

林業用鋼索の疲労に関する研究 第2報

主索に関する疲労試験

上 田 実⁽¹⁾
斎 藤 敏 彦⁽²⁾
柴 田 順 一⁽³⁾

目 次

まえがき	2
1. 主索の疲労試験	3
1.1 緒 言	3
1.2 R. WOERNLE の試験結果に対する考察	3
1.2.1 第1図に対する考察	4
1.2.2 主索領域に関する $S-N$ 曲線	5
1.2.3 輪荷重 1800 kg に関する $S-N$ 曲線	6
1.2.4 各輪荷重の寿命が最低となる引張応力の関係式	6
1.2.5 検 討 結 果	8
1.3 6×7 16 mm の疲労試験	8
1.3.1 試 験 装 置	8
1.3.2 試 験 条 件	8
1.3.3 試験実施要領	10
1.3.4 試 験 結 果	10
1.3.5 考 察	10
1.3.6 結 言	35
2. ワイヤロープの各社性能比較試験	35
2.1 緒 言	35
2.2 試 験 方 法	36
2.2.1 供試ロープ	36
2.2.2 試 験 期 間	36
2.2.3 試 験 条 件	36
2.2.4 疲労試験実施要領	36
2.2.5 素 線 検 査	36
2.2.6 ワイヤロープの検査	37
2.3 試験ならびに検査結果	37
2.3.1 疲労試験結果	37
2.3.2 製 品 検 査	38
2.3.3 疲労試験後の残留強度	38
2.3.4 金属顕微鏡による素線検査	40
2.3.5 素線の表面はだ	40
2.4 考 察	40

(1) 機械化部機械科機械第一研究室長

(2)(3) 機械化部機械科機械第一研究室

2.4.1 素線断線の発生状態と寿命	40
2.4.2 ロープのエネルギー	46
2.4.3 各種要因と寿命百分率との関係	46
2.5 結 言	54
文 献	54
Résumé	55
付録 1—1〜3	57
付 録 2	65
付 録 3	69
付 録 4	70

ま え が き

林業用鋼索の疲労に関する研究は、その第一段階として作業索のようにシーブに巻きついた状態で曲げを受ける場合の鋼索（以下ロープと呼ぶ）の疲労現象を追求し、これを第1報に報告した。このときの供試ロープは 6×19 10 mm である。

これに対して主索の場合はロープの構成が主として 6×7 であること、直径が 16 mm 以上 30 mm ぐらいになるので素線径が太くなること、さらにロープのより方がほとんどラングよりであるため素線相互の接触状態が 6×19 の場合とかなり相違していること、また応力についても作業索より引張応力がかなり高い反面、作業索のように完全にシーブに巻きついたような曲げはあまり受けないので曲げ応力は作業索ほど高くないが、そのかわり走行車輪から受ける接触圧力はきわめて高いなど、多くの点で相違点がある。

しかして主索に関する疲労試験は国内はもちろん外国においても、その例は少なく、約40年前ドイツにおいて R. WOERNLE が V. D. I に発表したグラフが唯一のようである。したがって研究を進めるにあたって、つぎのような計画をたてた。

- 1) R. WOERNLE の試験結果から $S-N$ 曲線を求める手法を探索し、適切な実験計画をたてる。
- 2) 林業でもっとも多く使われている 6×7 C/L 裸 A 種のロープについて基礎試験を行ない、前項について検討する。
- 3) 作業索の場合に行なったと同じように、10数社の製品について疲労試験を行ない、耐疲労性に関する要因を探索する。
- 4) 前項によって浮かびあがった要因をさらに確証するため、製造条件を整え、特定の因子だけを変えたロープの比較試験をおこない、その要因の影響を求める。

本報告は、以上掲げた 1)〜3) 項についてまとめたもので、4) 項まで試験が完了するには今後 1〜2 年ほどかかりそうであり、これまでの試験成果のなかにも実際面でかなり参考になる情報が得られたので報告するしだいである。

なお、本研究を推進するにあたって、試験機の試作あるいは試験結果の検討などに林業試験場機械化部長米田幸武氏に多くの助言と協力を得た。また基礎試験の段階においては元機械研究室員石橋泰彦技官に多大の労をわずらわした。さらに本試験は約3年にわたって行なわれ、その間多くの専門家の意見を拝聴した。とくに $S-N$ 曲線に関しては東京大学工学部助教授工学博士岡村弘之氏に多くの助言を得、また試験結果の考察で防衛大学教授本多三雄氏から多くの教示を得た。ここに記して深甚の謝意を表する。

1. 主索の疲労試験

1.1 緒 言

主索として使用される場合のロープの研究は、疲労・摩耗を中心に多くの未解決な問題を抱えている。従来主索の設計にあたっては輪圧張力比がある範囲のうちで選び、これをもとにして計算されていた⁹⁾。これが提唱された根拠は ISAACHSEN の曲げ応力式による。すなわち ISAACHSEN の式は、後で示すように曲げ応力が引張応力の平方根に反比例するという式であるから、引張応力の低いところでは曲げ応力は高い値をとるが、引張応力が高くなると曲げ応力は低下していくことになる。この両者の和をしらべてみると、ある引張応力のところで最小値を持つことがわかるが、従来はこの点を重視して、応力最小の場合が最適の使用条件と考えられてきた。

これに対して、材料試験ですでに判明している疲れ限度線図の考え方を利用した提案がある¹⁰⁾。鋼材の疲れ限度は普通抗張力の20~30%であるから、これにならってロープの疲れ限度線図を描き、この範囲内にロープの曲げによる応力振幅をとろうとする考え方である。任意の平均応力のときの応力振幅は疲れ限度線図より求められるから、この値に対して使用条件に応じた応力振幅を ISAACHSEN の式で求めて、この両者の比（これを疲労安全率と名づけている）を最大にする条件が、最適条件であるという考え方である。これによると引張応力は抗張力の1/3のとき疲労安全率は最大となるから、引張安全率は3が適当で、これを裏付けるような事例が随所にみられるというのである。

しかし、この説にも判然としないものがある。すなわち、疲れ限度内でロープが使用されておれば、 $10^6 \sim 10^7$ 回の応力を受けてもロープは疲労しないはずであるのに、さらにこの疲れ限度以下の応力で使用しようとして、疲労安全率を設けることである。

現場で作業計画をたてる場合、もっとも知りたいのは、ロープが作業期間中切斷しないで十分使用に耐えうるかどうかということであろう。この要求に対して、以上掲げた考え方からは明確な答えはできそうもないし、従来架空索運材で合理化を考える場合、ロープの寿命が求められないために、いつもロープの消却費が不確定因子になり、十分納得のいく検討ができなかったように思われる。

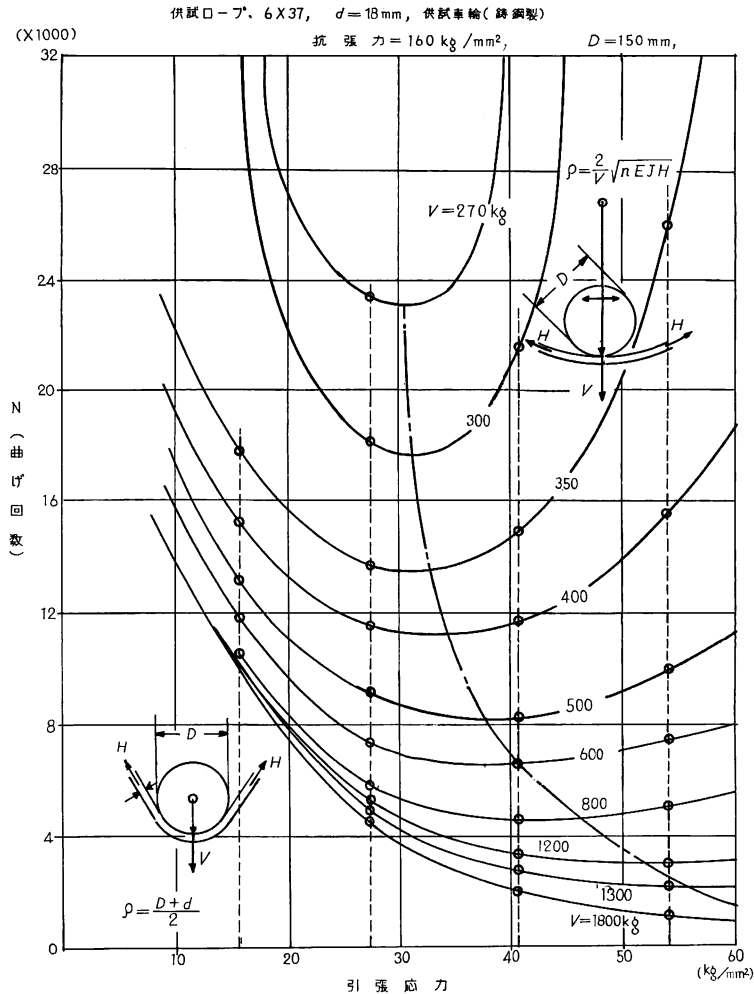
このように考えてくると、主索として使われるロープの $S-N$ 曲線の重要性を痛感する。本編は、はじめに R. WOERNLE のデータを借用して $S-N$ 曲線の誘導を試み、つぎに筆者らの行なった試験結果について述べたものである。

1.2 R. WOERNLE の試験結果に対する考察

第1図は⁹⁾ 1932年の V.D.I (独逸工業会誌) に掲載されているものである。

(補注) これはロープ研究に関する委員会が1932年1月20日ドイツのシュットガルト工科大学で開かれ、この会の模様を座長の R. WOERNLE が取りまとめているが、この末尾の方に掲載されたものが同図である。この図面だけは研究者の氏名が付記されていないが、この3年前にも WOERNLE が作業索に関する広範囲な疲労試験を発表していることなどから勘案すると、同図も WOERNLE の業績と推定される。

この図面に関する原文の説明はまことに簡単なもので、「ロープの寿命は一定輪荷重の条件下において引張応力の増加につれて寿命は漸次低下し、寿命が最低になる引張応力が存在し、この引張応力を越えるとふたたび寿命は増加する傾向がある。そして、この寿命が最低になる点を破線で結んだ曲線より左側は、走行車輪直径とロープ径によってロープの曲率半径が決定する領域である。このときの曲率半径は



第1図 引張応力の変化にともなう各種輪荷重に対する鋼索の寿命線図

$\rho=(D+d)/2$ となり、右側の領域は索張力と輪荷重の関係で走行車輪の半径よりもロープの曲率半径が大きい“主索領域”で $\rho=2/V\sqrt{nEJH}$ である」と説明している。

ここに ρ は曲率半径, D は走行車輪直径, d は素線の直径, V は輪荷重, n は構成素線の本数, E はロープの弾性係数, J は断面二次モーメント, H はロープ張力である。

(記号は原文のままとした。)

以上の説明に、若干補足して考察を加えたとつぎのとおりである。

1.2.1 第1図に対する考察

1) J. ISAACHSEN の曲げ応力の式を示すと次式のとおりである。

$$\sigma_b = \frac{V}{A} \sqrt{\frac{E_b}{\sigma_t}} \dots \dots \dots (1)$$

ここに, σ_b : 曲げ応力 (kg/mm²), σ_t : 引張応力 (kg/mm²), A : ロープの有効断面積 (mm²), V : 輪荷重 (kg), E_b : ロープの曲げ応力弾性係数 (この値については多くの研究¹⁷⁾ があるが, ここでは

21,000 kg/mm² とする。)

この式からわかるように、ロープの曲げ応力は引張応力が大きくなるにつれて小さくなるから、かりに曲げ応力を応力振幅とみなすと、第1図の破線から右側の領域においては、 $S-N$ 曲線の性質と一致した傾向にあることがわかる。

2) 破線から左側の部分は、すべて引張応力が増加するにつれて寿命が低下するから、これは明らかに(1)式を適用するような領域ではなく、第I報において述べたようなロープが滑車に巻きついた場合の $S-N$ 曲線の性質と一致した傾向にあることがわかる。

しかし輪荷重が 1,200, 1,300, 1,800 kg の寿命曲線は引張応力が 15 kg/mm² の付近で一致して、それ以下の応力では1本の寿命曲線を描いている。このことに着眼すると、引張応力が小さくなるとロープの剛性は急激に減少し、走行車輪にロープが完全に巻きついた状態になり、したがって曲げ応力は同じ値になっていたと推定される。さらに輪荷重が 1,200, 1,300 kg の場合の寿命曲線は引張応力が 60 kg/mm² あたりになると若干上向きになるが、1,800 kg の寿命曲線は引張応力が 60 kg/mm² になっても、依然として下降の一途をたどっている。これより輪荷重 1,800 kg の場合は、走行車輪とロープが完全に巻きついた状態で接触していたと考えられるから、この曲線は作業索の場合と同じ手法で $S-N$ 曲線が描かれるはずである。そして、輪荷重が 1,800 kg 以下の場合、曲げ応力がそれよりいくらか小さい値をとっていたと推定される。

1.2.2 主索領域に関する $S-N$ 曲線

第1図において主索領域とみなされる寿命曲線が、引張応力 41, 53 kg/mm² の破線と交わる場所の寿命を読みとり、この点の曲げ応力を(1)式により算出すると第1表のとおりである。

ここに有効断面積 A はつぎのようにして求めた。

供試ロープは 6×37 18 mm で、素線抗張力は 160 kg/mm² であるから、供試索の切断荷重を 17,900 kg と推定し (旧 JIS による)、これを 160 kg/mm² で除して 112 mm² を得た。

本試験のように車輪に当たる側は圧縮、反対側は引張り曲げ応力を受けるような片振りの条件においては、その $S-N$ 曲線は縦軸に曲げ応力を普通目盛にとり、横軸に寿命を対数目盛にとって作るもので、これにならったところ曲線を描くので、曲げ応力も対数目盛にとって描き直したところ、第2-1図のごとく各点は

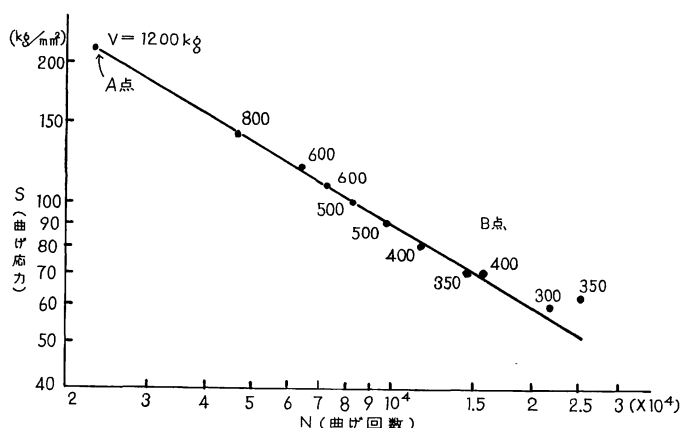
第1表 右半分の領域の各値

V (kg)	σ_t (kg/mm ²)	σ_b (kg/mm ²)	N ($\times 100$)
300	41	61	215
	41	71	145
350	53	62	250
	41	81	115
400	53	71	155
	41	101	83
500	53	89	97
	41	121	64
600	53	107	72
	53	142	46
800			
1200	53	213	23

ほとんど直線上に乗ることがわかった。ただしこの図をみて気付くことは σ_b の最高値が 213 kg/mm² になっており、素線抗張力をはるかに超過していることである。これは鋼索を丸棒とみなして誘導した(1)式の適用範囲外の曲率を与えたために起こったもので、真の値がこのように高いというものではなく、単なる計算値と理解することにする。

いまこの $S-N$ 曲線を利用すると、つぎのような関係式が得られる。

第2図に示す A 点 ($V=1,200$ kg, $N=2,330$, $\sigma_b=213$ kg/mm²) と B 点 ($V=350$ kg, $N=14,500$, $\sigma_b=70.7$ kg/mm²) 間が直線であるとみなすと、 σ_b と N との間にはつぎの関係式がなりたつ。



第 2-1 図 第 1 表よりの S—N 曲線図

$$\sigma_b = 22,884/N^{0.6}$$

上式に(1)式を等置させると次式が得られる。

$$\frac{V}{A} = 158\sqrt{\sigma_t}/N^{0.6} \dots \dots \dots (2)$$

また、この式を輪圧張力比という形に変形すると次式のごとなる。

$$\frac{V}{T} = \frac{24964}{N^{1.2}(V/A)} \dots \dots \dots (3)$$

上式が示すように輪圧張力比は、 N と V/A によって決まることがわかる。

1.2.3 輪荷重 1,800 kg に関する S—N 曲線

前述のごとく、輪荷重 1,800 kg の場合は走行車輪にロープが巻きついていたと考えると、曲げ応力は(4)式で求められ、119 kg/mm² となる。

$$\sigma_b = E_b \frac{d}{D} \dots \dots \dots (4)$$

ただし、 d : 素線直径 (0.85 mm と推定)、 D : 走行車輪のピッチ直径 (=150 mm)、 E_b : 鋼索の曲げ応力弾性係数 (=21,000 kg/mm² と仮定)

第 2 表 $V=1,800$ kg の $(\sigma_b + \sigma_t)$

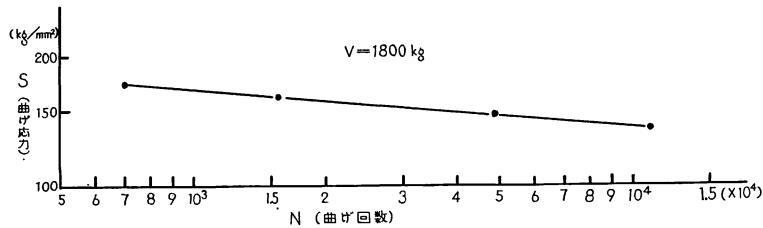
σ_t (kg/mm ²)	$\sigma_t + \sigma_b$ (kg/mm ²)	N (×100)	$\sigma_b = E \frac{d}{D} = 119$ kg/mm ²
15	134	110	ただし、 $E=21,000$ kg/mm ² $d=0.85$ mm $D=150$ mm
27	146	49	
41	160	16	
53	172	7	

いま第 1 図の輪荷重 1,800 kg の寿命曲線が引張応力 15, 27, 41, 53 kg/mm² の縦線と交わる寿命を読みとり、曲げ応力と引張応力の和を求めると第 2 表のとおりであり、これを図示すると第 2-2 図のごとく各点は 1 つの直線上に乗ることがわかる。このことは第

1 報の試験結果と合致しており、当初設けた仮定が妥当であったことを裏付けるものとする。

1.2.4 各輪荷重の寿命が最低となる引張応力の関係式

第 1 図からわかるように、ロープの寿命は各輪荷重ごとに最低の引張応力があるから、この関係を承知しておくことは必要である。そこで、この関係を求めるため種々検討した結果、つぎのようなことが判明した。


 第 2-2 図 $V=1,800 \text{ kg}$ の $S-N$ 曲線

 第 3 表 最下点で求めた σ_b と T/V

V (kg)	σ_t (kg/mm ²)	σ_b (kg/mm ²)	N ($\times 100$)	T (kg)	T/V
270	31	63	230	3472	12.85
300	32	69	175	3584	11.94
350	33	79	132	3696	10.56
400	34	89	110	3808	9.52
500	36	108	80	4032	8.06
600	39	124	64	4368	7.28
800	44	157	44	4928	6.16
1200	53	213	23	5936	4.94

$$\sigma_b = \frac{V}{A} \sqrt{\frac{E}{\sigma_t}}$$

$$A = B/\sigma_B = 17,900 \div 160 = 112 \text{ mm}^2 \quad (B \text{ は新品時の切断荷重})$$

$$E = 21,000 \text{ kg/mm}^2$$

まず各輪荷重の寿命が最低になる点の寿命と引張応力を読みとり、(1)式により σ_b を求める。つぎにこの引張応力から索張力を求め、これと輪荷重 V との比 T/V を求めると第3表のごとくなる。そこで、 σ_b と T/V との関係を両対数グラフにプロットすると、第3図に示すように各点はほとんど1つの直線に乗ることがわかった。

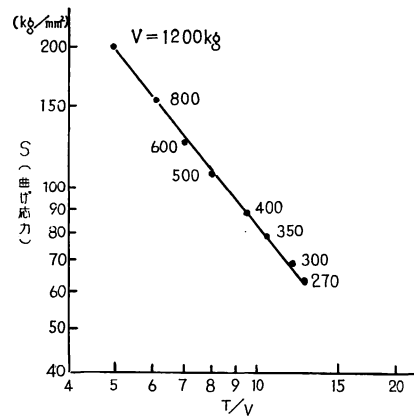
このことは、ロープの機械的特性を究明するうえに重要なことと考えられるが、これに関する説明は今後の研究に待つことにして、この結果からつぎのような関係式が誘導される。

第3図の $\sigma_b - T/V$ 線図を直線とみなし、その両端の点を用いて線形を求めると、

$$\sigma_b = \frac{1638}{(T/V)^{1.277}}$$

となる。上式に(1)式を等置させると次式が得られる。

$$\sigma_t = 22.66(V/A)^{0.356} \dots\dots\dots (5)$$



第 3 図 第 3 表からの線図

上式からわかるように、寿命が最低になる引張応力は V/A を主要因子とする式で求められる。なお、ロープの構成あるいは直径が変われば係数などは変わることが予想される。

1.2.5 検討結果

R. WOERNLE の試験結果に検討を加えた結果を要約すると、つぎのとおりである。

1) 主索として使用されるロープの $S-N$ 曲線の描き方は、ロープと走行車輪の接触状態によって大きく2つに分けられる。

その1つは接触角が微小なもので、これはISAACHSEN の曲げ応力 [(1)式] を縦軸に、寿命を横軸にそれぞれ対数目盛にとって描かれる。

他の1つはロープが走行車輪に完全に巻きついた状態のもので、これは輪荷重がロープ張力に比べてきわめて大きい場合のもので、(4)式で求めた曲げ応力と引張応力とを加算したものを縦軸に、寿命を横軸にそれぞれ対数目盛にとって描かれる。

2) ロープの寿命は各輪荷重ごとに寿命が短くなる引張応力があるが、これは(5)式に示すような V/A が主要因子となる形の式で与えられる。

1.3 6×7 16 mm の疲労試験

以上述べたような検討結果を参考に、林業でもっとも多く使われている6×7構成のロープについて疲労試験を行なった。

1.3.1 試験装置

試験装置は最大張力 5 t で試験ができるよう設計されたもので、その機構を示すと第4図のとおりである。すなわち、供試ロープ C の両端末はソケット a の内に合金止めされ、両ソケットは固定部にピンで連結される。供試ロープの張力はレバー A の先端に負荷される重錘 f によって約 5 t までかけられる。重錘の目方と張力との比は 1 : 10 である。供試ロープの横荷重は走行車輪 d を索 e で引張ることによって与えられ、索 e は横荷重負荷用重錘 f に連結されている。また走行車輪を上下動させるため、駆動装置 g のアームの先端と走行車輪がロープで連結されている。

駆動は 10 PS のモータによるが、この減速はモータに直結した減速機による。走行車輪の行程は 1.2 m、速度は 0~1.5 m/sec、1 分間の往復回数は約 16 回である。

1.3.2 試験条件

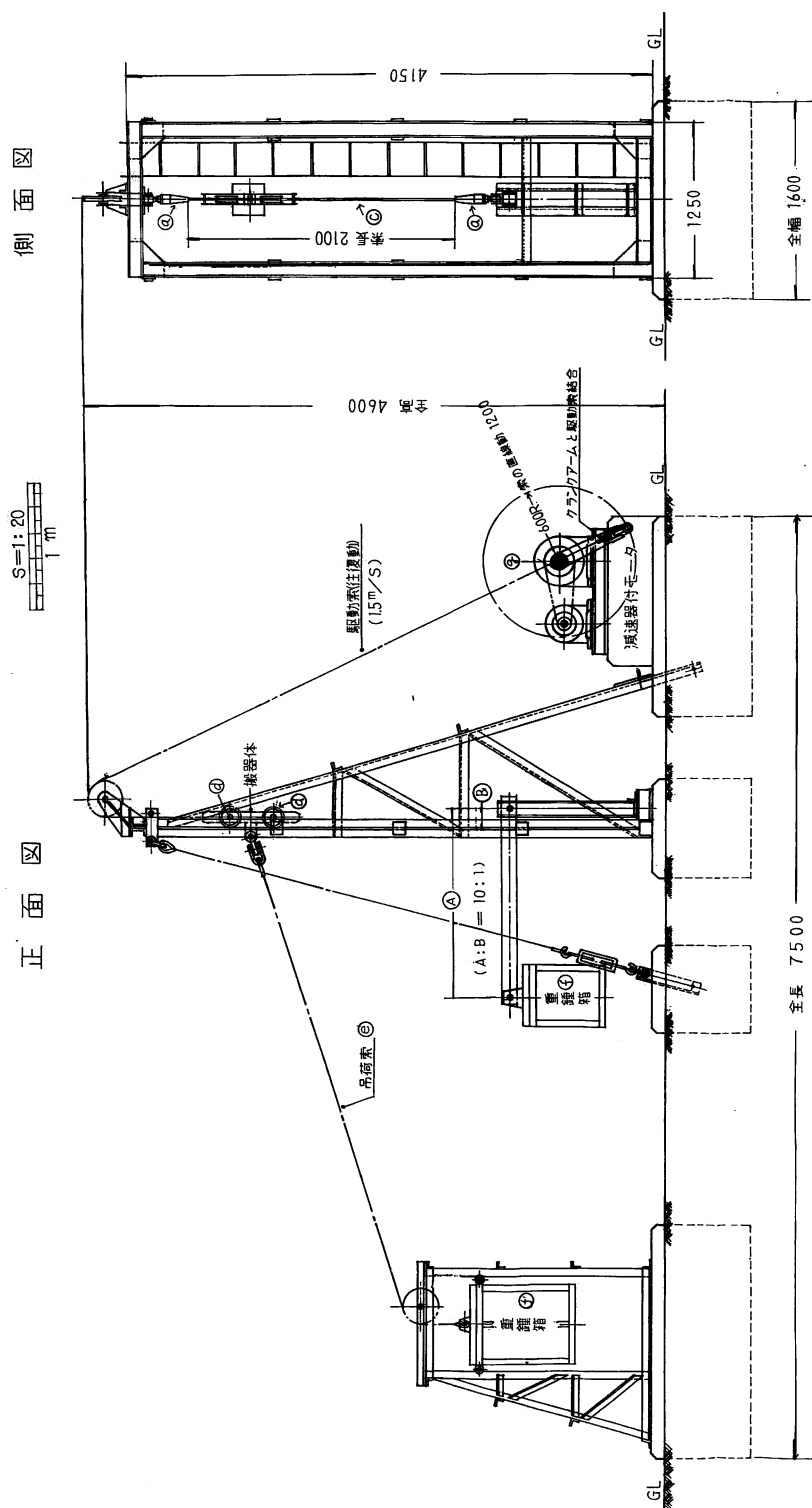
1) 供試ロープ

供試ロープは 6×7 C/L 2 種 16 mm [旧 JIS] で、製造会社は第2編に述べる A, E, G₍₂₎ 社のものを使用した。その機械的性能は第10表 (第2編) に示す。なお、16 mm ロープを採用したのは、試験装置の能力 (最大負荷 5 t) と、安全率を 3 にとったときのロープの切断荷重から決めたものである。

2) 引張力と横荷重

現場において、6×7 16 mm ロープが主索として使用されているときの引張力と横荷重の関係を文献⁸⁾⁹⁾ から推定すると、一般に搬器が中央点にあるとき安全率は 3、水平距離は 100~500 m が普通であるので、この条件で主索の負荷を求めると 1,000~500 kg であり、この搬器がスパン内を走行した場合張力は 3 t ぐらいまで低下するので、これらを考慮して引張力は 5, 4, 3 t; 横荷重は 1,000, 750, 500 kg の3水準をとり、これらの組合せによる 9 とおりの試験条件を設けた。

