

新制
工
794
京大附図

# ワイヤロープの劣化の非破壊検査 に関する研究

平成元年10月

塚田和彦



# ワイヤロープの劣化の非破壊検査 に関する研究

平成元年10月

塚 田 和 彦



## 目 次

### 緒 論

1. 本研究の目的	1
2. ワイヤロープの使用劣化とその管理・取替基準	1
3. ワイヤロープの非破壊的劣化検査法研究の歴史と現況	4
3.1 放射線を用いる方法	5
3.2 電磁的あるいは磁氣的検査法	5
3.3 振動・音響的試験法および超音波・AEを利用する方法	10
4. 本論文の構成と内容の概観	11

### 第 I 部 磁気を用いるワイヤロープの劣化評価に関する研究

第 1 章 半導体感磁性素子を用いるワイヤロープの漏れ磁束探傷	18
1.1 緒 言	18
1.2 ワイヤロープの使用劣化と磁気探傷法	19
1.3 漏れ磁束探傷装置における基礎的問題	19
1.3.1 励 磁	19
1.3.2 検 出	20
1.4 磁気ヒステリシスが探傷に及ぼす影響	22
1.4.1 実 験	23
1.4.2 結 果	24
1.4.3 探傷出力への影響	26
1.5 結 言	29
第 2 章 PWS 吊ケーブルの漏れ磁束探傷	32
2.1 緒 言	32
2.2 大径静索の劣化とその探傷における問題点	32
2.3 PWS 吊ケーブル	33
2.4 探傷装置	34
2.4.1 励磁方式と所要起磁力	34
2.4.2 検出器	35
2.4.3 装置の構造	36
2.4.4 信号処理回路	36
2.5 損傷評価の方法	38

2. 5. 1	損傷の検出感度	40
2. 5. 2	横断面内における損傷部位置の標定	42
2. 5. 3	損傷の評価手順	42
2. 6	PWS吊索の現地探傷	43
2. 6. 1	探傷の状況	43
2. 6. 2	結果・考察	44
2. 7	結 言	46
第3章	局部腐食損傷をもつPWSケーブルの残存強度推定	48
3. 1	緒 言	48
3. 2	劣化したワイヤロープの強度推定の現状	48
3. 3	残存強度の推定方法とその検証	49
3. 3. 1	供試体	50
3. 3. 2	漏れ磁束探傷による断面積損失率の推定	51
3. 3. 3	残存強度推定	53
3. 4	実ケーブルへの適用例	56
3. 4. 1	対象としたPWS吊ケーブル	56
3. 4. 2	強度試験結果と考察	56
3. 5	結 言	59
第4章	全磁束測定型ワイヤロープ探傷法とその応用	61
4. 1	緒 言	61
4. 2	全磁束法について	62
4. 2. 1	Return Flux 法 と Main Flux 法	62
4. 2. 2	全磁束法適用における留意点	63
4. 3	損傷と探傷信号出力の関係について	63
4. 3. 1	実 験	63
4. 3. 2	結果・考察	64
4. 4	腐食した吊ケーブル用鋼線の磁氣的断面積測定	67
4. 4. 1	実 験	67
4. 4. 2	結 果	69
4. 4. 3	考 察	73
4. 5	結 言	75
第5章	ワイヤロープの曲げ疲労劣化とその磁氣的評価	77
5. 1	緒 言	77
5. 2	曲げ疲労劣化とその諸現象	77

5. 3	実 験	78
5. 3. 1	供試体	78
5. 3. 2	曲げ疲労試験機	79
5. 3. 3	漏れ磁束探傷と全磁束探傷	81
5. 3. 4	実験方法および実験中の諸計測	81
5. 3. 5	残存強度の測定と分解検査	82
5. 4	結 果	82
5. 4. 1	ロープ構造と素線断線発生の態様	82
5. 4. 2	ロープの伸びと残存強度の関係	85
5. 4. 3	漏れ磁束探傷記録について	88
5. 5	考 察	88
5. 5. 1	表面断線数とロープの残存強度	88
5. 5. 2	探傷結果の解釈	89
5. 6	結 言	92

## 第Ⅱ部 ワイヤロープへのAE検査法の適用に関する研究

第6章	加速度計によるワイヤロープ引張疲労試験中のAEの観測	94
6. 1	緒 言	94
6. 2	ワイヤロープのAEについての研究の現況	94
6. 3	実 験	95
6. 3. 1	供試体	95
6. 3. 2	断線検出システム	95
6. 3. 3	実験手順	96
6. 4	結 果	96
6. 5	考 察	99
6. 6	結 言	100
第7章	鋼線の磁歪効果とそのワイヤロープ非接触超音波検査への利用	102
7. 1	緒 言	102
7. 2	磁気現象を利用する非破壊的材料評価について	103
7. 3	ワイヤロープ用鋼線の磁歪特性	103
7. 3. 1	実 験	103
7. 3. 2	結 果	105
7. 3. 3	考 察	112

7. 4	磁歪効果を利用した超音波の非接触励起・検出	115
7. 4. 1	鋼線への適用	115
7. 4. 2	ワイヤロープへの適用	118
7. 5	結 言	120
第8章	ワイヤロープ引張試験における素線破断A Eの非接触検出	123
8. 1	緒 言	123
8. 2	実 験	123
8. 3	結 果	124
8. 4	考 察	127
8. 4. 1	検出波動の周波数	127
8. 4. 2	波動伝播と減衰	128
8. 5	結 言	130
第9章	ワイヤロープ引張疲労試験における劣化過程の監視	132
9. 1	緒 言	132
9. 2	実 験	133
9. 2. 1	供試体および引張疲労試験機	133
9. 2. 2	素線破断A Eの検出	134
9. 2. 3	荷重・伸びの計測	134
9. 3	結果・考察	134
9. 3. 1	ロープの伸びおよび剛性の変化と素線断線数の推移の関係	134
9. 3. 2	素線破断位置の標定	136
9. 4	結 言	139
第10章	素線破断A E非接触検出法のワイヤロープ曲げ疲労試験への適用	141
10. 1	緒 言	141
10. 2	実 験	141
10. 3	結果・考察	142
10. 4	結 言	147
結 論		149
謝 辞		152
付録 I	ワイヤロープ磁気探傷の損傷検出信号とその処理について	153
I・1	漏れ磁束法および全磁束法の損傷検出信号の基本的特性	153
I・2	漏れ磁束検出信号のベクトル軌跡表示	157

I・3	漏れ磁束信号からの全磁束信号の合成	158
I・4	漏れ磁束信号にもとづいた損傷の大きさの推定	160
付録Ⅱ	素線破断AEの発生位置の標定と伝播減衰率の推定の方法について	163
Ⅱ・1	AEの発生位置の標定方法	163
Ⅱ・2	伝播減衰率の推定方法	167



## 緒 論

### 1. 本研究の目的

ワイヤロープの不時破断は、使用現場によっては、重大な被害をもたらす原因となる。それゆえ、ワイヤロープの使用劣化の状態を常時監視し、使用の安全性を確保することが重要であり、そのための適正な非破壊的検査方法の確立が希求されている。著者は、その方法として、磁気を利用する方法と A E (Acoustic Emission) 法について検討を行った。まず、比較的古くから研究されている磁気を用いる検査法については、ワイヤロープの劣化状態をより正確に把握できる方法の研究を行った。つぎに、最近ワイヤロープ検査への応用が研究され始めている A E 法については、ワイヤロープに適する実用的な A E 検出法の開発を目的とする研究を行った。

### 2. ワイヤロープの使用劣化とその管理・取替基準

ワイヤロープは、多数の高強度鋼線をより合わせることによって構成される、大きい引張強度と十分な曲げやすさをもった機械あるいは構造要素であり、しかも、千 m にも及ぶような長尺のものも容易に製造できるという特長を有している。鉱業、土木建設業をはじめ、ワイヤロープの使用分野は多岐にわたっているが、その使用形態は 2 つに大別することができる。1 つは、鉱山の立・斜坑やエレベータ、クレーンなどの巻上索を代表とする動索として使用であり、長尺で曲げやすいという特長を有効に利用した、動力を伝達する機械要素としての使用形態である。もう 1 つは、長大橋のケーブルやハンガーロープなどを代表とする静索としての使用であり、長尺で高強度であるという特長を利用した、引張荷重を担う構造要素としての使用形態である。

ワイヤロープは、使用期間の経過とともに、疲労、摩耗、腐食などによって次第に劣化して行くが、ワイヤロープは、一般の機械要素や構造要素に比べて、概してその劣化の進行が速いということが特徴である。これは、ワイヤロープが多数の細い鋼線の集合体であるがゆえのことであり、曲げやすさと表裏一体をなす欠点である。さらに、ワイヤロープは、いずれの使用形態においても、長尺の状態でしかも主たる機能を担う要素として用いられており、一部分の劣化がロープの破断のみならず構造全体の崩壊や大きな人的および経済的被害をもたらす危険性がある。したがって、ワイヤロープの使用劣化の監視と安全性の確保は、いずれの使用現場においても、重要な課題となっている。

鉱山やエレベータなど、動索としての使用現場では、早くからこのことが認識され、ワ

ワイヤロープの劣化状態を常に監視し安全で無駄のない取替時期を決定する努力がなされて来た。一方、静索としての使用現場では、暗に他の構造要素と同程度の耐久性を信じて来たような嫌いがあるが、近年になって、初期に建設された欧米の吊橋のハンガーロープが架け替えられ始めるなど、ワイヤロープの経年劣化に注意が払われるようになって来た。

ワイヤロープの使用劣化は、つまるところ強度の低下と定義づけられるが、劣化状態の観察や測定から、直接的に強度低下の度合いを知ることは、一般に不可能である。したがって、通常は、一定の経験的な基準に照して、ロープの管理およびその廃棄がなされている。しかしながら、たとえば鉱山の立・斜坑巻上げ設備においても、ワイヤロープが適切に管理されているとは言い難い事実がある。カナダ・オンタリオ鉱山局が収集した28鉱山167本の廃棄ロープ試験結果について、R.L.Jentgenらがまとめた1984年の統計<sup>1)</sup>によれば、廃棄ロープのうち、約10%のロープが15%以上の強度低下をきたしており、実はそのうちの5本に1本が30%以上の強度低下を引き起こしていた。また逆に、70%のロープは、なんら強度低下しないうちに廃棄されていたということである。ワイヤロープが、その構造や使用設備・環境によってかなり異なった劣化状況を示すものであって、画一的な基準に照して取替時期を決定することが合理的でないということはあるにしても、現在行われているワイヤロープの劣化検査は、信頼性において、かなり不十分なものであると言わざるを得ない。また、より良い検査方法がないがゆえに、危険を避けるためには過早取替にならざるを得ないのが現状であるともいえる。

ワイヤロープの劣化やその検査・管理について考える際には、劣化のメカニズムとその結果として現われる損傷や付随的諸現象を区別して考えるべきであろう。ワイヤロープの劣化のメカニズムを、R.A.Egenは、Table 1に示したように、時間的要素によって分類することを提案している<sup>2)</sup>。この分類は、ワイヤロープを管理する側の立場から見て、誠に当を得たものと思われる。つまり、1)に Short-term Mechanism として分類されたものは、ワイヤロープを正しく使用していないがために起こるものであり、その結果としてロープには、キンクや曲りなどの変形(形崩れ)が発生する。これらの損傷は、概して大きな強度低下をもたらすものであり、この意味では管理上の重要項目となるが、これらの損傷は目に見えやすく、またその原因もはっきりしている場合が多い。しかも、これらの劣化が起こった場合には、すぐにロープを取替えるのが常であるから、劣化評価の困難性を伴うことはない。一方、2)に Long-term Mechanism として分類されたものは、どのような使用形態においても、その寄与の大小はあるものの、ワイヤロープを劣化させる基本的なメカニズムとなるものであり、本質的に回避することのできないものである。また、それらによって生ずる劣化は、ロープの表面・内部を問わずに徐々に進行していくものである。したがって、ロープの検査および管理においては、これらのメカニズムによって引き起こされるロープの劣化を的確に評価することが、主要な課題となる。

Table 1 ワイヤロープの使用劣化のメカニズムと損傷形態

劣化のメカニズム	損傷形態	付随的現象・劣化兆候
1) Short-term Mechanism Accidents, Mishandling, Operational Problem	キンク, 曲り, かご状変形 つぶれ, ストランドの浮き ストランド切れ	
2) Long-term Mechanism Wear, Corrosion, Fatigue	素線に生じた摩耗痕 素線の減肉および表面凹凸 素線断線	ロープ直径の減少 ロープよりピッチの変化 ロープ全体の伸び ロープ剛性の変化

Table 2 ワイヤロープの取替基準

US Code of Federal Regulation 30 (Mineral Resources) からの抜粋<sup>3)</sup>

『損傷および劣化した部分を切取ることができる場合を除いて、  
以下の各項に示した状態となったワイヤロープは取替えるものとする。』

- 1) ロープの1よりピッチ間の素線断線数がロープ総素線数の5%より多くなったとき、あるいは、1ストランド内の断線数がストランド総素線数の15%より多くなったとき(ただし、フィラー線は含めない)。普通よりロープの場合は、ロープ1よりピッチ間に谷切れ断線(ストランドとストランドの接触部分での断線)が1本より多く生じたとき。
- 2) 摩耗によってロープ直径が6%より多く減少したとき、あるいは、外層素線の直径がもとの直径の1/3より小さくなったとき。
- 3) 腐食が著しいとき。
- 4) 形崩れが起こったとき。
- 5) 熱的な被害を被った場合。
- 6) 非破壊試験によって、ロープの強度が10%以上減少したと認められたとき。

摩耗, 腐食, 疲労によるワイヤロープの劣化は、素線上の摩耗痕(ロープとシーブの接触によって表面素線に生ずるもの, 素線相互の圧迫と滑動によって内部素線に生ずるもの)や、素線の腐食減肉および表面凹凸(Corrosion Pitting)、素線断線(摩耗や腐食が著しく進行した結果生じたもの, 疲労によるもの)などの損傷形態として顕在化するが、これらのメカニズムが単独で発現することは稀であって、一般にはそれらが複合的あるいは相乗的に作用してロープを次第に劣化させていく。劣化が進行したあるいは損傷が累積した結果として、ワイヤロープには、Table 1 に示したような、ロープ直径の減少などの付随的現象が現われる。ワイヤロープの劣化検査方法には、損傷を直接的に測定あるいは観

察するものと、付随的な現象によって劣化を評価するものがある。使用現場において一般に行われている検査の項目としては、(a) ロープ表面状態の目視観察、(b) 表面断線数および位置の確認、(c) ロープ直径減少量の測定、がある。これらのうち、表面断線数は疲労進行度合いの指標、直径減少量は摩耗（あるいは腐食）の進行度合いの指標と認識されており、ワイヤロープの取替基準も、一般に素線断線数（ある区間長さにおける総素線断線数）と直径減少量によって規定されている場合が多い。国々および対象となるロープの構造や使用設備によって多少の差異はあるものの、取替基準としては、Table 2 に示したような項目が掲げられるのが普通である。

ワイヤロープの管理および取替基準は、目視つまり人的な検査を行うことを基本として規定されているのが現状である。しかし、数百mにもおよぶロープを人間が検査することが、膨大な時間と労力のかかるわりには、信頼性の低いものであることは明らかである。また、表面状態や直径の減少量だけでロープの内部劣化状態を判断することにも無理があると言わざるを得ないし、まして、腐食劣化に関しては、直径減少量を指標として評価すること自体疑問である。このような理由から、目視や直径減少量の測定に代わる、より信頼性の高い、ロープ全長にわたって簡便に検査できる非破壊的検査方法の確立が望まれてきた。ワイヤロープが鉱山に広く用いられるようになってから、長年にわたって様々な方法の研究開発がなされて来た。しかし、それらのなかで比較的成果を上げていると認められる磁気的な検査方法においても、未だロープの劣化状態を定量的に評価できる技術には至っていない。したがって、各使用現場においても、非破壊的検査方法は、通常の検査を補助するものと認識されているし、管理基準において、非破壊検査が義務づけられているのは、世界中でカナダのオンタリオ州だけである<sup>3)</sup>。また、取替基準に非破壊検査法による評価が規定されているのも稀で、含まれていたとしても、断線検出の手段としてのもりこみかたであったり<sup>4)</sup>、Table 2 の 5) として挙げたような漠然とした規定にならざるを得ないのが現状である。

### 3. ワイヤロープの非破壊的劣化検査法研究の歴史と現況

ワイヤロープの非破壊的劣化検査の方法としては、既に今世紀初頭から、様々な手法が試みられてきており、その歴史は、非破壊検査法自体の歴史と歩を一にして来たともいえる。近年になって、非破壊検査が独自の学問領域としての地位を獲得するに及んで、ワイヤロープの検査についてもその研究が再び盛んになって来た感がある。

これまでに試みられたワイヤロープの非破壊的検査法としては、放射線を用いるもの、電磁的あるいは磁気的検査法、振動・音響的試験法、超音波検査法の適用、AEを利用するもの、などが挙げられる。

### 3. 1 放射線を用いる方法

一般のX線透過撮影の方法を、ワイヤロープの内部断線の確認に用いた例<sup>5)</sup>がある。しかし、この方法は、構成素線数の多いロープでは困難であり、またロープの全長検査にも適さないことから、むしろ他の方法では困難なロープ末端部の健全性の評価などに用いられるべきであると思われる。鈴木<sup>6)</sup>は、 $\gamma$ 線をワイヤロープに照射したときの透過率を、シンチレータで直接的に測定することによって、ロープの断面積の変化を全長にわたって連続的に測定する方法の研究を行った。この方法は、サドルやガイドシュー上のロープの検査にも適用できるものとして注目されるが、実用化には相当の困難が伴うものと考えられる。放射線を用いる非破壊検査の方法は、CT法の開発などとあいまって、その適用範囲を広げつつありまたかなりの成果も挙げて来ている。しかし、ワイヤロープにおいては、特殊な部分への適用を除き、今後も日常的な劣化検査法としての利用は難しいと思われる。

### 3. 2 電磁的あるいは磁氣的検査法<sup>9), 7), 8), 9)</sup>

いわゆる電磁探傷法と総称されているワイヤロープの電磁的検査法は、最も古くから研究されてきた方法の1つであり、現在では最も有効な方法であると認められ、実際の現場にもある程度普及している。この方法には、大きく分けて2つの種類がある。1つは、非破壊検査で言うところの電磁誘導探傷法(渦流探傷法)に属するものであり、もう1つは、漏れ磁束探傷法である。両者とも磁束を媒介としてロープの損傷を検知するものであり、非接触でロープを検査できることが特長である。また、どちらもロープ全長を簡単に検査できることを意図して開発されて来たものである。前者は、交流磁界を用いるものであり、ロープと磁氣的に結合した試験コイルのインピーダンス変化によって損傷を評価するものである。それに対し、後者は、直流磁界を用いるものであり、損傷をその周りに現われる漏れ磁束によって直接的に検知しようとするものである。一般に前者をAC法、後者をDC法と俗称している。

#### 1) 電磁誘導探傷法

電磁誘導型のワイヤロープ探傷法は、主にイギリス、南アフリカ、カナダにおいて発展して来た探傷法であり、その原形は、1906年にC. McCannが、electrical apparatusとして提案したロープ断面積測定装置に求めることができる。本格的なロープ劣化検査装置としては、1929年にT.F. Wallが発表したもの<sup>10)</sup>が最初と思われる。彼の装置は、外部電磁石(交流20Hzで駆動)とロープとによって磁気回路を構成し、ロープを取巻くようにおいた検出コイルの誘導起電力の変化から、ロープの劣化状態を評価するものであるが、ロープを飽和磁化させるだけの大きな励磁電流を用いるところが、以後の形式と異なるところである。1946年にA. Semmelinkが、Wallの探傷器を批判するかたちで、ロープと同軸に励磁コイルと検出コイルを配置する形式の、新しい探傷装置を発表し、その

後も種々の実験を重ねて、その装置の改良を行った<sup>11)</sup>。彼の研究は、1956年ごろからカナダのオンタリオ鉱山局と McPhar 社との共同研究 (Semmelink と J.G.Lang を中心とするグループ) により、OMA (Ontario Mining Association) ロープテストとして結実することとなる<sup>12)</sup>。我が国においても、内藤 (電気試験所)<sup>13)</sup>、鈴木<sup>14)、15)</sup>、秋吉・佐々木・山本<sup>16)</sup>、高岡・立田・小林・柴田 (資源試験所)<sup>17)</sup> らによって電磁誘導型のワイヤロープ探傷法の開発研究がなされている。

電磁誘導型の探傷法は、磁束を発生し検出する試験コイルの構成によっていくつかの方式に分けられる<sup>18)</sup>。まず、励磁コイルと検出コイルをもつ相互誘導型と、両者を兼ねる方式の自己誘導型がある。また、インピーダンス変化を検出するためには交流ブリッジ回路が用いられるが、その回路構成には、抵抗線ひずみゲージによるひずみ計測の場合の1ゲージ法や2ゲージ (アクティブ・ダミー法) などと同様に、いくつかの組合せがあり、検出コイル1つのものを単一方式、一對のコイルの片方を標準試料に、他方を被検査材に作用させる方式を標準比較方式、一對のコイルを被検査材に互に近接させて配置し、それぞれをブリッジの2辺としてその差を検出する方式を自己比較方式と呼んでいる。相互誘導型か自己誘導型かはそれほど問題ではないが、単一方式や標準比較方式と自己比較方式とでは、その探傷能に大きな違いがある。ワイヤロープと同軸に検出コイルを配置し、ロープの長手方向に沿って探傷する場合を考えると、単一方式や標準比較方式では、ブリッジのバランスをとった地点を基準として、そこからのインピーダンスの変化を測定することになり、局部的な損傷よりもロープ長手方向の断面積の変化、つまり摩耗や腐食による鋼実質部分の減少量をその測定の対象とすることになる。一方、自己比較方式では、隣接2地点の差を検出することになるから、長手方向のゆるやかな変化には追従できず、ちょうど前者の微分波形を与えることになって、断線などの局部的な損傷の検知に適したものになるわけである。

今までに開発されて来た電磁誘導型の探傷装置についても、上述のような分類で見ると、それぞれの特徴が明らかとなる。鈴木は、自己比較方式によって断線が検知できることを示唆しているが、実際には、自己誘導相互比較方式によって探傷を行っている<sup>14)</sup>。電気試験所のものは、自己誘導単一方式であり、2つのコイル (2分割型) を使用することについても述べているが、ブリッジの2辺として自己比較方式を構成しようとするものではなくあくまでも単一方式としての利用である。資源試験所のものは、自己誘導自己比較方式で、局部損傷の検知を主眼としたものであり、フランスの Lagpa 社のものも同一の形式であるとのことである<sup>19)</sup>。しかし、この2つは試験周波数がきわめて高く (数~十 KHz) になっている。秋吉らのものは、構成としては Wall の探傷器と同様のものであるが、断面積減少の検出には単一コイル方式を、局部損傷用には特殊な界磁による差動検出器を用いるようになっているのが特徴である。彼らの探傷器では、Wall のものと同様に、ロ

ープを飽和磁化させるに十分な大きい励磁電流を用いるようになっている。

最初に述べた Semmelinkらの OMA ロープテストは、相互誘導単一方式のものであり、渦電流による表皮効果（磁束がロープ内部へ浸透しなくなる）と発熱を抑えるために、低周波（30, 80 Hz）でしかも弱い起磁力（ $1\text{ A} \times 10\text{ Turn}$ ）で探傷を行うようになっている。また、出力としては、誘導起電力の実数成分（X：磁束成分）と虚数成分（R：渦電流成分）を別々に取り出せるようになっている。ロープと同軸に試験コイルを配置する場合、インピーダンスは、ロープの断面積、ロープ軸方向の透磁率、ロープ周方向の導電率、コイルに対するロープの位置（偏心率）によって決まる。摩耗や腐食による鋼実質断面積の減少は、X成分を減少させることになるが、素線相互の摩耗による接触面積の増大は見掛け上ロープ周方向の導電率を大きくすることになり、R成分を増加させる。しかし、腐食生成物の素線相互の隙間への蓄積は、逆にR成分を減少させることになる。このように、探傷結果には劣化の様々な要素が関与してくることになって、一般にその解釈はかなり難しいと言わねばならない。また、低周波を用いるので、探傷可能なロープ速度が制限を受けること、起磁力が弱いので、磁気ヒステリシスの影響を受けやすく、ロープに残留磁化がある場合には、大きなノイズが発生することになり、それをなくするためには前もって大きな起磁力によって消磁しなくてはならないことも問題である。さらに、ロープ張力の変動による透磁率の変化やコイルに対するロープの偏心や揺動もノイズの原因となる。

このように、電磁誘導型のワイヤロープ探傷法は、交流であるがゆえに、渦電流が発生することに起因する様々な障害をもっており、H. R. Weischedel も述べているように<sup>3)</sup>、近い将来より良い方式のものに取ってかわられるだろうと予想される。

## 2) 漏れ磁束探傷法

漏れ磁束型のワイヤロープ探傷法は、主に、ドイツ、ポーランドなどヨーロッパ諸国において発展を遂げた探傷法である。1931年にドイツ Bochum ロープ試験所の A. Otto によって開発された、ロープと同軸のソレノイド型励磁コイルと1対の差動型検出コイルからなる探傷器<sup>20)</sup>が、この方法の最初のものである。その後も、同試験所においては、H. Grupe などによって、励磁を外部電磁石方式に変更するなど、種々の改良が行われた<sup>21)</sup>。Bochum試験所の最初の探傷器開発後、いくつかの機関で研究開発が行われ始めたが、まもなく、それまでの検出コイルの方式、つまり、1対2つのコイルをロープと同軸に巻線して差動接続することが、円筒面の半分に矩形形状に巻いたU字型コイルを2つ合わせて用いることと原理的に全く同一であることが明らかとなり、このことが、その後の探傷器実用化への道の大きな Break-throughとなった。この2分割型差動コイルについては、既に1937年に R. Wörnle と H. Müller が、ドイツ特許を取得しているとのことである<sup>3)</sup>。その後、ドイツのみならず、ベルギー、オランダ、スイスをはじめヨーロッパ各国で同様の原理にもとづく装置の開発が行われた<sup>22), 23)</sup>。そうした中で1966年 OITAF（国際鋼索輸

送機構；Organizzazione Internazionale dei Trasporti a Funne)が、各国の探傷器の実情を調査した上で、それらを統合するかたちで、1つの模範的な探傷器(OITAF-Instrument)を開発・発表する<sup>24)</sup>に至って、漏れ磁束探傷法は1つの実用的ワイヤローブ検査法としての地位を獲得した。

一方、ポーランドのCracow大学においても、M.Jezewski, L.Szklarski, Z.Kaweckiらを中心として、1946年ごろから独自に漏れ磁束型の探傷法の研究開発が行われ、その後、J.Stachurski, M.Berganderらによって、装置の改良や探傷結果の解釈についての研究がなされた<sup>26), 27), 29)</sup>。彼らの探傷器は、Magnetic Defectgraphとして実用化されている<sup>29)</sup>。我が国においても、1963年ごろから、見沢・松木<sup>30)</sup>、小門・藤中・田下ら<sup>31), 32), 33)</sup>を中心に、この方式の探傷法についての研究が行われ、現在では、三井ローブテストなどとして、実用化されている。

今までに開発された漏れ磁束型の探傷装置は、ローブの一部を飽和磁化させ、損傷によってその周りに現われ出る漏れ磁束をサーチコイルによって検知するという、その原理的においてはすべて同一のものであるが、励磁方式や検出コイルの構成においては、多少の違いがある。励磁方式としては、ローブを鉄心とする同軸ソレノイド方式と、界磁部をもつ外部電磁石(あるいは永久磁石)を用いる方式がある。同軸ソレノイド方式は、界磁や鉄心を必要とせず、またローブ内の磁場の均一性が良く、ローブの探傷器に対する偏心や横振動の影響も受けにくいといった長所はあるが、現場で毎回巻線をする必要があるという作業性の欠点から、今ではあまり用いられないようである。また、外部磁石を用いる方式においても、最近の磁性材料の進歩ともあいまって、電源リップルの影響がなく、より安定な磁界を得ることができる永久磁石方式に転換される傾向にある。漏れ磁束の検出コイル部分については、2分割差動コイルが一般的であるが、2分割コイルを上下左右計4つ用いてそれぞれの出力を単独に取り出せるようにしたもの<sup>30), 34)</sup>、検出コイルを振動させることによってローブと探傷器の相対運動がないときにでも出力が得られるようにしたもの<sup>22)</sup>など、特徴的な方式のものもある。

ローブを長手方向に飽和磁化させたとき、損傷部つまりローブの断面積が小さくなった部分では、余分な磁束がローブ外周空間に漏れ出ることになる。ローブを取囲むようにおいた円形のサーチコイルを、ある速度でローブに沿って走査させた場合を考えると、漏れ磁束の存在する部分においてサーチコイルに生ずる誘導起電力は、漏れ磁束のローブ半径方向の密度と走査速度(ローブ速度)との積に比例する。つまり、この方式の探傷法は、ローブ外周空間の漏れ磁束の量の分布ではなく、ローブに沿った漏れ磁束の密度の分布を計測する方法であるといえる(差動コイルの場合は、2箇所での漏れ磁束密度の差を計測していることになる)。したがって、断線など局部的にローブ断面積が急変するような損傷の検知には非常に適したものであるが、徐々にローブ断面積が変化しているような摩耗

や腐食による損傷部を評価することは困難である。また、検出要素としてコイルを用いる限り、その出力は、ロープとコイルの相対速度に比例することとなり、動かない状態のロープすなわち静索には適用し難い。

### 3) 最近の磁気探傷法の展開

ワイヤロープの管理においては、ロープ全長にわたっての素線断線の位置と数の確認が重要な検査項目となっている。このことから、断線の検知性にすぐれた漏れ磁束法のほうが、電磁誘導法よりも普及しているようである。近年の電子技術の進歩ともあいまって、最近では漏れ磁束型のワイヤロープ探傷法の改良とその欠点の克服に努力が注がれている。

1つは、コイルに代わって、ホール素子などの半導体感磁性素子を漏れ磁束検出の要素として用いることの研究である。これら磁束密度を直接測定できる半導体素子を利用することによって、出力に速度依存性があるコイルでは不可能な、静止したロープの探傷や、ロープを部分的に精査できる探傷装置を実現することができる。これらの素子のワイヤロープ探傷への利用としては、我が国ではすでに1963年に、松田・松原・大谷や見沢・松木らの先駆的な研究<sup>35)</sup>があるが、それを受けて、小門・藤中らもいわゆる無速度探傷とその検出器の設計についての研究<sup>36), 37)</sup>を行っている。また海外でも、従来のコイル型の探傷器をホール素子やフラックスゲートセンサを用いる方式へ転換することが進められているようであり、E.Kalwa, K.Piekarski は、ホール素子の配置や検出器の構造と損傷検出信号の関係について、精力的な研究を行っている<sup>38)-44)</sup>。

もう1つは、摩耗や腐食などロープに沿って断面積が徐々に変化しているような損傷の評価が困難であるという漏れ磁束法の欠点を克服することである。摩耗や腐食は、素線表面での圧痕や凹凸の形成を伴うものであるから、漏れ磁束探傷においても、それらの微細な局部的断面変化が連続的な微動的信号として検出されることになる。この一連の微動的信号の振幅を摩耗や腐食によるロープの劣化の指標とする方法が提案されている<sup>45), 46)</sup>が、これはあくまでも間接的な方法である。従来の漏れ磁束法は、ロープ断面積の変化を測定しているものといえるから、摩耗や腐食を評価するためには、断面積そのものつまり飽和磁化状態でのロープ長手方向の磁束に比例した出力を得るようにする必要がある。それを実現する方法として、アメリカやカナダにおいて開発されたのが全磁束法である。全磁束法(本論文では、つぎの2つの方法を総称してこう呼ぶことにする)には、Return Flux法とMain Flux法がある<sup>3)</sup>。Return Flux法は、F.Kitzinger, J.R.Naud<sup>47)</sup>やB.G.Marchent<sup>48), 49)</sup>によって開発されたものである。この方法は、外部磁石とロープとで磁気閉回路を構成したときに、そこに流れる磁束がロープの磁気抵抗つまり断面積によって変化することを利用したもので、NS両磁極とロープとのエアギャップ部に設けたホール素子によってその磁束を測定するものである。一方、Main Flux法は、前者を批判するかたちで、H.R.Weischedel<sup>3), 50), 51)</sup>によって提唱されたものである。この方法は、従

来と同じようにロープを取囲むようにおいたサーチコイルを検出要素とするものであるが、コイルの誘導起電力を積分することによってロープ内の磁束に比例した探傷出力を得るようになっており、Return Flux が両磁極間の平均的な磁束しか測定できないのに対し、より局所的な断面積変化にも追従する信号の得られるのが特長である。

ワイヤロープの磁気探傷法は、ホール素子の利用と全磁束法の開発によって、それまでの損傷の検知から劣化の定量的な評価へとその段階が移行しつつあるといえる。ホール素子の利用においては、検出要素としてそれをどのように配置・組合せるのが損傷の評価においてより有利であるかといった問題が、また、全磁束法においては、損傷の形態と出力の基本的な関係や、差動方式とできないがゆえに受けやすい外乱の影響を如何に軽減するかなどの問題が残されている。

### 3. 3 振動・音響的試験法および超音波・A Eを利用する方法

これらの方法は、ワイヤロープ内に振動や波動を外部から積極的に送り込む能動的な方法と、素線破断などによって発生した波動を検知する受動的な方法とに分けられる。

前者の能動的な方法は、検査者がロープを叩いて、その反響音でストランドの弛みや局部的な腐食の状況を判断する、いわゆる打音検査に端を発したものであるといえる。ロープの定常的な横振動周波数が、ロープの張力とロープの単位長重量に関係することを利用して、一定区間のロープに振動を与えその横振動周波数から、ロープの質量の減少量つまり摩耗などによるロープの劣化程度を評価しようとする試みがなされた<sup>52)</sup>が、あまり成果があったとは言い難い。最近、打音検査法的一种として、H.Kwun, G.L.Burkhart が、打撃によってロープに衝撃的な横振動波を発生させ、損傷の存在によって発生する副次的な反射波を、非接触変位計によって検知することについて研究を行っている<sup>53)</sup>が、その実用性については疑問である。一般材料の超音波検査技術をロープの劣化検査に応用する試みもなされている。それは、ロープの一部からパルス波を導入し、ロープに沿って伝播する波動を他の部分で検出して、その波動の伝播減衰からロープの劣化状態を判定しようとするもので、伝播減衰の評価には、A.Vary の提唱したSWF (Stress Wave Factor) を用いている。繊維ロープについては、J.H.Williams, S.S.Lee<sup>54)</sup>が、一般のワイヤロープについては、H.L.M.dosReis, D.M.McFarland<sup>55)</sup>が、実験を行っている。dosReisらは、引張疲労試験においては、その荷重繰返し回数とSWFが線形関係にあると報告しており、超音波減衰測定をロープの劣化評価に利用することは、今後の発展が期待できると思われる。しかし、その実用化においては、超音波の送受信子をロープに取り付けたときの結合度合いを如何にして一定とするかや、適切な周波数の選択など、検討しなくてはならない点が多々ある。

一方、受動的な方法は、製品検査として通常行われるワイヤロープ引張あるいは引張疲

労試験における素線破断の計数を目的として発展してきたもので、素線破断時の可聴音の発生をマイクロフォンで検知する試みに始まり、今では、一般にその波動の検知に加速度計が用いられている<sup>56), 57), 58)</sup>。素線破断時の波動の発生をAEと認識して、一般材料のAE検査法をワイヤロープに初めて導入したのは、P.A.Laura, H.H.Vanderveldtらである<sup>59), 60), 61)</sup>。その後、本格的なAE測定装置を用いた、D.O.Harris, H.L.Duneganらの研究<sup>62)</sup>や、WilliamsとLeeの繊維ロープへの適用<sup>63)</sup>、J.R.Matthewsらの海洋ソナー曳航用ケーブルのAEモニタリングの研究<sup>64)</sup>などがあり、最近では、N.F.Casey, J.L.Taylorが精力的な研究を行っている<sup>65)-70)</sup>。ワイヤロープのAE検査は、他の方法に比べてより直接的であり、急激な劣化の進行やロープ破断の予知に大いに役立つと期待され、その実用化が望まれるが、現段階では、未だ実験室における計測技術という域を出ていない。また、運搬設備に動索として利用されているワイヤロープにも適用できるようにするためには、非接触方式のAE検出法を開発する必要がある。

#### 4. 本論文の構成と内容の概観

本論文は、ワイヤロープの使用劣化を非破壊的に検査する方法に関する研究成果をとりまとめたものであり、緒論と結論の他2部で構成されている。第I部では磁気的な検査法について、第II部ではAEを利用する方法について、それぞれの研究成果をとりまとめている。以下それぞれの内容について概観する。

第I部では、従来からワイヤロープ検査法として用いられてきた磁気探傷法をとりあげ、劣化の定量的評価を中心課題として検討を行った。

まず、漏れ磁束探傷において、検出要素としてホール素子などの半導体感磁性素子を用いる際の基礎的な問題について検討を行い、とくに、ワイヤロープのもつ磁気ヒステリシス特性が探傷に及ぼす影響について考察した(第1章)。その考察にもとづき、吊構造物に支索として用いられているPWS(平行線ストランド)ケーブルを対象とする、大径静止索用の漏れ磁束探傷装置を開発し、現地探傷においてその実用性を確認した(第2章)。さらに、漏れ磁束探傷結果から損傷の程度を断面積損失率として定量的に評価する方法について検討するとともに、PWSの局部腐食について、探傷結果にもとづいてその残存強度を推定する方法を提案し、その方法の検証を行った(第3章)。つぎに、漏れ磁束法では困難な摩耗や腐食などの損傷の評価に適するとして注目されている、全磁束法の基本的な探傷特性について実験的な検討を行い、その応用として、腐食した鋼線の軸に沿った横断面積の変化を簡便に測定する方法の開発を行った(第4章)。さらに、曲げ疲労環境下でのロープの劣化過程を監視する方法の確立を意図として、構造によって明らかな劣化形態の違いを見せる2種類のロープの曲げ疲労試験を実施し、漏れ磁束探傷法と全磁束探傷

法を併用して、両者の探傷結果が実際のロープの劣化形態とどう対応するかについて検討した（第5章）。

第Ⅱ部では、最近注目されている、ワイヤロープへのA E法の適用について、とくにより実用性の高い、非接触式A E検出法の開発を中心として、種々の検討を行った。

まず、加速度計を用いた素線破断検出法の実用性について検討するとともに、連続監視システムの開発を行った（第6章）。つぎに、非接触A E検出法の開発を念頭として、その原理として磁歪効果を用いることの可否について検討するため、ワイヤロープ用鋼線の磁歪特性についての調査を行った（第7章）。その調査にもとづいて、ワイヤロープの素線破断時のA Eを電磁的に非接触で検出する方法を開発し、その実用性をワイヤロープの引張試験において確認した（第8章）。引張疲労環境下でのワイヤロープの劣化過程を監視する方法の確立を意図として、この非接触検出法をワイヤロープの引張疲労試験に適用し、素線破断A Eの発生過程が他の劣化兆候とどのように関係しているかについて検討するとともに、このA E検出法によって得られた波形から素線破断の位置標定をする方法を提案した（第9章）。最後に、ワイヤロープの曲げ疲労試験におけるシープ上での素線破断の発生の監視にこの方法を用いることによって、著者の開発した非接触A E検出法が、運搬設備などに動索として使用されているワイヤロープにも適用できる方法であることを確認した（第10章）。

なお、巻末には、付録Ⅰとして、ホール素子を用いる漏れ磁束探傷において、損傷をその形や分布も含めて、よりの確に評価するための検出器の構成法や信号処理の方法について検討した結果を、付録Ⅱとして、非接触A E検出法によって得られた波形から素線破断の位置標定を行う方法についての解説を付している。

