽⁹⁾はTellurium Lead Alloy (Pb-Te-As)を推挙している。今回筆者らは、各合金の曲げ疲労特性(疲労限については実験中)を検討するため、J. F. Eckel氏⁽⁹⁾と同じような曲げ試験機を作成し、現用の合金をはじめ、各種合金について初期曲げひずみを0.37%および0.97%とし、また曲げ速度を10~660 c/hとして実験を行ったので、その結果を報告する。

2. 試料および実験装置

2.1 試 料

実験に供した試料はまず純鉛(純度: 99.98%)を黒鉛るつぽに入れて熔解し、450°Cに保持し各種母合金(Pb-1% As, Pb-11.4% Sb, および Pb-1.18% Te)を順次適量添加したのち400°Cで10分間保持してからかくはんし、20×45×180 mmの100°Cに予熱した金型に鋳造した。この鋳造材を常温において2 mm厚に加工し、室内に2週間時効させてから試験に供した。なお使用した純鉛は日本鋳業製の電解鉛(E. S. S.)である。第1表にその分析結果を示す。

2.2 供試材の分析結果と機械的性質

第2表に供試合金の分析結果を示す。試験試料は純鉛をはじめ、Pb-Te, Pb-Te-Cu系合金およびPb-Sn, Pb-Sn-Sb系合金、Pb-As系合金(F-3 Alloy) およびPb-Te-As系合金(Tellurium Lead

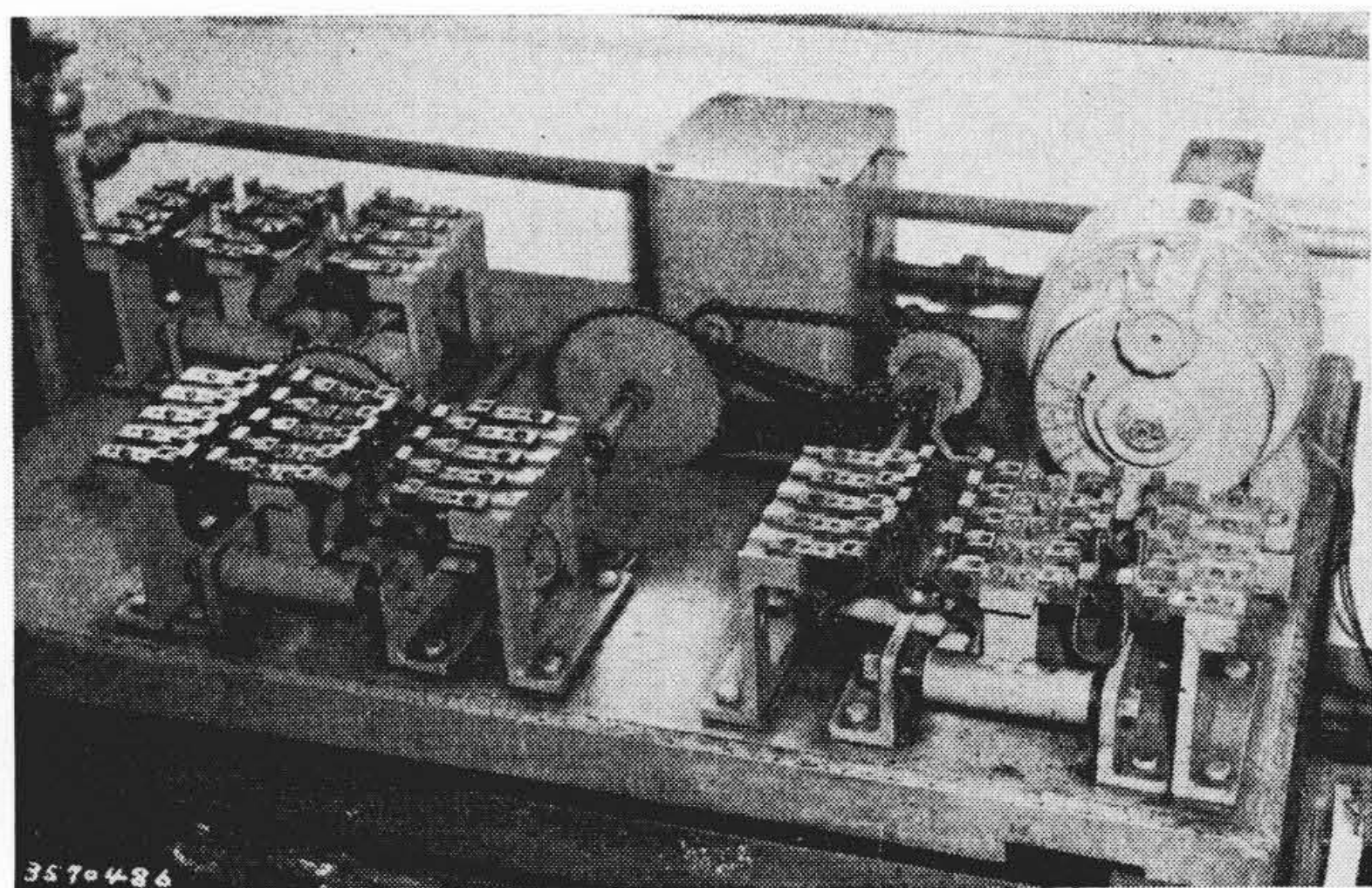
* 日立電線株式会社電線工場

第1表 鉛地金の分析結果

成 分	Fe	Cu	Sn+Sb	Zn	As	Bi
重 量 (%)	0.00018	0.001	0.00018	0.00028	tr.	0.009

第2表 供試材の分析結果と機械的性質

合 金 名	組 成 (%)						引張強さ (kg/cm ²)		伸び (%)	
	Te	Sn	Bi	Cu	As	Sb	常温	70°C	常温	70°C
純 鉛	—	—	—	—	—	—	137.6	86.2	34.4	34.9
Pb-Te-Sn	0.069	0.13	—	—	—	—	301.3	240.1	24.7	19.5
系 合 金	0.064	0.10	0.12	—	—	—	298.2	238.7	24.2	21.0
Pb-Te-Cu	0.067	—	—	0.065	—	—	264.7	187.4	41.2	29.6
Pb-Sn	—	2.45	—	—	—	—	245.6	162.2	33.4	45.9
Pb-Sn-Sb	—	1.25	—	—	—	0.24	241.1	170.5	29.2	44.7
F-3 合 金	—	0.12	—	—	0.20	—	239.6	170.1	40.1	24.7
Tellurium Lead Alloy	0.064	0.08	0.098	—	0.17	—	240.9	180.2	38.0	26.4



