

導電用アルミニウム合金線の耐疲労性

Fatigue Strength of Some Aluminium Alloy Wires Used for Electric Conductor

太田 宏* 山路 賢吉**
Hiroshi Ōta Kenkichi Yamaji

内 容 梗 概

導電用アルミニウム合金線として古くから使用されているアルドライ線を含む二、三のアルミニウムおよびアルミニウム合金線について回転曲げ疲労試験を行ない、S-N線図を求めその疲労強度を検討した。
またこれらアルミニウムおよびアルミニウム合金線を100℃および120℃の温度で60日間にわたる長時間の加熱処理を施し、これについて回転曲げ疲労試験を行ない長時間加熱による疲労強度の変化を調べた。得られた結果を要約すると

- (1) アルミニウムおよびアルミニウム合金線は冷間加工および熱処理によって機械的強度は増加するが、引張り強さの大きいものほど疲れ強さも大きい。
- (2) この場合疲れ強さと引張り強さおよび表面かたさとの間にはおのおのほぼ直線的関係が存在する。
- (3) 疲れ強さと引張り強さの比は比較的引張り強さの大きいところでは一定値を示す。
- (4) 100℃および120℃における長時間の加熱処理によって疲れ強さは1~2 kg/mm² 低下する。この場合長時間加熱による疲れ強さの低下率は加工硬化形合金線のほうが析出時効硬化形合金線よりやや大きい。

1. 緒 言

導電用アルミニウムおよびアルミニウム合金線はより線として超高圧の架空送電線に使用されるが、その際に送電線の風による微振動、雪と氷によるギャロッピング（ダンシング）およびコロナ振動による振動疲労が問題となり⁽¹⁾、電線の疲労に関する資料が必要で、すでに数々の研究成果が発表されている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。

導電用アルミニウム合金線として古くから使用されているアルドライ系合金（イ号アルミ合金）は、Al-Mg₂Si系の擬二元系合金で析出時効硬化形合金であるところからその機械的、物理的および化学的諸性質は熱処理条件に依存するところが大きい⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

アルドライ線について焼戻温度を130℃より200℃、焼戻時間を2時間より8時間に変えて種々焼戻条件の疲労強度に及ぼす影響について研究が行なわれ、焼戻温度が高く、焼戻時間が長いほど疲労強度が低下する傾向が認められている⁽²⁾。

電線に電流が流れると電気抵抗による発熱のために温度上昇が起きるが、電線の温度があまり高くなると引張り強さが低下するので連続使用条件のもとに最高許容温度が定められ、裸線については連続使用最高温度を90℃として許容電流が決められている⁽⁷⁾。

本研究においてはアルドライ線を含む二、三のアルミニウムおよびアルミニウム合金線について回転曲げ疲労試験を行ないS-N線図を求め、疲労強度を検討するとともに、これらの試料について焼戻温度としては比較的低温で裸線の連続使用最高温度90℃よりはやや高温の100℃ならびに120℃における最高60日間にわたる加熱処理の疲労強度に及ぼす影響を調べた。

2. 試料および試験方法

2.1 試 料

試料は普通品位アルミニウム線（試番No.1）、アルドライ線（試番No.3）および析出時効硬化形のアルドライ線と比較するために作った同じ化学組成の加工硬化形合金線2種（試番No.2およびNo.4）の計4種類で、いずれも3.2 mmφの線材である。試料の化学組成を第1表に示す。

No.1は熱間圧延による16 mmφ荒引線を3.2 mmφに伸線したも

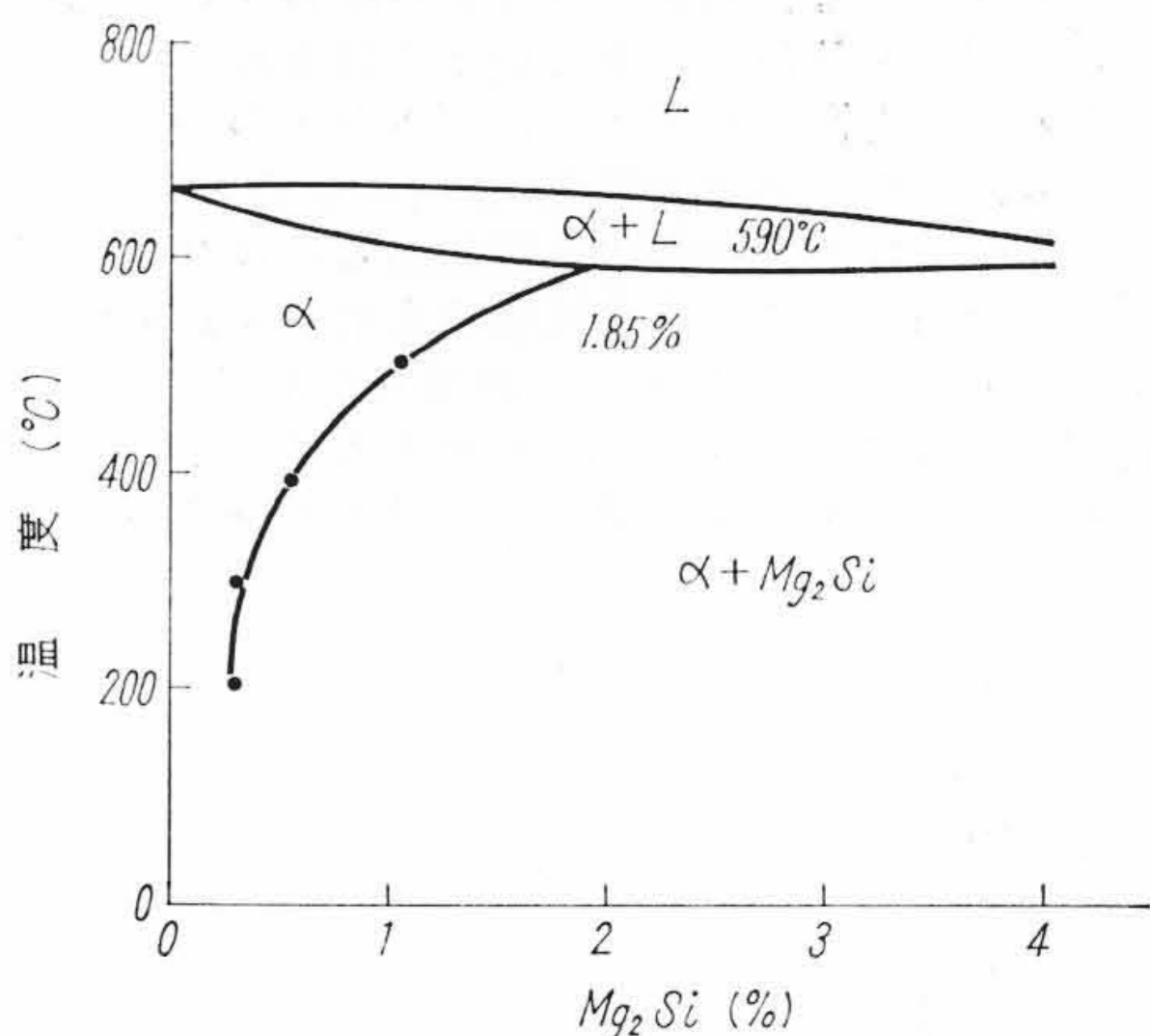
* 日立電線株式会社電線工場
** 日立電線株式会社電線工場 工博

第1表 試料の化学組成 (%)

試番	Si	Mg	Cu	Mn	Fe	Ti	Al
No.1	0.06	—	0.002	0.002	0.17	tr.	Bal.
No.2	0.50	0.41	0.002	0.002	0.12	0.008	Bal.
No.3	0.46	0.43	0.002	0.002	0.13	0.008	Bal.
No.4	0.49	0.46	0.002	0.002	0.12	0.008	Bal.