## 参考文献

- 1) Jentgen, R.J., R.C.Rice and G.L.Anderson: Preliminary Statistical Analysis of Data from the Ontario Special Rope Tests on Mine-hoist Wire Ropes, CIM Bulletin, Vol.77, No.871, pp.50-55, (Nov.1984)
- 2) Egen, R.A.: Nondestructive Testing of Wire Rope, Proc. of 9th Annual Offshore Technology Conference, OTC2926, pp.375-382, (May 1977)
- 3) Weischedel, H.R.: The Inspection of Wire Ropes in Service: A Critical Review, Materials Evaluation, Vol.43, No.13, pp.1592-1605, (Dec.1985)
- 4) 通産省立地公害局鉱山保安技術基準作成検討会ロープ部会 編: 人を運搬する巻揚装置に使用するワイヤロープの更新基準およびその解説, 改訂第2版, (Feb.1981)
- 5) 神山壮吉, 遠藤弘己, 押川定典: ワイヤロープに対する放射線透過試験, 昭和57年度全国地下資源関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, P-15, pp.50-52, (Oct.1982)
- 6) 鈴木光: ワイヤロープの電磁的ならびにアイソトープによる非破壊検査法について, 昭和40年度鉱業関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, I-1-9, pp.56-62, (1965)
- 7) Wait, J.R.: Review of Electromagnetic Methods in Nondestructive Testing of Wire Ropes, Proc. of the IEEE, Vol.67, No.6, pp.892-903, (June 1979)
- 8) Weischedel, H.R.: Electromagnetic Wire Rope Inspection in Germany, 1925-40, Materials Evaluation, Vol.46, No.6, pp.734-736, (May 1988)
- 9) 小門純一: ワイヤロープの電磁探傷法の展望と実施上の問題点, 第15回ワイヤロープ研究会講演集, pp.101-107, (Sep.1964)
- 10) Wall, T.F.: Electromagnetic Testing for Mechanical Flaws in Steel Wire Ropes, Journal of IEE, Vol.67, pp.899-911, (1929)
- 11) Semmelink, A.: Electromagnetic Testing of Winding Ropes, Trans. of South African IEE, Vol.43, No.5, pp.113-129, (1953); Vol.47, No.8, pp.206-244, (1956)
- 12) Lang, J.G.: The Principle and Practice of Electromagnetic Wire Rope Testing, CIM Bulletin, Vol.62, No.684, pp.415-424, (Apr.1969)
- 13) 内藤正: 電磁誘導変換による工業量の電気計測に関する研究, 電気試験所研究報告, 536号, pp.138-162, (1953)
- 14) 鈴木光: 巻索探傷器の試作と探傷結果, 日本鉱業会誌, Vol.68, No.764, pp.25-28, (Feb.1952)
- 15) 鈴木光: 二三の豎坑巻索の探傷記録, 日本鉱業会誌, Vol.68, No.767, pp.197-200, (May 1952)
- 16) 秋吉利男, 佐々木昭士, 山本秀俊: 鋼索の非破壊検査に関する研究, (第1報) 交流による磁化, 九州鉱山学会誌, Vol.33, No.10, pp.407-414, (Oct.1965); (第2報) 局部欠陥検出について, Vol.33, No.11, pp.439-446, (Nov.1965); (第3報) 断面積減少の検出, Vol.33, No.12, pp.473-480, (Dec.1965)

- 17) 高岡三郎, 立田潤, 小林秀男, 柴田康弘: ロープテストの試作研究, 探鉱と保安, Vol.15, No.8, (1969)
- 18) たとえば、非破壊検査協会: 渦流探傷試験A, p.40, (1977)
- 19) 小林秀男, 立田潤: 数種の電磁探傷器の探傷特性について, 昭和49年度全国地下資源関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, F-6, pp.1-6, (1974)
- 20) Otto, A.: Electromagnetische Verfahren zur Prüfung von Drahtseilen, Glückauf, Jg.69, Heft 21, S.471-475, (1933)
- 21) Grupe, h.: Die electromagnetische Prüfeinrichtung für Förderseile der Seilprüfstelle Bochum und ihre Anwendung, Glückauf, Jg.93, Heft 37/38, S.1168-1171, (1957)
- 22) van del Velden, D. und H.T.Vossen: Ein Gerät zum Prüfen von Drahtseilen auf electromagnetischem Wege, Glückauf, Jg.92, Heft 27/28, S.792-794, (1956)
- 23) Hitchen, H.: Characteristics and Application of Round, Flattened and Locked Strand Ropes, Canadian Mining and Metallurgical Bulletin (CIM Bulletin), pp.281-289, (May.1957)
- 24) OITAF: Magnetic Inspection of Ropes, A Report from OITAF, (Part One), International Ropeway Review, pp.58-62, (Apr./June 1967); (Part Two), pp.120-125, (Oct./Dec. 1967)
- 25) Jezewski, M. und Z.Kawecki: Theoretisches und Experimentelles über das electromagnetische Verfahren der Drahtseilprüfung, Glückauf, Jg.95, Heft 17, S.1067-1074, (Aug.1959)
- 26) Bergander, M.J.: Principles of Magnetic Defectoscopy of Steel Ropes, Wire Journal, No.5, pp.62-67, (May 1978)
- 27) Bergander, M.J.: Computerized Magnetic Testing of Steel Ropes, Paper Summary of ASNT National Conference 1979, pp.144-148, (1979)
- 28) Bergander, M.J.: Magnetic Flux Leakage Inspection of Wire Rope, International Advances in Nondestructive Testing, Vol.9, pp.113-123, (1983)
- 29) Ross, A.C.: The Use of the Magnetic Defectograph, M.D.6, CIM Bulletin, Vol.62, No.684, pp.425-431, (Apr.1969)
- 30) 見沢繁光, 松木三郎: 電磁ロープ検査装置の試作研究, 九州鉱山学会誌, Vol.33, No.9, pp.375-382, (Sep.1965)
- 31) 藤中雄三, 田下和男, 中井幹雄: 鋼索の電磁探傷に関する研究, 水曜会誌, Vol.15, No.2, pp.69-72, (Aug.1963)
- 32) 小門純一, 藤中雄三, 多田隈一雄: C.B.C.鋼索の電磁探傷について, 日本鉱業会誌, Vol.80, No.909, pp.266-268, (1964)
- 33) 小門純一, 藤中雄三, 田下和男, 上田和彦: 電磁探傷法による鋼索の損傷検知に関する研究, 日本鉱業会誌, Vol.83, No.952, pp.997-1003, (Aug.1967)

- 34) Ulrich, E. : Schädigungen durch den Betrieb bei Förderseilen großer Durchmesser in Treibscheibenanlagen, Draht, Vol.31, No.1, pp.3-7, (1980)
- 35) 見沢繁光, 松木三郎, 三好康信, 榎 且 : ホールゼネレーターによる鋼索の探傷, 九州鉱山学会誌, Vol.33, No.9, pp.383-389, (Sep.1965)
- 36) 小門純一, 藤中雄三, 森田和元 : 鋼索の無速度電磁探傷, 日本鉱業会誌, Vol.94, No.1081, pp.157-162, (Mar.1978)
- 37) 小門純一, 藤中雄三, : 鋼索の無速度探傷における環状検出器の研究, 日本鉱業会誌, Vol.94, No.1083, pp.329-333, (May 1978)
- 38) Kalwa, E. and K. Piekarski : Detection of Defects in a Steel Rope with the Hall-Effect Magnetic Probe, Canadian Society for NDT Journal, Vol.7, No.4, pp.40-45, (July/Aug.1986)
- 39) Kalwa, E. and K. Piekarski : Fundamentals of Magnetic Testing of Steel Wire Rope, Canadian Society for NDT Journal, Vol.8, No.1, pp.36-43, (Jan./Feb.1987)
- 40) Kalwa, E. and K. Piekarski : Abrasion of Wire Ropes - Their Models and the Magnetic Testing Method, Canadian Society for NDT Journal, Vol.8, No.2, pp.46-49, (Mar./Apr.1987)
- 41) Kalwa, E. and K. Piekarski : Design of Hall-Effect Sensors for Magnetic Testing of Steel Ropes, NDT International, Vol.20, No.5, pp.295-301, (Oct.1987)
- 42) Kalwa, E. and K. Piekarski : Design of Inductive Sensors for Magnetic Testing of Steel Ropes, NDT International, Vol.20, No.6, pp.347-353, (Dec.1987)
- 43) Kalwa, E. and K. Piekarski : Determination of Flaws Located at Different Depth Level in the Cross-Section of Steel Rope, NDT International, Vol.21, No.2, pp.77-82, (Apr.1988)
- 44) Kalwa, E. and K. Piekarski : Qualitative and Quantitative Determination of Densely Occuring Defects in Steel Ropes by Magnetic Testing Method, Materials Evaluation, Vol.46, No.6, 767-770, (May 1988)
- 45) 田下和男, 小門純一, 藤中雄三 : 斜坑巻索の安全性について, 日本鉱業会誌, Vol.89, No.1030, pp.787-792, (Dec.1973)
- 46) 田下和男, 小門純一, 藤中雄三, 錦織栄 : 立坑巻索の劣化の進行とその判定, 日本鉱業会誌, Vol.91, No.1047, pp.335-339, (May 1975)
- 47) Kitzinger, F. and J.R.Naud : New Developments in Electromagnetic Testing of Wire Rope, CIM Bulletin, Vol.72, No.806, pp.99-104, (June 1979)
- 48) Marchent, B.G. : An Instrument for the Non-destructive Testing of Wire Ropes, Systems Technology, No.29, pp.26-32, (Aug.1978)
- 49) Marchent, B.G. : Mooring Cable Nondestructive Testing, Oceanology International 78, pp.11-15, (1978)
- 50) Weisedel, H.R. : Quantitative In-Service Inspection of Ropes, Materials Evaluation, Vol.46, No.4, pp.430-437, (Mar.1988)

- 51) Weischedel, H.R. and R.P. Ramsey : Electromagnetic Testing, A Reliable Method for the Inspection of Wire Ropes in Service, NDT International, Vol.22, No.3, pp.155-161, (June 1989)
- 52) 会田俊夫他編 : ワイヤロープ便覧, 白亜書房, p.804, (1967)
- 53) Kwun, H. and G.L. Burkhart : Feasibility of Nondestructive Evaluation of Synthetic or Wire Ropes Using a Transverse-Impulse Vibrational Wave, NDT International, Vol.21, No.5, pp.341-343, (Oct.1988)
- 54) Williams, J.H., Jr., J.Hainsworth and S.S.Lee : Acoustic-Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Double-Braided Nylon Ropes Using the Stress Wave Factor, Fibre Science and Technology, Vol.21, pp.169-180, (1984)
- 55) dos Reis, H.L.M. and McFarland, D.M. : On the Acousto-Ultrasonic Nondestructive Evaluation of Wire Rope Using the Stress Wave Factor Technique : British Journal of NDT, Vol.28, pp.155-156, (May 1988)
- 56) 戸田陽一, 横田彦二郎, 半沢貢, 横山邦彦 : 引張疲労試験中の断線検出について—海洋構造物用鋼索の疲労特性に関する研究(1)—, 鉄と鋼, Vol.65, No.11, p.551, (1979)
- 57) 吉田正人, 小野田武, 汐谷益雄, 林隆一 : ワイヤロープの引張疲労特性, 昭和57年度全国地下資源関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, P-4, pp.11-14, (Oct.1982)
- 58) 早崎清志, 福田喜久夫, 玉井鬼子雄 : スパイラルロープの引張疲労試験結果, 昭和62年度資源素材関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, F-4, pp.12-15, (Sep.1987)
- 59) Laura, P.A., H.H.Vanderveldt and P.Gaffney : Acoustic Detection of Structural Failure of Mechanical Cables, The Journal of Acoustical Society of America, Vol.45, No.3, pp.791-793, (1969)
- 60) Laura, P.A., H.H.Vanderveldt and P.Gaffney : Mechanical Behavior of Stranded Wire Rope and Feasibility of Detection of Cable Failure, MTS Journal, Vol.4, No.3, pp.19-32, (May-June 1970)
- 61) Vanderveldt, H.H. and Q. Tran : Acoustic Emissions from Synthetic Rope, Naval Engineers Journal, pp.65-67, (Dec.1971)
- 62) Harris, D.O. and H.L. Dunegan : Acoustic Emission Testing of Wire Rope, Materials Evaluation, Vol.32, No.1, pp.1-6, (Jan.1974)
- 63) Williams, J.H., Jr. and S.S.Lee : Acoustic Emission/Rupture Load Characterizations of Double-Braided Nylon Rope, Marine Technology, Vol.19, No.3, pp.268-271, (July 1982)
- 64) Matthews, J.R. and M.R. Black : Acoustic Emission Signature of Variable Depth Sonar Tow Cable, International Advances in Nondestructive Testing, Vol.7, pp.181-214, (1981)

- 65) Taylor, J.T. and N.F. Casey : The Acoustic Emission of Steel Wire Ropes, Wire Industry, Vol.51, No.601, pp.79-82, (Jan.1984)
- 66) Casey, N.F., D.Wedlake, J.T.Taylor and K.M.Holford : Acoustic Detection of Wire Rope Failure, Wire Industry, Vol.52, No.617, pp.307-309, (May 1985)
- 67) Casey N.F. and J.T.Taylor : The Evaluation of Wire Ropes by Acoustic Emission Techniques, British Journal of NDT, Vol.27, No.6, pp.351-356, (Nov.1985)
- 68) Casey N.F., H.White and J.T.Taylor : Frequency Analysis of the Signals Generated by the Failure of Constituent Wires of Wire Rope, NDT International, Vol.18, No.6, pp.339-344, (Dec.1985)
- 69) Wedlake, D., H.White, K.M.Holford and J.T.Taylor : Acoustic Energy in Wire Failure, Wire Industry, Vol.54, pp.628-629, (Oct.1987)
- 70) Casey, N.F., K.M.Holford and J.T.Taylor : The Acoustic Evaluation of Wire Ropes Immersed in Water, NDT International, Vol.20, No.3, pp.173-176, (June 1987)



## 第 I 部

# 磁気を用いるワイヤロープ の劣化評価に関する研究



## 第1章 半導体感磁性素子を用いるワイヤロープの漏れ磁束探傷<sup>1)</sup>

### 1.1 緒言

ワイヤロープの非破壊検査法としては、現在のところ、ロープを長手方向に飽和磁化させた状態で行う漏れ磁束探傷法が最も普及している。この方法は、断線などの局部的損傷の検知性に優れており、また、強い静磁界を印加して行うので、低周波弱磁界で行う電磁誘導型の探傷法よりも、磁気的外乱の影響を受けにくいという利点がある。

従来のワイヤロープ漏れ磁束探傷においては、損傷にもとづいてロープ外周空間に現われ出る漏れ磁束を検出する要素として、コイルが用いられていた。しかし、コイルを用いる場合、出力が磁束の時間変化すなわちロープとコイルの相対速度に比例するから、移動速度が小さい場合には、信号のS/Nが相対的に低下し、探傷が困難になってしまうという欠点があった。この問題点を回避するため、最近では、コイルの代わりにホール素子などの半導体感磁性素子が検出要素として利用されるようになった<sup>2)-8)</sup>。このような素子は、磁束密度に比例した出力が得られるから、ロープとコイルの相対速度に無関係に、たとえ静止状態であっても一定感度の探傷（いわゆる無速度探傷<sup>6)</sup>）を行うことができ、従来困難であった、巻上げ索におけるコース元付近の探傷や、吊構造物の支索の探傷も可能となる。

コイルを検出要素として用いる場合、出力が磁束の時間変化に比例するという事は、裏返せば、一種のハイパス・フィルタを通した出力が得られるということであり、ゆるやかな磁束分布の変化や低周波のノイズの影響を受けにくい。これに対し、ホール素子を用いる場合は、磁束密度を絶対値として計測することになるから、ロープ外周空間の磁束分布のすべての変化が出力に影響を及ぼすことになる。

ワイヤロープは強磁性体であって、強い磁気ヒステリシス性を有している。この磁気履歴性が探傷に影響を及ぼすということについて指摘したような例は見当たらない。しかし、実際の探傷においては、ロープは探傷器を通過する際にその区間だけ磁化されるのであるから、ロープが動いている場合には、その磁束分布が静止している状態とは異なったものとなっていると考えられ、このことが、探傷出力に悪影響を及ぼすことも十分に考えられる。

本章では、ホール素子を用いるワイヤロープの漏れ磁束探傷において、その励磁方法や検出器の構造などの基礎的な問題について検討するとともに、ワイヤロープの磁気ヒステリシス性が探傷に及ぼす影響について実験的に考察する。

## 1. 2 ワイヤロープの使用劣化と磁気探傷法

H.R.Weischedel は、ワイヤロープの使用劣化の形態をつぎのように分類している<sup>5)</sup>。

### 1) LMA (Loss of Metallic Cross-Sectional Area)

摩耗や腐食によるもので、ロープの鋼実質断面積の減少と定義できる、ロープ長手方向にある程度の広がりをもった損傷

### 2) LF (Localized Faults)

疲労による素線断線、集中的な腐食、キンクや形崩れなどの局所的な損傷

この分類は、種々あるワイヤロープの非破壊的な検査方法を性格づけすることを意図として提唱されたものである。一般に行われているワイヤロープの人的な検査でいえば、ロープ直径減少量の測定がLMA損傷の検査に、目視観察がLF損傷の検査にあたる。また、緒論の3.において述べたとおり、電磁誘導型ワイヤロープ探傷法のうちの単一コイル方式および相互比較方式が、LMA損傷の評価を目的としたものであるのに対し、同法の自己比較方式と漏れ磁束探傷法は、LF損傷の検知を目的としたものであるといえる。また、最近注目を集めている全磁束法<sup>5)</sup>は、漏れ磁束法と同じ励磁形式のもとでLMA損傷の評価に優れた探傷出力を得られるようにしたものである。全磁束法については第4章において詳しく考察することとし、本章では、漏れ磁束探傷法を中心課題としてとりあげる。

## 1. 3 漏れ磁束探傷装置における基礎的問題

ここでは、漏れ磁束探傷装置の主要部分を構成する、励磁器と検出器のそれぞれについて検討する。

### 1. 3. 1 励磁

ロープを長手方向に一部分磁化させる方式としては、Fig.1.1 (a),(b) に示した2つの方式がある。(a)は、鉄心と界磁部をもつ、1つまたは複数個の外部電磁石(あるいは永久磁石)によって両極間のロープ部分を磁化する方式である。(b)は、ロープ自体を鉄心としてソレノイド状に巻いたコイルによってロープを磁化させる方式である。以後、(a)を極間磁化方式、(b)を同軸ソレノイド方式と呼ぶことにする。

両者の励磁方式を比較すると、その長所・短所としてつぎのようなことが挙げられる。極間磁化方式では、1) 装置を2分割構造にでき、現地での装着が容易である。2) 電磁石を用いる場合、所要起磁力を得るためのコイル巻数と励磁電流の組合せが自由に選択でき、効率の良い直流電源を設計することができる。ことが長所として挙げられ、3) 大型化においては、鉄心や界磁部の重量が問題となる。4) ロープ横断面内の磁束密度に偏り

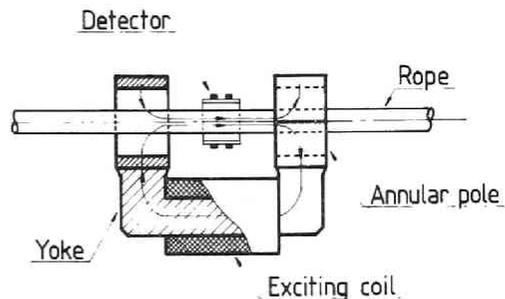
が生じやすい。5) 磁極とロープとの空隙が回路全体の磁気抵抗の主たる部分を占めるから、ロープの横揺れにもとづく磁束分布の乱れが生じやすい。ことなどが短所として挙げられる。一方、同軸ソレノイド方式の場合は、極間磁化方式と全く逆のことがいえ、1) 現場で被検索ごとに励磁コイルを巻くことが必要である。2) 周辺空間が磁路の大半を占めるため磁化の効率が低い。ことが短所として挙げられ、3) 鉄心部や界磁部がないため重量の面で大型化しやすい。4) 装置とロープとの吸着力がないので、非接触状態を保ちやすい。5) 本質的に軸対称構造であるから、ロープ横断面内での磁束密度の均一性が良く、またロープ横揺れによる磁束分布の乱れも少ない。などの長所がある。

現在実用化にある探傷装置としては、近年の永久磁石材料の進歩もあって、現地での設置の容易な極間磁化方式のものが多くなっている。

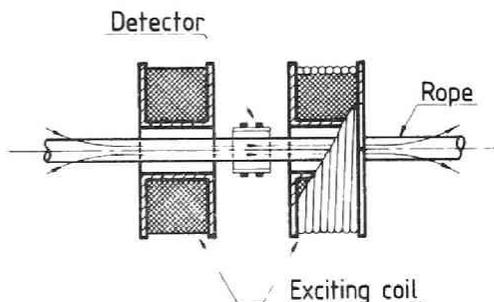
しかし、とくに一様な磁化を容易に実現できる点では、同軸ソレノイド方式が優れている。電磁石やソレノイドを用いる場合には、大容量でしかも安定な低ノイズの電源を必要とするが、永久磁石を用いる方式では、このことを全く考慮する必要がない。しかし、永久磁石を用いる場合は、直流電流のように起磁力を変えることができないので、直径の異なるロープを対象とするような場合には、同一の磁化状態で探傷を行えないことに注意しなければならない。

### 1.3.2 検出

コイルを漏れ磁束の検出要素として用いる場合、その基本的な配置形式には、Fig.1.2 に示したのものがある。(a) は、最も基本的なもので、1つのコイルをロープと同軸に置く形式のものである。(b) は、(a) のコイルを2つ適当な間隔を隔てて配置し、両者の差動をとる、いわゆる自己比較方式のコイル配置である。(c) は、2分割差動コイルとよばれる形式のものであり、同図よりわかるとおり、コイルのロープ軸方向に沿った部分での誘導起電力が上下のコイルで相殺されるため、原理的には(b) と全く同一の出力が得られるものである。(b) の形式は、磁気的な外乱やロープの横揺れなどによる同相的雑音を除去



(a) 極間磁化方式



(b) 同軸ソレノイド方式

Fig.1.1 励磁方式

できる点で、(a) よりも優れている。また、(c) は、現地探傷での設置の容易さにおいて、他の2つよりも優れている。検出コイルの形式は、(a) から(c) へと変遷してきた歴史をもち<sup>9)</sup>、現在では、(c) の形式のものがほとんどである。コイル幅すなわち差動の間隔については、どれぐらいが最適か明確でないが、素線断線を検知対象とする限り、コイル直径の半分ぐらいに設定するのが良いと考えられる。

ホール素子は、磁束密度に比例した出力電圧が得られるものである。Fig.1.3 において、駆動電流を  $I_x$ 、面に直交する方向の磁束密度を  $B_z$  とすれば、それらと直交する方向の両端から得られるホール電圧  $V_h$  は、

$$V_h = k \cdot I_x \cdot B_z$$

( $k$  は素子の材質と厚みによってきまる係数)

で表わされる。Table 1.1 に代表的な諸元の例を示したように、ホール素子は、普通数mm角の大きさであり、漏れ磁束探傷における検出要素として用いる場合、その配置や出力の組合せかたには、いろいろなものが考えられる。ここでは、コイルを用いた漏れ磁束検出の方式に照して、その基本的な配置について考える。

Fig 1.2 (a) の単一コイル形式について考え見ると、コイルがロープにそって一定の速度 ( $v$ ) で運動するとき、生ずる誘導起電力は、コイルが一定時間 ( $\Delta t$ ) に描く曲面つまり円筒面 (長さ  $\Delta z = v \Delta t$ ) と交差する磁束に比例する。したがって、 Fig.1.2 (a),(b) に原理的に対応するホール素子の配置形式は、Fig.1.4 (a),(b) となり、素子をロープ半径方向の向きで円周状に隙間なく連続的にならねば、コイルによる場合と全く同一の出力が得られることになる。実際には、

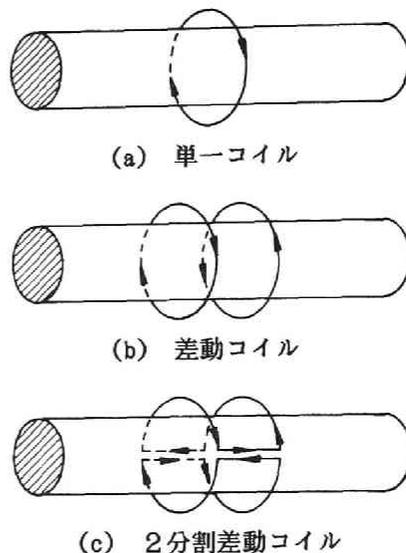


Fig.1.2 コイルによる漏れ磁束検出の基本的形式

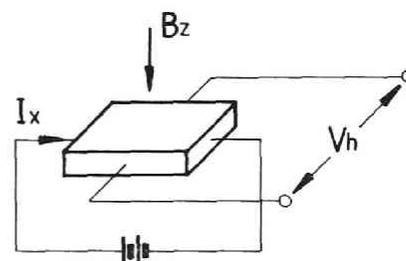


Fig.1.3 ホール素子

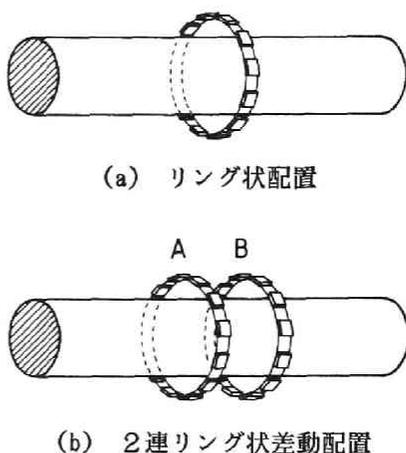


Fig.1.4 漏れ磁束検出におけるホール素子の基本的配置

ロープ表面と検出素子の距離（リフト・オフ）を、接触を避けるために 10mm 程度以上とするのが普通であるので、円筒面上にホール素子を数 mm 間隔おいて並べても、周方向の感度差は問題とならない。小門・藤中は、素子数を少なくするかわりに高透磁率の整磁板を用いて周方向の感度均一化を計ることについて検討している<sup>7)</sup>。また、E.Kalwa と K.Piekarski は、ホール素子の両面に、ロッド状のMagnetic Concentrator を取り付け、それを径の異なる2つの円筒形のリングの間に挟む形式の検出器を提案している<sup>8)</sup>。しかし、他の強磁性体を検出器内におくことは、損傷にもとづく漏れ磁束の本来の分布を変化させることになるから、損傷の形や大きさなどを漏れ磁束分布をもとにして評価をしようとする場合には、かえって妨げになる恐れがある。ホール素子の配置には、上述の基本的なもののほかに、ロープ軸に沿った方向の漏れ磁束密度を検出するようにしたもの<sup>4)・8)</sup>もあり、また、円周状のホール素子群を分割して、損傷の断面内位置を標定できるようにすることも可能であるが、これらのことについては、付録1および第2章で検討する。

ホール素子は、その内部抵抗が温度によってかなり変化するので、磁束密度と出力電圧との比例性を保つためには、定電流駆動する必要がある。Fig.1.5 は、Fig.1.4 (b) の方式を採用したときの検出回路を示したものである。著者が採用している方式では、各素子は、それぞれ定電流回路（LM78L05 と抵抗で構成される）によって一定電流（約11.5mA）で駆動されるようになっており、また、A、Bそれぞれの素子列について、各素子の出力を検出器内のプリ・アンプで加算増幅し、その出力  $e_A$ 、 $e_B$  をシールド・ケーブルで主たる信号処理器に導いて差動増幅（ $e_A - e_B$ ）を行うようにしている。

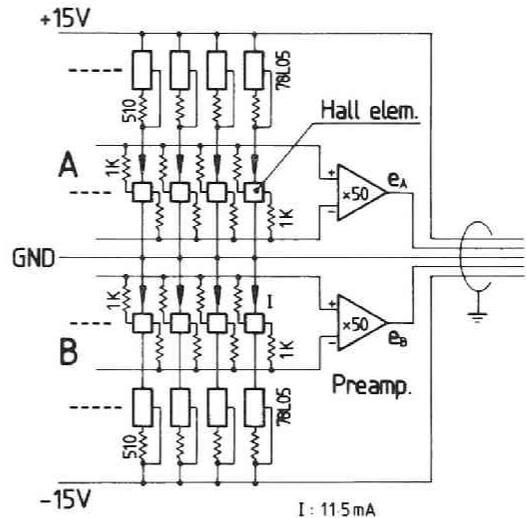


Fig.1.5 ホール素子を用いる  
差動型漏れ磁束検出回路

#### 1. 4 磁気ヒステリシスが探傷に及ぼす影響

ホール素子を検出要素とするワイヤロープの漏れ磁束探傷において、ワイヤロープの持つ磁気ヒステリシス性が探傷に及ぼす影響について実験的に考察する。なお、励磁方式としては、1.3.1 で述べた極間磁化方式をとりあげることとする。

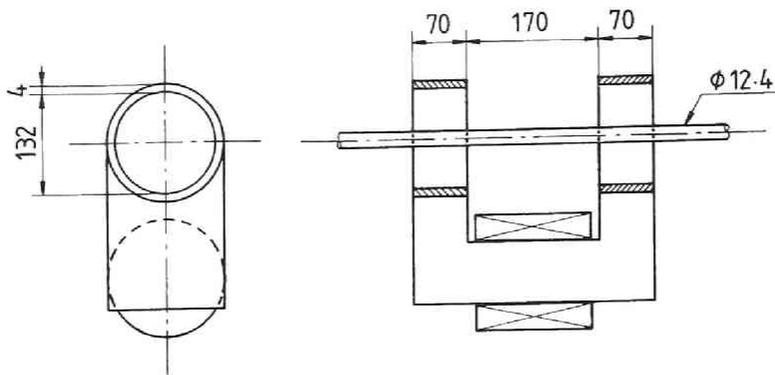


Fig.1.6 極間型励磁器

#### 1. 4. 1 実験

Fig.1.6 は、実験に用いた励磁器で、環状磁極をもつ1個の電磁石でワイヤロープを約200 mmの区間磁化する形式のものである。なお、これはワイヤロープ漏れ磁束探傷器として実用下にあるものの1つで、コイルの巻数は4,000回、最大起磁力は12,000 AT（最大許容電流3 A）である。試料としては、たわみの少ないことを考慮し、直径12.4 mmの1×7 PC鋼より線（プレストレス・コンクリート用；素線直径2.06 mm，断面積92.9 mm<sup>2</sup>）を用いた。励磁器とロープとによって形成される磁場の性状について明らかにするために、ロープの内部の磁束と、ロープ表面の半径方向磁束密度を、種々の起磁力のもとで両磁極間の中央140 mmにわたって計測した。ロープ内部の磁束の測定は、巻数50回、直径15 mmのサーチコイルとフラックスメータによって行った。ロープ表面上の磁束密度の測定は、Table 1.1 に示したホール素子（THS102A；約11.5 mAで駆動）によって行った。ロープ表面と素子のリフト・オフは4 mmとし、出力は500倍して記録した。

励磁器とロープによって形成される磁場は、ロープの運動によって変化する。これは、ワイヤロープが磁気ヒステリシス性をもつためであるが、この現象は、渦電流現象のように時間に依存するものではない。つまり、磁束分布が変化するのは、ロープの運動が逆転するときだけであって、たとえば、Fig.1.6において一端ロープを右へ移動させれば、その直後に磁束分布が変化し、それ以後は、たとえロープを停止させても、逆方向へ動かさない限り、磁束分布が

Table 1.1 ホール素子の諸元

THS102A	
Ga As イオン注入プレーナ形 ホールセンサ	
寸法	3×3 mm (1.6 mm 厚)
制御電流	15 mA 以下
動作温度	-55 ~ 125 °C
内部抵抗	450 ~ 900 Ω
ホール電圧	10 ~ 30 mV / 1 mA・1 kg

保持されるということである。このことが予備実験において確認できたので、ワイヤロープが右方向へ運動しているときおよび左方向へ運動しているときという条件での測定は、すべて、ロープをその方向に十分移動させた後、静止させた状態で行うことにした。

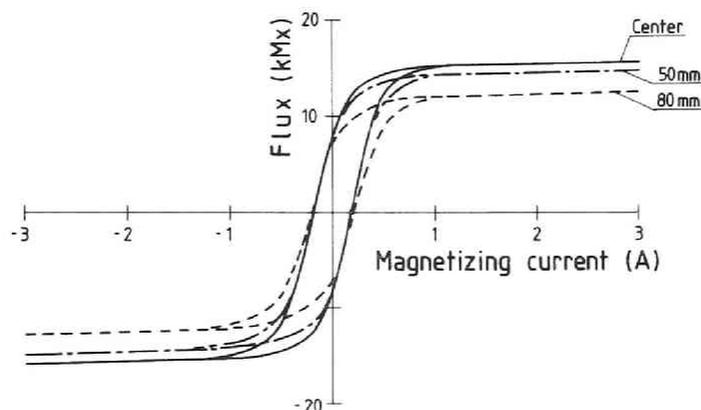


Fig.1.7 励磁電流と試料内の磁束の関係（PC鋼より線の磁化特性）

#### 1.4.2 結果

Fig.1.7 は、試料の磁気ヒステリシス特性を示したもので、横軸が励磁器に通じた電流値を、縦軸がサーコイルによって測定したロープ内の磁束を表わす。試料を静止させた状態で、両磁極間の中央および中央から 50 mm と 80 mm の計 3 つの位置で磁束を測定した。この図によれば、どの地点でも励磁電流 1 A で磁束が飽和しているが、中央より離れた地点では、磁束の方向がロープ軸に平行となっておらず、このことが見かけの飽和磁束の減少となって現われている。

つぎに、ロープが運動しているときについてみる。Fig.1.8 は、いくつかの励磁電流におけるロープ内の磁束分布を示したもので、横軸は、両磁極間の中央地点からの距離を表わす。なお縦軸は、磁束の絶対量ではなく変化の量を表わしている。磁束の量は、中央で大きくなっているが、ロープが右方向に運動しているときは中央より右へ、左方向へ運動しているときは左に、磁束の最大値を示す地点が移行している。またこの傾向は、励磁電流が大きくなるほど小さくなるが、全くなくなるわけではないことがわかる。一方、Fig.1.9 は、ロープ表面の半径方向磁束密度の分布を示したもので、縦軸は、ホール素子の出力電圧で、ロープ内に入る方向の磁束密度を正として表わしている。出力電圧が 0 であるということは、ロープ表面上の磁束がロープ軸と平行になっているということを表わす。励磁電流が大きい場合には、ロープ表面の磁束が両極間にかなりの範囲にわたってロープ軸と平行になると予想されたが、実際には、ロープが運動している限り、出力電圧が 0 となるところは、両磁極間において 1 箇所しかない。Fig.1.8 に示したロープ内の磁束

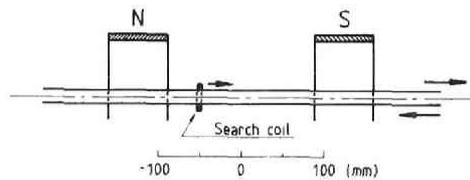
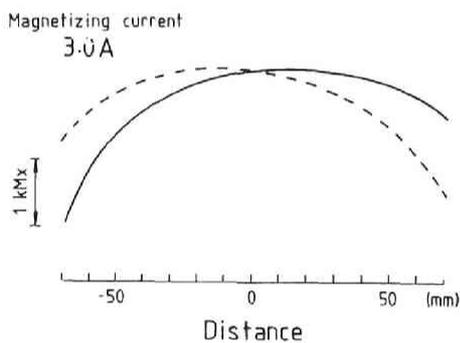
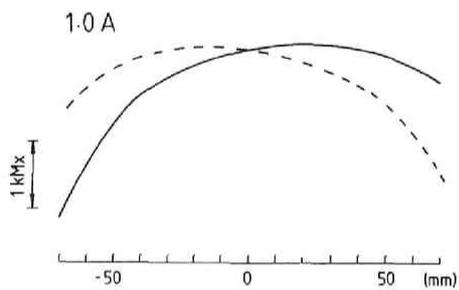
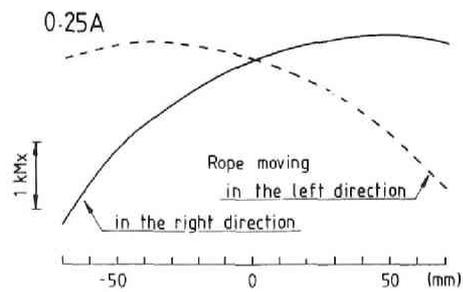


Fig.1.8 ロープ内の磁束の分布

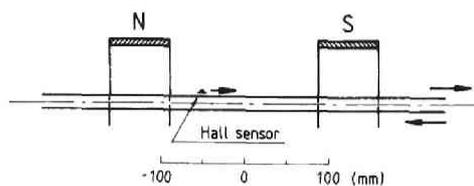
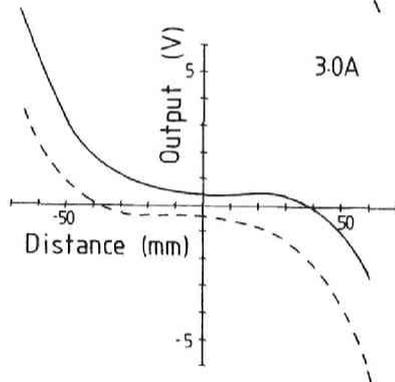
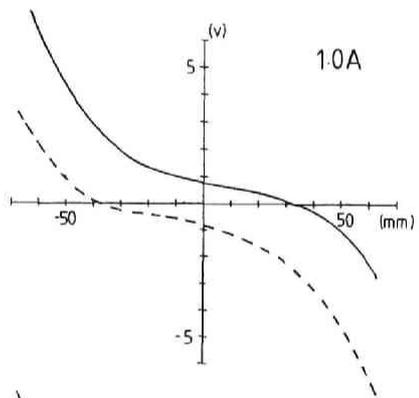
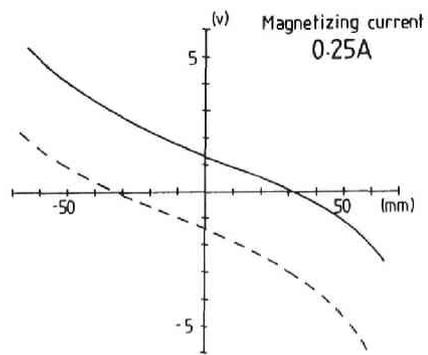


Fig.1.9 ロープ表面上での  
半径方向磁束密度の分布

分布と同様、空間での磁束分布も、ロープの運動によってその方向に引き摺られるように変化することがこの図からも読取れる。Fig.1.8 において、ロープ内の磁束が最大となる地点の中央からの距離を、磁束分布がロープの運動方向へ引き摺られる傾向の指標とすると、その値は励磁電流によって、Fig.1.10 のように変化する。この図から、ロープの運動による磁束分布の引き摺りは、励磁電流が小さいときにはかなり大きく、ロープが磁気飽和する1 A以上では、ほぼ一定となることがわかる。Fig.1.11は、以上の結果をもとに励磁器周辺の磁束分布の概要を描いたものである。