第1図 繰返し曲げ試験機の外観

Alloy)などについて試験を行った。なお分析結果と併記して各合金の機械的性質を示す。顕微鏡組織およびほかの性質については先に報告^{(10)~(12)}したので省略する。

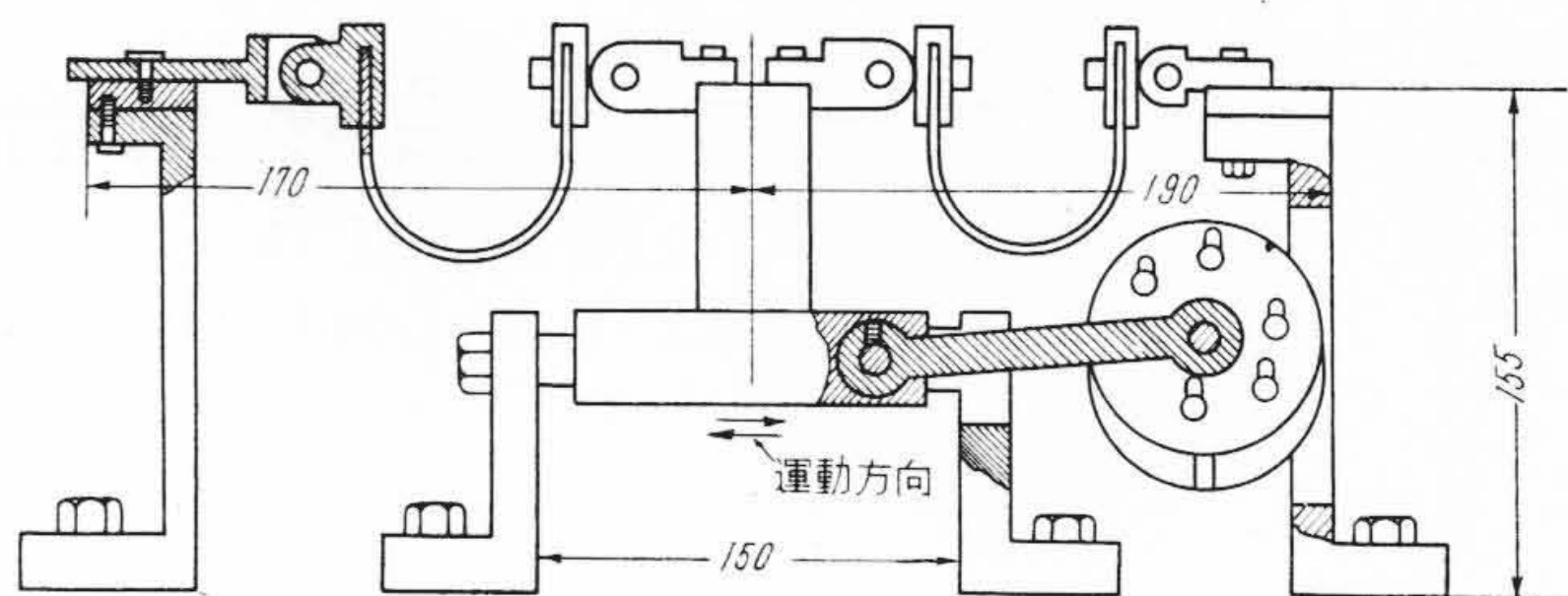
2.3 曲げ試験装置

使用した曲げ試験機の外観を第1図に示す。また第2図はその構造の一部を示す。第1図は F. Eckel 氏⁽¹³⁾の試験機を参考として製作した試験機であり、試験速度の異なった三つの部分、すなわち左側、中央部、右側の部分より構成されている。試験はおのの10個の試験片を同時に試験できる。曲げ速度は左側部分が10c/hと30c/h、中央部は20c/hと51c/h、右側は340c/hと660c/hの試験速度とした。またストロークは0~30mmまで自由に变化ができるようにした。なお試験片は第3図に示すとおりであり、図示した試片を試片取付けチャックに固定し試験を行ったが、その前にU形に曲げた試験片の外側および内側にひずみ計(K-9形)をより、曲げひずみを測定した。なおひずみの測定には動的電気抵抗線式ひずみ計を使用し、電磁オシロによりひずみの記録を行った。

