

導電用アルミニウム合金の疲れ強さ

Fatigue Strength of Aluminium Alloys for Electric Conductor Use

川 西 六 郎*
Rokurō Kawanishi

内 容 梗 概

高抗張力導電用アルミニウム合金としてのアルドライ合金(Al-Mg₂Si 系合金)は架空送電線などに最近需要が非常に多くなってきている。

アルドライ合金は析出形時効硬化性合金であり、静的強さ、耐食性および導電率が熱処理条件に大きく影響されると同様に、架空送電線に使用する場合に問題となる疲れ強さも、熱処理により変化することが考えられる。

したがって、130~200°Cの範囲で最高8時間までの焼戻処理を行った場合の疲れ強さを測定した。

得られた実験結果を要約すると

- (1) 焼戻温度が高く、時間が長いほど、疲れ強さは低下する傾向がある。
- (2) 静的強さと疲れ強さの関係は、疲れ強さが高いもののほうが、静的強さも高くなっている。

1. 緒 言

導電用アルミニウム合金として、最近需要の多いアルドライ合金は、長径間の架空送電線などに広く使用されつつあるが、架空送電線に使用される材料として、当然風圧により複雑な振動を受けることが考えられる。したがって、このような材料に対しては架設時の基礎的なデータとして疲れ強さがどの程度のものであるかを調べておくことが大切である。

疲労破壊は、変動する応力、または変動的塑性ひずみによって材料が破壊する現象をいうのであるが、架空送電線がうける応力は、繰り返し応力を周期的に受ける場合もあるし、また変動応力を受けるときもあり、応力もまた非常に変動することが考えられる、しかし疲労という現象は、応力振幅が静的破壊応力より非常に低い値であっても起るといふ事実は十分注意しなければならない。このようにきわめて小さい繰り返し応力を受けて材料が破壊することについては、数多くの研究が⁽¹⁾⁽²⁾なされているが、いまだに明快な解析はされていない、通常巨視的立場から考えると、材料が繰り返し応力を受ける場合には、応力の分布は試料の最外層において最大となることが多い。このためにその部分がひずみ硬化を起し、最後にはすべり変形を起すことができなくなり、微細なき裂が発生して内部のほうに発展し、ついに破断すると考えられている。

疲れ強さを測定するには、疲労試験を行うのであるが、非鉄金属材料では、鉄鋼材料とことなり繰り返し数が増加しても疲労限が、あきらかに認めがたいので、一般に繰り返し数 10⁶~10⁷ 回における疲れ強さを使用している。

アルドライ合金は時効硬化性析出形合金で⁽³⁾あり、熱処理により機械的強さ、導電率および耐食性などが変化する、これは溶体化処理により過飽和に固溶した Mg₂Si が、焼戻処理により析出してくるからである。したがって、アルドライ合金のように焼戻処理によ



第1図 シュベニング式回転曲げ疲労試験機

り、所要の性能をうる材料においては焼戻処理条件は十分に考慮する必要がある。

疲れ強さに影響する因子としては加工度、熱処理、結晶粒度、析出物の形状などが考えられるが、本論文は焼戻条件により疲れ強さがどの程度変化するかにつき調査したものである。

2. 供試材および実験方法

2.1 供 試 材

試料は熱間加工後 520°C で溶体化処理、常温時効後冷間伸線により 2.9 mmφ にしたもので、これを 130, 150, 170 および 200°C の各温度で最高8時間まで焼戻処理を行った。

なお、比較のために電気用地金品位のアルミニウムについても疲れ強さを測定した。

第1表は供試材の化学組成を示す。

2.2 実 験 方 法

試験装置はシュベニング式回転曲げ疲労試験機を使用した。

第1図はシュベニング式回転曲げ疲労試験機の外観写真を示したものである。

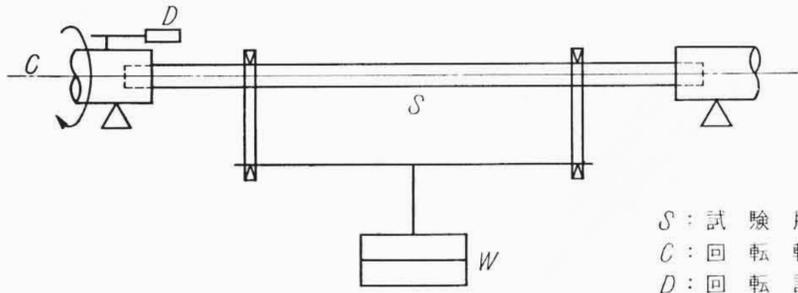
第2図は試験機の原理を図解したもので、この方法においては、試験片の長さによつてモーメントが一様であり、1回転ごとに試験片の各点は繰り返し応力をうけることになる。