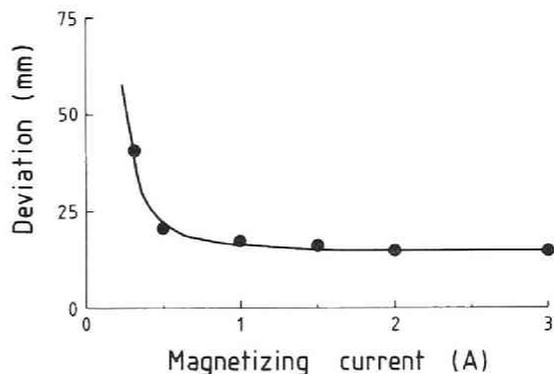


Fig.1.10 励磁電流とロープの運動に伴う磁束分布の引き摺りの関係

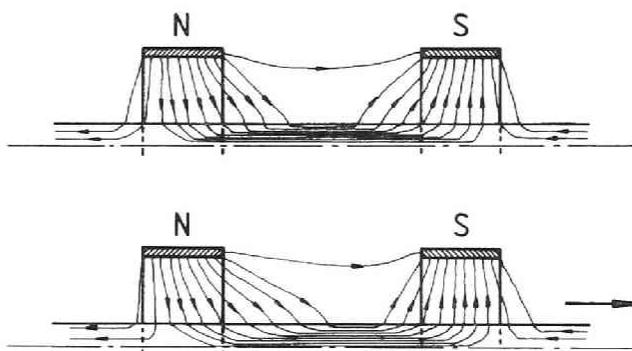


Fig.1.11 励磁器周辺の磁束分布

### 1. 4. 3 探傷出力への影響

#### 1) ロープの運動に伴う探傷出力の基線変化

Fig.1.12 は、図中に示したように、両磁極間中央の位置にホール素子をロープ半径方向の磁束に感応する向きにおき、ロープを右方向（図中①）および左方向（図中②）へ動かしたときの出力の変化を測定したものである。この図は、ちょうど、Fig.1.4 (a) に示した単一方式の検出器を用いた場合の探傷記録に対応するが、図のように、ロープの運動にともなって出力が大きく変化する、つまり探傷記録の基線レベルが大きく変化することがわかる。このことは、Fig.1.11 に示したように磁束分布がロープの運動によって変化するところから理解できる。Fig.1.13 は、極間中央にホール素子を 30mm の間隔で 2 個配置し、その差動出力がロープの運動によってどのように変化するか求めたもので、ちょうど、Fig.1.4 (b) に示した、差動式の検出器を用いた場合に相当する。差動式の場合には、基線変化は全く現われない。Fig.1.14 は、図中に示したように、Fig.1.13 の測定で用いた 2 個 1 組のホール素子を極間中央から (d) 離れた位置においたときの差動出力の値

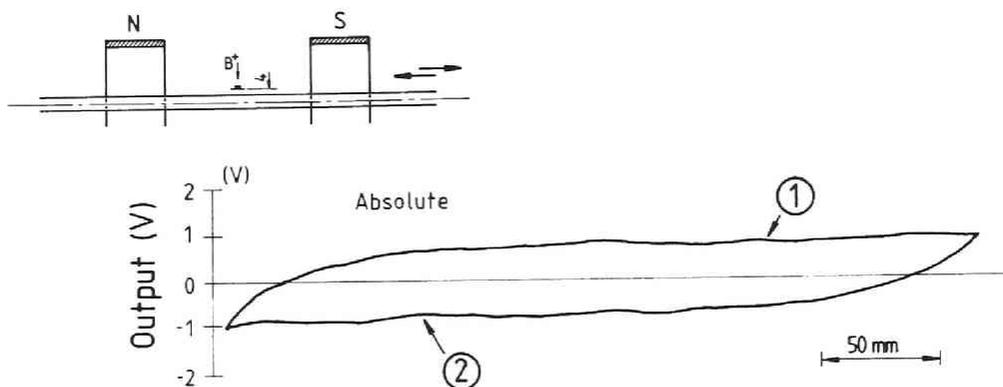


Fig.1.12 ロープの運動に伴う検出器出力の基線レベル変化（単一方式の場合）

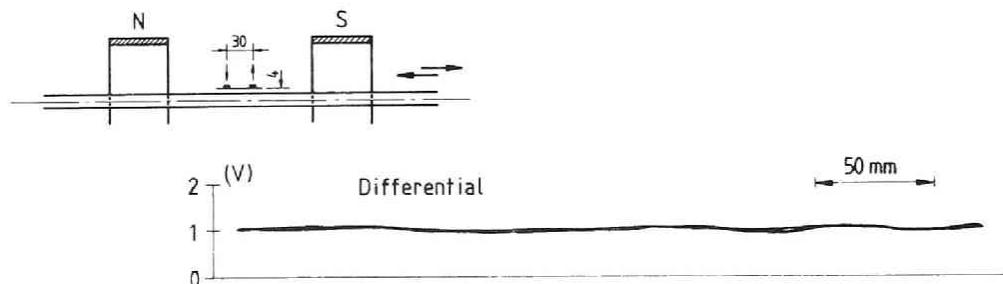


Fig.1.13 ロープの運動に伴う検出器出力の基線レベル変化（差動方式の場合）

が、ロープの運動によってどのように異なるかを示したものである。上述した差動検出器による探傷出力の基線変化は、この図における両曲線の差の分だけ現われるものであるから、差動出力を構成したとしても、それを両磁極の中央に置かない限り、基線変化が現われてしまうことがわかる。中央に差動検出器を置いた場合に基線変化がなくなるのは、Fig. 1.15に模式的に示したように、A、B 両素子の位置での半径方向漏れ磁束密度の方向と大きさ（図中の矢印）が、ロープの運動方向が右か左かで

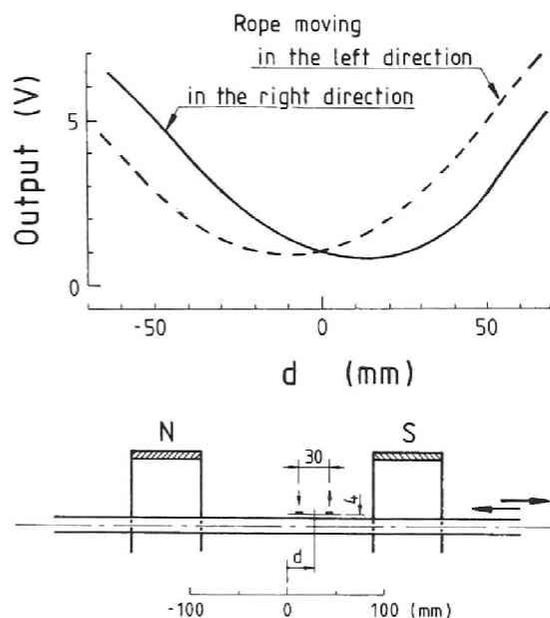


Fig.1.14 差動検出器の位置と出力基線レベルの関係

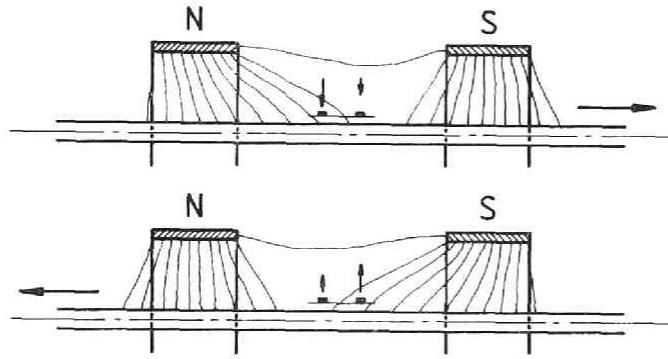


Fig.1.15 差動検出器とロープ周辺磁束分布

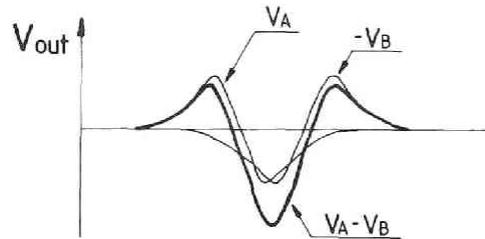
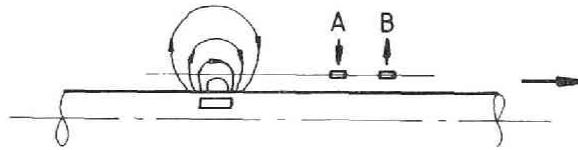


Fig.1.16 差動検出器による断線検出波形

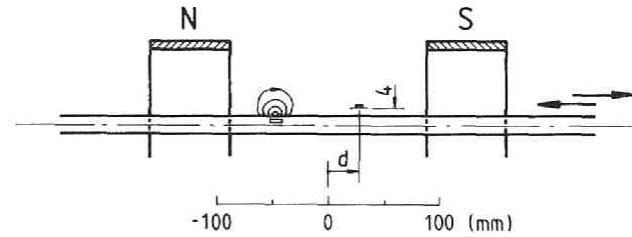
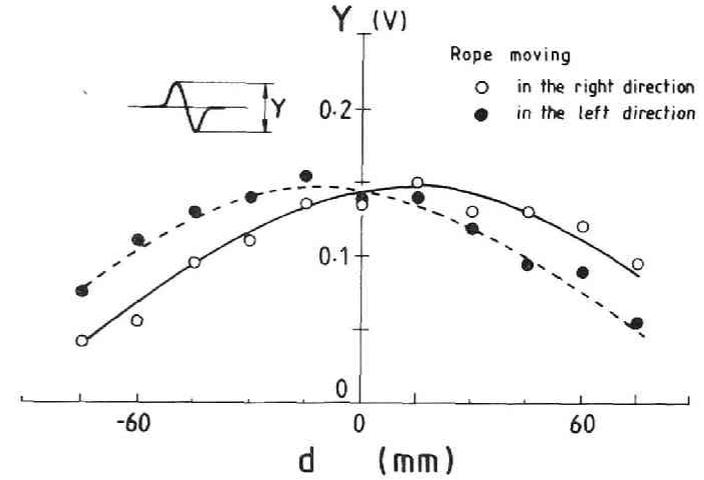


Fig.1.17 素子の位置と断線検出波形の大きさの関係

ちょうど対偶的な関係になるためである。

## 2) 損傷検出波形への影響

Fig.1.16 に示したとおり、断線損傷にもとづいて現われる漏れ磁束を差動検出器で測定すれば、その検出波形は対称的な形となるはずであるが、このことは、図のA、B両素子の検出波形 ( $V_A$ ,  $V_B$ ) の大きさが同じであることが前提である。しかし、差動出力を構成する2つのホール素子は、ともに極間中央からそれぞれ左右へある距離隔てて配置するものであり、ロープ内の磁束量が極間での位置やロープの運動によって変化するように、

損傷によって現われる漏れ磁束も、またそれを検出したときの波形の大きさも、素子の位置やロープの運動によって変化すると予想される。Fig.1.17 は、ホール素子を両極間の種々の位置におき、断線損傷にもとづいて現われる漏れ磁束を検出したときの波形の大きさを、ロープの運動方向ごとに測定したものである。この図から、たとえば差動の間隔を 30mm とした場合には、両素子の検出波形の大きさに約1割の違いが生じること、またその大小関係はロープの運動方向の違いによって逆になることがわかる。これらのことから、差動検出器によって断線損傷にもとづく漏れ磁束を検出した場合、得られる出力波形は、Fig.1.18に示したように、非対称にひずむことになる。

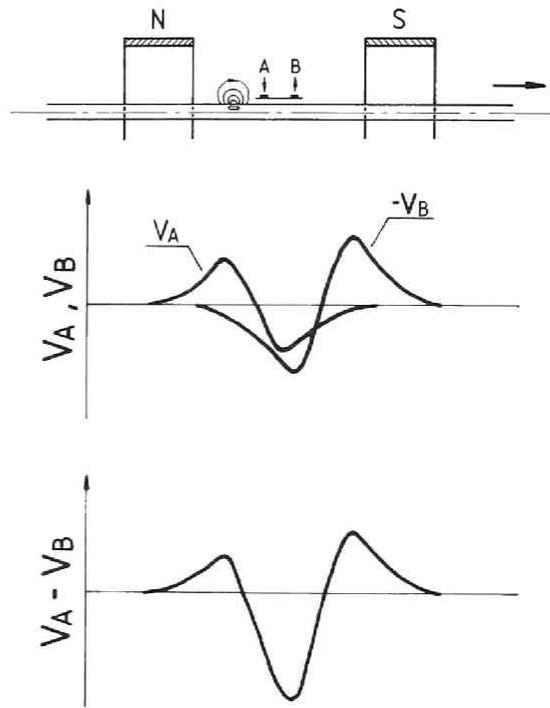


Fig.1.18 ロープの運動による  
断線検出波形のひずみ

## 1.5 結言

ホール素子などの半導体感磁性素子を利用するワイヤロープの漏れ磁束探傷について、その励磁方式として、極間磁化方式と同軸ソレノイド方式をとりあげ、その得失を明らかにするとともに、漏れ磁束検出器として、従来の差動型コイルに原理的に相当する環状検出器を提案した。この検出器は、ホール素子をロープ半径方向の磁束に感応する向きで円周上2列に配置したものである。

つぎに、ワイヤロープが有する磁気ヒステリシス特性が漏れ磁束探傷に及ぼす影響につ

いて、励磁方式として極間磁化方式を採用した場合をとりあげて、実験的に考察した。その結果、1) 励磁器によって形成される磁場は、ロープの運動によって磁束がその方向に引き摺られるように変化すること。2) 差動検出器を用いれば、ロープの運動によって現われる検出器出力の基線変化をなくすることができるが、これは、あくまでも、検出器を両磁極の中央の位置に置いた場合にのみ実現できることであること。3) 差動検出器を用いる場合、ロープの運動によって、損傷検出波形にひずみが生じること。が明らかとなった。

なお、磁気ヒステリシスによる様々な影響は、同軸ソレノイド方式を用いる場合には、全く現われないことがその後の実験的検討で明らかとなった。これは、同軸ソレノイド方式によって形成される磁場が、極間磁化方式よりも一様であるからである。このことから、設置の不便さゆえに現在ではあまり用いられていない同軸ソレノイド方式を、改めて見直すべきであると考え。また、極間磁化方式においては、ロープまわりの磁束分布は磁気ヒステリシスのためにロープの運動とともに変化するということを念頭において、それをできるだけ抑えるような励磁器の設計がなされるべきであると考え。

## 参考文献

- 1) 朴承鳳, 藤中雄三, 花崎紘一, 塚田和彦: ホール素子を用いる鋼索の電磁探傷, 日本鉱業会誌, Vol.100, No.1155, pp.411-415, (May 1984)
- 2) 見沢繁光, 松木三郎, 三好康信, 横 且: ホールゼネレーターによる鋼索の探傷, 九州鉱山学会誌, Vol.33, No.9, pp.383-389, (Sep.1965)
- 3) Kitzinger, F. and J.R.Naud: New Developments in Electromagnetic Testing of Wire Rope, CIM Bulletin, Vol.72, No.806, pp.99-104, (June 1979)
- 4) Marchent, B.G.: An Instrument for the Non-destructive Testing of Wire Ropes, Systems Technology, No.29, pp.26-32, (Aug.1978)
- 5) Weischedel, H.R.: The Inspection of Wire Ropes in Service: A Critical Review, Materials Evaluation, Vol.43, No.13, PP.1592-1605, (Dec.1985)
- 6) 小門純一, 藤中雄三, 森田和元: 鋼索の無速度電磁探傷, 日本鉱業会誌, Vol.94, No.1081, pp.157~162, (Mar.1978)
- 7) 小門純一, 藤中雄三: 鋼索の無速度探傷における環状検出器の研究, 日本鉱業会誌, Vol.94, No.1083, pp.329-333, (May 1978)
- 8) Kalwa, E. and K.Piekarski: Design of Hall-Effect Sensors for Magnetic Testing of Steel Ropes, NDT International, Vol.20, No.5, pp.295-301, (Oct.1987)
- 9) Weischedel, H.R.: Electromagnetic Wire Rope Inspection in Germany, 1925-40, Materials Evaluation, Vol.46, No.6, pp.734-736, (May 1988)

## 第2章 PWS吊ケーブルの漏れ磁束探傷<sup>1), 2)</sup>

### 2.1 緒言

ワイヤロープは、吊構造物の張力部材、海洋構造物の係留索など、静索としても広く用いられている。近年、橋梁などの大型構造物の経年劣化とその健全性の評価に関心がよせられる<sup>3)</sup>ようになり、静索として用いられている比較的大きい直径のワイヤロープについても、定期的な目視観察にかわる非破壊的な劣化検査方法の開発が要望されている。

第1章で述べたように、ワイヤロープの劣化評価には、直流磁界のもとで行う漏れ磁束探傷法が有効である。しかし、静止索への適用としては、架空索道の支索の探傷例<sup>4)</sup>があるだけで、吊構造用ケーブルなどの直径の大きい静止索に漏れ磁束探傷法を適用した例はない。B.G.Marchant が、係留索用磁気探傷装置の基本的な構想について発表している<sup>5)</sup>が、実際に探傷が実施されたとの報告はない。これは、従来の電磁探傷技術が、いわゆる動索を対象としたものであり、最大ロープ径として大規模な立坑に用いられている60mm程度までのものを目標として探傷装置の設計がなされてきたからである。大径静索を対象とする場合、ロープをその内部まで十分に磁化するためには装置自体の大型化が避けられず、またそのことが探傷器を検査対象であるロープに懸架して移動走査させることのできる構造に仕上げる際の妨げとなる。このため今日まで、実用性のある大径静索用探傷器の開発はなされていない。

著者は、吊屋根用のケーブルとして用いられているPWS (Parallel Wire Strand, 平行線ストランド) を直接の対象として、大径静止索 (直径 100mm程度) にも適用できる探傷装置の開発を行った。本章では、開発した装置の構造、探傷結果からケーブルの損傷を定量的に評価する方法、および実際に吊屋根の支索として用いられ、集中的な腐食があると認められていたPWSケーブルの探傷結果について述べる。

### 2.2 大径静索の劣化とその探傷における問題点

静索として用いられているワイヤロープの劣化は、主に、繰返し引張荷重による素線の疲労破断と、雨水による腐食とである。耐用年数を考えた場合にとくに問題となるのは、后者である。ケーブルはその構造上侵入した水分が滞留しやすく、またそれが局部的であると腐食が加速度的に進行し、僅かな期間で極度にケーブルを劣化させることとなる。このような局部的な腐食の検査にも、漏れ磁束探傷法が有効と考えられる。

吊屋根や斜張橋のケーブルなどのように、一般の静索として広く用いられている直径 5

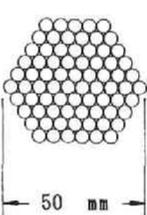
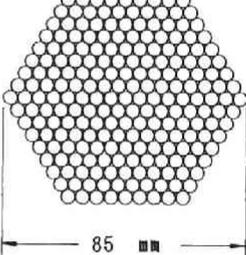
0~100 mm のワイヤロープに対して電磁探傷を適用する際には、以下に述べるような点が問題となる。1) 一般の動索とくらべて、数倍から十数倍と大きい横断面積をもつロープが対象であるから、それを磁気飽和状態まで磁化するためには、かなり大きな起磁力を要すること。またそれを得るための効果的な磁化方法を見出すこと、2) 静索を対象とするので、移動速度の変動によって探傷感度が影響されない漏れ磁束検出の方法（いわゆる無速度探傷方式<sup>5)</sup>）をとらなければならないこと、である。さらに副次的な問題として、

3) 探傷器をケーブルに吊り下げそれ自体を軌条として移動させるとき、走行中でも安定な磁化が確保できること、4) 磁化用電磁石の発熱も含めた周囲温度の変化によって探傷信号が影響を受けないこと、5) 移動する探傷器に曳行される電線による給電および信号伝送に問題を生じないような電源および信号処理回路とすること、などがあげられる。

### 2.3 PWS吊ケーブル

PWS（平行線ストランド）は、当初、吊橋のメイン・ケーブルをプレハブストランド工法で架設する際のケーブル構成要素（ストランド）として実用化をみたケーブルである。今日では、斜張橋のケーブルをはじめ、長大スパンが要求される建築物にも、引張部材としてモノ・ストランドの形で利用されている。Table 2.1 は、探傷器開発の直接の対象としたPWS75とPWS217の諸元を示したものである。PWSは、その名のように直径5 mmの丸素線を平行最密に束ね、外形を六角形としたものである。引張強度、弾性係数ともに他の形式のワイヤロープに比べて最も大きく、よりのないで構造的な伸びを生じることもなく、引張部材として優れたものと認められている。素線は通常 300 g/m<sup>2</sup> 程度にめっきされており、使用環境にあわせて架設後に細線によるラッピング、樹脂材による被覆等の防食処理が施される場合もあるが、屋外用のものでも簡単な塗装処理だけの施工例もあり、年月とともにロープ内部に腐食を生じている例も報告されている。

Table 2.1 PWSの諸元

	PWS75	PWS217
素線径	5 mm	5 mm
素線本数	75 本	217 本
断面形状		
断面積	1,473 mm <sup>2</sup>	4,261 mm <sup>2</sup>
保証切断荷重	224 tonf	648 tonf
標準重量	11.5 kg/m	33.4 kg/f

## 2. 4 探傷装置

### 2. 4. 1 励磁方式と所要起磁力

ワイヤロープの漏れ磁束探傷におけるロープの励磁方式は、1.3.1 で述べたように、極間磁化方式と同軸ソレノイド方式の2つがある。それぞれ一長一短があるが、PWSの探傷においては、特に装置の大きさや重量ができるだけ小さくなることを考慮し、横断面積  $1,473 \text{ mm}^2$  の PWS 75 用には従来の極間磁化方式を、また、その約3倍の断面積  $4,261 \text{ mm}^2$  をもつ PWS 217 用には同軸ソレノイド方式を採用することとした。

両者において、その所要起磁力の実際値を決定するため、また、両者に磁化効率の面でどれほどの優劣があるのかを知るため、以下に述べるような予備実験を行った。それは、対象とするPWSの断面の中心に模擬断線1本を挿入し、励磁電流を増加させながら、外部漏れ磁束密度の変化を測定するもので、いいかえれば、どれだけの起磁力でPWSの中心を磁気飽和状態にすることができるかを、外部漏れ磁束密度の観測値を指標として測定するものである。なお、漏れ磁束の検出には、複数個のホール素子を2列に配置した差動出力型の検定用検出器を用いた。

Fig.2.1 は、極間磁化方式を採用した PWS 75 の場合についての結果を示したものである。なお、励磁器の構造は、2.4.3 で述べる実際の探傷器のものと同じである。同図から、漏れ磁束の大きさを表わすインパルス電圧波形のピーク値は、起磁力が  $20,000 \text{ AT}$  をこえると飽和に近づくことがわかる。一方 Fig.2.2は、ソレノイドコイルを用いた PWS 217 の場合の結果を示したものである。同図(a) にその概略を示したように、励磁は、 $400 \text{ mm}$  離れた2つのコイルボビン(内径  $130 \text{ mm}$  , 幅  $140 \text{ mm}$ ) に、 $100 \text{ mm}^2$  の溶接用ケーブルをそれぞれ23回巻き、 $100 \sim 500 \text{ A}$  の直流電流を通电して行った。同図(b) から、起磁力が  $20,000 \text{ AT}$  で飽和に対して約60%の磁化状態となっており、PWS 217 がPWS 75 の3倍の横断面積を持っているにもかかわらず、ほぼ同じ起磁力で同等の磁化状態を

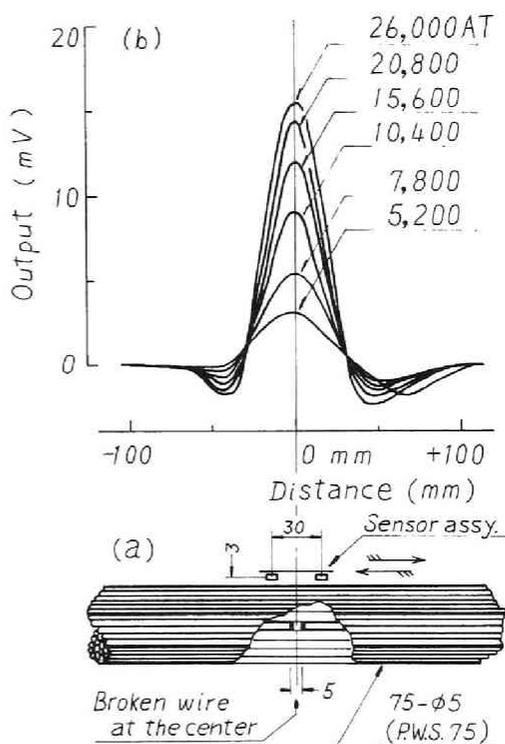


Fig.2.1 励磁電流と損傷検出波形  
(極間磁化方式, PWS 75)

現することができるということが分かる。ソレノイド方式の場合には、外周空間を磁束帰路とするため磁化効率が低くなるのが当初懸念されたが、非接触状態を保つために環状磁極とロープとの間にかなりの空隙を設けることを余儀なくされる極間磁化方式よりもかえって効率の良い磁化方式であるとみなせることがわかった。

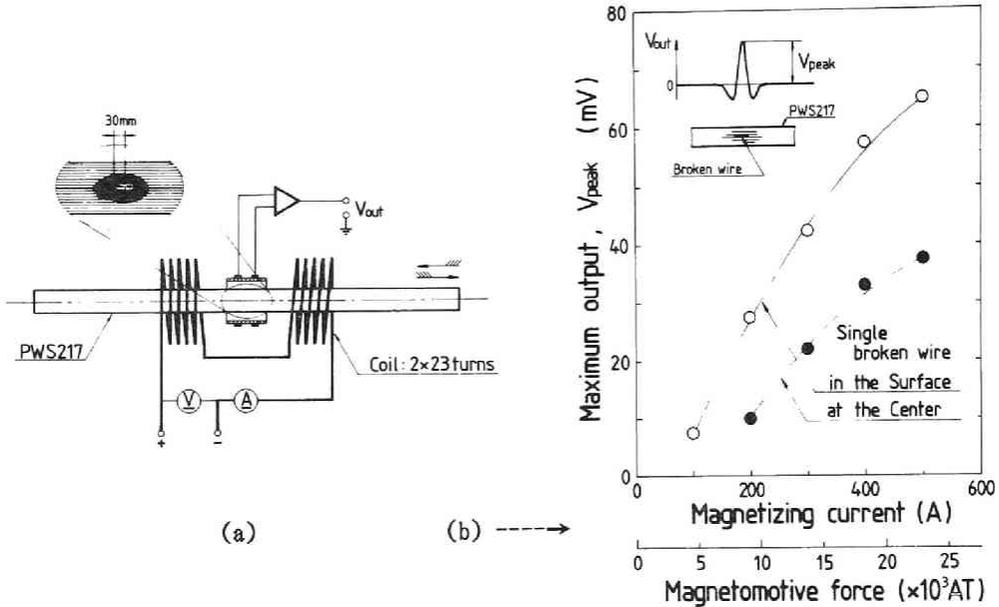


Fig.2.2 励磁電流と損傷検出波形（同軸ソレノイド方式，PWS217）

#### 2.4.2 検出器

静索を対象とする場合は、探傷感度に速度依存性のない、いわゆる無速度探傷方式の検出器<sup>6)</sup>でないと不都合を生じやすい。そこで、第1章で述べた、ホール素子を用いる環状検出器を製作した。Fig.2.3は、この検出器の構造概略図で、PWS75用のものを示したものである。PW

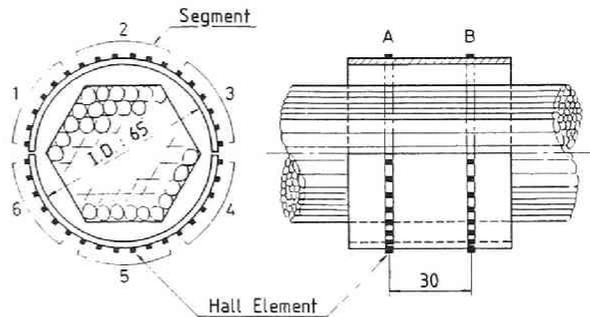


Fig.2.3 漏れ磁束検出器の構造

S 75 用と PWS 217 用の検出器の諸元は、Table 2.2 に示したとおりである。

検出器は、複数個のホール素子を2分割した硬質樹脂管の表面上において、長手方向にある距離を隔てたA、Bの2列をなす形で、リング状に配置した構造のものである。差動方式を構成させるA列とB列との間隔は、検出器内径寸法との関連からそれぞれ PWS 75 では 30 mm、PWS 217 では 50mm としている。なお、すべてのホール素子（PWS

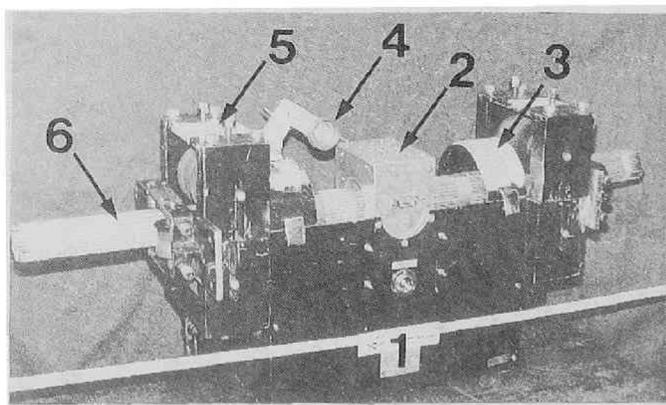
75で2×36個、PWS 217で2×48個)は、自己発熱や周囲温度の変化によってその感度が変わらないように、約11.5mAに定めた定電流駆動を行うようにしている。なお検出回路の構成は、Fig 1.5と同じである。検出器内径は、リフト・オフが20mm程度であっても十分に損傷検出が行えることが、2.4.1で述べた予備実験を通じて明らかとなっていたので、探傷中に十分な非接触性が保たれるように、それぞれ65mmと100mmとに設定した。吊ケーブルのように直径の大きな静索の場合、損傷が断面内のどの位置に分布あるいは集中しているかを知ることは、損傷原因を明らかにすることやそのケーブルの管理方針を設定するために有用であり、また、探傷記録に現れるインパルス波形からその損傷の大きさを推定する上にも必要なことである。そこで、この検出器では、Fig.2.3に示したように、環状に配置したホール素子を6つのセグメントに分割し、それぞれのセグメント単独の探傷信号も得られるようにしている。

### 2.4.3 装置の構造

Table 2.2は、今回開発した探傷器の概略構造と励磁器および検出器の構成の諸元を示したものである。Fig.2.4は、それぞれの探傷器の外観を示したものである。PWS 75用の極間磁化方式のものは、環状磁極やその中央に設ける検出器がすべて2分割構造としてあり、探傷器を現地で簡単に設置できる構造となっている。励磁は、2,600回巻のコイルに直流8Aを通电して行うようにしている。PWS 217の同軸ソレノイド方式のものは、磁化効率(起磁力と対象ロープ断面積の比として定義した便宜的な指標; Table 2.2中に示した)がかなり良く、寸法重量とも前者の1.5倍程度におさえることができた。ソレノイド方式の場合、巻線数を大きくすることが現地での作業性を著しく低下させることになるので、実際には60mm<sup>2</sup>の電線を245mm離れた2つのボビン(幅160mm)にそれぞれ40回巻することとし、250Aの電流を通じることで20,000ATの所要起磁力を得るようにしている。したがって電源がかなり大掛かりのものとなり、電力効率の面ではかなり低いものとならざるを得なかった。なお、巻線ボビンは、放熱と軽量化を考慮してアルミニウム製とした。これにより、励磁器の定格時間は30分となり、現地探傷にはなんら支障をきたさなかった。両装置ともPWSに沿って移動させながら検出器出力を連続的に測定するのであるが、PWSの長さを横軸とした探傷記録を得るため、ロータリー・エンコーダを用いて探傷器の移動距離をパルス信号として得られるようにしている。

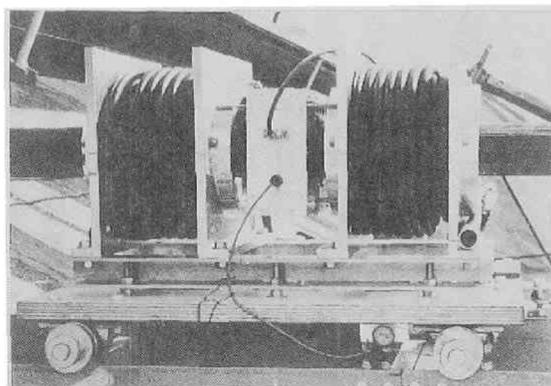
### 2.4.4 信号処理回路

探傷器から長さ40mのシールド・ケーブルを通じて探傷信号および距離信号を信号処理器に導き、同じケーブルを通じて主電源から検出器とロータリー・エンコーダに給電する方式を取った。なお、励磁用の電流は、このケーブルとともに曳行される別のキャプタ



- 1. 励磁器      4. ロータリ・エンコーダ
- 2. 検出器      5. ガイド・ローラ
- 3. 磁極        6. PWS 75

(a) PWS 75用



(b) PWS217用

Table 2.2 探傷装置の諸元

	極間磁化方式	ソレノイド方式
対象ワイヤロープ 横断面積 外 径	PWS75 1,473 mm <sup>2</sup> 50 mm	PWS217 4,261 mm <sup>2</sup> 85 mm
励 磁 電 力 起 磁 力 磁化効率	DC 70V 10A 8A×2,600T (20,800 AT) 14.1 AT/mm <sup>2</sup>	DC 10V 500A 250A×40T×2 (20,000 AT) 4.7 AT/mm <sup>2</sup>
検 出 器 内 径 素 子 数 信号増幅度 周方向分割	65 mm 2×36 50 dB 6	100 mm 2×48 50 dB 6
構 造 寸 法 重 量	700×230×400 mm 約 55 kg (電源約 30 kg)	800×550×520 mm 約 70 kg (電源約 200 kg)

Fig.2.4 吊ケーブル用探傷装置

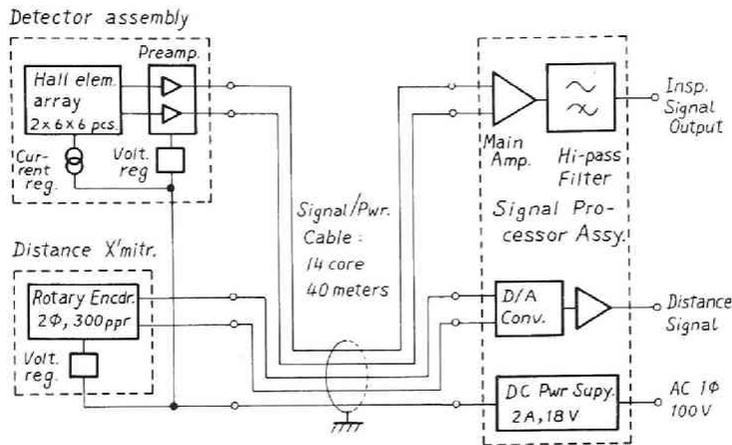


Fig.2.5 探傷装置の信号処理系統

イヤ・ケーブルによって供給した。Fig.2.5 は探傷信号等の処理系統図である。探傷信号の伝送については、まず検出器内部に検出素子群A, Bそれぞれの出力に対する差動式の前置増幅器を設けて出力インピーダンスを低くしておき、処理器側で主差動増幅を行う2重差動方式とした。このことによって伝送ケーブルが長いために侵入しやすい外来雑音性電圧の除去に優れた測定回路を構成することができた。なお、探傷器を往復移動させたときに現われる磁気ヒステリシスに基づく検出電圧のレベル変化(1.4.3で詳述した)、ならびに温度変化に基づくドリフトを除くため、処理回路の中間において遮断周波数0.5Hz, 12dB/octのハイパス・フィルタを挿入した。記録チャートにおける横軸すなわちPWSの長さに沿った距離信号については、ロータリー・エンコーダの出力信号が疑似正弦波信号であり、また非整合伝送ケーブルを用いることによる波形ひずみも含まれるので、受信側においてコンパレータによるデジタル信号化を行った後、その2相出力信号間の位相弁別によって移動方向を得るとともに、加減算カウンタとD/Aコンバータを用いて、任意の起点からの距離と移動方向を示すアナログ信号電圧として記録器に導くようにした。ホール素子群への給電は、ケーブルでの電圧降下を考慮して、送電端には所要電圧よりも十分高い電圧の主電源回路を構成しておき、受電端には電圧レギュレータを設けてその安定化を行った。したがって、ホール素子への給電は、定電圧電源と前述の定電流回路を用いる2重の安定化が計られていることになる。

## 2.5 損傷評価の方法

ワイヤロープの探傷結果は、漏れ磁束検出器からの出力を、ロープのある起点からの距離に沿って記録した図(以後これを探傷記録と呼ぶ)として得られる。2.4で述べた探傷

装置によって、実際にケーブルの探傷を行った場合、もしそのケーブルに局部的な損傷が存在すると、その探傷記録上の損傷位置に対応する所に、インパルス波形（後出の Fig.2.14 にみられるような波形）が現われる。差動型の漏れ磁束検出器からの出力であるこのインパルス波形の大きさと形から、損傷の程度が評価できる。著者は、吊ケーブルの局部腐食損傷の程度を表わす指標として、その損傷をある区間一定に断面積が損失しているものと考えた時の、その長さ(L)と損失断面積(A)を用いることにしている。なお、このような損傷評価の尺度を用いることが、PWSケーブルの局部損傷を対象とする場合に妥当であることは、第3章において確認される。しかし、他の構造のロープや他の損傷形態にも有効かどうかはわからない。

損傷の程度と得られるインパルス波形の関係を検討するにあたって、損傷モデルとして、Fig.2.6 に示したような、素線を1ないし数本長さLにわたって欠落させたものを考えることとした。また、探傷記録上のインパルス波形の大きさと形を表わす代表値として、同図に示した、幅(W)と高さ(H)を採用した。インパルス波形の幅(W)と高さ(H)は、欠落素線の長さ(L)と素線数いかに断面積(A)および欠落部分のケーブル横断面内での位置によって変化する。したがって、前者2つの既知量から、後者3つの未知量を求めるためには、なんらかの工夫が必要である。インパルス波形の幅(W)と高さ(H)から損傷の断面積(A)を評価する方法は、断線を対象として、M.J.Bergander によって提言されている<sup>7), 8)</sup>。彼の方法は、検出器として直径の異なる2組の差動型コイルを用い、得られる2つのインパルス波形の高さの違いから、第3の未知量である損傷の断面内位置を推定するというものである。しかし、直径の異なるコイルで検出することが損傷の評価において互に独立な効果を生むことなのかどうか疑問である。また、E.Kalwa と K.Piekarski もこれらの関係について詳細な研究結果を報告している<sup>9), 10)</sup>が、損傷の評価方法については言及していない。一般の動索などの場合では、その損傷の生じ方が使用されているロープの構造や使用条件によって、ある程度限定されることもあって（断線が外層素線に発生するとか、鋼芯と側ストランドとの間に限られるとかいったこと）、実際の探傷結果の解釈においては、いくつかのモデル損傷について得られたキャリブレーション波形と探傷結果を照し合わせることによって、その損傷の評価がなされている<sup>11), 12)</sup>。筆者は、検出素子としてホール素子を用いることの利点を生かし、円周上の素子群を6つに分割し、おのおのの素子群から得られるインパルス波形の違いをもとにして損傷位置の推定を行い、それにもとづいて損傷の