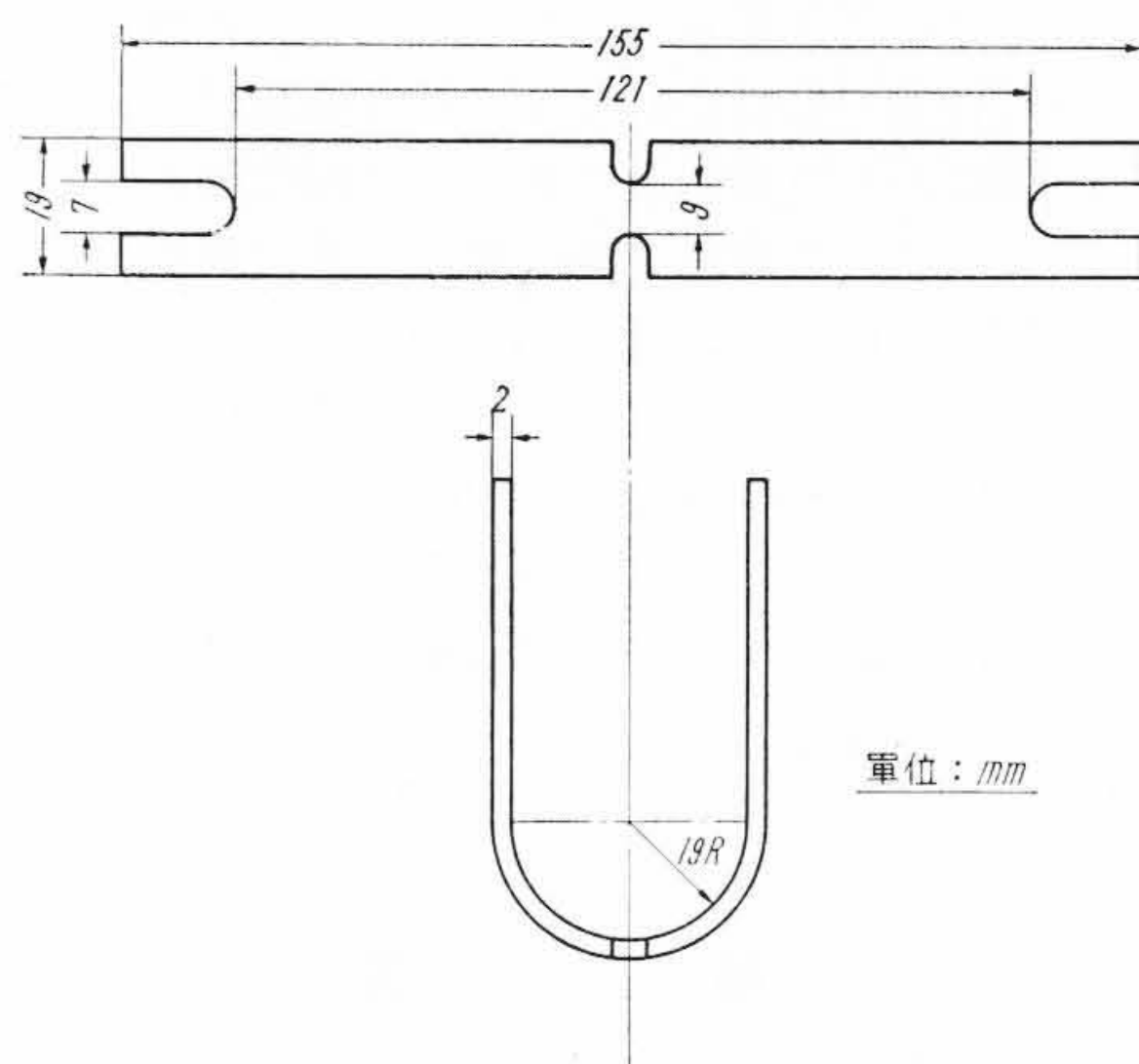
3. 実 験 結 果

3.1 Pb-Te 二元合金

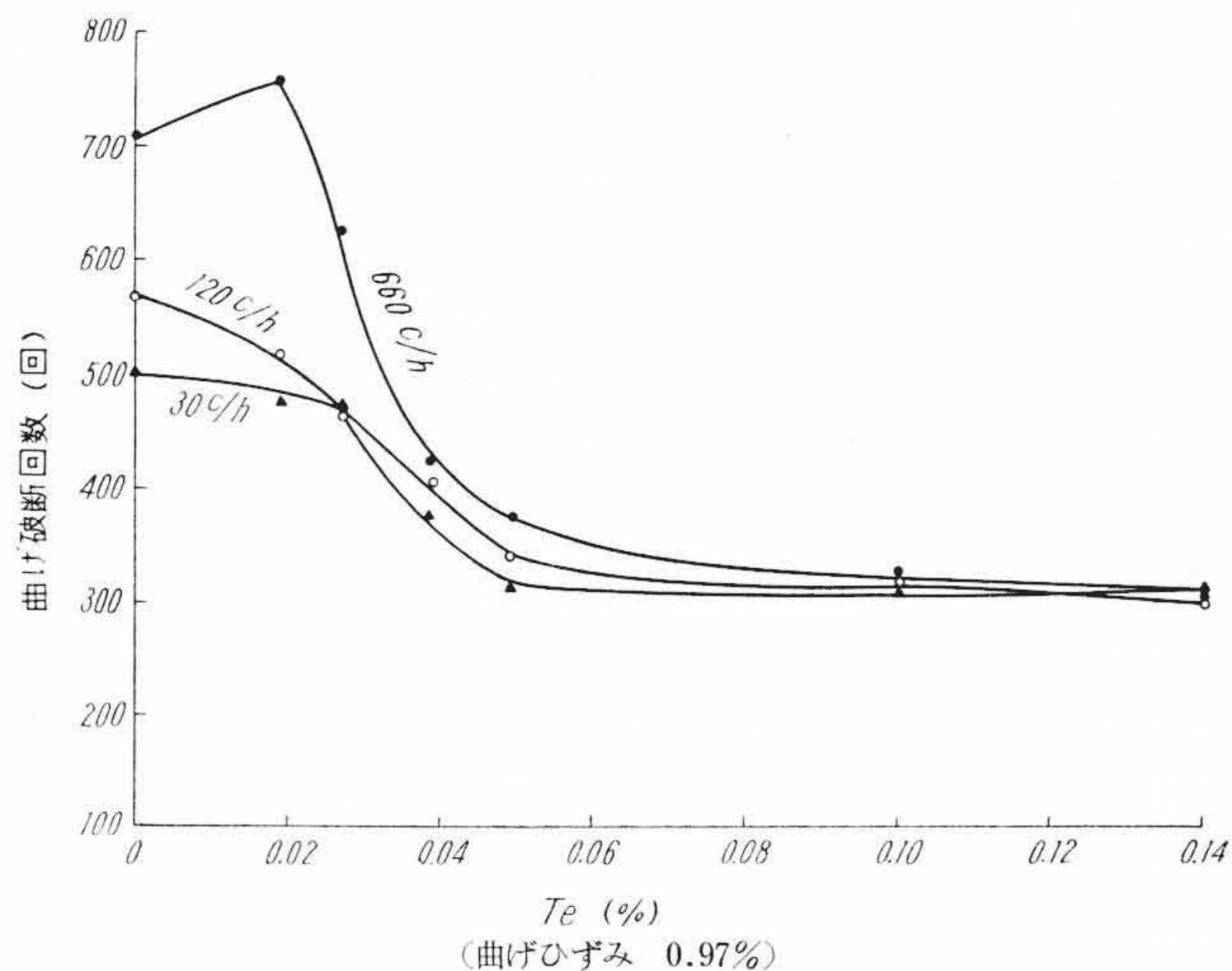
第4図に Pb-Te 二元系合金の Te 添加による繰返し曲げ特性について示す。Pb-Te 合金についてはケーブル鉛被用として多くの研究があり^{(13)~(17)}、その結果によると機械的性質にすぐれ、また耐食性も化学鉛に比べ良好とのことである。また 0.05% Te 付近で結晶粒が微細化するので硬化現象を起し、その結果疲労抵抗が著しく高くなるといわれている。しかしその反面非常に硬化がはげしいので押出し加工性に問題があり、Pb-Te 二元合金のみでは使用に適しないと発表されている。