試料長は 180mm で、回転軸Cを電動機によって回転すると試験

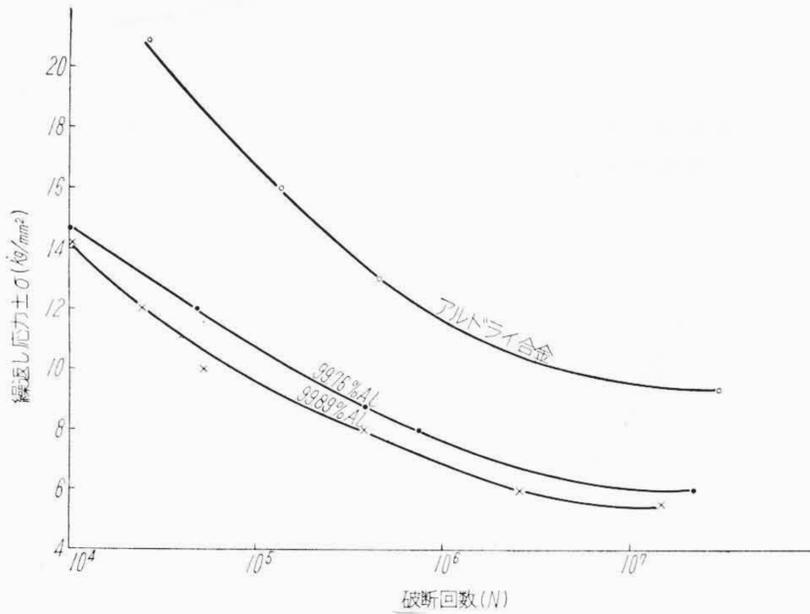
第1表 供試材の化学組成

試 料	化 学 組 成 (%)					
	Fe	Si	Cu	Mn	Ti	Mg
アルドライ合金	0.12	0.42	0.002	0.003	0.008	0.40
高品位アルミニウム (99.89% Al)	0.06	0.04	0.002	0.001	tr	—
普通品位アルミニウム (99.76% Al)	0.17	0.06	0.002	0.002	tr	—