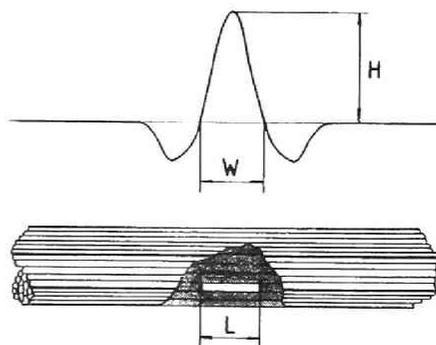


Fig.2.6 損傷モデルと検出波形

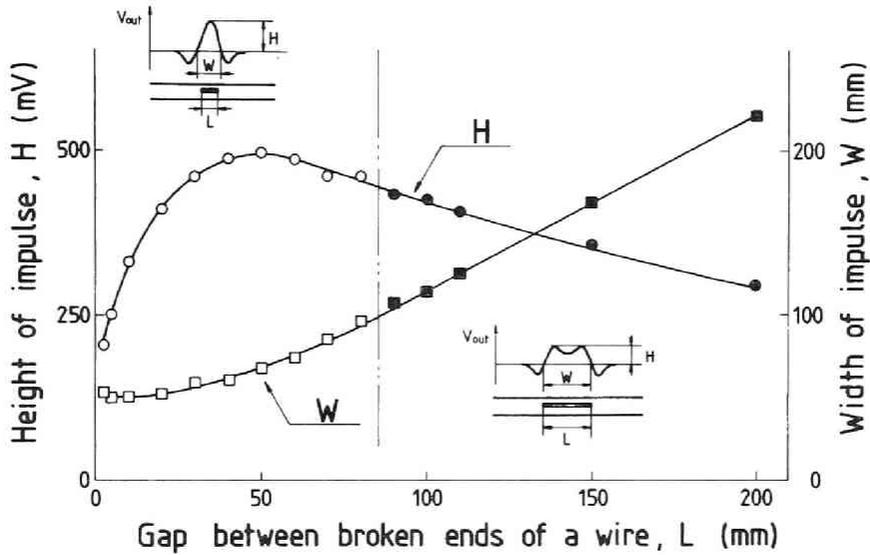


Fig.2.7 損傷の長さ (L) と検出インパルス波形の幅 (W) と高さ (H) の関係

大きさを評価するという方法をとった。

### 2.5.1 損傷の検出感度

Fig.2.7 は、PWS 75 の中心素線を欠落させ、その長さ(L)をかえた時に、得られるインパルス波形の幅(W)と高さ(H)の変化を示したものである。なお、用いた探傷器は、Fig.2.4 (a) に示したものである。高さ(H)は長さ(L)によってかなり変化し、 $L \geq 90\text{mm}$  の範囲では図中に示したようにインパルスが2山になる。一方、幅(W)は、 $L \leq 30\text{mm}$  の範囲をのぞき、 $W \approx L + 20\text{mm}$  となっている。また、欠落部分の横断面内での位置を変化させた時、インパルスの高さ(H)はかなり変化するが、幅(W)はやはり  $L \leq 30\text{mm}$  の範囲を除き、上に示した関係を満足することがわかった。これらのことから、損傷の長さ(L)は、得られたインパルスの幅(W)から直接的に求めることができるといえる。

次に、PWS内の素線1本分の欠落に対するインパルス波形の高さ(H)を検出感度 (mV/本) と定義し、これが欠落素線の断面内位置によってどのように異なるかについて検討した。Fig.2.8 は、PWS 75 を極間磁化方式の探傷器で探傷したときの検出感度の値を断面内の各素線位置において求めたもので、Fig.2.9 (a) は、PWS 217 をソレノイド磁化方式の探傷器で探傷したときのものである。ともに、長手方向に  $L = 30\text{mm}$  の破面間隔をもった断線損傷について測定したものである。いずれの場合も中心付近と表面付近とではかなりの感度差がある。Fig.2.8 と Fig.2.9 (a) を比較すると、中心と表面との感度比は、PWS 75 の時 2以上、PWS 217 の時 1.5と、後者の方が感度差が少なくな

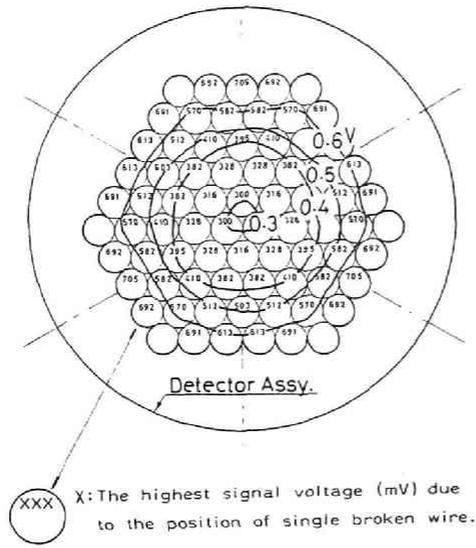
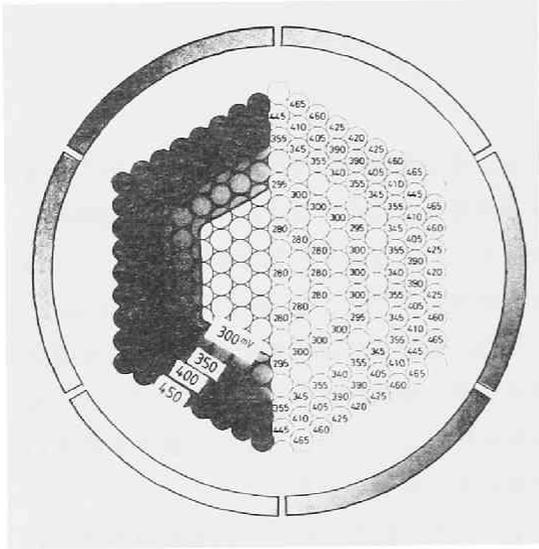


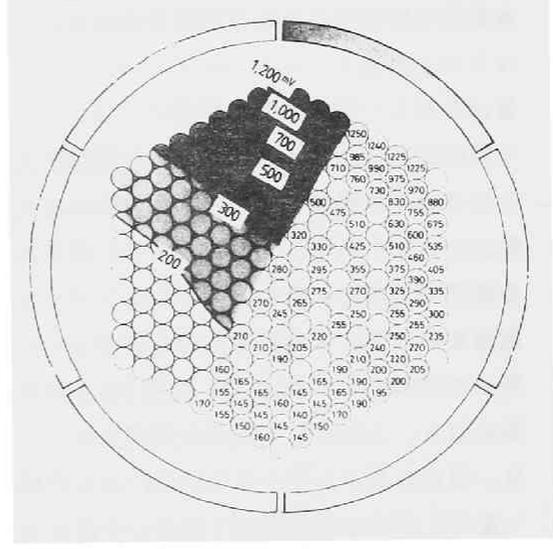
Fig.2.8 損傷検出感度の断面内分布 (磁極間磁化方式, PWS75)

Table 2.3 複数損傷における検出電圧の加法性

断線位置	検出電圧 (mV)	
	実測値	計算値
	1,013	900
	1,562	1,602
	2,300	2,120



(a) 全方向性探傷



(b) 単方向性探傷

Fig.2.9 損傷検出感度の断面内分布 (ソレノイド方式, PWS217)

っている。これは両者の探傷器で磁化方式が異なっていることによるもので、このことから、断面内の磁束分布の均一性の面においてもソレノイド型の磁化方式の方が優れているといえる。Table 2.3 は、同一断面内に複数の損傷があるときの検出電圧をPWS 75 の場合について示したもので、損傷分布の集中、離散にかかわらず、Fig.2.8 に示した感度

分布が表わしている素線それぞれの値を加算した値とほぼ一致している。したがって、損傷部の断面積と検出電圧との間には、ほぼ重ね合せが成立つといえる。

## 2.5.2 横断面内における損傷部位置の標定

上述したように、損傷の大きさを探傷記録から断面積損失率として推定する際には、その損傷の位置あるいは複数断線においてはそれらの分布状況を知ることが必要となる。外観検査の結果も参考にできるが十分とはいえない。本研究で用いた検出器は、2.4.2 に述べたように、6方向から単独に探傷できるので、それぞれの方向からの探傷記録をもとにして、横断面内における損傷位置の標定を行うことができる。Fig.2.9 (b) は、6つのセグメントのうちの一つだけを作動させた時の断面内の感度分布を示すものである。この単方向探傷における感度分布には十分に鋭い方向性があり、その距離減衰も大きく、横断面内における損傷位置標定のために好都合な特性であると認められる。Fig.2.10(a) (b) は、図中の黒点で示すような種々の損傷分布状態において、検出器の各セグメントが示す検出電圧の大きさをその方向の頂点にとって、実線で結んで六角図として表わしたものである。

図中の破線は、6セグメントの全てを並列に用いた時の検出電圧を示している。実線で示す六角形は、損傷の分布状態をかなりよく反映しており、現地での探傷においても、各方向からの探傷を行ってこのような六角図を描けば、損傷の横断面内での位置をある程度まで推定することができる。

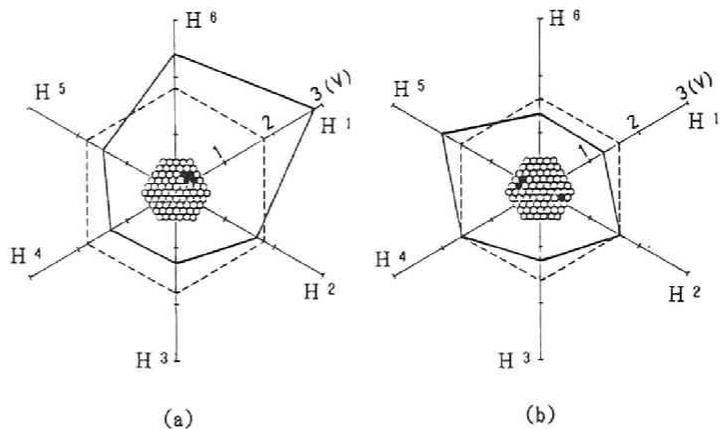


Fig.2.10 損傷の断面内分布と検出電圧六角図の関係

## 2.5.3 損傷の評価手順

探傷によって得られたインパルス波形の高さと幅、および6つの方向からの探傷結果（検出電圧の六角図）をもとにして、損傷を定量的に評価する、つまり損傷の位置、長さ、断面積を求める手順は、以下のとおりである。

- 1) 探傷記録上に現れたインパルス波形の位置が損傷の位置である。
- 2) 得られたインパルス波形と同じインパルス幅 (W) を与える欠落素線モデルの長さ (L) を決定し、これを損傷部の推定長さとする。
- 3) 長さ (L) の欠落素線によって断面内の検出感度分布を作成する。

- 4) 検出電圧の6角図をもとにして、損傷の断面内位置を概略標定する。
- 5) 4)の結果を参考にしながら、3)において作成した感度分布図をもとに、探傷インパルス波形の高さ(H)に相当する、つまり、同じ検出電圧となるべき欠落素線数を求めて、損傷の断面積いいかえれば断面積損失率を算出する。

## 2. 6 PWS吊索の現地探傷

### 2. 6. 1 探傷の状況

開発した装置を用いて実施した現地探傷の対象は、露天下に設置されている PWS 75 と PWS217 である。このPWS吊索は、施工時に、PWSへの雨水の滞留を考慮して、アンカーに近い下方部分約1mの内部にグリースを充填し、外部は塗装によって防食処理が施されていたが、約15年を経て腐食劣化が目視によって認められ始めていたものである。外観検査によれば、腐食はアンカー部から0.5~1.2mの範囲に集中している様子であった。これは、表面から侵入し斜張状態のPWS内部を伝わってきた雨水がグリース充填部の上端付近に滞留しやすかったことに起因していると思われる。

Fig.2.11, Fig.2.12 は、探傷の実施状況を示すものである。PWS 75 については探傷器をそのPWSに吊り下げ、曳索によってその全長約22mにわたって移動させ、往復の探傷記録を

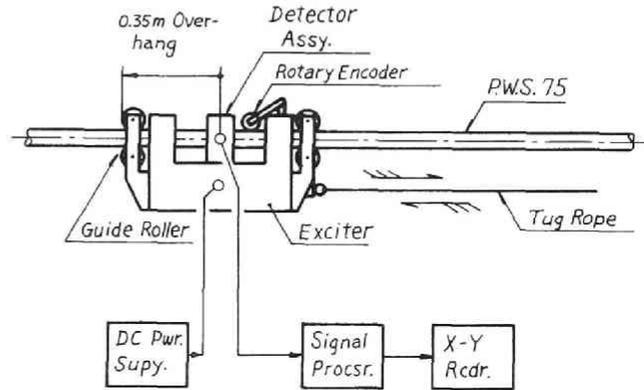


Fig.2.11 吊ケーブル現地探傷の状況 (PWS75)

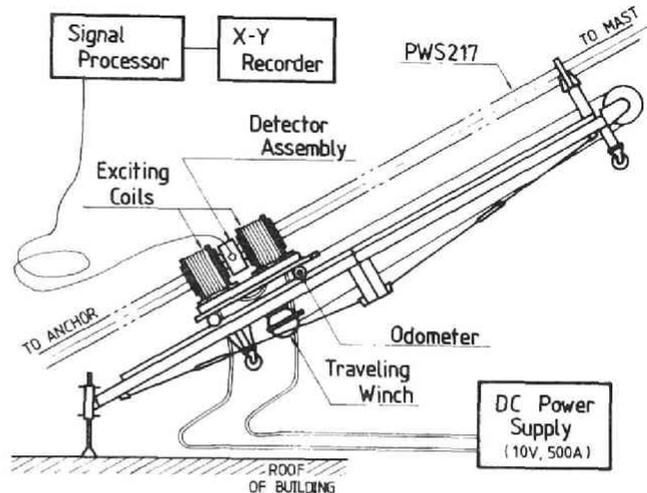


Fig.2.12 吊ケーブル現地探傷の状況 (PWS217)

得るようにした。一方 PWS 217 の場合は、すでに PWS 75 の探傷によって損傷がアンカー部近くにのみ存在することが明らかであったので、Fig.2.12 のような探傷器をケーブルに沿って移動させることのできる傾斜型の架台を製作し、PWSのアンカーもとから約2mの区間を探傷することとした。なお、ソレノイド型の場合、その巻線作業にかなりの時間がかかるが、これもボビンを回転させながら巻線できる構造としたため、比較的短く（約20～30分間）することができた。

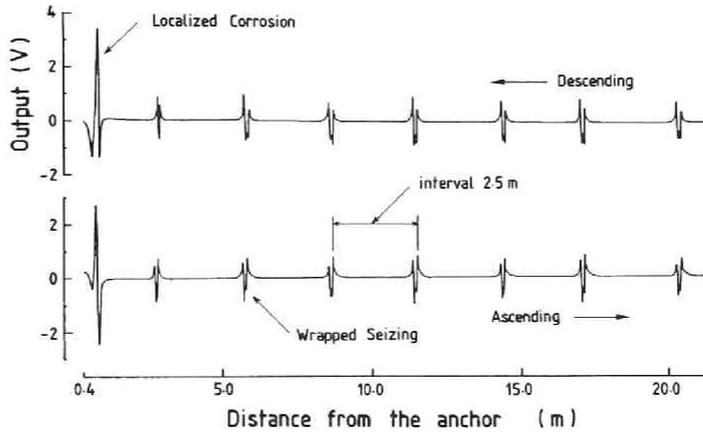
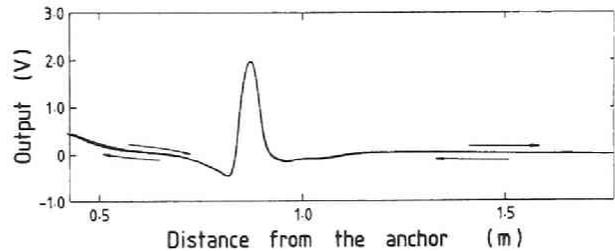


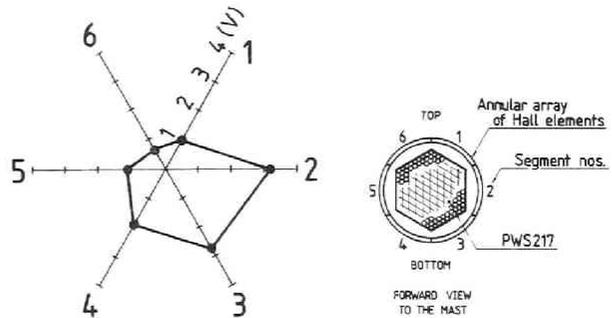
Fig.2.13 探傷結果例 (PWS75)

### 2.6.2 結果・考察

Fig.2.13, Fig.2.14 は、探傷記録の1例を示すもので、Fig.2.13はPWS 75の全長約22mにわたっての探傷記録例である。このPWS 75では、アンカーもとから0.6mの部分に顕著な集中損傷があり、それより上方には全長にわたって全く異常がないと判断される。なお、記録上において約2.5mごとに現れているインパルス波形は、損傷でなく、PWSに施されたワイヤ・シーリングによる横断面積の増加部を示すものである。Fig.2.14(a)は、PWS 217のアンカーもとから約2mの区間の往復探傷記録で、(b)は



(a) 全方向性探傷往復記録



(b) 単方向性探傷による検出電圧六角図

Fig.2.14 探傷結果例 (PWS217)

このケーブルについて6方向からの探傷記録にもとに、集中損傷部でのインパルス波形の高さを六角図として表わしたものである。これらの探傷記録から、本研究で開発した探傷器はいずれも、静索として用いられている大径ワイヤロープの探傷に適するものであり、集中腐食のような損傷はかなりの確に検知できることがわかる。極間磁化方式の探傷器で得られる探傷記録には、Fig.2.13の例のように、探傷器の移動方向によってそのインパルス波形に違いが生じる。これは、1.4.3 で述べたように、ワイヤロープが磁気ヒステリシス性を持つためである。しかし、同軸ソレノイド方式の場合は、このような往復における記録波形の違いがほとんど認められず、探傷結果解釈の容易さにおいても、ソレノイド型の磁化方式のほうが優れているといえる。一方、Fig.2.14 (a) の探傷記録においては、その左端すなわち起点部が正の方向に若干の上昇を示している。これは、探傷器がアンカー部に近づくことによって、励磁コイルの磁束がアンカー金具に分流して磁化状態が変化したことによるものである。このことは、ソレノイド磁化方式においては磁気回路の大部分が外周空間であり、外在の磁性体の影響を受けやすいためであるが、この程度であれば、実際の探傷にはそれほど支障とならないと考えられる。

探傷を行ったこの現場のPWSは、損傷の程度は多様であっても、損傷を生じている場所は、PWS 75 も PWS 217 もすべて、アンカーもとから 0.5~1.2m の範囲における1箇所集中していた。また、Fig.2.14 (b) の六角図から、損傷はケーブル断面の下半分に集中していると推測される。これらのことから、この損傷は、1箇所集中的持続的に雨水が滞留したことによって生じた腐食劣化であると推察される。Fig.2.15 は、探傷を実施した 25 本の PWS 75 の推定断面積損失率を、探傷に先立って行われた、目視観察による腐食程度の分類結果と対照したもので、Dが最も腐食が激しいと判断されたものを表わす。なお、推定断面積損失率が幅をもっているのは、損傷の位置および長さの推定値に余裕をもたせたためである。この図から、目視では、Cランクがかなり広い範囲を占めてしまい、取替えるか否かの判断が難しいことがわかる。電磁探傷によって同現場で最も腐食が激しい（断面積損失率の推定値20~30%）と推定されたPWS 75 について、それを取り外して分解

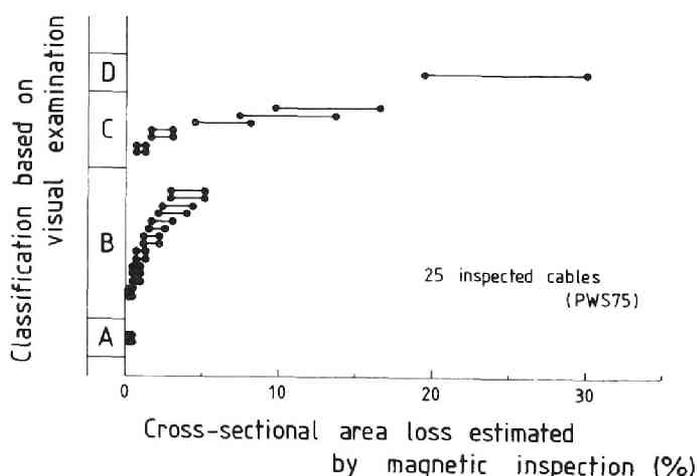


Fig.2.15 探傷結果と目視観察結果の比較

検査した結果、PWSの最弱部での横断面積損失率は約22%であった。

## 2.7 結 言

吊構造用のPWSケーブルを直接の対象として、大径静止索（直径 100mm程度）に適用できる漏れ磁束探傷装置を開発した。また、吊屋根ケーブルの現地探傷を実施して、この装置が雨水による局部腐食劣化の検査に適したものであることを確認するとともに、探傷によって得られる記録から局部腐食の程度を断面積損失率として評価する方法を提案した。装置の開発および現地探傷を通じて明らかとなったことをまとめるとつぎのようである。

1) 探傷の際のロープの励磁方法としては、同軸ソレノイド方式が大型化に適しており、またこの方式においては、ロープ内に誘起される磁束の分布が一様であって、探傷記録の基線レベル変化や損傷検出波形のひずみが生じない。

2) ホール素子を用いる環状検出器において、円周上の素子列を6つのセグメントに分割し、それぞれの出力を別々に取り出すようにすれば、それらの比較から損傷のロープ断面内での位置が概略標定できる。

3) 損傷の断面内位置が標定されれば、探傷記録上に現われたインパルス波形の高さと幅をもとにして損傷の長さや大きさ（断面積損失率）を推定することができる。

## 参考文献

- 1) 藤中雄三, 花崎紘一, 塚田和彦: P.W.S. ロープ用電磁探傷装置について, 日本鉱業会誌, Vol.102, No.1185, pp.783-788, (Nov.1986)
- 2) 藤中雄三, 花崎紘一, 塚田和彦: 大径静索用電磁探傷装置の開発, 日本鉱業会誌, Vol.103, No.1198, pp.853-857, (Dec.1987)
- 3) 白石成人: 鋼構造物の診断について(橋梁), 日本鋼構造協会誌, Vol.21, No.228, pp.18-21, (1985)
- 4) Kitzinger, F. and J.R.Naud: New Developments in Electromagnetic Testing of Wire Rope, CIM Bulletin, Vol.72, No.806, pp.99-104, (June 1979)
- 5) Marchent, B.G.: Mooring Cable Nondestructive Testing, Oceanology International 78, pp.11-15, (1978)
- 6) 小門純一, 藤中雄三, 森田和元: 鋼索の無速度探傷, 日本鉱業会誌, Vol.94, No.1081, pp.157-162, (Mar.1978)
- 7) Bergander, M.J.: Principle of Magnetic Defectoscopy of Steel Ropes, Wire Journal, No.5, pp.62-67, (May 1978)
- 8) Bergander, M.J.: Computerized Magnetic Testing of Steel Ropes, Paper Summary of ASNT National Conference 1979, pp.144-148, (1979)
- 9) Kalwa, E. and K.Piekarski: Detection of Defects in a Steel Rope with the Hall-Effect Magnetic Probe, C.S.N.D.T. Journal, pp.40-45, (July/Aug.1986)
- 10) Kalwa, E. and K.Piekarski: Determination of Flaws Located at Different Depth Levels in the Cross-section of Steel Rope, NDT International, Vol.21, No.2, pp.77-82, (Apr.1988)
- 11) Ross, A.C.: The use of the Magnetic Defectograph, M.D.6, CIM Bulletin, Vol.62, No.684, pp.425-431, (Apr.1969)
- 12) OITAF: OITAF-Catalogue for Magnetic Wire Rope Testing, (1981)

### 第3章 局部腐食損傷をもつPWSケーブルの残存強度推定<sup>1), 2)</sup>

#### 3.1 緒言

供用中のワイヤロープの健全度は、強度残存率（現在の引張破断強度／新品時の強度）で表わすのが最も良いことは言うまでもない。定期的な探傷を実施することで、ロープの残存強度とその変化の度合いを知ることができれば、ロープを適切に維持管理することができ、安全かつ過早でない取替時期を決定することができる。しかし、探傷によって求めたロープ内の断線数あるいは損傷の断面積損失率を直接強度低下率と結びつけて考えることは問題である。それは、損傷の形態やその分布状態、さらにはロープがどのような構造のものであるかも、残存強度に大きく関わってくるからである。

本章で扱うのは、局部腐食損傷をもつPWSケーブルである。第2章において、PWSなどの大径静索にも適用できる漏れ磁束探傷装置、および探傷によってPWSケーブルの局部腐食損傷を断面積損失率として評価する方法について述べた。著者は、このPWSの局部腐食損傷を、簡単な力学モデルによって表現し、探傷によって得られた断面積損失率の値をもとにして、その残存強度を推定する方法を考案した。本章では、この推定方法の概要と、局部腐食損傷を模して人工的に加工を施したPWS試料によって実施した、推定法の検証実験、さらに、この推定方法を実際の吊ケーブルに適用した結果について述べる。

#### 3.2 劣化したワイヤロープの強度推定の現状

劣化したワイヤロープの残存強度推定法としては、本邦では、西岡式ABCDE法がある<sup>3)</sup>。これは、膨大な使用済みロープの試験結果をもとにみだされたもので、いくつかの代表的なロープ構造について、その強度推定の指針が与えられている。この方法は、劣化したロープについての目視観察結果をもとにして、その損傷の形態（A：摩耗，B：断線，C：腐食，D：形崩れ，E：偏心その他）ごとに強度減少率を算定し、それらの合計として残存強度を求めるというものである。損傷をその形態ごとに評価するという点では、理にかなった推定法であると言えるが、目視観察によるものであるから、結果に個人差が生じやすく、信頼度の高い方法とは言い難い。

漏れ磁束探傷結果から残存強度を推定する方法も、鉱山の巻上げロープなどについては、いくつか提案されている。まず、素線断線が劣化の主形態である場合に適用できる方法として、小門らの方法<sup>4)</sup>が挙げられる。これは、探傷記録上に現われたインパルス波形からその高さに相当する断線数を算定し、断線による断面積損失率をロープの4ピッチ分にお

たって合算し、その値を強度低下率とするものである。摩耗損傷については、摩耗の進行に伴って探傷記録上のベースラインノイズが増加することを利用して、その幅を強度低下の指標とする田下らの方法<sup>5)・6)・7)</sup>があり、OITAFなどもこの方法を推奨している<sup>8)</sup>。M.J.Bergander は、断線、摩耗、腐食の全てを含むような劣化の場合にも、探傷記録上に現われた全てのインパルスのある区間にわたって合算した値が、残存強度を表わす良い指標となると報告している<sup>9)</sup>。しかし、いずれの方法も未だ一般に受け入れられてはおらず、実際には、各使用現場ごとに、蓄積された過去の使用実績と目視観察結果や探傷結果を照し合わせることによって、おおよその残存強度が推定されているのが現状である。漏れ磁束探傷結果からロープの残存強度を求めることが容易でないのは、いひとつには、ロープの構造が複雑で、例えばロープ長手方向の断線集中度と強度低下率との関係を力学的に定式化することが困難であるといった事情があるからである。素線1本の断線はロープ長手方向にどれだけの長さまで影響を及ぼすのであろうか。いいかえれば、断線位置からどれだけ離ればその素線は初期の荷重を負担できるようになるのであろうか（この長さのことは、一般に回復長さと呼ばれている）。これは、ロープ内の素線相互の摩擦力によってきまるものであるが、この長さを解析的にも求めることはきわめて困難である。M.J.Bergander は、実験的に求めた値として、6×19の普通よりロープで2.5ピッチ、ラングよりで6ピッチを示しており、この長さを考慮して探傷記録上のインパルス高さを処理する方法を提言している<sup>10)</sup>。しかし、現在のところ、よりロープについて漏れ磁束探傷結果もとに残存強度を推定する汎用性のある方法はない。

本研究の対象としているPWSケーブルは、その構造が一般のワイヤロープとくらべてきわめて単純であるので、損傷をもつPWSの荷重時の変形挙動およびその残存強度を、力学的モデルを用いて予想することの可能性は高いものと考えられる。

### 3. 3 残存強度の推定方法とその検証

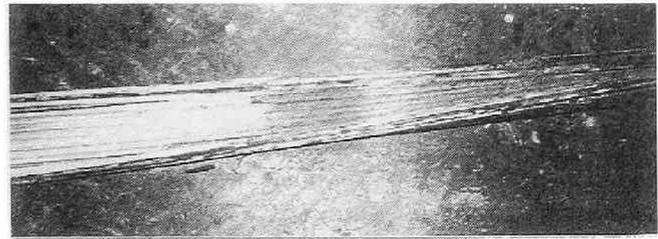
Fig.3.1 は、雨水の滞留によって局部腐食を生じたPWS75の例である。同図 (a)は集中腐食部分の写真、(b)はその構成素線のうちの数本について腐食部分を拡大した写真である。局部腐食は、雨水の滞留によってPWSの内部から進行しており、各素線は、ある区間にわたって、相当な凹凸を伴いながら、腐食による断面積減少を呈している。また、その腐食の程度は均一的でなく素線ごとに異なっている。このような局部腐食部分をもつPWSケーブルに対して、著者が提案する残存強度推定の方法は、まず、PWSの漏洩磁束探傷を実施してその記録上のインパルス波形の大きさから局部腐食損傷の断面積損失率を推定し、つぎに、その値をもとにしたPWSの変形挙動の計算機シミュレーションによって残存強度を求める、との2段階によって成り立つものである。この2つの段階それぞれ

れの考え方について検証を行った。

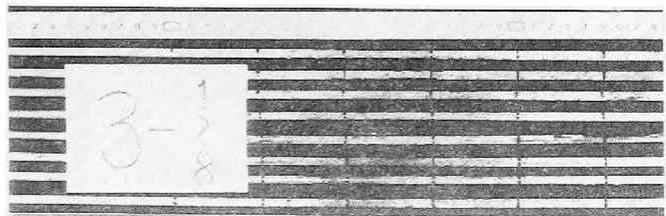
### 3.3.1 供試体

この供試体とは、残存強度推定方法の検証のために人工的に局部腐食損傷状態を模して作った試料のことである。Fig.3.2は、この模擬試料を構成している素線を示したものである。同図に示す寸法が実際の腐食形状を代表するものと見なし、長さ2mの素線の中央部を細く削って調製したものである（以後これを模擬腐食素線と呼ぶ）。実際のPWSの局部腐食では各素線の腐食程度が一定でないので、

模擬腐食素線としては、削って細くした部分の径（ $d$ ）が異なるものを数十本用意した。径（ $d$ ）の値としては2.0mmから4.0mmまでを0.5mmきざみで変化させて調製してある。これらの模擬腐食素線と正常素線とを種々に組み合わせたPWS37を十数体製作して、模擬試料すなわち供試体とした。PWS37に組みあがる際には、そのPWS37全体での断面積損失率が8~40%の種々の段階のものになるように、加工径の異なる模擬腐食素線を選定して組合せた。Fig.3.3は、それらの模擬試料のうち、のちに引張試験を行った4つの試料（No.2,4,5,6）の内容を示したもので、図中の素線を表わす円のなかに書いてある数字は、素線を加工して細くした部分の直径である。数字のない素線は全長にわたって直径が5.1mmの加工していない素線である。なお、Fig.3.1（a）に示した実際の腐食態様にあわせて、素線束の中央に模擬腐食素線を配置した。



(a) 局部腐食部分



(b) 構成素線の状況

Fig.3.1 局部腐食を呈したPWS吊ケーブル

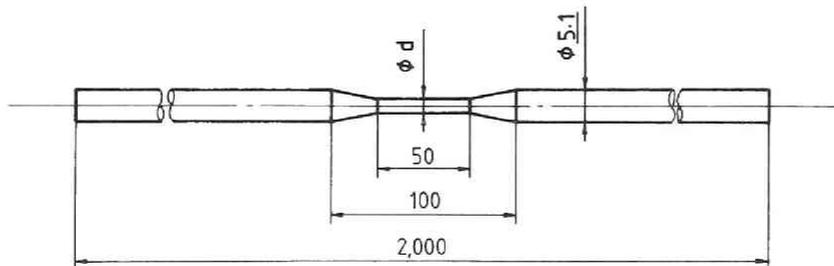


Fig.3.2 模擬腐食素線

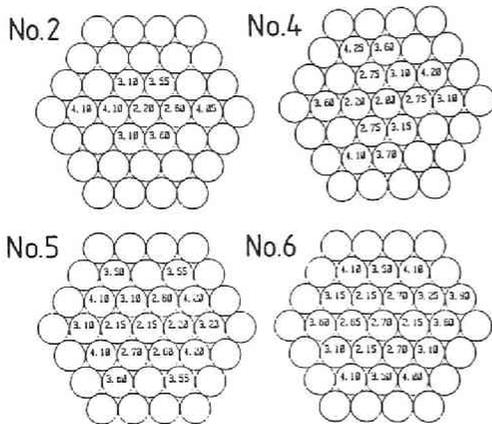


Fig. 3.3 引張試験に供したPWS37模擬試料

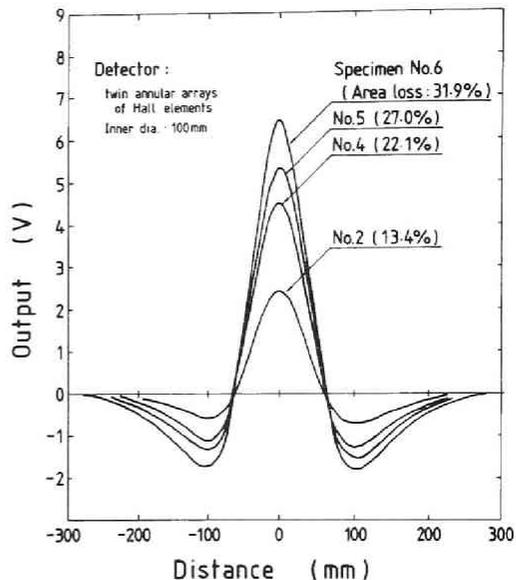


Fig. 3.4 模擬試料に対する漏れ磁束探傷結果

### 3. 3. 2 漏れ磁束探傷による断面積損失率の推定

#### 1) 模擬試料に対する漏れ磁束探傷

模擬試料の漏れ磁束探傷を行うのに用いた装置は、第2章で示した同軸ソレノイド方式のものである (Table 2.2 参照)。Fig. 3.4 は、探傷結果の例として、Fig. 3.3 に示した試料の探傷記録を示したものである。断面積を減少させてある部分について、図のように、高さが断面積損失率にほぼ比例し、幅にはほとんど変化がないインパルス波形が得られている。

#### 2) 損傷検出感度較正值の決定

2.5 において、探傷記録上のインパルス波形の高さから、断面積損失率が求められることを示した。そのためには、まず損傷検出感度とその断面内分布を求めることが必要である。筆者は、2.5 で詳述したように、模擬欠損 (素線を切断して、切断面間にある長さの空隙をつくったもの、以下この長さを破面間隔と呼ぶ) を用いた簡便な感度較正の方法を採用している。これは、まず未知の損傷を表わしている波形と同じ幅のインパルス波形を与えるような模擬欠損の破面間隔を決定し、つぎにその模擬欠損をローブ全断面内の種々の位置に移動させて得た検出感度の値を用いて較正する方法である。

Fig. 3.3 に示したPWS37の模擬試料についても、この方法で感度較正值を決定した。まず、Fig. 3.2 に示した模擬腐食素線で減面部の直径(d) を 2~4 mm の何種類かに調製したものを、健全なPWS37の中心または表層の素線と差し替え、漏れ磁束探傷を行ってインパルス波形の高さ(H)と幅(W)を求めた。その結果は、Fig. 3.5 中の丸印で示すとおり

である。つぎに、破面間隔を30mm, 50mm, 70mm, 90mmとした模擬欠損の1本をPWS37の中心または表面素線と差し替えた場合についても同様の測定を行った。その結果は、Fig.3.5中の破線上に示すとおりである。この破線の位置はいうまでもなく $d=0$ 、断面積損失が $(1/37) = 2.7\%$ に相当する。この図から、インパルス高さはほぼ断面積損失率に比例し、インパルスの幅はほぼ一定であることと、この模擬試料に対して損傷検出感度の較正を行うには、模擬欠損のギャップを70mmとすればよいことがわかる。

検出器が環状で無方向性であるため、探傷感度の分布はロープ断面内において同心円状である。Fig.3.6はその状態を表わすもので、中心素線の損傷の検出感度を1とする比率で表示されている。検出器の内径(100mm)がロープの外径(35mm)に比べてかなり大きいので、表面と中心との感度差は約5%以内におさまっている。この検出器では、中心における一本断線によって435mVのインパルス出力が得られている。PWS37の総断面積に対する素線1本の損失率は2.7%であるから、1%程度以上の断面積損失ならば、この検出器によって十分検出できると考えられる。

### 3) 断面積損失率の推定値と実測値の比較

2)に述べた方法によって、種々の状態に調製した模擬試料の断面積損失率の推定を行った。Fig.3.7はその推定値を実測値と比較して示すもので、図中の白丸に付した番号は、Fig.3.3に示した試料であることを表わしている。Fig.3.7において、推定値が実際の損失率よりも若干大きく求まっているが、両者はだいたい一致しており、模擬欠損によって求めた感度較正值にもとづいて行う断面積損失率の推定方法は妥当なものであるといえる。

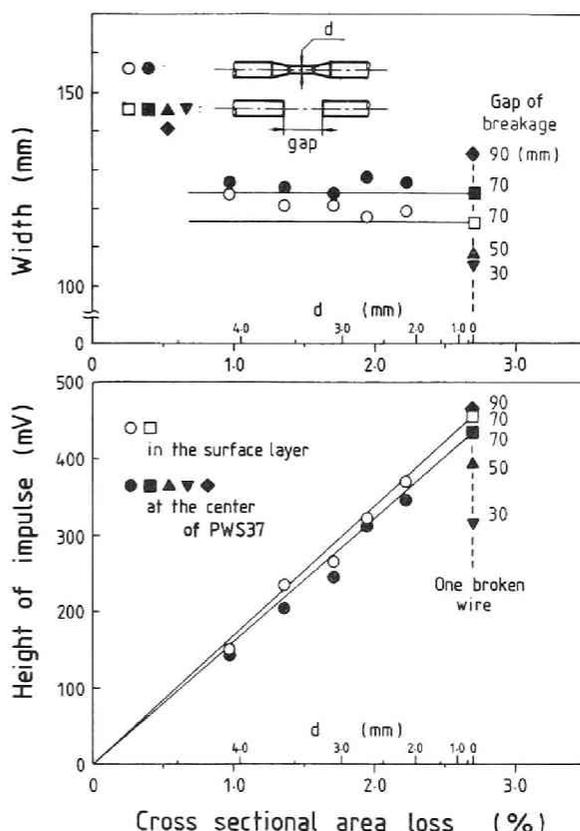


Fig.3.5 損傷検出感度較正值の決定  
(種々の模擬腐食素線と素線欠落によるインパルス波形の高さと幅)

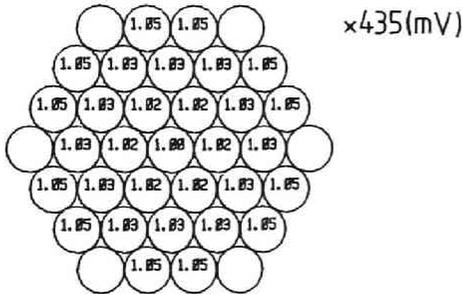


Fig.3.6 損傷検出感度の断面内分布 (ソレノイド方式, PWS37)

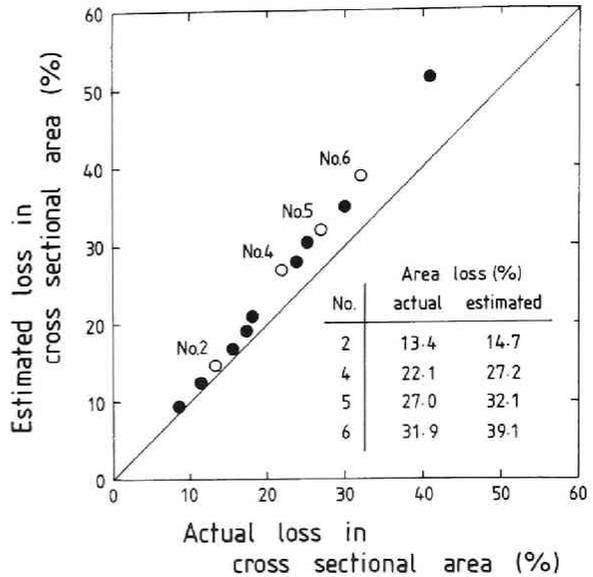


Fig.3.7 模擬試料における断面積損失率の実測値と探傷結果からの推定値の比較

### 3. 3. 3 残存強度推定

#### 1) 方法

構造が単純であるPWSにおいても、断面積損失率と強度低下率とは等しくならない。これは、PWSが素線の集合体であって、腐食によって各素線の断面減少がそれぞれ異なった状態を呈しているために、引張荷重下での各素線の応力状態が均等でないからである。そこで、引張試験を実施して強度を測定するかわりに、計算機シミュレーションを用いて、局部腐食損傷をもつPWSの残存強度を推定する方法を採用した。