第2表 試料の機械的性質

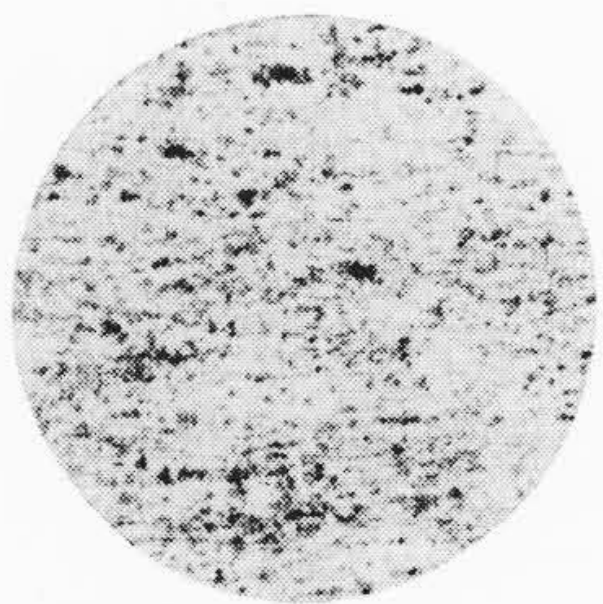
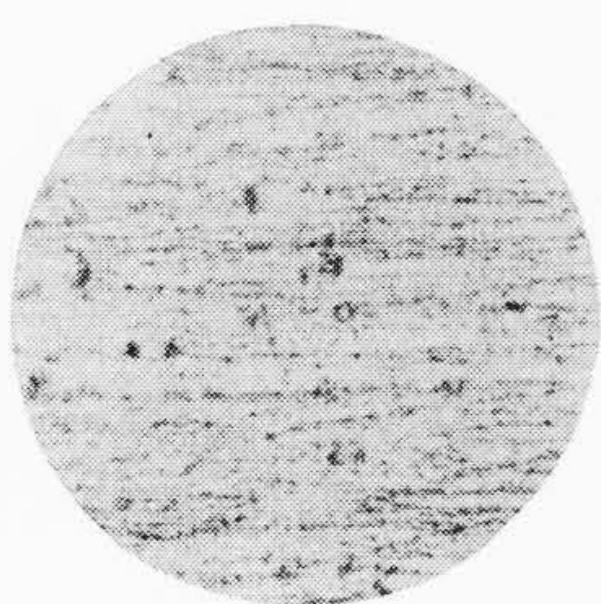
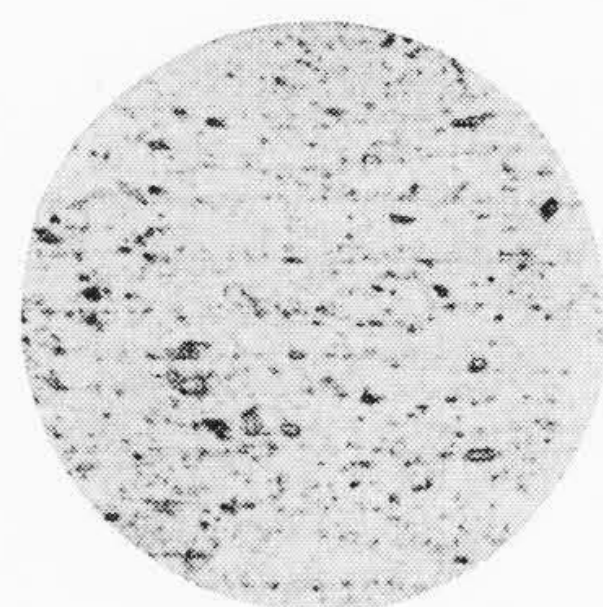
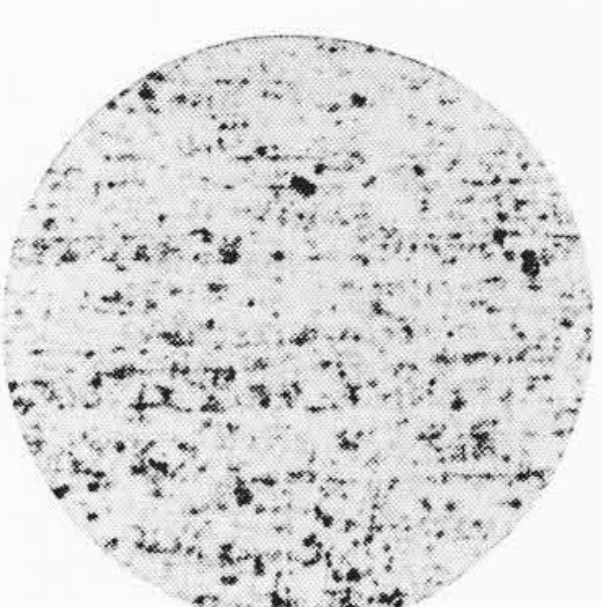
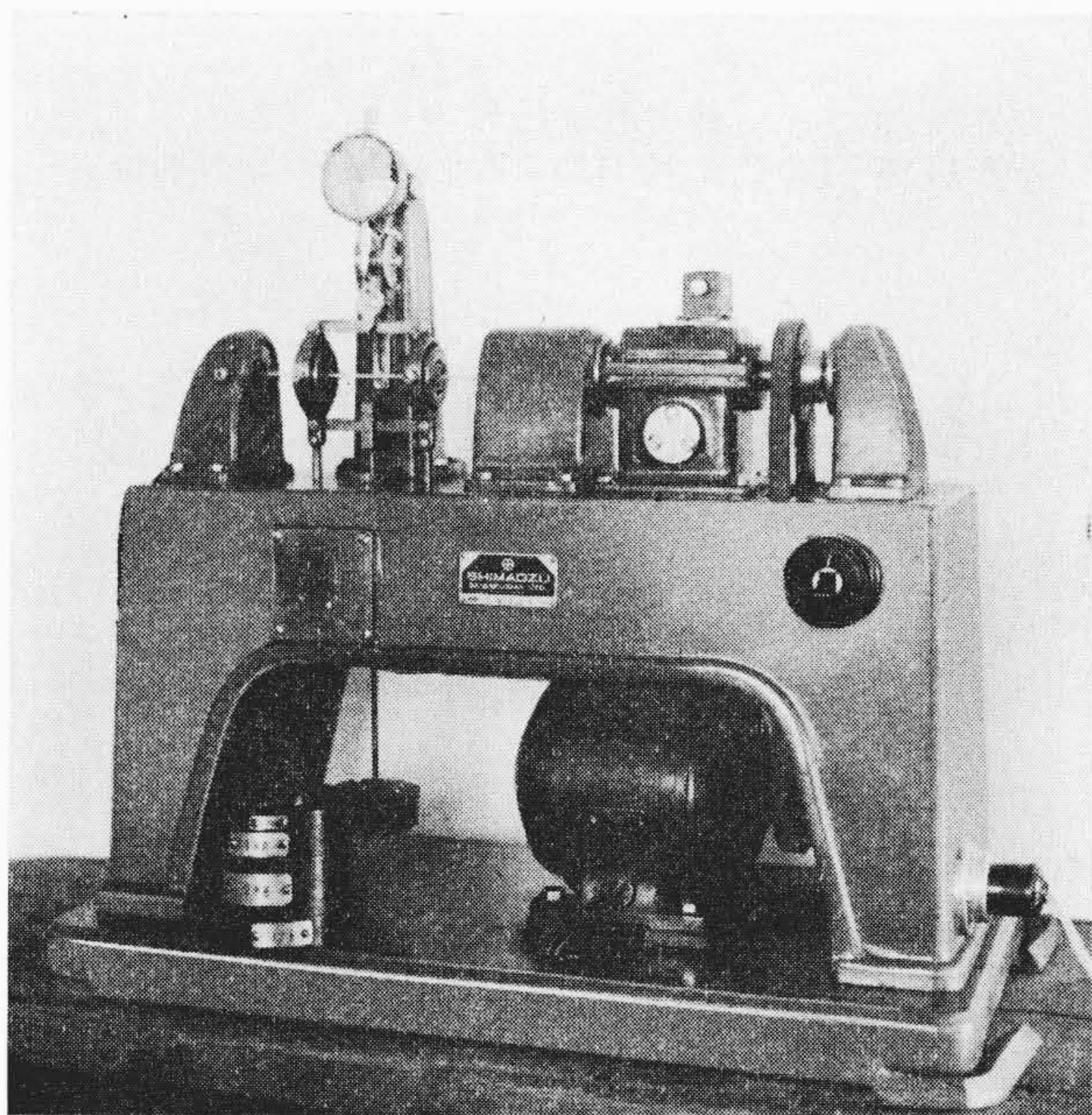
試 番	寸 法 (mmφ)	機 械 的 性 質			
		引張り強さ (kg/mm ²)	降伏強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	か た さ (荷重 200g)
No.1	3.20	19.3	17.0	3.6	44.5
No.2	3.20	27.6	25.5	3.2	78.1
No.3	3.20	35.3	33.4	7.0	99.5
No.4	3.20	34.3	32.0	3.0	92.9



第1図 Al-Mg₂Si擬二元系平衡状態図

ので加工度は96%である。No.3は熱間圧延による16 mmφ荒引線を520℃で1時間溶体化処理後水中焼き入れを行ない、3日間常温時効硬化させたのち8.7 mmφに伸線し、160℃で2時間中間焼戻処理を施し、さらに3.2 mmφに伸線後110℃で2時間焼戻処理を行なったものである。参考として第1図にAl-Mg₂Si擬二元系平衡状態図を示す⁽⁵⁾。

No.2は熱間圧延による16 mmφ荒引線を、No.4は19 mmφ荒引線をおのおの熱処理を施さずに3.2 mmφに伸線したもので加工度はおのおの96%および97%である。

第2図 No. 1の顕微鏡組織
(×400)第3図 No. 2の顕微鏡組織
(×400)第4図 No. 3の顕微鏡組織
(×400)第5図 No. 4の顕微鏡組織
(×400)

第6図 試験機の外観写真

試料の機械的性質を第2表に、試料の縦断面の顕微鏡組織を第2～5図に示す。

2.2 試料の加熱処理

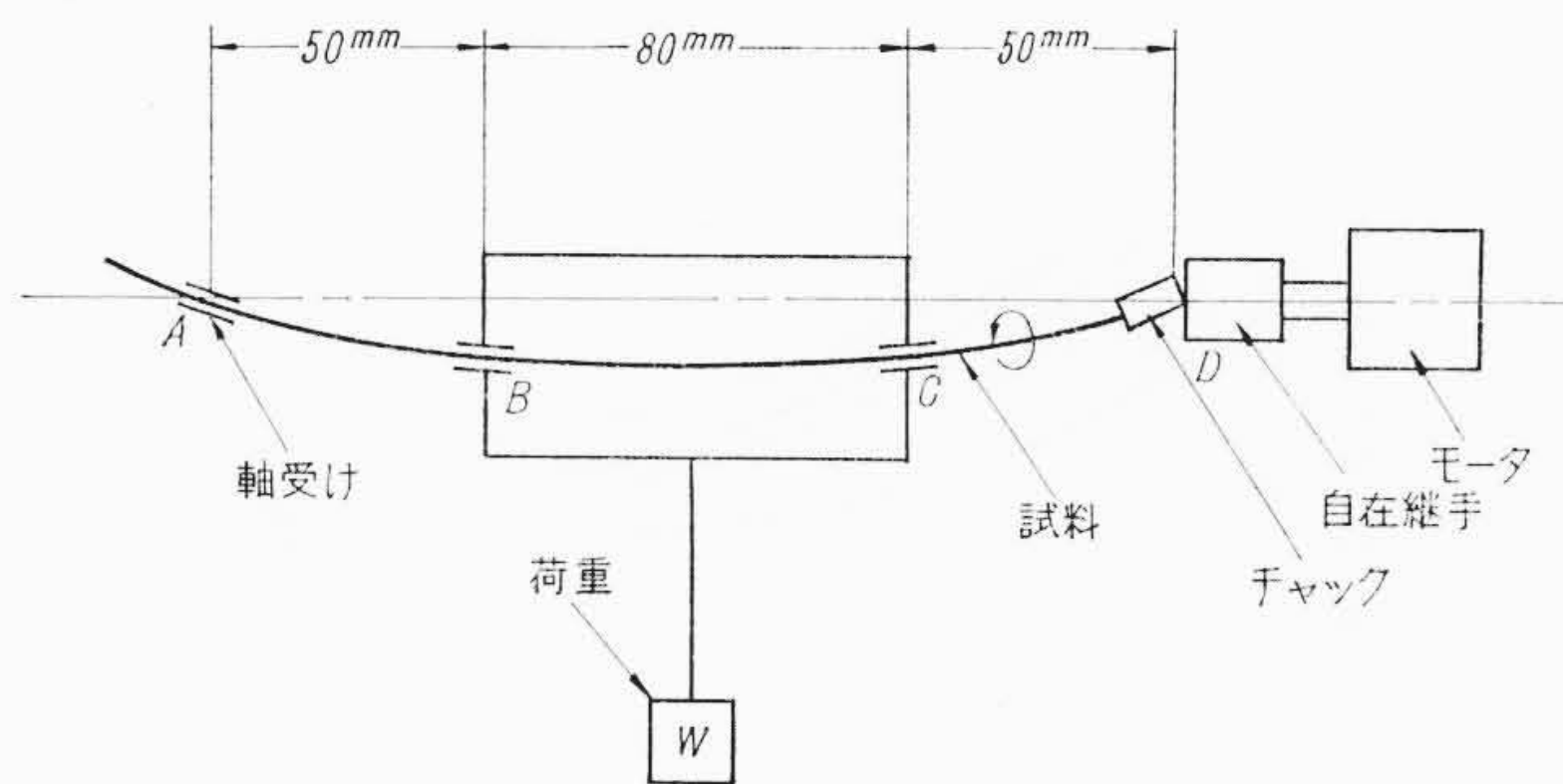
上述の各試料を $100^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ および $120^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ に保持した恒温槽に入れ、空气中で最高60日間にわたり加熱した。試料は加熱開始後1, 3, 5, 10, 30 および60日後に取り出し下記の各試験を行なった。