第2図 繰返し曲げ試験機の構造



第3図 繰返し曲げ試験片の形状



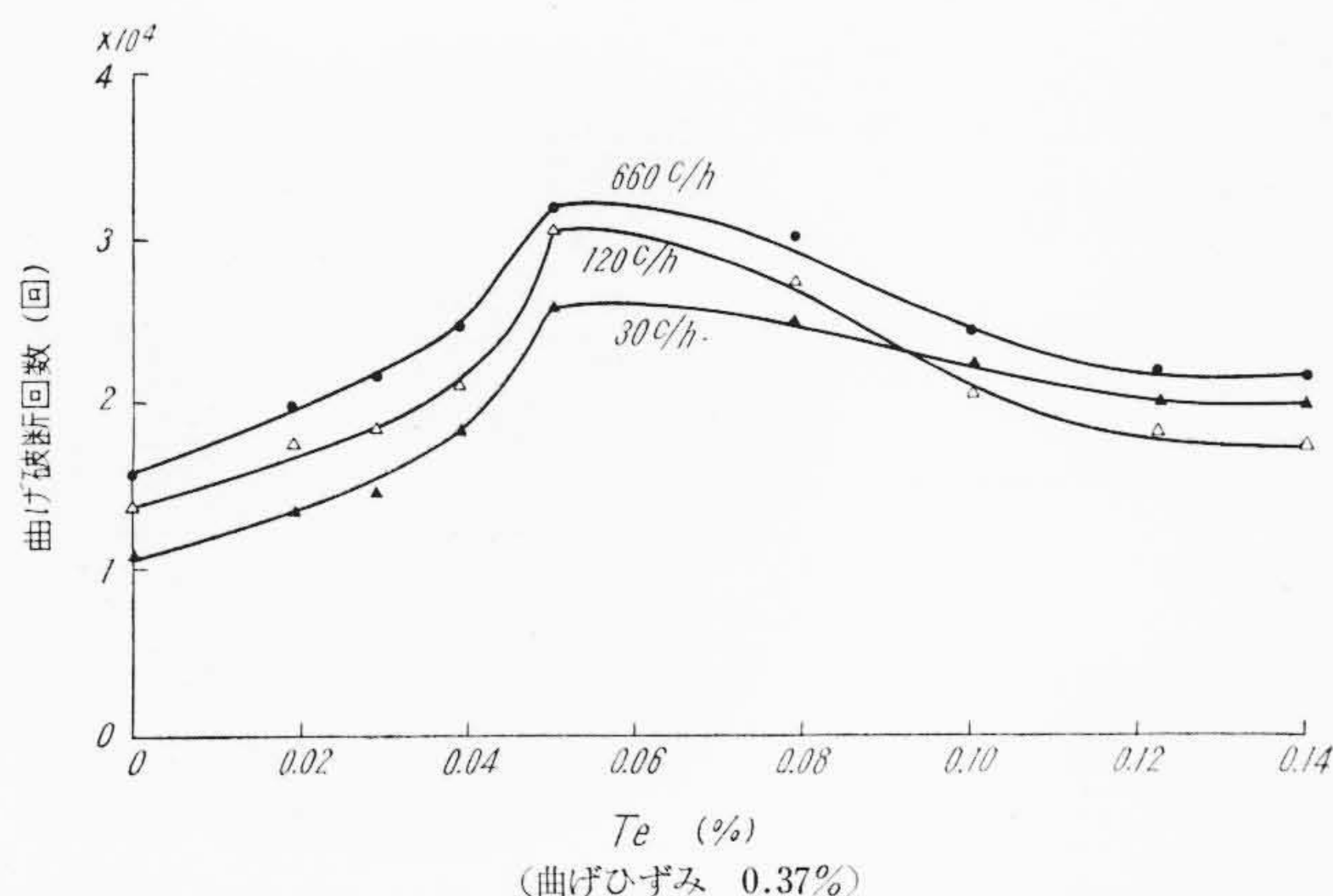
第4図 Pb-Te 二元系合金の繰返し曲げ特性

第4図について考察すると曲げひずみ 0.97% においては Te 含有量の増加にしたがい破断回数が減少している。しかし 0.02~0.03% Te 付近ではかなり良好な値を示している。曲げ速度の影響についてみると、曲げ速度の早い場合のほうが遅い場合に比較して、特に微量添加の場合破断回数が増加している。このことは曲げ速度が早い場合には、曲げ試験中により多くの硬化現象が促進されるためと考えられる。

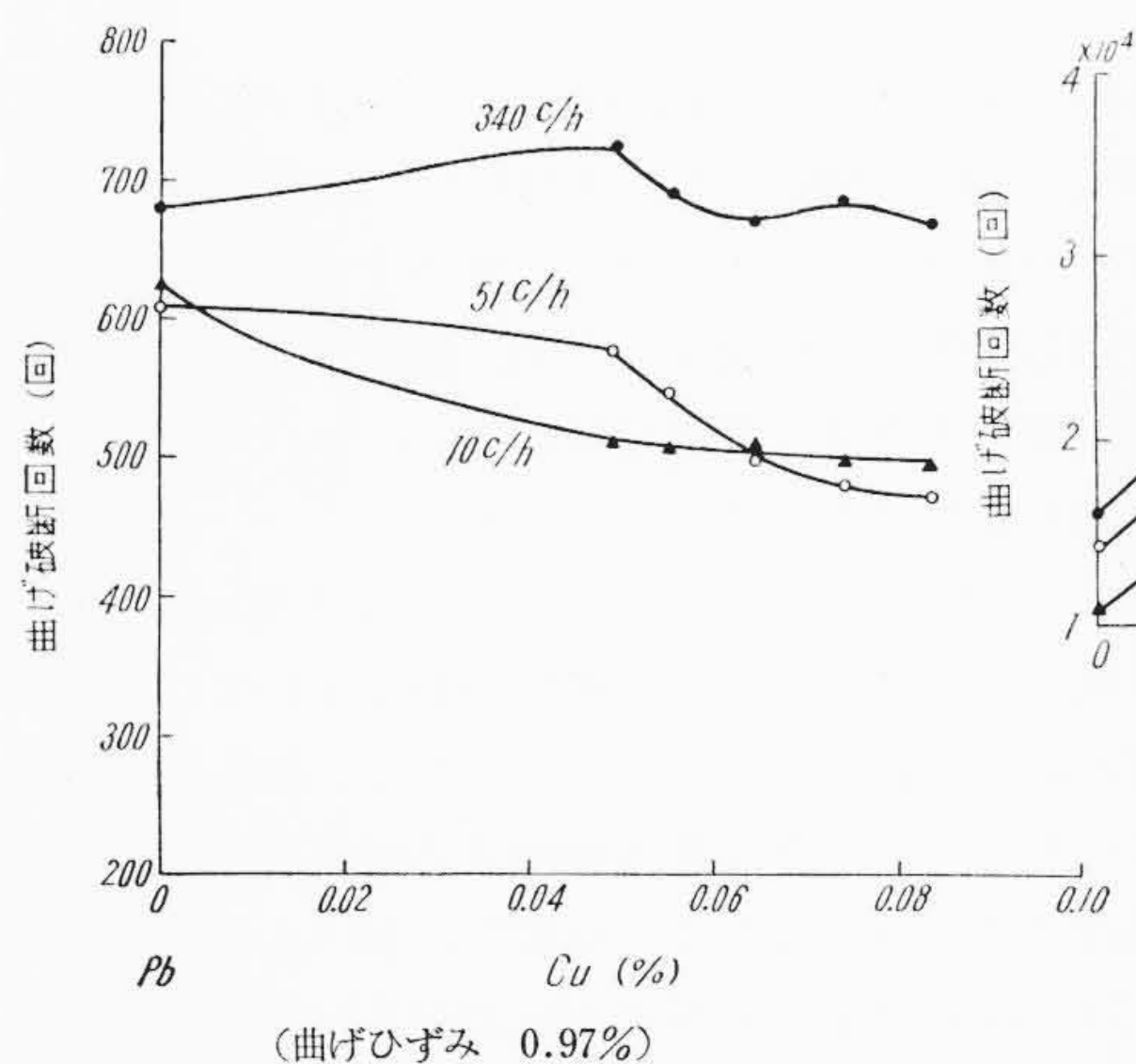
第5図は 0.37% の曲げひずみにおける Te 添加量と曲げ破断回数との関係を示す。この結果からわかることは 0.97% ひずみの場合に純鉛はほかの合金に比べ、破断回数が増えているが、0.37% のひずみにおいては、純鉛が最も破断回数が少なく、0.05% Te 付近が良好な曲げ破断回数を示している。それ以後 Te 量が増加すると曲げ破断回数は若干低下する傾向を示している。

