

RIIS-TN-78-3

UDC 614.839 : 534.222 : 536.46

産業安全研究所技術資料

TECHNICAL NOTE OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

1979

ワイヤーロープのフラクトグラフィと 事故調査へのその応用

田中正清
近藤太二

労働省産業安全研究所

ワイヤロープのフラクトグラフィと 事故調査へのその応用*

田中正清
近藤大二

Fractography of Wires and its Application to Accident Analysis

Masazumi TANAKA**
Taiji KONDO**

Important informations about fracture are often left on the fracture surfaces. Fractography, or fracture analysis mainly with electronmicroscope, therefore, has become an influential method studying fracture mechanisms and analyzing fracture accidents. This technic, so far, has been used mostly for slightly wrought (rolled or forged) materials, for example, those for airplane, ship and pressure vessel structure and for various machine parts, but it has scarcely been for wire materials. Such materials, however, are classified in one category, and characterized by excellent mechanical properties and extremely elongated structure owing to severe drawing.

Therefore, it seems very important to analyze fractographically steel wires as a representative of them, in order to get more knowlage of fracture phenominan and data for accident analysis.

In this report, first, fractographic features of eutectoid steel wires are fundamentally investigated using scanning electronmicroscope, as to tensile, torsion, impact bending and fatigue fracture modes.

All modes show basically similar fracture surface morphology of wires to usnal wrought steel. But some differences that seems to characterize the material of this kinds are also found.

Eor example, elongated dimples in the shear lip often have parallel ridge fairly long, and river pattern on cleavage facets is less clear, and striations are less frequent and definable.

Secondly, using the fractograpy as a main measure, the wire rope that had fractured and caused a serious accident is investigated precisely. In this cace, the above preliminary analysis was refered to beneficially. The rope has been used as the lift wire of a derrick crane on a cargo ship. From the precise analysis of failure state of the rope around the fractured portion and some tests to confirm its strength, the following conclusions concerning to the cause of rope fracture were obtained ;

(1) Wires in rope fractured portion were subjected to marked one-side wear and fair fatigue failure. Outlayer wires were worn so hard that most of them fractured and had no practical loading capacity. Innerlayer wires were fairly worn too, and more than 21 of them had broken or had no loading capacity.

* 一部はクレーン Vol.13, No.2 (1975) に発表

** 機械研究部 (Mechanical Engineering Reserce Division)

(2) The structure in which an end block of left guy tackle is not appropriate, and accelerated wear and fatigue failure mentioned above.

(3) Marked wear was caused because the rope had been rubbed with the side plate of block, through unsuitable design of mast block and/or topping rope.

(4) Fatigue failure was accelerated by a number of microcracks previously formed in zinc-plated layer of wires, and also helped by rather small block diameter.

(5) The strength of the topping rope at fractured portion had been lowered to about 4 ton before the accident, because of the failure described above.

(6) It is assumed that cargo collapsing during unloading operation, caused dynamic load corresponding to 4 ton and broke down the rope.

At last, through experience on empirical and practical fracture analysis, the importance of them are emphasized.

1. ま え が き

材料の破壊によって生じた破面には、その破壊の状況を物語る最も重要な情報が残されている場合が多い。従って、破面形態の解析（フラクトグラフィ）は破壊原因の調査や破壊機構の研究のための有力な手段であって、肉眼や光学顕微鏡的手法としてはかなり古くから利用されていた様である。ところが、近年、電子顕微鏡が開発され、その高い分解能、大きな焦点深度により、破面の微視的形態の詳細な観察・解析が可能となり、エレクトロンフラクトグラフィ (Electron-fractography) と呼ばれて、この分野に画期的な進歩をもたらした。電子顕微鏡を中心とするこの破面解析は、1950年代半ばにフランスで開始され¹⁾、続いて米国を中心に大きく発展し、1960年代半ば頃までにはすでに重要な成果が報告されている^{2,3)}。一方、我国でも1960年代後半から急速に発展し、グループ研究活動も含めかなり多くの成果が公表されている^{4~6)}。これらの重要な研究によって、現在では、破壊というものが多くの因子の影響を受ける複雑な現象であるにもかかわらず、残された破面の局部は比較的種類の少ない特徴的な微視破面形態から構成されている場合の多いことが明らかにされ、それらの形成機構、巨視的な変形様式や破面形態との関連性についても、信頼性の高い解釈が与えられている。現在は、これら破面解析の基礎面の一層詳細な検討と、これまでの成果の応用を目的とした、材料や負荷条件、さらに他の物理的および化学的環境条件の異なる場合の破壊現象解明のための地道な研究が続けられているようである。金属材料に関して概観すると、これまでの解析の対象は主として、航空機、船舶および圧力容器用の構造材や機械部品用材など、比較的加工度の少ない圧延あるいは鍛造材であって、線材についての解析例は殆んど公表されていない^{7,8)}。しかし、線材は強い引き抜き加工で金属組織が長手方向に著しく引伸ばされている点や強度的に非常に優れている点など、他の材料にみられない特徴を有する材料群であって、古くからワイヤロープを代表として、重要な強度部材としても幅広く使用されており、その破壊が直接、間接に関連した災害もまた数多く生じている。従って、このような事故の原因究明や防止策の一環としてこの種の材料についての破面解析を行っておくことは非常に有意義であると思われ

る。

本報では、以上のような事情を考慮し、まず初めに最も一般的に使用されている共析鋼ワイヤロープの素線について、静引張り、振り、衝撃および疲労の各々の破壊様式に対する巨視的および微視的破面形態の解析を行った結果を紹介する。次にそれを参考にしたフラクトグラフィ的手法を中心に死傷災害を招いたワイヤロープ破断事故原因を調査した。なお、本報での破面観察には最近とくに広く使用されている走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた。これは透過型電子顕微鏡にやや遅れて開発されたが、実物破面を低倍率から高倍率まで広い倍率範囲で観察できること、そのため観察位置の確認が容易であること、焦点深度が極めて大であって像に立体感があること、しかも取扱いが比較的容易であることなど、一般に粗い表面から構成された破断面の形態解析に適している。

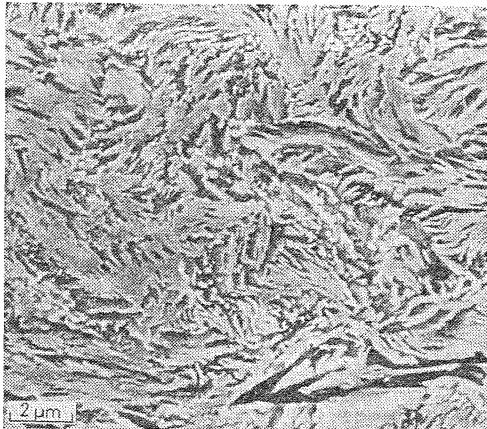
2. ワイヤロープ素線の破面形態

2.1 破面解析試料

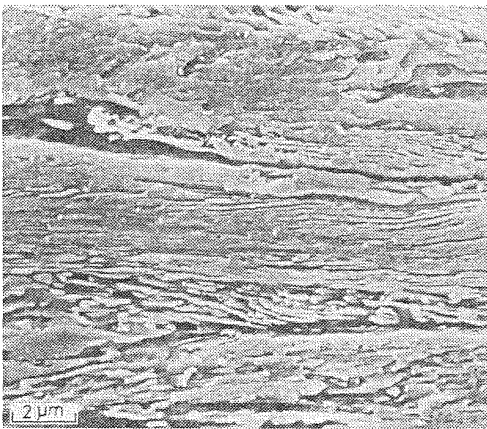
破面解析の供試材は、JIS G 3506 SWRH 62 A (化学組成は C ; 0.59~0.66, Si ; 0.15~0.35, Mn ; 0.60~0.90, P ; 0.040 以下, S ; 0.040 以下 Wt%, 標準引張り強度 165 kg·f/mm²) 相当の直径 3.2 mm の硬鋼線材である。ワイヤロープ素線は一般に焼戻しのソルバイト組織であるが、本供試材は **Photo. 1** に示すように素線長手方向に著しく引伸ばされたセメンタイトとフェライトの細かい層状組織となっている。この素線を室温空气中で引張り試験、換回試験、素線に切欠きを付した試験片でのシャルピー衝撃試験および回転曲げ疲労試験によって破壊させ、得られた破面を走査型電子顕微鏡で観察した。なお疲労についてはより実際の破面としてシーブを介してU字曲げ疲労させた直径 12.5 mm の JIS 4号ワイヤロープから採取した直径 0.7 mm の素線の破面を観察した。

2.2 引張破面

巨視的には引張破壊は **Fig. 1** に示すように典型的な cup-and-cone と呼ばれる形態を生じる場合が多い。破断部近傍の素線の局所的なくびれはかなり著しいが破断部以外では殆んど断面減少がみられず、従って標点間の伸びも比較的小である。走査電顕で観察す