まず、局部腐食をもつPWSの構成素線として、Fig.3.8 に示すような力学モデルを設定する。つまり、i) 各素線（長さ $L$ ，断面積 $A$ ）はその腐食部（長さ $\eta L$ ）において一様な断面積減少を呈しており、その断面積残存率（ $\xi_1$ ）は素線ごとに異なっているとす。ii) 引張力が作用したとき、腐食部（I）と健全部（II）はそれぞれにおいて均一な一軸引張の応力状態にあり、各部分の応力（ $\sigma_1$ ， $\sigma_{11}$ ）はそれぞれその断面積に反比例する大きさのものであるとする。さらに、iii) 各素線は引張荷重を受けて降伏点まで弾性的に挙動し、腐食部の応力（ $\sigma_1$ ）が降伏応力（ $S$ ）になったときに耐荷力を失って破断する

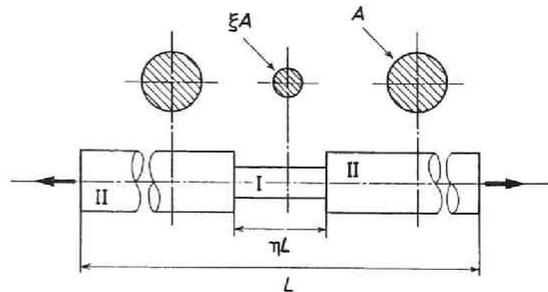


Fig.3.8 局部腐食素線のモデル

ものと見なす。なお弾性率（E）および降伏応力（S）の値は健全な場合のそれらと同じであるとする。さて、このようなモデル化のもとに、局部腐食をもつ素線が複数本集合してPWSを構成していると考え、そのPWSが引張荷重によってある伸び（ $\Delta L$ ）を示しているとき、各素線が分担している荷重（ $P_i$ ）は、下記の式で表わせる。

まず、腐食部をもつ素線が張力を応分に負担しているとき、すなわち

$$(\sigma_i)_i = \frac{1}{\xi_i} (\sigma_{ii})_i < S \quad \text{のときは、}$$

$$P_i = (\sigma_{ii})_i \cdot A = \frac{\xi_i \cdot E}{\xi_i(1-\eta) + \eta} \cdot A \cdot \frac{\Delta L}{L}$$

$(\sigma_i)_i \geq S$  のときは、その素線は破断しているため

$$P_i = 0$$

これらの式をもとにして、局部腐食をもつPWSが引張試験に供されたときの荷重変形挙動のシミュレーションを行い、残存強度を推定することができる。計算上は、伸びを徐々に増加させながら、各素線の分担荷重（ $P_i$ ）を算出し、その合計としてPWSの耐荷力を求める方法をとっている。

## 2) 模擬試料の引張試験とシミュレーション

Fig.3.3 に示した模擬試料について、それぞれ両端に亜鉛鍍込みによるソケットづけをした後、引張試験を実施し、荷重・伸び曲線とその強度値を測定した。一方、同じ試料について、1) で述べた方法による引張試験のシミュレーションも行った。その計算に用いる諸量は、 $L=1,400\text{mm}$ 、 $\eta L=70\text{mm}$ 、 $S=166\text{kgf/mm}^2$ 、 $E=9,900\text{kgf/mm}^2$  と定めた。また、素線の断面積残存率（ $\xi_i$ ）は個々の素線における実測値を用いた。これらの値を定めるに当たって考慮した主な点はつぎに述べるとおりである。いま、腐食区間長（ $\eta L$ ）は、Fig.3.2 に示した素線の形状からもわかるとおり、50~100 mm の値に選ぶことが考えられるが、どれだけにすべきかは確たる根拠がない。そこで、漏れ磁束探傷の感度較正の際に採用した模擬欠損の破面間隔と同じ値である70mmを用いることにした。Sとしては素線材料の引張強度値を用いた。Eについては、引張試験時の伸び量がクロスヘッド間の変位によって測定されることを考慮して、素線自体の弾性係数でなく、健全なPWS試料についての引張試験において得られる、ソケット内での素線のすべりも含まれている見かけの弾性係数を採用した。なお、シミュレーションにおいては、素線の破断強度を規定している限り、Eの値は荷重・伸び曲線の形状にだけ影響し、残存強度にはなんら影響しない量である。

## 3) 引張試験結果とシミュレーション結果の比較

Fig.3.9 は、模擬試料 No.6 の引張試験結果とシミュレーション結果を併示したもので



定方法は妥当なものであるといえる。

### 3. 4 実ケーブルへの適用例

#### 3. 4. 1 対象としたPWS吊ケーブル

3.2 に述べた局部腐食のあるPWSの残存強度推定の方法を、実際に吊屋根のケーブルとして使用されているPWS75に適用した。このPWS75は、Fig.3.1 にすでに例示したものと同様に、全長のうちのある一部分に雨水の滞留による集中腐食が発生しているものであった。現地における漏れ磁束探傷については、第2章で述べたとおりである。このPWSのうち25体のPWS75の漏れ磁束探傷結果によれば、局部腐食の程度つまり断面積損失率の推定値は、最も大きいもので20~30%、つぎの段階のものでは10~17%であった（Fig.2.15参照）。劣化が激しいと判断されたこの2本のPWSは新しいものと取り替え、取り外し品は、引張試験による残存強度の測定と、その後の分解検査に供した。

#### 3. 4. 2 強度試験結果と考察

##### 1) 引張試験

取り外した2体のPWS75から、局部腐食部分を含む4mを切断してソケットづけした試料1本ずつと、漏れ磁束探傷によって損傷がないと判断された区間から切り取った1本を比較のために加えて、計3本の供試体を作製した。Fig.3.11は、3つの試料についての荷重・伸び曲線の実測値を示したものである。図中③、②の曲線は、それぞれ20~30%、10~17%の局部損傷をもつと推定された試料、①は健全な試料についてのものである。

③の試料の場合、まず荷重64tonfのときかなりの破断音を伴って最初の素線断線が発生し、荷重の増大とともにつぎつぎと素線破断が発生していった。約20本程度の素線断線が発生した時点で最高耐荷重を示した後、耐荷力を減少させながら素線断線が進み、全体破断に至った。この曲線には、断線発生のたびに起こる瞬時的な荷重低下によって、不連続な部分が現れている。このように、素線破断が断続的に発生しながらその過程において最高耐荷重を示す状況は、②の場合においても同様であった。これは、腐食によって直径が局部的に減少している素線がほとんど塑性変形を伴わずに破断するからであると推察される。このことは引張試験後の分解検査における破断面の観察によって検証された。一方、①の健全な試料の場合には、一般の鋼材と同様に延性的な挙動を示しており、ある程度の塑性変形の後、破断している。それぞれの強度は、図に内挿した表に示すとおりであるが、③、②とも、その強度低下率は断面積損失率よりもかなり大きい値となっている。これは、引張試験時の挙動において明らかなどおり、局部腐食をもつ素線のうちの何本かは引張の過程において最終的な耐荷力になんら寄与しないからである。

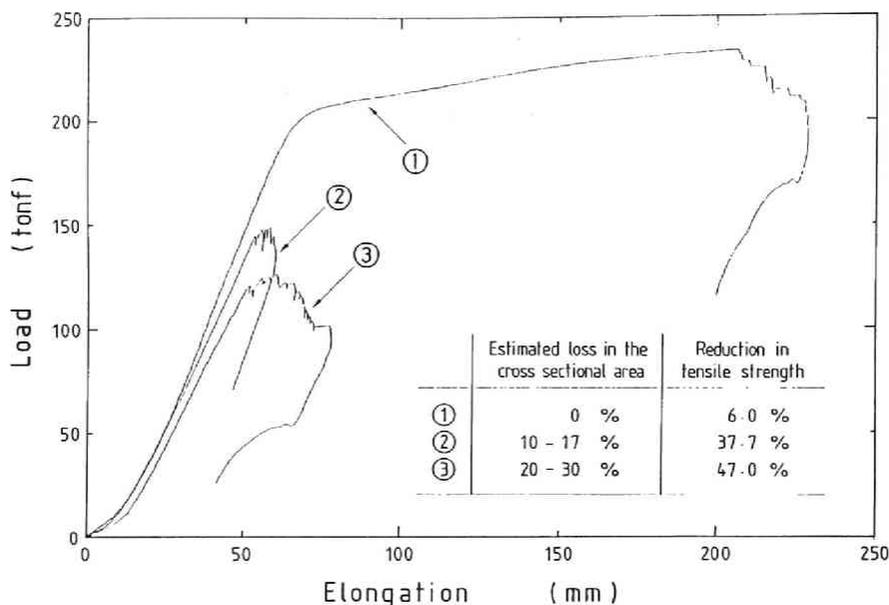


Fig. 3.11 局部腐食をもつPWS75の引張試験における荷重・伸び挙動

## 2) 引張試験のシミュレーション

このPWS75について、3.3・3に述べた方法による引張試験のシミュレーションを実施した。その計算にあたって、各素線の断面積残存率 ( $\xi_i$ ) の値は、つぎに述べるようにして定めた。まず、③の試料について、引張試験後に分解検査を行い、各素線の最も細くなっている部分の断面積損失率をその直径から求めた。Fig. 3.12の黒点群は、それらの値を75本のすべてについて個別に示したものである。これらの値は、引張試験後に測定したものであるから、実際の $\xi_i$ の値を正確に表わすものではないが、③の試料の全素線の試験前の断面積残存率の分布をかなりよく表わすものと見なしてよいであろう。またこの分布傾向は、この現場における他のPWSについても十分に

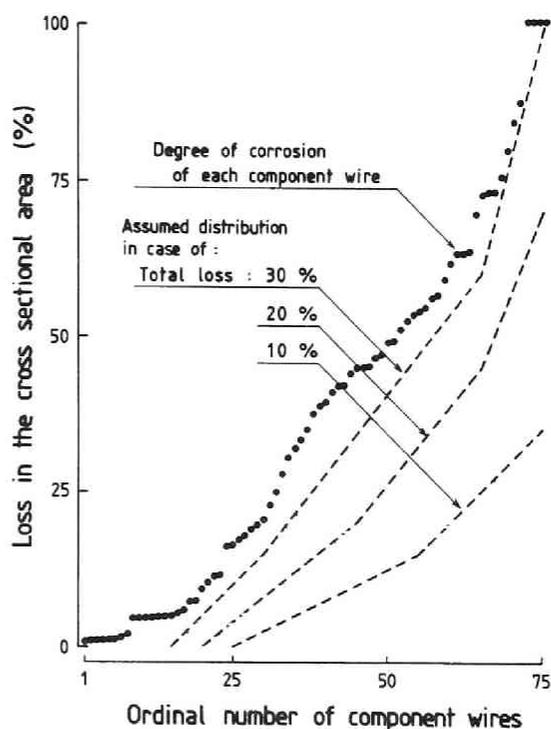


Fig. 3.12 引張試験後の素線径から求めた各素線の断面積損失率とシミュレーションに用いた $\xi_i$ の分布

適用できる共通性をもつものと見なせるであろう。そこで、計算にあたって、PWS全体の断面積損失率がそれぞれ10, 20, 30%である場合を代表例として考え、それらの場合に各素線個々の断面積残存率(%)の分布形態は、図中の黒点の分布に準じたものとして、それぞれ図中の破線で示す形であると想定した。シミュレーションに必要なその他の値は、実測値をもとにして、それぞれ $S = 166\text{kgf/mm}^2$ ,  $L = 4,000\text{m}$ ,  $\eta L = 150\text{mm}$ ,  $E = 19,900\text{kgf/mm}^2$ とした。

Fig.3.13 は、シミュレーションの結果を示すものである。Fig.3.11と比較すれば、その変形挙動をかなりよく模擬していることがわかる。とくにFig.3.13の20%および10%の曲

線は、それぞれFig.3.11の③、②で示した実際の荷重・伸び曲線と、その形状においても値についてもよく対応している。Table 3.1は、取り外された2本のPWS75について、漏れ磁束探傷によって求めた推定断面積損失率をもとに残存強度を算出した値とその実測値を比較したものである。両者はだいたいにおいて近い値を示しており、このことによって、一連の残存強度の推定方法が適切なものであることが再確認されたと同時に、シミュレーションによって求められた断面積損失率と残存強度の関係は、この現場で用いられているすべてのPWS75についてもあてはまるものであると考えられる。

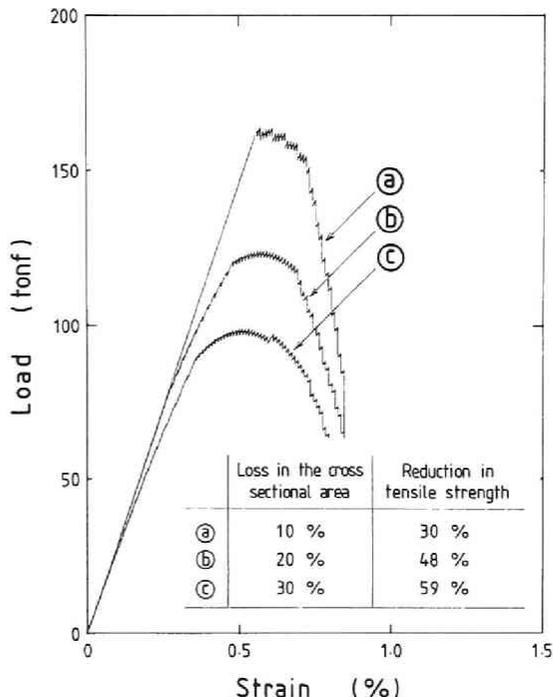


Fig.3.13 局部腐食をもつPWS75の荷重・ひずみ挙動のシミュレーション結果

Table 3.1 局部腐食をもつPWS75の残存強度の推定値と実測値の比較

推定断面積損失率	強度低下率	
	推定値	実測値
10~17 %	30~43 %	37 %
20~30 %	48~59 %	47 %

### 3.5 結 言

吊構造物に使われているPWSケーブルのうち、管理上の重要な問題点である局部腐食がある場合について、そのPWSの残存強度を推定する方法を提案した。まず、局部腐食部をもつPWSを模して作製したPWS37試料について行った実験によって、この推定方法の2つの要点、すなわち、漏れ磁束探傷記録上のインパルス波形からその局部損傷の断面積損失率を推定することと、局部損傷をもつ素線を簡単な力学的モデルで近似し、PWSをそれらの集合体であるとして、その引張試験時の挙動を計算によって模擬し残存強度を求めること、のそれぞれについて、ともに妥当なものであることを検証した。つぎに、この方法を、実際に局部腐食を呈した吊屋根PWSケーブルの残存強度推定に適用し、その有用性を確認した。

## 参考文献

- 1) 塚田和彦, 花崎紘一, 藤中雄三: 局部腐食損傷をもつPWSロープの残存強度推定について, 日本鋳業会誌, Vol.104, No.1210, pp.883-889, (Dec.1988)
- 2) Fujinaka, Y., K.Hanasaki, K.Tsukada, N.Yoshioka and K.Sugii: Magnatic Inspection of P.W.S. Ropes, 11th World Conference on NDT, Proc. Vol.1, pp.154-161, (Nov.1985)
- 3) 会田俊夫他編: ワイヤロープ便覧, 白亜書房, p.736, (1967)
- 4) 小門純一, 藤中雄三, 田下和男, 上田和彦: 電磁探傷法による鋼索の損傷検知に関する研究, 日本鋳業会誌, Vol.83, No.952, pp.997-1003, (Aug.1987)
- 5) 田下和男, 小門純一, 藤中雄三: 斜坑巻索の安全性について, 日本鋳業会誌, Vol.89, No.1030, pp.787-762, (Dec.1973)
- 6) 田下和男, 小門純一, 藤中雄三, 錦織栄: 立坑巻索の劣化の進行とその判定, 日本鋳業会誌, Vol.91, No.1047, pp.335-339, (May 1975)
- 7) 田下和男, 小門純一, 藤中雄三, 野原博, 近藤善資: 斜坑巻索の劣化の進行とその電磁探傷記録について, 日本鋳業会誌, Vol.95, No.1093, pp.143-148, (Mar.1979)
- 8) OITAF: Magnetic Inspection of Ropes, a Report from OITAF (Part Two), International Ropeway Review, pp.120-125, (Oct./Dec.1967)
- 9) Bergander, M.J.: Magnetic Flux Leakage Inspection of Wire Rope, International Advances in Nondestructive Testing, Vol.9, pp.113-123, (1983)
- 10) Bergander, M.J.: Principles of Magnetic Defectoscopy of Steel Ropes, Wire Journal, pp.62-67, (May 1978)

#### 4.1 緒言

漏れ磁束探傷法は、1.2 で述べたように、LF損傷（断線や集中腐食など）の検知に優れたものである。しかし、この方法は、局所的な断面積の変化にもとづいて現われる漏れ磁束を検出するものであるから、LMA損傷（摩耗や一様な腐食など）の評価には、原理的に適していない。

ワイヤローブにおいては、一様な摩耗や腐食といっても、その構成素線には、細かな凹凸を伴うものである。したがって、漏れ磁束法によっても、それらの凹凸（言い換えれば細かな断面積変化）を探傷記録上に現われた連続的なインパルスあるいはベースラインノイズの増大としてとらえることができる。田下らは、これを探傷記録上の基線振幅と称して、摩耗や腐食によるワイヤローブの劣化を評価する指標としており、その大きさによってローブの強度低下を推定できると報告している<sup>4)</sup>。しかしこの方法は、同一使用現場での劣化進行程度の判断には有効と思われるが、あくまでも摩耗や腐食にともなう副次的な現象を指標とするものであって、たとえば、ローブ断面積減少量などと結びつけて劣化を定量的に評価することはできない。

また、漏れ磁束法が断線検出に優れているとはいえ、断線がローブ長手方向にある程度以上密に多数存在する場合には、2.5 で述べたような損傷評価の方法を適用して探傷記録からその断線の数と分布を求めることはかなり困難となる。最近、漏れ磁束法において、ローブ半径方向磁束密度の変化を検出するという従来の方法にかわって、ローブ軸方向の成分を検出信号とすれば、摩耗や密に分布した断線についても定量的な評価が可能となるとの報告が E.Kalwa らによってなされている<sup>5), 6)</sup> が、その実用性については現段階では何とも言えない。（このことについては、付録 I で検討する。）

漏れ磁束探傷法のこれらの欠点を補う方法として、1970年代後半から1980年代初頭にかけて H.R.Weischedel<sup>7)</sup> らによって開発されたのが、全磁束測定型の探傷法である。この方法は、ローブ外周空間に現われる漏れ磁束を検知するのではなく、一定の直流磁界のもとで損傷を含んだローブ内にどれだけの磁束が誘起されているかを測定し損傷評価の指標とするものである。したがって、断線のように断面積が急変する部分の検知よりは、ローブ長手方向にある程度広がりをもって断面積が変化している形の損傷を評価するのに適していると考えられる。また、この方法は原理的にローブの横断面積に比例した探傷出力が得られるので、探傷記録の解釈も比較的容易であることが期待される。

本章では、PWSケーブルを試料として全磁束法による探傷実験を行い、この方法にお

ける損傷と探傷出力の関係について検討する。また、この方法の応用例として、腐食した鋼線の長手方向に沿った鋼実質断面積の変化を簡便に測定する方法についてもあわせて述べる。

#### 4.2 全磁束法について

##### 4.2.1 Return Flux 法と Main Flux 法

全磁束法は、損傷を含んだロープの各部分での磁束残存量を測定するものであり、言い換えれば、直流磁界での磁気抵抗の変化を測定するものであるといえる。摩耗や腐食による断面積減少も、また断線による空隙の生成も、ともに磁気抵抗を増加させる要因であるから、それらすべてを含んだ意味で劣化を定量的に評価できると考えられる。

全磁束法には、2つの種類がある。Weischedel の呼び方<sup>7)</sup>に従えば、1つは Return Flux 法で、もう1つが Main Flux 法である。Fig.4.1 にそれらの探傷原理を概念図として示した。Return Flux 法は、F.Kitzingerら<sup>8)</sup> および B.G.Marchent<sup>9), 10)</sup> によって開発されたもので、磁石とロープとによって形成される磁気回路におけるロープ部分の磁気抵抗の変化を、磁極とロープとの空隙での磁束変化として観測しようとするものである。Weischedel は、この方法では、磁気回路を形成しているロープ部分全体としての平均的な変化しか捉えることができないとして、ロープと同軸にサーチコイルを配置し、その出力を積分することによって、ロープ内の各部の磁束の変化を求めることを提案した。これが、後者の Main Flux 法である。いずれの方法も、従来の漏れ磁束検出と併用でき、LF、LMAそれぞれの損傷の評価に適した2つの探傷出力をもつ探傷器を製作することができる。

なお、以下の検討はすべて、Main Flux 法を対象として行った。

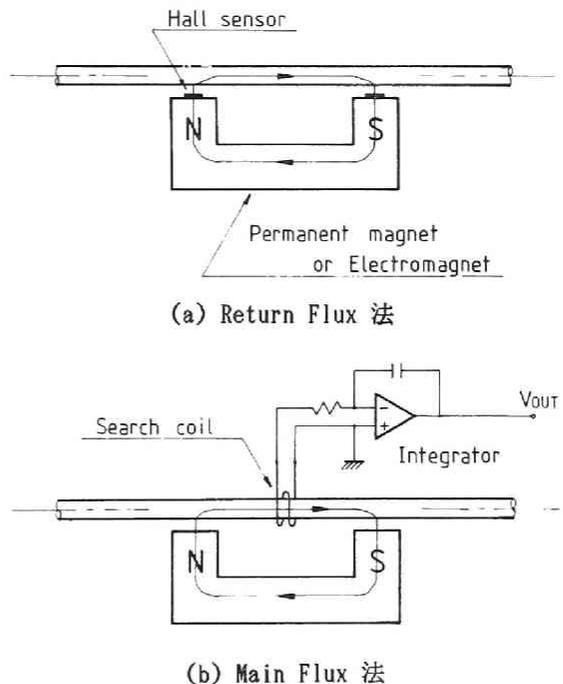


Fig.4.1 全磁束測定型ワイヤロープ探傷法

#### 4. 2. 2 全磁束法適用における留意点

全磁束法の場合、ワイヤロープを励磁する方法は漏れ磁束法と全く同じであるが、磁気ヒステリシスや残留磁化が探傷結果に悪影響を及ぼさないようにするため、またロープの横断面積とロープ内の磁束との比例性をよくするために、ロープを完全に飽和状態にまで磁化することが必要である。全磁束法の探傷出力は、ロープを取巻くように置いたサーチコイルからの出力を積分することによって得られる。ロープが静止している時、出力はゼロであるが、ロープを移動させているとき、たとえば、摩耗などによって断面積の小さくなっている部分がサーチコイルを通過するとロープ中の磁束の時間変化が誘導起電力としてコイルに発生する。よって探傷出力として誘導起電力の時間積分値を用いるとその部分の磁束減少量つまり断面積の減少量を知ることができる。なお、励磁器として電磁石を用いる場合は、ロープを静止させた状態で、磁化電流を零から徐々に規定値まで上昇させた時に得られる積分出力電圧を測定することによって、断面積と検出電圧の較正を行うことができる。

全磁束法においては、積分器の性能が探傷能力を大きく支配する。積分器の応答周波数帯域の上限が探傷可能な最大ロープ速度を規制することは言うまでもない。逆に、下限はできる限りDCに近づくことが望ましいが、この点に関しては積分器のドリフトが問題となってくる。漏れ磁束法の検出器は、コイルやホール素子列を2つ用いる、いわゆる自己比較型のものであり、磁氣的にも電氣的にも外乱に対して比較的強い測定系であるといえる。しかし、全磁束法は、検出器を自己比較式に構成することが原理的に不可能であり、外乱に弱い測定系であると言わざるを得ない。これらの面で、全磁束法は、装置の設計においても実際の探傷においても、かなり慎重な配慮を必要とする探傷法であるといえるが、損傷がロープ長手方向にある程度以上の広がりをもったものであれば、それがロープ横断面内のどの位置にあっても、常にその減少断面積に比例した出力が得られるから、探傷記録の解釈の面で卓越した長所をもつ方法であるといえる。

#### 4. 3 損傷と探傷信号出力の関係について

損傷の大きさならびにその長さ全磁束法によって得られる探傷記録波形との関係について、人工的に欠陥をもうけたPWSを用いて検討した。

##### 4. 3. 1 実験

Fig.4.2 は、実験装置の概要を示したものである。試料は、直径 5.1mmの亜鉛めっき鋼線を37本束ねた、長さ2mのPWS37である。直流磁界は、2連のソレノイド（それぞれ40回巻、巻幅160mm、内径140mm；直流50～300A）によって発生させた（2.4.3 で述べたP

WS 217用の励磁装置)。ソレノイド間隔 (245 mm) の中央に直径 48mm のサーチコイル (10回巻, 幅 5mm) をロープと同軸に配置し、その出力をフラックスメータによって積分したものを探傷信号とした。この実験における人工欠陥は、ロープ全長の中央に設けてあり、ソレノイドとサーチコイルを一体としてロープに沿わせて左右に走査させながら探傷記録を得るようにした。

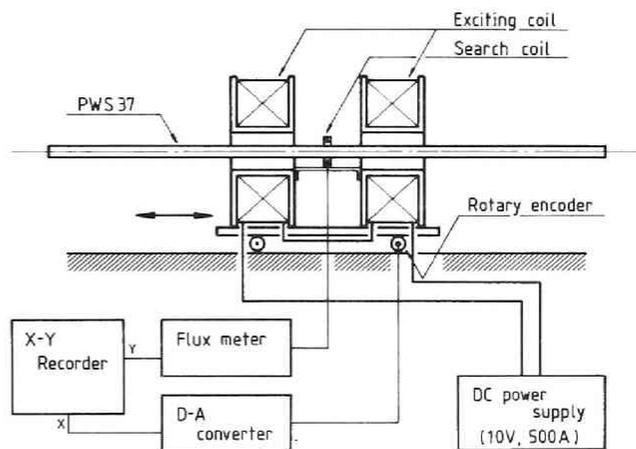


Fig.4.2 探傷実験装置

Fig.4.3 は、Fig.4.2 の装置によって測定したロープ試料の磁化特性を示したものである。横軸は、ソレノイドに通じた電流の値、縦軸は、サーチコイルで測定した磁束である。励磁電流 100A で PWS37 をほぼ飽和状態に磁化することができ、磁気ヒステリシスの影響のない探傷を行えることがわかるが、本実験では、試料端末での反磁界の影響が探傷信号に現われることを防ぐため、励磁電流を 250A と大きく設定した。

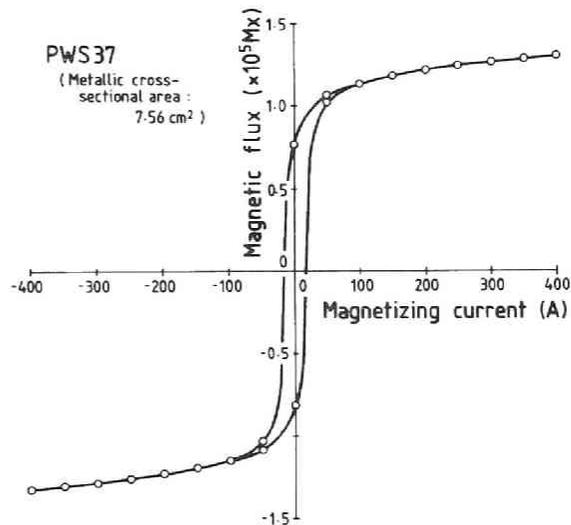


Fig.4.3 PWS37の磁化特性

#### 4.3.2 結果・考察

Fig.4.4 は、PWS37の横断面中央に素線 1 本分 ( $N=1$ ) の空隙 (長さ  $L=20\sim 600\text{mm}$ ) を設けたときの探傷記録を示したものである。長さ  $L$  が 400mm をこえると記録図形の中央が平坦になるとともに、 $L$  がそれより大きくなってもその高さは一定であることがわかる。その値 ( $3.2\text{kMx}$ ) は、磁化電流 250A のときの総磁束 ( $124\text{kMx}$ ) の 37分の 1 ( $3.35\text{kMx}$ ) をすこし下回る程度となっており、磁束が素線本数にほぼ比例していることがわかる。記録図形の高さ ( $H$ : 磁束減少量の最大値) と幅 ( $W$ ) を、Fig.4.5 のように定義し、空隙の大きさ ( $N$ : 欠落させた素線本数) と欠落部分の長さ ( $L$ ) を、種々に変化させたとき

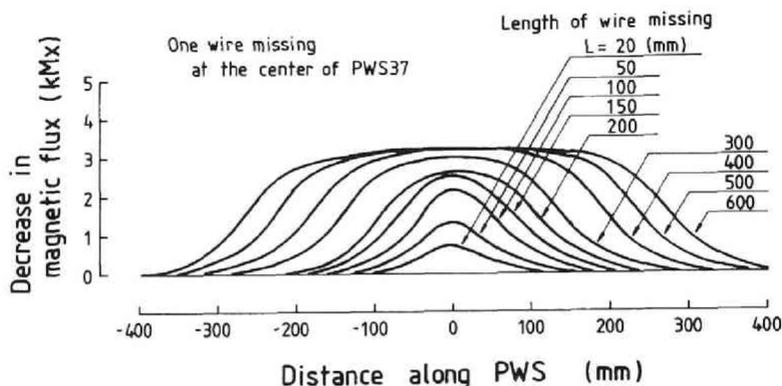


Fig.4.4 素線欠落と全磁束探傷記録

の探傷結果を整理すると、Fig.4.6 のようである。Fig.4.6 (a) は、欠落部分の長さ $L$ と出力図形の高さ $H$ との関係を示したもので、前述のように $L$ が400mm以上のときは、 $H$ が一定値に達している。同図 (b) は、空隙の大きさ（欠落素線数） $N$ と記録図形の高さ $H$ との関係を示したもので、 $H$ は $L$ に関係なく $N$ にほぼ比例している。同図 (c) は、空隙の長さ $L$ と記録図形の幅 $W$ との関係を示したもので、 $L$ が300

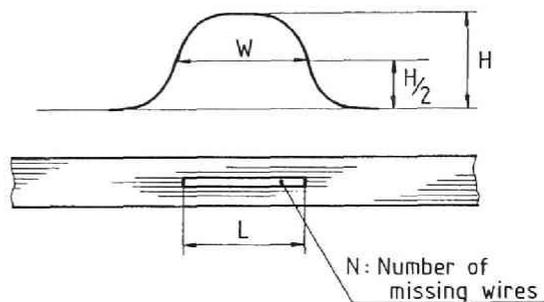


Fig.4.5 全磁束探傷記録波形

mm以上では、 $W$ と $L$ は直線的な関係にある。Fig.4.7 は、比較のために、漏れ磁束型の検出器（2.4.2 で述べたPWS 217用の検出器）を用いて同じ試料の探傷を行った結果を示したものである。漏れ磁束探傷の場合、空隙の長さ $L$ によってインパルス波形の高さ $H$ はかなり変化し、しかも、 $L$ がある程度以上の大きさになるとインパルス波形が、図中右上に示したように両側にピークを持つ波形に変ってくる。これらのことが漏れ磁束法による探傷結果の解釈を難しくしている理由であったが、全磁束法の場合にはこのような難点がない。Fig.4.8 は、空隙を試料横断面内の種々の位置に設けたときの、探傷記録図形の高さの違いを示すもので、その偏差はおおくても1割程度であり、断面内における損傷の位置による探傷感度の差は、損傷の大きさを探傷記録図形から評価する際に、それほど考慮しなくてもよいことがわかる。漏れ磁束探傷の場合、その感度差が5割以上であった（2.5.1 参照）ことを考えると、この点でも全磁束探傷法が優れた方法であるといえる。上に述べたことを要約すると、全磁束探傷の場合、対象とする損傷の長さが400 mm以上の場

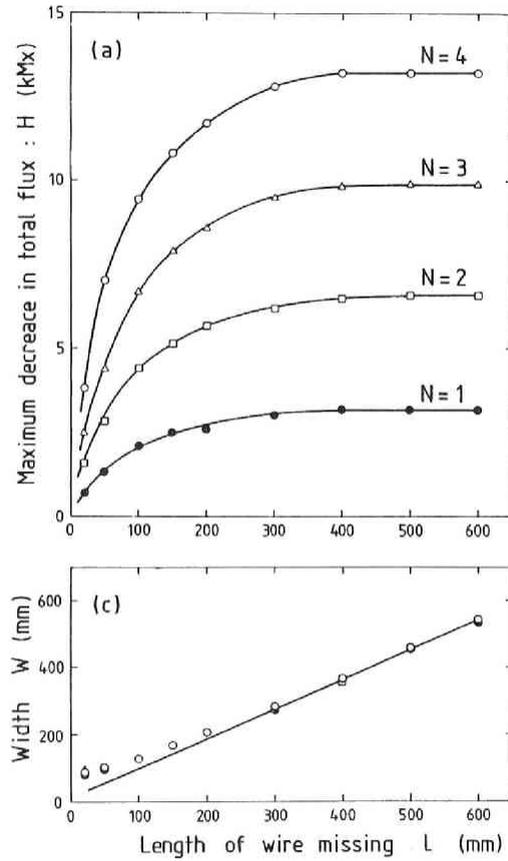


Fig.4.6 欠落素線の数 (N) 及び長さ (L) と  
全磁束探傷波形の高さ (H) と幅 (W) の関係

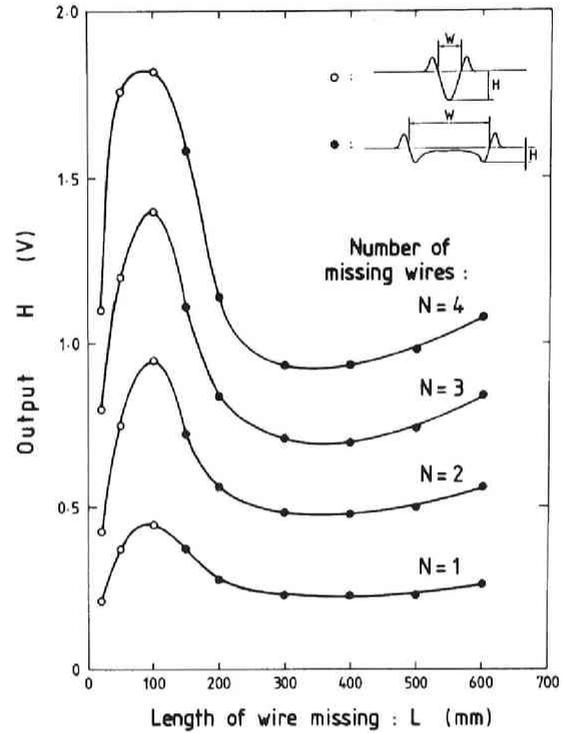
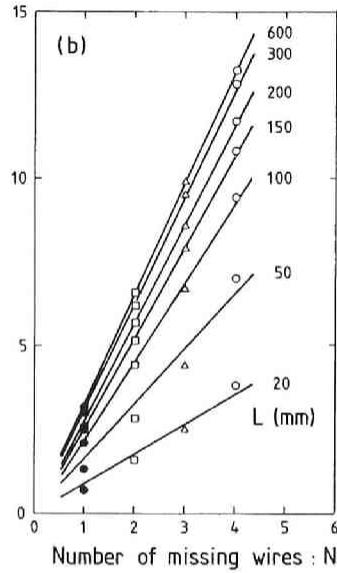


Fig.4.7 欠落素線の数 (N) 及び長さ (L) と  
漏れ磁束探傷波形の高さ (H) の関係

合には、その損傷の大きさ（断面積損失率）を直接的に求めることができ、また長さが400mm以下でも、Fig.4.6のような較正曲線群を参照すれば、損傷の定量的評価が可能であるといえる。なお、400mmという値は装置の大きさによって変わるもので、励磁器をもっと小型にすれば、PWS 37を対象とする場合200mm程度まで小さくすることができる。

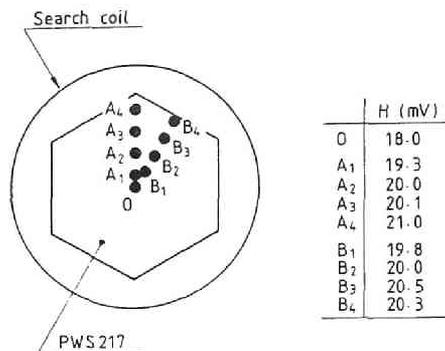


Fig.4.8 全磁束法における損傷検出感度の断面内分布

#### 4.4 腐食した吊ケーブル用鋼線の磁氣的断面積測定

前節において、全磁束法の基本的な探傷特性を明らかにした。この方法は、長尺材料の断面積測定にそのまま応用することができ、また腐食によって断面積が変化している場合も、その腐食生成物の付着の有無にかかわらず、実質的に鋼として残存している量を評価することができる。そこで、従来、ノギスや断面写真などによってしか測定することができなかった、腐食した鋼線の断面積とその長手方向の変化を測定することに、この全磁束法を利用し、腐食による微妙な断面積の変化をどの程度忠実に測定できるか、また、測定した断面積の値が、鋼線の残存引張強度とどの程度一致するかについて検討した。

##### 4.4.1 実験

###### 1) 供試体

実験に用いたのは、橋梁用PWSケーブルに使用される、直径 5.12 mm の亜鉛めっき鋼線である。化学成分及び機械的性質は、Table 4.1 に示したとおりである。供試体としては、2種類のもの（いずれも長さ 330 mm）を用意した。1つは、本断面積測定法の検定のためのもので、鋼線の一部に人為的に断面積変化をもたせたものである。以後これを加工鋼線とよぶ。もう1つは、実際に腐食した吊ケーブルの構成素線の状況を模擬したもので、鋼線の一部を一定期間塩水噴霧によって腐食させたものである。以後これを腐食鋼線とよぶ。

加工鋼線は、直径 5.12 mm、長さ 330 mm の鋼線の中央部を、ある区間にわたって細く旋盤加工したものである。細くした部分の直径 (d) としては、3.5, 4.0, 4.5 mm (断面積損失率にしてそれぞれ 51, 38, 19 %) の3段階、加工部分の長さ (l) は、それぞれ 3, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 80 mm のものを用意した。

腐食鋼線は、腐食によるPWS鋼線の強度低下（引張および引張疲労強度）を調査する

ために用意されたものである<sup>11)</sup>。Fig.3.1 に実際の吊ケーブルの腐食状況を示したように、ケーブル内の鋼線の腐食は、線状錆や孔食のような形態ではなく、ある区間多少の凹凸はあるもののほぼ一様に錆びたような形態をとっている。したがって、このような腐食状態に近いものを製作することとし、供試体としては、330 mm の鋼線の中央 150 mm の区間を、塩水噴霧によって一定期間腐食させたものを用いた。なお、塩水噴霧の期間は 50, 100, 150 日の 3 段階とした。Fig.4.9 に表面の錆びを落とした状態での試料の写真を示す。なお、塩水噴霧の条件は、噴霧量 0.5 cm<sup>3</sup>/min、塩水温度 35 °C、噴霧溶液の PH は 6.5~7.2 とした。また、短期間に腐食を発生させるため、鋼線試料は全て塩水噴霧に先立って、亜鉛めっき層を剥がし、直径を 5.0 mm にした。

Table 4.1 PWS 鋼線の化学成分と機械的性質

(a) 化学組成

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.75	0.12	0.60			
-0.80	-0.32	-0.90	< 0.025	< 0.025	< 0.2

(b) 機械的特性

直径	5.12±0.06 mm
引張強度	160-180 kgf/mm <sup>2</sup>
0.7%伸びにおける耐力	> 118 kgf/mm <sup>2</sup>