3.2 Pb-Cu 二元合金

第6, 7図は Pb-Cu 二元合金でそれぞれひずみが 0.97% および 0.37% の場合の試験結果を示す。



第5図 Pb-Te 二元系合金の繰返し曲げ特性



第6図 Pb-Cu 二元系合金の繰返し曲げ特性

第6図の結果から明らかなとおり、Cu 添加によって曲げ破断回数は低下しており、Pb-Cu二元合金の共晶組成である0.06% Cu 付近は最も機械的性質が良好であるといわれているが⁽¹⁸⁾、曲げひずみの大きな場合すなわち0.97%のひずみにおいては、その傾向は認められなかった。

これに対し第7図は0.37%ひずみにおける試験結果であるが、0.97%ひずみの場合に比べ、純鉛の曲げ破断回数は非常に低下しており、共晶組成付近である0.05~0.07% Cu 付近がかなり良好な結果を示している。

3.3 そのほかの合金

鉛の疲労限に関する報告はかなりの数に上っており、種々の鉛合金について疲労限が明らかにされている。しかしこれらの数値は試料の作成方法および試験方法などによりかなりの開きがあり、そのため各種鉛および鉛合金の疲労限についてはその取扱いが問題となる場合がしばしば発生している。

鉛の疲労試験はその性質上試験機の方式、試料の形状などによって結果が異なってくるので違った研究者の試験結果を集めて比較することは無理である。現在までに発表されている疲労試験についてまとめてみると以下のようなものである。まず試料の履歴と疲労強度との関係を第3表に示す⁽¹⁹⁾。ケーブル鉛被は高温で押出された管であり、機械的性質はもちろんのこと組織も常温圧延材またはそれを焼鈍したものとは異なっており、その疲労強度もかなりの開きがある。また鉛の疲労限は温度によって著しく影響されるものであって⁽²⁰⁾、第4表に示すとおり疲労に対する温度の影響はきわめて敏感に作用する。

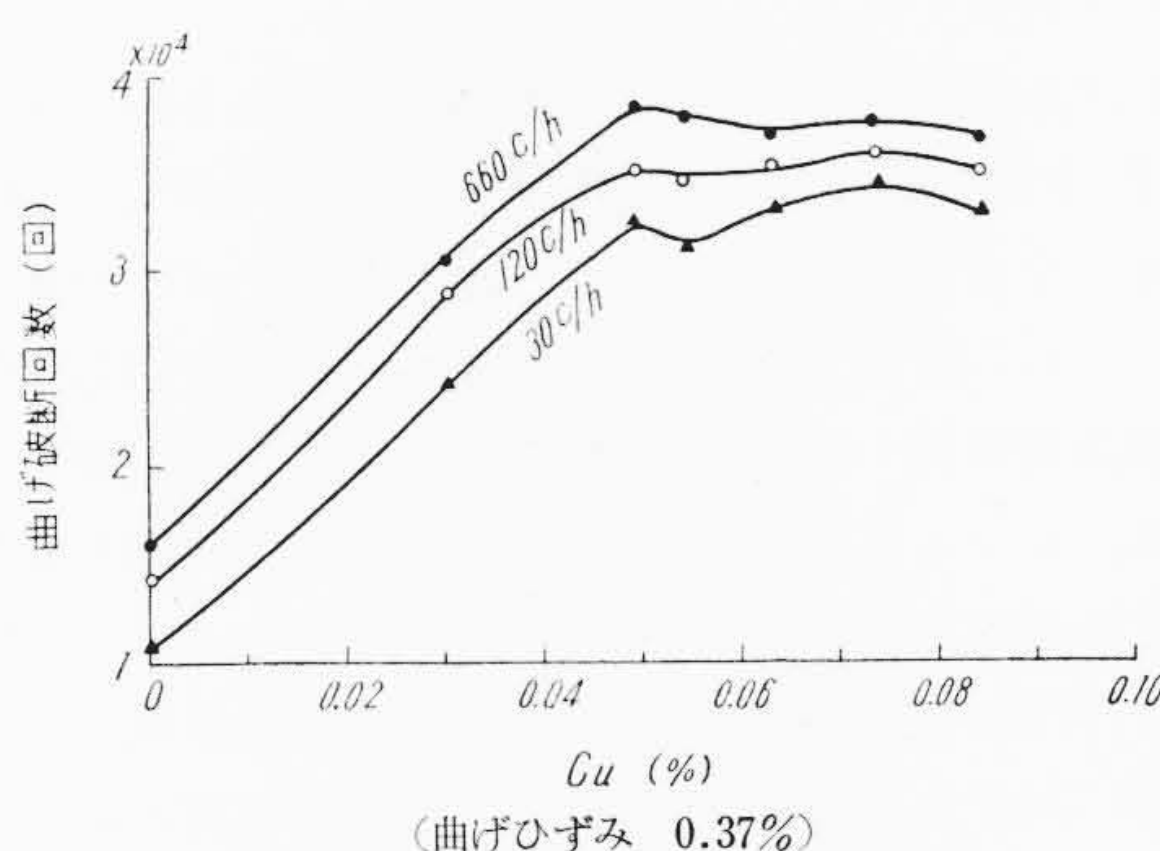
鉛の疲労強度はまたふんいきおよび湿度などによって著しく影響されるものであり、空気中の酸素は鉛の疲労限を低下させ、炭酸ガ