(a) Transverse section
横断面



(b) Longitudinal section
長手方向断面

Photo. 1 Microscopic structure of wire
素線の顕微鏡組織

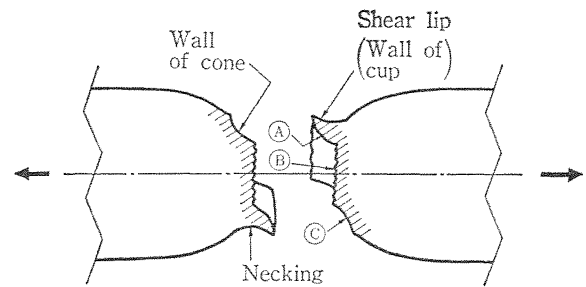


Fig. 1 Longitudinal section of tensile fractured wire, (shows a variety of cup-and-cone type)
鋼線引張破断部の軸断面形状

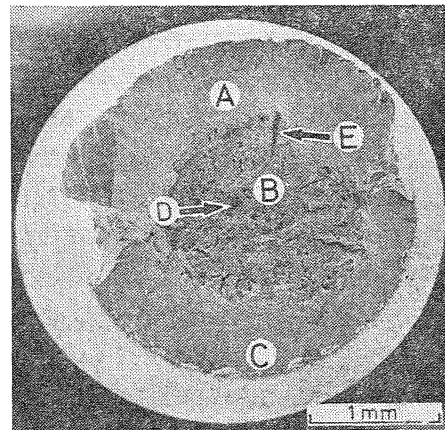


Photo. 2(a) Fracture surface of wire(tension)
素線の引張破断面形状

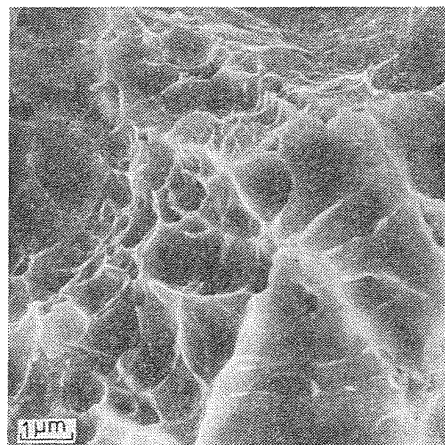


Photo. 2(b) Detail of area B in Photo. 2(a)
写真(a)中のB領域の詳細

ると低倍では Photo. 2(a) に示すような形態である。写真中の記号はそれぞれ Fig. 1 中の記号と対応している。B領域は cup の底に相当し外周部から横方向の変形を拘束されて引張破壊を生じた部分で、Photo. 2(b) に示すように主として方向性のない等軸ディンプルから構成されている。ただしこれらの中に Photo. 2(a) 中のDのように普通のディンプルに優先して存在し拡大したと思われる大空洞や、Photo. 2(a) 中のEのように破面上で半径方向に生じた割れが散在している。後者の割れは恐らく塑性拘束によって軸および半径方向に垂直な(円周方向の)引張りが作用したため

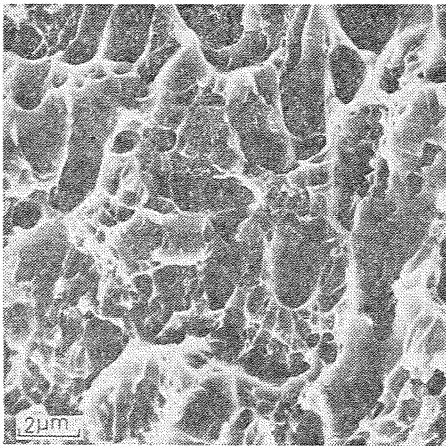


Photo. 2 (c) Detail of area A in Photo. 2 (a) showing large elongated dimple and smaller ones
写真(a)中のA領域の詳細

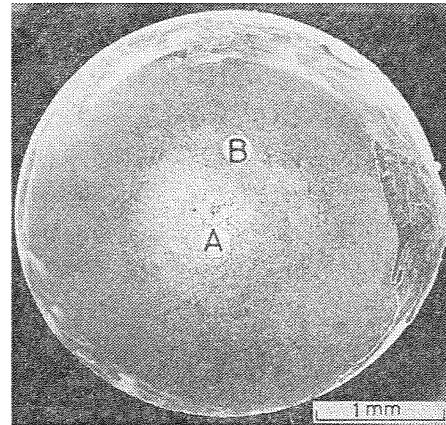


Photo. 3 (a) Fracture surface of wire (torsion)
素線の捩り破断面形状

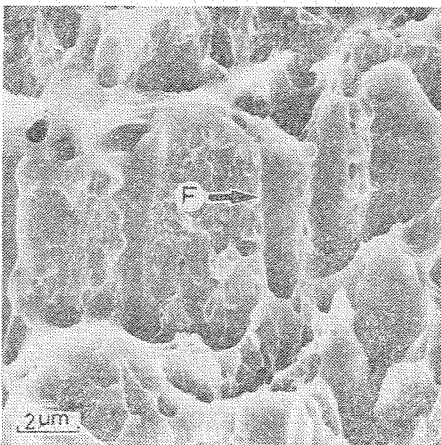


Photo. 2 (d) Detail of area C in Photo. 2 (a)
写真(a)中のC部の詳細

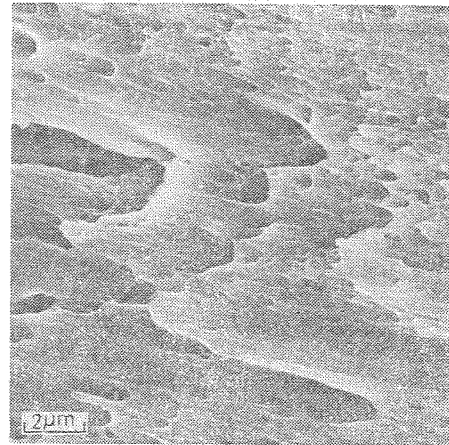


Photo. 3 (b) Detail of area B in Photo. 3 (a) showing extremely, elongated dimples
写真(a)中のB領域にみられる著しく伸長したディンプル

に形成されたものであろう。Photo. 2 (c) は (a) 中の A の Shear lip と呼ばれている cup 側面部の形態で、Photo. 2 (d) は、(a) 中の C 部すなわち cone の外端部近傍の微視形態を示す。巨視破面に垂直な方向から観察すれば前者は中心方向に凸、後者は中心方向に開いた放物線形に伸びた伸長ディンプルであるが、(c) では観察方向が 45° 方向に近いのでディンプルの伸長状態をとらえにくくなっている。なお、Photo 2 (d) の F のように通常の圧延率の小さい延性材料で見られる典型的伸長ディンプルと若干異なって組織に沿

ったと思われるかなり長い平行部を有するディンプル状形態がみられる。またこの辺りのディンプルには寸法の大きいものとそれらの中にある小さいものと大略 2 つのグループがあるように思われる。これらは引抜き加工により伸びた組織の材料に特有の形態かと思われる。

2.3 捩り破面

軸方向の張力を殆んど与えず捩回破断した場合の巨視破面は軸に垂直な平坦面であり、Photo. 3 (a) に示

すように外周部にこすれた痕跡のみられることが多い。微視的にはほぼ全断面が周方向に伸びたせん断型の伸長ディンプルで占められており、その伸長の程度は外周に近いほど著しい。しかし基本的には photo. 2 (d) と同類の特徴を示す。写真 (b) は写真 (a) 中の B 部でみられる大きく伸びたディンプルである。なお振り破面でも回転中心の領域 (Photo. 3(a) 中の A) では引張破面と同様の等軸ディンプルで構成されている。

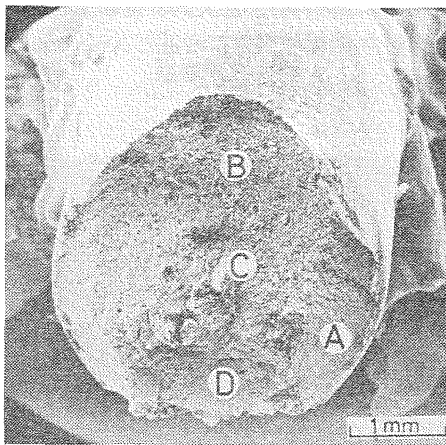


Photo. 4(a) Fracture surface of wire (impact 3-point bending)
素線の衝撃破断面形態
(衝撃3点曲げ)

2.4 衝撃破面

室温で切欠き付きの素線をシャルピー衝撃破断させた場合の巨視的破断形態を Photo. 4(a) に示す。巨視的にはかなり塑性変形を伴った複雑な形態である。Fig. 2 に軸断面形状を示す。微視的には上記写真中の A 部のシャーリップ形成領域、B 部の繊維状組織の領域でそれぞれせん断型の伸長ディンプルおよび等軸ディンプルが観察される、しかし、C 領域には衝撃破壊の特徴であるへき開状破面がディンプルに囲まれて散在している (Photo. 4(b), (c))。但しこの場合には軟鋼のへき開破面に比べてリパーパターンがやや不鮮明