2.3 疲労試験

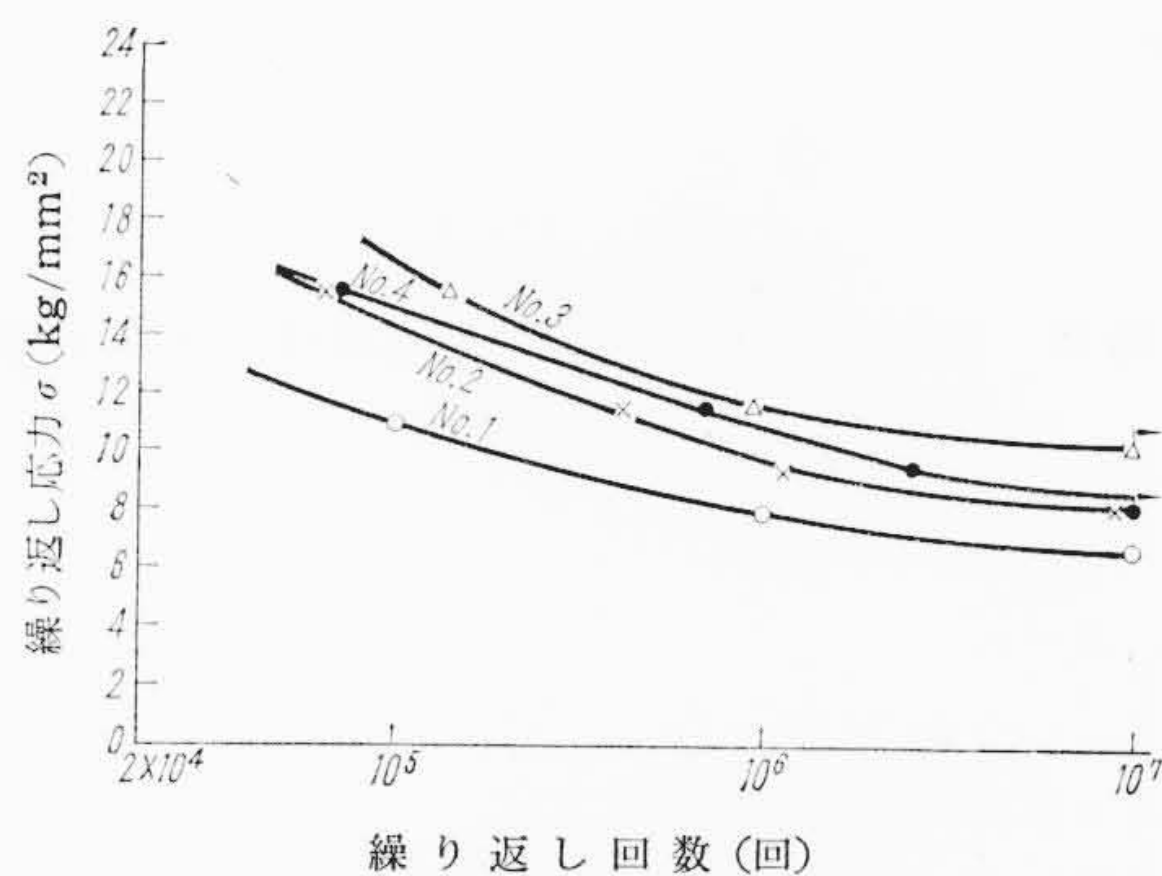
疲労試験はシュビニング式回転曲げ疲労試験機で行なった。第6図に試験機の外観写真を、第7図に負荷機構および試料に加わる曲げモーメント図を示す。

第7図において試験片は両ささえばりとして支持され、中央部(BC間)80mmの区間に均一な曲げモーメントが加わるようになっている。試験片に作用する曲げ応力は次式で算定される。

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{Wa}{2Z}$$



第7図 負荷機構および曲げモーメント図



第8図 供試材のS-N曲線

上式において Z は試験片の断面係数, M は曲げモーメント, W は荷重, a はモーメントの腕の長さすなわち $\overline{AB}$ または $\overline{CD}$ の長さで50mmである。モータの回転数すなわち繰返し速度は毎分1,500回である。

非鉄金属材料においては鋼のように繰返し回数が 10^7 回以下において明瞭な疲労限が現われず、一般に 10^7 回または 2×10^7 回における疲れ強さを限定疲労限(耐久限)としている。本研究においては試験時間の関係から試験は 10^7 回で停止した。以下のS-N線図において縦軸は繰返し応力振幅を、横軸(対数目盛)は破断に至るまでの繰返し回数を示す。

2.4 引張り試験およびかたさ試験

引張り試験は室温においてリーレ式引張り試験機により引張り強さおよび伸びの測定を行なった。試験片寸法は $3.2\text{mm}\phi \times 350\text{mm}$, 標点距離は250mm, 引張り速度は15mm/minである。