第3表 純鉛の試料履歴と疲労強度との関係

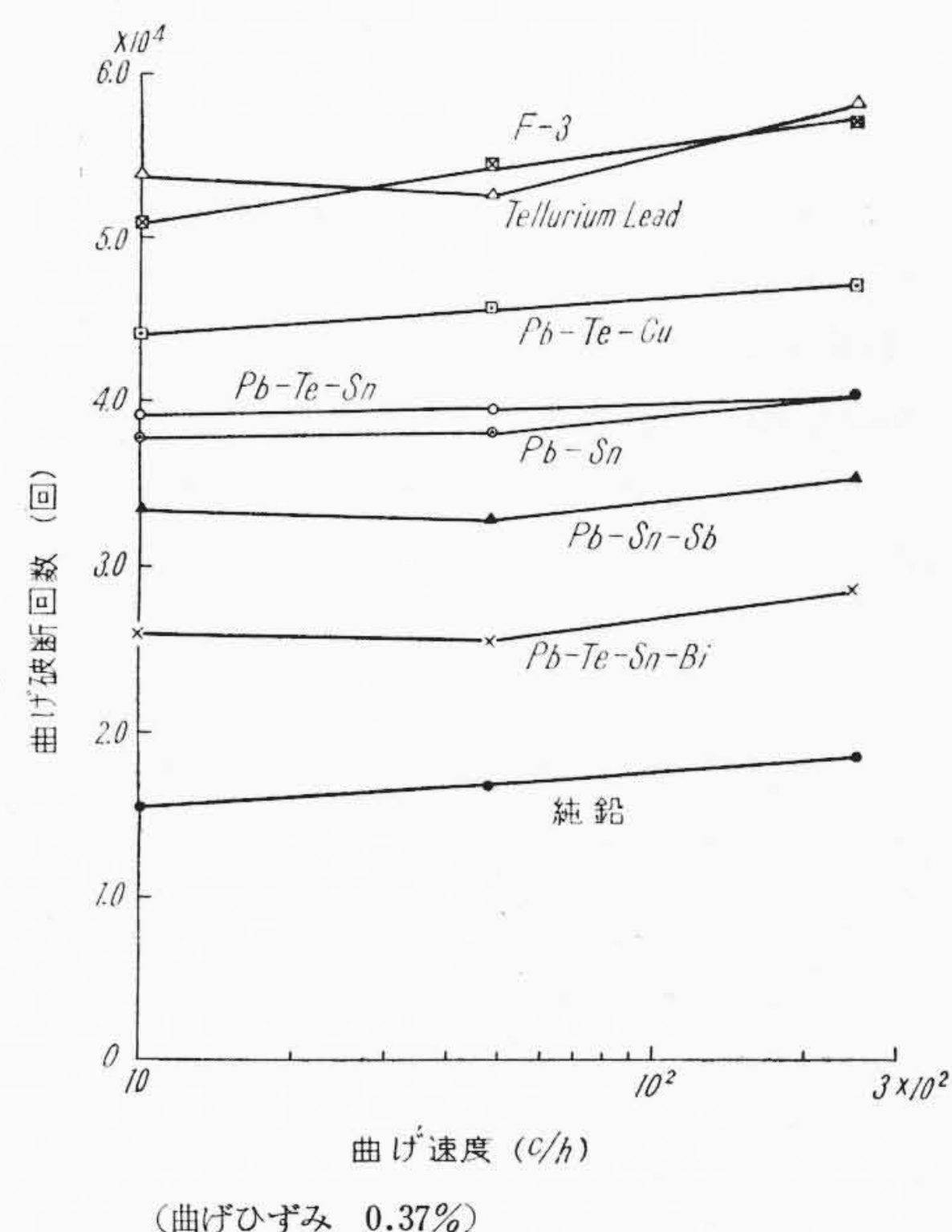
試料	疲労限 (kg/cm ²)
押出材	23.4
常温圧延材	26.8
常温圧延材 (250°C×1h焼鈍)	31.5

第4表 純鉛の疲労強度に及ぼす温度の影響

温度 (°C)	荷重 (kg/cm ²)	破断するまでの回数 (回)
常温	±39.37	1.17×10 ⁶
100	±39.37	0.98×10 ⁶
150	±39.37	0.56×10 ⁶