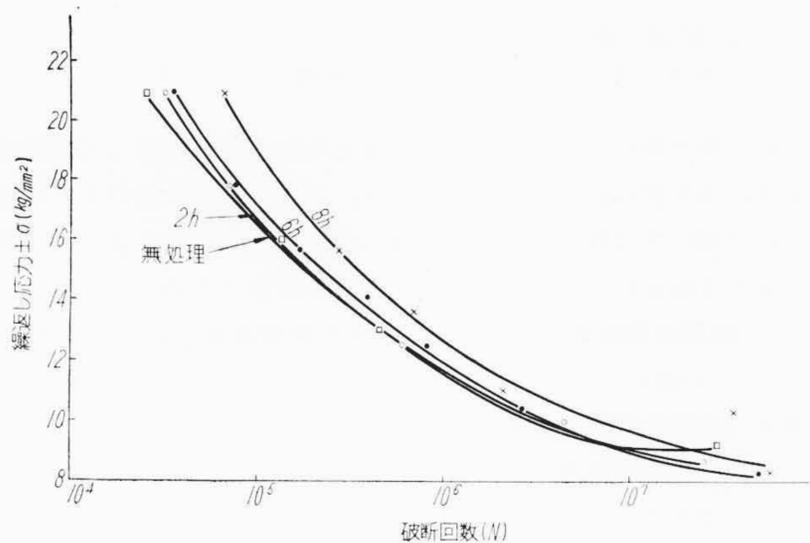
* 日立電線株式会社電線工場



第2図 疲労試験機の図解



第3図 アルドライ合金，アルミニウム線の破断回数と繰返し応力の関係



第4図 焼戻し温度(130)を一定にしたときの処理時間の変化による破断回数と繰返し応力の関係

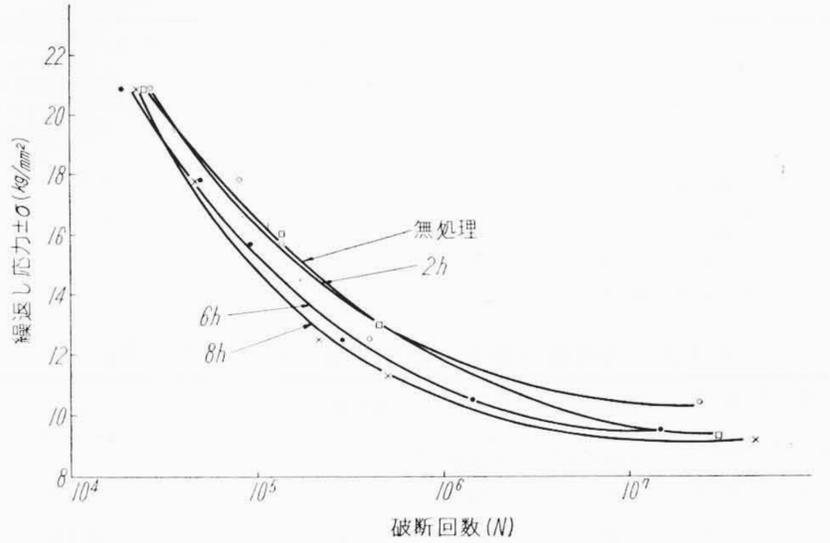
片Sが回転する，試験片が破断すると電動機が自動的に止まるようになっており，その破断までの回転数は，回転計Dによって指示されるようになっている。