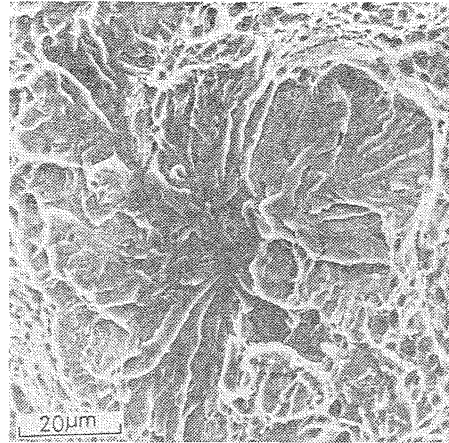


Photo 4(b) Cleavage surface of area C of Photo. 4(a), surrounded by dimple
写真(a)中のC領域にみられたへき開破面

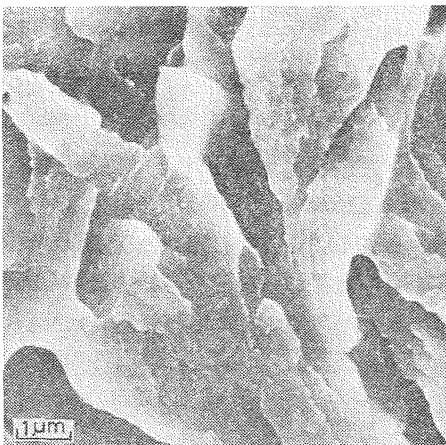


Photo. 4(c) Precise of the cleavage facets in Photo 4(b)
写真(b)中央部のへき開ファセットの詳細

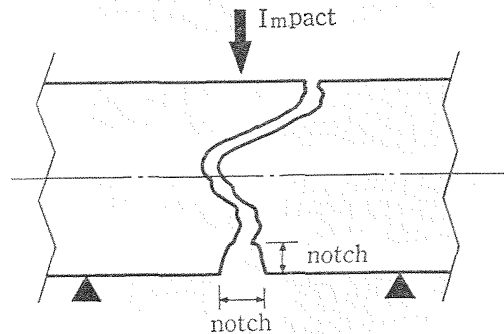


Fig. 2 Longitudinal section of the wire fractured by impact-three point bending
衝撃曲げ破断させた切欠き付き鋼線の軸断面形状

である。これは本供試材の組織にもともと大きなフェライト結晶粒が存在しない上に、引き抜きによる大きな塑性変形を受け、広い範囲に渡り良好な結晶性を有するフェライト領域が存在しないためと思われる。なおD部にはへき開面はみられず、引裂き型のディンプルとなっている。

2.5 疲労破面

回転曲げ疲労破面は巨視的には素線軸に垂直な平坦面と最終破断部の若干凹凸の大きい領域とから成る。その低倍写真を **Photo. 5 (a)** に示す。高サイクル(低応力)条件であるため1つのき裂が優先的に発生・拡大し平坦な疲労域が広く、しかも最終破断領域(B)は中心から偏っている。A領域の微視形態を、**Photo. 5 (b)** および **(c)** に示す。不明瞭ながらもまれにC部のような疲労特有のストライエーション状模様やそれに沿った割れがみられた。しかしこの材料では通常この形態の明瞭なものは見出しにくいようである。このことは衝撃破面についての項でのべたと同じ組織の特徴によるものかもしれない。やや低倍率での **Photo. 5 (b)** のEに示すような巨視的き裂伝播方向に沿った稜(tear ridge)や、それに垂直な二次き裂Fおよびそれらによって境界づけられたDのような比較的滑らかな平坦面なども疲労の特徴をよく表わしている。なおA'領域はA領域の疲労き裂に遅れて反対側表面から発生した疲労き裂の成長域で、上記A領域と全く同様の破面形態である。最終静破断部B領域は種々な型

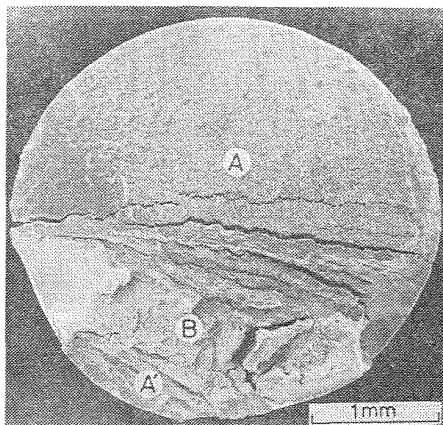


Photo. 5(a) Fracture surface of wire (rotating bending fatigue)
素線の回転曲げ疲労破面形態

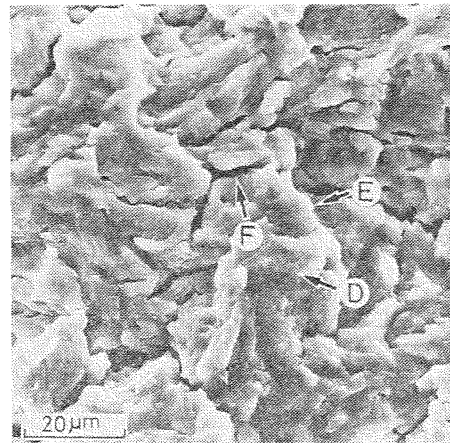


Photo. 5 (b) Area A in Photo. 5 (a)
写真(a)中のA領域の拡大

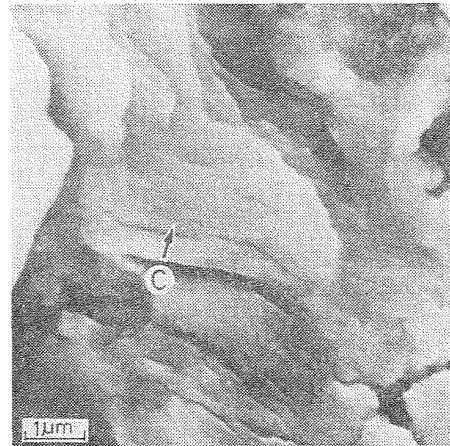


Photo. 5 (c) Fatigue striations observed in area A in Photo. (a)
写真(a)のA領域にみられた疲労ストライエーション

のディンプルがやや複雑に混在している。疲労き裂の伝播の最終領域には比較的顕著な縦割れがみられるがかなりかたさの大きい層状組織をもった材料の特徴を表わすものかもしれない。

Photo. 6(a) はU字曲げ引張り疲労破断させたワイヤロープの破断部である。この部分から採った直径0.7 mm 素線の破面の低倍および高倍率写真を **Photo. 6 (b)** および **(c)** に示す。破面形成後に損傷を受けている場合が多いにもかかわらず、この場合には素線の疲労試験とは違った実際のワイヤロープにおける疲労破壊の特徴を示している。即ち **Photo. 6(b)** が示すよ

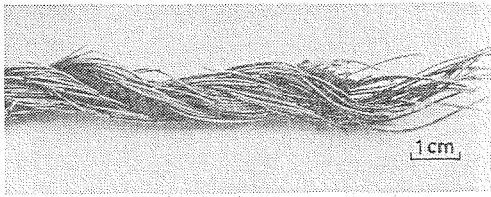


Photo. 6 (a) Fatigue failure of a wire rope (Cyclic U-bending in tension)
引張下でのU字曲げ疲労破断したワイヤロープの損傷状況

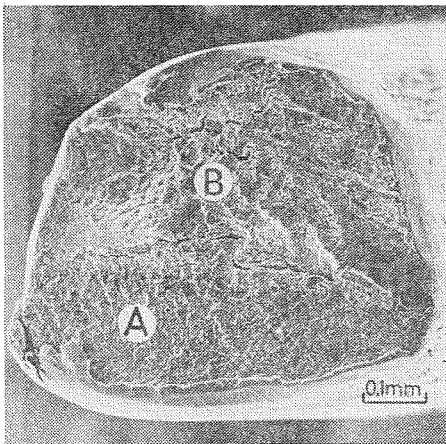


Photo. 6 (b) Fracture surface of a wire in the rope shown in Photo 6(a)
写真(a)のロープ中の素線破断面形態

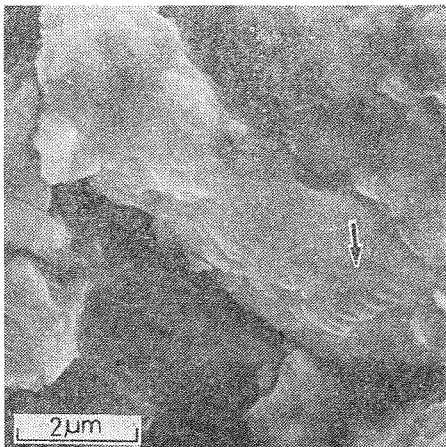


Photo. 6 (c) Detail of area A in Photo. 6(b), showing tire mark
写真(b)中のA領域の拡大(右下部に疲労特有のタイヤマークがみられる)

うに素線はまずかなりの摩耗を受け、疲労き裂はその表面から発生・拡大している。やや不鮮明ではあるがその疲労き裂伝播領域Aには特徴的の貝殻模様が形成されており、微視的形態は前記の3.2mmの素線の疲労破面 Photo. 5(c) と全く同様である。さらにやはり疲労破面形態の1つの特徴を表わすタイヤマークも観察された (Photo. 6(c))。B領域には静破断を示す等軸あるいは引き裂き型のディンプルがみられた。