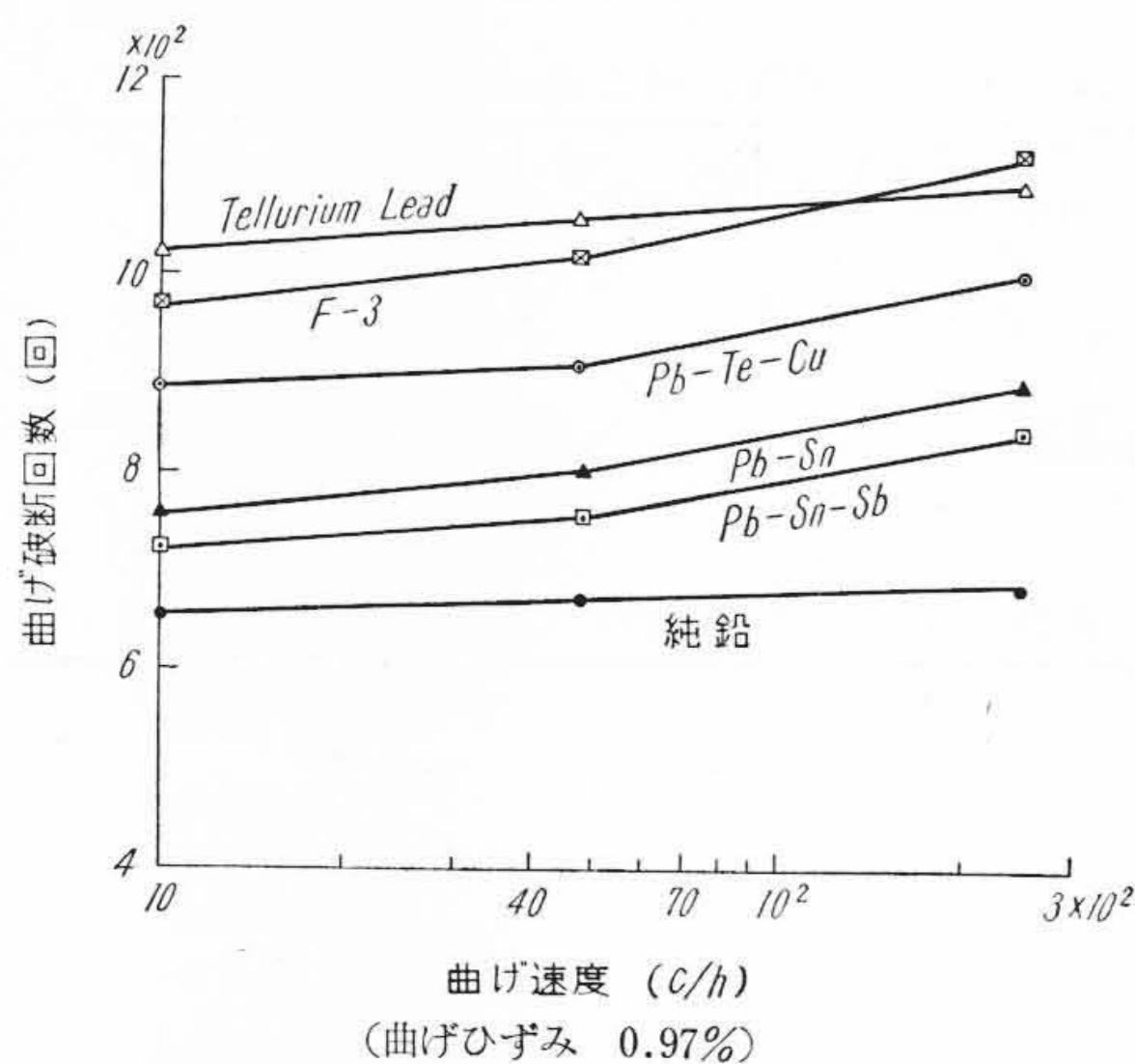
第7図 Pb-Cu 二元系合金の繰返し曲げ特性



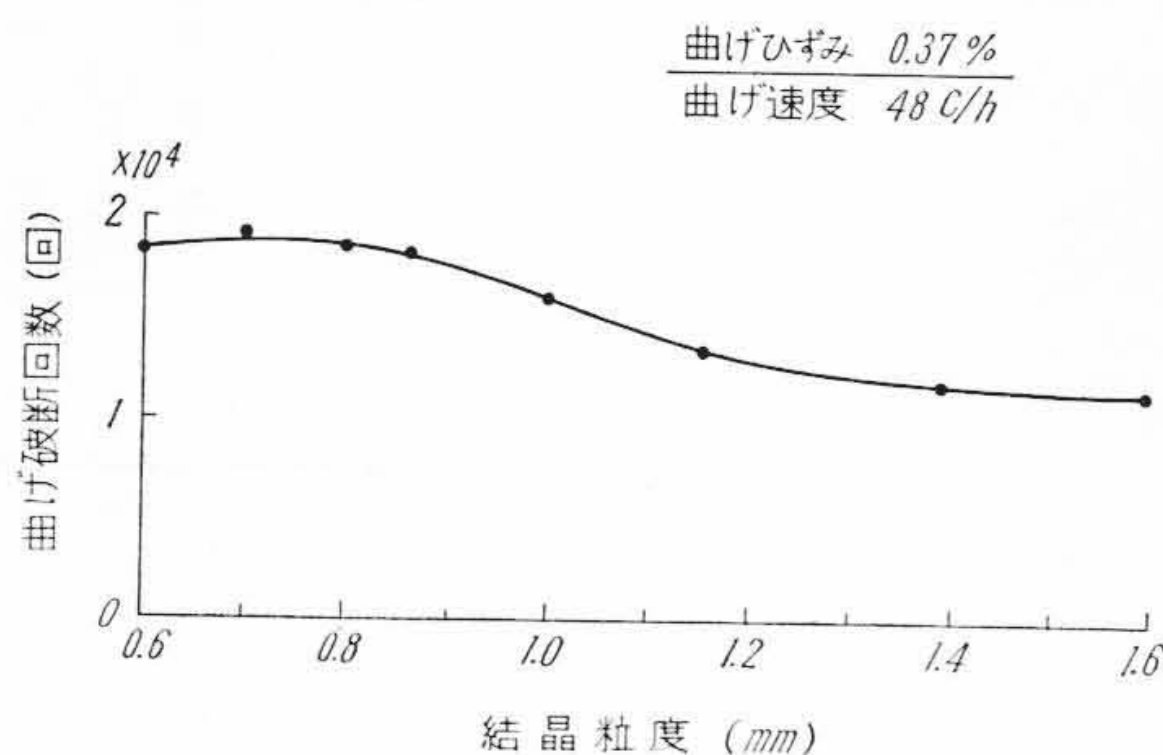
第8図 各種鉛合金の繰返し曲げ特性

ス中では疲労が遅れるといわれている。種々のガスふんいき中で行った試験片の破断面は酸素中では酸化されて灰色を示し、水素中では全面金属光沢を示している。またガス中における疲労き裂の開始はいずれも結晶粒界のき裂を伴って発生する。

なお鉛の場合曲げ速度および振動速度が増加すると疲労が遅れる場合がある。このことは引張試験の場合、引張速度が増加すると引張強さが増加することと同じようである。また湿度も疲労にかなりの影響を及ぼすものであり、湿度の高いほど疲労を遅らせる傾向を示す。結晶粒の大きさと疲労強度との関係は、結晶粒の大きいものは結晶粒の小さいものに比較して疲労しやすいといわれている。われわれの行った各種鉛合金の繰返し曲げ試験は曲げひずみを0.37%および0.97%で行い、また曲げ速度は10, 48, 240 c/hの各条件で行った。なお曲げ振幅は2.6 mmである。第8図に0.37%ひずみにおける試験結果を示す。この図で明らかなとおり、純鉛の曲げ破断回数はもっとも低く、ついでPb-Te-Sn系合金の順となっており、比較的良好な合金はF-3および“Tellurium Lead Alloy”であり、Pb-Te-Cu系合金は前者につぐ破断回数を示している。なお現用の合金については適度の剛性を持ち、かなり良好な曲げ特性をもっているといわれているPb-Sn合金が良好な結果を示していた。また第9図は0.97%ひずみにおける試験結果を示す。曲げ疲労性としては、各合金とも0.37%ひずみの結果と傾向としては同じようであるが、0.37%ひずみの場合のようにその差異はあまり見られなかった。なお曲げひずみ0.37%および0.97%のいずれにおいても曲げ速度が増加するにしたがい、破断回数が多くなる傾向を示してい