かたさ試験はマイクロビッカースかたさ計により線材の表面かたさを測定した。荷重は200gである。

3. 試験結果

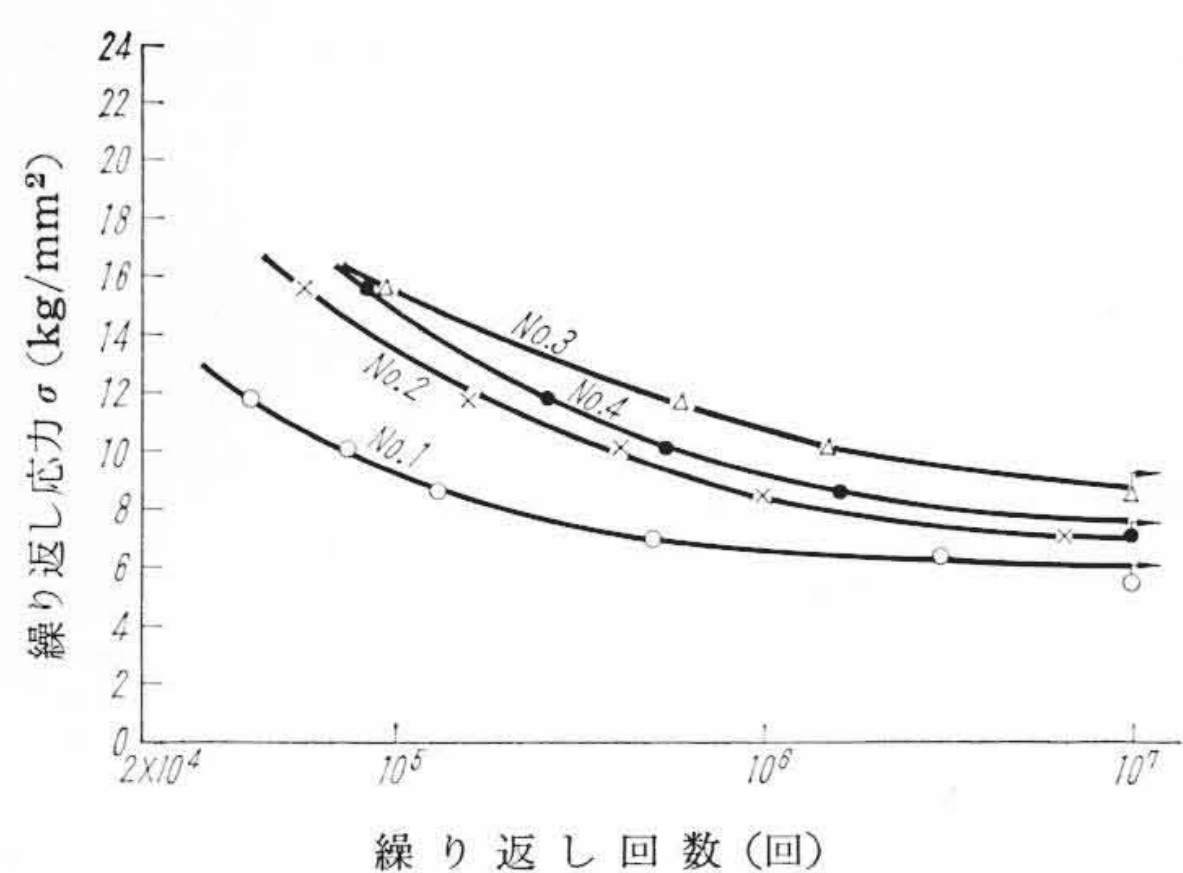
3.1 供試材のS-N曲線

No. 1, 2, 3 および No. 4 の各試料について得たS-N曲線を第8図に示す。

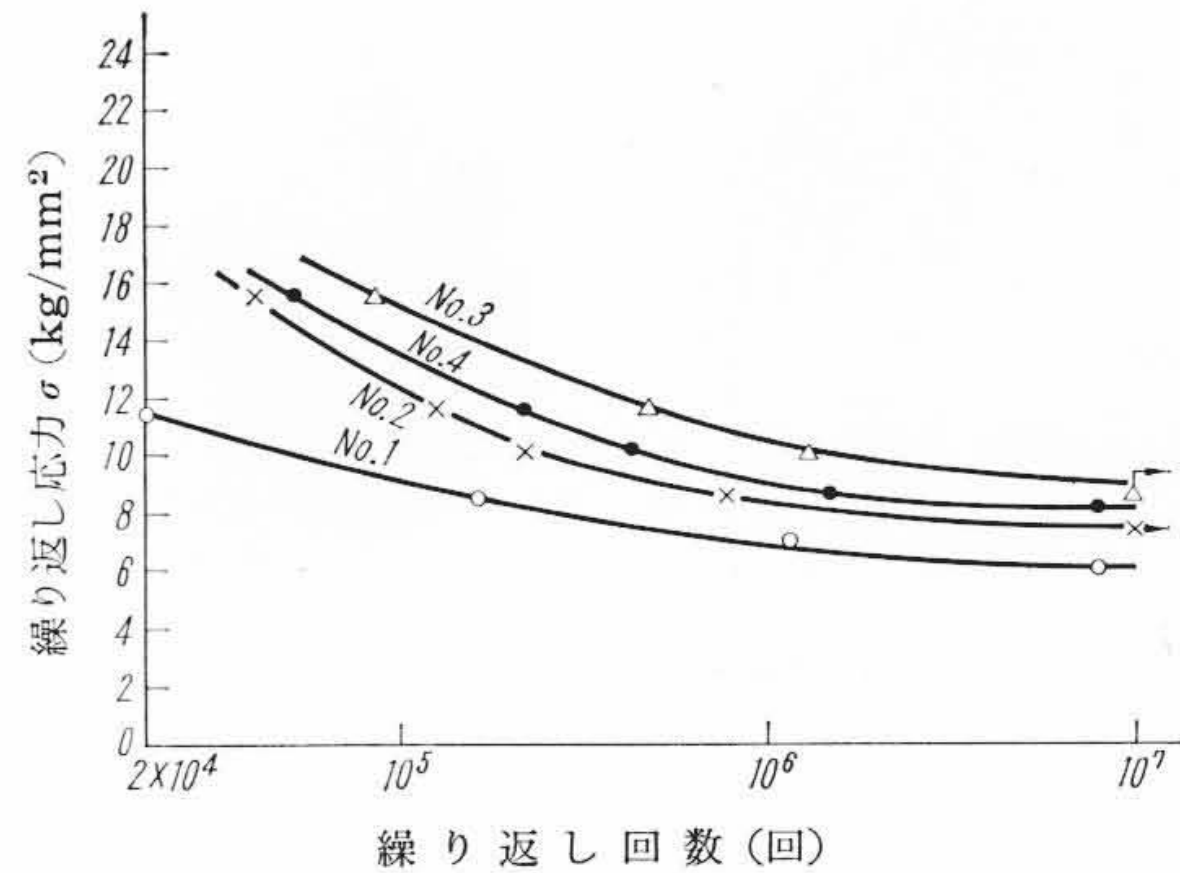
3.2 100°C で加熱した試料のS-N曲線

100°C において5, 10, 30 および60日間加熱処理した試料について得たS-N曲線を第9～12図に示す。

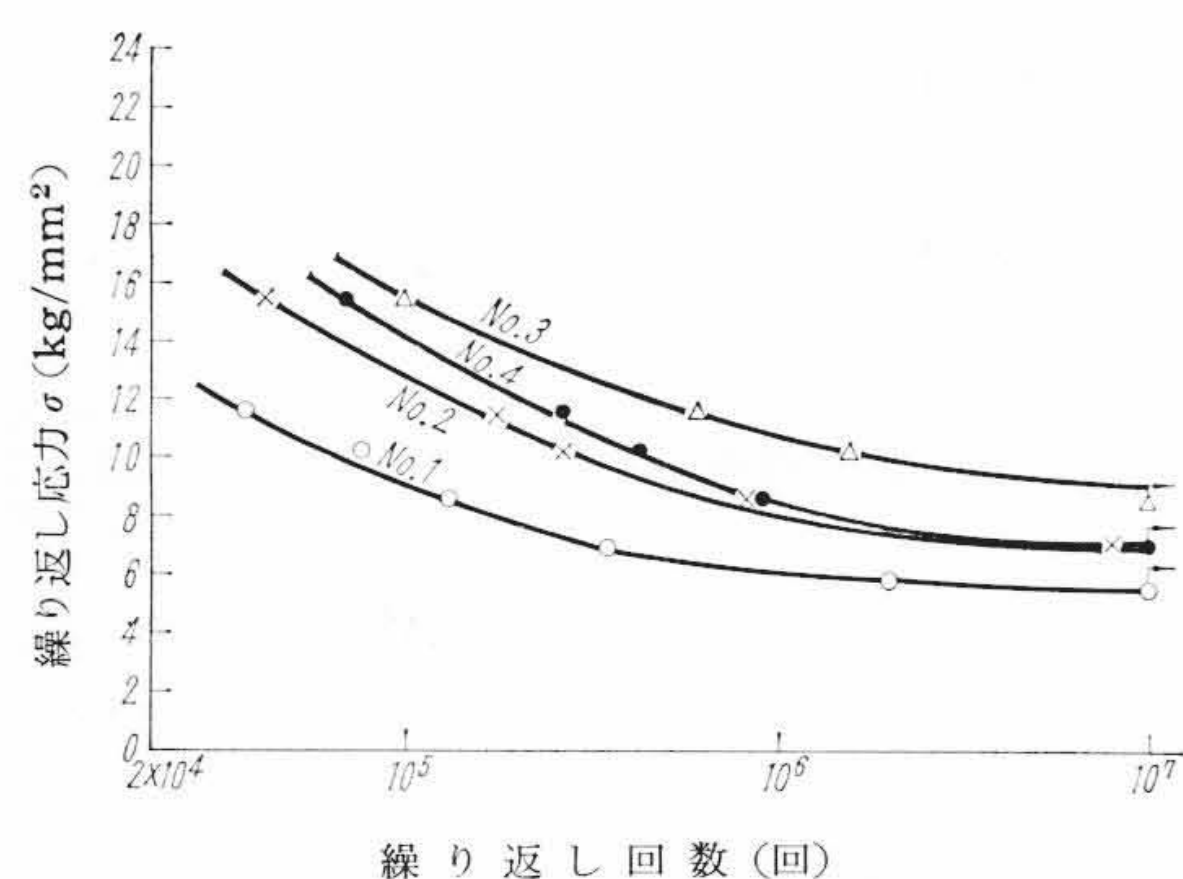
第3表は 100°C で加熱した試料の引張り強さ(σ_B), 伸びおよびか



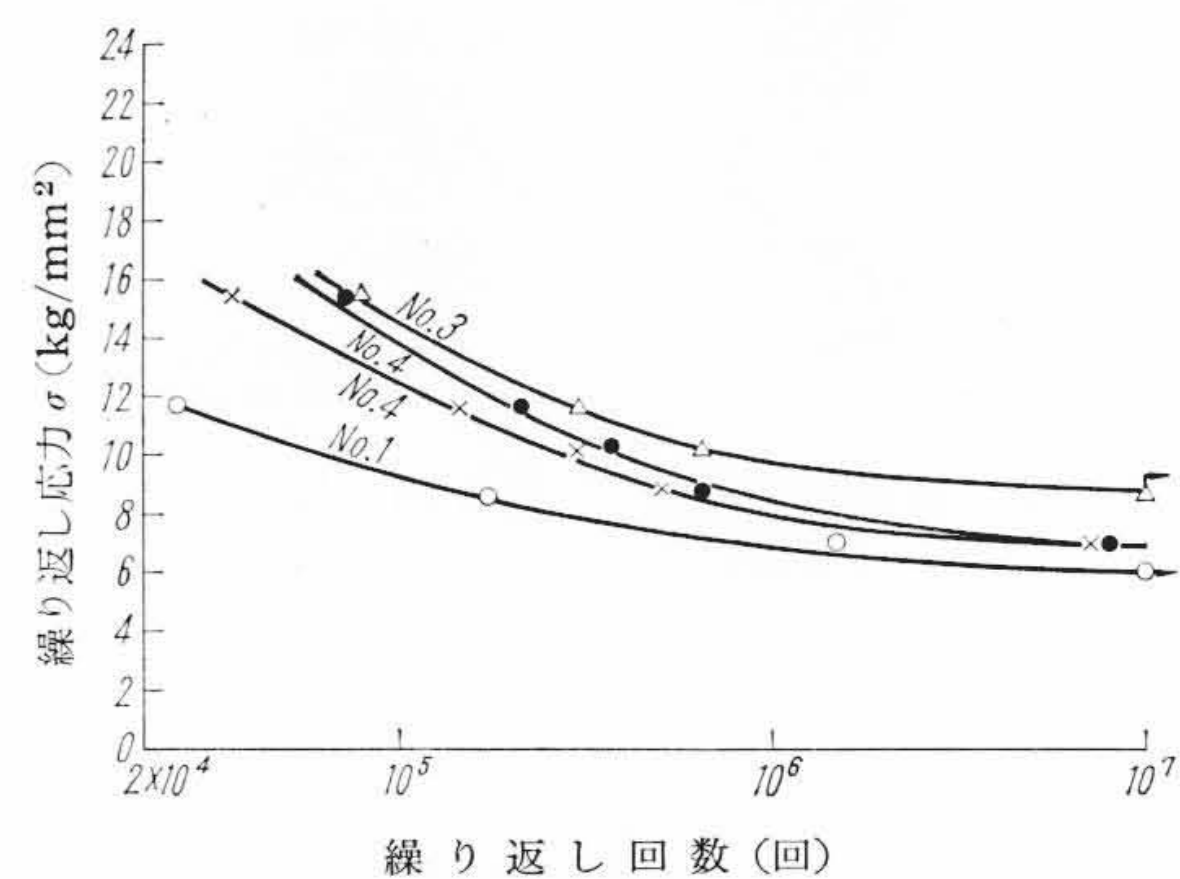
第 9 図 100°C で 5 日間加熱した試料の S-N 曲線



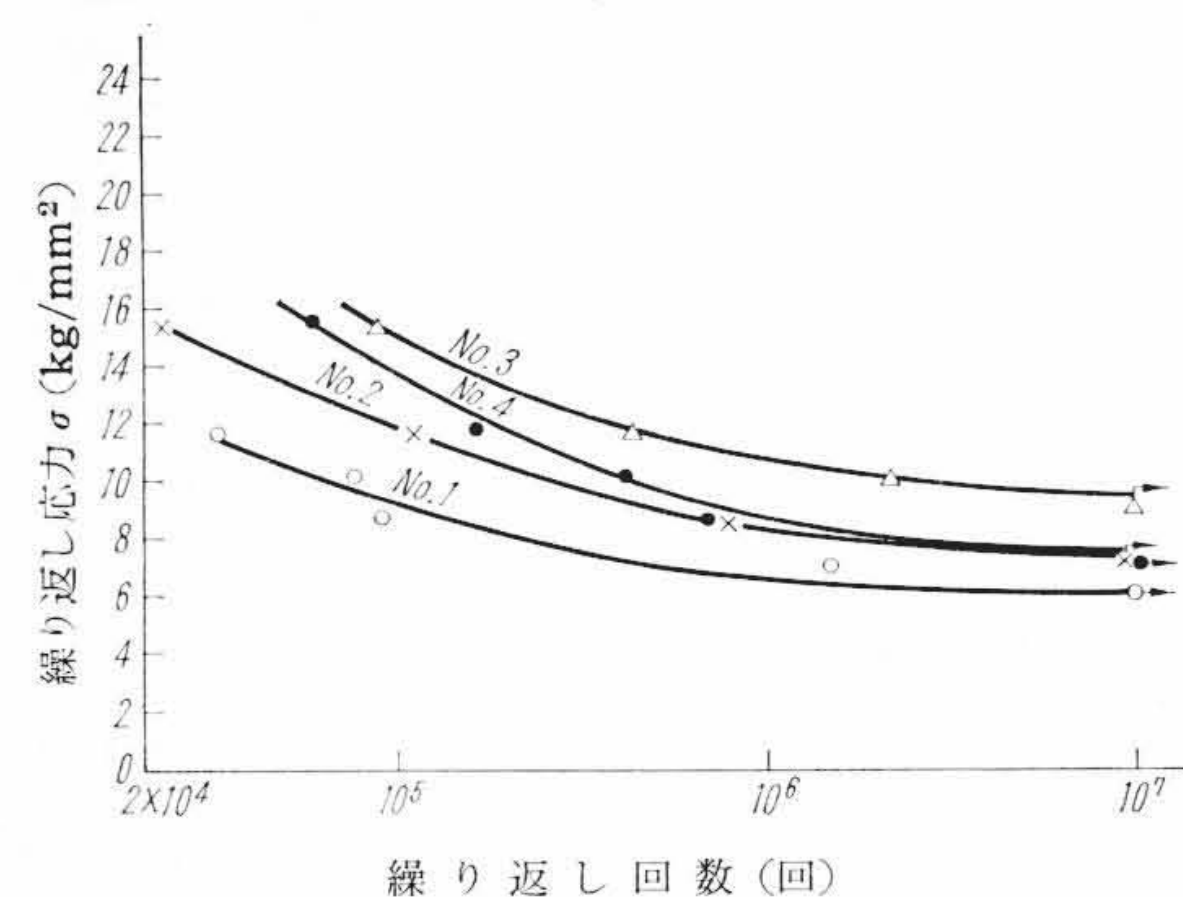
第 13 図 120°C で 5 日間加熱した試料の S-N 曲線



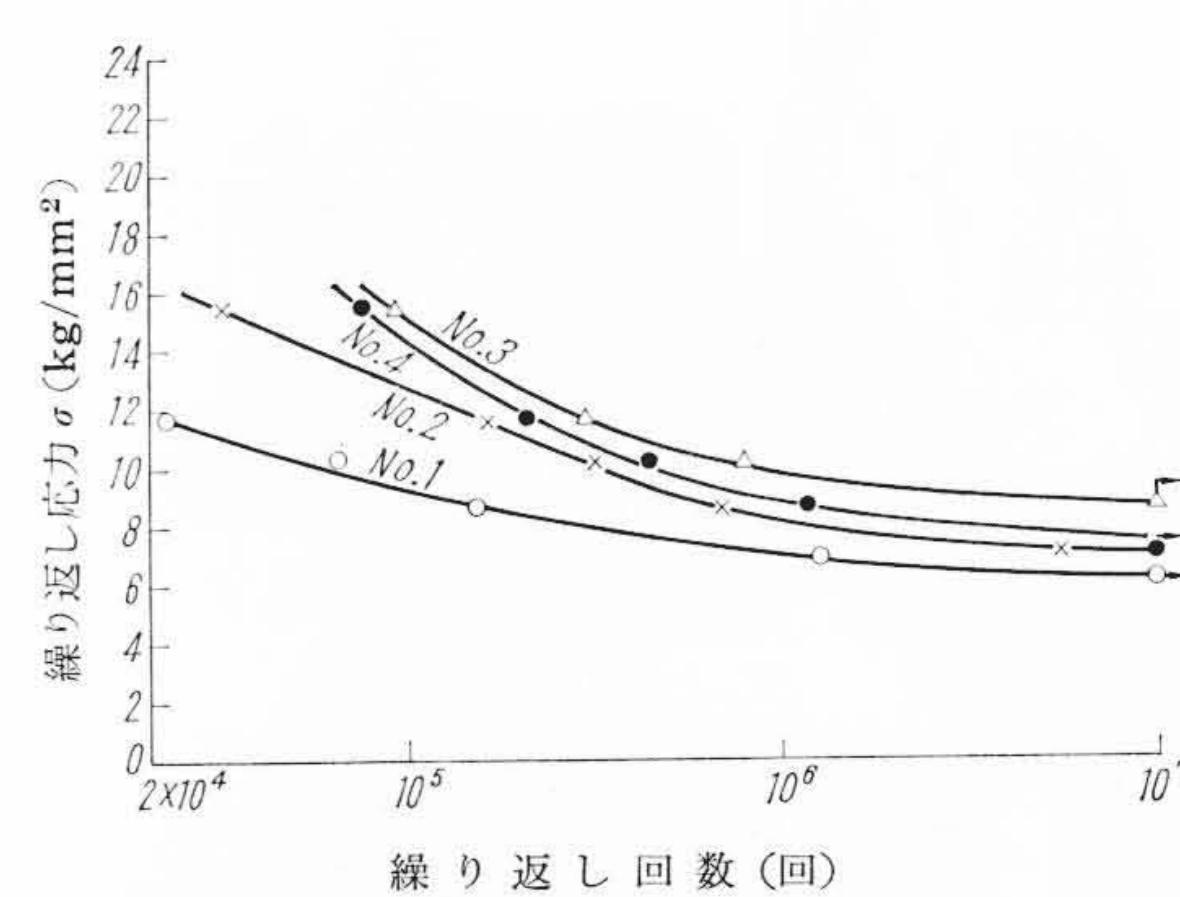
第 10 図 100°C で 10 日間加熱した試料の S-N 曲線



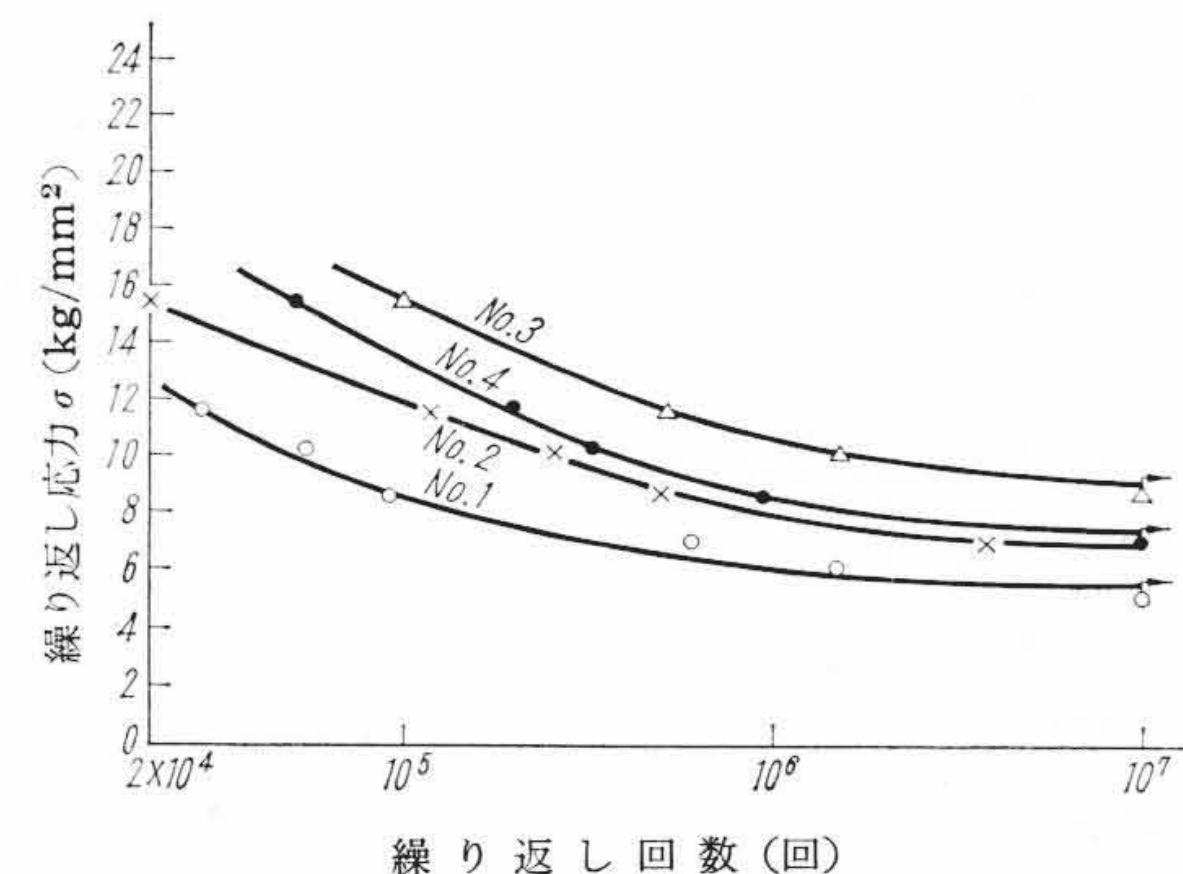
第 14 図 120°C で 10 日間加熱した試料の S-N 曲線



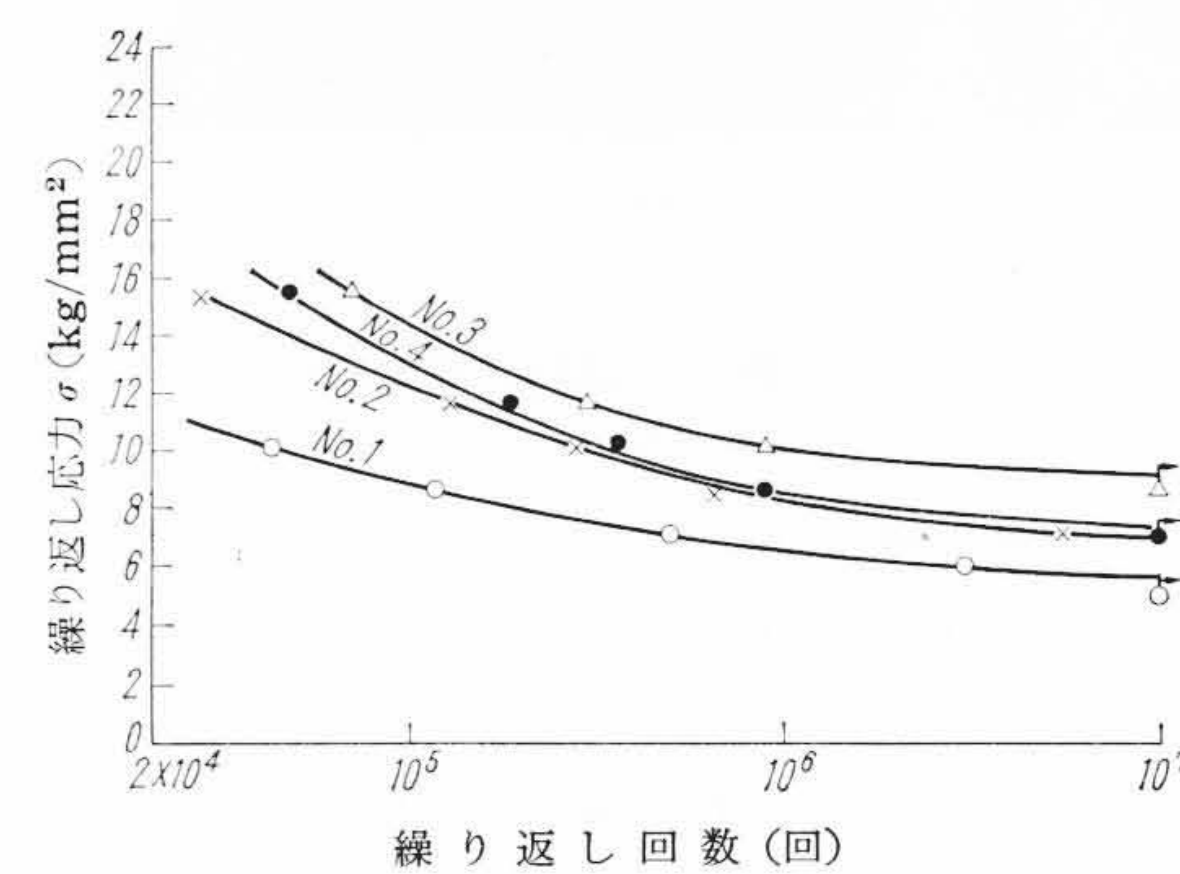
第 11 図 100°C で 30 日間加熱した試料の S-N 曲線



第 15 図 120°C で 30 日間加熱した試料の S-N 曲線