3. 実験結果

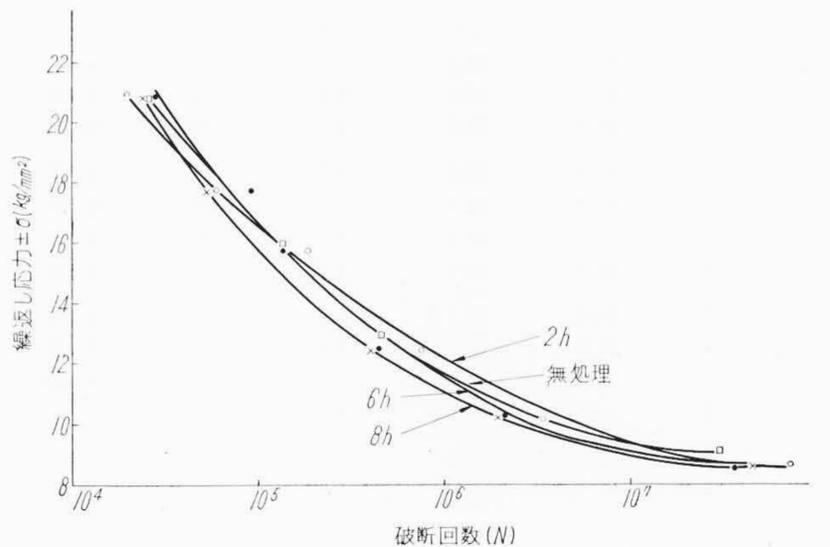
3.1 硬引き材の疲れ強さ

第3図は2.9mmφのアルドライ合金線および電気用地金品位のアルミニウム線の硬引き材の繰返し応力と破断回数との関係を示したものである。

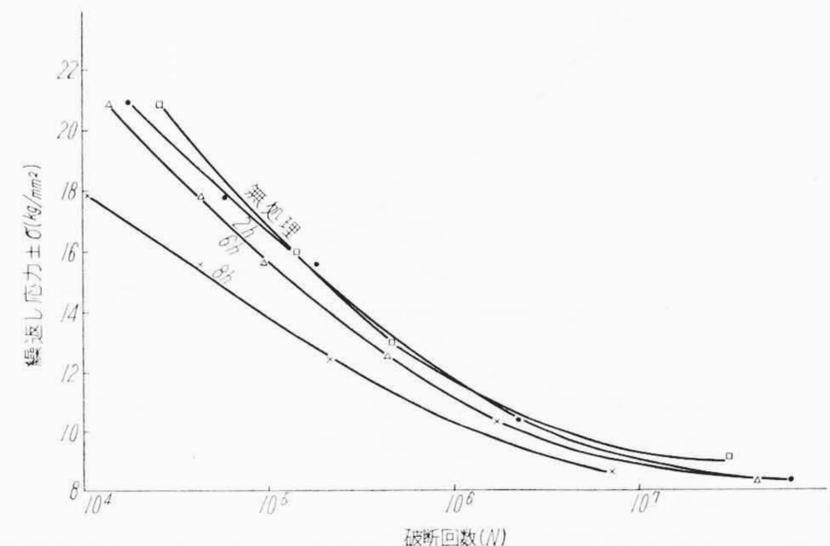
第3図をみるとわかるように，アルミニウム線においては純度により疲れ強さには大きな差がない，たとえば10⁷回における限定疲労限を求めると，高品位アルミニウム(99.99%Al)は±5.5kg/mm²，普通品位アルミニウム(99.76%Al)は±6.0kg/mm²である，しかるにアルドライ合金は±9.6kg/mm²と高い値を示しており，機械的強さは静的強さ，動的強さのいずれも電気用地金品位のアルミニウ



第5図 焼戻し温度(150°C)を一定にしたときの処理時間の変化による破断回数と繰返し応力の関係



第6図 焼戻し温度(170°C)を一定にしたときの処理時間の変化による破断回数と繰返し応力の関係



第7図 焼戻し温度(200°C)を一定にしたときの処理時間の変化による破断回数と繰返し応力の関係

ムに比較して高いことがわかる。

第2表はアルミニウム線，アルドライ合金線の静的強さと疲れ強さをまとめたものである。

3.2 焼戻処理温度を一定にしたときの処理時間による疲れ強さの変化

第4～7図は焼戻処理温度を130，150，170および200°Cとそれぞれ一定にしたときに疲れ強さがどのように変化するかを示したものである。

非鉄金属の疲労限は前述したように明らかに認めることはできにくいので，一般には，繰返し数10⁷回における疲れ強さをもって耐疲労性を比較しているが，さらに，繰返し応力と破断回数の関係，すなわちS-N曲線において，その関係曲線の傾きがどのようにな

第 2 表 アルドライ合金およびアルミニウムの機械的強さ

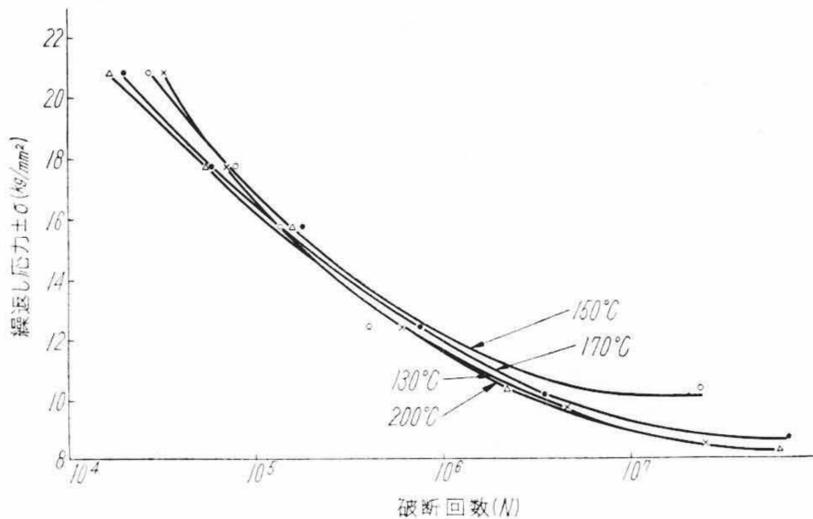
試料	引張り強さ (kg/mm ²)	降伏強さ* (kg/mm ²)	疲れ強さ** (±kg/mm ²)
アルドライ合金	35.5	32.8	9.6
高品位アルミニウム (99.89% Al)	18.5	16.1	5.5
普通品位アルミニウム (99.76% Al)	19.5	17.4	6.0