3. ワイヤロープ破断事故調査例

3.1 事故の概要

昭和48年、鉄材運搬船の揚荷作業中、デリッククレーンのリフトワイヤがマストブロックの位置で破断し、デリックブームが落下して作業員1名が死亡、他の1名が重傷を負うという事故が発生した。Fig. 3はワイヤロープの負荷状態の概要を示す。

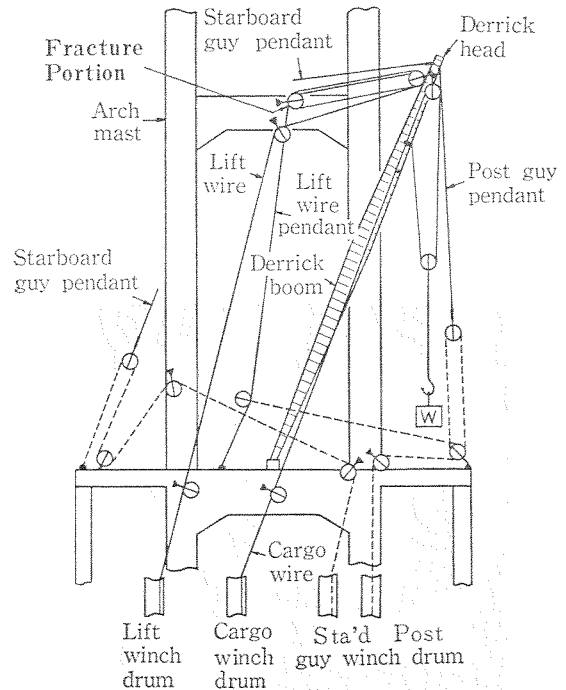


Fig. 3 Loading condition of the wire rope at the accident
事故当時におけるワイヤロープの負荷状態

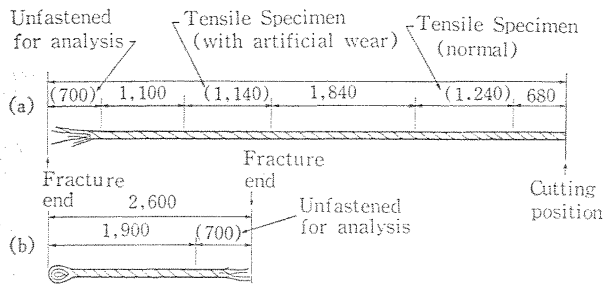


Fig. 4 Fractured rope that caused accident and its use for various analysis
 (a) Derrick-head side,
 (b) Shackle (fixed) side.
 事故ワイヤロープと試験片採取位置

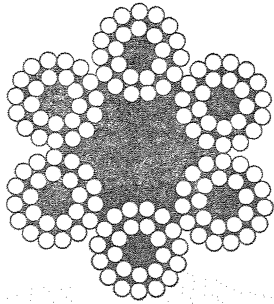


Fig. 5 Transverse section of JIS G 3525 No. 4 6×24 wire rope
 JIS G 3525 4号 6×24 ワイヤロープの横断面形状

3.2 破断ワイヤロープの概要

調査のため入手したロープは破断部からシャックル側とデリックヘッド側の2本1組である。これらのロープの寸法および調査の為に必要な試験片採取位置を Fig. 4 の略図に示す。ロープは Fig. 5 に示すような6ストランド構成で、各ストランドは外層15本内層9本の素線から成りメッキが施されている。ロープ外径は破断部から離れたところで約 24 mm であり JIS G 3525 4号 6×24 メッキ種に該当するものである。

麻芯には特に異常はなく油分も十分ではないが残存しており、芯に封入された標識紙からメーカーが確認できた。

破断位置は各ストランドともほぼ同一個所で、特に引伸ばされたり短くなったストランドは見られな

い。

破断時からかなりの時間を経過しているが保存状態は比較的良好で、保存中の損傷は殆んど見当らなかった。しかし事故後に生じたと思われる錆状の汚れがおもに破断部に観察され、またロープ取扱い中に破断部から 5, 6 本の素線が脱落した。Photo. 7 は破断部の全体的な状態を示す、

3.3 損傷および欠陥の状況

3.3.1 摩耗

Photo. 8 に示すように破断部近傍は激しい片側摩耗を生じており、その程度は破断端から離れるに従って軽微となる。破断端からシャックル側で約 95 cm、デリックヘッド側で 90 cm 以遠では殆んど問題にならず、破断部付近だけが特に激しい摩擦を受けたことを示している。これらの片側摩耗はことに外層素線にお

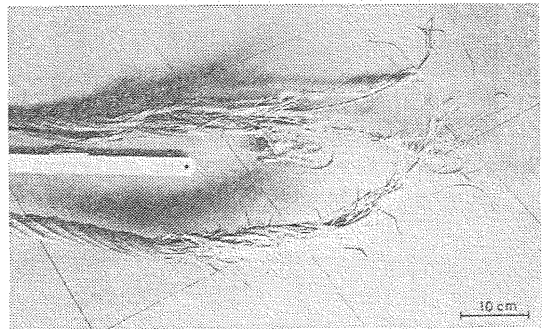


Photo. 7 Fracture appearance of the rope
 ロープの破断状況

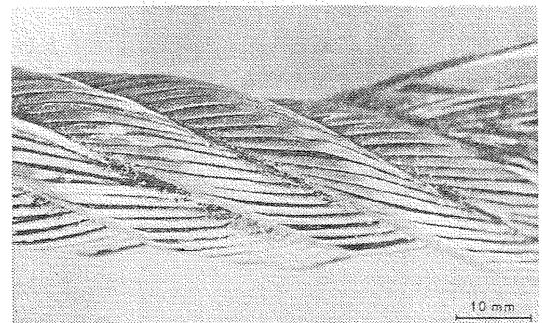


Photo. 8 Wearing appearance of outlayers (near the fracture portion)
 破断部近傍における外層素線の摩耗状態

いて顕著であるが破断部の先端に近いところでは外層素線が脱落し、露出した内層素線の一部にもかなりの摩耗がみられる。これら摩耗の状態は滑らかに回転する滑車の表面によって生じたのではなく、何か固定された金属との間で擦れ、かなり急激に生じたものと思われる。なお、いずれの部分においても問題となるような素線同志の摩擦によるいわゆる内部摩耗の著しいものは認められなかった。

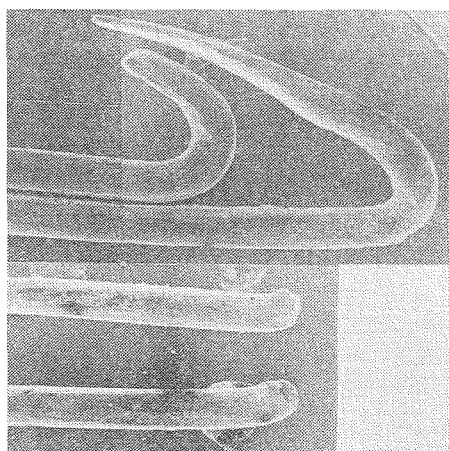
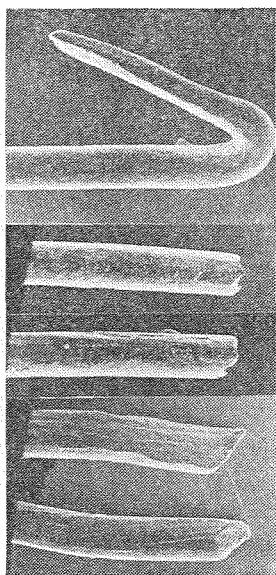


Photo. 9(a) Fracture ends of outlayers
外層素線の破断端形状



hoto. 9(b) Fracture ends of innerlayers
内層素線の破断端形状

3.3.2 断線および脱落

素線の断線箇所は外層素線では多くは上述の摩耗による断面減少部であるが、破断した素線の末端は殆んどがU字型に折れ曲るかまたはその曲り際で破断している。Photo. 9 (a) はそのU字曲りと摩耗状態を示す素線破断端部の低倍率写真である。これらの状況は、これらの素線が事故発生の前に既に断線ししかもその後かなりの疲労を受けたことを示すものと考えられる。

内層素線の破断部は Photo. 9(b) に示すように一部は摩耗部での断線であるがその他に、殆んど断面減少を伴わない断線がかなり観察される。一方破断部の内層と外層の素線では明らかに後者が短かく、素線がかなり脱落したことが予想された。そこでロープ破断部の接続状態を次のようにして調べた。即ち、まずシャックル側およびデリックヘッド側とも各ストランドに同一回転方向で番号を付した後、破断端から約70cmの位置でロープを切断し、各々のストランドを内層と外