第 12 図 100°C で 60 日間加熱した試料の S-N 曲線



第 16 図 120°C で 60 日間加熱した試料の S-N 曲線

たさを第 5～9 図の S-N 曲線より求めた疲れ強さ (σ_w) ならびに疲労比 (σ_w/σ_B) とともに示す。

3.3 120°C で加熱処理した試料の S-N 曲線

120°C において 5, 10, 30 および 60 日間の加熱処理を施した試料について得た S-N 曲線を第 13～16 図に示す。

第 4 表は 120°C で加熱処理した試料の引張り強さ、伸びおよびかたさを第 13～16 図の S-N 曲線より求めた疲れ強さならびに疲労比とともに示す。

4. 検 討

4.1 供試材の疲れ強さ

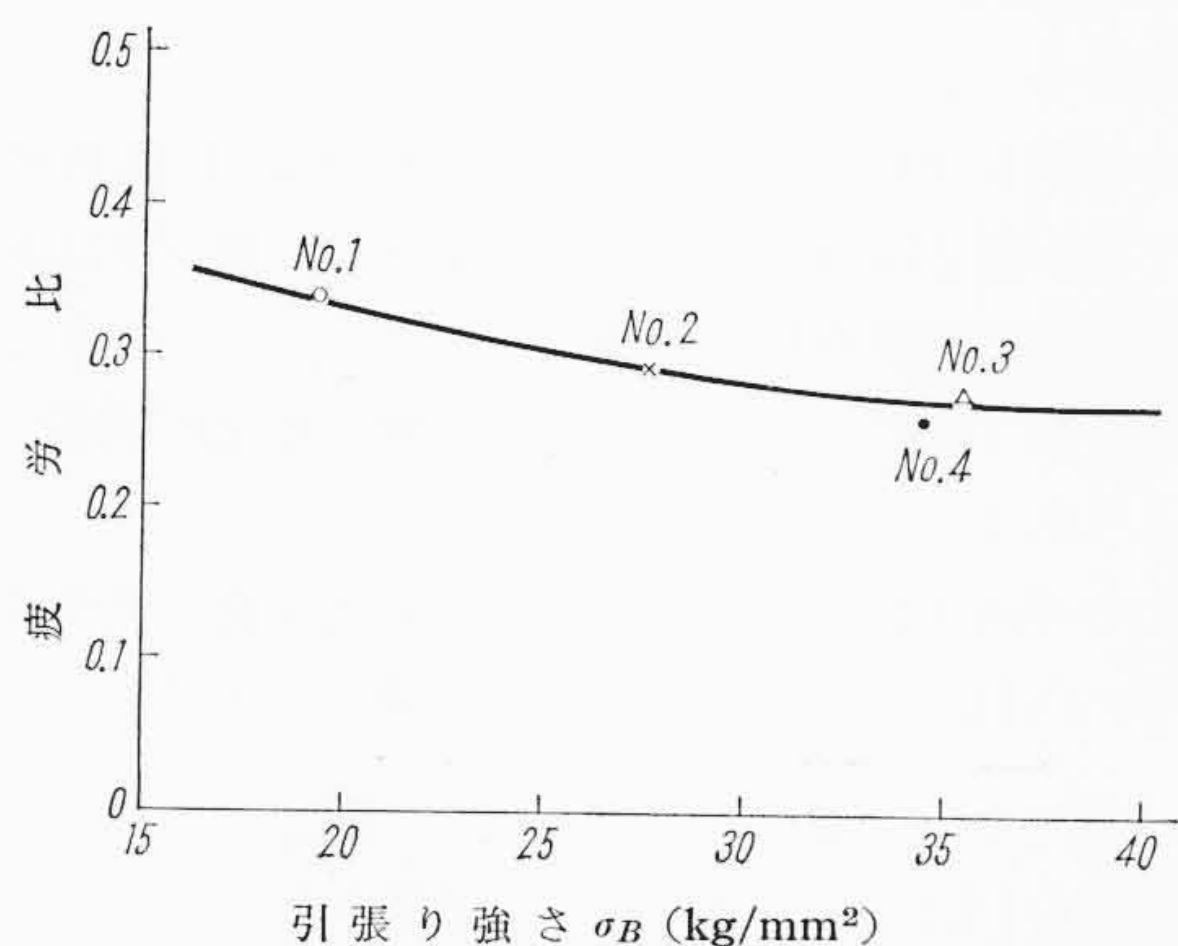
供試材の疲れ強さは第 8 図に示すように、No. 3 ($\sigma_w=10.0$ kg/mm², $\sigma_B=35.3$ kg/mm²), No. 4 ($\sigma_w=9.0$ kg/mm², $\sigma_B=34.3$ kg/mm²), No. 2 ($\sigma_w=8.0$ kg/mm², $\sigma_B=27.6$ kg/mm²) および No. 1 ($\sigma_w=6.5$ kg/mm², $\sigma_B=19.3$ kg/mm²) の順に低下し、引張り強さの大きいものほど疲れ強さも大きい。

第3表 100°Cで加熱した場合の機械的性質

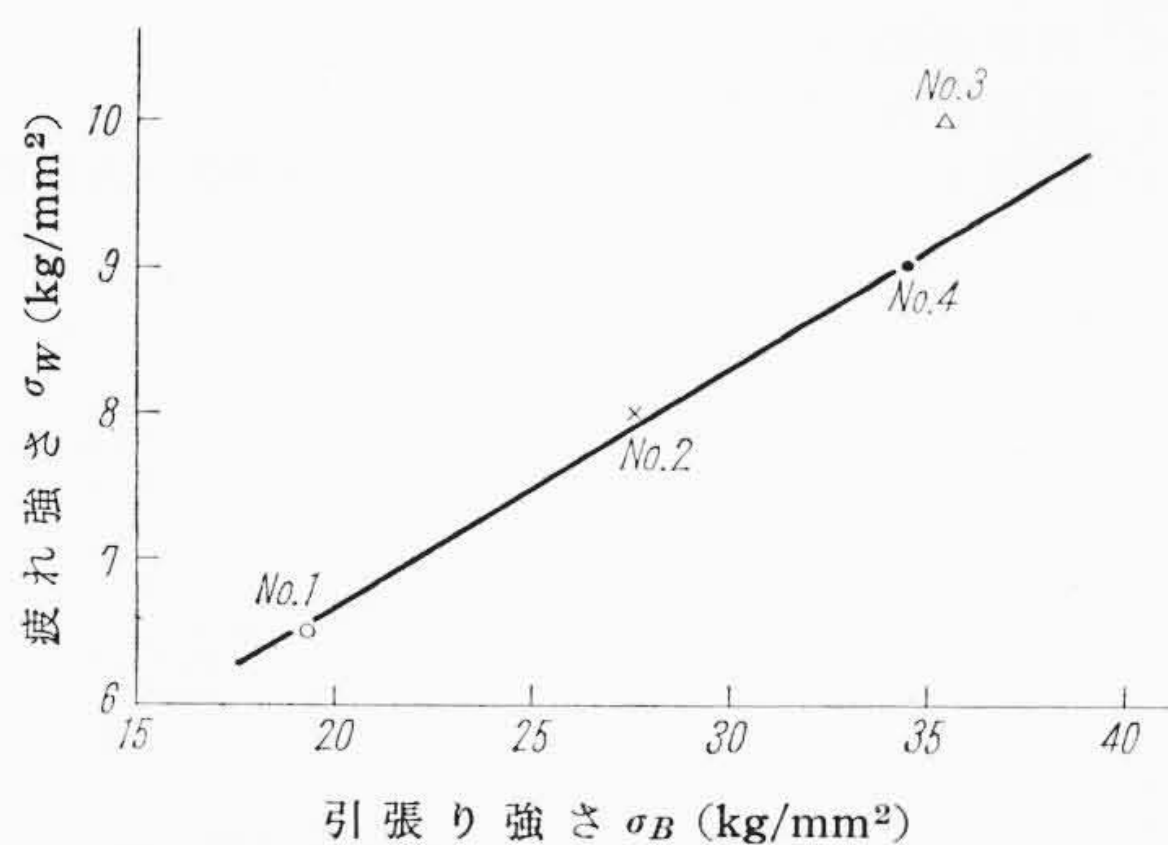
試料	加熱日数	引張り強さ σ_B (kg/mm ²)	伸び δ (%)	かたさ H_V (荷重 200g)	疲れ強さ σ_W (kg/mm ²)	疲労比 σ_W/σ_B