* 0.2%永久伸びを生ずる応力
** 破断回数 10⁷ 回における繰返し応力

第 3 表 各種焼戻条件の静的強さと疲れ強さの関係

焼戻条件		引張り強さ	降伏強さ*	疲れ強さ**	$\frac{\sigma_W}{\sigma_B}$	$\frac{\sigma_W}{(\sigma_{0.2} + \sigma_B)}$
温度(°C)	時間(h)	σ_B (kg/mm ²)	$\sigma_{0.2}$ (±kg/mm ²)	σ_W (kg/mm ²)		
加工状態		35.5	32.8	9.6	0.271	0.141
130	2	32.7	31.8	9.0	0.275	0.149
	4	32.9	31.4	8.9	0.271	0.138
	6	32.8	31.6	9.2	0.280	0.143
	8	33.5	31.3	9.5	0.283	0.146
150	2	35.1	31.6	10.4	0.296	0.155
	4	34.1	30.5	9.2	0.271	0.142
	6	33.8	30.0	9.3	0.275	0.145
	8	33.8	27.8	9.1	0.269	0.147
170	2	33.5	30.4	9.3	0.277	0.145
	4	32.1	20.7	9.0	0.280	0.170
	6	31.7	18.4	9.2	0.290	0.183
	8	30.9	18.0	8.9	0.288	0.182
200	2	26.6	22.7	9.0	0.338	0.183
	4	26.0	20.9	8.8	0.338	0.188
	6	25.2	17.6	8.8	0.349	0.205
	8	—	16.5	8.5	—	—

* 0.2%永久伸びを生ずる応力
** 破断回数 10⁷ 回における応力



第 8 図 焼戻し時間 (2h) を一定にしたときの処理温度の変化による破断回数と繰返し応力の関係

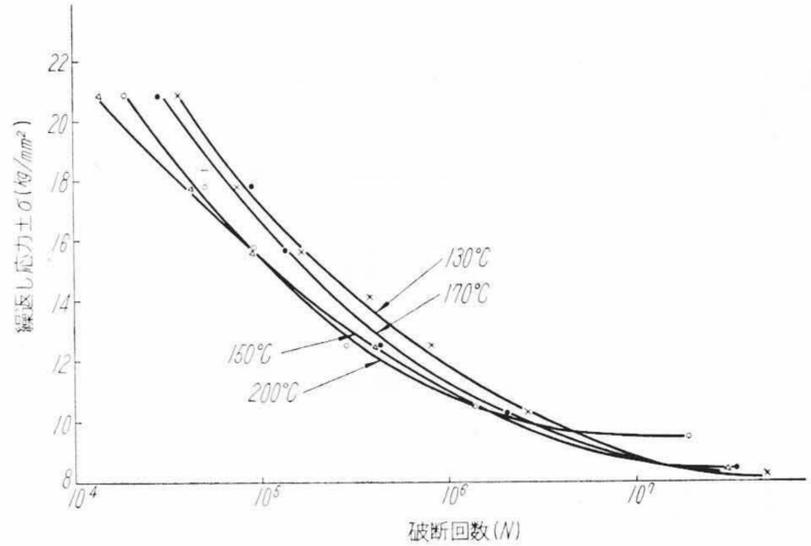
っているかも考慮する必要がある。

第 4~7 図の S-N 曲線を比較してみると、処理温度が高くなるにつれて S-N 曲線の傾きが低くなる傾向がある。このことは処理温度が高いほうが、繰返し応力の大きい場合に早く破断することになる。