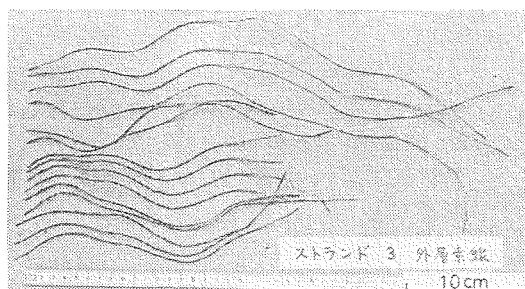


Photo. 10(a) Unfastened outlayer (fracture at the right)
破断部外層素線の解体例

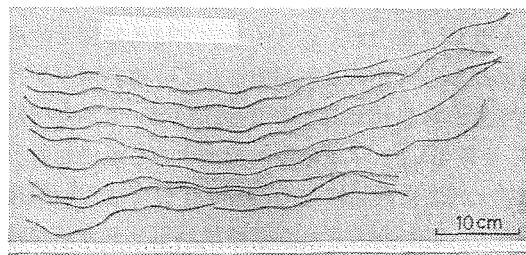
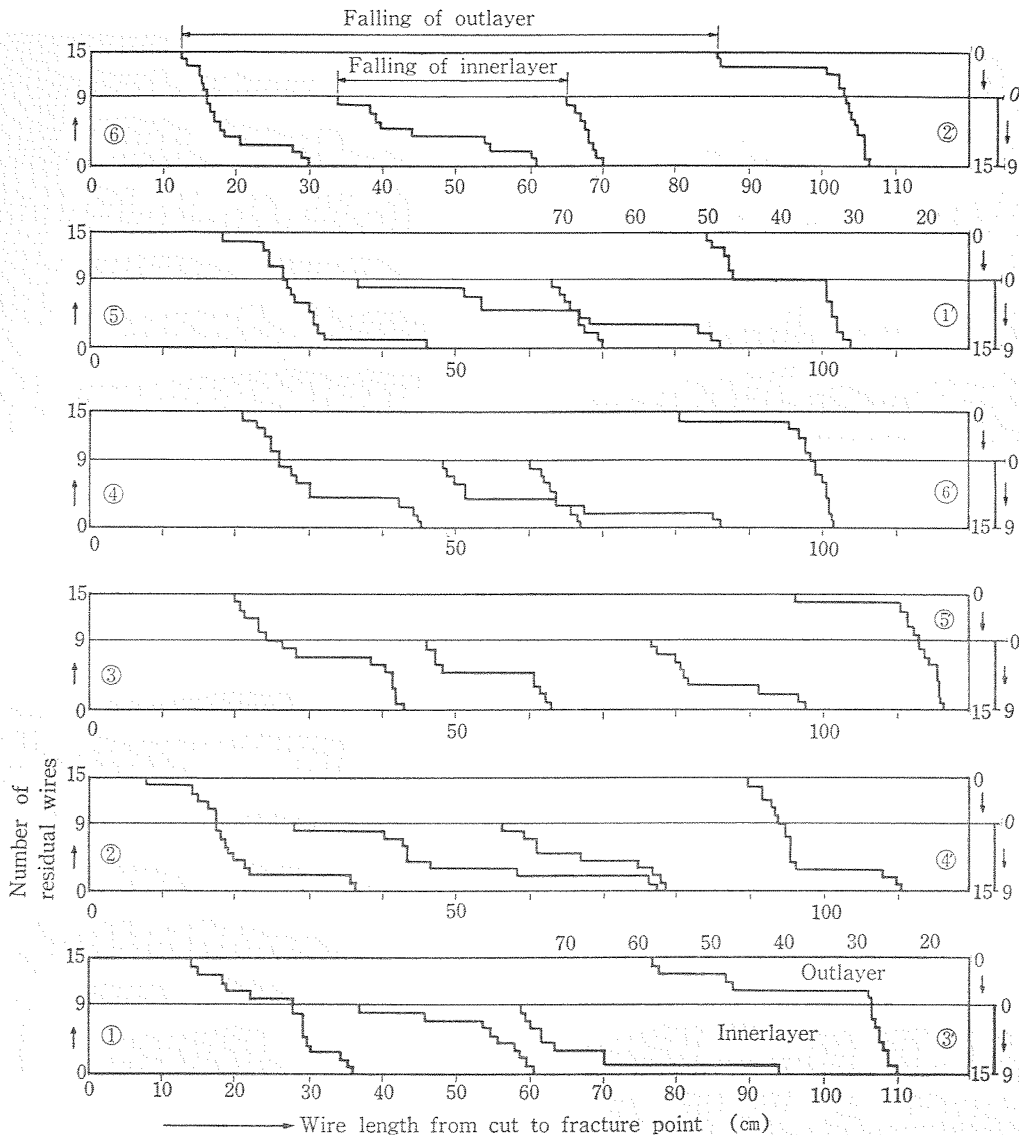


Photo. 10(b) Unfastened innerlayer (fracture at the right)
破断部内層素線の解体例



①～⑥：①～⑥ Strand's number on derrick head side and shackle side respectively

Fig. 6 Estimation of connecting condition of the rope at its fractured portion
ロープ破断部の接続状態の推定

層を区別して素線に解体した。Photo. 10 (a), (b) に外層および内層素線の解体例を示す。次に切断位置からの素線長さを測定し、長さの順に整理してストランド毎のグラフを作成した。このグラフを用い、Table 1 に示すように順次ストランドをずらせながらどの素線も重複しないようにして突き合せを行ない、両側のロープの距離が最も短くなる組合せを求めた。その結果得られた最近接の突き合せの例を Fig. 6 に示す。

この結果は少なくとも外層素線で平均約 76 cm、内層素線で平均約 18 cm の脱落があったことを示している。この数値は内層素線の破断状況からみてやや過大

とも考えられるが、これは破断時に素線が引伸ばされたためや、測定誤差によるものかもしれない。しかしたとえ内層素線の脱落がもっと少なかったと仮定しても外層素線は殆んど全てが脱落を生じていたと断言できる。

3.3.3 表面き裂

素線を溶剤で洗滌して表面を顕微鏡で観察したところ、破断部の近傍の素線の一部表面に円周方向の細いき裂が狭い間隔で並んでいるのが発見された。そこで負荷の作用しないアイスプライスの編み込み端部、破断部近傍および破断部から十分離れた非破断部の各所

Table 1 Estimation of connecting condition of the rope at its fractured portion

		Combination of strands					
		①—①	①—②	①—③	①—④	①—⑤	①—⑥
Strand number (Derrick head-side)	①	cm	cm	cm	cm	cm	cm
	②	62.0	63.0	68.6	65.8	49.3	67.4
	③	80.0	78.0	71.2	52.6	64.8	63.8
	④	70.5	65.2	52.0	69.3	65.5	65.2
	⑤	63.4	54.2	72.4	66.8	69.4	73.8
	⑥	58.8	76.0	72.0	73.0	77.0	72.0
Max. in each combination		80.0	78.0	*72.4	73.0	77.0	73.8

* This combination gives the minimum connecting distance to be estimated.

から適当に約30本の素線を採取し表面を#1,000の水ペーパーとバフで研磨し光学顕微鏡観察した。その結果、上記き裂群は位置に無関係に全ての個所で観察され、しかもそれら平行なき裂の間には網状に連なった割れが共存している場合が多いことが分った (Photo. 11 (a))。

しかし素線表面を補強のためさらにニッケルメッキしてから樹脂に埋込んで縦断面を研磨して観察すると



Photo. 11 (a) Surface cracks of slightly polished wire
素線表面にみられるき裂群

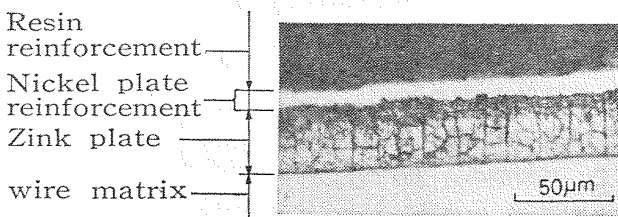


Photo. 11 (b) Cracks formed in zink-plated layer
素線メッキ層中に形成されたき裂群

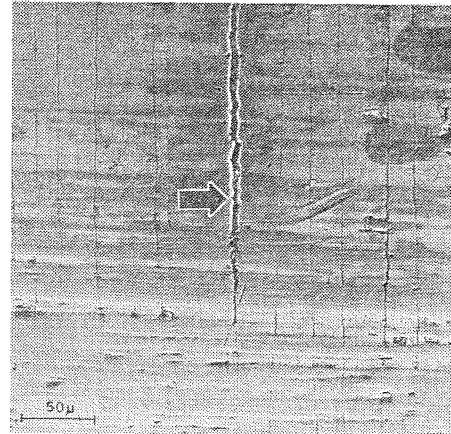


Photo. 11 (c) Opening surface crack (in the innerlayer)
開口した表面き裂の例

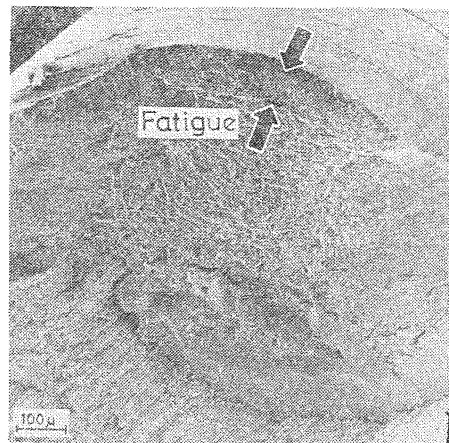


Photo. 11 (d) Penetrating condition of the surface crack shown in Photo. 11 (c)
写真 (c) 矢印のき裂の内部への侵入状況