3) 走行車輪



第4図 小角度曲げ疲労試験

走行車輪の材料は鍛造鋼で、溝の表面を焼入れ加工を施したものである。硬度はロックウェル硬さで C スケール 53.5～57.5 である。またロープ接触部分の溝形はロープ半径の約 1.1 倍（9 mm）、溝底部における直径は 150 mm である。

1.3.3 試験実施要領

1) 両端末を合金鑄込み加工をした供試ロープ（ソケット間隔約 2 m）を試験装置に取りつけ、所定の張力を与えてから、ソケット間隔をスチールテープで測定する。つぎにロープピッチ数を数え、ノギスを用いて 3 方向からのロープ径を測定する。

2) 試験装置の運転は初期断線を発見するまではつぎの基準で停止し、断線の有無を検査し、素線断線を発見してからはそれぞれ半分の往復回数で停止し、検査を行ない、寿命に近づくにしがいにその半分にした。

張力 5 t の場合 2,000 往復

張力 4, 3 t の場合 1,000 往復

ただし、鋼索の寿命の判定は林野庁制定の集材機作業基準に従い、1 より長さで 4 本の素線が断線した場合、あるいは同一ストランドに 3 本の素線断線が集中発生した場合、および型くずれを起こした場合をもって寿命とみなした。

また断線調査に際しては、上部ソケットからの発生箇所をロープピッチ数で調査するほか、走行車輪に接触して断線を起こしたものを「山断線」、ストランド同志の接触箇所で断線を起こしたものを「谷断線」と呼称し、この区分で素線断線状態を分類した。

3) 寿命に達したことが認められると横荷重を除去し、試料長を測定した。

4) つぎに供試ロープを試験装置から撤去し、引張試験機にかけて残留強度を求めた。

1.3.4 試験結果

試験結果を一括表示すると第 4 表のとおりである。すなわち寿命に達するまでの往復回数、このときの伸び、断線数、残留強度、新品時に対する％、引張力—伸び線図から求めたロープの引張弾性係数等を各会社ごとに示した。ここに伸び率は車輪に接触した部分だけが疲労により伸びたものと考え、接触長（157 cm）に対する％である。

本試験は S—N 曲線を求めることに主眼を置いた試験ではあるが、寿命に適するまでの断線発生の経過、あるいは寿命に達したときのロープの切断荷重、疲労破面近傍の金属組織なども調査したので、作業管理あるいは安全管理に関連させて次節のごとき考察を行なった。

1.3.5 考察

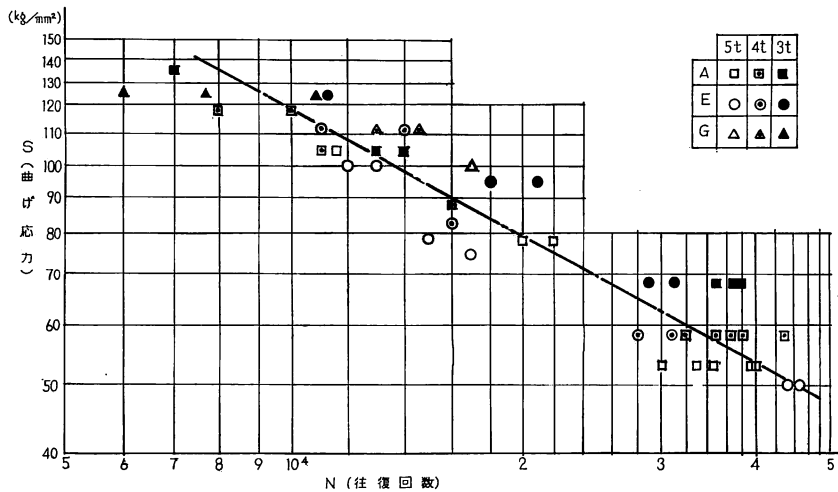
1) S—N 曲線について

第 4 表に示した寿命と曲げ応力の関係を両対数方眼紙にプロットすると第 5 図のようになる。これをみると総体的には右下がりの 1 つの線上に乗っているようではあるが、会社別に見ていくと必ずしも一直線上には乗っていない。また引張力 3 t（黒く塗りつぶした点）のものは、全体の傾向からややはずれたところにあるようである。このことは第 1 図のデータを検討すると納得できる。すなわち、本試験条件の輪荷重（500, 375, 250 kg）をロープ径 18 mm に換算すると、それぞれ 630, 480, 320 kg ぐらいになるが、このような輪荷重の寿命曲線を第 1 図に想定すると、引張力 3 t（引張応力は約 30 kg/mm² になる）の条件の寿命は主索領域からはずれたところにある。したがって、1.2.2 に述べた結果を是認すると引張

第4表 試 験 結 果

試 験 条 件							試 験 結 果									
社名	張力 (t)	荷重 (t)	曲げ応力 の (kg/mm ²)	試験長 (mm)	ロー プ ピ ッチ 数	ヨリの 長さ (mm)	16mm に 対 する 倍 数	寿 命 (×1000)	1 割断線 時の伸び (mm)	伸び 率 (%)	素線断線状態			残 留 強 度 (t)	残 留 強 度 率 (%)	弾性係数 (kg/mm ²)
E	5.5	1	100.8	2085	93	134.5	8.4	13	11	0.70			10	11.7	72	9,880
	5.5	1	100.8	2096	92	136.7	8.55	12	10	0.64			15	12.0	74	11,100
	4.5	1	111	2087	87	143.8	9.0	14	8	0.51			9	10.3	63	8,220
	4.5	1	111	2087				11	10	0.64			10	12.8	78	9,140
	3.5	1	126	2085	89	140.5	8.79	11.2	10	0.64			15	13.6	83	10,170
	2.5	1	149	2073	93	133.8	8.37	11	12	0.77			9	13.4	82	10,500
	5.5	0.75	75	2110	91	138.8	8.68	17	7	0.44			10			
	4.5	0.75	83	2089	94	133.4	8.34	16	7	0.44			6	12.5	77	8,300
	3.5	0.75	95					21					14.6	89		8,250
	3.5	0.75	95	2100	94	134.1	8.38	18	12	0.75	11		11			
	5.5	0.5	50	2096	95	132.3	8.28	45	6	0.38	13		13			
	5.5	0.5	50	2088	94	133.2	8.33	44	7	0.44	16		16			
	4	0.5	59	2089	95	131.9	8.25	28	4	0.25	7		7			
	4	0.5	59	2079	94	132.7	8.30	31	6	0.38			9			
	3	0.5	68	2060	95	130.1	8.14	31	8	0.52	10		10			
	3	0.5	68	2087	95	131.8	8.24	29	10	0.64	13		13			
	5	0.75	79	2095				15	7	0.44	13		13			
G ₂	5.5	1	101					17					10	13.0	75	10,290
	4.5	1	111	2090	91	137.6	8.61	14	19	1.22	19		19	9.3	54	10,110
	4.5	1	111	2078	97	128.5	8.04	14	10	0.64			14	13.8	80	11,570
	4.5	1	111	2075	97	128.3	8.02	13.4	18	1.15			7	12.1	70	10,660
	3.5	1	126	2089	97	129.2	8.08	6	18	1.14			7	10.5	61	10,140
	3.5	1	126	2089	97	129.2	8.08	7.7	29	1.84	13		13	12.1	70	9,800
	3.5	1	126	2086	97	128.9	8.06	11	12	0.75	14		14	12.2	70	10,890
	2.5	1	149	2087	96	130.4	8.15	10	10	0.63			13	10.1	58	
A	5	0.5	53	2068	98	126.6	7.92	40	10	0.64	12	1	13			
	5	0.5	53	2067	98	126.5	7.91	34.5	9	0.58	3	5	8			
	5	0.5	53	2046	97	126.6	7.92	33	5	0.32	11	2	13			
	5	0.5	53	2098	99	127.1	7.95	30	11	0.69	1	12	13			
	5	0.5	53	2098	100	125.9	7.88	39	8	0.50	12		12			
	5	0.75	79	2079	99	125.9	7.88	19.9	7	0.45	14		14			
	5	0.75	79	2074	98	127.0	7.94	22	16	1.02	6	4	10			
	5	1	106	2087	98	127.7	7.99	11	7	0.44	8		8			
	5	1	106	2008	96			11.5			10		10			
	4	0.5	59	2080	99.5	125.4	7.84	43	7	0.44	7	2	9			
	4	0.5	59	2108	101	125.4	7.84	38			5		5			
	4	0.5	59	2087	100	125.4	7.84	33	6	0.38	5	1	6			
	4	0.5	59	2066	99	125.3	7.83	36.5	14	0.90	11	2	13			
	4	0.5	59	2063	98	126.3	7.90	35	22	1.42	5	2	7			
	4	0.75	89	2078	100	124.7	7.80	16	10	0.64	11		11			
	4	1	118	2105	99	127.5	7.97	8.15	7	0.44	8		8			
	4	1	118	2041	97	126.3	7.90	10	10	0.64	7		7			
	3	0.5	68	2080	99	126.1	7.88	35	6	0.38	8		8			
	3	0.5	68	2094	101	124.5	7.78	38	21	1.33		1				
	3	0.5	68	2078	98			37			7		8			
	3	0.75	102	2076	101	123.3	7.71	13	9	0.57	8		8			
	3	0.75	102	2083	100	125.0	7.82	14			6		6			
	3	1	136	2052	98	125.8	7.86	7.1	6	0.38						
	3	1	136	2100	100	126.0	7.88	7	6	0.38	7		7			

力 4, 5t (引張応力はそれぞれ約 40, 50 kg/mm² になる) のデータと一緒に 3t のデータをプロットした場合, 1つの線に乗らなくても止むを得ないことであろう。しかし前述のごとく, 主索張力は搬器が移動するにつれて (16 mm ロープの場合) 5t から 3t ぐらいまで変化するから, 少々のはずれはあ



第5図 各試料総合のS—N曲線

ても、一緒にして1つのS—N曲線にまとめておいた方がつづりがよい。

つぎにデータのバラツキについてふれると、本試験の場合同一条件内でかなりデータがバラツキであり、横荷重が500 kgの場合その傾向が強い（これから推量するとWOERNLEの実験は同一条件を数回やり、その平均値で第1図を作製したように考えられる）。さらに本試験の場合会社数は3つであるが、この3社の間にも若干の差異がある。したがって、実際現場において使用しているロープの寿命を推定するとなると、かなり誤差範囲を大きくとる必要がある。

さらにこのS—N曲線は横荷重一定の条件であるのに対し、実際の現場においては行きは空搬器、帰りは実搬器という繰返し疲労であるから、これをどう取り扱うべきかは苦慮するところである。これに対してはつぎのような便法を採ることにした。すなわち、

空搬器の負荷は実搬器の負荷に比べてかなり小さく、輪荷重が小さくなると第1図でもわかるように寿命は極端に大きくなるので、空搬器走行による影響は微小と考え無視することにする。つぎに、実搬器は引張力が5t（中央点にあるとき）から3tになるような区間を走行すると考えると、その寿命の比はほぼ2:1であるから、引張力5tの寿命（往復回数）を実搬器片道1回分（搬器1往復の意）と考えることにより、一応場所によるロープの寿命の差は考慮したことにする。

以上のように考えると、第5図に示すS—N曲線は空搬器の行きと実搬器の帰りををもって、1往復相当とするS—N曲線として実用に供しうることができる。

2) S—N 曲線の応用

第5図に示す全部のデータを用いて最小自乗法により回帰式を求めるとつぎのとおりである。

$$N = \frac{3.7247 \times 10^7}{\sigma_b^{1.7164}} \dots\dots\dots (6)$$

上式に σ_b の原式を等置させ、さらに式中の因子 E_b を21,000 kg/mm²、 σ_t を55 kg/mm²（安全率3）とすると次式が得られる。

$$N = \frac{2.2636 \times 10^6}{(Q/2A)^{1.7164}} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 Q は横荷重（主索の負荷）で、車輪数は2個とする。

すなわち、(安全率3の場合の) 16 mm ロープの主索の寿命は輪荷重 ($Q/2A$) できまることが明らかになった。ここに Q は安全率、水平距離、傾斜角が同じでも中央垂下比 s/l (搬器が中央にあるときの垂下量 s とこのときの主索長 l の比) が異なると変わってくることは文献8の許容荷重表に示すとおりであるが、ロープ径が変わっても各許容荷重表から求めた $Q/2A$ の値は共通の値をもつ。もし(7)式の関係式が 16 mm 以外のロープにも適用できるとすれば、文献の8の許容荷重表はロープ径のいかんを問わず、みな共通の寿命をもつことになる。しかし材料試験の結果では、部材の寸法が異なると、その受ける応力が同じでも寸法の大きなものの寿命は短くなることが明らかにされており (これを寸法効果という)、各ロープ径の許容荷重表が共通の寿命をもつことはないと思う。そこで、この寸法効果をロープ径の逆比と仮定する (たとえば 25 mm のロープの寿命は 16 mm の寿命の 16/25 となる) ほか、つぎのような仮定を設けると任意の径のロープの運搬可能な総重量が算出できる。

- ① 搬器の重量は主索の 100 m 相当とする。
- ② 作業索の標準重量は主索の 1/3 とする。
- ③ 作業索が主索の負荷に及ぼしている重量はスパン (L) の 1/2 とする。
- ④ 索張りはエンドレスタイラー式とする。
- ⑤ 重錘の目方は $L/2$ 相当の作業索 (荷上索) 重量とする。

いま主索の総負荷を $Q(\text{kg})$ 、主索の標準重量を $w(\text{kg/m})$ 、スパン (支間水平距離) を $L(\text{m})$ 、吊荷重量を $\hat{Q}(\text{kg})$ とすると $\hat{Q}$ は次式で表わせる。

$$\hat{Q} = Q - (100w + wL/3 + wL/6) = Q - w(100 + L/2) \dots\dots\dots(8)$$

搬器 作業索 重錘

したがって任意の径のロープの運搬可能な総重量 $\Sigma \hat{Q}$ (ロープ径を ϕ とする) は次式で求められる。

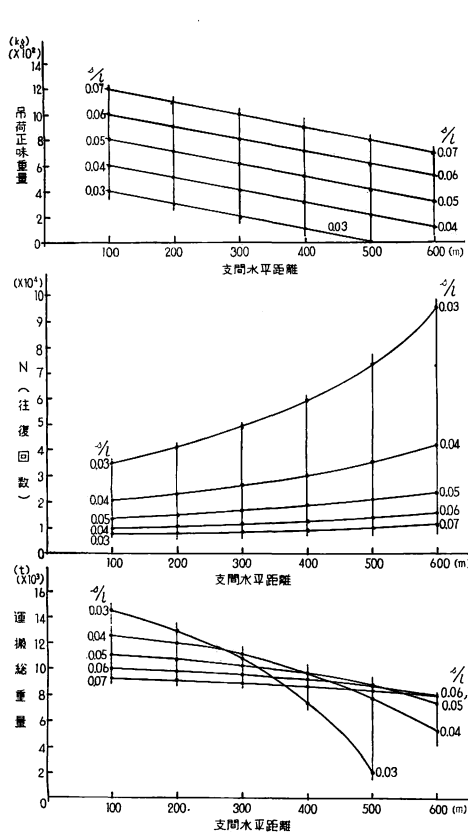
$$\Sigma \hat{Q} = N(Q - w(100 + L/2)) \cdot 16/\phi \dots\dots\dots(9)$$

いま文献8の許容荷重表の 16 mm および 25 mm について、安全率3の場合の許容荷重を読みとり、(7), (8), (9)式を使って $\Sigma \hat{Q}$ を求め、これを図示すると第6, 7図のごとくなる。これを見ると運搬可能な総重量は L と s/l によってかなり影響を受けることがわかる。普通現場においては $L=500\text{ m}$ ぐらいのとき、 s/l は 0.05 ぐらいで作業をしているようであり、また L が 700 m にもなると s/l は 0.06 ぐらいにとっているのをよく見うけるが、同図の傾向をみるとこのような作業条件の場合、運搬総重量はかなり高くなっており、同図はよく実態を説明しているように考えられる。

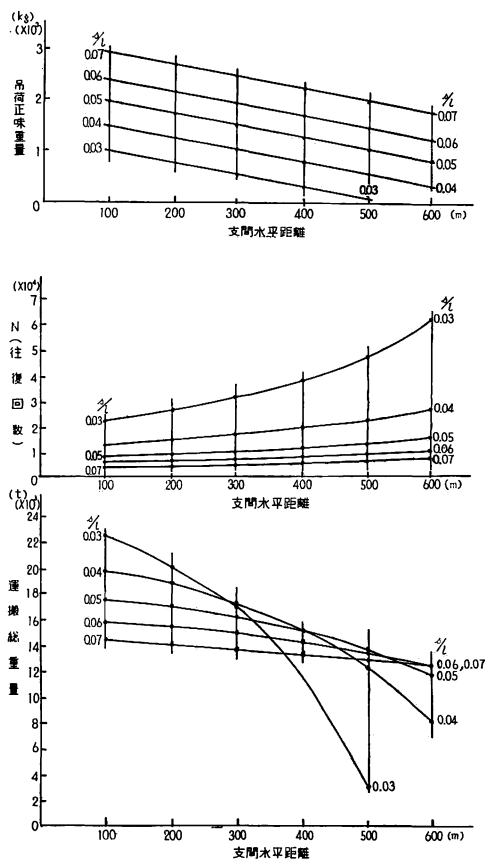
従来 s/l や $\hat{Q}$ をきめる場合、地形条件や能率が重視されてきたようであるが、主索の寿命の推定が適確になれば、主索の張り替えの労力なども加味して s/l や $\hat{Q}$ の決定が可能になるわけで、作業管理あるいは安全管理上きわめて有効である。本手法はこの意味で重要な意義をもつが、実験の裏付けがまだされていないので今後現地調査をすすめようと考えている。

3) 伸び率ならびに残留強度と寿命の関係

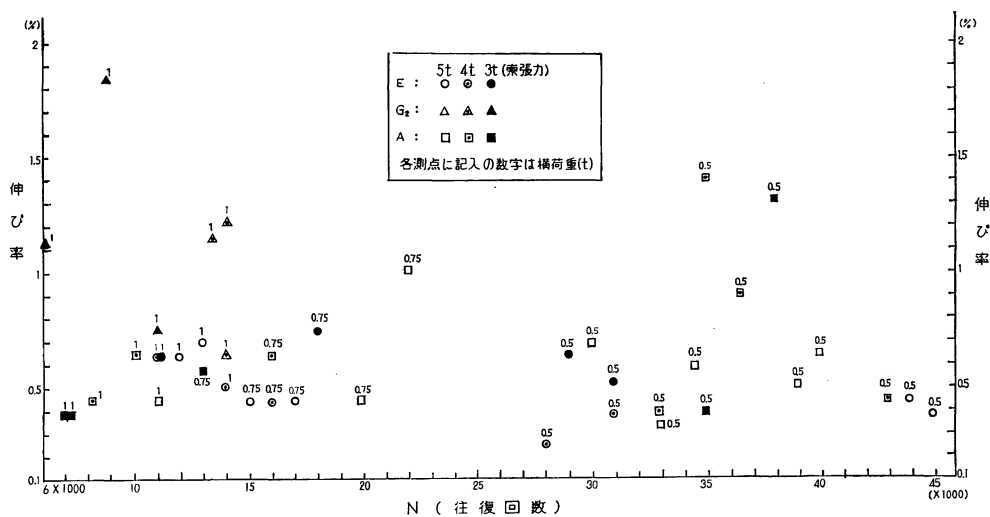
寿命に達したときのロープの伸び率あるいは残留強度と寿命の関係を図示すると第8, 9図のようになる。これらをみるとほとんど傾向らしいものは認められないが、これは当然なのかもしれない。当初寿命の長いものは伸び率が大きかったり、残留強度は低い傾向を示すなど何らかの傾向があるのではないかと予想していたが、寿命に達したときのロープの外観は種々で、山断線だけで1割断線になったものがあるかと思うと、谷断線が多いものもあるといったぐあいで、あまりはっきりした傾向は示さなかった。このこ



第 6 図 6×7 A 種 16 mm の運搬総重量, 吊荷正味重量, 寿命等の関係



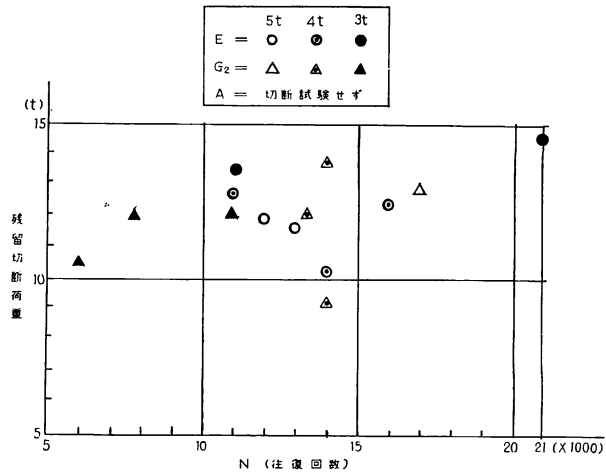
第 7 図 6×7 A 種 25 mm の運搬総重量, 正味重量, 寿命等の関係



第 8 図 伸び率と寿命

とはロープの疲労の実態を示したもののよう考えられ、前述のごとく傾向らしいものが認められなかった原因は、このようなところにあったのではないかと考える。そこで、この断線の発生していく経過を調べてみるとつぎのとおりである。

第10-1～3図はロープの素線の断線発生経過を引張り別にしたもので、ここではA社のものを示してあるが他社のものも大同小異である。識別を容易にするため断線箇所の上下両端を結んで、断



第9図 残留切断荷重と寿命

線が起る範囲を示したが、車輪の往復行程で2輪全部が接触する区間だけに初期断線が発生するといったものでもなく、走行車輪が1輪しか接触しないような端末の部分でも断線が起ることもある。また初期断線までの往復回数に対する、初期断線から寿命までの往復回数の比率を示すと第5表のようになるが、これを見てもあまり傾向らしいものは認められない。

第5表 初期断線までの往復回数に対する、初期断線から寿命に達するまでの往復回数の比率 (単位 %)

横荷重 (t) \ 張力 (t)	1	0.75	0.5
5	37, 44	11, 22	7, 44, 175, 0, 37
4	33, 43	60	43, 5, 10, 22, 17
3	17, 17	8, 17	25, 50, 32

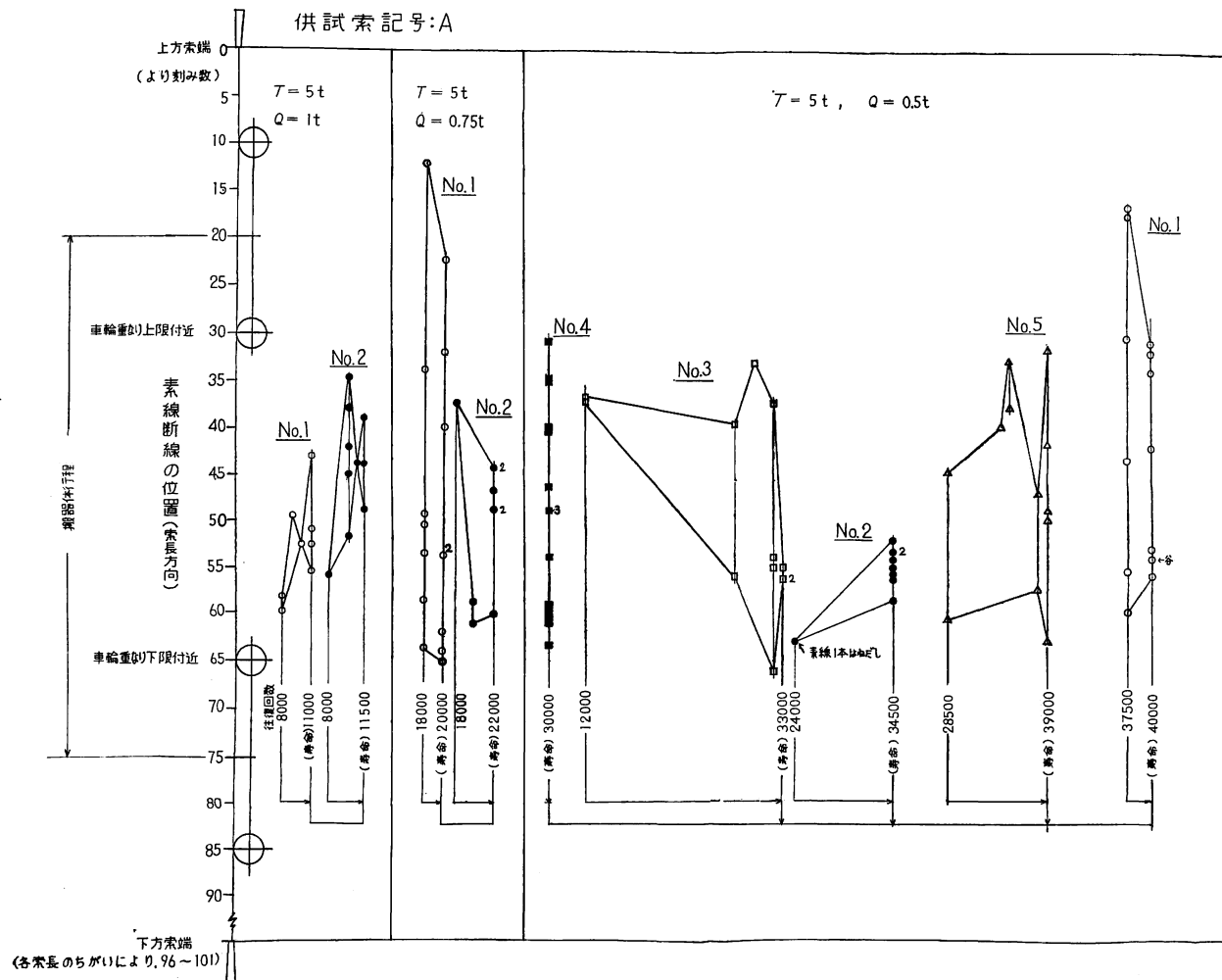
4) 疲労現象について

以上述べたごとく素線断線はかなり不規則なものがあり、この原因の追及はロープの疲労特性を知る上に重要であるので、その第一歩として疲労破面近傍の金属組織の検鏡をととして、疲労現象を観察することにした。