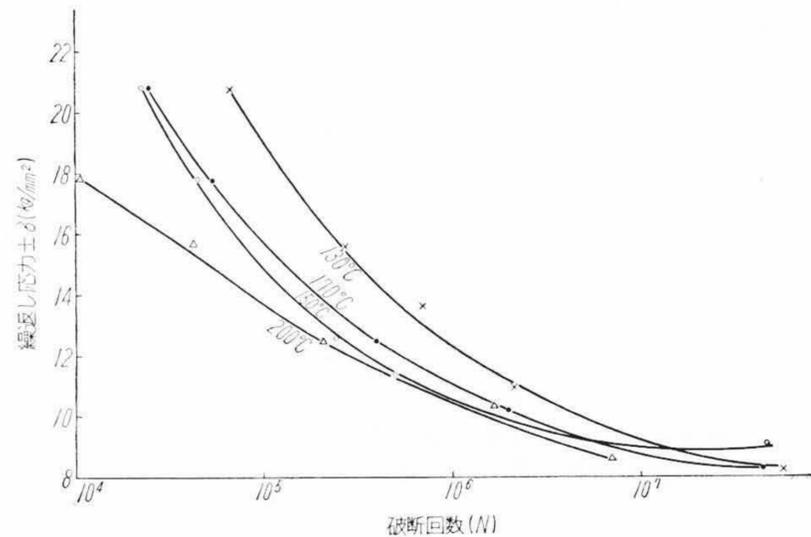
また、焼戻し処理温度が 130°C の場合と、それ以上の温度で処理した場合では処理時間による疲れ強さの変化が異なることがわかる。

すなわち、処理温度 130°C では疲れ強さは硬引き材に比較して、良好な耐疲労性を示し、この傾向は処理時間が長いほうが明らかに認められる、しかし、処理時温度が 150°C 以上ではやや異なった状態となり、焼戻し処理により耐疲労性は硬引き材に比較してやや低くなる傾向がある、処理時間が短いときには、S-N 曲線は硬引き材とほぼ同じであるが、処理時間が長くなると疲れ強さは次第に低下しており、特に第 7 図 (200°C 焼戻材) にみられるように処理温度および処理時間が大きいほど S-N 曲線は低下している。

アルドライ合金は析出形時効硬化性合金であり、焼戻し処理条件に



第 9 図 焼戻し時間 (6h) を一定にしたときの処理温度の変化による破断回数と繰返し応力の関係



第 10 図 焼戻し時間を (8h) 一定にしたときの処理温度の変化による破断回数と繰返し応力の関係

より析出物の形状が変化することが考えられる、したがって焼戻し処理条件により疲れ強さが変化するのは、アルドライ合金のように熱処理材においては残留応力により疲れ強さが左右されるよりも、析出物または結晶粒度の影響が大きいものと推測される。

3.3 焼戻し処理時間を一定にしたときの処理温度による疲れ強さの変化

第 8~10 図は処理時間を 2, 6 および 8 時間とそれぞれ一定にしたときに焼戻し処理温度により疲れ強さがどのように変化するかを示したものである。

第 8 図にみられるように処理時間が短いときには、焼戻し処理温度による疲れ強さの差は特に明らかではないが、第 10 図に示したように、8 時間の焼戻し処理の場合には処理温度による差が大きくあらわれてくるのが認められる。これは前述したようにアルドライ合金は析出形時効硬化性合金のために、処理温度の差により析出物の大きさ、形状が異なることによると思われる。