Photo. 11 (b) に示すように、これらのき裂群は元来は亜鉛メッキ層の中にだけ存在したものと判明した。

ところが破断部の内層素線は他の個所と異なり上述の細かいき裂群の中の幾つかがかなり大きく成長していた (**Photo. 11 (c)**)。そこでこの種のき裂を有する素線を液体窒素に浸漬してから急速に曲げ破断させて、破断部を観察してみた。**Photo. 11 (d)** はその結果で、表面近くにメッキ層よりも深く侵入した環状のき裂が先在したことが分る。しかもそれは微視的に **Photo. 5 (c)** で示したと同じ疲労破面である。一方、

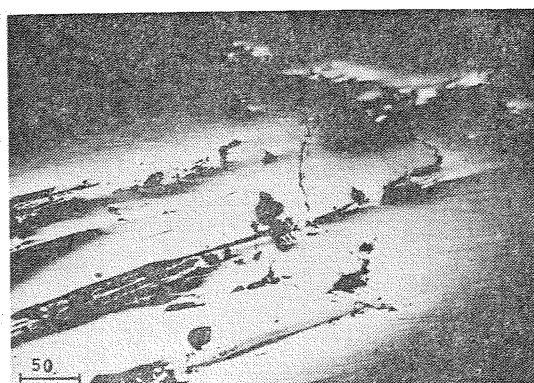


Photo. 12 Surface cracks in worn area (after slightly polished)
摩耗部の表面き裂

Photo. 12 は素線の摩耗部表面に生じた小さい疲労き裂である。上述のようなき裂を起点として静破断する場合には後述のように比較的伸びの少ない破断となると考えられる。

3.4 破面形態

ロープ破断部の素線の破面には、かなり損傷または腐食しているものもあるが、肉眼および走査電子顕微鏡による観察によって、ほぼその破壊様式を推定することができる。

外層素線において最も多く見られる摩耗部の破断では、破断点の近傍に明瞭な局部伸びが観察される場合が多く肉眼的にやや複雑なせん断状や典型的ではないが浅いシャーリップ状形態がみられる。また微視的には **Photo. 2(d)** と同様なディンプルが観察された。従ってこれらの破断部は摩耗により断面が減少して負荷に耐えきれずに静破断したものであると思われる。しかし局部的な伸びには差があって、伸びの小さいものは疲労き裂がある程度進行した後に静破断したものである。このことは外層素線では破面の損傷が著しいため、直接残存破面から確認はできなかったが、**Photo. 12** に示したような摩耗部のき裂の存在から充分予想される。

内層素線においては既述のとおり、摩耗部での破断のほか、殆んど摩耗なしに疲労き裂から破断したものが多く。その場合破面の静破断部に cup-and-cone 状に近いシャーリップが残されていることもあるが、全体的に破断部近傍の局部的伸びおよびくびれが非常に

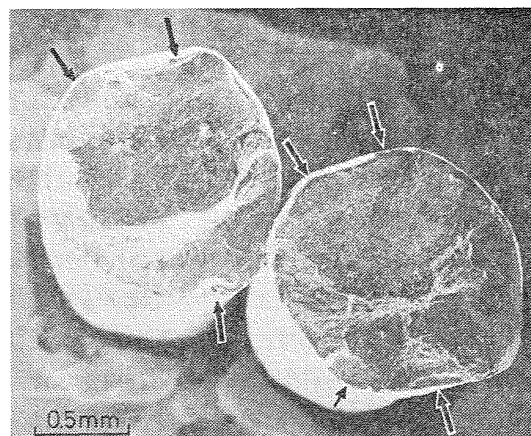


Photo. 13 Fracture ends of innerlayers (Fatigue cracks have initiated from the arrowed surface areas)
内層素線の破断端の形状

小である。**Photo. 13** は疲労き裂から破断した代表例である。破面の損傷のため分りにくいですが表面から円弧状に侵入した平坦な疲労域が確認できる。また **Photo. 14** は摩耗の少ない表面から疲労き裂が発生伝播した破面形態を示す。これは取扱い中にわずかな指先の手力で折れた破断部の内層素線の破面であって、き裂を有する素線の強度が非常に低いことを示している。

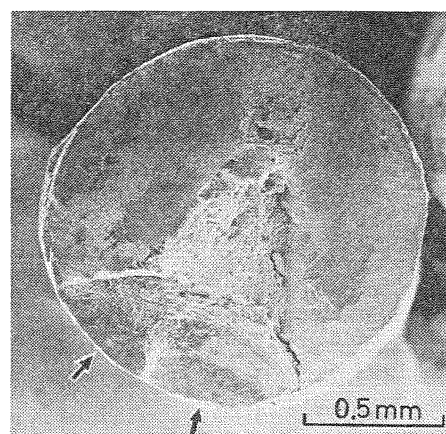


Photo. 14 Innerlayer fracture from fatigue crack (This fractured by hand in analysis treatment)
疲労き裂からの破断例
(調査中の取扱いで破断した内層素線)

3.5 素線の強度試験

ロープの健全部の強度および損傷による強度低下を確認する目的で、内層素線の引張および振り試験を実施した。試料としては使用時の損傷の少ないと思われる非破断部素線および破断部近傍で摩耗部を有する素線の2種を採用した。結果を **Table 2(a)**, **(b)** に示す。この表からみると、非破断部についてはメッキ層におけるき裂の存在にも拘らず、引張強度、伸びおよびくびれ状態の何れにも特に異常は認められなかった。破断部近傍の摩耗した素線についてもき裂の影響は殆んど認められず切断荷重はほぼ残存断面積に比例している。

振り試験はロープ破断部および非破断部の素線について振り間隔 135 mm で試験し破断までの振り回数

Table 2(a) Tensile properties of wires (normal portion)

ロープ健全部から採取した素線の引張試験結果

Wire number	Tensile strength (kg)	Tensile stress (kg/mm ²)	Elongation (%)		note
			gauge length = 50 mm	gauge length = 200 mm	
1	240	172.7	—	—	fracture at shack end gauge point is unclear
2	229	164.7	—	3.6	
3	238	171.2	9.0	5.65	
4	229	164.7	5.6	3.7	
5	233	167.6	7.8	4.4	
Mean	233.8	168.3	7.47	4.34	

Table 2(b) Tensile properties of wires (worn part of innerlayer in fractured portion)

破断部近傍内層素線の摩耗部の引張試験結果

Wire number	Minimum diameter (mm)	Residual sectional area (mm ²)	Tensile strength (kg)	Tensile stress (kg/mm ²)
1	1.24	1.355	230	169.7
2	0.89	1.00	156	156.0
3	1.00	1.135	192	169.0
4	1.07	1.21	196	162.0
5	1.20	1.33	220	165.4
Mean		1.206	198.8	164.4

Table 3 Torsion test of innerlayers in fractured portion (Shackle side)

シャックル側破断部の内層素線についての振り試験結果

○ : marked, △ : fair, × : weak or no (有り) (かなり有り) (無し)
(gauge length = 135 mm)

素線番 Wire number	線号	振り破断回数 Number of torsions to fracture (nf)	局部的 捩れ Local torsion	摩耗 Wear	偏心 Eccentricity
Strand ①	5	1	○	○	○
	6	16	×	—	×
	7	2	×	—	○
	8	6	×	—	△
Strand ③	1	11	△	×	△
	2	1.5	×	×	△
	3	9.5	×	×	○
	4	2.5	×	×	△
	5	9	×	×	×
	6	4	△	○	○
	7	12	×	×	△
	8	1.5	○	○	○
	9	14	×	×	△

(n_f) を求めた。非破断部の素線の n_f はほぼ正常値 ($n_f = 24 \sim 32$) を示しているが、破断部近傍の素線の n_f は著しくばらついている。**Table 3** には破断部についての測定結果を示す。 n_f が小さい場合の素線破断部は、摩耗によって断面積が減少しその部分で局所的に捩れているものと、摩耗の有無には関係なく、局所的捩れが肉眼的には殆んど確認できないほど小さいものがある。後者の破面には **Photo. 15** に示すように素線軸に垂直方向の、疲労き裂と思われる破面が存在している。

以上の試験結果から、素線のき裂に対する強度の低下は、静引張りの場合については断面積に比例する程度以上には確認されなかったが、振りにおいては極めて大きく、破断時の伸びの小さいことが推定される。従来の研究によればき裂を有する素線は負荷がロープの破断荷重に達する前に個々に切断するため、疲労によるロープの強度低下は素線の強度低下より著しく大であることが知られている⁹⁾、従って本件ワイヤロープにおいて疲労き裂を有し、殆んど伸びを伴わずに破断している素線は、ロープ破断に先立って破断してい