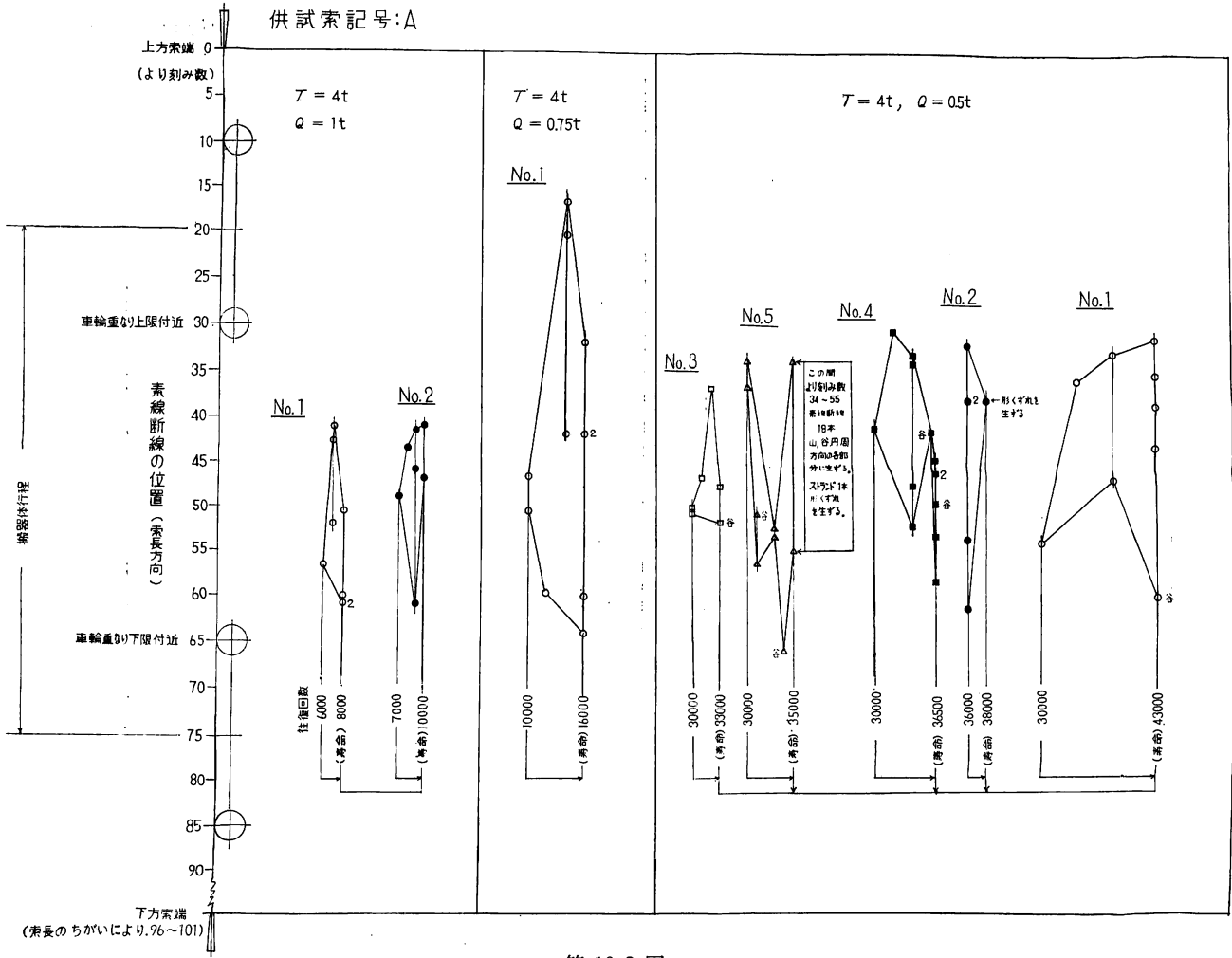
a) 素線断線の発生箇所と外観

写真1は張力5t、横荷重0.5tで、往復回数33,000回で1割断線を起こしたA社の供試ロープを試験装置からとりはずして接写したもので、ロープの中心部にロープピッチごとに白く見えるもの(矢印)が車輪に当たって塑性変形を受けた部分である。寿命に到達するころになると疲労断線した素線はよくハネ出してくるが、中央付近にそれが見える。

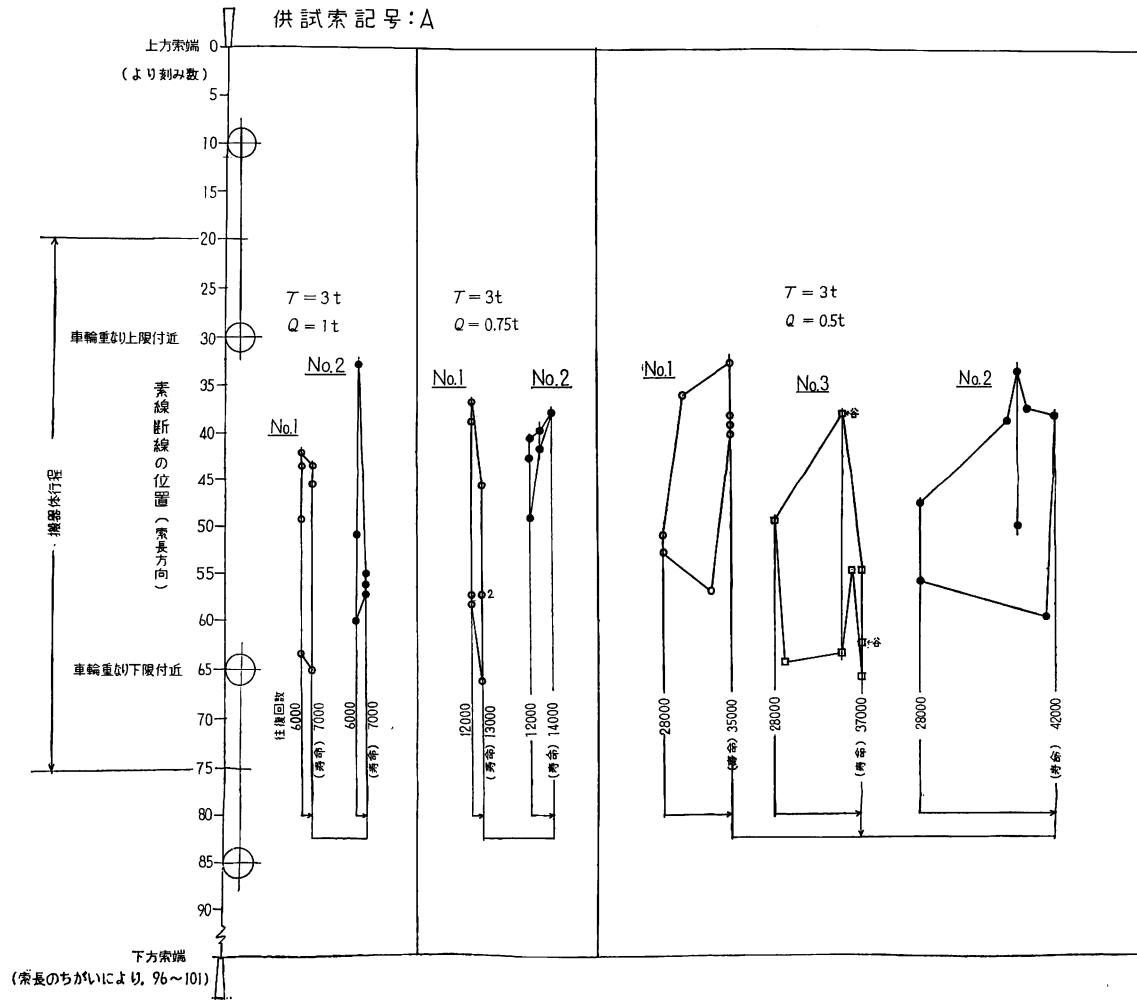
写真2は同じ供試索の56ロープピッチ(第10-1図)に発生した山断線を示す。車輪に当たった部分が平滑に摩耗したり、上部右隅にタテ割れが見える。また中心部の奥に見えるものは心線で、側線により塑性



第 10-1 図



第 10-2 図



第 10-3 図

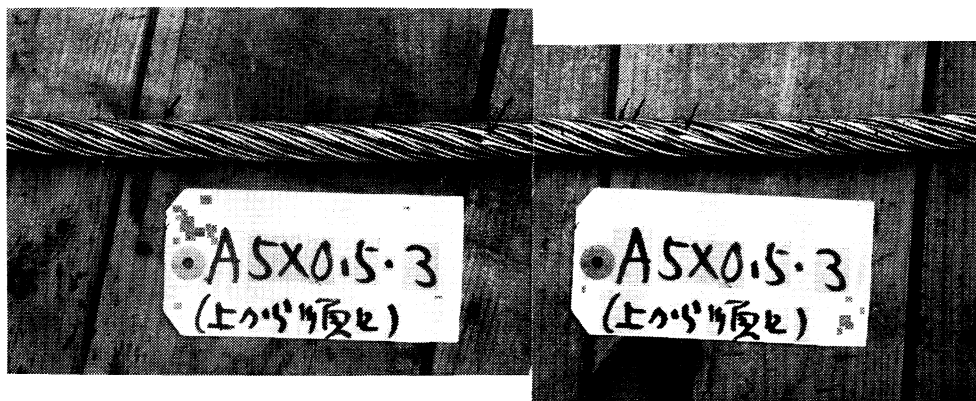


写真 1. A 社, 張力 5t, 横荷重 0.5t の試験条件で寿命に達した供試索 (往復回数 33,000)
注: 矢印は断線およびタテ割れ部分



写真 2. 山 断 線

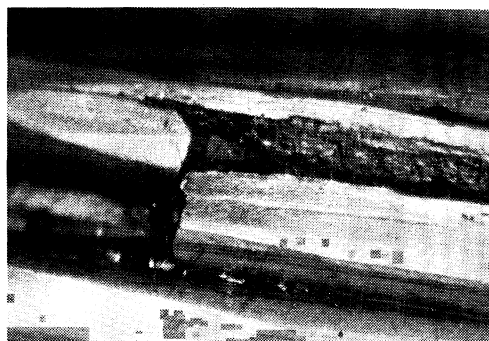


写真 3. 写真 2 の右上隅のタテ割れ

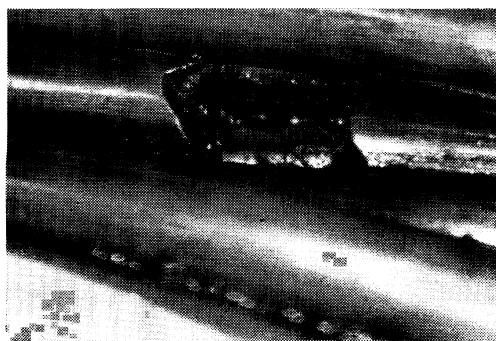


写真 4. 谷 断 線



写真 5. 往復回数 3 万で発生した山断線



写真 6. 塑性変形した箇所への崩壊現象



写真 7. 外部にハネ出した谷断線



写真 8. 不整破面をもった山断線

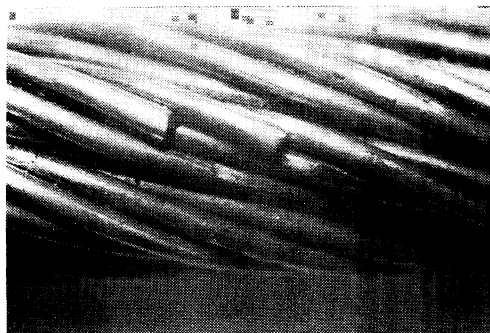


写真 9. E 社, 張力 5 t, 横荷重 0.75 t の試験条件で寿命に達した供試索の一部分 (往復回数 14,500)

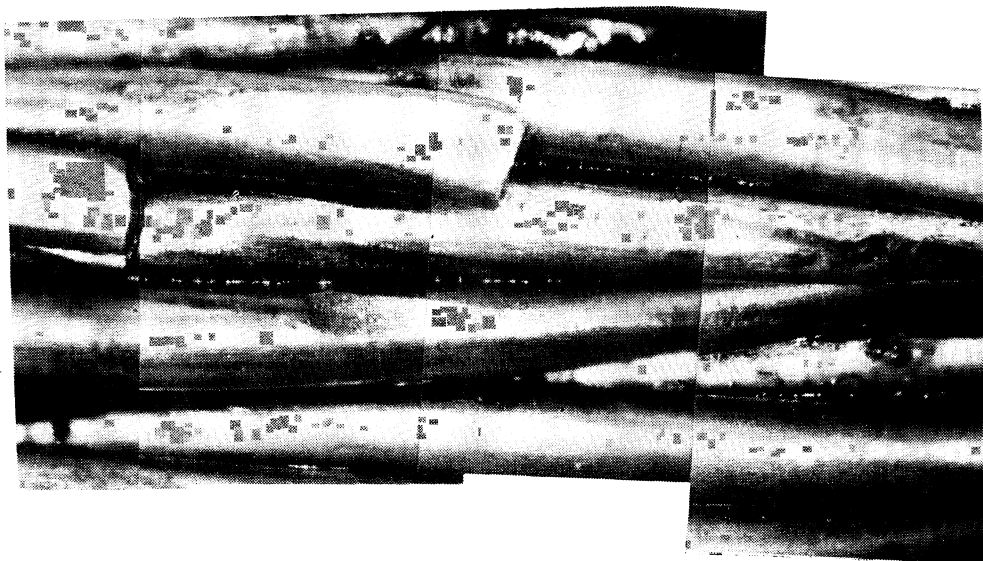


写真 10. 写真 9 を拡大したもの

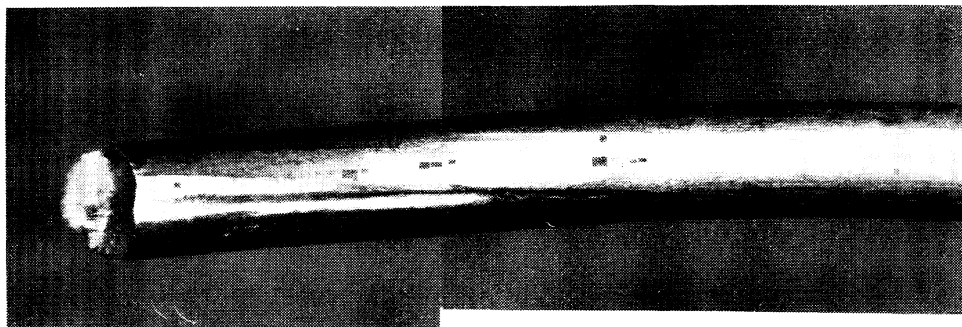


写真 11. 山断線の内側。心線との接触部分が塑性変形したところを示す (E 社)

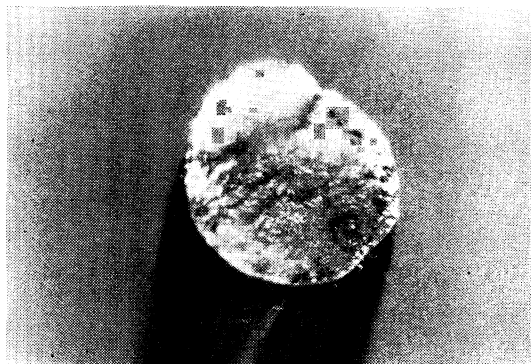


写真 12. 写真 11 の破面

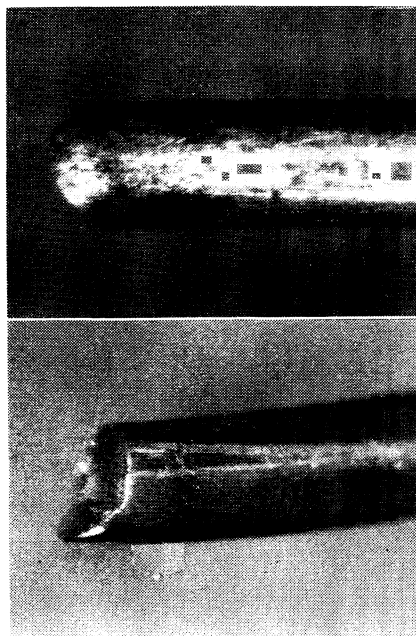


写真 13. 写真 11 の破面付近を背面と横からみた状態

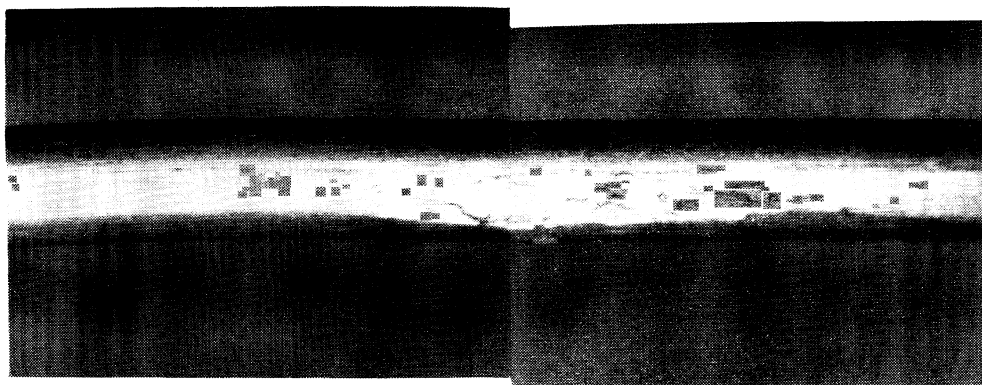
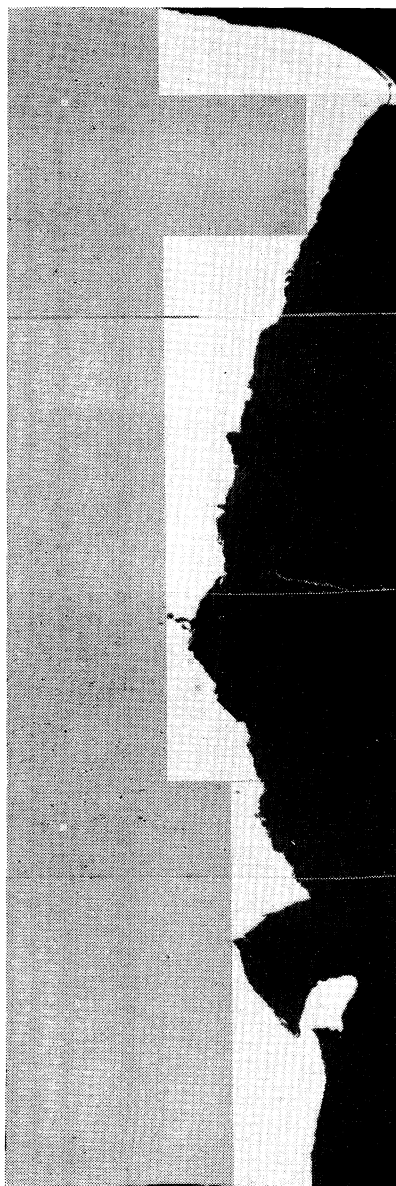


写真 14. 写真 13 の破面から約55mm離れた箇所車輪走行の裏側に発生していた融着状態を示す。



×100

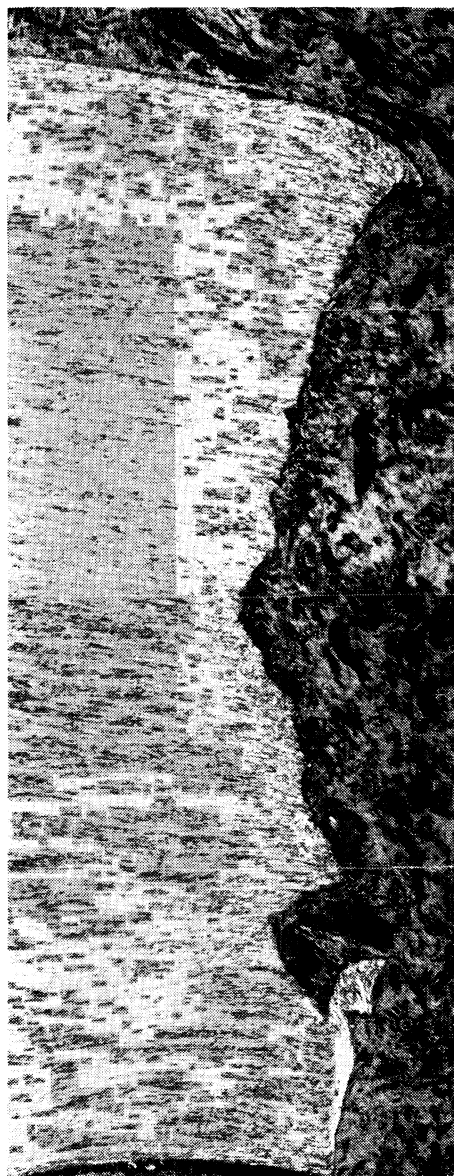
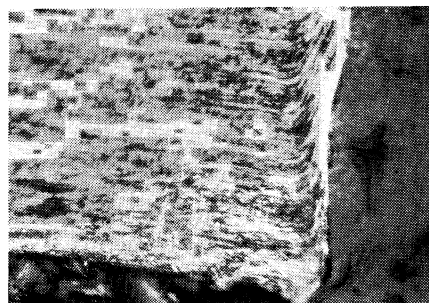


写真 15. E 社山断線の破面



×400



× 100

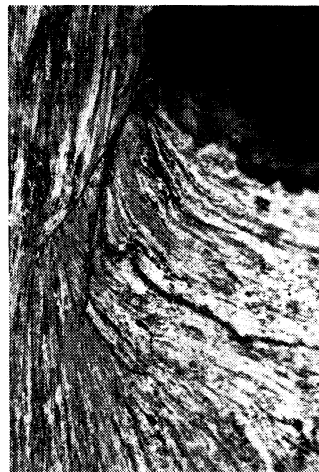
写真 16. 心線に接触して融着状態を呈していた側線の
縦断面



× 400

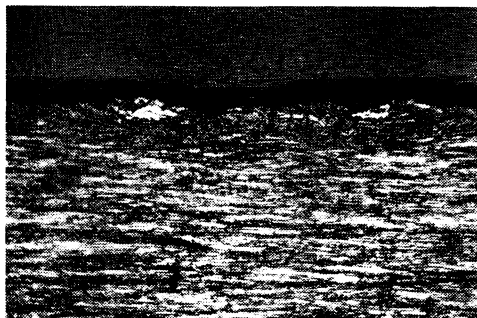


× 100



× 400

写真 17. 塑性変化の激しいところに見られる
局所的な迂り



(1) $\times 100$



(2) $\times 400$ (1)の右周辺部の拡大

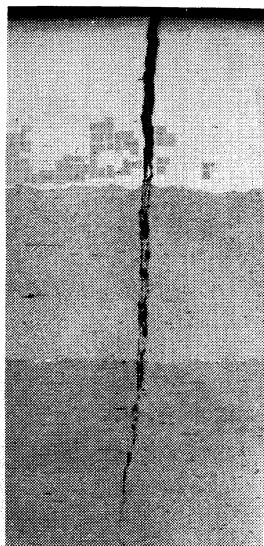


(3) $\times 400$
(1)の左周辺部の拡大

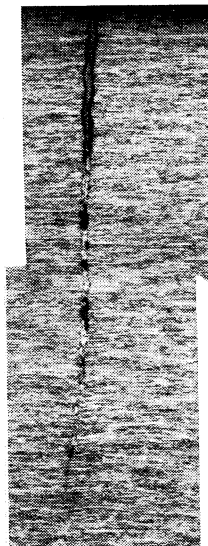


(4) $\times 1,000$
(3)をさらに拡大

写真 18. 塑性変形を受けた部分の変質部分

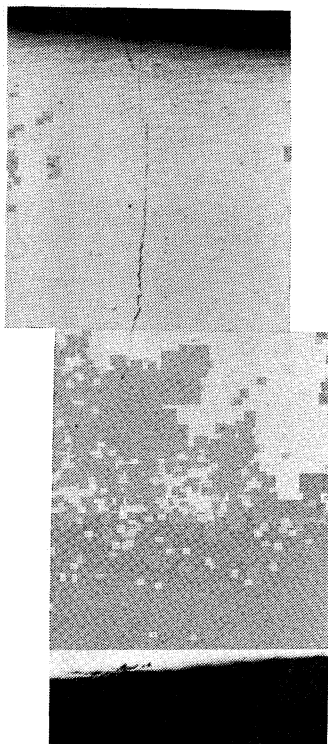


× 60 (無腐食)

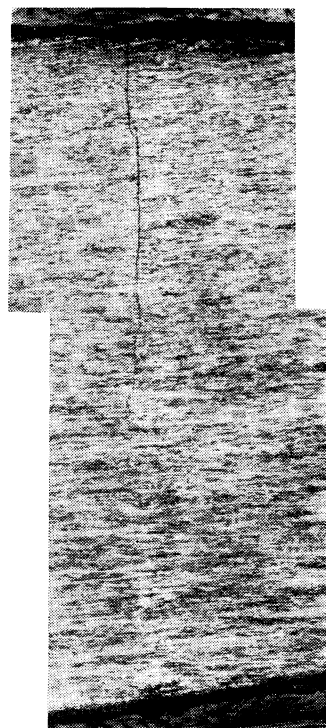


× 60

写真 19. 疲労破面 (山断線) から 3.6 mm 離れたところに見られた亀裂

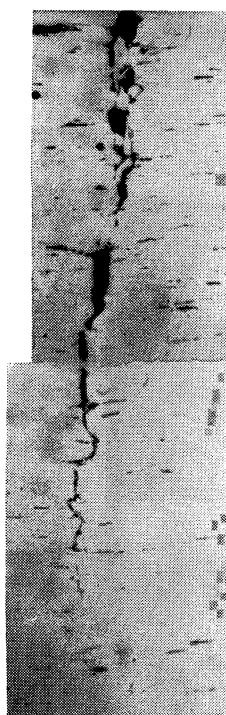


× 50 (無腐食)



× 50

写真 20. 亀裂の進行状態
亀裂の進行方向真下の周辺部に塑性変形がみられる。



(1) × 300
亀裂進行の先端
部分

(無腐食)