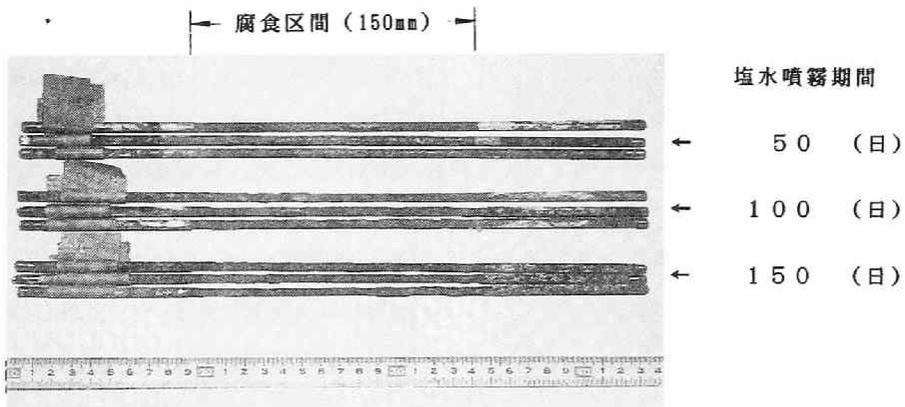


Fig.4.9 腐食鋼線

## 2) 測定装置

Fig.4.10 は、磁氣的断面積測定装置の概要を示したものである。鋼線を磁化するための外部磁界は、内径 35 mm、外径 90 mm、幅 90 mm、巻数 1,600 回、5 Ω の空芯ソレノイドによって発生させた。なお、励磁電流は 5 A まで可変とした。一方、鋼線内の磁束を計測するサーチコイルは、外部磁界用ソレノイドと同軸に配置したガイドシリンダの外面に巻いたものである。サーチコイルからの出力はフラックスメータで積分され、磁束に比

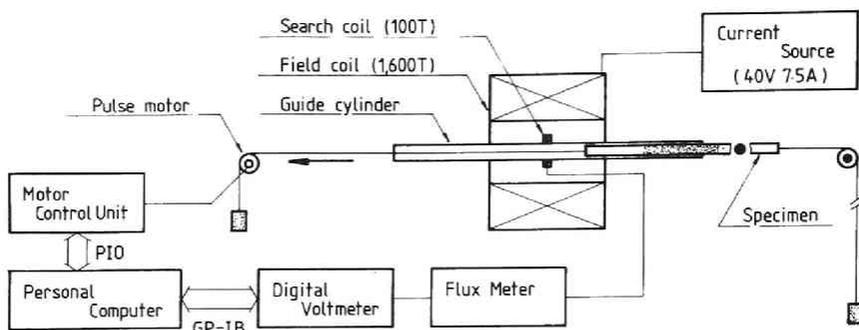


Fig.4.10 断面積測定装置の概要

Table 4.2 サーチコイルの諸元

コイル	A	B	C	D	E	F	G	H
内径 (mm)	8.5	12	20	12	12	12	12	12
巻幅 (mm)	10	10	10	2	3	6	9	12
巻数 (回)	50	50	50	20	20	20	20	20

例した電圧信号としてデジタルボルトメータに入力される。鋼線を移動させるためのパルスモータをコンピュータで制御し、鋼線を徐々に移動させながら、長手方向に沿ったそれぞれの位置での磁束を計測するようにした。なお、移動距離は 450 mm で、全測定点数は 1,200点である。

磁束を計測するサーチコイルの径と幅が、断面積測定の精度と長手方向分解能に大きく関わることはいうまでもない、そこで、Table 4.2 に示した、8種類のコイルを用いて比較検討することにした。コイルABCは、内径のみ違うもの、コイルDEFGHは、巻幅のみ違うものである。なお、Aを標準コイルとし、腐食鋼線については全てこのコイルで測定を行った。

#### 4.4.2 結果

##### 1) 加工鋼線の形状と磁束測定結果の関係

Fig.4.11 は、加工した部分の径 (d) が 4.0 mm の鋼線について、励磁電流 3 A の条件でコイルAによって測定した、磁束の量の長手方向に沿った変化を示したものである。横軸は、試料に沿った長さを、縦軸は、それぞれの位置での磁束の変化を、無加工部分の磁束を100%とした比率で表わしたものである。細くした部分の長さ (l) が 50 mm 以上になると、その曲線に平坦な部分が現われ、その磁束減少量が断面積減少量に一致するようになる。このことから、狭い区間において急激な断面積変化を呈しているようなものに

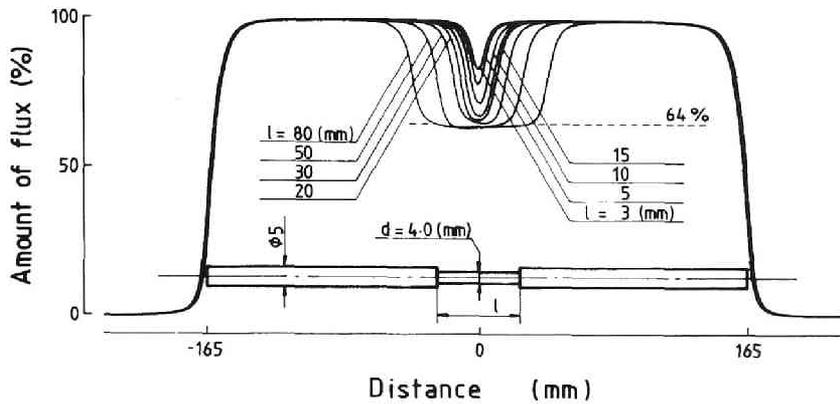


Fig. 4.11 加工鋼線についての断面積測定結果例

は、この測定法は適さないといえる。Fig. 4.12は、(d)の異なる3種類の加工鋼線について、加工部分での最大磁束減少量と(l)の関係を示したものである。この図から、(d)がどれだけであっても(l)が40mm以上であれば、磁束減少量が断面積減少量にほぼ一致することがわかる。Fig. 4.13は、鋼線中央に段階的に細くした部分を設けた試料についての測定結果である。下の曲線は、3つの段階それぞれの部分の長さが50mmの場合で、上の曲線は、15mmの場合である。50mmの場合は、測定曲線に3箇所平坦な部分が見われており、そこでの磁束が各部分の断面積に一致している。15mmの場合は、曲線に平坦な部分がなく、また、中央部分(Φ3.5の部分)での磁束減少量が実際の断面積減少の9割程度にしかっていない。しかし、曲線の凹凸の具合からは断面積の異なる部分が3つ存在することが読み取れ、またそれぞれの中央部分での磁束減少量は、Fig. 5.5に示した長さl = 15mmのときの値とほぼ一致している。

## 2) 測定結果に影響を及ぼす諸要因

励磁電流の大きさつまり外部磁界の強さや、サーチコイルの直径や幅は、断面積測定の精度や長手方向の凹凸分解能に影響を与える。

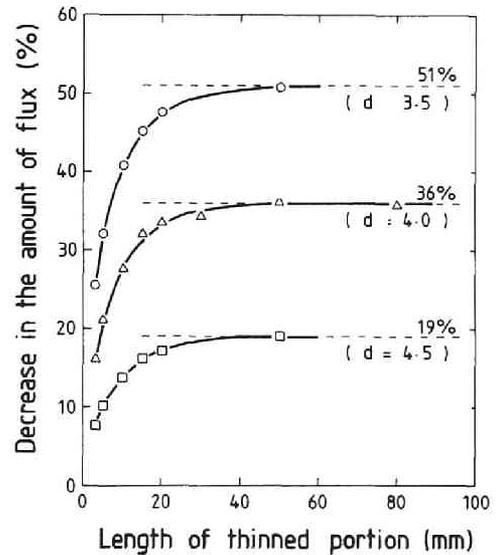


Fig. 4.12 細くした部分の長さ(l)と最大磁束減少量の関係

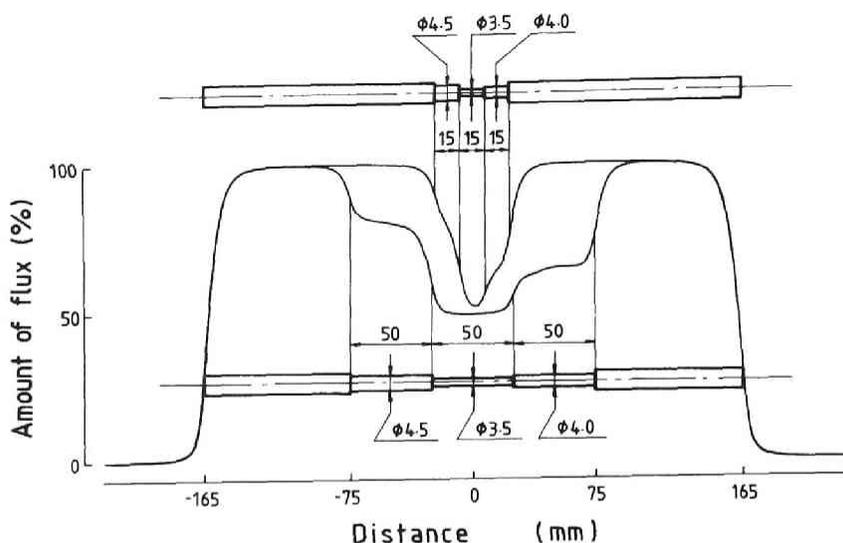


Fig.4.13 段階的に細く加工した鋼線についての測定結果

Fig.4.14 は、試料としたPWS鋼線の磁化特性を示したもので、Fig.4.10に示したシステムで未加工鋼線をコイルの中央に停止させた状態で計測したものである。図中横軸は、励磁電流の値であるが、1.5A 以上では磁気ヒステリシス曲線が閉塞している。したがって、断面積計測においても、この電流以上であればよいと思われるわけであるが、実際には、試料端末や断面積の急変部に誘起される磁極によって減磁界が現われ、断面積と磁束との比例性が損われることになる。Fig.4.15 は、加工部分の径  $d=4.0$  mm、長さ  $l=50$  mm の加工鋼線について、励磁電流が異なる場合の磁束測定結果を比較したものである。いずれの場合も未加工鋼線での各励磁電流における磁束を基準とした百分率で示してある。2 A以下の励磁電流では、端末や断面急変部での減磁界の影響が著しく、断面積に比例した出力が得られていない。3 Aでは、減磁界の影響をほぼ抑えることができているが、励磁電流が大きいほどその効果は大であることがわかる。しかし、実際には、コイルの温度上昇が激しくなることや磁氣的クーロン力の増大によって試料の円滑な移動が妨げられるなどの理由により、励磁電流としては5 Aが限度であった。

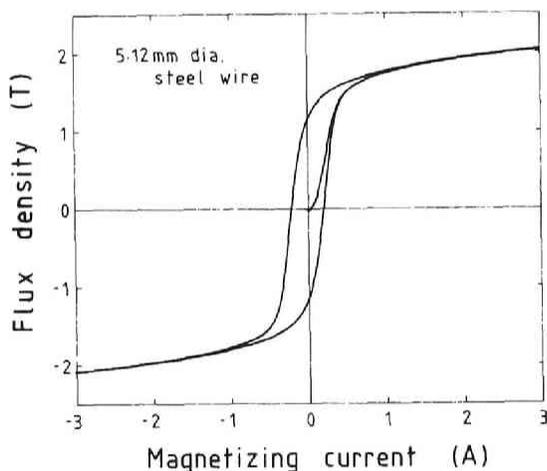


Fig.4.14 PWS鋼線の磁化特性

2 A以下の励磁電流では、端末や断面急変部での減磁界の影響が著しく、断面積に比例した出力が得られていない。3 Aでは、減磁界の影響をほぼ抑えることができているが、励磁電流が大きいほどその効果は大であることがわかる。しかし、実際には、コイルの温度上昇が激しくなることや磁氣的クーロン力の増大によって試料の円滑な移動が妨げられるなどの理由により、励磁電流としては5 Aが限度であった。

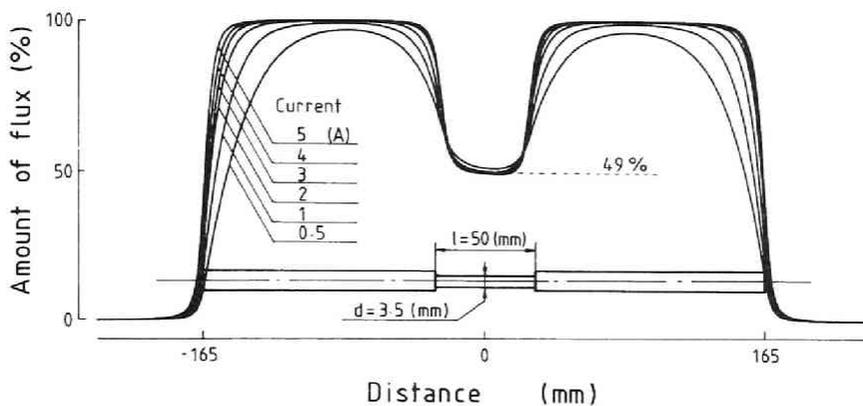


Fig.4.15 励磁電流の影響

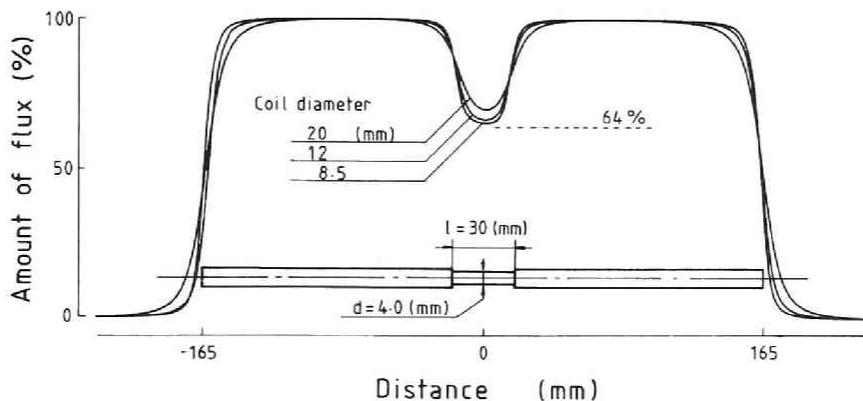


Fig.4.16 サーチコイルの内径の影響

Fig.4.16 は、同一の加工鋼線（細くした部分の径 4.0 mm ，長さ 30 mm ）について内径の違う 3 つのサーチコイル（A，B，C）でえられた測定結果を比較したものである。加工部分の幅が狭く、コイル径が 8.5mm のコイル A でも、その磁束減少量は断面積減少量（36%）に一致してはいないが、コイル径は、測定結果にかなりの影響を与えるものであり、できる限り対象素線径に近づけることが望ましいことがわかる。Fig.4.17 は、同様にコイル幅（コイル D，E，F，G，H）の影響について示したものである。断面変化部分において、多少の違いはあるものの、ほぼ同じような曲線を描いており、またその差も 2% 程度以内である。

以上のことから、測定においては、できる限り励磁電流を大きくし、サーチコイルとしてはその径ができる限り鋼線の径に近いものを用いるべきであるが、コイル幅は、径に比べて測定精度に与える影響が少ないと言える。

### 3) 腐食鋼線について

Fig.4.18 は、本測定法によって得られた、腐食鋼線の長手方向に沿った断面積の変化について示したものである。なお、励磁電流は3 Aで、サーチコイルはAを用いた。図中 -75 mm ~ +75 mm の区間が、塩水噴霧によって腐食させた部分である。塩水噴霧期間が 50, 100, 150 日と増えるにつれて、断面積損失量と断面形の長手方向の凹凸が増大していく様子がよく捉えられている。

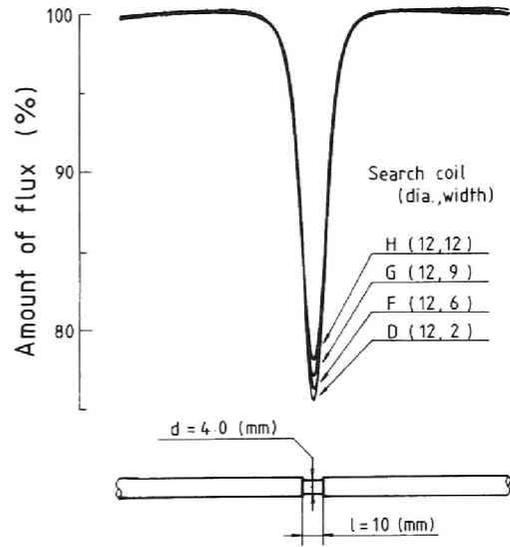


Fig.4.17 サーチコイルの幅の影響

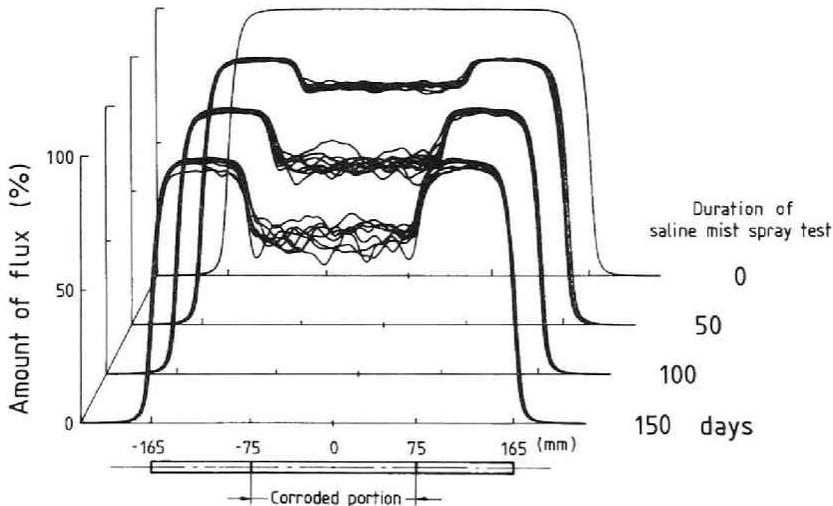


Fig.4.18 腐食鋼線についての断面積測定結果

## 4.4.3 考察

### 1) 断面写真による横断面積の実測値との比較

150 日腐食鋼線のうちの 1 本について、その長手方向の断面積変化を断面写真法によって求め、磁氣的計測法の結果と比較した。試料の腐食部分を 1 mm ずつ研磨しながら、その横断面を一定倍率で写真にとり、そのネガフィルム上の画像を CCD カメラによって画像処理システムに取込んだ<sup>12)</sup>。おのおのの初期画像をすべて二値化処理し、試料の長手方向 1 mm ごとの断面積を求めた。Fig.4.19 は、その結果を示したものである。磁氣的な

方法によって得た長さに沿った断面積変化の曲線は、コイルの長手方向の凹凸分解能がそれほどでないため、なめらかなものになっているが、写真によって得たものの凹凸をある程度忠実に反映したものとなっている。写真による方法の精度を考えれば、本磁氣的測定法は、ケーブル用鋼線などの腐食量の評価には十分な精度をもつものであるといえる。

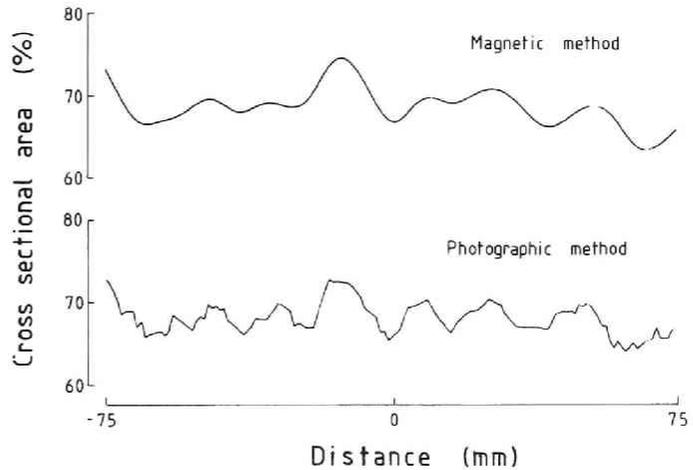


Fig.4.19 写真法による断面積実測値との比較

## 2) 腐食鋼線の引張強度と断面積の関係

腐食鋼線は、磁氣的断面積測定の後、引張試験に供してその引張残存強度を求めた。Fig.4.20 は、本測定法によって求めた腐食区間での最大断面積損失率とその強度損失率を比較したものである。また、Fig.4.21 は、100 日塩水噴霧腐食鋼線の断面積測定結果を示すもので、図中には、引張試験の際にその鋼線の破断した位置が矢印で示してある。本計測法で求めた断面積損失率とそれら腐食鋼線の引張強度損失率は、かなりよい一致をみている。断面積損失率が大きいほど、若干その強度損失率との間にずれが生じるようになるのは、腐食が激しいほど鋼線に生じる凹凸が激しくなり、断面積ばかりでなく凹凸そのものが強度に二次的な影響を及ぼすようになるためと考えられる。Fig.4.21 によれば、磁氣的に求めた最大断面積損失率の位置と、引張試験での鋼線の破断位置が、ほとんど全ての試料において一致しており、本測定法が、ケーブル鋼線に現われるような腐食について、強度という意味において、十分な長手方向分解能をもつものであることがわかる。

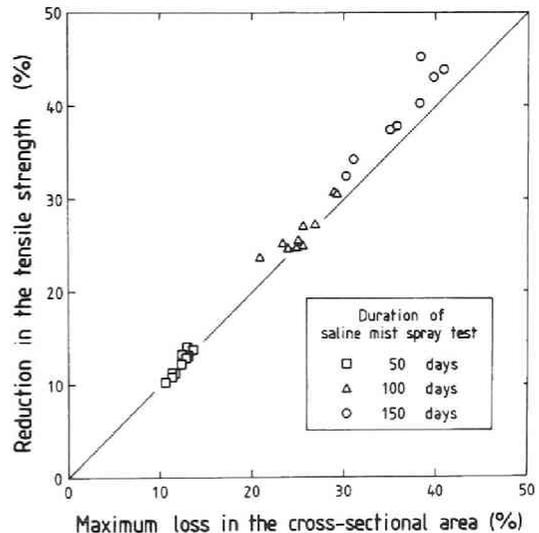


Fig.4.20 腐食鋼線の最大断面積損失率と引張残存強度の関係

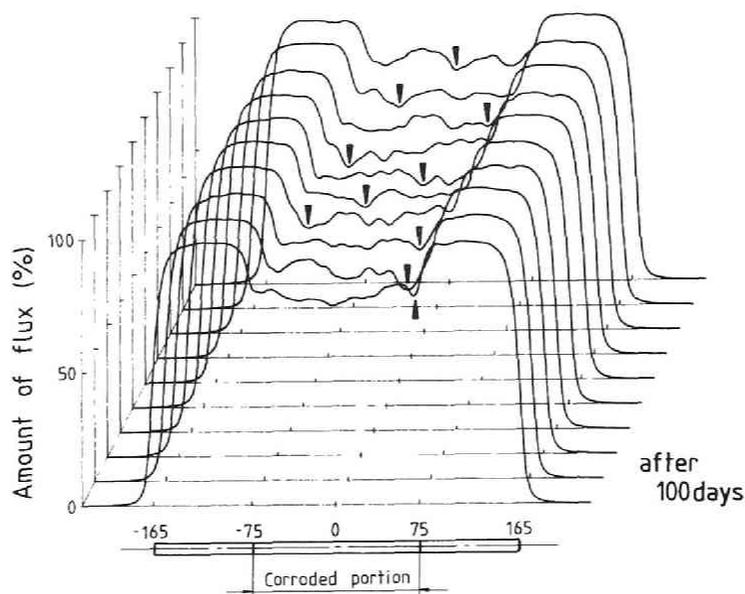


Fig.4.21 腐食鋼線の長手方向断面積変化と引張試験における破断位置

#### 4.5 結言

全磁束測定型ワイヤロープ磁気探傷法の基本的特性について、人工欠陥を設けたPWSを対象として検討した。その結果、この方法は、長手方向にある程度以上の広がりをもった損傷については、その断面積損失率に比例した探傷出力が得られるものであり、摩耗や腐食によるワイヤロープの劣化の評価に優れた方法であることが確認できた。

つぎに、全磁束法を応用して、吊ケーブルなどに用いられる鋼線について、その腐食の程度すなわち断面積損失率とその長手方向に沿った変化を、簡便に測定できる方法を開発し、塩水噴霧によって人工的に腐食させた鋼線に適用した。その結果、本方法が、長手方向の凹凸の分解能においてそれほど優れたものとはいえないが、ケーブルなどの腐食については、強度という意味においても十分な定量性を備えたものであることがわかった。

## 参考文献

- 1) 塚田和彦, 花崎紘一, 藤中雄三: 直流型全磁束測定法のPWSロープ探傷への適用について, 昭和63年度日本非破壊検査協会春季大会, 講演概要Ⅲ-10, 非破壊検査, Vol.37, No.2A, pp.178-179, (Mar.1988)
- 2) 塚田和彦, 花崎紘一, 藤中雄三: 腐食した吊ケーブル用鋼線材の磁氣的断面積測定, 昭和63年度日本非破壊検査協会秋季大会, 講演概要Ⅲ-2, 非破壊検査, Vol.37, No.9A, pp.827-828, (Oct.1988)
- 3) Hanasaki, K., K. Tsukada, Y. Fujinaka and K. Sugii: A Magnetic Method to Measure Metallic Cross-Sectional Area of Corroded Steel Wire, Non-destructive Testing, Proceedings of the 12th World Conference on NDT, Amsterdam, April 23-28, 1989, edited by J. Boogaard and G.M. van Dijk, Vol.2, pp.1270-1272, (Apr.1989)
- 4) 田下和男, 小門純一, 藤中雄三, 錦織栄: 立坑巻索の劣化の進行とその判定, 日本鋳業会誌, Vol.91, No.1047, pp.335-339, (May 1975)
- 5) Kalwa, E. and K. Piekalski: Abrasion of Wire Ropes - Their Models and the Magnetic Testing Method, Canadian Society for NDT Journal, Vol.8, No.2, pp.46-49, (Mar./Apr.1987)
- 6) Kalwa, E. and K. Piekalski: Qualitative and Quantitative Determination of Densely Occurring Defects in Steel Ropes by Magnetic Testing Method, Materials Evaluation, Vol.46, No.6, pp.767-770, (May 1988)
- 7) Weischdel, H.R.: The Inspection of Wire Ropes in Service: A Critical Review, Materials Evaluation, Vol.43, No.13, pp.1592-1605, (Dec.1985)
- 8) Kitzinger, F. and J.R. Naud: New Development in Electromagnetic Testing of Wire Rope, CIM Bulletin, Vol.72, No.806, pp.99-104, (June 1979)
- 9) Marchent, B.G.: An Instrument for the Non-destructive Testing of Wire Ropes, Systems Technology, No.29, pp.26-32, (Aug.1978)
- 10) Marchent, B.G.: Mooring Cable Nondestructive Testing, Oceanology International 78, pp.11-15, (1978)
- 11) 佐々木佳男, 木内晃, 新家徹, 渡理宙, 西壽樹, 杉井謙一: 腐食ワイヤの疲労強度解析, R & D神戸製鋼技報, Vol.38, No.1, pp.63-66, (Jan.1988)
- 12) 花崎紘一, 塚田和彦, 今井澄, 藤中雄三: 発色紙圧力測定法の画像処理による分解能向上に関する研究, 水曜会誌, Vol.20, No.10, pp.680-685, (June 1988)

## 第5章 ワイヤロープの曲げ疲労劣化とその磁氣的評価<sup>1), 2), 3)</sup>

### 5.1 緒言

鉱山立坑の巻索やエレベータ、クレーン用ロープなど、動索として使用されるワイヤロープは、運転中にドラム、シーブ、ローラなどによって繰返し曲げを受け、その供用期間の増加とともに、次第に劣化していく。曲げやすいことが、ワイヤロープの一大長所であり、これは、変形の際に構成素線の相互滑動がある程度許容されることによって生み出されるものである。しかし、このことが、ワイヤロープの曲げ疲労劣化の態様を一般の鋼材と異なった特殊なものにしているともいえる。つまり、ワイヤロープの場合は、一般的な意味での曲げや引張応力の他に、素線相互の圧迫力（とそれによる素線の摩耗）が、その曲げ疲労劣化に大きな影響を及ぼすのである。

緒論 2. で述べたとおり、ワイヤロープの曲げ疲労劣化は、素線上の摩耗痕や素線の断線など、顕在的な形態として現われるのが特徴である。また、それらの二次的な現象として、ロープ直径の減少、ロープ伸びの増大、剛性の低下などが現われる。ロープの管理においては、これらの諸現象を手がかりとして、つまり、表面素線断線数の確認や直径減少量の測定を通じて、劣化度の評価が行われる。

本章では、2種類の構造の異なるワイヤロープをとりあげ、それらのシーブ曲げ疲労試験を実施し、表面断線やロープの伸びの変化を測定することによって、構造による曲げ疲労劣化特性の違い、および、ロープの強度低下率とそれらの劣化の諸現象との関係について検討した。また、疲労試験中に継続的に第2、第3章で述べた漏れ磁束探傷および第4章で述べた全磁束探傷を実施し、それらの探傷法の曲げ疲労劣化評価への適用性について検討した。

### 5.2 曲げ疲労劣化とその諸現象

ワイヤロープの曲げ疲労に影響を及ぼすものとしては、多くの因子が挙げられるが、Table 5.1 に示すように、それらは大きく3つに分類できる。ワイヤロープの曲げ疲労劣化については、長年にわたり多くの実験的研究が行われ、これらの諸因子とロープの寿命（破断までの繰返し曲げ回数）との関係についての検討が行われている<sup>4), 5), 6)</sup>。一方、繰返し曲げによって生ずる劣化の諸現象については、おもに使用者の側において、いくつかの実験的研究がなされており、繰返し曲げ回数と素線断線数<sup>7), 8), 9)</sup>、ロープの伸び<sup>8), 9), 10)</sup>、ロープ直径の減少<sup>11)</sup>、ロープ剛性の変化（縦弾性係数<sup>12)</sup>、縦振動数・減衰率、

振り振動周期・減衰率<sup>10)</sup>）などの関係について報告されている。また、繰返し回数と強度低下率の関係<sup>7), 13)</sup>や、断線数と強度低下の関係<sup>14)</sup>についての研究も行われている。しかしながら、これらの劣化の諸現象の現われ方は、対象とするロープ構造や使用条件が異なれば変わってくるものであり、いまだそれらの諸現象とロープの強度低下とを結びつけるような統一的な見解が得られているわけではない。

Table 5.1 にあげた諸因子のうち、ロープ構造の違いが、もっとも劣化の諸現象の現われ方に差異を生む要素であると考えられるので、本研究では、直径や強度がほぼ同じで、構造がすこし異なる2種類のロープを対象として、曲げ疲労試験を実施した。また、曲げ疲労試験中に漏れ磁束探傷と全磁束探傷を継続的に行って、それらの探傷結果から、実際の劣化の進行度合いをどの程度評価できるかについても検討した。

Table 5.1 ワイヤロープの曲げ疲労劣化に影響を及ぼす諸因子

分類	因子
製造条件	ロープの構造（素線構成）， より方（ラング，普通；平行，交差），よりの長さ 素線の強度（引張強度，靱性，めっきの有無） プリテンションの有無，型付けの有無
使用条件	荷重（静荷重，変動荷重） $D/d$ ， $D/\delta$ （シーブ径/ロープ径），（シーブ径/外層素線径） 曲げられ方（U字，S字など） シーブの材質および溝形状 シーブとの接触角 動的な影響（変動荷重の周波数，運転速度）
環境条件	腐食性雰囲気 塗油状態 温度，湿度

## 5.3 実験

### 5.3.1 供試体

曲げ疲労試験に供する2種類のワイヤロープは、ともに外層素線径 $\delta=0.91\text{mm}$ ，公称径 $d=16\text{mm}$ のIWRC 7×7+6×Fi(29)である。両者の構成素線はすべて同じであるが、一方は、ストランドと心ロープとの相互圧迫を緩和するために、ストランドと心ロープとの隙間にデルタファイラーと呼ばれるポリプロピレン被覆した三角形断面の特殊線がより込ま

Table 5.2 供試ロープ諸元

	DFロープ	Fロープ
構成	7×7+6×DF+6×Fi(29)	7×7+6×Fi(29)
公称直径 (mm)	16	16
実測直径 (mm)	17.03	16.57
外層素線径 (mm)	0.91	0.91
より方	普通Zより	普通Zより
よりの長さ (mm)	100	103
規定切断荷重 (tonf)	18.0	17.6
実際切断荷重 (tonf)	18.9	18.85
素線切断荷重合計 (tonf)	23.439	23.133

Table 5.3 供試ロープの構成素線径

心ロープ		側ストランド	
記号	直径 (mm)	記号	直径 (mm)
$\delta_{11}$	0.69	$\delta_2$	0.91
$\delta_{10}$	0.75	f	0.42
$\delta_{01}$	0.74	$\delta_1$	1.06
$\delta_{00}$	0.85	$\delta_0$	1.45

れている。以後、デルタフィラーの入っているものをDFロープ、入っていないものをFロープと記すことにする。Fig.5.1は、このロープの断面と構成素線を示したものである。また、Table 5.2は、それぞれのロープの諸元を示したもので、Table 5.3は、構成素線の直径を示したものである。

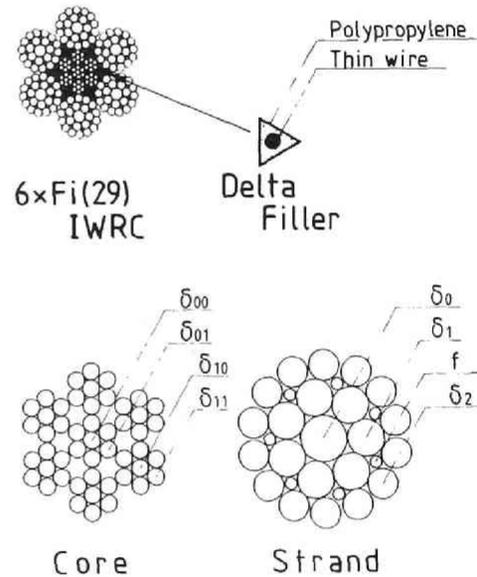


Fig.5.1 供試ロープ断面

### 5.3.2 曲げ疲労試験機

Fig.5.2は、本実験に使用した曲げ疲労試験機と測定システムを示すものである。直径1mの駆動輪と緊張輪との間に全長約10mのロープを張り渡し、駆動輪を270°の範囲で正逆回転させることによって、ロープに2.35mの行程の往復運動を与えるようになっていく。なお、1往復の周期は約10秒で、往復の切換え時には約0.7秒の休止時間がある。ロープの走行速度は約0.5m/sである。実験中のロープの張力は、緊張輪を介して油圧によって与えられ、ロープの伸びにかかわらず一定値に保たれる。なお、ロープ張力の値

は、安全率が4～8となる範囲（4,500～2,250 kgf）に設定した。

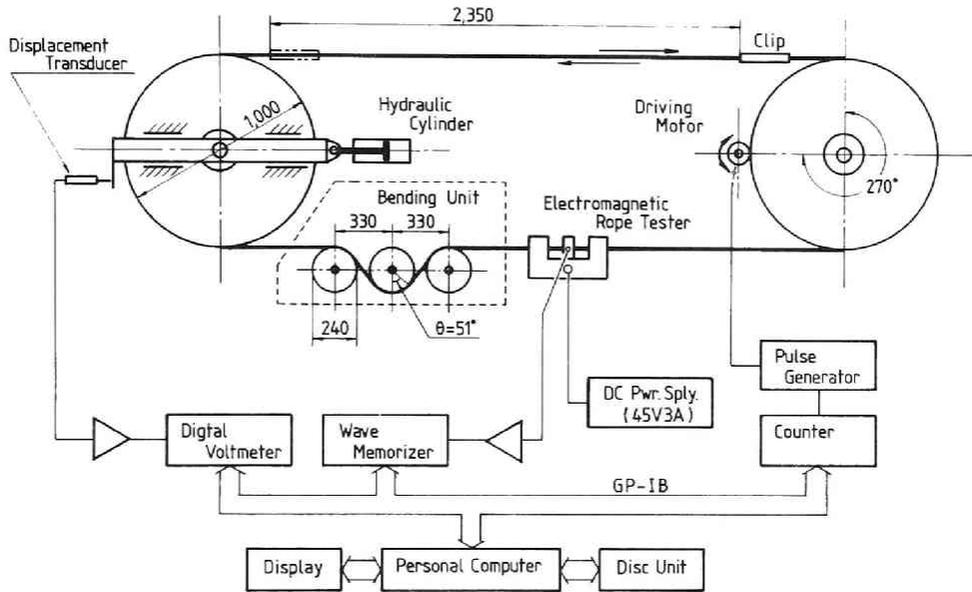


Fig.5.2 曲げ疲労試験機と測定系統

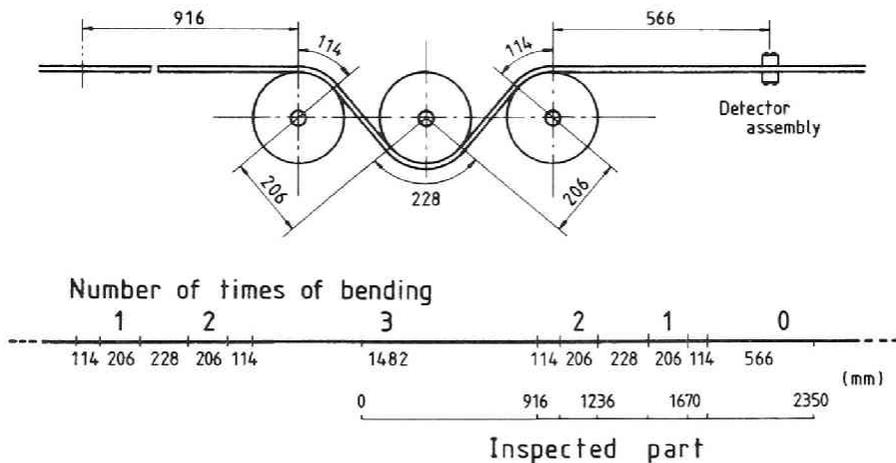


Fig.5.3 曲げ区間と探傷区間

ロープは、図中に示した3連の屈曲用シーブ（直径 $D = 240$  mm）を通過するたびに二重S字の曲げを受ける。ただし、緊張輪と駆動輪は鉛直面内であるのに対し、これらの屈曲用シーブは水平面に配置されている。本研究の実験は、3連のシーブの中心を一直線上に配置し、屈曲角  $\theta = 51^\circ$  の状態で行った。なお、 $D/d = 15$ ,  $D/\delta = 258$  である。

実験においては、往復1回を曲げ回数2回と数えることにしたが、試験機の構造上、ワイヤロープは部分によって屈曲用シーブを通る回数が異なる。Fig.5.3 に示したとおり、曲げの程度が異なる区間を、それぞれ3回曲げ区間（往復のたびごとに完全に3つのシーブを通過する部分）などと呼ぶことにした。

### 5.3.3 漏れ磁束探傷と全磁束探傷

漏れ磁束探傷は、駆動輪と緊張輪のほぼ中央で行った。励磁器は、両端に環状磁極をもつ電磁石によってロープを磁化する、いわゆる極間磁化方式のものである。電磁石は、45 V 3A 4000Turnsのもので、これによって直径16mmのロープ内に誘起される磁束密度は、見かけで約 11 kG、鉄部分の実質断面積に対して 16kG である。したがってロープは長手方向に飽和した状態にある。極間の中央に設けた漏れ磁束の検出器は、2.4.2 で述べた形式と同一のものである。外径30mmの円筒の外面上に、20個のホール素子を半径方向の磁束に感応する向きで環状2列に配置し、その2つの検出素子列の間隔を15mmとしたもので、両者の差動出力を探傷信号としている。