第 11 図、(a)、(b) および (c) は硬引き材、130°C × 8h、および 200°C × 8h 焼戻し処理した顕微鏡組織を示す。

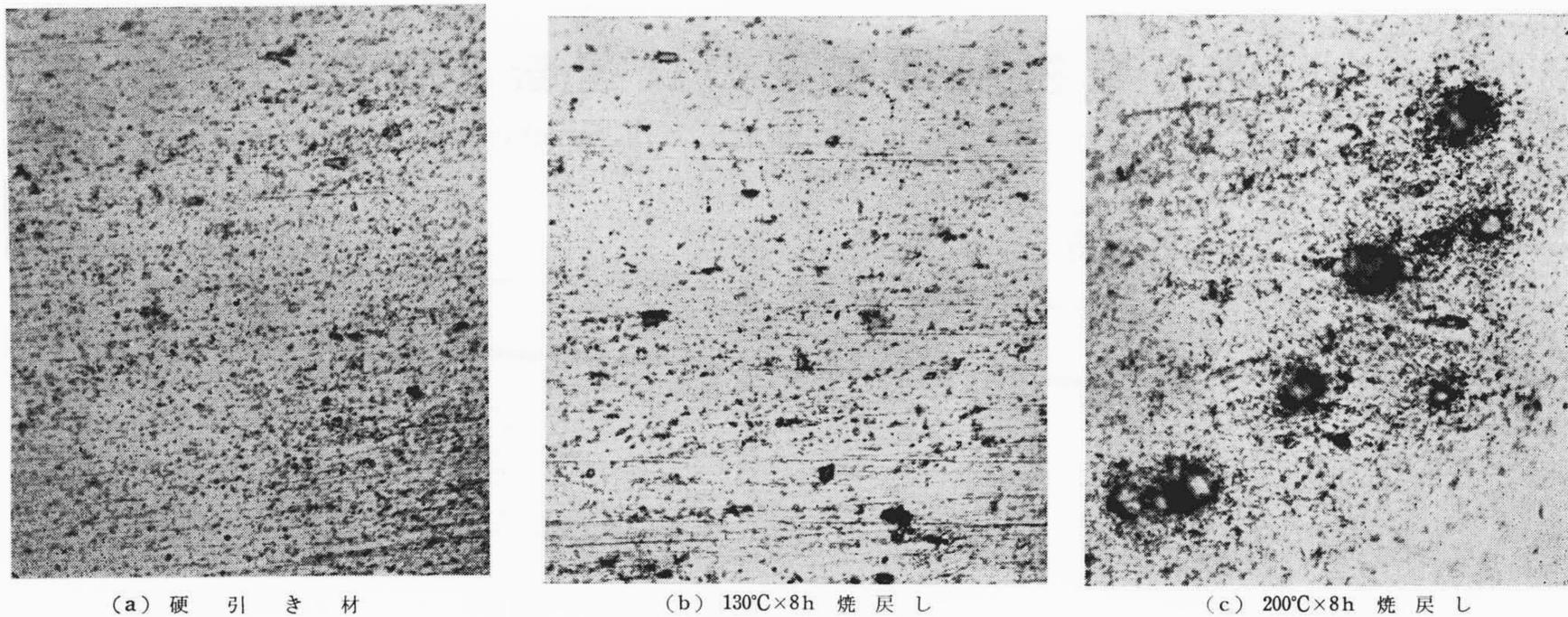
130°C × 8h 処理においては析出物は小さく散在しているが、200°C × 8h 処理の場合には前者に比較して相当に大きく発達していることが認められる。この組織の差が疲れ強さに影響すると考えられる。

3.4 静的強さと疲れ強さの関係

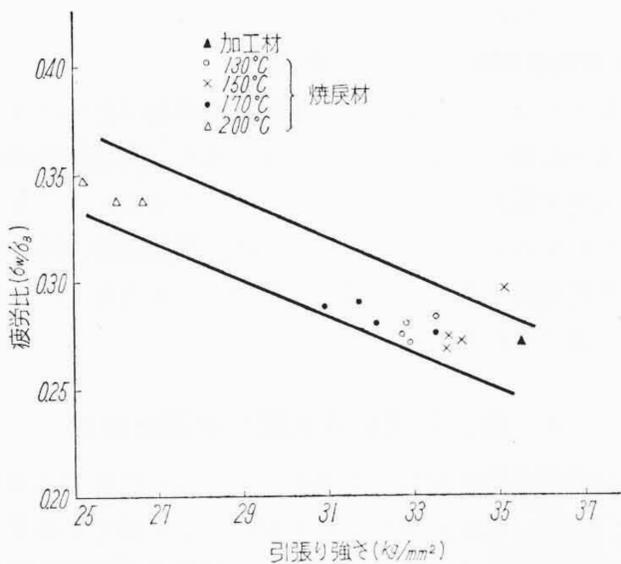
疲れ強さと静的強さの関係は疲労比としてあらわされているが、この疲労比をあらわすのに一般に次の式が使用されている。