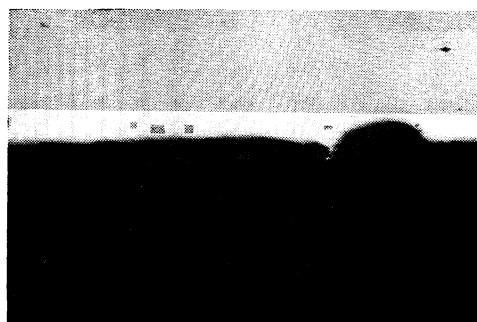


(2) × 300
周辺部に開口した
部分

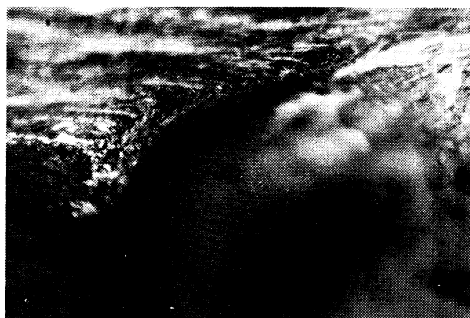


(3) × 300
最先端部分

写真 21. 写真 19 の亀裂先端付近



× 100



× 400

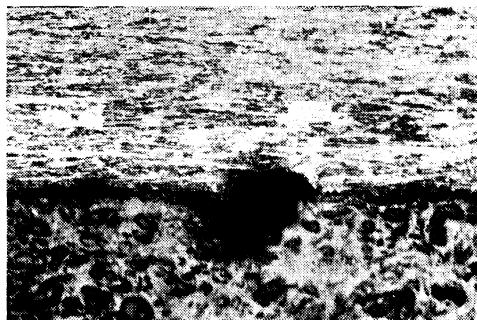


写真 22. 亀裂の発生した反対側に見られ
る凹み

× 100

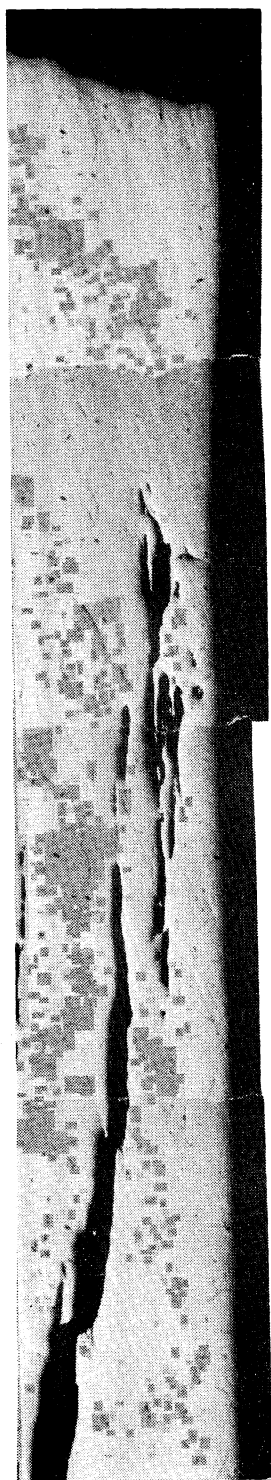


写真 23. タテ割れの進行
状況 × 80



× 100

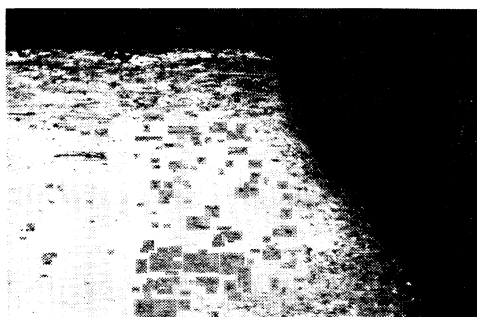


× 400



× 400

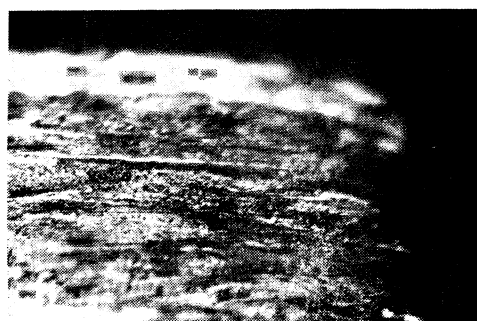
写真 24. 写真23 の中央付近を腐食したもの



(1) × 100



(2) × 400



(3) × 400

写真 25. 脱炭のある疲労破面

写真 26. A社横断面
走行車輪に接触したストランドを示す。

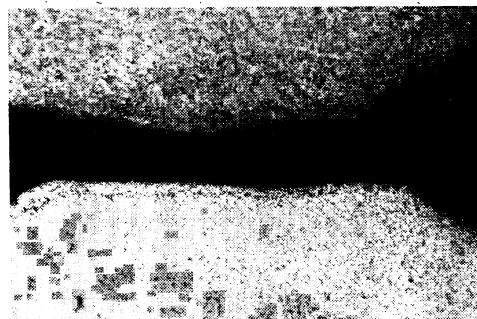
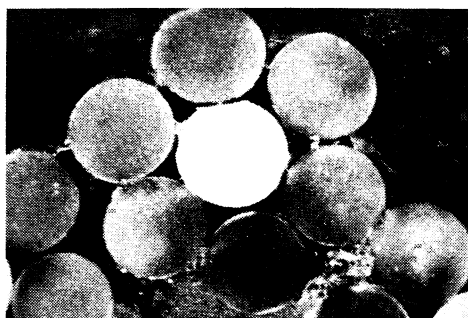


写真 27. 写真 26 に示す心線と側線の塑性変
形部分

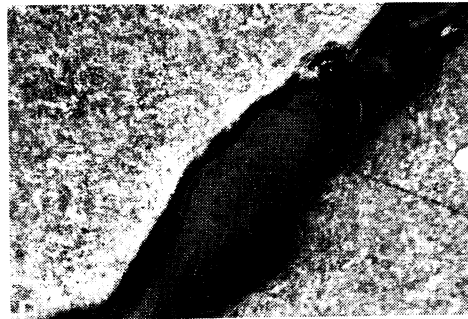


写真 28. 隣接ストランドと接触して塑性変
形した側線

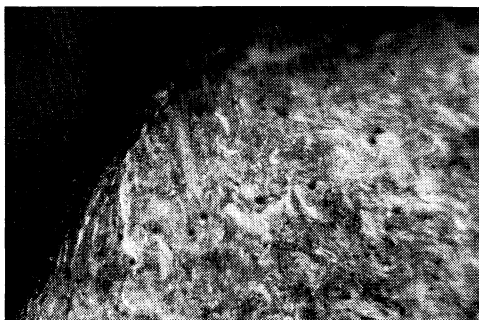
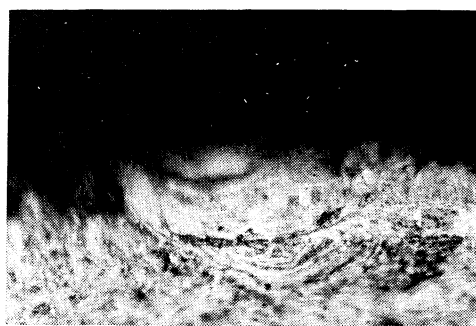


写真 29. 写真 28 の中央部左側の側線
を拡大したもの
× 400

(1)
× 400

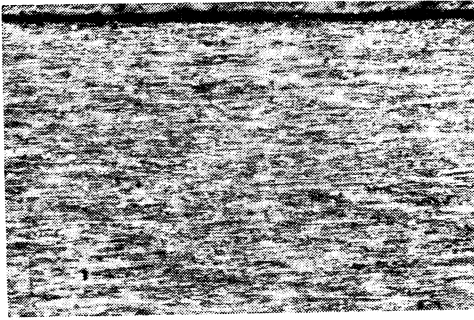


(2) × 400

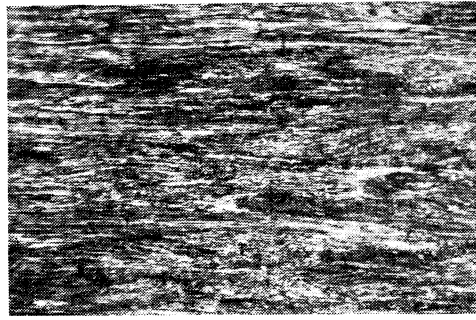


(3) × 400

写真 30. 写真 29 の相手側の側線で、ピンツをずらして逐次内部を見たもの



× 100

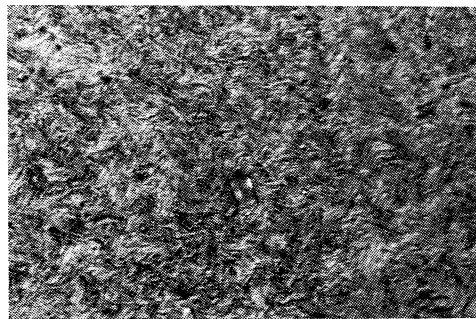


× 400

写真 31. B_2 の縦断面の組織

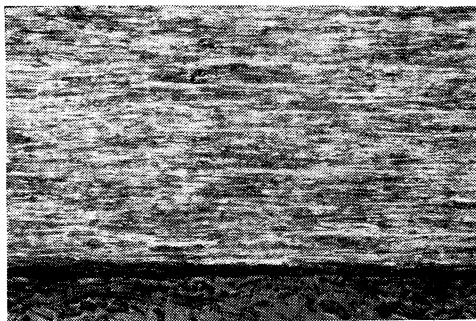


× 100

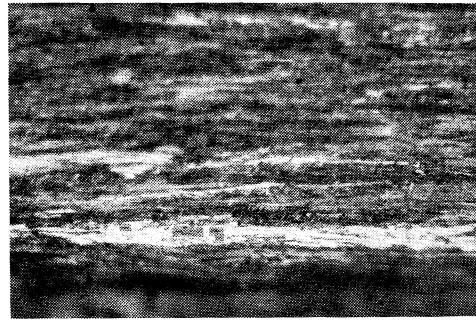


× 400

写真 32. B_2 の横断面組織



× 100



× 400 周辺部

写真 33. G_1 の周辺部に見られる脱炭で、この程度のものが全体にある。

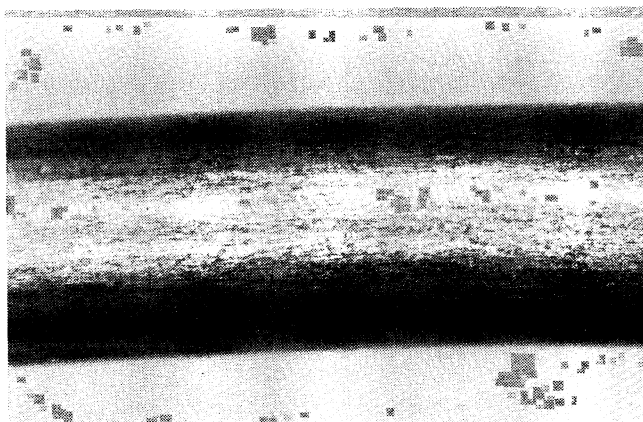


× 100

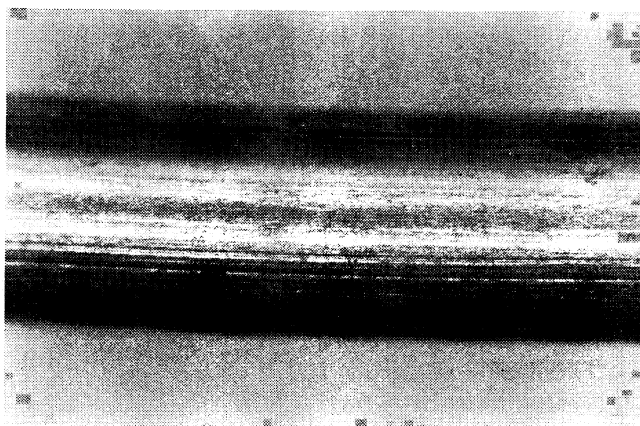


× 400 周辺部

写真 34. H の周辺部に見られる脱炭で、この程度のものが全体にある。



瑕のないもの



ダイス瑕のあるもの

写真 35. 素線の表面はだ

変形を受けたことがわかる。

写真3は、写真2の右上隅のタテ割れを見たものである。この断線箇所は往復回数 28,000 から 33,000 の間で発生したものである。

写真4は、同じ供試索の 57-ロープピッチに発生した谷断線を示す。

写真5は、同じく 33-ロープピッチに発生した山断線で、往復回数30,000で発生したものである。

写真6は車輪により塑性変形を受けた箇所のうち、もっとも変形度のひどい箇所の状態で、場所は上端から19ロープピッチである。

写真7は55ロープピッチ付近に発生した谷断線の破面で、外部にハネ出していたものである。

山断線の破面は素線の軸心にはほぼ直角方向に疲労が進行したあとを見せるものが多いが、A社の場合はタテ割れが多いためか、写真8のような不整破面が多い。

写真9はE社の張力 5 t、横荷重 0.75 t、往復回数 14,500 で寿命に達したロープの外観で、写真中央に見える断線箇所は2つあるが、A社のように表面がくずれていない。この写真は断線した片方の素線を取り除いてから撮影したもので、拡大すると写真10のようになる。写真中央部に見える凹みは、左側の断線した素線が最初に位置していた箇所と推定され、断線してこれだけのズレを起こしたものと考えられる。同様に上側の断線した素線が最初位置していた箇所は、右側中央付近の塑性変形のひどいところと推定される。なおこの素線は心線である。

写真11～13は山断線した同じ素線の破面近傍を角度を変えて示したもので、写真11は心線に接触して塑性変形した状態を示し、写真12は破面を示したもので、中央付近にタテ割れが見える。写真13は破面を背面と横から見たもので、左先端の尖っている部分が最後に破断した箇所であり、絞られて若干細くなっている。疲労起点は心線と接触して塑性変形を起こしている付近と推定されるが、いつも疲労起点が内部にあるとは限っていないようである。

写真14は写真13の破面から約 55 mm 離れたところの素線の融着状態を示したもので、この箇所は車輪に接触しない側にあり、心線との摩擦でこのようになったものである。

以上の外観検査から、本試験のような条件の場合のロープの疲労は輪荷重による影響がかなり大きいことが想像できる。また、疲労過程としては試験を開始して 1,000～2,000 往復回数で塑性変形が走行車輪側に起こり、この変形が進むとその素線はタテ割れを生じたり、疲労破面近くで再度の断線が起こる。そして、寿命に達した場合最初に断線した素線の破面は、大きく変形してくずれるような状態になる。また谷断線は後期に発生する傾向が強い。

b) 破面近傍の金属組織

写真15は山断線の破面を示したもので、下端隅の部分を拡大したものを添付したが、これを見ると繊維状組織が乱れており、かなり大きな圧縮がこの部分に作用したことがわかる。そして、このような箇所は一樣に腐食されず白い部分がよく見られたが、その他の部分ではとくに組織的な差違があるようには認められなかった。

写真16は心線に接触して融着状態を呈していた側線の縦断面を示したもので、かなり大きな凹凸が見られるほか、亀裂が進行しているのが見られる。この部分を拡大すると網目状に細分化して亀裂の走っているのが見られ、内部とは明らかに腐食の程度も異なり、もろくなっているように推定される。また凹凸の変化の激しいところでは、写真17に示すように断層ができたように局所的なこりが見られるのが普通であ

る。

さらに写真18も同様塑性変形した部分の縦断面であるが（写真14の素線）、周辺部に遊離フェライト状の白いものが見えるが、拡大してみるとその周辺はかなり組織が乱れており、左側の白い部分を1,000倍に拡大するとこの部分に亀裂の走っているのが見られる（亀裂の上の斜線は研磨きずである）。

写真19は山断線の疲労面から3.6 mm離れたところに見られた亀裂であるが、疲労破面の近傍にはこのような亀裂がよく発見できた。これら疲労亀裂は繊維状組織にはほぼ直交して走るのが特徴で、ときたま写真20のように進路が変わるのも見られた。これら亀裂の周辺は微細な亀裂であるのか、非金属介在物であるのかその判定はつけにくい、写真21に示すようにかなり黒いものが多い傾向がある。また亀裂の発生した反対側には写真22に示すような凹みがあり、そのような部分には写真18で示したような白い部分が見られた。

写真23はタテ割れの進行状況を示したもので、内部に突然大きなきれつが発生して成長したように推定される。なお中央よりやや上の方に繊維状方向に直交するきれつも見える。この部分を示したものが写真24で、周囲の組織ととくに変わった点は認められない。このようなことは疲労断線（山断線）を起こした位置に相当する隣接ストランドの素線の検鏡結果においてもいえそうであり、断線をおこしていないストランドの素線と、疲労断線した破面近傍の組織ならびに清浄度（非金属介在物の）に顕著な差異は認められなかった。

写真25は疲労起点と思われる周辺部に脱炭のあるものを示したものであるが、このような脱炭が疲労破面近傍につねに発見できるとは限らなかった。

c) 横断面の状況

前述のごとくロープを構成している素線は輪荷重によりかなり大きな塑性変形を局所局所で受けていることがわかったが、これを横断面で見た場合の状態も考察を進めるうえに必要なので、1割断線を起こした付近のロープを合成樹脂で固め、軸心方向に直角に切断して検鏡した。

写真26は車輪走行面のストランドを示したもので、心線がかなり大きく塑性変形を受けていることがわかる。写真27は心線が大きく凹んでいる箇所を拡大したもので、側線も若干変形している。なお心線が白っぽく見えるのは炭素含有量が側線に比べて少ないからである。写真28は隣接ストランドと接触して塑性変形した側線を示したもので、写真29は中央付近の角の部分拡大して示したもので、鍛造を受けたようになり組織が乱れているのがわかる。またこの素線の相手側の側線をピントをずらしながらみると、写真30に示すように最外層はすでにきれつが発生し、剝離現象を示しており、内部にはいるにつれて貝殻状のしま模様が発生しているのがわかる。

d) 疲労現象

疲労現象は普通つぎの段階に分けて考えられており、前項に掲げた写真はよくこのことを説明しているように考えられる。

まず第1段階は塑性変形と歪硬化である。素線断線の発生箇所は、塑性変形を受けた箇所に限られており、走行車輪に直接接触する素線がもっとも多いが、隣接ストランドと接触する素線外周がこれに次ぐようである。これら接触箇所においては鍛造加工を施したように組織の乱れが起こり、硬化現象が起こる。

第2段階はこの歪硬化がある一定値に達すると、微細なクラックが発生して内部に進行する。したがって、その近傍に不均一な組織があった場合、その部分に応力が集中しクラックの進行速度を助長すること

が考えられる。

第3段階は、この微細なクラックが成長し、近くのもと合体して成長し、最終的に破断する。

以上のように考えると、走行車輪に直接接触しない素線であっても断線を起こす素因は十分もっていることになり、断線の発生状態がきわめて不規則であるという事態についてもある程度納得がいく。しかし疲労起点と考えられる破面近傍の縦断面組織に、脱炭あるいは非金属介在物が異状に多いという傾向も得られなかったことを考慮に入れると、これらの欠陥がどの程度影響しているかを吟味することはむずかしい問題である。

以上、本試験における6×7ロープの疲労現象を観察してその特徴をあげると、塑性変形を起こした箇所に疲労起点があることであり、各素線の受ける塑性変形を極力少なくすることが寿命を延ばす方策に有効であると考えられる。すなわち走行車輪数をふやすこと、シーブ溝面の曲率、材料、硬さなどを適正にすることなどがあげられるが、これらについては今後の実験で確かめたい。

1.3.6 結 言

小角度曲げ疲労試験機により6×7c/L 2種 16mm [旧 JIS] ロープについて疲労試験を行なった結果を要約するとつぎのとおりである。

1) 引張力・横荷重をそれぞれ3水準ずつとってロープの寿命（林野庁制定の集材機作業基準に示されている使用制限に達するまでの往復回数）を求め、(1)式により算出された曲げ応力の間で相関を求めてみると、第8図に示すように両対数グラフにおいて両者はほぼ1つの直線上に乗ることがわかった。

このS-N曲線は、第1図に示すR. WOERNLEの試験結果のうち、主索領域のデータからも得られた。

2) 本試験から得られたS-N曲線を利用すると第6、7図に示すような主索の運搬可能重量が算出できる。従来このような情報は経験的に、ごく大まかなことしかわかっていなかったが、このような図面を活用するとロープ径の決定、中央垂下比の選択等設計に当たって必要な因子が寿命を考慮の上定められるので便利である。今後はこのグラフが現地にどのくらい適合しているかどうか検討してみたいと考えている。

3) 寿命に達するまでに素線が断線していく経過を調べてみると、第7-1～3図に示すように、同一条件においてもかなりの相違があり、走行車輪にいちばん接触した中央部に断線が集中するといったものでもない。この原因は素線そのものに何か欠陥があるのではないかと思い、破面近傍の金属組織を重点に検鏡したが、予期した成果は得られなかった。

4) 使用制限時のロープの切断荷重は、新品時の60～90%であり、またこのときの伸び率はほとんど0.4～0.7%であったが、これらのことは安全管理のうえで重要な情報と考えられる。

2. ワイヤロープの各社性能比較試験

2.1 結 言

ロープの寿命に影響を及ぼす要因の探求は、多くの研究者によってなされているが、その共通点は特定の因子だけを変えてその効果を検出する研究手法がとられたことである。この点第1報は実際に市販されている各社ロープ（6×9 10mm）について寿命の比較試験を行ない、従来寿命に影響するといわれてきた因子と寿命との相関を求めたところに特色がある。今回はさらに検討する因子の数をふやし、素線の

機械的強度試験，成分分析，金属組織ならびに非金属介在物の検鏡，硬度およびロープのトルクを測定し，これらの因子と寿命との相関を求めてみた。

2.2 試験方法

2.2.1 供試ロープ

供試ロープは6×7c/L 2種（旧JIS）で，1964年春林野庁において購入したロープのほかに，依頼試験でメーカから直送されたものを含めて11社の製品である。

会社名をアルファベット順で示すとつぎのとおりである。

朝日製綱所，イゲタ製綱，関西金属製綱，川崎製鉄，興国鋼線鋼索，日本鋼線鋼索，神鋼鋼線鋼索，昭和製綱，帝国産業，東京製綱，東洋製綱（東京製綱と合併前）

なお会社名の称呼は前記の順位とは関係なく当方で適宜決めた記号A，B，C，………K）によることにし，同じ会社から2つの供試ロープを得たものについてはB₁，B₂；G₁，G₂と表わすことにした。

2.2.2 試験期間

昭和40年4月より同年8月までである。

2.2.3 試験条件

- 1) 試験装置は前編と同じである。
- 2) 試験条件は第6表のとおりである。
- 3) 走行車輪

第6表 試験条件

張 力	横 荷 重	引張応力	曲げ応力
5 (t)	0.75 (t)	53 (kg/mm ²)	79 (kg/mm ²)
4	1	42	118
3	1	32	136

材料は機械構造用炭素鋼 S55C で，これを削り出し加工しただけのもので，溝底直径は150mm，溝の曲率半径は9 mm（ロープ半径の約1.1倍）である。

2.2.4 疲労試験実施要領

1) 試験順序

試験順序は張力 5t，4t，3t の順とし，5t の条件では2回行ない（ただし，バラツキの多い場合は3回），他は1回ずつ行なった。

2) 走行車輪の交換

走行車輪は各社の供試ロープが変わるごとに新しいものと交換した。したがって，車輪の溝面には前記3条件の試験が終了するところには浅い縄目がついた。

3) 調査事項

寿命に到達するまでのロープ径，伸びならびに断線発生状況を調査したが，その要領は前編と同じである。

また，疲労試験が終了したロープは，5t の条件のもの1本は解体して内部断線の有無を調査するためにあて，その他のものは全部切断試験を行ない，残留強度率を求めた。ただし，残留強度率は新品時の2本の切断荷重の平均値に対する％とした。

2.2.5 素線検査

新品の供試ロープの全素線について，切断試験，ネジリ試験，巻解試験，絞り検査，金属組織の検鏡（縦断面の検鏡は1ストランドだけにとどめた），硬度検査（横断面で1ストランドだけ），表面はだ検査を行なった。ただし，前から3項目までは試験機のつごうで東京製綱株式会社，興国鋼線鋼索株式会社に

検査を依頼した。また川崎製鉄株式会社千葉製鉄所に依頼して、1ストランドの試料について定量分析ならびにオーステナイト結晶粒度の測定を行なった。

2.2.6 ワイヤロープの検査

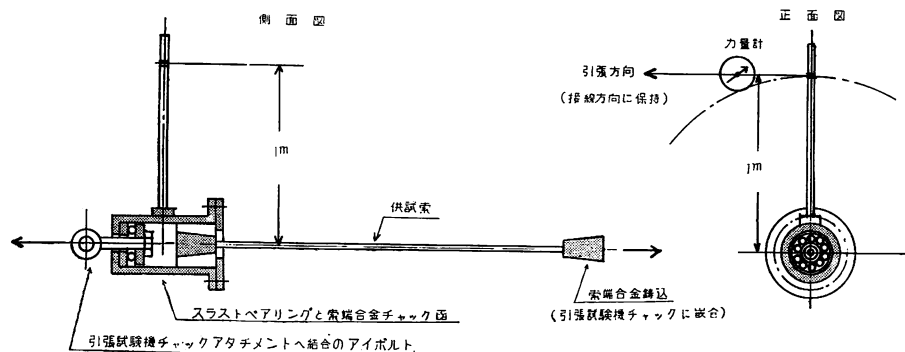
新品について、型付率、ロープトルクおよび切断荷重を求めた。その測定要領はつぎのとおりである。

1) 型付率

第1報に述べたごとく定盤上においてストランドの山の高さをハイトゲージにより測定し、各ストランドごとにその平均値を求めて型付率を算出した。

2) ロープトルク

ロープトルクの測定は第11図に示すような金具を使用して行なった。すなわち、供試ロープの両端末に合金でソケット加工を施し、一端は横型の100t引張試験機(容量25t)のチャック部に固定し、他の一端はトルク測定具内に収めて負荷を与えると、合金チャック函はスラストベアリングで荷重を受けるため回転を起こす。そこで、合金チャック函のほぼ中央部に立てた腕を(これとほぼ直角方向に)ばねばかりを介して引っ張り、負荷を与えるまえにあった位置に腕をとめて引張力を読みとった。なお腕の長さは中心部から1mで、荷重は1, 2, 3, ………, 7tの7とおりを与えた。また試料長はソケット間隔で約2mとした。



第11図 主索トルク測定法

3) 切断荷重

切断荷重の測定は横型の100t引張試験機(容量25t)を用いて行なった。はじめに予荷重2tを与え、荷重を零に戻したところを原点にとり破断にいたるまでの引張力と伸びの関係を記録にとった。試料長は約2mで、試料数は2本である。

2.3 試験ならびに検査結果

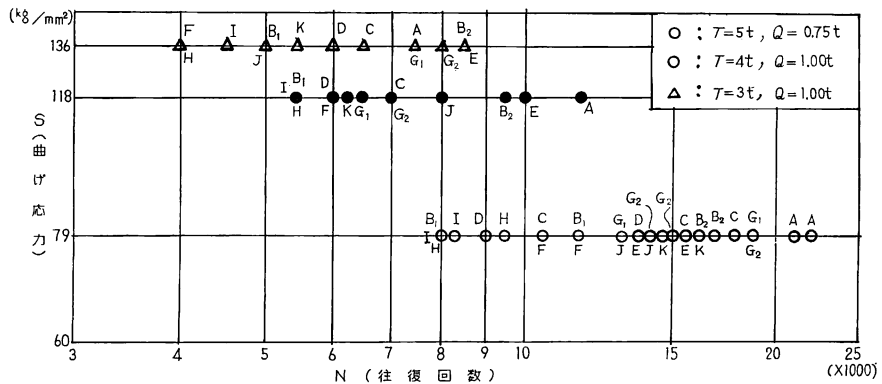
2.3.1 疲労試験結果

各試験条件ごとの寿命(廃棄基準に達するまでの往復回数)を一括表示すると第7表のごとくなる。なお張力5tの試験条件で寿命が最高だったA社を100%とし、各社の寿命百分率を求め、この合計で順位を示したが、会社間にかかなりの相違のあることがわかる。これは第1報(6×19 10mmの各社比較試験)においてみられた傾向とよく似ている。

つぎに往復回数と曲げ応力の関係を、対数目盛で一括図示すると第12図のごとくなる。各会社ごとの3

第7表 疲 勞 試 験 結 果

条件 寿命 試料	張 力 5 t 横荷重 0.75 t		張 力 4 t 横荷重 1 t		張 力 3 t 横荷重 1 t		合 計	
	寿 命	%	寿 命	%	寿 命	%		
A	21.4 ^{×1000}	100	11.3 ^{×1000}	100	7.5 ^{×1000}	100	300	1
B ₁	8.7	41	5.5	49	5.1	68	153	10
B ₂	16.3	76	9.5	84	8.5	113	273	2
C	14.7	69	7.0	62	6.5	87	218	6
D	11.2	52	6.0	53	6.0	80	185	9
E	14.5	68	10.0	89	8.5	113	270	3
F	11.0	51	6.0	53	3.8	51	155	11
G ₁	15.5	72	6.5	58	7.3	97	227	5
G ₂	16.2	76	7.0	62	8.0	107	245	4
H	8.8	41	5.5	49	3.9	52	142	13
I	8.3	39	5.5	49	4.5	60	148	12
J	13.5	63	8.0	71	5.0	67	201	7
K	15.3	72	6.3	56	5.5	73	201	7



第12図 各社総合のS—N曲線図

条件の寿命についてみると、データのバラツキも考慮すれば、この3点はほぼ直線上にあると見なせる。しかし、会社間の差は相当大きく、一括してただ1つのS—N曲線として表現することは無理のようである。

2.3.2 製品検査

新品時の素線ならびにロープについて、試験を行なった結果を一括表示すると第8表のとおりである。また、素線の化学成分を1ストランドについて定量分析した結果、ならびにオーステナイト結晶粒度の測定結果とを写真で示すと付録1のとおりである。