No.1	0	19.3	3.6	44.5	6.5	0.34
	1	17.4	4.0	38.6	6.0	0.35
	3	17.1	3.6	38.0	6.0	0.35
	5	17.0	3.0	38.6	6.0	0.35
	10	17.1	3.0	40.5	5.5	0.32
	30	16.2	3.0	41.3	6.0	0.37
	60	16.4	3.0	38.2	5.5	0.34
No.2	0	27.6	3.2	78.1	8.0	0.29
	1	23.8	7.2	66.3	8.0	0.34
	3	23.1	7.6	65.7	8.0	0.35
	5	23.1	7.8	63.0	7.0	0.30
	10	23.0	8.1	64.7	7.0	0.30
	30	22.0	7.1	63.0	7.0	0.32
	60	21.9	4.2	54.0	7.0	0.32
No.3	0	35.3	7.0	99.5	10.0	0.28
	1	34.8	8.3	101.7	10.0	0.29
	3	34.5	8.0	101.1	9.0	0.26
	5	34.7	7.3	107.6	9.0	0.26
	10	34.2	7.1	108.0	9.0	0.26
	30	32.8	6.1	87.5	9.0	0.27
	60	32.5	5.5	63.2	9.0	0.28
No.4	0	34.3	2.6	92.9	9.0	0.26
	1	35.6	8.0	85.5	8.0	0.25
	3	31.1	8.1	82.0	7.5	0.24
	5	30.5	7.0	92.1	7.5	0.25
	10	29.8	6.3	84.5	7.0	0.24
	30	27.7	5.0	69.9	7.0	0.25
	60	27.0	4.8	60.0	7.0	0.26