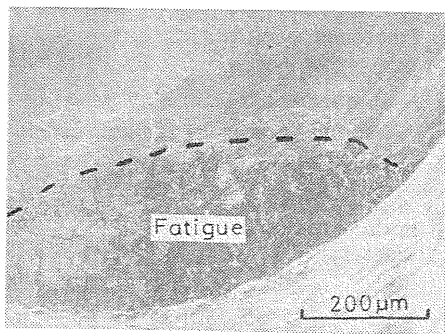


Photo. 15 Fatigue crack previously formed in a wire (near the fractur portion)
破断部近傍の素線の捩り破面上の先在き裂

破断部の状況を再現させるためグラインダを用い試験片の片側を研削した。研削量は中央部が最も多く両側に行くに従って少なくなるようにした。中央部ではロープ表面の外層素線を各々のストランドで8本程度削りとり内層素線もその直径の半分近くまで削った。引張試験には 500 ton 万能試験装置を用いた。

引張試験における伸び—荷重線図を Fig. 7 に、また両試験片の切断状況を Photo. 16 に示す。最大荷重および伸び率はそれぞれ非破断部で 29.5 ton および 7.9%、人工摩耗部で 5.0 ton および 0.38% であった。非破断部は切断荷重が JIS 規格値 (26.7 ton) より大で、伸びも適当で、ワイヤロープの引張特性の点で異常は認められない (以下健全部と呼ぶ) 摩耗試

たもので最終荷重を負担することができなかったと考えるのが妥当であろう。

3.6 ワイヤロープの引張試験

本件ワイヤロープのうち摩耗の激しい破断部を除く非破断部の健全度を確認し、さらに摩耗による強度低下の概略値を推定するため以下のワイヤロープ引張試験を実施した。

試験片は事故ロープの図 1 に示す位置から採取した非破断部試験片と、同様の位置から採取して人工摩耗を加えた試験片との 2 本である。人工摩耗は事故ロー

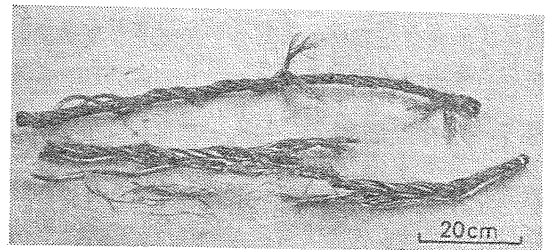


Photo. 16 Appearance of tensile fractured wire ropes
upper ; normal state specimen
lower ; artificially worn specimen
健全部および人工摩耗つきワイヤロープの引張破断状況

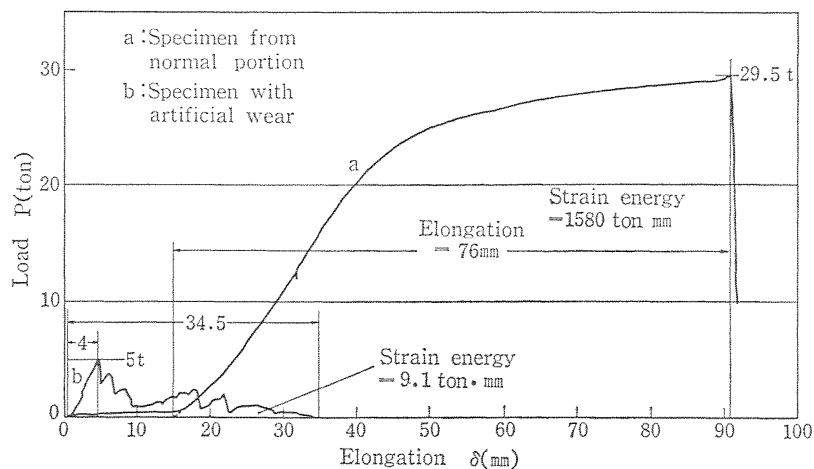


Fig. 7 Result of the tensile tests of wire rope (load-elongation diagram)
ワイヤロープ引張試験結果 (荷重—伸び線図)

験片では Photo. 16 にみられるように試験時に多数の素線脱落を生じ事故品における脱落の多かったことを予想させる。素線の破断状況は健全部試験片の場合にはほとんどが cup-and-cone 型の延性破面であるのに対し、人工摩耗試験片ではおもにせん断状破面を呈しており、事故ロープ破断部解析の参考になる。なお引張試験結果から耐衝撃性を推定するため切断荷重、伸び率および歪エネルギー値の健全部に対する摩耗部の比を求めると切断荷重は 16.9% であるが、伸び率では 4.8%、単位長さ当りの歪エネルギーではわずか 0.53% となり衝撃強度の低下が極めて大きいことが予想される。

ここで試験に用いた人工摩耗試験片の摩耗状態が事故ロープと比べて相当の誤差のあることは当然考えられるが、事故ロープの場合には、前述のとおり摩耗のほかにかかなりの疲労が加わっており、実際に負担できた荷重やエネルギーは、この試験結果よりもさらに低かったと考えてよいであろう。

3.7 残存断面積

素線の引張試験によって、素線の摩耗部分の強度はほぼ残存断面積に比例することが判ったので、事故ワイヤロープの負担能力を推定するための準備として、切断部近傍の内層素線の残存断面積を調べた。残存断面積の算出は、摩耗を弾性片側摩耗と仮定し、最小直径の測定値から計算によって求めた。ただし、既に述べた理由により、先端がU字型に曲った素線、および伸びが少なく疲労き裂から破壊したと思われる素線については、計算から除外した。

ストランド毎の各素線に対する最小直径の測定値と、残存断面積の計算値を Table 4 に示す。この結果、事故直前の内層素線の残存断面積の合計は、38.37 mm² であったと推定される。

3.8 考 察

これまでに述べたように、外層素線について(イ)破断部近傍に著しい摩耗が認められしかもそれは素線同志の摩擦による内部摩耗ではなく外部から進行した外部摩耗である、(ロ)残存する破断部素線の先端の大部分がU字型に曲るか、その屈曲部で破断している、(ハ)大量の素線の脱落があっても摩耗が内層素線についてもかなり認められるというような状況が確認された。これらから総合的に判断すると外層素線の大部分は事故当日作業開始前に既に断線していたと判断され仮りに断線しないでも、荷重を負担する能力は殆んど無かったと思われる。

Table 4 Residual sectional area of rope at the fractured portion
残存断面積の測定
—number— : fracture at wearing portion
|— : fracture from fatigue crack
(— : U-type bend

Wire No.	Minimum diameter (mm)	Residual sectional area (mm ²)	Wire No.	Minimum diameter (mm)	Residual sectional area (mm ²)
Strand ①'	1	—1.22—	1	0.66—	0.67
	2	—1.07—	2	0.97—	1.10
	3	1.16—	3	—	—
	4	—1.00—	4	—	—
	5	—0.89—	5	1.14—	1.28
	6	1.08—	6	1.35—	1.39
	7	—1.0—	7	1.25—	1.36
	8	—1.21—	8	(—	—
	9	(—	9	0.98	1.11
Strand ③'	1	—	1	—	—
	2	—0.72—	2	(—	—
	3	—1.00—	3	—1.04—	1.18
	4	—	4	—1.17—	1.31
	5	0.56—	5	(—	—
	6	—0.84—	6	—0.99—	1.12
	7	—	7	—1.08—	1.22
	8	—	8	(—	—
	9	—	9	—0.85—	0.94
Strand ⑤'	1	—	1	(—	—
	2	—	2	—1.12—	1.26
	3	0.94—	3	—1.10—	1.24
	4	1.15—	4	—1.15—	1.29
	5	1.24—	5	—1.11—	1.25
	6	—	6	—1.15—	1.29
	7	(—	7	1.06—	1.20
	8	(—	8	—1.21—	1.34
	9	—	9	(—	—

次に内層素線については、(イ)Table 4 で示したように総数 54 本の内層素線中 10 本には破断部のU字曲りが、また 11 本にはメッキ層中の割れにより発生が促進されたとと思われる疲労き裂からの破断が認められる、(ロ)Fig. 6 において測定誤差を考慮して ±5cm の間隙または重複を許すとしてもなお 32 本の素線に

脱落が生じていたことになる。これらを3.3に述べた損傷状況と合せ判断すると、内層素線においても事故当日作業開始前に既にかかなりの摩耗と、疲労き裂の発生による劣化を受け、少くとも(イ)で述べたように21本以上の素線が断線あるいは荷重負担能力のない状態にあったと考えられる。

ロープ破断部の激しい摩耗の原因については資料不足で断定はできないが、マストブロックの滑車の回転の不良による摩擦か、マストブロックの構造とトップピングロープの掛け方の関係の不備によるマストブロック側板との摩擦かのいずれかによると推定さる。

また、本件のトップピングロープの固定部付近にはFig. 3で示したように左舷ガイテークルロープの端末滑車を取り付けられている。従ってトップピングロープはブームの上下および水平移動の度にマストブロックの滑車上を繰返しかなり大きく移動し、上記の摩耗を著しく促進したと考えられる。なおマストブロックの滑車直径410mmとトップピングロープの直径 $d=24$ mmとの比は17.1であり6×24型ワイヤロープに対してはやや過小であり、これもロープの疲労損傷を速める原因となったと思われる。