2.3.3 疲労試験後の残留強度

廃棄基準（主として1割断線）に達した供試ロープの切断試験結果を表示すると第9表のとおりである。これをみると残留強度率は最高91%，最低62%，平均77%ぐらいにあることがわかる。この傾向は前編の結果とほぼ同じであり（第4表）、安全管理の上で参考になる事項と考えられる。

第8表 製品検査一括表

社名	A	B ₁	B ₂	C	D	E	F	G ₁	G ₂	H	I	J	K
項目													
(側線) 素線直径 (mm)	1.776	1.801	1.779	1.774	1.774	1.772	1.774	1.795	1.748	1.791	1.764	1.755	1.768
標準偏差	0.0070	0.0062	0.0129	0.0112	0.0112	0.0105	0.0086	0.0074	0.0144	0.0116	0.0249	0.0021	0.0139
(側線) 素線切断荷重 (kg)	459	437	418	408	436	407	436	440	423	450	425	405	415
標準偏差	11.30	11.52	11.77	12.47	12.41	4.63	11.79	7.4	5.44	6.30	10.33	3.37	14.22
(側線) 素線抗張力 (kg/mm ²)	185.2	171.8	164.3	166.1	176.5	165.1	176.6	174.5	177.4	179.0	174.0	165.8	169.0
標準偏差	5.6	4.5	1.9	5.2	5.8	3.1	4.6	3.4	2.3	2.7	6.1	27.6	2.0
(側線) 捻回値	29	38.7	33.2	37.4	36.7	41.0	35.5	37	39.4	32.4	38.3	37.1	37.8
標準偏差	7.5	3.2	2.7	7.4	1.3	3.8	3.5	3.1	12.9	1.8	4.8	4.8	6.2
(側線) 捻り率 (%)	44.4	49.1	58.4	53.4	52.4	57.6	53.0	54.9	55.1	50.8	50.7	52.1	57.4
標準偏差	2.3	2.1	2.3	2.6	2.6	2.6	3.1	3.5	4.7	1.8	3.2	4.49	1.8
(側線) 素線硬度 (Hv, 200 g)	500~440 平均 475	430~370 395	470~425 445	435~375 405	460~385 425	450~370 415	455~395 430	460~360 410	465~395 420	441~385 415	480~405 460	460~370 435	465~390 425
(中心線) 素線直径 (mm)	1.862	1.828	1.898	1.848	1.802	1.983	1.840	1.858	1.858	1.812	1.820	1.970	1.820
標準偏差	0.0100	0.0128	0.0391	0.0128	0.0117	0.0331	0.0064	0.0142	0.0042	0.0089	0.0077	0	0
(中心線) 素線切断荷重 (kg)	368	434	470	447	425	550	475	469	558	448	455	511	461
標準偏差	9.47	5.80	3.35	42.94	17.63	16.70	19.18	1.69	15.59	12.96	6.29	4.20	1.67
(中心線) 素線抗張力 (kg/mm ²)	133.3	165.3	165.8	167.4	166.9	178.1	178.8	167.7	203.5	173.8	175.7	167.7	171.6
標準偏差	2.7	3.9	1.2	1.4	7.3	20.0	16.8	1.5	7.0	6.7	3.1	4.64	0.65
(中心線) 捻回値	34	39.5	33.2	37.2	35.5	34.8	34.9	41.0	31.8	34.8	36.0	33.3	39.2
標準偏差	5.57	3.50	0.98	5.85	41.8	2.03	2.07	3.23	3.87	2.48	3.52	5.17	4.45
中心線の側線に対する増径率 (%)	4.8	1.6	5.6	4.4	1.7	11.9	3.8	3.5	6.3	1.2	3.4	12.3	3.0
キズ線 (42本中) (本)	0	6 (中心線2本)	0	9	4 (1本)	0	10	7	2	0	8 (3本)	2	1
鋼索直径 (mm)	16.83	16.73	16.63	16.83	16.75	17.45	16.67	17.21	16.57	17.07	16.17	16.67	17.00
鋼索切断荷重 ヨリ減り (%)	16.850 7.6	16.625 9.3	16.357 8.4	16.200 6.7	16,850 7.5	16.300 8.8	17.100 8.0	17.000 9.5	17.30 7.4	16.950 10.2	16.100 10.5	16.60 6.3	16.275 7.8
型付率 標準偏差 (%)	93.0 2.3	89.7 4.0	95.1 1.9	92.8 4.7	87.9 4.4	90.6 5.1	94.6 2.7	97.2 2.8	92.6 0.7	91.6 4.0	87.6 2.5	92.8 0.9	97.7 1.8
ローブ直径に対するヨリ長の比	7.86	7.74	7.46	8.22	8.02	7.92	8.57	7.79	7.62	7.95	8.32	7.63	7.58
鋼索トルク (資料 長2m 張力7t) (kg/m)	11.2	12.3	12.3	10.9	11.1	10.6	11.1	10.6	11.7	14.0	10.6	12.0	12.1
鋼索の重量 塗油のまま g/m	924.8	979.4	997.7	942.1	918.1	983.7	933.6	984.7	930.3	956.8	915.1	971.4	956.4

第9表 疲労試験後の残留強度

資料	新品の平均 切断荷重 (t)	残 留 強 度 (t)			残 留 強 度 率 (%)		
		5×0.75	4×1	3×1	5×0.75	4×1	3×1
A	16.85	12.30	12.35	12.90	73.00	73.80	76.60
B ₁	16.63	14.00	13.40	11.90	84.20	80.60	71.60
B ₂	16.38	13.90	11.80	12.40	84.90	72.00	75.70
C	16.55	12.80	12.20	10.25	77.30	73.70	61.90
D	16.58	14.20	12.95	10.65	85.70	78.10	64.20
E	16.35	14.30	14.80	13.95	87.50	90.50	85.30
F	17.15	13.00	14.00	14.60	75.80	81.60	85.10
G ₁	17.10	11.88	11.75	13.75	69.40	68.80	80.40
G ₂	17.18	11.85	10.00	10.80	69.10	58.30	62.90
H	16.95	12.50	12.75	13.25	73.80	75.30	78.10
I	16.05	14.10	14.05	13.80	87.90	87.60	86.10
J	16.63	12.30	11.90	13.45	73.90	71.60	80.90
K	16.28	12.00	13.50	12.40	73.70	83.10	76.20

2.3.4 金属顕微鏡による素線検査

1) 組織について

各社の横断面ならびに縦断面について検査した結果を要約すると、つぎのとおりである。なおその標準的な組織を示すと写真31, 32のとおりである。

- ① 心線と側線の間にはA社を除いて組織的な相違は認められなかった。
- ② 同一会社内においては、各素線の組織はほとんど同じとみなしうるほど近似していたが、会社間の差は若干あるようである。

2) 脱炭について

脱炭は全体としては少なかったが、写真33, 34に示すような軽度の脱炭が認められた。その結果を表示すると第10表のとおりである。なお横断面検査欄に、()で示した数字はクラックのあった素線本数で、A社は13本もあり、E社は1本で、他社には発見されなかった。

3) 非金属介在物について

非金属介在物について調べた結果を要約すると、つぎのとおりである。なお各社の標準写真を付録2に示す。

- ① 各社とも各素線間にとくに有意な差は認められなかった。
- ② 非金属介在物の大きさ、形状、清浄度などについては、会社によって特徴のあることがわかった。

2.3.5 素線の表面はだ

実体顕微鏡により素線の表面はだを写真撮影して各社比較すると、若干会社間に差違が認められるが、ダイスマークのある瑕線はきわめて小数であった。標準的なものを示すと写真35のとおりである。

2.4 考 察

2.4.1 素線断線の発生状態と寿命

ワイヤロープの寿命に大きく影響するといわれている要因として、撚りの均等性がある。撚りが不均等であると、特定のストランドあるいは特定の素線に応力が集中し、そのためその箇所が早期に疲労断線と

第10表 脱炭検査表

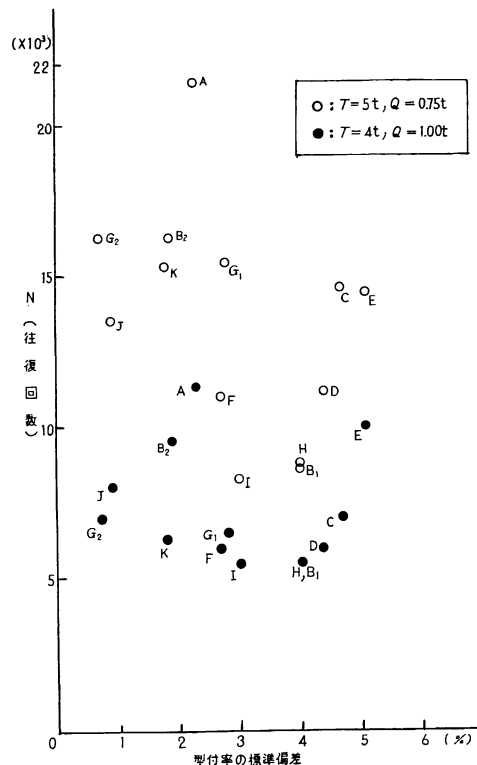
資料記号	縦断面 検査	横 断 面 検 査						脱 炭 合 計	クラック 合 計
		ス ト ラ ン ド No.							
		1	2	3	4	5	6		
A	1 1(軽度) 7(軽度) 7(軽度)	1(2)		1(3)	(5)	1(2)	(1)	3	13
B ₁		2		2	2		8		
B ₂									
C									
D					1		1		
E		6(1)	1			7	1		
F					1	1			
G ₁									
G ₂									
H		7(軽度)	4	5	5	4	2	22	
I			1					1	
J									
K		1					1		

注：1. 表の数字は素線の本数
 2. ()の数字はクラックのあった素線の本数

起こし、それだけ寿命が短くなると考えられるからである。しかし、撚り機の構造からして各素線あるいは各ストランドの負荷を一定に保ちながらストランドあるいはロープを撚りあげることは困難であるので、撚り1つをとってみてもロープは均質でないことが想像される。

第11表は各社ごとにその発生箇所をA～Fの記号（同表備考参照）で左側に、また供試ロープを切断する際、全試料を通して設けたストランド番号を右側に配して一括表示したものであるが、寿命の短いB₁、H等は特定のストランドに断線が集中しているのに対し、寿命の長いA、B₂、G₂は全部のストランドに断線が発生している傾向の強いことがわかる。この傾向は従来の定説を裏付けしたものと解されるが、この原因の1つとして各ストランドの型付けの不均一性が考えられる。

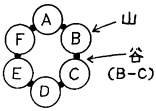
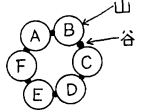
現在製造されているロープのほとんどは、その反発性を除去するためこの型付けを行なっている。すなわち、ロープに撚りあげる直前スト



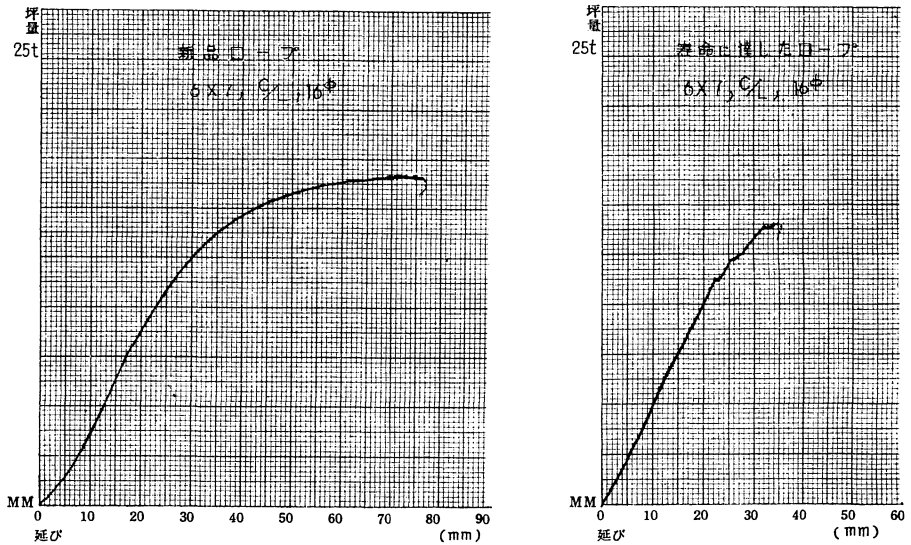
第13図 型付率の標準偏差と寿命の関係

第11表 供試ロープ全長にわたって発生した素線断線の発生箇所ならびに発生ストランド番号別本数

社名 断線 試験条件	A		B ₁		B ₂		C		D	
	発生箇所	ストランド	発生箇所	ストランド	発生箇所	ストランド	発生箇所	ストランド	発生箇所	ストランド
	A～F	No. 1～6	A～F	No. 1～6	A～F	No. 1～6	A～F	No. 1～6	A～F	No. 1～6
張力 5t 横荷重 750kg	A 谷3(A～F) B 谷4(C～D) C 谷3(D～E) D 谷3(D～E) E F	1 谷1 2 谷1 3 谷4 4 谷1 5 谷3 6	山4谷1心1(A～F) 山1	山1 心1 山2 谷1	山6谷1(A～F) 谷1(B～C) 谷1(D～E)	山3 谷1 山2 谷1 山1	山12 心1 山4 心1 山3 山2 山2 山1	山19谷2心1(A～F)	山6 谷1 山4 谷1 山1 山2 山2 山2 谷1	
	A 谷4(A～F) B 谷4(C～D) C 谷4(D～E) D 谷4(D～E) E F	1 谷1 2 谷2 3 谷4 4 谷2 5 谷3 6	山2谷2 (A～F) 山2 谷1 (B～C)	山4 谷3	山1谷6(A～F) 山1 山1 谷1	山1 谷1 谷4 山1 谷1	山6 山2 山1 山3	山9 心1	山3 心1 山2 山2 山2	
	A 谷2山2(A～F) B 山2 C 谷3 (C～D) D 谷2 (D～E) E F	1 山2谷2 2 3 谷1 4 山1 5 谷3 6 山1谷1					山19 山2 山4 山3 山4 山6			
張力 4t 横荷重 1t	A 山7谷1谷1心1(A～F) B 山1谷2 (D～C) C D E F 山1	1 山1 2 3 谷1 4 5 山4谷3心1 6 山4 心1	山7谷2 (A～F)	山1 谷1 山1 谷1 山4 谷1 山1	山7 谷2	山2 山2 山1 谷1 山1	山8 山1 山3 山1 山3	山10 山5	山3 山4 山4 山1 山3	
張力 3t 横荷重 1t	A 山5谷2 心1(A～F) B 谷1 (B～C) C D E F	1 山3谷1心1 2 谷1 3 山1 4 谷1 5 山1 6	山7谷2 (A～F)	山2 山2 山1 谷1 山2 谷1	山3 心1 山1	山1 山1 心1	山13 谷1(A～F) 山2 谷1 山2 山4 山4 山1	山11 山1	山3 山6 山1 山1 山1	

社名 断 線 試験条件	E		F		G ₁		G ₂		H		I		J		K		備 考
	発生箇所 A～F	ストランド No. 1～6	発生箇所 A～F	ストランド No. 1～6	発生箇所 A～F	ストランド No. 1～6	発生箇所 A～F	ストランド No. 1～6	発生箇所 A～F	ストランド No. 1～6	発生箇所 A～F	ストランド No. 1～6	発生箇所 A～F	ストランド No. 1～6	発生箇所 A～F	ストランド No. 1～6	
張力 5t 横荷重 750kg	A山7 B 2 C 3 D 4 E 5 F 6	山1 山1 山1 山3 山1	山10 山4	山2 山6 山3 山3	山12 山2	山4 山4 山1 山3 山2	山14 山1 山1 山5 山3	山4 山1 山1 山2	山4 山1 山1 山2	山4 山1 山1 山3	山10 山1 山7 山2	山8 山3 山3 山1	山9 山2 山3 山1	山5 山1	山1 山2 山1 山2		
	A山8谷1 B山1谷1 C 3 D 4 E 5 F 6	山1谷1 山1 山1 山2 山1 山3谷1	山8 山1 山5 山1 山1	山1 山1 山1 山1	山3 山2	山4 山1 山1 山1 山2	山8 山1 山2 山1 山1 山2	山7 山1 山3 山1 山1 山1	山10 山1 山7 山2	山8 山3 山3 山1	山9 山2 山2 山1 山2						
	A B C D E F	1 2 3 4 5 6			山11 山3 山1 山3 山2 山2												
張力 4t 横荷重 1t	A山9 B山3 C 3 D 4 E 5 F 6	山1 山3 山3 山1 山4	山14 山1 山2 山1 山3 山2	山5 山1 山2 山3 山2	山5 山1	山6 山1 山6 山1 山2 山1	山14 山3 山6 山1 山2 山1	山11 山1 山1 山3 山4 山2	山10 山1 山4 山3 山2	山6 山6 山3 山2	山4 山3 山3 山2	山9 山1 山5					
	A山11 B山3 C 3 D 4 E 5 F 6	山2 山2 山4 山2 山4	山7 山2	山5 山2	山10 山1 山2 山6 山3	山13 山3 山3 山6 山1	山8谷1 山1 山6 山1	山8 山1 山5 山1 山1	山3心1 山2 山1	山10 山1	山4 山1						

林業用鋼索の疲労に関する研究 第2報 (上田ほか)



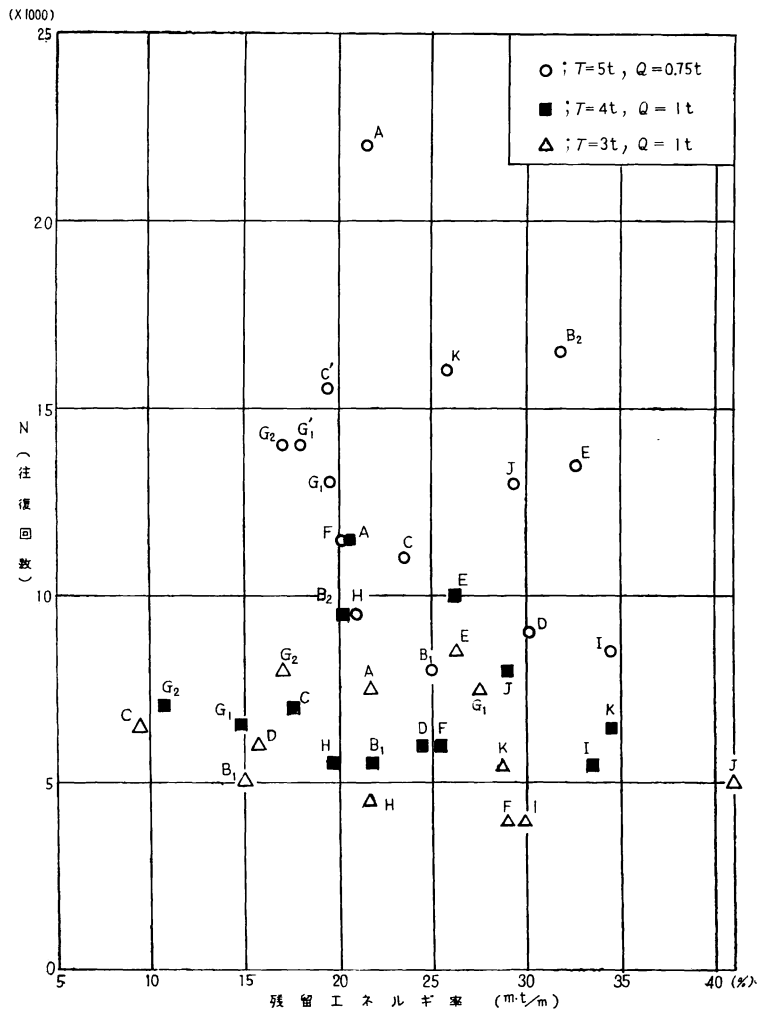
第 14 図 ワイヤロープの引張り伸び線図

第12表 新品ロープのエネルギーと寿命に達したロープの残留エネルギー

資料	新品ロープのエネルギー			各条件での 寿命総合比 率 %	寿命に達したロープ の残留エネルギー t・m/m			新品エネルギーに対する 残留エネルギーの比率 %		
	t・m	t・m/m	誤差率 %		5t×0.75t	4t×1t	3t×1t	5t×0.75t	4t×1t	3t×1t
A	0.590 0.556	0.522 0.517	0.39	300	0.104	0.104	0.108	20	20	21
B ₁	0.542 0.599	0.526 0.565	3.48	158	0.134	0.087	0.078	25	16	14
B ₂	0.946 0.901	0.474 0.449	2.60	273	0.145	0.088	0.069	31	19	15
C	0.624 1.307	0.542 0.651	9.21	218	0.127	0.104	0.053	22	17	9
D	0.537 0.595	0.473 0.550	7.42	185	0.160	0.116	0.081	31	23	16
E	0.556 0.598	0.532 0.580	4.13	270	0.185	0.194	0.145	33	31	26
F	0.555 0.526	0.531 0.482	3.01	155	0.109	0.132	0.163	22	27	33
G ₁	0.567 0.544	0.515 0.533	1.52	227	0.102	0.077	0.152	19	15	29
G ₂	0.929 0.856	0.459 0.428	3.38	245	0.072	0.047	0.071	16	11	16
H	0.641 0.485	0.622 0.466	14.13	142	0.113	0.107	0.118	21	20	22
I	0.852	0.424		148	0.143	0.134	0.128	34	32	30
J	0.789 0.796	0.395 0.263	19.69	201	0.100	0.104	0.137	30	32	42
K	0.832 0.628	0.416 0.313	13.97	201	0.098	0.127	0.111	27	35	30

ランドを強制ローラにより屈曲させて塑性変形を起こさせ、ロープに撚りあげた状態に近い形状にするが、このため各ストランドごとに普通3個のローラの関係位置を調整し、そのロープに適した型付け率を与えているため、各ストランドの型付け率を全く同じに調整することはかなりの熟練を必要とする。普通型付け率を測定すると、6本のストランドの間にはかなりのバラツキがあるが、このように不均一に型付けされたストランドを撚れば、ロープの撚りが均等であることを期待するのは無理で、当然寿命が短くなることが予想される。

そこで、第8表に掲げた型付け率の標準偏差と第7表に示す寿命の関係を図示すると第13図のごとくなるが、これをみると期待したほど顕著な傾向は示されていないが標準偏差の少ないものの方が寿命が長い群にはいっていることがわかる。以上のことを総合すると、素線断線の発生状態が均等な傾向を示すものは撚りが均等であることを物語るものと解され、その要因として型付け率のバラツキも大きな要因のように考えられる。



第15図 引張試験結果の残留エネルギー率（新品 100% に対する）と寿命

2.4.2 ロープのエネルギー

ワイヤロープを引張試験機にかけてその引張力と伸びの関係を記録すると、第14図のような線図が得られる。この曲線の包む面積は静的引張試験におけるロープのエネルギーということになる。このエネルギーとロープの寿命との関係を直接関係づけて考えてみることは、疲労機構からいって無理のように考えられるが、参考までに各社の新品時ならびに疲労試験後のエネルギーを求めてみると第12表のごとくなる。これをみると新品時のロープエネルギーは各社間にかなりの相違があるほか、同一会社の供試索間にもバラツキのあることに気付く。いまこれらと疲労試験結果（第7表）との関係を図示すると第15図のごとく、ほとんど相関は認められない。また、2本の供試ロープの1m当たりエネルギーの誤差率と、寿命の相関もほとんど認められなかった。

つぎに疲労試験後の残留エネルギー率をみると最低で9%，最高で41%，平均20～30%の値が多く、残留強度の低下率に比べてロープエネルギーの低下率の方が大きいことがわかる。このことは林業の実態から見て重要な情報である。すなわち、ロープは地上からかなり離れて架設されているのが普通であるから、容易に点検ができないうえ、衝撃的張力増加が頻発するので、廃棄基準に近づいたロープを使用するのは切断の危険がきわめて高いことが推量される。したがって、すでに初期断線の発生したロープを使用している場合は運転操作に十分留意して、衝撃的な張力増加を与えないような配慮が肝要である。

2.4.3 各種要因と寿命百分率との関係

第9表に掲げた各社寿命百分率と、第10表に掲げた各種要因の関係を図示すると第16-1～2図のようになる。これを見るといずれの因子を採ってみても、単独に寿命百分率との間に相関の高いものはないことがわかる。しかし、きわめて成績の良かったA社に焦点を合わせて、各因子を比較すると、A社のロープは特徴のあることがわかる。以下これを中心に考察を加える。

1) 索線の抗張力ならびに硬度について

第16-1図に示すように側線の切断荷重はA社が最高である。しかし、全体としての傾向は側線切断荷重が低くなるにつれて寿命百分率は大きくなっている。また心線の切断荷重を調べてみると（第8表）、A社の場合は他社に比べて約100kgも低い値を示していることに気付く。このことは抗張力についても同様である。さらに興味深いことは、普通心線は側線に対して数%増径するが、同一ロッドを使用した場合、加工度の関係で心線の抗張力は若干低目になる。しかし今回の供試ロープをみると必ずしもそうはなっていないで、つぎのような4つの群に分類される。

(心線の抗張力) > (側線の抗張力) E, G₂

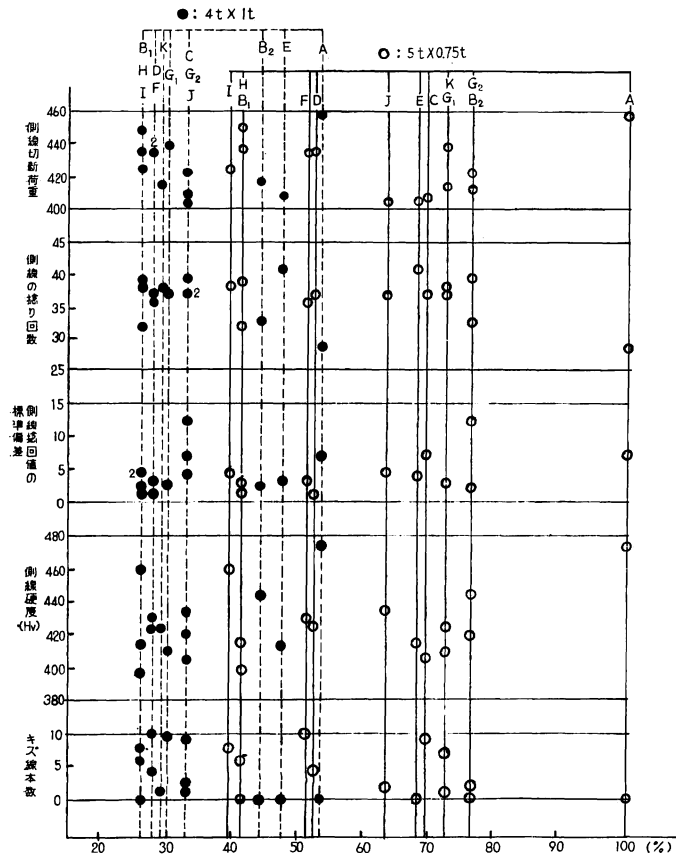
(同 上) ≒ (同 上) B₂, C, F, I, J, K

(同 上) < (同 上) B₁, D, G₁, H

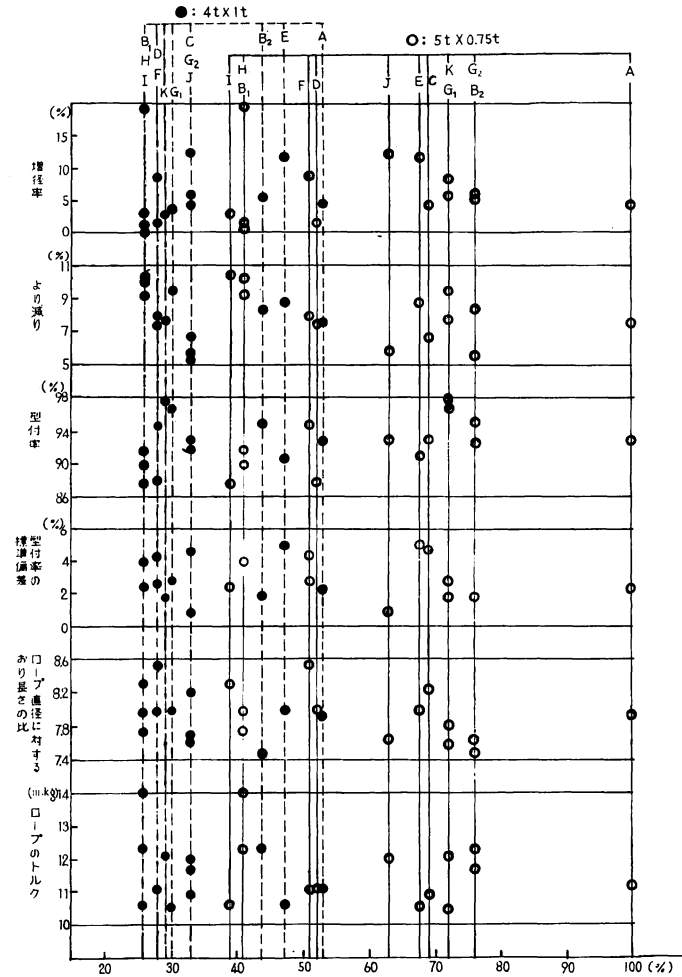
(同 上) ≪ (同 上) A

これをみると、成績の良いもの、悪いものが適当に各群にはいっており、どの型のものが良いということはいえないようである。そしてAだけはとび離れて違った存在であることがわかる。検鏡の結果他社の