第4表 120°Cで加熱した場合の機械的性質

試料	加熱日数	引張り強さ σ_B (kg/mm ²)	伸び δ (%)	かたさ H_V (荷重 200g)	疲れ強さ σ_W (kg/mm ²)	疲労比 σ_W/σ_B
No.1	0	19.3	3.6	44.5	6.5	0.34
	1	15.4	2.5	41.0	6.0	0.39
	3	14.5	2.0	38.5	6.0	0.41
	5	14.4	2.5	37.8	6.0	0.42
	10	15.0	2.0	36.6	6.0	0.40
	30	14.6	2.2	36.5	6.0	0.41
	60	14.2	2.0	35.0	5.5	0.39
No.2	0	27.6	3.2	78.1	8.0	0.29
	1	24.0	5.1	66.1	7.5	0.31
	3	23.5	6.4	68.8	7.5	0.32
	5	23.5	5.1	69.2	7.5	0.32
	10	23.0	6.6	64.3	7.0	0.30
	30	21.5	3.6	57.8	7.0	0.33
	60	21.0	3.1	55.8	7.0	0.33
No.3	0	35.3	7.0	99.5	10.0	0.28
	1	34.9	7.6	97.8	9.0	0.26
	3	34.3	7.6	95.4	9.0	0.26
	5	34.1	7.9	93.8	9.0	0.26
	10	32.8	6.9	90.2	9.0	0.27
	30	31.1	5.0	83.5	9.0	0.29
	60	31.1	2.9	79.5	9.0	0.29
No.4	0	34.3	2.6	92.9	9.0	0.26
	1	31.3	7.0	84.1	8.0	0.26
	3	31.1	7.0	88.9	8.0	0.26
	5	30.6	7.1	73.1	8.0	0.26
	10	30.7	7.1	87.2	7.0	0.23
	30	28.7	4.7	76.8	7.0	0.24
	60	28.5	2.3	66.3	7.0	0.25



第17図 疲労比と引張り強さとの関係

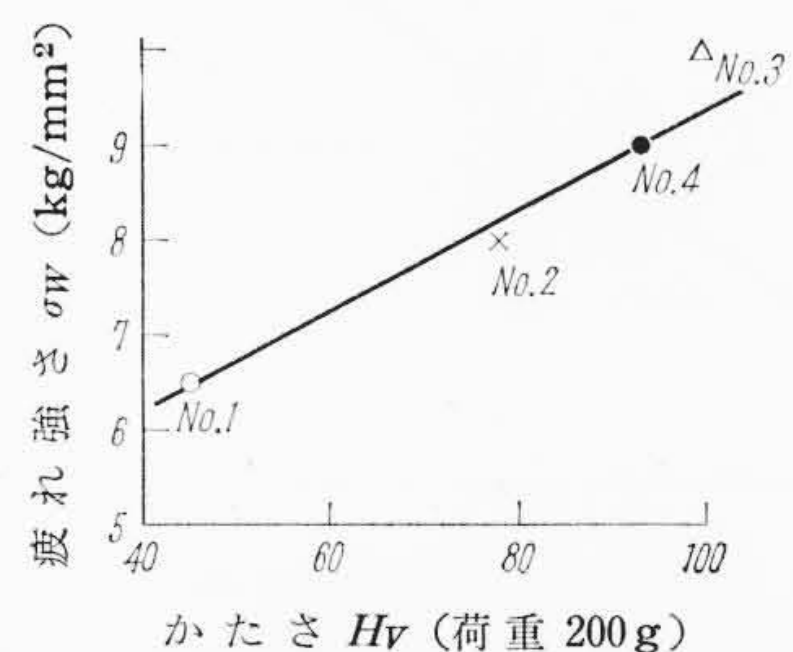


第18図 疲れ強さと引張り強さとの関係

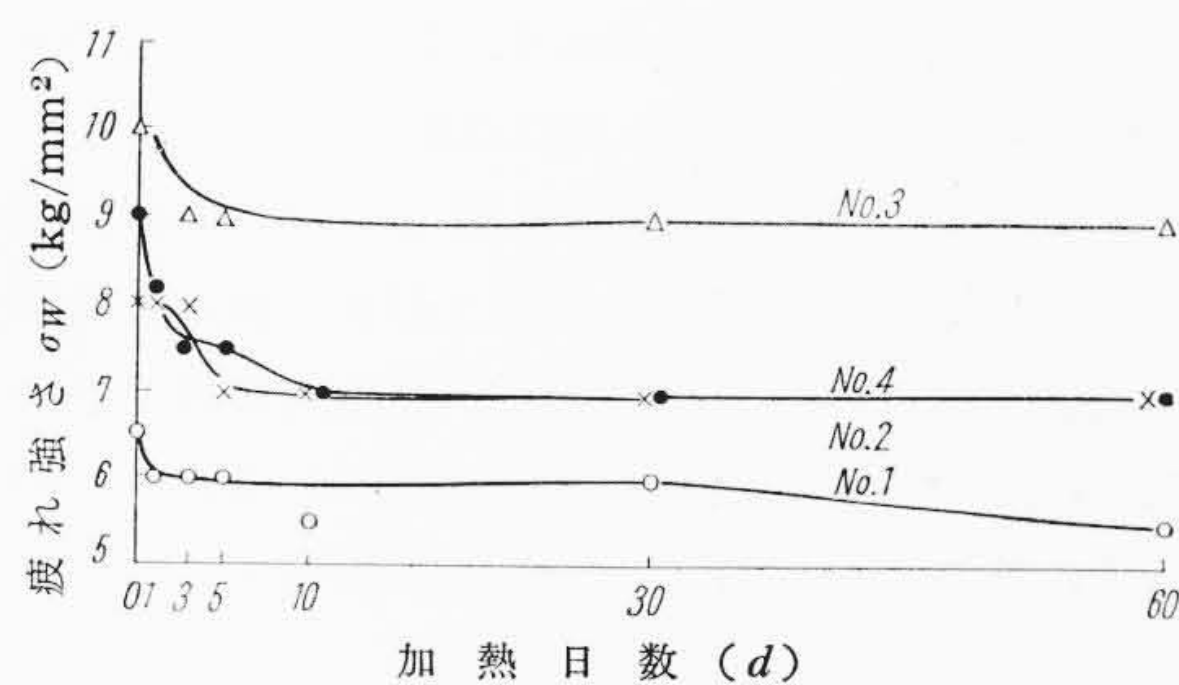
4.2 疲れ強さと静的強さとの関係

疲労比 (σ_W/σ_B) は第17図に示すように引張り強さの比較的高いところ (No. 3およびNo. 4) で一定となりその値は0.27である。引張り強さの比較的低いところ (No. 1) ではこの比はやや高くなり0.4に近づく。