$$k = \frac{\sigma_W}{\sigma_B} \dots \dots \dots (1)$$

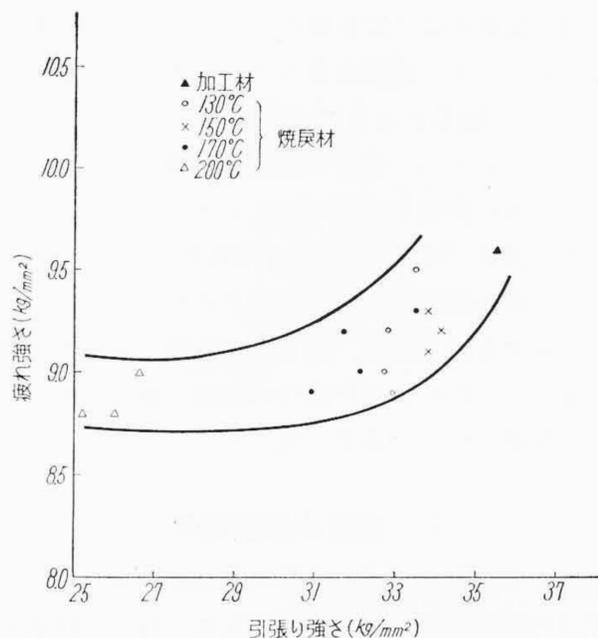
$$k = \sigma_W / (\sigma_{0.2} + \sigma_B) \dots \dots \dots (2)$$



第11図 供試線の顕微鏡組織 (×600)



第12図 焼戻し条件の差異による引張り強さと疲労比の関係



第13図 焼戻し条件の差異による引張り強さと疲れ強さの関係

σ_w : 疲れ強さ
 $\sigma_{0.2}$: 降伏強さ
 σ_B : 引張り強さ

(2)式はおもに鉄鋼材料において使用される実験式である。アルドライ合金は熱処理により静的強さも変化するから疲労比も熱処理により当然変化してくる。

第3表は引張り強さ、降伏強さ、疲れ強さおよび疲労比をとりまとめたものである。第3表をみると疲労比は焼戻し温度が高くなると大きくなる傾向がある、すなわち、静的強さが低いほど疲労比は大きいことになる。

第12図は疲労比と引張り強さの関係を示したものである。

第12図をみるとわかるように処理温度が170°Cまででは引張り強さには差はあるが疲労比には大きな差はないことがわかる、しかし処理温度が200°Cになると引張り強さが低下し、疲労比が高くなっている。

第13図は引張り強さと疲れ強さの関係を示したものである。第13図の関係はちょうど引張り強さと疲労比の関係曲線と逆の傾向にある。すなわち、引張り強さの高いもの、焼戻し温度の低いもののほうが疲れ強さが高い傾向にある。これは第11図の顕微鏡組織よりわかるとおり処理温度が高くなると析出物の形状が大きくなり、この析出物がノッチ効果として作用することにより疲れ強さが次第に低下するものと思われる。

4. 結 言

アルドライ合金は高抗張力導電用アルミニウム合金として近來、

架空送電線などに広く使用されているが、この合金は析出形合金であるために熱処理により疲れ強さも、静的強さと同様に変わることが考えられる。

架空送電線として使用される場合にはいろいろ複雑な繰返し応力を受けることが考慮されるので、2.9mmφアルドライ合金線を使用し、130~200°C範囲の温度に最高8時間まで焼戻し処理を行い、ジュビニング式疲労試験機により、焼戻し条件と疲れ強さの関係を検討し、あわせて静的強さとの関係を調べた。

実験結果を総括すると次のとおりである。

- (1) 疲れ強さは、静的強さにみられるように焼戻し処理温度による大きな変化は認められないが、焼戻し処理温度の高いほうが疲れ強さが低い傾向がある。
- (2) 焼戻し処理時間による疲れ強さの変化は、処理温度が150°C以上になると、処理時間が長いほうが疲れ強さが低くなる傾向がある。これは析出物の形状の差異によるものと思われる。
- (3) 静的強さと疲れ強さの関係は、疲れ強さの高いもののほうが、静的強さも高くなっている。

終りに終始ご指導ご激励いただいた日立電線株式会社電線工場、久本、山本両博士および山路主任、また実験に協力くださった、杉野、大島両氏にお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) 石橋： 金属の疲労と破壊の防止 (1954)
- (2) W.M. Murray: Fatigue & Fracture of Metals (1950)
- (3) 川西： 日立評論 41 77 (昭34-5)