ここでいう鋼索エネルギーは全部のストランドが切断するまでのものでなく、切断試験の要領に準じて第1回目のストランド切断までのエネルギーである。また、伸びの検出は、引張試験機のムラの移動長により行なっているが、予荷重を2t与えていったん0に戻し、それから引張っているので、チャックの塑性変形による誤差は微小と考えられる。



第16-1図 各種要因(素線)と寿命百分率との関係



第16-2図 各種要因(ロープ)と寿命百分率との関係

ものは、心線と側線との間にほとんど金属組織的な差違はなかったが、A社だけは心線の炭素含有量が0.40%ぐらいであることがわかった（このことはA社に照会して確認した）。

このことは重要な意味をもつものと考えられる。すなわち、心線の抗張力がこのように極端に低い場合は、硬度も当然側線より低いから心線が塑性変形を受ける度合が大きくなり、したがって、心線の増径率が適当であれば心線と側線間の接触圧力の低下はもちろん、側線相互間の接触圧力も低下し、さらにこの塑性変形のためにストランド内の各素線のなじみが良くなって型くずれ防止の効果もあるはずで、耐疲労性を増すことが十分考えられる。

以上のような考察の結果、A社の寿命が特に良かった原因の1つに、心線が0.40%Cの線材を使用していたことにあるのではないかと推量される。

2) 側線のネジリ回数ならびに硬度について

ロープは素線によって作られているから、引張力を受けた場合各素線はネジリ力を受ける。したがって、素線はネジリに対しても強靱さが要求される。JISには線径に応じてそれぞれ最低限度の回数を定めており、供試ロープの場合27回である。ネジリ試験の結果を要約すると、A社以外のものは27回を下回ることとはなかったが、A社の場合は36本（心線を除く）中7本が27回を下回り、また異状破面のものが13本もあり、疲労試験の結果が最高になるとはとても想像されなかった。事実、A社の場合タテ割れがよく発生したが、これは寿命に近づくころによく見られ、他社の場合はタテ割れはあまりなかったが、寿命の方はA社の半分ぐらいのものが多く、とくにタテ割れの発生するのをとがめることもなさそうである。そして、ネジリ回数と寿命百分率の関係をみていくと、むしろネジリ回数の低い方が良いような傾向があり、その標準偏差はなんら関係がなさそうである。このことは、ネジリ回数が直接寿命に対して影響するところが少ないことを物語るものと考えられる。

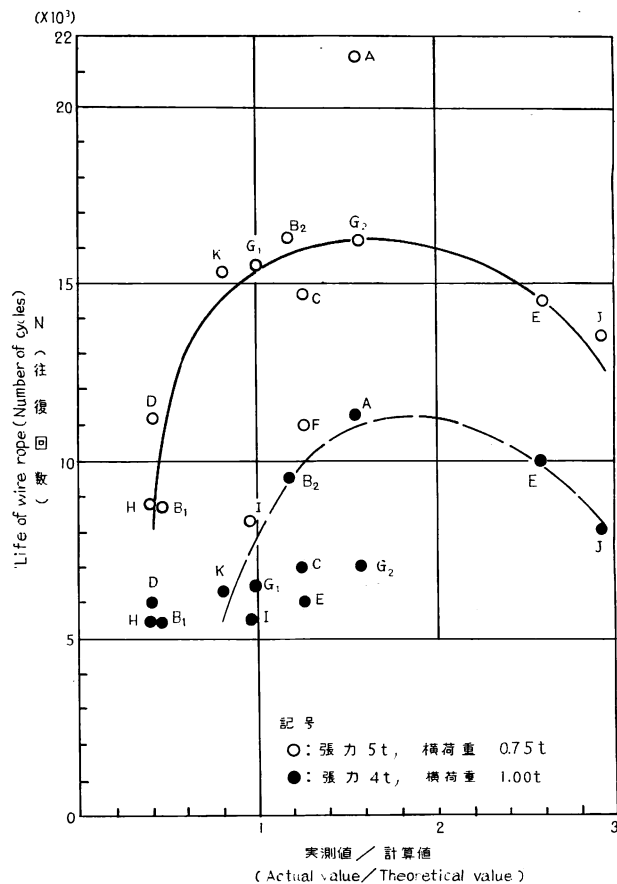
つぎに側線の硬度について考えると、一般に素線の加工度（総減面率）が85%（供試ロープはおおむねこの辺の値をとっていると推定される）を越えると捻回値は低下し、抗張力ならびに硬度は上昇する性質がある。したがって、ネジリ回数が低下するにつれて寿命が良くなる傾向があるなら、硬度については硬度が上昇するにつれて寿命が良くなる傾向があつて良いはずである。このことは第16-1図をみるとおおむねいえそうである。このことからつぎのようなことが考えられる。すなわち、主索として使われる場合のロープは走行車輪から受ける接触圧力がきわめて大きいから、これに対して強靱なものが寿命も長いはずで、硬度が高ければ外力に対してそれだけ強くなるから、A社の寿命の長かった原因の1つには、この硬度が他社に比べてきわめて高いことが挙げられる。このことは第11表に示した素線断線の発生箇所をみてもその傾向が現われており、A社以外のものは山断線がほとんどであるのに対し、A社の場合は山断線もあるが谷断線もかなり多いことから立証される。

以上のような考察から、硬度が寿命に対してかなり影響する要因であるということがいえそうである。

3) 増径率について

ロープの横断面を軸心と直交した截面で見ると、各素線は楕円状になっていることがわかる。これは各素線あるいは各ストランドがよられているために起こる現象であるが、この場合心線と側線の直径が同じであると、心線と側線の間に間隙が生じ側線相互間の接触圧力は増大する。さらにこのような状態で、ロープが横負荷を受けると不規則な素線のずれにもとづく接触圧力の不均衡を生じ、ひいては型くずれの遠因になることが推定されるので、心線の直径は側線の直径より4~5%増径するのが良いとされてきたが

(この比率を増径率という), 増径率をあまり大きくすると側線相互間に空隙を生じて, これまた良くないとされてきた。本試験に用いたロープの増径率をみると, より角も各社マチマチであるので増径率に相違のあることは当然であるが, ほとんど増径されていない B_1, D, H, I がいずれも成績が良くなく, また極端に増径率を大きくとった E, J もあまり成績が良くないのをみると, より角に対応して適当な増径率があるように考えられる。この増径率の算出法には, 幾何学的あるいは力学的手法のほかにはベクトル表示法⁶⁾があるが, ここではベクトル表示法によって増径率を算出し, 実測値と計算値の比率を求め, 張力 5t および 4t の寿命との関係を図示すると第17図のようになる。なお計算式ならびに計算過程の主要因子を示すと付録 3 のとおりである。これをみると張力 5t, 4t の双方とも図に書き入れた仮想線のように



第17図 増径率(実測値/計算値)と寿命の関係

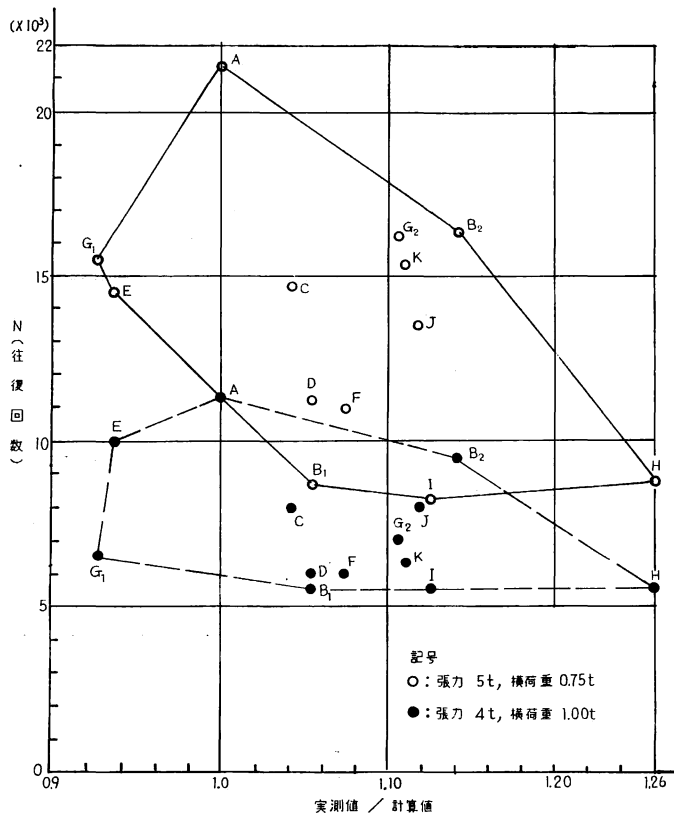
Fig.17 Relation between rate of enlargement of centre wire (d_0) against side wire (d_1), $\frac{d_0-d_1}{d_1} \times 100$ and life of wire rope

に, 実測値に対する計算値の比が 1.5 ぐらいのところが見うけられる。このことは, はなはだ常識的な結果とも考えられるが, データの数および分布状態からみてさらに検討したい事項である。

4) ロープのトルクについて

ロープはコイルばね状の素線の集合体とみなせるから, 引張荷重に対してその軸の回りに回転する。このロープの自転はロープの使用上そのピッチ角を増大し, ひいては型くずれの原因となって寿命に悪影響を及ぼし, また自転を抑制することによってたくわえられるトルクはキンクの誘因ともなり, 疲労に対して悪影響を及ぼすことは十分考えられるところである。したがって, ロープのトルクはなるべく少ないのが良いとされてきた。ロープのトルクに関する研究はかなり前から行なわれ, 池田・上野の式⁷⁾がある。試験条件からいって供試索は高い引張荷重によって各素線が一体となっていたと判断されるから, 計算式は付録 4 に示すごとく単純化できる (なお計算過程の主要因子も併せ掲載した)。前項同様実測値と計算値の比を求め, 寿命との関係を図示すると第18図のようになる。

これをみるとデータはかなり広範囲に分布しており, 当初予想したほどロープのトルクは寿命に影響し



第18図 ロープトルク（実測値/計算値）と寿命の関係

ていないようにみえる。しかしこのことから、にわかにトルクの効果を否定するわけにはいかないものがある。なぜならば、本試験条件は短区間で両端を固定した状態で、片側だけを搬器が走行した場合の疲労結果であり、実際の使用条件とはちがって自転は強く抑制されているから、このためトルクの効果が顕著に現われなかったのかもしれないし、さらに実測トルクは計算トルクに対して大きな増減はなく、ほとんどのデータが $-8 \sim +14\%$ の範囲にはいっており、この程度の差違では効果が現われないのかもしれないからである。

しかし第17図の増径率の効果と比較すると、ロープのトルクは増径率ほど影響度の高い要因

ではないように考えられる。

5) 脱炭について

脱炭が疲労に対して影響の強い要因であることは、多くの報告があり、とくに炭素含有量の高い鋼ほど脱炭の影響は大きいとされている。ロープは普通0.6%ぐらゐの高い炭素含有量の素線で構成されているから、脱炭はロープの寿命に対して強く影響する要因であると昔からいわれており、第1報においてもそのような傾向が得られた。今回の供試ロープを検鏡した結果は、1ストランドの縦断面組織においてはほとんど発見されないくらい脱炭は少なかったが、横断面について全ストランドを検査した結果では、第10表に示すごとくHは縦断検査と同様多いが、そのほかA, B₁, Eも若干ずつではあるが脱炭しているものがある。このように横断面と縦断面の検査結果で若干の食い違いを生じているのは、脱炭の箇所が周辺部に一様に分布していないことのほか、横断と縦断とは組織的にかなり相違しており、脱炭の判定基準にいくつかの相違があったために生じたのではないとも考えられる。いずれにしても成績の良くなかったB₁, Hがやや脱炭の多い傾向からみて、脱炭が影響しているようにも考えられるが、成績の上位のA, Eにも少数ながら脱炭があるのをみると、脱炭している素線本数に限界本数のようなものがあるようにも考えられる。しかし今回の試験のように少数の供試ロープからでは、このような傾向まで求めることは無理であり、今後の課題にしたい。

6) 非金属介在物について

鉄鋼中に含まれている非金属介在物の影響については、学術振興会第19委員会において協議会がもたれ、これに関する検討がなされているが、ここに提出された神戸製鋼所中央研究所の資料のなかから、非金属介在物が疲労におよぼす影響について述べている事項を要約すると、つぎのとおりである。

a) 非金属介在物 (以下たんに介在物と記載する) が鋼の疲労の性質に悪影響を与えるという報告に対して、ほとんど影響をおよぼさないという報告もあり、いずれも説明が定性的であり、推論の域を脱していないが、介在物の好ましくない影響がはっきりあらわれだすのは、高張力の水準においてであるということは大体一致した意見であり、柔らかくて細長く延伸した介在物は応力集中の点から考えて、長さ方向の疲労限にはさほど影響しないという考え方もある。しかし介在物の大きさとその位置および方向が疲労に影響されることは十分考えられることである。

b) 疲労の機構としては、つぎのように考える。

金属の疲労において、疲労核が存在する確率は局所的な応力分布によって決まる。したがって局所的な応力分布を変えるようなものがあるときには疲労強度は大きく変わってくる。

疲労現象は3段階に分けて考えることができ、その第1段階は多くの結晶粒界でおこる塑性変形と歪硬化である。この時期は比較的短く、歪硬化が一定値に達すると第2段階にうつる。すべり線は幅がひろくなり密集してきて、いちばん密集して変形した部分からマイクロ・クラックが発生する。介在物によって疲労強度が低下するのは結局のところマイクロ・クラックが生じやすくなるためと考えられる。第3段階ではこのマイクロ・クラックが成長して伝播し、近くのものと合体して成長し、最終的に破断するに至る。

c) 介在物による応力集中

介在物による応力分布の変化を考える場合問題となるのは、(i)介在物の形状、(ii)介在物と母材との間の粘着力、(iii)介在物および母材の弾性的性質 (たとえば弾性係数、ポアソン比、弾性限など)、(iv)介在物相互の影響を考える場合に問題になる介在物間の距離、あるいは数、(v)介在物の大きさ、などである。

d) 介在物の種類

応力集中の点から考えると、母材との粘着力さえ強ければ、硬い介在物の方は害が少ないが、実際には柔らかい介在物の方が影響が小さいといわれている。また製鋼法の相違によっても介在物の種類は変わり、電気炉鋼には変形しない球状のケイ酸塩が多く、平炉鋼におけるケイ酸塩系介在物はかなり偏平に変形する。鍛造時、変形しない介在物によって空洞が生じると応力集中効果の点からみて有害である。変形しない介在物には結晶状のアルミナ、アルミノ・ケイ酸塩、石英、球状ケイ酸塩、窒化チタンなどがある。

以上述べたように、介在物が疲労におよぼす影響を究明するには、かなり専門的な知識と研究の蓄積が必要なことがわかる。さらにこれらの研究の多くは、あらかじめ成分、製鋼法、加工条件などのわかった材料について、単純曲げあるいは回転曲げなどの試験を行なったものであり、これに対して本試験のように製鋼履歴はもちろん、加工条件なども不明なロープの試験結果からにわかに結論めいたものを引出すことは無理であるが、つぎのような傾向がみられた。

(1) 介在物の大きなものの多いロープは寿命が短い傾向がある。すなわち、

(イ) かなり清浄で、長さ約 10 mm、幅 1.6 mm ぐらいの資料の中に、小さな球状の介在物が 1~2 個ぐらいしかいないグループ (A, B₂, C, G₁, G₂, E) はいずれも成績が上位にある。微細な介在物は

かなりあるが、大きなものはほとんどないグループ (D, F, J, K) は成績が中位にある。

これに対して 30~100 μm あるいはそれ以上の長さをもち、幅も 10~数 10 μm ある介在物や、10~30 μm 程度の球状の介在物が 1 資料に 3~10個もあるグループ (B₁, H, I) は成績は下位にある。

(ロ) B₁, H, I グループに発見された介在物は、ほとんどケイ酸塩のように推定されるが、他のグループにも大きさは小さいがこれに類似したものがほとんどあり、有害な介在物の種類をこれから推定することは無理のようである。しかも長く尾を曳いてその中央付近に核のようにだ円を呈したもののある灰色状の介在物は、どの供試索にも発見できるところをみると、本試験のような条件下では、介在物はその大きさが問題であるように考えられる。

(2) 介在物の分布状態は偶発的な要素が多分にあり、疲労断線の発生箇所の偶発性と類似しているように思われる。すなわち、

介在物の存在する位置は周辺部とか中心部に限られたのではなく、きわめてまんべんなく分布しており、また連続的に周辺からはほぼ一定の距離に発見されることもあれば、なんら関連性のない発生のしかたをすることもある。

一方疲労断線の発生状態も同様に、きわめて予測困難な発生状態をする。すなわち、走行車輪が 1 往復する間に 4 回車輪に接触する区間に初期断線が発生するものでもなく、また隣接したストランドに連続して断線が発生することもまれである。ロープは機械的に撚られているから、わずか 2 m ぐらいの資料長で撚りのムラのようなものはないのではないかという想定もなりたつが、同時に前述のごとく型付率のバラツキはかなりあるから、かなり不均一なものであるようにも想像される。したがって断線の不連続な発生状態が何によるかを推定することはむずかしい問題であるが、素線の材質的な不均一さ、とくに介在物が影響しているのではないかという考え方に立つとかなり説明が楽になる。すなわち金属顕微鏡で素線を観察すると、せん維状組織のムラもさることながら、それよりさらに不均一さを端的にあらわしているものは介在物のように感じられる。かりに走行車輪に接触したり、隣接ストランドと接触する箇所に巨大な介在物があった場合、ここが疲労起点となり、断線を起こしたと考えることはきわめて自然であり、前述のごとく疲労断線の箇所が連続的でなかったり、走行車輪の 1 往復で 2 回しか車輪に接触しないような箇所に断線が発生してもこれを介在物と結びつけると不思議ではなくなる。

以上のことを実証するため、疲労断線した破面の横断面を無処理のまま金属顕微鏡で観察し、介在物の検出を試みたが、疲労起点と考えられるような介在物の発見はできなかった。しかしこれは、以下述べるような理由により当然の結果だったように考えられる。すなわち、鏡面仕上げを行なった素線の横断面を 100 倍で検鏡した場合、介在物は普通丸い点状になっており、これを 400 倍で観察してようやくこれが介在物かゴミであるかの識別ができる実情であるから、起伏の激しい疲労破面をいきなり 400 倍で検鏡して、その中から介在物を検出することは至難なことである。このような場合の検鏡方法としては (レプリカ法により) 電子顕微鏡を使い、3,000~5,000 倍の倍率で介在物が疲労起点になっていることを実証している例があるので、今後はこの手法も用いて検討を進めたいと考えている。

7) オーステナイト粒度について

ロープの素線はパテンティングした後伸線され、繊維状組織になっているので、金属顕微鏡では分解能の関係で結晶粒界も判然とせず、その均質性を判定することはむずかしい。この素線の結晶粒度を調べるには日本学術振興会第19小委員会で制定した方法 (滲炭剤と共に函中に密閉し、加熱炉で加熱し約 2 時間

で約 925°C に達せしめ、この温度に約 6 時間保持した後徐冷する) による。

かりにロッドの成分ならびにパテンティングの条件が同じであれば、粒度の均一性がパテンティング後の組織の均一性を左右することは当然であり、オーステナイトの整粒度は素線の靱性あるいは均一性になり影響するといわれている。

各社のオーステナイト粒度の測定結果ならびに写真は付録 1 のとおりであるが、これを見ると、最低 5.4, 最高 7.5, 平均 6.6 ぐらいであり、各社間に大きな差のないことがわかる。しかし、側線の粒度で分類するとつぎの 3 グループに分けられる。

7.0~7.4 のグループ A, B₁, E, F, J

6.0~6.5 のグループ B₂, C, D, G₁, G₂, H

5.6 のグループ I

以上 3 つのグループの中には成績の良かったものと悪いものが双方はいており、オーステナイト粒度はあまり重要な因子ではないことがわかる。しかし各粒子の大きさを比較してみると、粒のそろったものとなりがち不ぞろいのものがあることに気づく。すなわち、

B₂, C, D, G₂ はかなり粒がそろっており (整粒グループと呼ぶ), F, I, K は粒が不ぞろいであるのが特徴である。

これを寿命と関連づけてみると、整粒グループは D 社を除き成績が上位にあり、不整粒グループは下位に属している。

この傾向は以下述べる理由から十分予想されることである。すなわち、

線材の熱処理は重要な工程ではあるが、線材の滯留時間は作業工程に大きく影響するので、標準となる時間が各社ごとに定められている。ところがこれはロッドメーカーから入荷されるロッドの粒度を想定して決められたものであるから、これから大きくはずれた粒度のものは、オーステナイト粒度の成長途上でパテンティングにはいるため、不整粒あるいは粒度番号の大きなものは不均一な組織になる確率が高いことになる。不均一な組織の焼線が冷間加工を受けた場合、当然繊維組織にむらを生じ、また残留応力も均一な組織のものに比べて大きくなることが考えられ、耐疲労性を低下させる。

以上の考察から、オーステナイト粒度はその粒度よりも整粒か否かが寿命と関連の深いことが考えられ、疲労試験の結果もこれを裏付けるような傾向が得られた。しかし、まだデータも少ないので、さらに今後の疲労試験結果について検討をつづけていく予定である。

8) 化学組成について

素線の化学組成は、その機械的性質あるいは非金属介在物の組成・形状、大きさ等に大きく影響する要因といわれている。この分析結果は付録 1 のとおりであるが、これを寿命と関連づけて調べてみたが、はっきりした傾向は見いだせなかった。

ただ Cu が若干傾向らしいものを示しているようである。Cu の含有量は最高 0.11%, 最低 0.05% で上下の差はかなりある。その中で 0.05~0.06% のものは B₂, E の 2 つであるが、これらはいずれも上位のグループにはいており、B₂ と同じ会社の供試ロープである B₁ を見ると 0.10% ときわめて多く、その寿命の低いことをみると、Cu の効果かとも考えられる。しかし一方、Cu が 0.10~0.11% のものをあげると、A, B₁, D, G₁, G₂, H であるが、そのうち B₁, D, H は下位グループであるのに対し、A, G₁, G₂ は上位グループであり、Cu が 0.10% のものは寿命が短いという決定も下しかねる。

このほか S, P など有害とみなされる要因については Cu ほどの傾向は示していない。

以上の結果は当初期待したものより著しくはずれたが、これは分析回数も 1 回で、しかも 1 ストランドについての結果であることも原因しているのかもしれない。

2.5 結 言

JIS 認可工場 11 社の 6×7 c/L 2 種 (旧規格) 16 mm ワイヤロープの耐久試験を行ない、つぎのような結果を得た。

1. 寿命 (主として 1 割断線) に達するまでの各社の往復回数を示すと第 7 表のとおりかなり相違があるので、新品時の素線ならびにロープの機械的性質と往復回数との相関を求めてみたが、第 16-1~2 図に示すように単独で寿命と相関の高いような因子はなかった。しかし、ある程度相関のありそうな因子をあげると素線の抗張力、硬度の 2 つであった。またロープのより技術に属する因子としては、型付率の標準偏差、心線の側線に対する増径率がある程度寿命と相関があるようである。

2. 供試ロープのなかでとくに成績の良かった A 社のロープは他社に比べて特徴のあるロープであった。すなわち、心線の炭素含有量が低いもの (0.40C) を使用し、そのかわり側線は抗張力を他社に比べて約 10 kg/mm^2 高くしていたが、主索のように高い接触圧力を受けるような使用条件下にあっては、側線の硬度の高いものの方が走行車輪に対して有利であるように考えられるし、さらに心線が側線よりかなり硬度が低いので、心線との接触圧力が低下し、ストランド全体のよりが安定するなどの効果が期待できる。しかし、実際の現場においてこのようなロープが、果たして有効かどうかは今後十分検討を要する事項と考える。

3. 寿命に影響する要因のなかで非金属介在物はかなり重要な位置にあるようである。いずれのロープにも多少の非金属介在物はあったが、巨大な介在物がどの素線からも発見できるようなロープは寿命が短い。このことは疲労機構から類推して当然の結果と考えられるが、疲労破面に疲労起点と断定できるような介在物の検出は今回の試験データからは得られなかった。

4. 寿命に達したロープの静的引張試験におけるエネルギーは、新品時のそれに比べてかなり低く (最低 9%, 平均 20~30%), 残留強度の低下率に比べて極端に低いことがわかった。このことは廃棄基準に近づいたロープは衝撃的な張力増加に対して抵抗力のないことを示すもので、このようなロープを使っているときは、とくに運転を慎重にし、衝撃を少なくするような配慮が肝要である。

文 献

- 1) 会田俊夫・佐藤 進: 鋼索の素線応力に関する基礎的研究, 第 7 回ワイヤロープ研究会講演集 pp. 1~12, (昭34. 5)
- 2) CZITARY, E.: Seilschwebbahnen. pp. 108, (1951)
- 3) Drantseilforschung, Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. (Bd 76) 557-560, (1932)
- 4) 池田正二・上野 勲: 非自転鋼索の機構, 第 6 回ワイヤロープ研究会講演集, pp. 83~90, (1958)
- 5) 加藤誠平: 林業用索道設計法, pp. 93, (1959)
- 6) 小野 進: ワイヤロープの解析(1), 第 6 回ワイヤロープ研究会講演集, pp. 96~109, (1958)
- 7) 斎藤栄吉: 6×7 C/L および 6×7 SRAF ロープの応力, 輪圧張力比, シープの溝底間直径と曲げ応力との関係ならびに応力分布についての検討, 日本林学会誌, 44, 4, (1962)
- 8) 上田 実・平松 修ほか 2 名: 架空索道材における主索に関する実用数値表, 林試研報, 136, pp. 101, (1962)

- 9) 上田 実・柴田順一・川端幸蔵：架空索の主索に関する実用数値表，林試研報，192，44～175，(1966)
- 10) 新保勉夫：安全率に関する側面的考察について，第5回ワイヤロープ研究会講演集，pp. 101～102，(1956)

Study on the Fatigue of the Wire Rope for Logging (The Second Report)

Repeated tests of the main rope under tension and bending

Minoru UEDA, Toshihiko SAITO and Jun-ichi SHIBATA

(Résumé)

In order to obtain the $S-N$ curve for wire rope as for steel and to compare the lives of main ropes delivered by eleven JIS makers, we performed an experiment with 6×7 C/L 2nd class, 16 mm ropes by a fatigue-testing machine (Photo. 1) designed specially for the main ropes.