次に疲れ強さと引張り強さおよび表面かたさとの関係を第18図ならびに第19図に示す。いずれの場合にもほぼ直線的関係が存在



第19図 疲れ強さと表面硬さとの関係



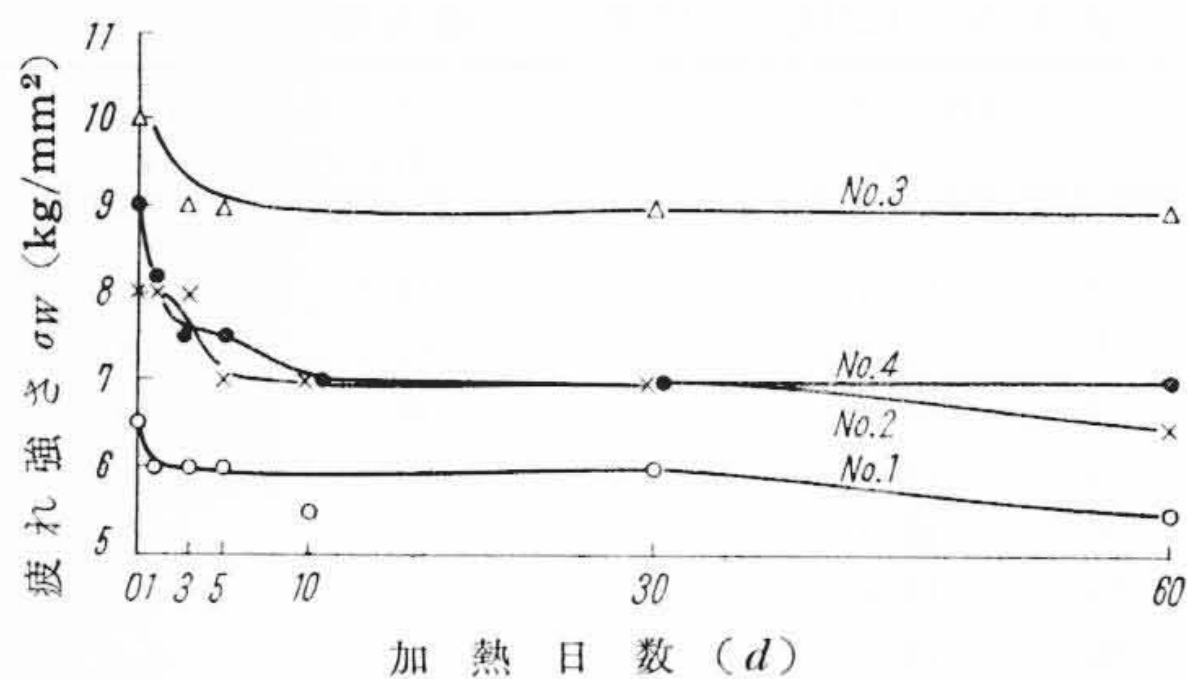
第20図 100°Cで加熱した場合の疲れ強さの変化

し、これらの関係よりアルミニウムおよびアルミニウム合金線の繰返し数 10^7 回における疲れ強さをある程度推定することができると思われる。

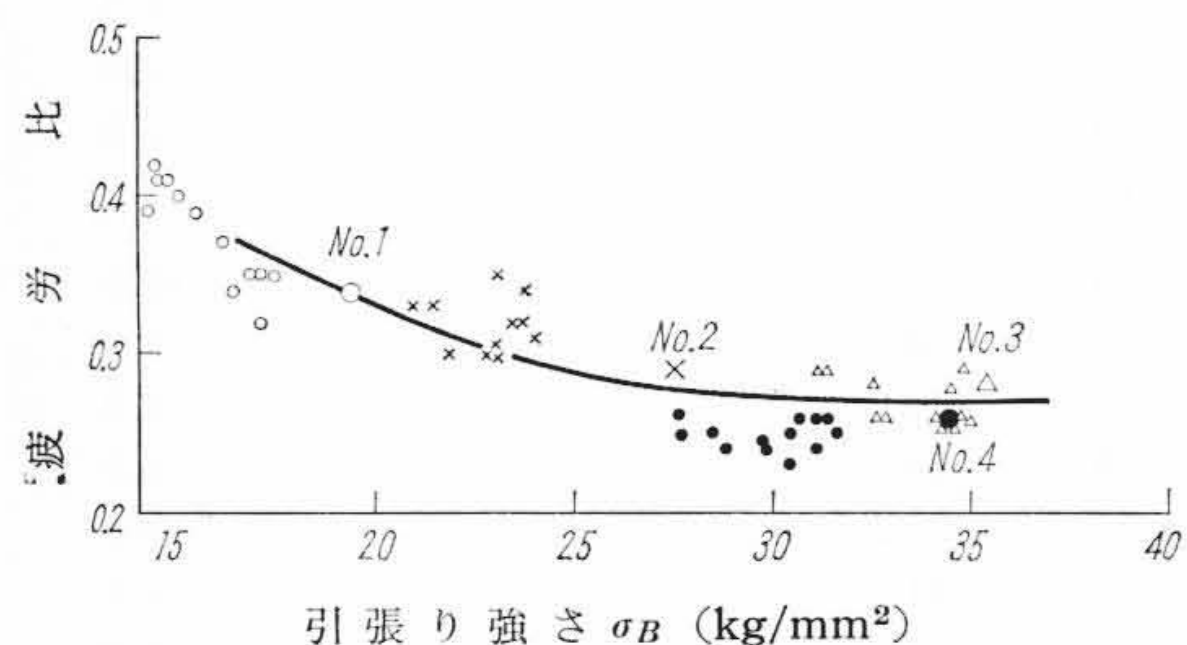
4.3 100°Cおよび120°Cにおける長時間加熱による疲れ強さの変化

各試料について得た疲れ強さと加熱回数との関係を第20図および第21図に示す。

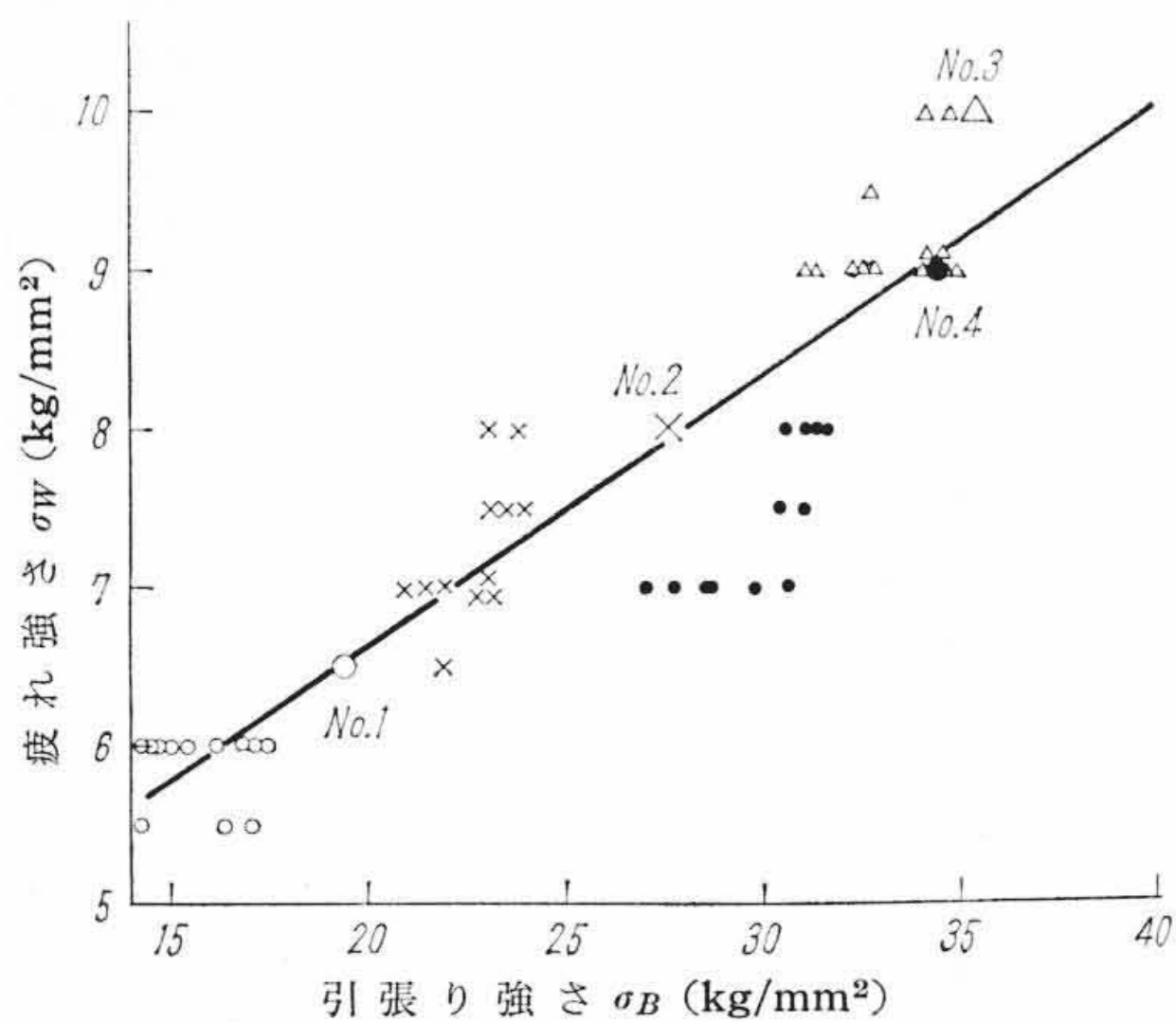
長時間加熱による疲れ強さの変化については、100°Cで加熱した場合と120°Cで加熱した場合で顕著な差は認められない。いずれの場合も60日間の加熱処理によって疲れ強さはNo. 4が2 kg/mm² (22%), No. 1が1 kg/mm² (15%), No. 2が1 kg/mm² (13%) およびNo. 3が1 kg/mm² (10%) の低下を示している。低下率は加



第 21 図 120°C で加熱した場合の疲れ強さの変化



第 22 図 疲労比と引張り強さとの関係



第 23 図 疲れ強さと引張り強さとの関係

工度の大きい加工硬化形合金線 No. 4 が最大で No. 2, No. 1 がこれにつぎ析出時効硬化形合金線 No. 3 は比較的小さい。

100~120°C において長時間加熱処理した場合の疲れ強さの低下が、析出時効硬化形合金線より加工硬化形合金線のほうが比較的大きいのは、前者では加熱により当然析出物の凝集粗大化の傾向があり、疲れ強さに悪い影響を及ぼすものと思われるが、この影響よりも後者が前者に比べて軟化しやすいことに帰因するものと考えられ

る。

第 22 図および第 23 図に 100°C および 120°C において加熱処理した試料について得た疲れ強さと静的強さとの関係を示す。図中、大きい記号は加工材について得た値を示すものである。長時間の加熱処理によって加工材の場合の直線的関係よりはずれる傾向がみられ、これは加工硬化形合金線について顕著である。第 22 図および第 23 図にみられるように No. 4 は長時間加熱によって疲労比がやや低下する傾向がみられる。

5. 結 言

3.2 mmφ の普通品位アルミニウム線、析出時効硬化形合金 (アルドライ) 線および加工硬化形合金線二種について回転曲げ疲労試験を行ない、S-N 線図を求め疲労強度を検討した。また各試料について 100°C および 120°C の温度で最高 60 日間にわたる長時間の加熱処理によって起きる疲れ強さの変化を調べた。

以下得られた結果を要約すると

- (1) 繰返し数 10^7 回における疲れ強さは普通品位アルミニウム線が 6.5 kg/mm^2 、加工硬化形合金線が $8 \sim 9 \text{ kg/mm}^2$ および析出時効硬化形合金 (アルドライ) 線が 10 kg/mm^2 で引張り強さの大きいものほど疲れ強さも大きい。
- (2) 疲れ強さと引張り強さの比すなわち疲労比は一定値 (0.27) を示し、引張り強さの比較的低いところではこの値は 0.4 に近づく。
- (3) 疲れ強さと引張り強さおよび表面かたさとの間には、いずれもほぼ直線的関係が存在し、これらの関係から疲れ強さをある程度推定することができる。
- (4) 各試料を 100°C および 120°C で 60 日間加熱処理することによって疲れ強さは $1 \sim 2 \text{ kg/mm}^2$ 低下し、低下率は加工硬化形合金線が析出時効硬化形合金線よりやや大きい。これは長時間加熱によって加工硬化形合金線の場合比較的軟化が顕著に起きるためと考えられる。

終わりにのぞみ実験に協力くださった万代主任、川西主任ほか関係者各位特に田村、平野両氏に深じんの謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 日立 24 (2), 13 (1962, 日立評論社)
- (2) 川西: 日立評論 42, 76 (昭 35-8)
- (3) 山路, 柿崎, 川西: 日立評論 別 43, 33 (昭 36-6)
- (4) 山路: 日本金属学会誌 1 (3), 206 (1962)
- (5) 川西: 日立評論 41, 77 (昭 34-5)
- (6) 川西: 日立評論 別 35, 20 (昭 35-5)
- (7) 大和: 電線ケーブルハンドブック 63 (1959, 山海堂)