一方、全磁束探傷の方は、極間型電磁石を用いた場合、第1章で述べたように、ヒステリシスのためにロープの往復運動に伴って現われる磁束密度の変化が著しく、探傷が困難となるので、同軸ソレノイド方式を採用することにした。使用した励磁コイルは、それぞれ1600回巻の2連の同軸ソレノイド（30V,3A）である。全磁束探傷において、ロープ内の磁束総量の変化を検出するのは、2つのソレノイドコイルの中央の設けた、内径25mm、巻幅10mm、50回巻のサーチコイルで、それからの出力をフラックスメータで積分したものを探傷信号とした。なお、探傷区間は曲げ区間の片側半分で、その範囲は、Fig.5.3 に示したとおりである。

### 5.3.4 実験方法および実験中の諸計測

ロープの伸び量は、Fig.5.2 に示したように、緊張輪のスライドフレームの移動量として計測した。ロープに所定の張力をかけて往復運転を開始する直前の伸びを0としたが、張力が同じでも、ロープの張り具合は各試料で異なるため、往復運転の最初の数回における伸び量は、各試料で相当違った値となった。したがって、ロープの伸び量の絶対値について議論することはできない。また、ロープの伸び量は、ロープ全体についての値であり、実際に曲げ疲労を生ずる区間以外の部分のクリープ的な伸びも含んだ値となっている。

疲労試験中は、探傷とロープの伸び量の計測を継続的に行い、疲労進行の状況を監視した。その測定系統は、Fig.5.2 の下部に示したとおりである。繰返し回数の計数は、疲労試験機の電磁カウンタのトランジェント信号をトリガとして、パルスジェネレータから往復運動を現わす TTL のパルスが発生させ、それをパーソナルコンピュータで計数するこ

とによって行った。繰返し回数 20 回ごとには伸び量の計測を、100 回ごとには探傷の実施とその記録の採集と保存を、パーソナル・コンピュータの制御のもとに自動的に行った。なお 1 回の探傷時間は、往復運動 10 秒間のうちの中央 8 秒間である。表面断線が発生してからは、繰返し回数 500 回ごとに回転を一時停止させて外部断線の数と位置を目視確認した。

### 5. 3. 5 残存強度の測定と分解検査

各試料について、順次いくつか予定しておいた繰返し回数に達したときその疲労試験を終了するようにし、劣化程度の異なったいくつかの試料を得られるようにした。疲労試験後は、それらの試料の一部を、分解検査してすべての素線断線の位置と数を確認するとともに、残りの試料については、すべて引張破断試験を行って残存強度を実測した。

## 5. 4 結果

Table 5.4 は、所定回数の曲げ疲労試験を実施しその後引張強度を測定した試料についての、実験結果を整理したものである。表中の初信号とは、漏れ磁束探傷においてその記録上にインパルス状の波形の乱れが現われ始めた時期の繰返し回数を表わすものである。また初断線とは、表面断線が目視によって始めて確認された時の繰返し回数を表わすものである。

### 5. 4. 1 ロープ構造と素線断線発生の態様

Table 5.5 は、同じ試料について、疲労試験終了時において目視確認された表面断線数を、山ぎれと谷ぎれとにわけて示したものである。Fig.5.4 に示したように、山ぎれとはストランド頂上部での断線をいい、谷ぎれとはストランドとストランドの谷部での断線を

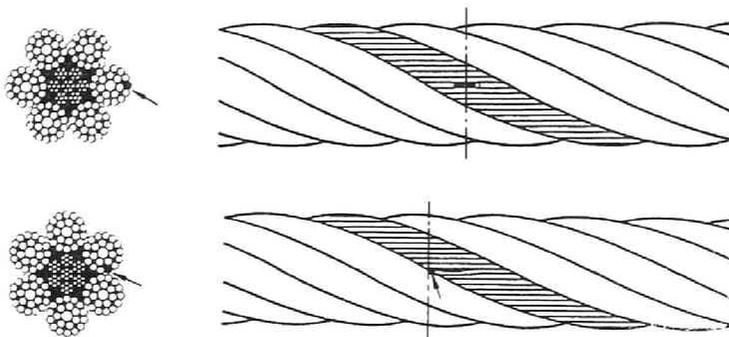


Fig.5.4 山ぎれ断線と谷ぎれ断線

Table 5.4 残存強度を測定したDF, Fロープの曲げ疲労試験結果

ロープ名	安全率	繰り返し回数	残存強度(ton)	表面断線数	初信号	初断線
DF 0		0	19.50	0		
DF 1	6	5,040	17.90	38	4,000	4,000
DF 2	6	4,500	16.55	32	3,100	3,100
DF 3	6	7,500	12.60	200	2,900	2,900
DF 4	5	6,200	11.95	99	3,400	3,400
DF 5	4	5,900	14.00	103	4,900	4,900
DF 6	7	8,000	13.15	92	5,500	5,500
DF 7	8	6,000	12.95	99	2,900	2,900
DF 8	8	8,500	10.90	208	4,300	4,300
DF 9	5	6,800	14.40	119	3,500	3,500
DF10	5	600	19.30	0		
DF11	5	3,500	18.80	0		
DF12	7	7,000	13.80	137	4,500	4,500
DF13	5	7,100	12.30	143	4,300	4,300

ロープ名	安全率	繰り返し回数	残存強度(ton)	表面断線数	初信号	初断線
F 0		0	19.00	0		
F 1	8	8,996	7.90	357	4,000	6,300
F 2	5	5,964	12.60	135	2,800	5,100
F 3	4	5,184	9.10	215	2,300	3,700
F 4	6	6,524	13.10	29	3,200	5,500
F 5	7	8,000	10.40	95	2,800	6,000
F 6	4	4,700	9.90	187	2,000	3,300
F 7	5	500	19.20	0		
F 8	5	5,500	13.50	27	2,400	4,000
F 9	5	2,500	18.90	0		
F10	7	7,966	12.45	106	3,600	6,000
F11	5	5,900	10.50	185	2,200	4,300

いう。これによれば、DFロープでは山ぎれが、Fロープでは谷ぎれが優勢である。DFロープの場合、デルタフィラーの存在によってストランド間およびストランドと心ロープとの接触圧が緩和され、谷部での断線はかなり抑制されるかわりに、ストランド頂上部付近の素線がもっとも高応力状態となっているものと考えられる。一方、Fロープの場合は、ストランド間やストランドと心ロープとの間の素線から摩耗と疲労による断線が発生していくものと考えられる。ただし、DFロープにおいては、安全率が低つまり張力が大きい条件で行ったロープや、ある程度劣化の進行したロープでは、谷ぎれも多く発生している。これは、高い張力状態や既に山ぎれが多数生じているような状態では、ストランドどうしの接触圧をデルタフィラーが緩和しきれないためであると考えられる。

Table 5.5 残存強度を測定したDF, Fロープの表面断線数

ロープ名	安全率	表面断線数			ロープ名	安全率	表面断線数		
		山	谷	計			山	谷	計
DF 1	6	38	0	38	F 1	8			357
DF 2	6	32	0	32	F 2	5	0	135	135
DF 3	6	198	2	200	F 3	4	0	215	215
DF 4	5	99	0	99	F 4	6	0	29	29
DF 5	4	12	91	103	F 5	7	8	87	95
DF 6	7	92	0	92	F 6	4	0	187	187
DF 7	8	99	0	99	F 7	5	0	0	0
DF 8	8	203	5	208	F 8	5	0	27	27
DF 9	5	51	68	119	F 9	5	0	0	0
DF 10	5	0	0	0	F 10	7	5	101	106
DF 11	5	0	0	0	F 11	5	1	184	185
DF 12	7	137	0	137					
DF 13	5	56	87	143					

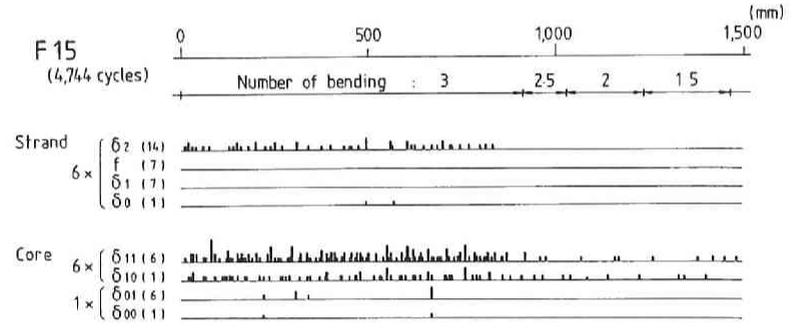
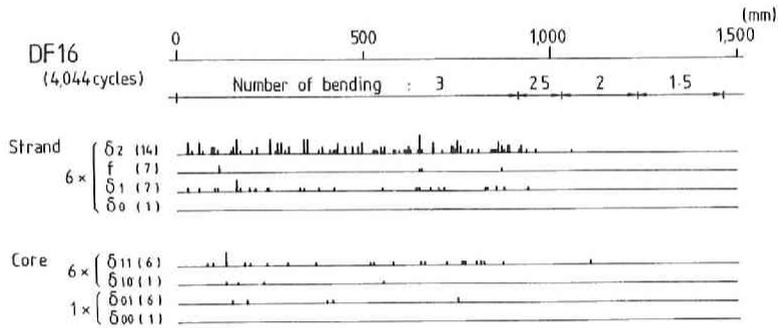
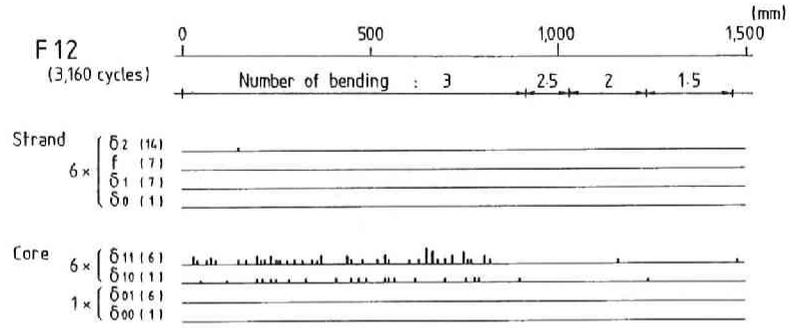
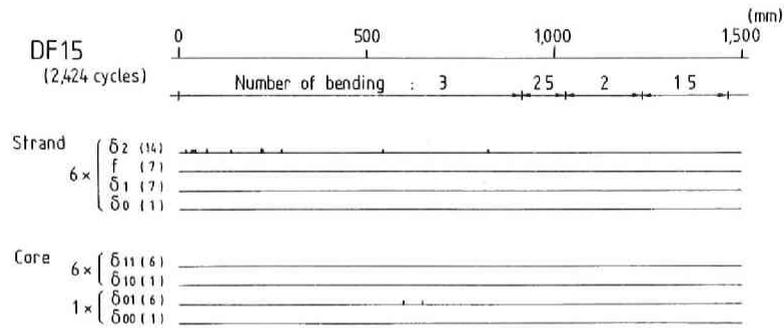
Fig.5.5 は、安全率5で疲労試験を実施した、DF、F両ロープ（それぞれ劣化程度の異なる2本）試料を分解検査した結果で、5mmごとの素線断線の分布をヒストグラム（最小単位1本）として示したものである。なお、横軸はFig.5.3に対応する距離であり、素線を表わす記号はFig.5.1に示したとおりである。なお、括弧内の数字は同種素線の本数である。この図から、DFロープは、まずストランド最外層素線が断線し、繰返し回数の増加とともに次第に内部へと劣化が進行していくこと、一方Fロープでは、まず心ロープで素線断線が発生し、外層素線の谷ぎれが多発するころには、心ロープはほとんど強度がないほどに劣化してしまっていることがわかる。

#### 5. 4. 2 ロープの伸びと残存強度の関係

Fig.5.6の上段の図は、繰返し回数とロープの伸び量の関係を、試験時の張力水準（安全率）ごとに示したものである。DFロープ、Fロープともその曲線は、他の一般材料のクリープ特性と同じように、3つの部分よりなっている。まず、初期にかなりの伸びを示す期間があるが、これはいわゆるロープのなじみ期間である。その後、定率的に伸びが増大していく期間があり、張力が高いほどこの区間での伸び曲線の傾きが大きくなっている。この時期は、内部摩擦や断線などが一定率で増加している期間にあたりと考えられる。最終的に、劣化がある程度進むと、断線が加速的に増加し、それとともに伸びも急激な増大を示している。定率的に伸びが増大していく段階において、DFロープは繰返し回数に対する伸びの増分（伸び曲線の傾き）が、Fロープよりもかなり大きい。これは、プラスチックのデルタフィラがストランドと心ロープとの圧迫力によって、かなりの程度にまで変形することによるものと考えられる。

Fig.5.6の中段の図は、安全率5の場合の繰返し回数と残存強度との関係を示したものである。これらの値は、それぞれの繰返し回数で疲労試験を終了させた試料について求めたものである。この図から、DF、F双方とも伸びが急増し始める繰返し回数の約半分の時期から強度低下が始まっていることがわかる。

Fig.5.6の下段の図は、安全率5の場合の表面断線数の推移を、DF、Fロープそれぞれ1本について示したものである。これによれば、DFロープの場合は、表面断線の発生時期とその増加の傾向が強度低下の開始時点とその変化の傾向とよく対応している。しかし、Fロープ場合は、表面断線の発生時期よりも強度低下の開始時期が早く、表面断線の発生より以前に既に内部での劣化が始まっていることがわかる。



(a) DFロープ

(b) Fロープ

Fig.5.5 分解検査結果

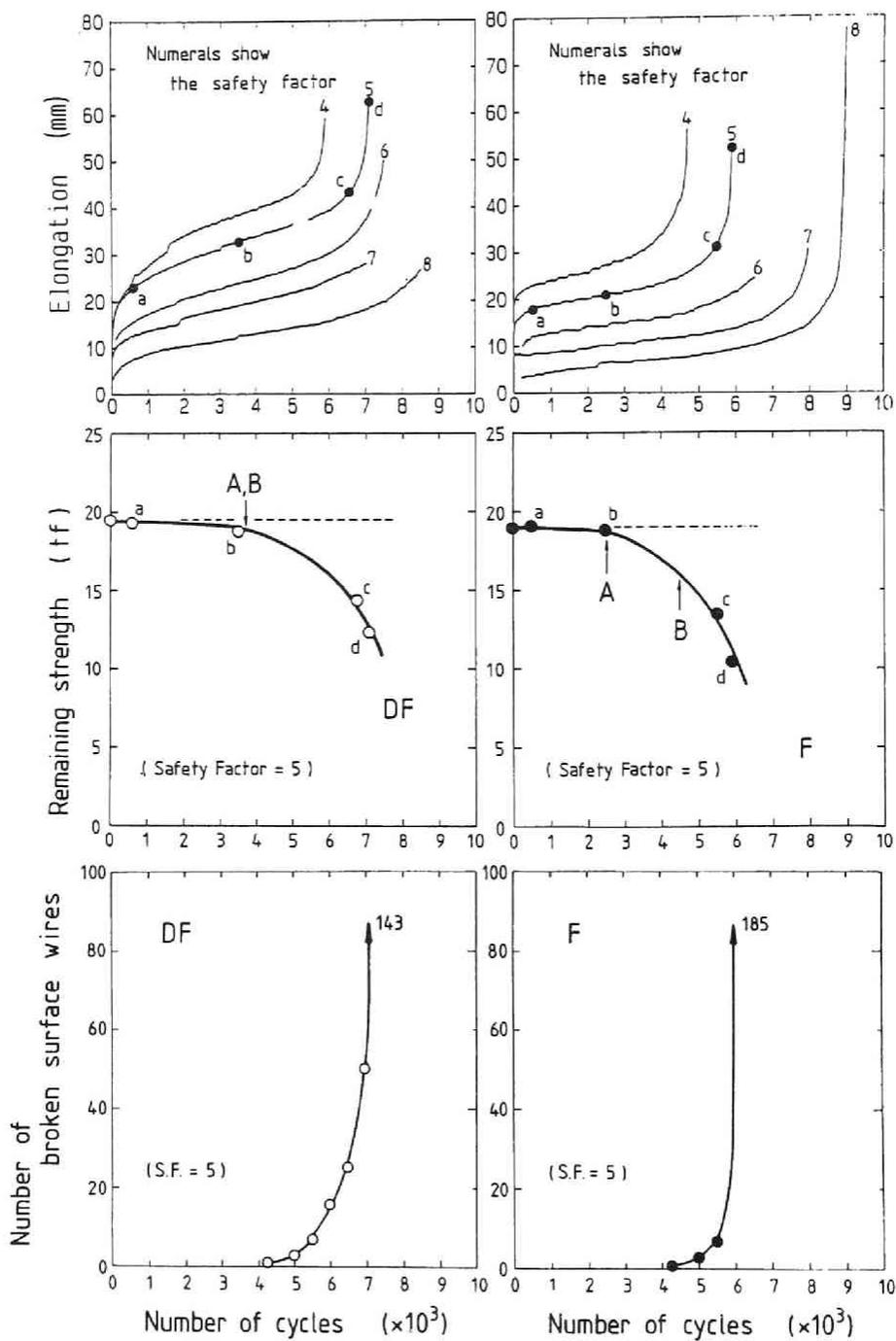


Fig.5.6 繰返し回数とロープの伸び，残存強度，表面断線数の関係

### 5. 4. 3 漏れ磁束探傷記録について

Fig.5.7 は、DF, F 両ロープについていずれも安全率を5に設定して行った疲労試験時の探傷記録の推移を示すものである。すべて、往復の探傷記録で、インパルス波形が集中している部分が、Fig.5.3 に示した3回曲げ区間にあたる。図形の中央部は、ロープが折返し運動のために停止している区間であり、全体の図形は左右対称性をもつものである。両端付近（曲げ回数が2回以下の部分）は、劣化がほとんど認められない。回数が増加とともに波形の乱れが増加し、ロープが徐々に劣化して行く様子がよく捉えられている。DF13の試料は、4,300回で探傷記録上にインパルス波形が現われたが、これは表面の初断線であった。一方F11の試料は、波形の乱れが現われ始めたのはほぼ2,200回ごろであるが、表面初断線は4,300回るときであった。この傾向はこの実験での全ての試料について当てはまることであり、Fロープでは、表面よりも内部で劣化が先行するということを裏付けている。内部劣化の進行に伴って波形の乱れが2,200回ごろ現われるとここで述べたが、これはむしろそれ以後の波形の変化を逆にたどることによって確認できることである。したがって、内部で劣化が先行するFロープのようなものの場合、実際に漏れ磁束探傷記録によってその劣化の開始を判定することは、かなり困難であると言わざるを得ない。

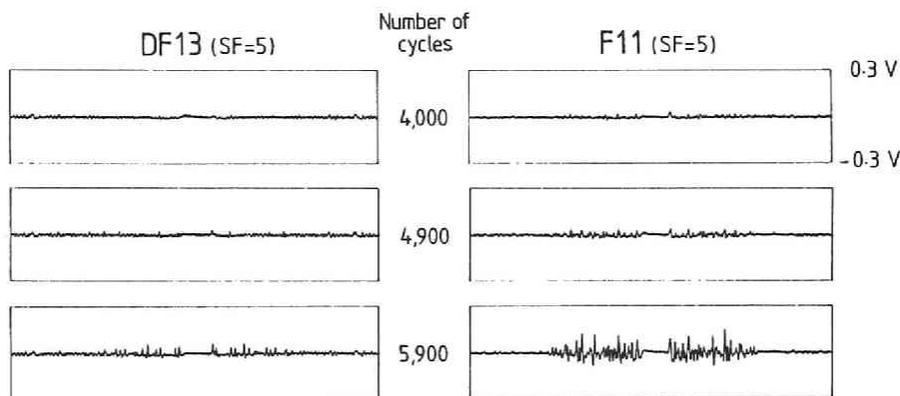


Fig.5.7 繰返し回数の増加に伴う漏れ磁束探傷記録の推移

## 5. 5 考察

### 5. 5. 1 表面断線数とロープの残存強度

Fig.5.8 は、ロープのよりの3ピッチ間に存在する表面断線の数と残存強度との関係を示したもので、両ロープの構造の違いが顕著に現われている。DFロープでは、表面断線の発生とともにロープの強度低下が始まり、表面断線数と強度低下とはほぼ比例関係にあるが、Fロープの場合は、表面断線がなくても実際には強度低下を来しており、表面断

線が現われからは、ほぼ直線的に強度が低下していくことがわかる。また、表面断線と残存強度の関係には、ロープの張力水準（図中の数字は安全率を示す）がほとんど影響しないことがわかる。これらの結果から考えると、D F ロープにおいては、通常行われている目視観察だけでも十分ロープの劣化監視ができるといえるが、F ロープのように内部から劣化が進行し始めるような構造のロープでは、目視観察だけでは不十分であるといえる。

### 5. 5. 2 探傷結果の解釈

目視観察だけでは劣化度の判断が困難なFロープについて、その漏れ磁束、全磁束探傷結果を解釈することによって、どの程度その劣化を定量的に把握することができるかについて述べる。

#### 1) 漏れ磁束探傷記録と断線箇所との対応について

Fig.5.9 は、安全率5の条件で実施した疲労試験における漏れ磁束探傷記録の推移を示したものである。その記録からは、3,000~4,000 回程度から劣化が開始していると読取れるが、かなりのノイズを含んでおりそのままでは断線箇所との対応づけが困難である。そこで、まず試験終了時（4,500 回）の探傷波形をFFTにかけ、40Hz以下の周波数成分についてのみ逆FFTするというフィルタリング処理した。つぎにその波形のなかで、あるしきい値をこえるインパルス波形についてそのピークを取り出し、探傷記録をパルス列に変換することを行った。同図(b) に示したのが、それらの処理によって得られた波形である。Fig.5.11 は、それらの波形(A)と、試験後の分解検査で確認されたすべての断線箇所(B)を合わせて示してのもので、横軸はFig.5.3に対応する距離を表わしている。一番上の波形が原探傷記録(A-1)、次がフィルタリング後の波形(A-2)、その下が探傷記録から最終的に得られるパルス列(A-3)である。得られたパルス列は、ストランド内の素線断線とよく対応していることがわかるが、心ロープでの素線断線については、かなり素線径が小さくまた内部であるため、はっきりとした対応づけが困難である。この試料の場合、ストランド最外層素線の断線のうち表面にあって目視確認ができたものはその

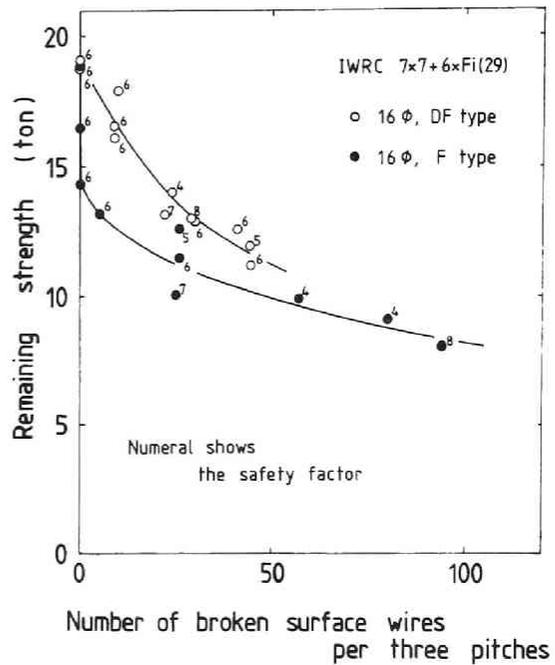
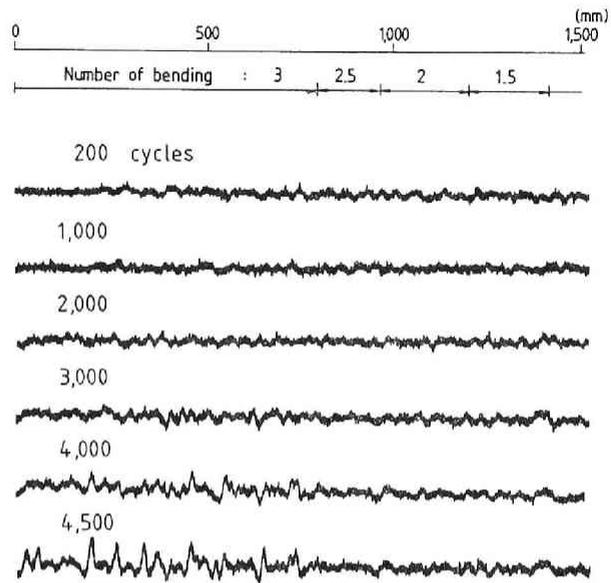
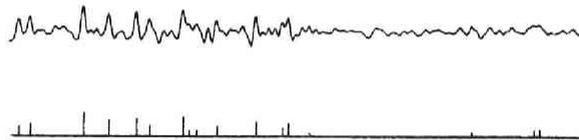


Fig.5.8 3ピッチ間の表面断線数と残存強度の関係

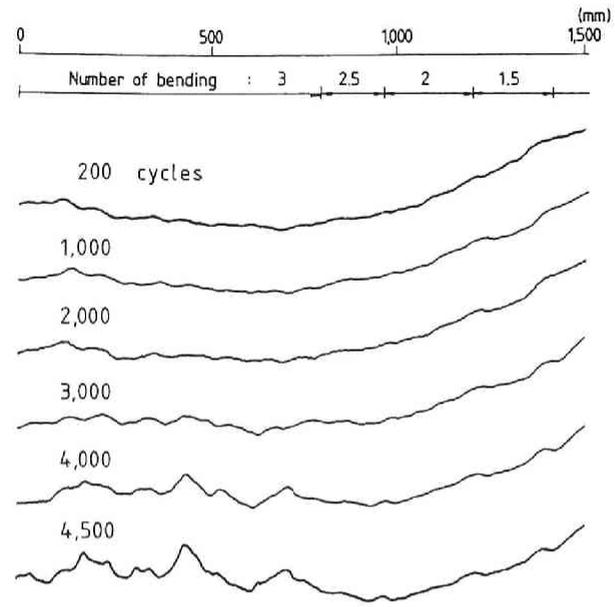


(a) 探傷記録

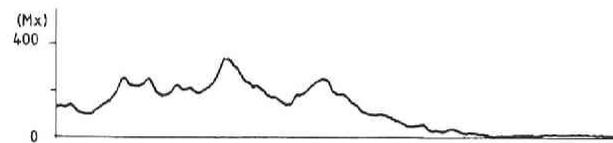


(b) 探傷波形のパルス列への変換

Fig.5.9 Fロープ（安全率5）についての漏れ磁束探傷記録



(a) 探傷記録



(b) 200回と4,500回の差の記録

Fig.5.10 Fロープ（安全率5）についての全磁束探傷記録

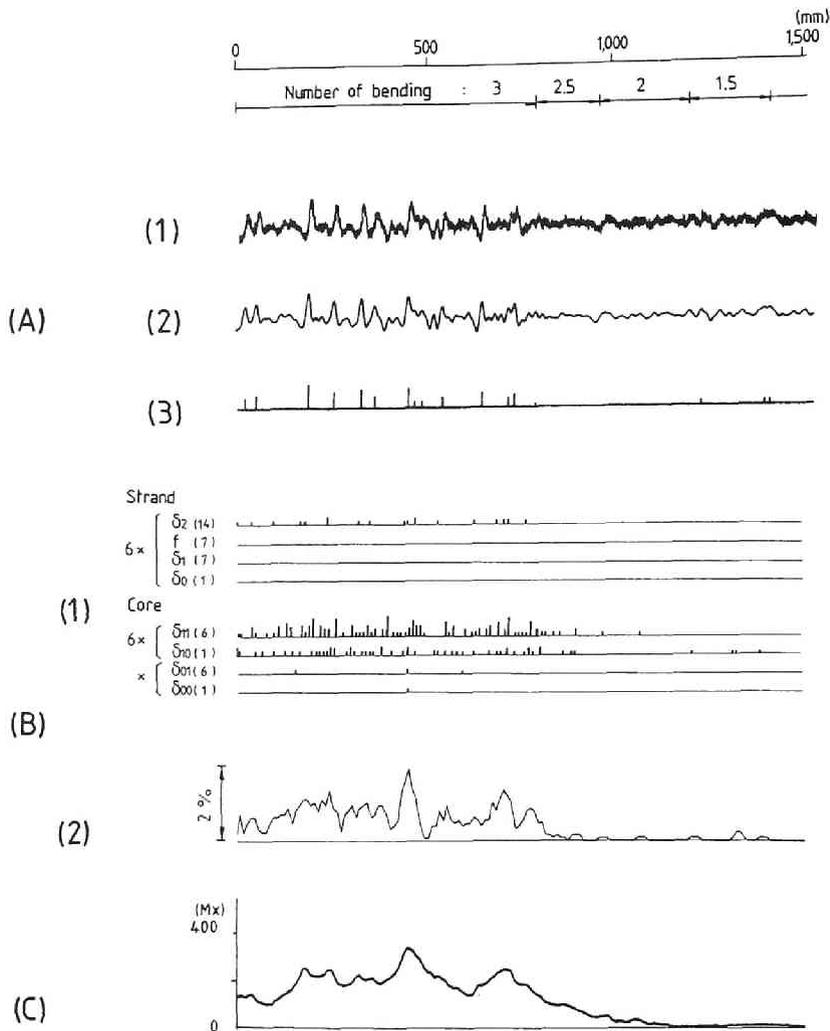


Fig.5.11 探傷結果と断線箇所との対応  
 (A) 漏れ磁束探傷結果, (B) 分解検査結果, (C) 全磁束探傷結果

うちの 20% であった。これらのことから、漏れ磁束探傷では、心ロープの劣化を評価することは困難であるが、ストランド内の素線断線であれば目視で発見できない部分でも、その断線の位置をかなりよく知ることができるといえる。

## 2) 全磁束探傷結果と内部劣化

Fig.5.10 は、Fig.5.9 と同じロープについての全磁束探傷結果の推移を示したものである。各波形は、上側が磁束が減少する方向で、各部分での磁束の量は、損傷がなくても等しくなっていないが、これは探傷区間が限られているためであると考えられる。繰返し回数の増加とともに、曲げをうけて劣化している部分に対応して、その部分での磁束が減

少している。試験終了時の 4,500回と 200回の波形の差をとって劣化による磁束の変化分だけを示したのが、同図の(b)である。分解検査による断線の分布 (Fig.5.11 (B-1)) から、Table 5.3 に示した各素線径をもとに、ロープ長手方向の各位置での損失断面積 (断線した素線の合計断面積) を計算し、その30mm毎の移動平均をとったのが、Fig.5.11 (B-2) の波形である。この波形と全磁束探傷記録 (C) とは、よい対応を示しており、このことから、全磁束法によれば、心ロープも含めてその断線分布状況を定量的に把握することができるといえる。

## 5.6 結 言

構造の異なる2種類のロープについて曲げ疲労試験を行い、ロープが劣化していく過程におけるロープの伸び、表面断線などの劣化の兆候と残存強度との関係について検討した。さらに、漏れ磁束探傷と全磁束探傷を疲労試験中に継続的に行い、その結果の解釈について考察した。その結果、次の様なことが明らかとなった。

- 1) 構造の違いによって、その曲げ疲労劣化進行の状況がかなり異なる。デルタフィラーロープでは、外層素線の疲労による断線が先行し、一般の IWRCロープ では、その心ロープでの断線が先行的に発生する。
- 2) ロープ全体の伸び量は、劣化の監視の指標の1つではあるが、伸びが急増し始める時点では、既にロープの引張強度は 30~40% 低下してしまっている。
- 3) ロープ3ピッチあたりの表面断線数とロープの引張強度低下率の間には、よい対応関係があり、表面断線数を定期的に観測することは、ロープの適正な管理にとって重要である。しかし、デルタフィラーロープでは、表面断線数からその強度低下率が推定できるのに対して、内部での劣化が先行するような一般の IWRCロープ では、表面断線が現われるころには、既に 20~30% の強度低下が起こっていると考えなければならない。
- 4) 16 mm 程度の直径の IWRCロープ では、漏れ磁束探傷によって心ロープ内の断線を検知することは、素線径が小さすぎて困難であるが、ストランド内の断線であれば、目視確認できない内部のものでも検知することができる。
- 5) 全磁束探傷では、心ロープも含めて、その断線分布とよく対応する探傷記録が得られ、内部で劣化が進行するようなものの劣化の評価には適した方法であるといえる。

## 参考文献

- 1) 藤中雄三, 花崎紘一, 塚田和彦: ワイヤロープの曲げ疲労と残存強度の関係, 昭和62年度日本鉱業会春季大会, 講演要旨集, 3306, pp.313-314, (Apr.1987)
- 2) 花崎紘一, 塚田和彦, 藤中雄三: ワイヤロープの曲げ疲労試験における伸びおよび断線について, 昭和62年度資源素材関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, F-6, pp.20-23, (Sep.1987)
- 3) 塚田和彦, 花崎紘一, 藤中雄三: 全磁束測定型のワイヤロープ探傷法について, 昭和63年度資源素材関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, M-13, pp.41-44, (Oct.1988)
- 4) 会田俊夫他編: ワイヤロープ便覧, 白亜書房, pp.323-342 (1967)
- 5) Gibson, P.T., et al: A Study of Parameters that Influence Wire Rope Fatigue Life, Final Report to Naval Ship Systems Command (Contract No.00014-68-C-0492), Battelle Columbus Laboratories, (Oct.1978)
- 6) Beeman, G.H.: Factors Affecting the Service Life of Large-Diameter Wire Rope, Final Report to US Department of Energy (Contract No.USDOE ET-75-C-01-9099), Pacific Northwest Laboratory of Battelle Memorial Institute, (Mar.1978)
- 7) 上田實, 柴田順一: 林業用ワイヤロープ(作業索)の劣化と寿命, 昭和54年度地下資源関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, S-8, pp.24-27, (Oct.1979)
- 8) 柳美三夫: 豎坑捲メインロープの保守と管理について, 第15回ワイヤロープ研究会講演集, pp.133-138, (Sep.1964)
- 9) 阿部正: 奔別立坑に於けるワイヤロープの使用実績について, 第15回ワイヤロープ研究会講演集, pp.145-161, (Sep.1964)
- 10) 上野勲: ワイヤロープの高応力(主として曲げの)疲労と諸現象, 昭和40年度鉱業関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, 1・1・8, pp.49-55, (1965)
- 11) 犬飼敏和, 浜登美男, 田下和男: 赤平第一立坑における195+8×F(10)の管理状況, 昭和62年度資源素材関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, F-9, pp.32-35, (Sep.1987)
- 12) 高橋忠幸: 三池鉱業所におけるワイヤロープ取替基準の一考察, 昭和59年度全国地下資源関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, 0-9, pp.31-34, (Oct.1984)
- 13) 上野勲: 鋼索の繰返し曲げ疲労試験結果について(第1報), 運輸技術研究所報告, Vol.3, No.1, pp.82-85, (Jan.1953)
- 14) 上野勲: 鋼索の疲労と断線, 第5回ワイヤロープ研究会講演集, pp.126-131 (1956)

## 第Ⅱ部

### ワイヤロープへのA E検査法 の適用に関する研究



## 第6章 加速度計によるワイヤロープ引張疲労試験中のAEの観測<sup>1)</sup>

### 6.1 緒言

長大橋のハンガーロープに代表されるように、引張疲労を生ずる環境におかれたワイヤロープは、その負荷サイクル数の増加に伴って素線断線が発生し、それが累積して最終破断にいたる。このことから、ワイヤロープの寿命判定の資料を得るために通常行われている引張疲労試験においても、その素線断線の発生時期、数、位置などを確認することが重要な課題となっている。試験中の素線断線の確認は、一般に目視によって行われているが、ロープの内部についてはもちろんのこと、ストランド谷部での断線も確認することが困難で、しかもそのために、何度も試験を中断しなければならない。したがって、目視に代わる、より正確で能率的な断線検出法の開発が望まれている。

素線が破断する際には、破断音とともにひずみエネルギーの解放による弾性波が発生しロープ内を伝播する。これは、AEの一種であり、また、この場合のAEは、一般の工業材料の亀裂進展に伴うAEと比べて十分大きいエネルギーをもつものであるといえる。

著者は、AEの検出要素として加速度計を用いたワイヤロープの素線破断を連続監視するシステムを構成した。これは、パーソナルコンピュータの利用によってシステムの簡略化を図るとともに、素線破断の発生数、時刻のみならずその位置の標定や波形解析も連続的に行おうとするものである。本章では、このシステムを、2種類のワイヤロープの引張疲労試験に適用し、その有効性について検討した結果について述べる。

### 6.2 ワイヤロープのAEについての研究の現況

ワイヤロープの破断監視に初めてAEの手法が導入されたのは、P.A.Lauraらの研究<sup>2)</sup>、<sup>3)</sup>においてである。彼らは、ロープにクランプ留めした加速度計を使うことによって、引張破断試験において、その強度の95%時点での破断予告が可能であることを示している。さらにD.O.HarrisとH.L.Duneganは、より高感度のAE装置を使用することによって、破断試験においては強度の50%時点でのAEを検知できること、また疲労試験においてもその破断予告が十分可能であることを示している<sup>4)</sup>。繊維ロープについても、AE法が適用されており<sup>5)</sup>、J.H.WilliamsとS.S.Leeは、Double-braidedナイロンロープの引張試験においてAE観測を行い、ある程度以上の振幅のAEが出始める時点の荷重値と、最終的なロープ強度との間には一定の関係があることを示した<sup>6)</sup>。その後、ワイヤロープのAEについては、J.T.TaylorとN.F.Caseyが精力的に研究を行っている。まず、ワイ

ヤロープのAEの振幅分布について検討し、素線破断は他の末端部での雑音に比べてかなり大きな振幅をもつものであること、また、その高振幅のAEのイベント数と破断発生数との間には直線関係があることを示しており<sup>7), 8)</sup>、AEの周波数特性についても検討している<sup>9)</sup>。また、それらの実験結果にもとづいて、素線破断検知装置を開発している<sup>10)</sup>。本邦においても、戸田らが加速度計とAEセンサを併用して、50~80%の断線検出率をあげ、その位置標定も行っている<sup>11)</sup>。

### 6.3 実験

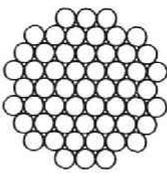
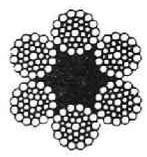
#### 6.3.1 供試体

供試体には、張力部材としてよく用いられるものの代表として、平行線ストランドである New PWS 55 (φ5mm 素線×55本)、一般のよりロープの代表として、6×WS(36)φ30mm (最外層素線径 1.70mm) を用いた。長さは、それぞれ 2,440mm と 1,850mm である。全ての供試体は、末端部をソケット加工 (合金鑄込み) した。なお New PWS は、従来の PWS に長いピッチのよりを加えることによって、その巻取性を改良したものである。各ロープの諸元は、Table 6.1 に示すとおりである。

#### 6.3.2 断線検出システム

Fig.6.1 は、断線検出システムのブロック図である。断線によって発生する弾性波に対するセンサとして、圧電型加速度ピックアップ (EMIC 540-B) を、供試体両端

Table 6.1 供試ロープ諸元

	New PWS 55	6×WS(36)
直径 (mm)	40	30
破断強度 (tonf)	170	51
外層素線径 (mm)	5	1.7
断面積 (mm <sup>2</sup> )	1,080	389
断面形		