The experiment concerned the life-tests of the wire ropes: Tension T in ton, 5, 4 and 3; Load Q in kg, 1000, 750 and 500.

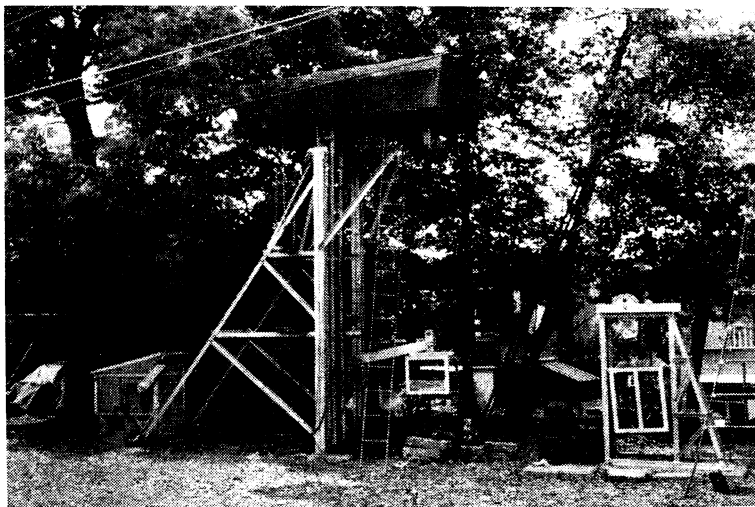


Photo. 1 Fatigue-testing machine

The results are summarized as follows:

1. The stresses of the outside wires are calculated according to formulae, $\sigma_b = V/A\sqrt{E_b/\sigma_t}$ for bending and $\sigma_t = T/A$ for tension, where E_b is the modulus of elasticity ($=2.1 \times 10^4$ kg/mm²) for bending stress, V a load on one sheave, and A the sectional area of wire rope.

Plotting these data on logarithmic paper, we get a straight line representing the life of rope versus σ_b . Also applying this method for the data presented by R. WOERNLE, we got the $S-N$ curve for the main rope.

2. We found considerable differences in the life of wire rope among the samples of JIS makers

above mentioned, as shown in Table 4, and after studying some effects on this difference, we surmised that the life might be strongly influenced by the following four factors:

- (1) Rate of enlargement of center wire (d_0) against side wire (d_1), $\frac{d_0-d_1}{d_1} \times 100$
- (2) Hardness of side wire;
- (3) Variation preforming percentage of the wire strand; and
- (4) Uniformity of microscopic structure, especially size of non-metallic inclusion in a wire material.

Above all, factors (1) and (4) are considered as very important according to Fig. 17 and Appendix 2.

3. From the $S-N$ curve of a rope we were able to calculate the total log volume attainable on a cable way using the rope up to its endurance limit. This is shown for each of two ropes with different sizes in Figures 6 and 7.

4. The statical test revealed that the breaking strength of a rope at the endurance limit remained from 50~70 percent of that of a new-rope, while the strain energy of the former was only from 10~40 percent of that of the latter. Accordingly, in logging practice, care has to be taken not to give the impulsive tension to such a rope as the former

付 録 1—1 Appendix 1—1

各社ロープ (6×7 C/L 16 m/m) 素線分析結果

種別	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	inSd Al	Sd Al	O ₂	H ₂ 10 ⁻⁴ %	inSd N ₂	Sd N ₂
A	0.62	0.24	0.61	0.019	0.026	0.10	0.03	0.08	0.003	0.006	0.0058	1.10	0.0007	0.0042
B ₁	0.67	0.31	0.82	0.019	0.028	0.10	0.05	0.08	0.007	0.007	48	0.82	7	62
B ₂	0.60	0.25	0.61	0.012	0.022	0.06	0.02	0.04	0.007	0.007	36	0.84	7	67
C	0.63	0.27	0.48(0.50)	0.020	0.021	0.08	0.03	0.05	0.003	0.004	45	1.16	8	50
D	0.70	0.25	0.55(0.57)	0.022	0.030	0.11	0.04	0.08	0.004	0.004	49	3.96	5	43
E	0.64	0.22	0.56(0.54)	0.013	0.019	0.05	0.02	0.04	0.001	0.003	41	2.16	5	49
F	0.62	0.22	0.43(0.44)	0.008	0.013	0.09	0.02	0.03	0.003	0.018	41	1.56	9	57
G ₁	0.62	0.19	0.43	0.008	0.024	0.11	0.05	0.04	0.002	0.005	50	2.80	7	55
G ₂	0.60	0.23	0.54	0.028	0.030	0.10	0.04	0.08	0.002	0.006	61	1.37	8	65
H	0.66	0.25	0.49(0.51)	0.015	0.020	0.10	0.03	0.02	0.001	0.004	62	1.56	11	64
I	0.65	0.26	0.55(0.54)	0.022	0.023	0.07	0.02	0.05	0.003	0.006	51	—	4	55
J	0.68	0.27	0.56(0.55)	0.015	0.026	0.08	0.03	0.06	0.005	0.011	51	1.84	4	50
K	0.62	0.27	0.51(0.53)	0.018	0.023	0.09	0.04	0.06	0.004	0.010	49	1.97	4	40

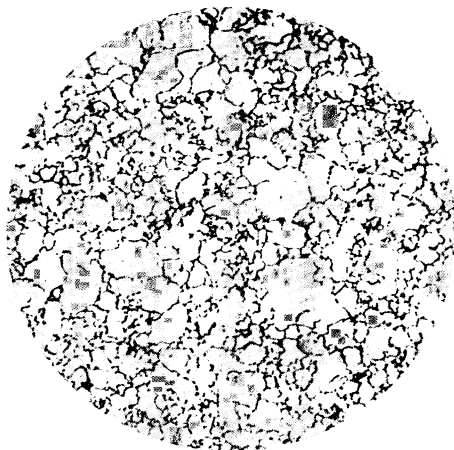
付 録 1—2 Appendix 1—2

各社ロープ (6×7 C/L 16 m/m) 素線オーステナイト粒度測定結果

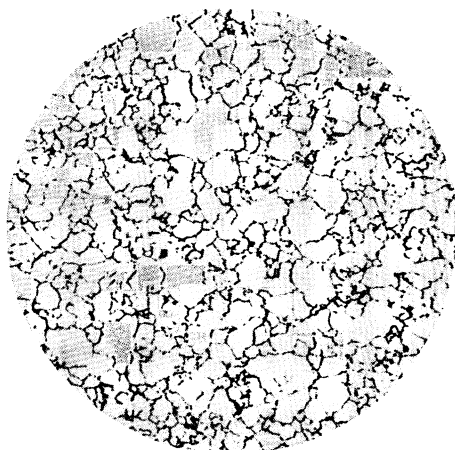
社 名	線径	オーステナイト粒度 (N)				社 名	線径	オーステナイト粒度 (N)			
		1 回	2 回	3 回	平均			1 回	2 回	3 回	平均
A	芯	1.86	7.4	7.4	7.3	G ₋₁	芯	1.87	6.4	6.5	6.2
	側-1	1.76	7.0	7.0	7.1		側-1	1.78	6.1	6.2	6.4
	側-2	1.76	7.4	7.5	7.5		側-2	1.78	5.5	6.1	5.7
B ₋₁	芯	1.79	7.5	7.0	7.3	G ₋₂	芯	1.85	6.8	7.0	6.8
	側-1	1.79	7.3	7.4	7.2		側-1	1.74	6.4	6.3	6.2
	側-2	1.79	7.3	7.1	7.4		側-2	1.74	5.8	6.3	5.9
B ₋₂	芯	1.89	7.4	7.3	7.2	H	芯	1.78	6.2	6.0	5.9
	側-1	1.80	6.4	6.2	5.4		側-1	1.78	6.0	6.2	6.3
	側-2	1.80	6.2	6.2	6.1		側-2	1.78	7.0	7.0	6.4
C	芯	1.84	7.3	7.4	7.4	I	芯	1.81	5.8	5.6	5.5
	側-1	1.75	6.3	6.6	6.5		側-1	1.76	5.4	5.6	5.8
	側-2	1.75	5.5	6.0	6.2		側-2	1.76	5.9	6.0	5.2
D	芯	1.77	6.4	6.3	6.4	J	芯	1.96	7.5	7.6	7.5
	側-1	1.77	6.2	5.9	6.3		側-1	1.76	7.2	7.0	6.8
	側-2	1.77	5.2	5.5	5.5		側-2	1.76	6.9	7.0	6.9
E	芯	1.99	5.2	5.6	6.1	K	芯	1.84	測定不可	—	—
	側-1	1.75	7.3	6.7	7.0		側-1	1.77	—	—	—
	側-2	1.75	6.7	7.0	7.2		側-2	1.77	—	—	—
F	芯	1.99	7.6	7.2	7.4						
	側-1	1.75	7.2	6.7	6.9						
	側-2	1.75	7.3	7.0	7.4						

付 録 1—3 Appendix 1—3

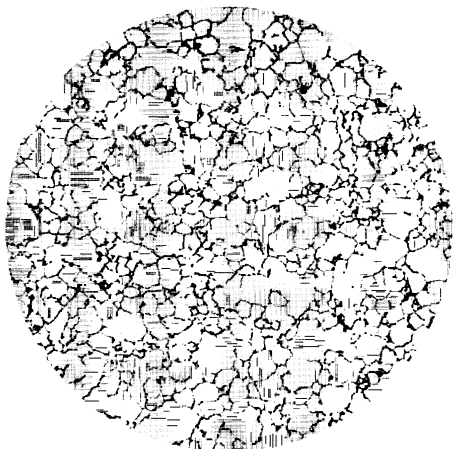
各社ロープ (6×7 C/L 16 m/m) 素線オーステナイト写真 (C×100)



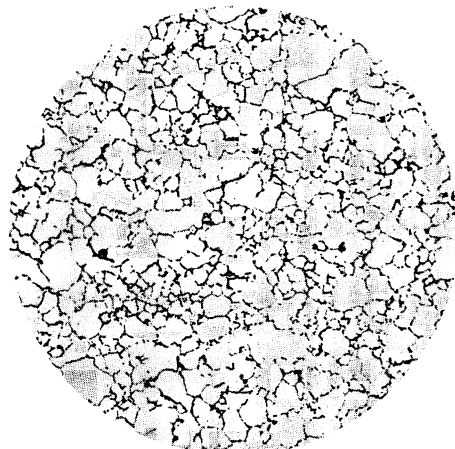
写真—1 A—芯 N=7.4



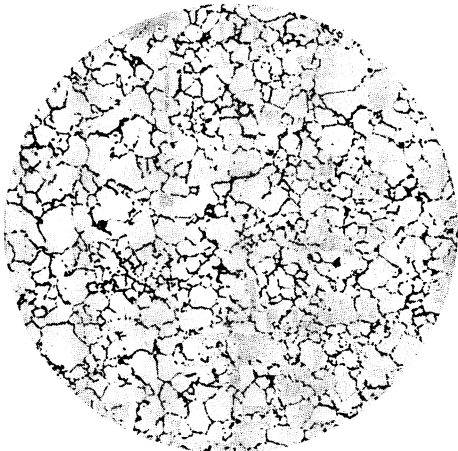
写真—2 A側—1 N=7.0



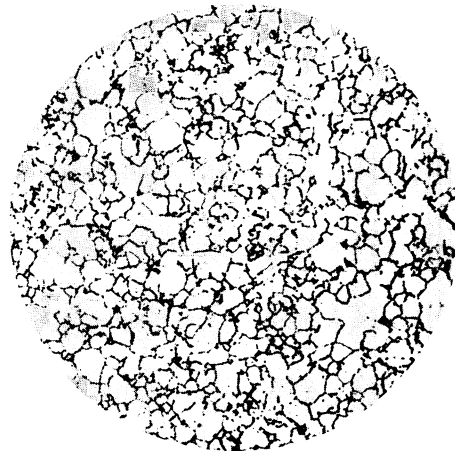
写真—3 A側—2 N=7.4



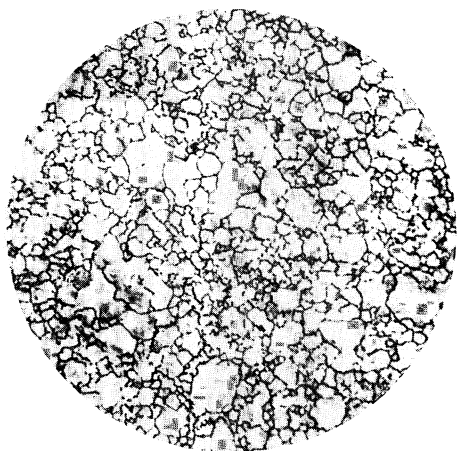
写真—4 B₁—芯 N=7.3



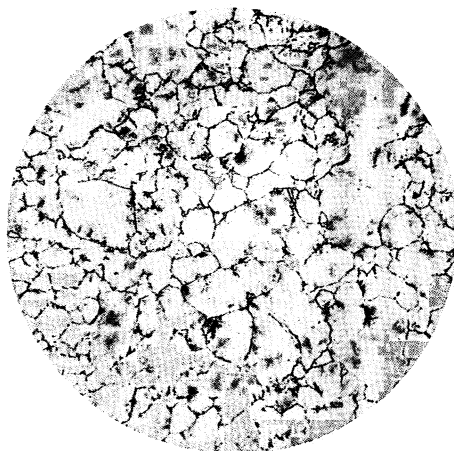
写真—5 B₁側—1 N=7.3



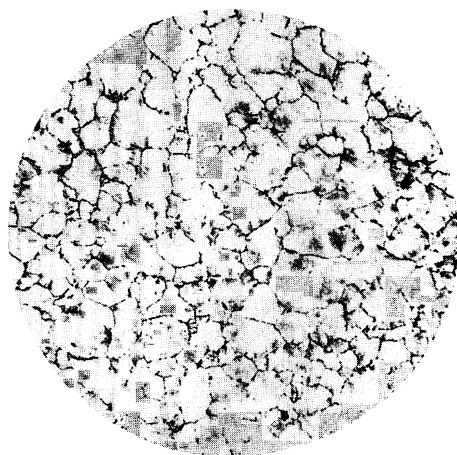
写真—6 B₁側—2 N=7.3



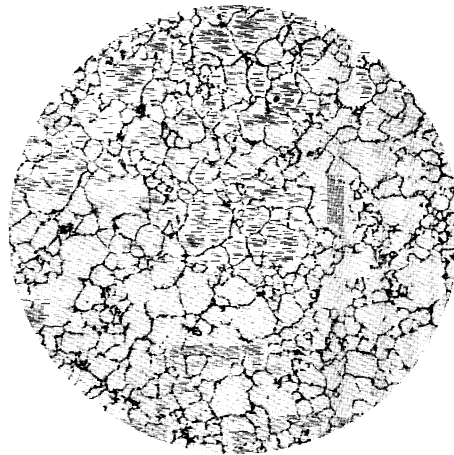
写真—7 B₂—芯 N=7.3



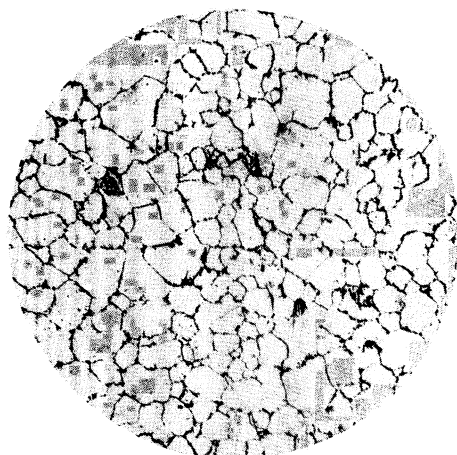
写真—8 B₂側—1 N=6.0



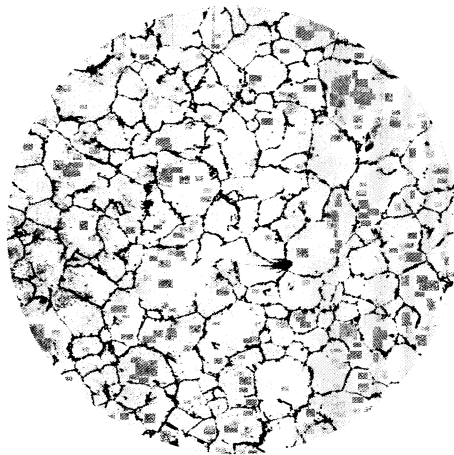
写真—9 B₂側—2 N=6.2



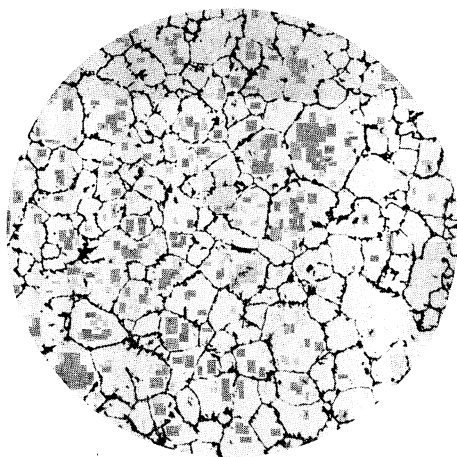
写真—10 C—芯 N=7.4



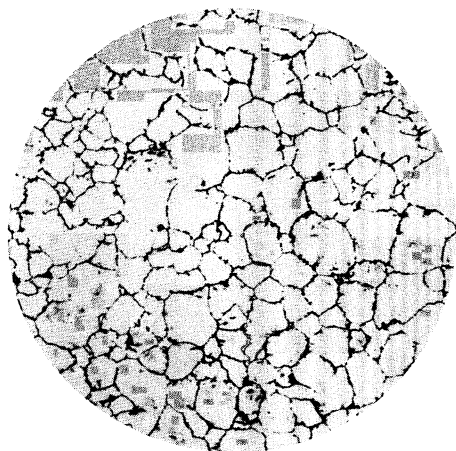
写真—11 C側—1 N=6.5



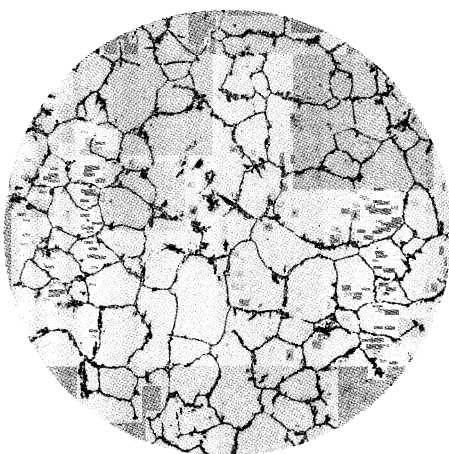
写真—12 C側—2 N=5.9



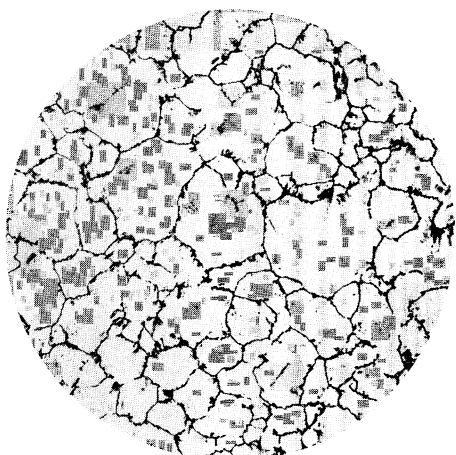
写真—13 D—芯 N=6.4



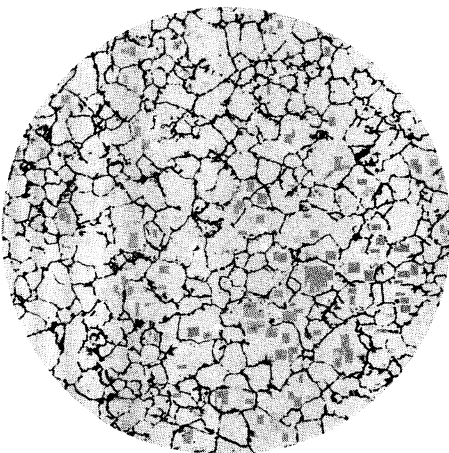
写真—14 D側—1 N=6.1



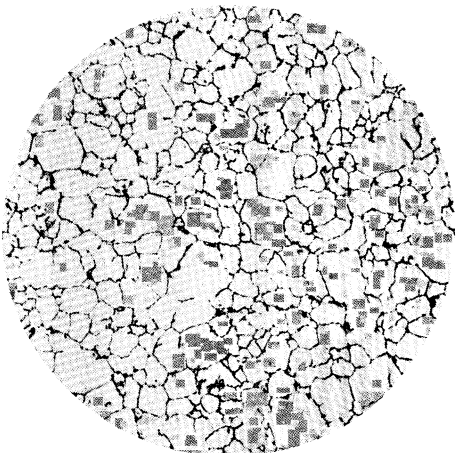
写真—15 D側—2 N=5.4



写真—16 E—芯 N=5.6



写真—17 E側—1 N=7.0



写真—18 E側—2 N=7.0

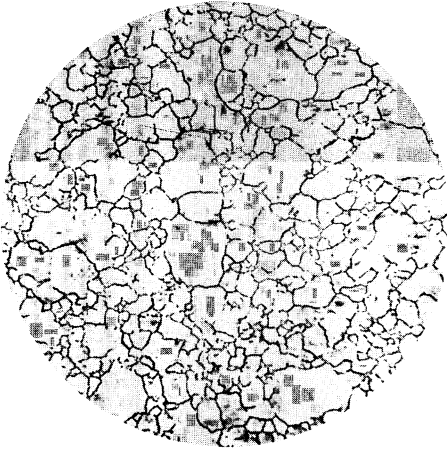


写真-19 F-芯 N=7.4

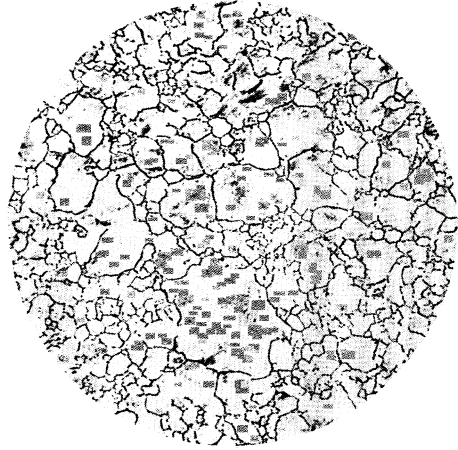


写真-20 F側-1 N=6.9

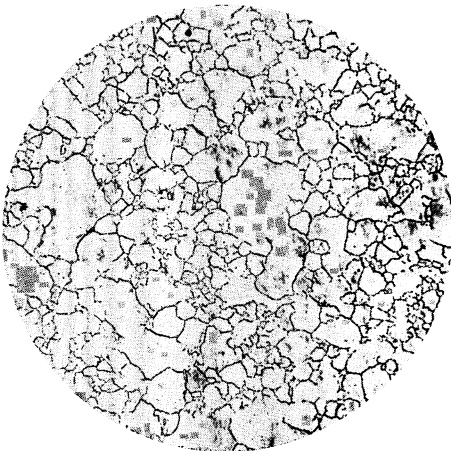


写真-21 F側-2 N=7.2

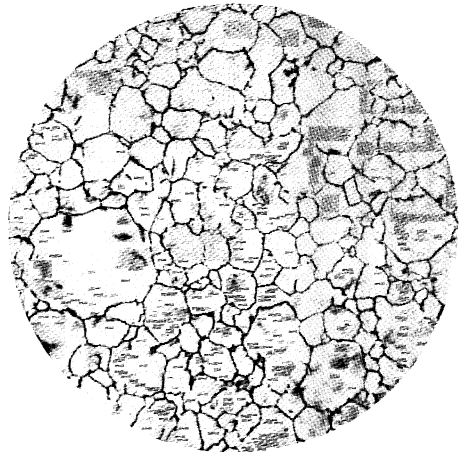


写真-22 G₁-芯 N=6.4

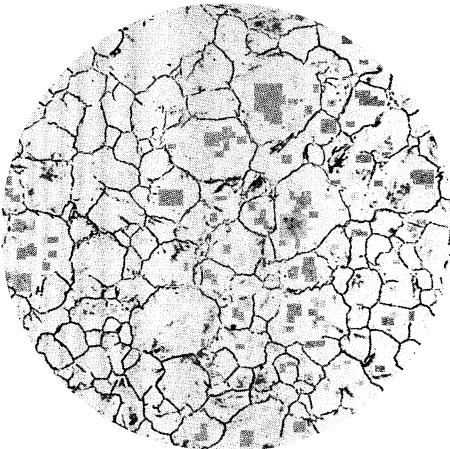


写真-23 G₁側-1 N=6.2

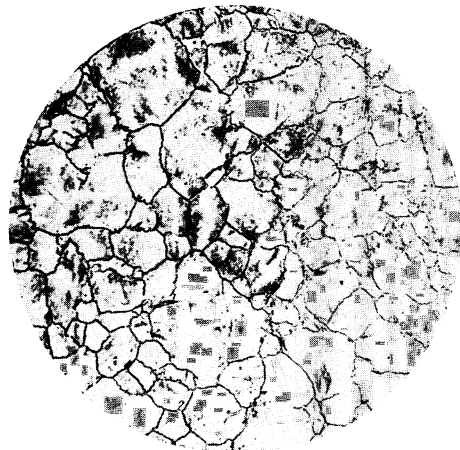
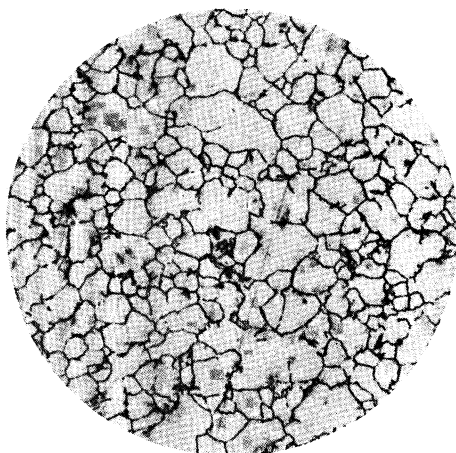
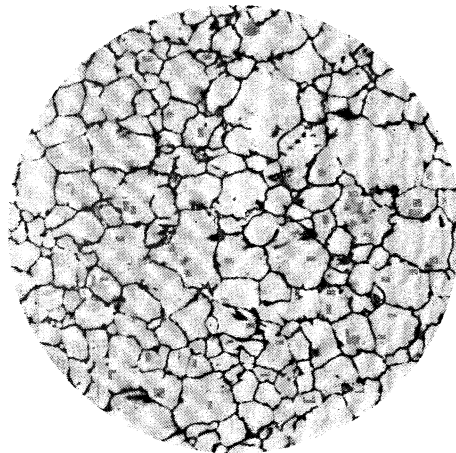