一方、ワイヤロープの破断直前における強度は以下の幾つかの方法から推定できる。

(イ) 残存断面積による推定

残存断面積としては3.7で求めた内層素線の値($\sum A'=38.37$)を用い、外層素線は荷重負担能力なしとしてこれを除外する。残存断面部の破断応力はTable 2の平均値($\sigma_B=164.4$ kg/mm²)を用い、撚り減り率 $\gamma=0.1$ とする。滑車による曲げ応力 σ_b は素線直径 $\delta=1.33$ mm、滑車直径 $D=410$ mm、ワイヤロープの曲げ応力弾性率 $E=10,000$ kg/mm²を採用し次式から求める。

$$\sigma_b = E_b \cdot \delta / D = 32.4 \text{ kg/mm}^2$$

以上によりワイヤロープの強度 P_{B1} は次のように求まる。

$$P_{B1} = \sum A' \cdot (\sigma_B - \sigma_b) (1 - \gamma) = 4.56 \text{ ton}$$

しかしこの推定に用いた残存断面積は破断部近傍の最小直径の測定値から求めており、素線の脱落などを考慮すると、実際に破断した部分の残存断面積は前記の値よりかなり小さいこと、さらにTable 2の素線強度平均値は先述のように過大評価となっている可能性が大きいこと、また非破断部付近は損傷のため素線に不均等な力がかかったことも考えられ、実際の破断強度

は上記推定値よりかなり小さいと判断される。

(ロ) 脱落素線数による推定

内層素線には既述のように32本の脱落があり、荷重は脱落しなかった残り22本の素線だけが負担すると考え、各素線の残存断面積として前記全残存断面積測定値($\sum A'$)の平均値を用いると脱落しなかった素線の残存断面積の合計は、

$$(38.37/33) \times 23 = 25.58 \text{ mm}^2$$

となる。これを前記(1)の式に代入すると、ワイヤロープの強度 P_{B2} は

$$P_{B2} = 3.04 \text{ ton}$$

となる。しかしこの値は脱落した素線が全て事故発生以前に負荷能力を失っていたと考えているため、過小な推定値となっているかもしれない。

(ハ) 人工摩耗試験による推定

3.6に示した人工摩耗試験片の引張強度は曲げおよび疲労による強度低下を含んでいない・直径 D の円筒に巻きつけた直径 d のワイヤロープの引張り強さは真直ぐな引張強度に比べ $D/d=16$ のとき88%に、 $D/d=18$ のとき90%に低下することが報告されている⁹⁾。本件の場合 D に滑車直径410mmを採用すると $d=24$ mmであるから $D/d=17.1$ となり曲げ引張強度は89%に低下すると考えられる。また初断線発生まで疲労させたロープ強度は引張強度のほぼ90%にまで低下することが従来の研究から推定される⁹⁾。これらの値を人工摩耗試験片の引張強度試験結果 $P=5.0$ tonに適用すると本件ワイヤロープの強度は

$$P_{B3} = 5.0 \times 0.89 \times 0.90 = 4.01 \text{ ton}$$

と推定される。

なおこの外にも以下のような方法でワイヤロープ破断部の強度の推定が可能であり結果のみを列挙すると、

(ニ) ウインチ能力による推定値

$$P_{B4} \geq 4.90 \text{ ton}$$

(ホ) ハッチ内吊り上げ作業による推定値

$$P_{B5} \geq 3.61 \text{ ton}$$

以上5つの推定値を総合すると事故時の作業開始前における本件トップピングロープの強度は3.0～4.90 tonの間であったことはほぼ確実であり、さらに個々の推定法を考慮すると、それらの平均値4.0 ton程度であったと推定するのが妥当であろう。

なお吊り荷による静荷重は約2.5 tonと計算されており、上記ロープ強度の推定値(4 ton)から判断する

と実際の破壊時には静荷重の1.6倍の負荷がかかったことになる。この原因についての種々の因子の検討結果によると、可能性の最も大きいものとして吊り荷の荷崩れが挙げられている。しかしクレーンのワイヤロープは荷崩れ程度の動荷重には十分耐えられる安全率を見込んでいる。本ワイヤロープも破断部の極端な強度低下さえなければ事故は起らなかったはずである。また、この局所的な著しい損傷がかなり進行してから事故当時までにはかなりの時間が経過していると考えられるが、その間にこのような主要強度部材についての重大な危険状態が発見・補修されなかったということは保守・管理に大きな欠陥があったといえよう。

3.9 結 言

以上、ワイヤロープ破断事故をロープの損傷状況、原因等につきフラクトグラフィ的手法を中心に解析したがその結果をまとめると、

(1) ワイヤロープ破断部付近の素線には著しい片側摩耗とかなりの疲労損傷が生じており、外層素線は大部分が断線して実際上の荷重負担能力のない状態であった。また内層素線においてもかなりの摩耗と、少くとも21本以上の素線が断線または荷重負担能力のない状態にあった。

(2) トッピングロープに左舷ガイテークルの端末滑車を通す構造は不適當であり、これが破断部の摩耗と疲労損傷を促進した。

(3) 激しい摩耗はマストブロックの不備またはトッピングロープの取付け関係の不良により、ロープが滑車またはブロック側板と摩擦して生じた。

(4) 疲労損傷は素線のメッキ層内に先在した微小き裂群により促進され、滑車直径の過小のため助長されたと判断される。

(5) トッピングロープ(破断部)の事故直前における強度は上記損傷のため約4tonに低下した。

(6) 荷物吊り上げ中に荷崩れによる動荷重が作用して上記負荷で破断した。

4. あとがき

以上ワイヤロープ素線につき実験室中で得られた種々の破壊様式に対する破面形態を予め調べるとともに、そのデータを参考にロープ破断事故の調査を行った結果を報告した。

一般に、フラクトグラフィは破壊事故原因の究明に極めて有力な手段であるが、単独では必ずしも十分でない場合もあり、他の情報や科学的調査手法と相俟って一層その価値を発揮できることが、この事故調査例によっても明らかであろう。

なお、2章の破面解析試料の一部は東京製鋼(株)の御好意により提供されたもので、ここに感謝の意を表する次第である。

(昭和54.3.31受理)

参 考 文 献

- 1) Henry, G. and Plateau, J., La Microfractographie, Éditions Métaux, 1966
- 2) Phillips, A., Kerlins, V. and Whiteson, B. V., Electron Fractography Handbook, AF ML-TDR-64-416(1965)
- 3) Beachem, C. D. and Pelloux, R. M. N., ASTM STP-381(1965), p. 210
- 4) 日本機械学会関西支部, 東海支部, フラクトグラフィに関する座談会資料 (1970-8)
- 5) 日本機械学会関西支部, エレクトロンフラクトグラフィに関する座談会資料 (1971-11)
- 6) 日本機械学会関西支部, フラクトグラフィ分科会報告, 1973; 同概要, 日本機械学会誌, 76巻(1973) p. 1203
- 7) 例えば A. S. M. Metals Handbook 8th Ed. Vol. 9, pp. 468-469(1974)
- 8) 田中正清, クレーン, 第13巻2号 pp. 6-10 (1975)
- 9) 幅野慎太郎: ワイヤロープの劣化とその対策に関する研究(1960)未公表

産業安全研究所技術資料 RIIS-TN-78-3

昭和 54 年 8 月 1 日 発行

発行所 労働省産業安全研究所

〒 108 東京都港区芝 5 丁目 35 番 1 号
電 話 (03) 453-8441(代)

印刷所 新日本印刷株式会社

UDC 614.839 : 534.222 : 536.46

ワイヤロープのフラクトグラフィと事故調査へのその応用

産業安全研究技術資料 RIIS-TN-78-3, 1~18 (1979)

初めに、強い引き抜き加工による優れた強度特性を有するワイヤロープ素線のフラクトグラフィ的解析を施した。各種の破壊様式に対する鋼線の破面形態は基本的には通常の煉鋼と同じであるが、詳細において線材特有と思われる若干の相違を示している。次にこの結果を参考にしたフラクトグラフィ手法を中心に実際に重大な災害を引起したワイヤロープの破断事故を調査した。事故発生直前におけるロープ破断部の激しい損傷状況を明確にすると共に、他の種々の方法による検討結果と合せて、その損傷の原因および破断時におけるロープ強度を詳細に検討した。

UDC 614.839 : 534.222 : 536.46

Fractography of wires and its Application to Accident Analysis

by Masazumi Tanaka and Taiji Kondō

**Technical Note of the Research Institute of Industrial Safety, RIIS-TN-78-3, 1~18
(1979)**

First, fractographic features in various fracture modes are analyzed (fundamentally) on steel wires which have excellent mechanical properties through severe drawing. Basic similarities and some differences in detail, compared with usual wrought steels, are found. Secondly, a serious accident caused by rope fracture, is investigated, using the fractography referred to the above result as a main measure. The severe damage state of the rope (at fractured portion) and its causes are clarified. Moreover, the residual rope strength on the accident are precisely estimated.