第 9 図 各種鉛合金の繰返し曲げ特性



第 10 図 結晶粒度と曲げ疲労との関係



第 11 図 破断部の組織 (×100)

る。なお各条件においての試験結果は試験片 3 個の平均値である。

各種合金の 0.37% ひずみおよび 0.97% ひずみにおける試験結果を考察してみると、いずれのひずみにおいても、F-3 合金および“Tellurium Lead Alloy”または Pb-Te-Cu 系合金などがほかの合金に比較して良好な曲げ疲労特性を示している。これら耐疲労性に富んでいると考えられる合金は先の報告⁽¹¹⁾の顕微鏡組織からも明らかのように、いずれも結晶粒が微細化している。しかも非常に微細な粒内析出を示しており、これらが曲げに対する抵抗を増加させる原因となると考えられる。これに反し純鉛およびほかの現用合金などは結晶粒が前記合金に比べ粗大なため、曲げに対する抵抗が減少するものと思われる。

なお曲げ破断後の破断部の状況は、やわらかい材料すなわち純鉛などは繰返し曲げ回数が増加するにしたがって、ひずみの集中点が広がり破断部を中心にかかなりの範囲にわたって網目状のしわが発生し、破断にいたる傾向がある。これに対しかたい材料すなわち Pb-Te 二元合金などは網目状のしわの発生が少ない状態で破断する。

3.4 結晶粒の大きさと曲げ破断回数

鉛にかぎらずどのような金属においても、結晶粒の大きさと機械的性質およびほかの諸性質は非常に密接な関係を示している。純鉛はとくに結晶粒が大きく、また加熱により直線的に結晶粒が成長するため、それに伴い機械的性質および曲げ疲労性などが減少する傾向を示している。

ケーブル使用状態においては負荷の変動によって鉛被が繰返し応力を受け、さらに温度も上昇するため、成長した結晶粒界に沿ってき裂が発生し事故を起す場合が多い。このため結晶粒が微細であり、しかも結晶粒の成長を起さない鉛合金の研究が数多く行われている。

今回われわれは Hydraulik 被鉛機で押し出した外径 48mm、厚さ 2mm の純鉛の鉛管を用い、結晶粒の大きさと曲げ破断回数について実験を行った。試験試料は押し出し鉛被を用い 200°C である時間加熱し所要の結晶粒を得てこれらを供試材とした。第 10 図はその試験結果である。この結果から明らかとなり結晶粒が大きくなるにしたがい曲げ疲労特性が低下している。なお破断後の試片よりその破断がどのような形状を示しているかを顕微鏡組織から検討した。その破断部の顕微鏡組織を第 11 図に示す。この組織からわかるように曲げによるき裂は結晶粒界に沿って発生し、このき裂が繰返し曲げ回数の増加にしたがって成長し、破断にいたるものと考えられる。

4. 結 言

ケーブル鉛被用材料としては、耐クリープ性および押し出し性の良好なことはもちろん必要であるが、繰返し曲げ特性も良好なことが

望まれる。

筆者は鉛被用各種合金について比較的大きな曲げひずみすなわち 0.37% および 0.97% ひずみの場合の曲げ特性について実験を行った。なお低いひずみの場合については追って報告する。また結晶粒の大きさと曲げ疲労との関係を検討するため、純鉛を加熱して結晶粒を粗大化させ結晶粒の大きさと曲げ破断回数について実験を行った。得られた結果を要約すると次のようになる。

- (1) Pb-Cu および Pb-Te 二元合金は、Cu および Te を 0.06% 含有した共晶組成のものが良好な曲げ破断回数を示している。
- (2) 曲げ速度と破断回数とは密接な関係がある。繰返し曲げ速度が速くなるにしたがい、破断回数は増加する傾向を示す。
- (3) 繰返し曲げひずみ 0.37% および 0.97% における破断回数は Pb-As 系、Pb-Te-As 系合金などがすぐれており、Pb-Te-Cu 系合金はこれにつぐ良好な曲げ特性を示している。
- (4) 結晶粒の大きさと曲げ破断回数とは密接な関係があり、結晶粒が粗大化するにしたがい曲げ破断回数は減少する。また曲げによるき裂はこの粗大化した結晶粒界に沿って発生し破断に至る。

終りに臨み本研究を行うにあたりご指導、ご鞭撻をいただいた日立電線株式会社電線工場久本、山本両博士、第一研究課渡辺課員ならびに種々実験上ご援助をいただいた金属係の方々に厚くお礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- (1) C. F. Schifreen: TAIEE, 63, 535 (1944)
- (2) F. W. Gland: Z. Metallk., 44, 97 (1953)
- (3) B. J. Giblin, W. T. King: Proc. I. E. E., 101, 123 (1952)
- (4) O. Hachnel: Z. Metallk., 191, 492 (1927)
- (5) J. F. Christmann: CIGRÉ, 14th Meeting, 2, 231 (1952)
- (6) 山路, 大島, 高橋, 大和田: 日立評論 37, 1197 (昭 30)
- (7) L. F. Hickernell, C. J. Snyder: TAIEE, 65, 563 (1946)
- (8) L. F. Hickernell, A. A. Jones: TAIEE, 70, 127 (1951)
- (9) J. F. Eckell, G. B. Shanklin: TAIEE, 67, 294 (1954)
- (10) 山路, 大内: 日立評論 39, 1294 (昭-32)
- (11) 山路, 大内: 日立評論 40, 412 (昭-35)
- (12) 山路, 大内: 日立評論 42, 378 (昭-35)
- (13) B. John, F. Eckel: A. S. T. M., 51, 745 (1951)
- (14) W. Singleton: J. Inst. Met., 12, 36 (1938)
- (15) G. Hirs: Met. Ind., 12, 36 (1938)
- (16) J. Greenwood: Proc. Austlarian, Inst. Min. Met., 104, 385 (1939)
- (17) C. W. Dollins: Univ. of Illinois Bulletin, 48, 394 (1950)
- (18) S. Beckinsal: J. Inst. Met., 39, 375 (1928)
- (19) 小野: 鉛および鉛合金 p. 41 (昭-17)
- (20) 高橋: 電学誌 72, 418 (1952)