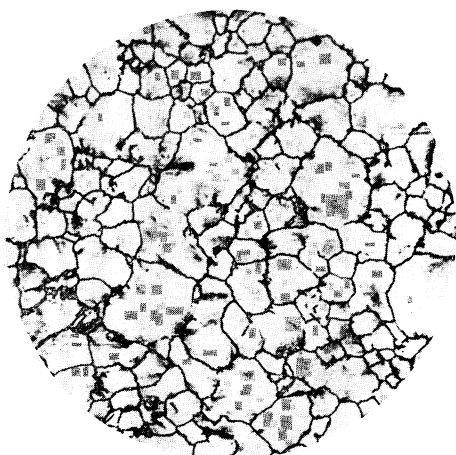
写真-24 G₁側-2 N=5.8



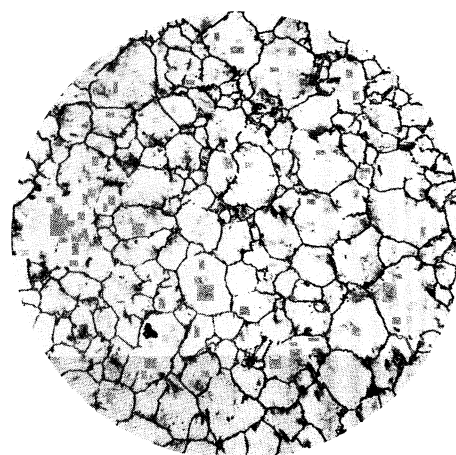
写真—25 G₂—芯 N=6.9



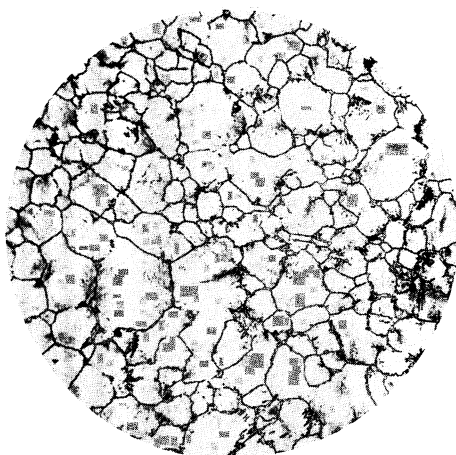
写真—26 G₂側—1 N=6.3



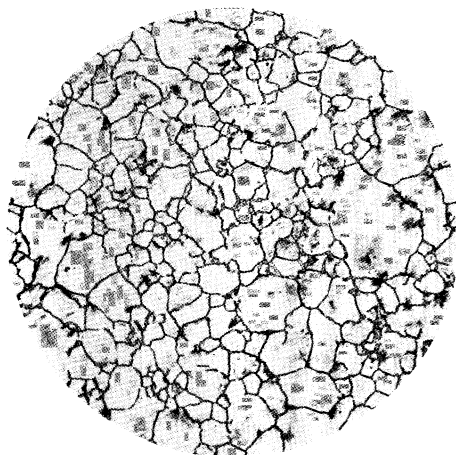
写真—27 G₂側—2 N=5.9



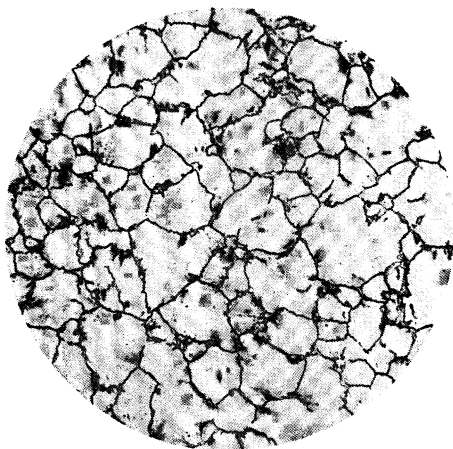
写真—28 H—芯 N=6.0



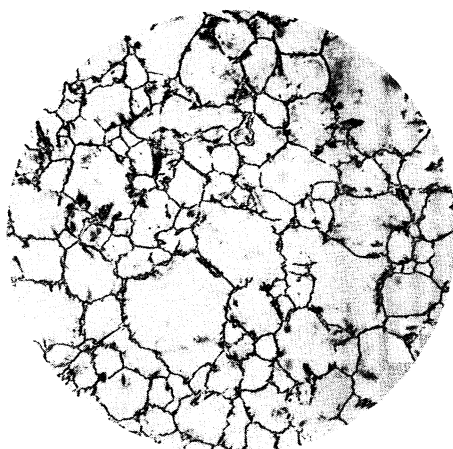
写真—29 H側—2 N=6.2



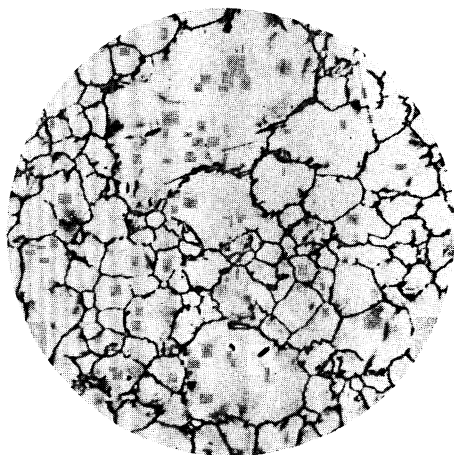
写真—30 H側—2 N=6.8



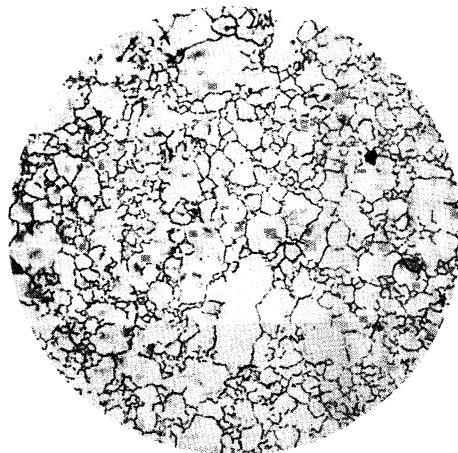
写真—31 I—芯 N=5.6



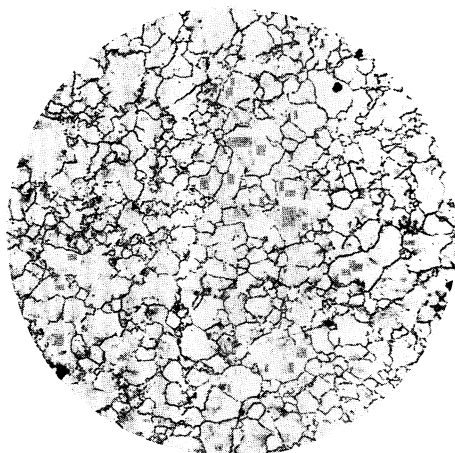
写真—32 I側—1 N=5.6



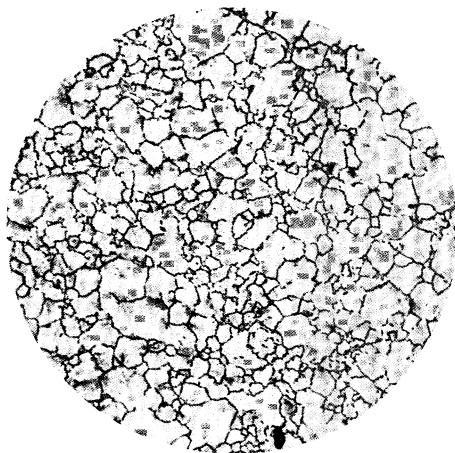
写真—33 I側—2 N=5.7



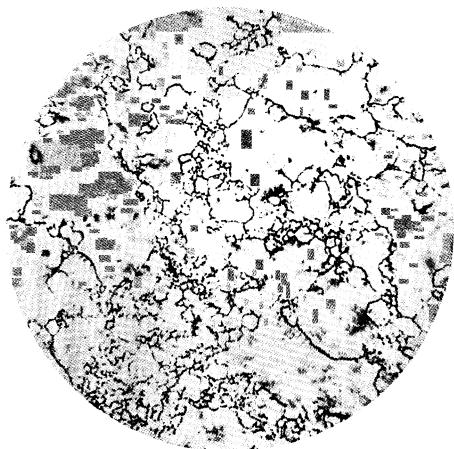
写真—34 J—芯 N=7.5



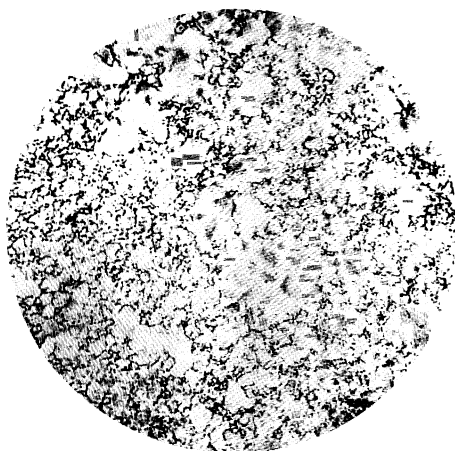
写真—35 J側—1 N=7.0



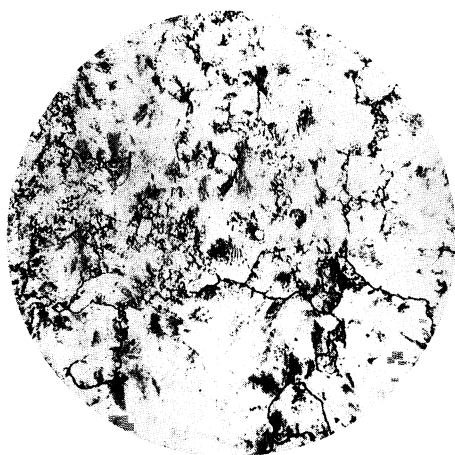
写真—36 J側—2 N=6.9



写真—37 K—芯



写真—38 K側—1

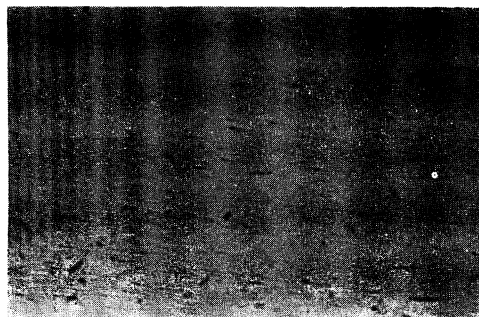


写真—39 K側—2

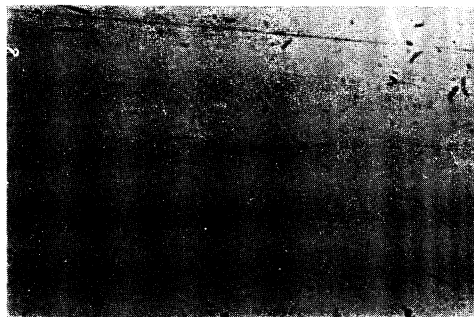
付 録 2 Appendix 2

各社素線の非金属介在物

Non-metallic inclusion in a wire material of the samples



× 100



× 400

A 社



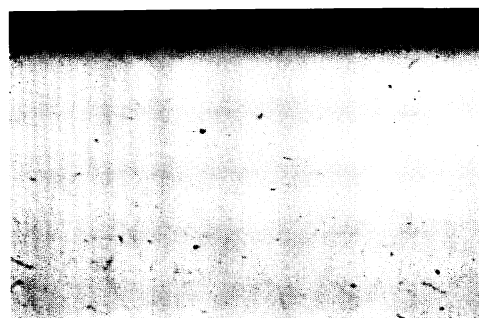
× 100



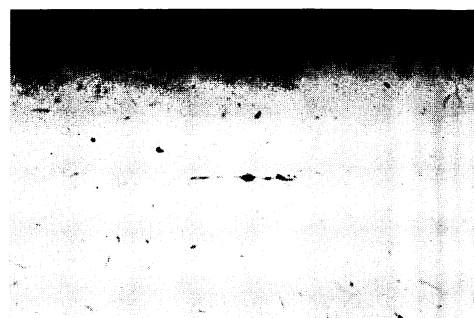
× 400

このくらいのものが 10 mm ほどの内に約 5 個ある

B₁ 社



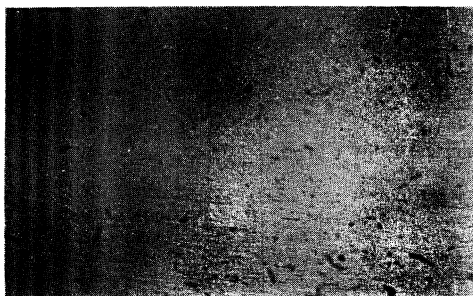
× 100



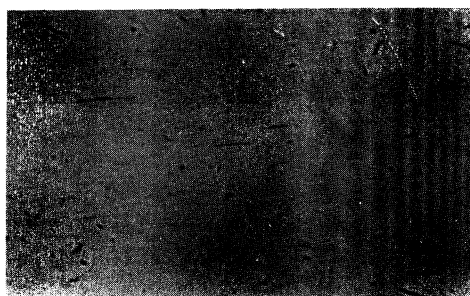
× 400 左写真の右周辺部

きわめて介在物は少ない

B₂ 社

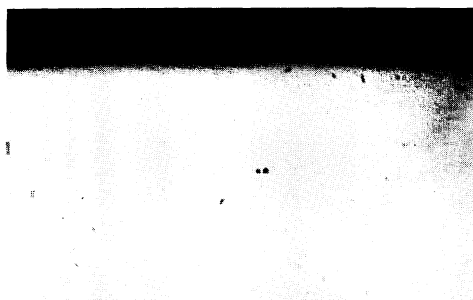


× 100

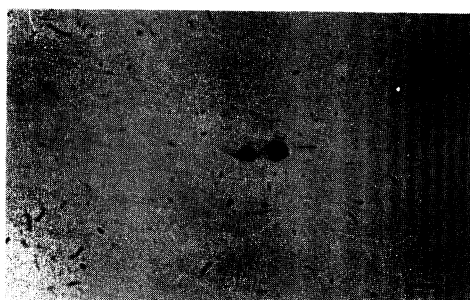


× 400

C 社

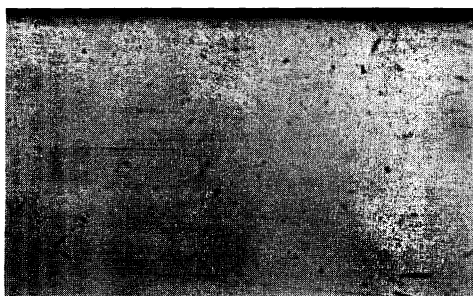


× 100

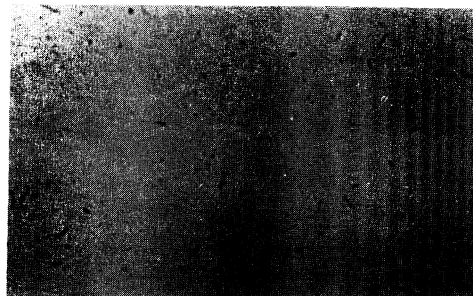


× 400

D 社



× 100



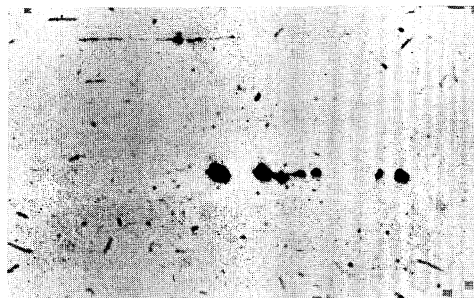
× 400

介在物はきわめて少ない

E 社



× 100



× 400

この程度のものは 10 mm 長で 5 ~ 6 個ある

F 社



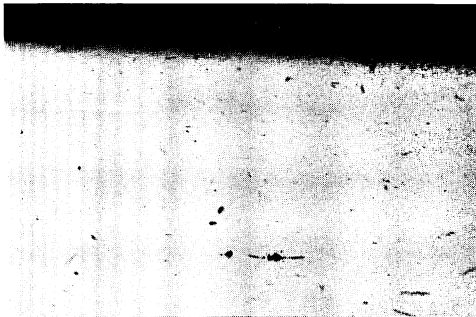
× 100



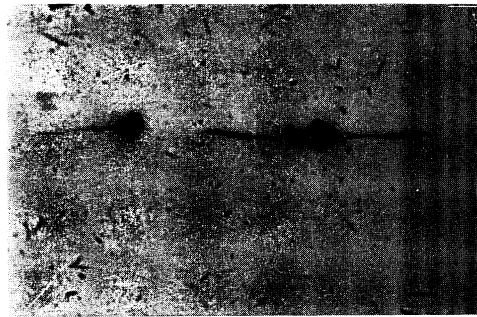
× 400

全体としては少ないが、10 mm 長で2~3個この程度のものがある

G₁ 社



× 100

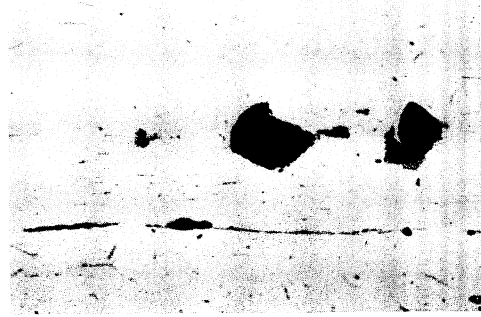


× 400

G₂ 社



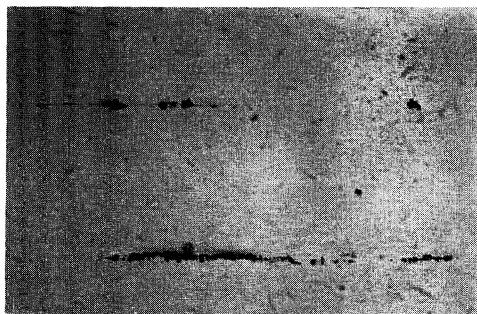
× 100



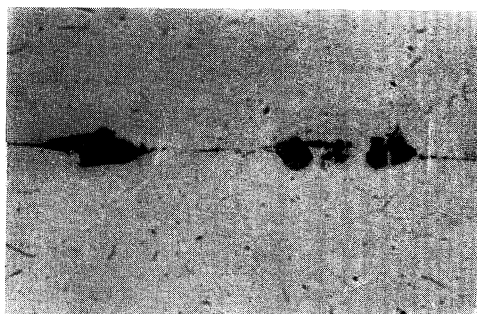
× 400

巨大なものがよくある

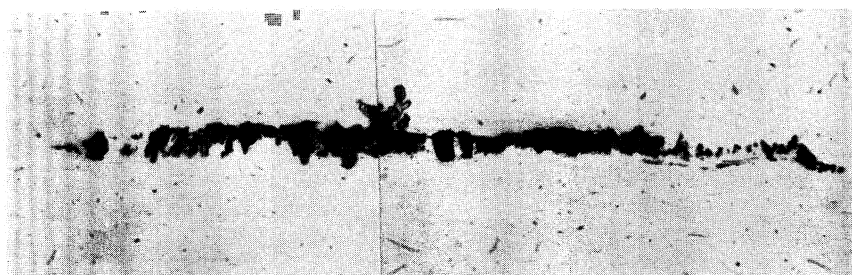
H 社



× 100

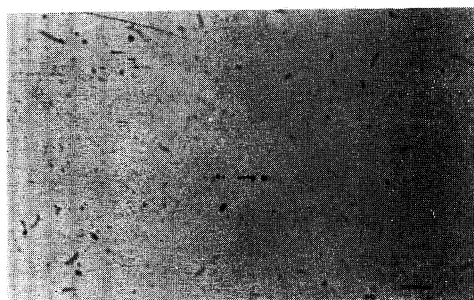


× 400 上部のもの

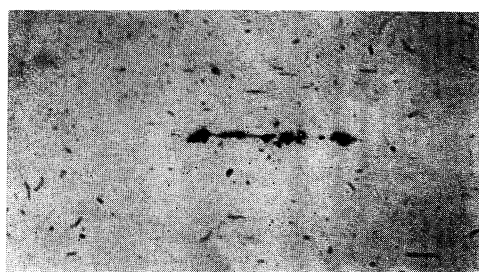


下部のもの
× 400

I 社 このようなものがほとんど連続して分布する

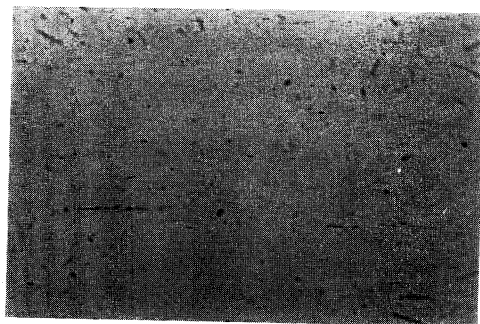


× 100

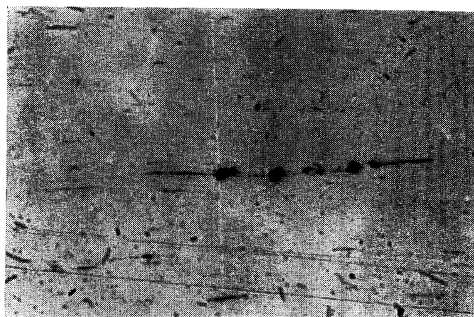


× 400

J 社



× 100



× 400

K 社

付 録 3 Appendix 3

増径率の計算要領

図のごとく直径 d_0 なる心線の中心 O のまわりに直径 d 、半径 b なる側線が a なる半径をもって配置される。このとき次式が成立する。

$$\frac{b}{a} = \sqrt{1 + \left(\frac{\cos \alpha'}{A}\right)^2} \cdot \sin \alpha' \dots\dots\dots (1)$$

ただし $\sin 2\alpha' = -2A^2(\alpha' - 0.5236)$

$$\alpha' = \frac{A^2}{\frac{\sin 2\alpha'}{2\alpha'} + A^2} \cdot \frac{\pi}{N} = \frac{A^2}{1 + A^2} \cdot \frac{\pi}{N} \dots\dots\dots (2)$$

ここに N は側線の数で、供試索の場合 $N=6$ であり、

$$A = \tan \theta = \frac{(\text{ストランドのヨリの長さ})}{(\text{ストランドの円周})} \dots\dots\dots (3)$$

これより $\frac{d_0}{d} = \frac{a}{b} - 1$

増径率 $= \left(\frac{d_0}{d} - 1\right) \times 100$ であるから、これより

$$\text{増径率} = \left(\frac{a}{b} - 2\right) \times 100 \dots\dots\dots (4)$$

式中 A を求めるにはストランドのヨリの長さが必要になるが、ストランドは型付けされて真直にするわけにいかないの、つぎのような近似法で求めることにした。

まずストランドから側線1本をはずして、ヨリの長さ (h) を測定する。つぎに心線および側線の直径をノギスで測定し、それぞれ d_0 、 d とする。

概略のヨリ角を θ' とすると

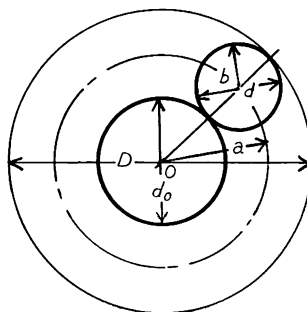
$$\tan \theta' = \tan^{-1} \left[\frac{h}{\pi(d_0 + d)} \right] \dots\dots\dots (5)$$

この型付けされたストランドを真直ぐに伸ばしたときのストランドのヨリの長さを $h \cdot \text{cosec } \theta'$ とすると、ストランドのヨリ角 θ は次式で得られる。

$$\tan \theta = \frac{h \cdot \text{cosec } \theta'}{\pi(d_0 + d)} = \tan \theta' \times \text{cosec } \theta' = \sec \theta' \dots\dots\dots (6)$$

すなわち増径率を求めるには、(5)式により θ' を、(6)式により $\tan \theta (=A)$ を、(2)式で α' を、(1)式で b/a を求めると、最後に(4)式で増径率は求められる。

各社の増径率を算出すると付録 3—1 表のとおりである。



付録 3—1 表 各 社 製 ワ イ ヤ ロ ー

区 分	社 名	A	B ₁	B ₂	C	D	E
<i>h</i>	(mm)	65	60	54	60	55	55
<i>d</i>	(mm)	1.776	1.801	1.799	1.774	1.774	1.772
<i>d</i> ₀	(mm)	1.862	1.828	1.898	1.848	1.802	1.983
<i>θ'</i>	(度)	9°58'	10°46'	12°8'	10°45'	11°33'	12°7'
<i>A</i>		5.77	0.357	4.755	5.367	4.997	4.763
<i>α'</i>	(度)	0.511	0.357	0.504	0.511	0.506	0.506
<i>b/a</i>		0.494705	0.493823	0.491210	0.495586	0.492233	0.495400
増径率	%	2.14	2.50	3.57	1.78	3.15	2.85
実測増径率	%	4.8	1.6	5.6	4.4	1.7	11.9
(実測値)/(計算値)		2.24	0.64	1.57	2.47	0.54	4.17

付 録 4 Appendix 4

トルクの計算要領

ロープのトルクは次式で表わされる。

$$T = \frac{R \cos \alpha \cdot \sin \alpha (E - 2G)}{2G \cos^2 \alpha + E \sin^2 \alpha} \cdot P \dots\dots\dots \text{文献(4)式}$$

ただし *T*: トルク, *R*: コイル平均半径, *E, G*: 弾性係数, *P*: 軸方向の荷重, *α*: ピッチ角

*P*が大きくなり丸棒のごとくなった場合

$$T = -\cot \alpha \cdot R \cdot P \dots\dots\dots \text{文献(23)式}$$

文献(23)式により各社のトルクを算出すると、付録 4—1 表のとおりである。

付録 4—1 表 各 社 製 ワ イ ヤ ロ ー

区 分	社 名	A	B ₁	B ₂	C	D	E
<i>D</i>	(mm)	16.83	16.73	16.63	16.83	16.75	17.45
2 <i>R</i>		11.22	11.53	11.08	11.22	11.17	11.63
ヨリ長さ		125.8	125.3	132.4	130.3	131.4	131.3
<i>α</i>		74°21'	73°52'	74°28'	75°5'	74°56'	74°28'
<i>P</i> =7 t のトルク							
(kg・m)		11.00	11.67	10.78	10.45	10.52	11.32
実測値 (kg・m)		11.0	12.3	12.3	10.9	11.1	10.5
(実測値)/(計算値)		1.00	1.055	1.141	1.042	1.054	0.937

ブの増径率の計算表

F	G ₁	H	I	K	G ₂	J
65	62	65	60	58	56	56.6
1.774	1.795	1.791	1.764	1.768	1.748	1.755
1.840	1.858	1.812	1.820	1.820	1.858	1.970
9°55'	10°29'	9°53'	10°38'	11°12'	11°26'	11°41'
5.811	5.494	5.829	5.421	5.245	5.043	4.939
0.512	0.510	0.512	0.511	0.509	0.5038	0.5035
0.495400	0.494520	0.495361	0.495458	0.494096	0.49	0.49
1.85	2.21	1.87	1.83	2.39	4.2	4.2
3.8	3.5	1.2	3.4	3.0	6.3	12.3
2.05	1.58	0.64	1.86	1.25	1.5	2.93

ブのトルクの計算表

F	G ₁	G ₂	H	I	J	K
16.67	17.21	16.57	17.07	16.17	16.67	17.00
11.22	11.47	11.05	11.38	10.78	11.11	11.033
131.3	127.7	126.9	128.2	135.6	126.5	129.4
75°7'	74°14'	74°42'	74°25'	75°59'	74°34'	74°37'
10.34	11.33	10.57	11.11	9.42	10.73	10.91
11.1	10.5	11.7	14.0	10.6	12.0	12.1
1.074	0.927	1.106	1.261	1.125	1.118	1.110