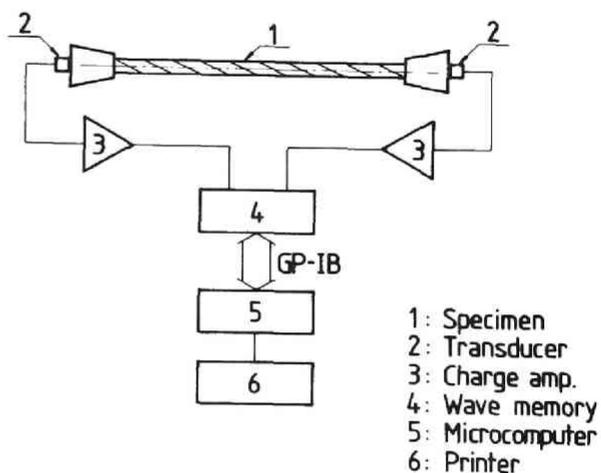


Fig.6.1 断線検出システム

末部の鋳込み合金の端面にそれぞれ1個ずつ接着して使用した。ピックアップをコーン端面に接着したのは、ロープへのクランプ留めや端末金具等に貼付するなどの方法よりも、断線波動の減衰が少ないと考えたからである。また同一のセンサを2個両端に設置して用いたのは、個々の断線検出、計数とともに、両者の波形によってノイズであるか否かを判定できるようにするため、並びに両端での到着時間差から断線位置の標定を行うためである。ピックアップの共振周波数、電荷感度、許容最大加速度は、それぞれ 45kHz, 1.5pc/G, 1kG である。加速度ピックアップからの出力信号は、チャージアンプ (EMIC 690-A) を介してウェーブメモリ (YEW 3652) に取り込まれる。設定したトリガレベルを越える大きさの断線波動は、その発生時刻とともに両チャンネルとも、その波形がパーソナルコンピュータのフロッピディスクに記録される。ウェーブメモリのサンプリングタイムは10 $\mu$ sec である。またフロッピディスクには約 200現象/枚の記録が可能である。

### 6.3.3 実験手順

疲労試験は、200 t 横型引張疲労試験機によって行った。まず、供試体を設置し、平均応力まで荷重を加えた状態において、片側のコーン端面を打撃して、その供試体の弾性波伝播速度を測定した。その後、Table 6.2 に示した応力条件で疲労試験を開始するとともに、断線監視システムを起動させて連続監視を行った。コンピュータの監視プログラム上では、通常、断線検出数の確認や位置の標定、波形解析などが実行されており、断線発生と同時に割込みルーチンへと実行が移行し、波形データの取り込みとフロッピディスクへの記録が終了したのち、通常ルーチンへ復帰するようになっている。断線が、5~10本程度発生した時点（本実験では、繰り返し回数 1~2  $\times 10^5$  回）で疲労試験を終了し、供試体を解体して、実際の断線箇所の数とそれぞれの位置を確認した。

Table 6.2 試験条件

		応力変動幅 (kgf/mm <sup>2</sup> )		破断強度 / 断面積 (kgf/mm <sup>2</sup> )
		$\sigma_{MAX}$	$\sigma_{MIN}$	
New PWS 55	No.1	95	60	155
	No.2	95	80	
6 $\times$ WS(36)	No.1	85	55	140
	No.2	61.5	31.5	

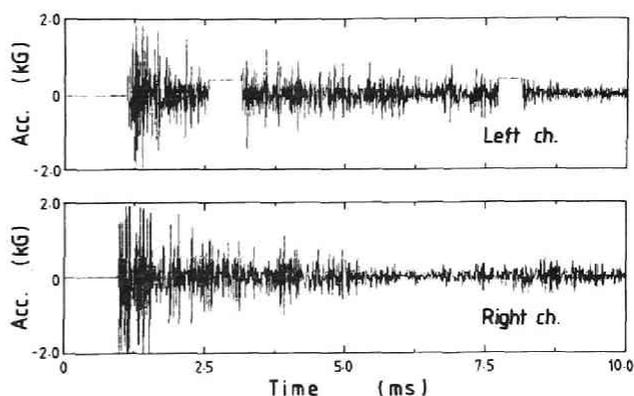
### 6.4 結果

弾性波伝播速度は、New PWS 55 で 4,550 m/s, 6 $\times$ WS(36) では4,020 m/s であった。予想されたとおり、よりロープである WS 型の方が伝播速度が小さくなった。なお、両

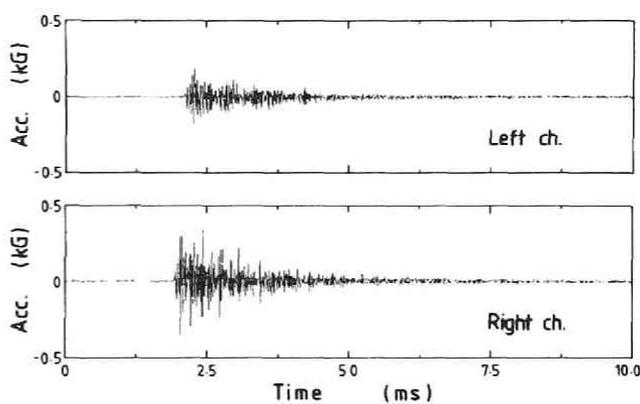
者とも、端末部も含めての伝播速度である。

Fig.6.2 は、断線時の波形記録例である。本実験での断線波動は、20~50kHz を卓越周波数とするもので、5~10msec で減衰することがわかる。(ただし50kHz 以上は測定範囲外である)

PWSでは、その断線時のA Eはかなり強く、その加速度の瞬時最大値は 2,000Gに達している。一方、WSでは、その加速度の瞬時最大値が 300~400 Gで、PWSのその10~20%であった。よりによる影響も考えられるが、この値は、両者の素線断面積ならびに最大応力の値から理解できるものである。(なお、PWSの波形の途中が切れているのは、データ取込みの不手際によるものである。)



(a) New PWS 55



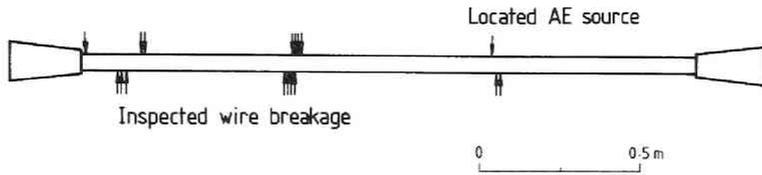
(b) 6xWS(36)

Fig.6.2 断線波動記録例

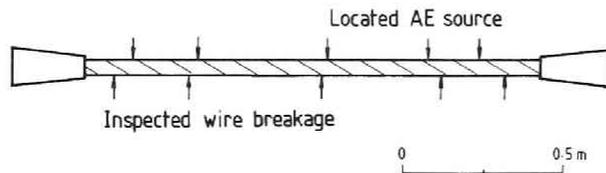
Table 6.3 断線検出結果

		トリガレベル (%)	A E 検出数	断線箇所数	検出率 (%)
New PWS 55	No.1	20	10	10	100
	No.2		8	9	89
6xWS(36)	No.1	10	5	5	100
	No.2		8	8	100

Table 6.3 は、断線検出の結果を示すものである。断線検出率は、概して満足できるものである。ウェブメモリからコンピュータのディスクへデータを転送する時間（約2秒）だけシステムにデッドタイムが生じているが、PWS No.2 において1個の検出漏れが起こったのは、このためであろうと考えられる。



(a) New PWS 55 (No.2)



(b) 6xWS(36) (No.1)

Fig.6.3 AEによる断線位置標定

AEによって標定した断線位置と実際の断線位置を対照して描くと、おのおのの試料について Fig.6.3(a),(b) のようになり、両者はかなりよく一致する。AEによる推定位置（上側の矢印）が、実際の断線位置（下側の矢印）より若干中央よりとなっていることは、実際の弾性波伝播速度が打撃によって求めた値よりもいくらか大きかったことを示すものであり、このことの主因は、端末の合金鋳込み部での伝播速度がロープ部におけるそれよりも小さいことによるものと考えられる。したがって、位置を精度よく標定するためには、あらかじめ特定の位置にノッチをつけたパイロット素線を設けておき、試験の進行に伴って必ずその部分が破断するようにしておくなど、実際の断線波動伝播現象またはそれに近い方法を伝播速度の測定に利用すべきであろうと

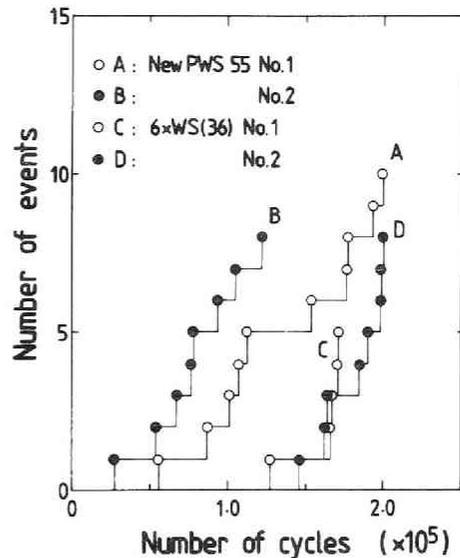


Fig.6.4 繰返し回数と  
検出AEイベント累積数

考えられる。Fig.6.4 は、引張力の繰返し数と検出された断線の発生累積の状況を示すものである。PWSでは、断線はすべて外層素線に生じたため、目視によっても確認できたが、WSでは、断線はすべてストランド谷部で生じたため、目視によっては一本も確認できなかった。

## 6.5 考察

本実験において、断線波動の加速度の大きさが 100～2,000G以上に達するかなり激しいものであったこともあって、その断線はほぼ確実に検出できた。また、トリガレベルは 10～20Gとしたが、この設定値においては、他のノイズによって断線監視が不能となることはほとんどなく、断線検出におけるよい選択性をもってしていると認められた。低応力レベルでの疲労試験や、破断に近づいて断線が多発する時期においても同様の結果が得られるかどうかは、今後検討しなければならないが、ここで述べた計測システムが断線検出に有効であった理由の主なものとして以下のようなことが挙げられる。

まず、ピックアップを直接合金鑄込み端部に接着したことにより、ロープへのクランプ留めや端末金物への貼付などの方法よりも断線波動の減衰が少なく、素線相互または鑄込み合金と素線またはソケットとの摩擦によって発生するノイズに対して、SN比の向上が得られたものと考えられる。また、TaylorとCaseyがソケット内部のバックグラウンドノイズと断線波動には30～40dBの差があると述べている<sup>7)</sup>ことから理解できるとおり、今回の実験で設定したトリガレベルが断線検出に適切であったと考えられる。

ワイヤロープのAEに対するシステムの応答周波数範囲として、HarrisとDuneganは100k～300kHzを設定している<sup>4)</sup>。しかし、これは一般の金属材料のAEに対しては有効と思われるが、ワイヤロープの場合には、それ自体、長尺でありかつ多数の素線の集合体であることから、これより若干低く設定するのが有利であると考えられる。しかしながら、逆にLauraら<sup>3)</sup>の設定した20kHz以下という範囲では、検出の効果が不十分である上、一般の機械的雑振動の影響を受けるのではないかの疑問がある。したがって、ワイヤロープの断線検出に対しては、10k～100kHzをその応答周波数範囲として設定するのが妥当であると考察される。このことは、Caseyらが行ったAEの周波数解析結果<sup>9)</sup>からも支持されることである。本実験のシステムでは、その応答周波数範囲は2～50kHzである。この範囲は、もう少し高域に移行させた方が有効であるとは思えるが、断線検出については、トリガレベルをある程度大きく設定したこともあって、雑振動の影響もなく、一応適当であったと考えている。

Fig.6.2 (b)において明らかであるように、遅れて到達する側の端部における波動の加速度は、他端部でのものよりも、伝播による減衰のため小さくなっている。伝播距離と波

動減衰との関係を、WSの場合についての観測結果にもとづいて図示すると、Fig.6.5 のようになる。縦軸は、加速度の r m s の対数で、外挿によって求めた伝播距離 0 における試料No.2についての値を 1 とする比率で表わしたものである。試料No.1とNo.2の加速度の違いは、その設定応力 (Table 6.2 参照) が異なっていることにもとづくものである。Fig.6.5 に示すように、波動減衰は、ほぼその伝播距離と対数関係にあり、断線波動は、約 2.5m で 1/10 に減衰することがわかる。これは、Taylor と Casey が示した、断線波動はその伝播距離が長くなるほど減衰の度合いが小さくなるという結果<sup>9)</sup>とは一致しない。しかしこのことは、より長い試料についての実験を行って確認されるべきことであろう。

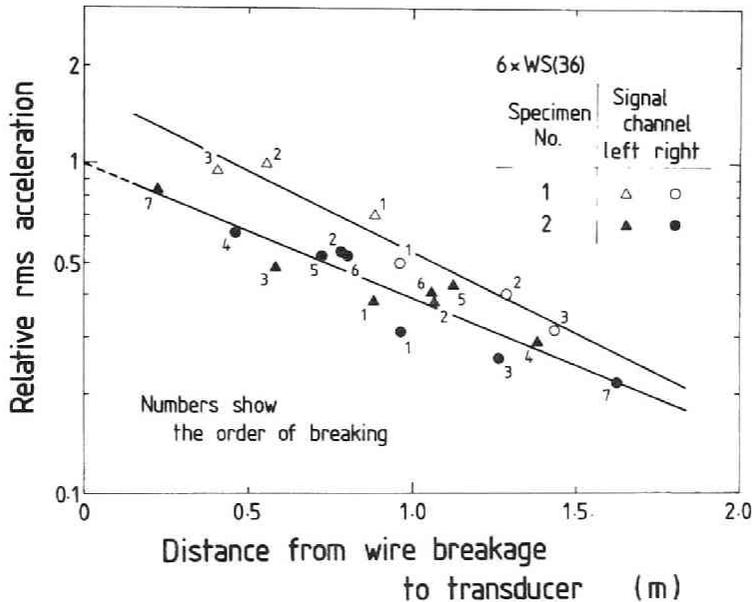


Fig.6.5 断線波動の伝播減衰特性

## 6.6 結 言

ワイヤロープの引張疲労試験における素線断線の検出に、加速度計を用いたAEモニタリングの手法を適用した。この方法によれば、供試ロープを解体することなく試験の続行中に断線の発生数およびそれらの位置をある程度正確に標定でき、かつ無人連続監視が可能であるから、疲労試験自体の能率を大幅に改善できることを確認した。

## 参考文献

- 1) 塚田和彦, 花崎紘一, 藤中雄三: 引張疲労試験時のワイヤロープの断線検出, 水曜会誌, Vol.20, No.6, pp.379-382, (June 1986)
- 2) Laura, P.A., H.Vanderveldt and P.Gaffney: Acoustic Detection of Structural Failure of Mechanical Cables, The Journal of Acoustical Society of America, No.45, No.3, pp.791-793, (1969)
- 3) Laura, P.A., H.Vanderveldt and P.Gaffney: Mechanical Behavior of Stranded Wire Rope and Feasibility of Detection of Cable Failure, MTS Journal, Vol.4, No.3, pp.19-32, (May-June 1970)
- 4) Harris, D.O. and H.L.Dunegan: Acoustic Emission Testing of Wire Rope, Materials Evaluation, Vol.32, No.1, pp.1-6 (Jan.1974)
- 5) Vanderveldt, H. and Quang Tran: Acoustic Emissions from Synthetic Rope, Naval Engineers Journal, pp.65-68, (Dec.1971)
- 6) Williams, J.H., Jr. and S.S.Lee: Acoustic Emission/Rupture Load Characterization of Double-Braided Nylon Rope, Marine Technology, Vol.19, No.3, pp.268-271, (July 1978)
- 7) Taylor, J.T. and N.F.Casey: The Acoustic Emission of Steel Wire Ropes, Wire Industry, Vol.51, No.601, pp.79-82, (Jan.1984)
- 8) Casey N.F. and J.T.Taylor: The Evaluation of Wire Ropes by Acoustic Emission Techniques, British Journal of NDT, pp.351-356, (Nov.1985)
- 9) Casey N.F., H.White and J.T.Taylor: Frequency Analysis of the Signals Generated by the Failure of Constituent Wires of Wire Rope, NDT International, Vol.18, No.6, pp.339-344, (Dec.1985)
- 10) Casey N.F., D.Wedlake, J.T.Taylor and K.M.Holford: Acoustic Detection of Wire Rope Failure, Wire Industry, pp.307-309, (May 1985)
- 11) 戸田, 横田, 半沢, 横山: 引張疲労試験中の断線検出について - 海洋構造物用鋼索の疲労特性に関する研究(1) -, 鉄と鋼, Vol.65, No11, p.551, (1979)

## 第7章 鋼線の磁歪効果とそのワイヤロープ非接触超音波検査への利用<sup>1)</sup>

### 7.1 緒言

一般の超音波検査やAE検査では、その超音波の発生・受信に圧電型の接触式変換子が用いられている。しかし、ワイヤロープを対象とする場合は、ロープの構造が細い素線の集合であるために、超音波伝達における十分な結合性が得られないという問題がある。また、前章で述べたような、変換子をワイヤロープに直接取り付けのではなく、端末ソケット部や金具に接着する方法においても、信号の減衰や摩擦音などの外来ノイズの混入といったS/N上の問題がある。したがって、ワイヤロープに超音波検査やAE検査の方法を応用するにあたっては、任意の位置でしかも非接触式に超音波を発生・受信できる方法の開発が、是非とも必要であると言える。

N.F. Casey<sup>2)</sup> や J.R. Matthews<sup>3)</sup> は、水中でワイヤロープのAEを検出することについて検討している。水など液体を超音波伝達の媒体として用いることは、一般の材料の超音波検査などに利用されており、有効な手段の1つであるが、ワイヤロープに関しては、彼らが意図としている係留索など海洋環境での適用以外、その実用性は低いと考えられる。金属材料に対して媒体を用いることなく非接触式に超音波を発生・受信する方法としては、電磁超音波法がある<sup>4), 5)</sup>。電磁超音波は、金属材料表面においたコイルに高周波電流を流したとき、誘起される渦電流と磁界との相互作用によって材料内にローレンツ力が発生することを利用するもので、逆に、超音波（粒子振動）と磁界との相互作用によって材料内に発生する渦電流をコイルの誘導起電力として検知することによって、超音波を受信することもできる。この方法は、高温状態の鋼材の検査などに実用化されているが、原理的に渦電流の発生が重要な役割を占めており、細い素線の集合体であるワイヤロープへの適用は困難であると思われる。

強磁性体を対象とする場合、もう1つの可能性として、磁歪効果の利用が考えられる。磁歪とは、強磁性体を磁化するとその寸法が変わるつまりひずみが生じる、また逆に、外力を加えてひずみを生じさせるとその磁化が変化する現象をいう。この磁歪効果は、圧電材料が普及する以前には、超音波振動子や変換子<sup>6)</sup>あるいは超音波遅延線<sup>7)</sup>などに広く応用されていたものである。R.B. Thompson は、電磁超音波法においても、磁歪効果が超音波発生副次的メカニズムとして働くと述べており<sup>8)</sup>、また、W. Polanschutz は、強磁性金属中のAEを逆磁歪効果を利用することによって電磁的に検出できると報告している<sup>9)</sup>。

ワイヤロープも強磁性体であり、超音波の発生やAEの検出に磁歪効果が利用できるものと考えられる。本章では、その基礎として、ワイヤロープ用鋼線の磁歪特性について考

察するとともに、磁歪効果を利用して超音波を発生・検出する方法がワイヤロープに適したものであるかどうか、その是非について検討する。

## 7.2 磁気現象を利用する非破壊的材料評価について

磁気ヒステリシス、バルクハウゼン効果、磁気AE、磁歪効果など、強磁性材料には、それ特有の効果や現象がある。これらの磁気的現象あるいは効果は、その材料の材質あるいは微視的構造・組織、さらに応力状態に敏感であって、鉄鋼材料などの非破壊評価への応用が期待できる<sup>10)</sup>。

これまでに、バルクハウゼン効果による材質評価や応力測定<sup>11)</sup>、磁気ヒステリシスを利用したひずみ測定<sup>12)</sup>、磁気ひずみ効果（磁気異方性）を利用した応力状態や残留応力の測定<sup>13), 14), 15)</sup>など、様々な研究がなされている。しかし、D.C.Jilesも述べているように<sup>10)</sup>、磁気現象を利用する非破壊評価は、その適用対象が限られるゆえに、これまで、超音波法などの汎用性のある方法に比べて、十分な研究がなされているとは言い難く、とくに鋼などの多結晶材料の磁気現象については、未だ不明な点が多い。

ここでとりあげるのは、強い磁気ヒステリシス性を有するワイヤロープ用鋼線の磁歪であって、それを超音波発生・受信の基本的機構として利用することである。鉄鋼材料における磁気と応力の基本的関係については、D.C.JilesとD.L.Athertonらによる精力的な研究がある<sup>16)-23)</sup>。ここでは、彼らの方法にのっとって、鋼線の磁歪および逆磁歪現象について考察する。

## 7.3 ワイヤロープ用鋼線の磁歪特性

### 7.3.1 実験

ワイヤロープに使用されている鋼線の磁気および磁歪特性を測定するにおいて、供試体としては、PWS用亜鉛めっき鋼線（直径5.1mm）を用いることにした。PWS鋼線の機械的性質および化学組成は、第5章のTable 5.1に示したとおりである。Fig.7.1は、測定システムの概要を示したものである。鋼線は、50 tonf 縦型引張試験に設置し、弾性限度内の範囲の張力を与える。一方、鋼線の中央部には、ソレノイドが鋼線と同軸に配置されており、それによって一様な軸方向磁界が与えられるようになっている。

ある強磁性体の磁化状態は、その物体が晒されている磁界の他に、応力状態にも影響される。つまり、物体に誘起される磁気誘導（ $B$ ）とひずみ（ $\varepsilon$ ）は、つぎの式のように、磁界の強さ（ $H$ ）と応力（ $\sigma$ ）の関数として表わされる。

$$\begin{aligned}
 B &= B(H, \sigma) \\
 \varepsilon &= \varepsilon(H, \sigma)
 \end{aligned}
 \quad \dots (7.1)$$

ただし、(B)も(ε)も、過去の磁氣的履歴が大きく関与するものであり、(H)と(σ)によって一意に決定されるものではない。本実験は、ワイヤロープの鋼線について、様々な(H, σ)の条件のもとで(B, ε)の値を測定するものであると性格づけできる。(H)(B)はベクトル量、(σ)(ε)は2階のテンソル量であって、いくつかの方向成分からなる物理量であるが、本実験では、鋼線軸方向の成分のみを問題とすることにした。また、応力は正つまり引張応力状態についてのみ測定を行った。

(H, σ)の設定および(B, ε)の測定は、つぎのように行った。まず、磁界の強さ(H)は、ソレノイドコイルに通電する電流(i)をバイ・ポーラ電源(定格45V15A)によって調整することで設定し、(i)の値をもって磁界の強さの指標とした。ただし、反磁界が生じるため(H)と(i)に比例関係はなく、また厳密には、(i)を一定に保っても(H)を一定としたことにはならないことは断っておかなばならない。応力(σ)は、引張試験機の荷重値を鋼線の断面積で除した値として得ることとし、実験においては、便宜上、試験機の張力値(tonf)でもって応力水準を設定することにした。一方、磁気誘導(B)は、励磁用ソレノイドの中央、鋼線と同軸においたサーチコイル(径8mm, 巻数100回)からの出力をフラックスメータによって積分して求めた。ひずみ(ε)は、サーチコイルをおいた鋼線部分に貼付した無誘導ひずみゲージ(KYOWA; KFN-2-350-C9-11)で測定した。

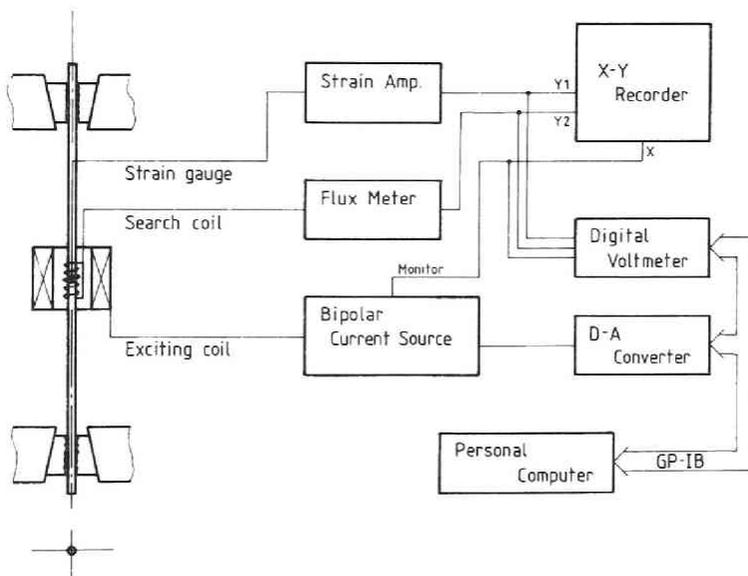


Fig.7.1 鋼線の磁化特性および磁歪特性測定システム

### 7.3.2 結果

磁気誘導 (B) とひずみ (ε) は、ともに過去の履歴 (とくに磁気履歴) に関係する量であって、式(7.1) の関数形を厳密に決定することは困難である。そこで、式(7.1) の微分形式について考えることにする。式(7.1) の微分をとれば、

$$\begin{aligned} \Delta B &= \left. \frac{\partial B}{\partial H} \right|_{\sigma} \Delta H + \left. \frac{\partial B}{\partial \sigma} \right|_H \Delta \sigma \\ \Delta \varepsilon &= \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial H} \right|_{\sigma} \Delta H + \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right|_H \Delta \sigma \end{aligned} \quad \dots (7.2)$$

ここで、 $\left. \frac{\partial B}{\partial H} \right|_{\sigma}$ 、 $\left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right|_H$  は、いわゆる、透磁率と弾性コンプライアンスで、  
 $\left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial H} \right|_{\sigma}$ 、 $\left. \frac{\partial B}{\partial \sigma} \right|_H$  は、磁歪率と逆磁歪率 (応力磁気誘導率) である。

#### 1) $B = B(H, \bar{\sigma})$ ; $\sigma$ 一定

Fig.7.2 は、いくつかの応力一定の条件における、鋼線の磁化特性を示したものである。横軸は、ソレノイドに通電した電流値を表わす。B-H曲線は、通常の強磁性体と同様に、ヒステリシス曲線を描いているが、その形状は、応力水準 (張力水準) によって異なり、張力が大きいほど偏平な形となっている。応力の違いによるB-H曲線の形状の変化は、通常の鉄鋼材料ほど複雑<sup>21)</sup> ではなく、同一の磁界の強さ (H) のもとでは、応力が高いほど磁気誘導 (B) の絶対値が小さくなっている。Fig.7.3 は、Fig.7.2 に示した張力 2.0 tonf と張力 0.5 tonf ( $\sigma = 952, 238 \text{ MPa}$ ; これらの値は、あとで応力による磁化の変化を測定した際の張力の振幅にあたる) のときの磁化曲線において、各磁界の強さでの磁気誘導の値の差 ( $\Delta B = [B]_{\text{hys}}|_{2.0} - [B]_{\text{hys}}|_{0.5}$ ) を求めて、応力差  $\Delta \sigma$  との比  $\left( \frac{\Delta B}{\Delta \sigma} \right)_{\text{hys}}$  として示したものである。

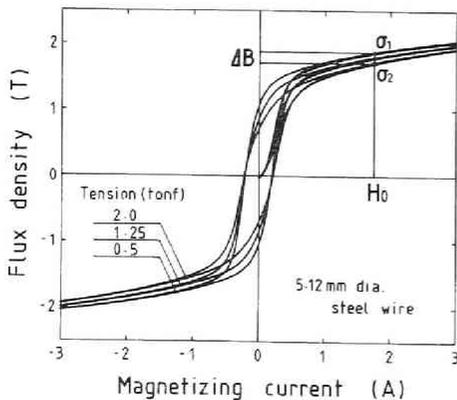


Fig.7.2 鋼線の磁化特性 (B-H曲線)

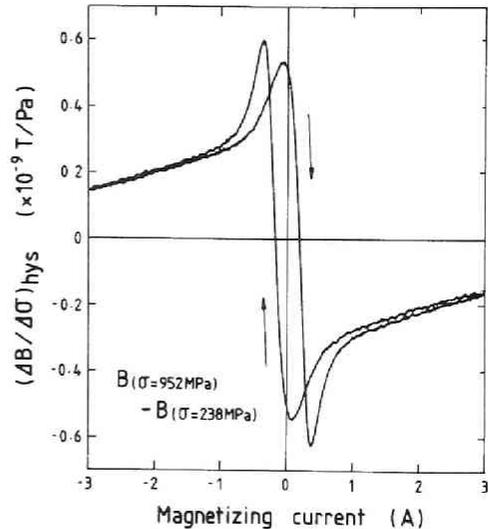


Fig.7.3 応力差と  
磁気誘導の差の比:  $\left( \frac{\Delta B}{\Delta \sigma} \right)_{\text{hys}}$

$$2) \quad \varepsilon = \varepsilon (H, \bar{\sigma}) ; \sigma \text{ 一定}$$

Fig.7.4 は、いくつかの応力水準のもとでの鋼線の磁歪特性を測定したものである。張力を一定に保つことがかなり難しかったため、ひずみの値にかなりのドリフトが認められるが、全体として、 $\varepsilon - H$  曲線も磁化の履歴性を反映してヒステリシス曲線となっている。(なお、磁化電流の範囲は、 $\pm 6 \text{ A}$  である。) 通常の鉄鋼材料では、Fig.7.5 にその例を示したように、応力がゼロの場合は、磁界の強さ ( $H$ ) を大きくしていくと、始めのうちはひずみが増加し、ある ( $H$ ) の値から減少し始め、ついにはひずみが縮みの方向に転ずるという状況を示す。また、応力が大きくなるにつれて、正の磁歪を示す磁界の強さの範囲が小さくなり、ある値以上の引張応力のもとでは、常に負の磁歪を示すようになる<sup>21)</sup> のが一般的である。しかし、ワイヤロープ用鋼線の場合は、Fig.7.4 のように、張力状態のいかんにかかわらず、磁界の強さの全範囲において負の磁歪を示しているようであるが、これは、鋼線が伸線加工によって軸方向にかなりの塑性変形を受けているためであると考えられる。Fig.7.4 では、張力が大きいほど磁歪の絶対量が大きくなっているように見受けられるが、

磁歪のオーダーが、 $10^{-6}$  であって、測定精度を考えると確かなことはいえない。Fig.7.6 は、張力が  $2.0 \text{ tonf}$  ( $952 \text{ MPa}$ ) の条件で測定した磁歪曲線から、その傾きとして微分磁歪率 (ただし単位は  $1/\text{A}$  で、磁化電流値に対する比のままである) を算出したものである。この図は、Fig.7.3 と傾向の良く似た曲線となっているが、このことについては後で考察する。

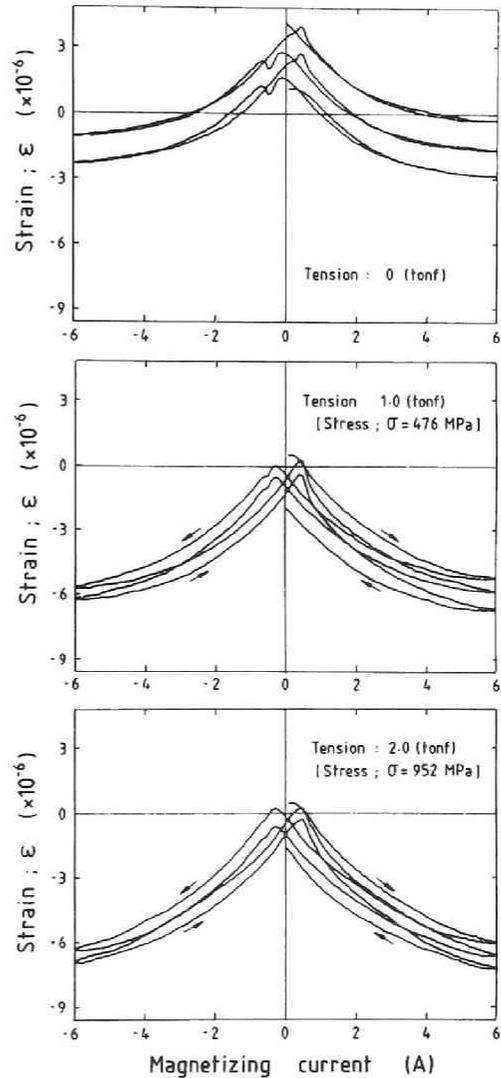


Fig.7.4 鋼線の磁歪特性 ( $\varepsilon - H$  曲線)

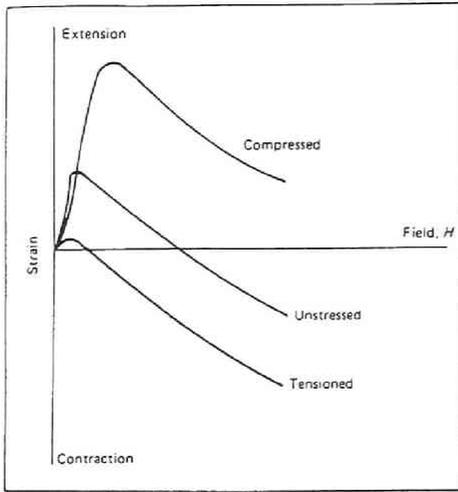


Fig.7.5 一般鋼材の磁歪特性  
(参考文献 21 より)

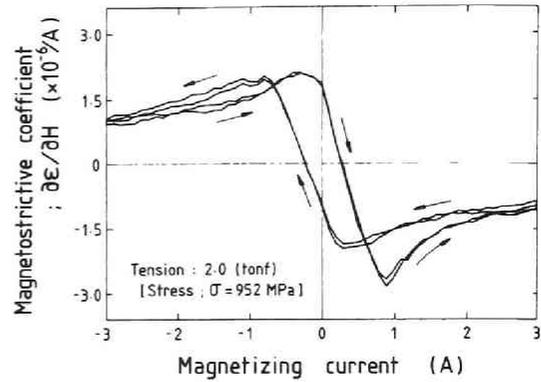


Fig.7.6 微分磁歪率 :  $(\frac{\partial \epsilon}{\partial H})$   
( $\epsilon - H$  曲線の傾き)

### 3) $B = B(\bar{H}, \sigma)$ ; $H$ 一定

一定の磁界のもとで応力変化を与えたときに生ずる磁化の変化の様相は、その時の磁化状態に大きく左右される。Fig.7.7 は、磁界の強さ ( $H$ ) を変えながら、磁気ヒステリシス曲線上のいくつかの磁化状態において、(a) 張力を一端減少させてもとに戻す、(b) 張力を一端増加させてもとに戻すという操作を行ったときの磁気誘導 ( $B$ ) の変化を測定したものである。この図から、ヒステリシス環線が閉塞していない磁界の強さの領域では、応力変化に伴う磁化の変化には、可逆・不可逆両方の成分があることがわかる。Fig.7.8

に示した、張力 1.25tonf (595MPa) の磁気ヒステリシス環線の下降曲線上のいくつかの磁化状態 (a~g) において、鋼線に一定幅の繰返し応力 (張力 0.5~2.0 tonf;  $\Delta\sigma = 714$  MPa) を与えた。Fig.7.9 (a)~(g)

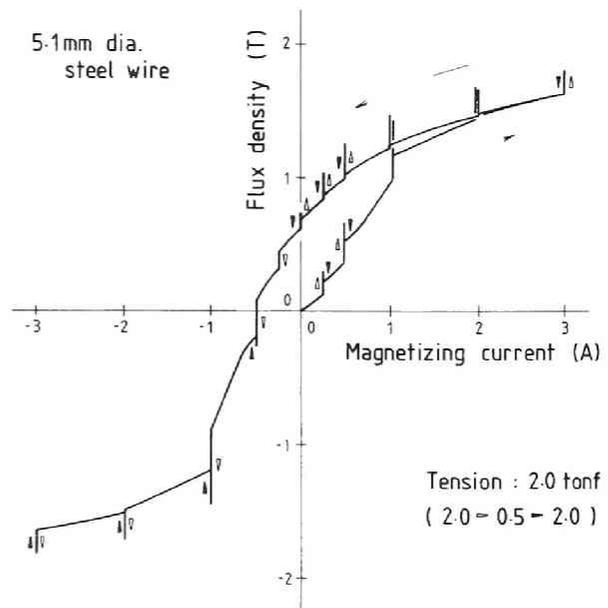


Fig.7.7 応力変化に伴う磁化の変化  
(a) 張力を一端減少させてもとに戻す操作を行った場合

は、そのときの磁化の変化の様子を示したものである。応力による磁化の変化の様相は、鋼線がどうい磁化状態にあったかによってかなりの違いをみせている。ヒステリシス環線が閉塞している範囲の磁化状態

(a,b,f,g の場合)では、応力による磁化の変化は、可逆的でしかも線形な関係にある。一方、ヒステリシス環線が閉塞していない、つまり履歴をもっている磁化状態(c,d,e の場合)では、最初に応力を変化させたときに磁化が大きく不可逆に変化し、その後の繰返しにおいて次第に不可逆変化の割合が少なくなって、数回の繰返しの後には、完全に可逆的で線形な関係に落ち着いている。

(ただし、線形といっても若干のヒステリシス性をもったループ状の曲線となっている) 応力に伴う磁化の変化のうち、不可逆変化の量  $\Delta B_{irr}^{(\sigma)}$  と、可逆変化量の応力に対する比率、つまり、応力磁気誘導率  $(\frac{\partial B}{\partial \sigma})_{rev}$  を Fig.7.9(d) のように定義し、それらを磁界の強さ(磁化電流値)を横軸として描くと、Fig.7.10 (a), (b) のようになる。(a) に示した可逆応力磁気誘導率  $(\frac{\partial B}{\partial \sigma})_{rev}$  は、磁気ヒステリシス環線の上昇曲線上で測定した値( $\blacktriangle$ )と下降曲線上で測定した値( $\nabla$ )とで

は多少の違いが生じている(ヒステリシス性が残る)ものの、おおよそ磁界が正の領域では負、負の領域では正となっている。また、この図は、Fig.7.3 に示した、応力水準の違いの2つの磁気ヒステリシス曲線での磁気誘導の差から求めた  $(\frac{\Delta B}{\Delta \sigma})_{hys}$  の値を描いた曲線とその形において良く一致しており、ヒステリシスのない強い磁界の領域では両者の値が一致している。一方、不可逆変化量  $\Delta B_{irr}^{(\sigma)}$  は、磁気ヒステリシス環線の下降曲線上の磁化状態では負の値( $\nabla$ )を示し、逆に上昇曲線上では正の値( $\blacktriangle$ )を示している。

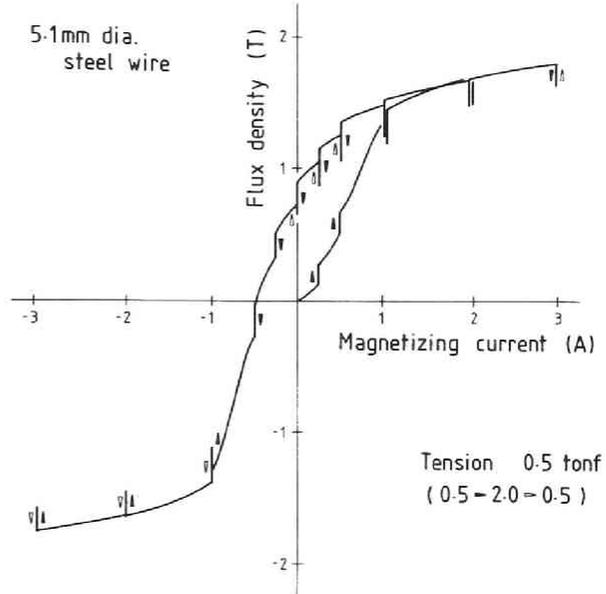


Fig.7.7 応力変化に伴う磁化の変化  
(b) 張力を一端増加させて  
もとに戻す操作を行った場合

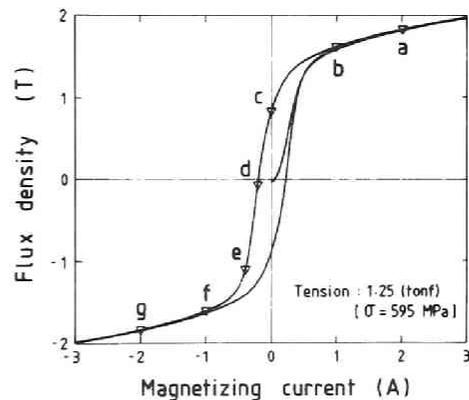


Fig.7.8 張力 1.25 tonf ( $\sigma = 595$  MPa) における磁気ヒステリシス曲線

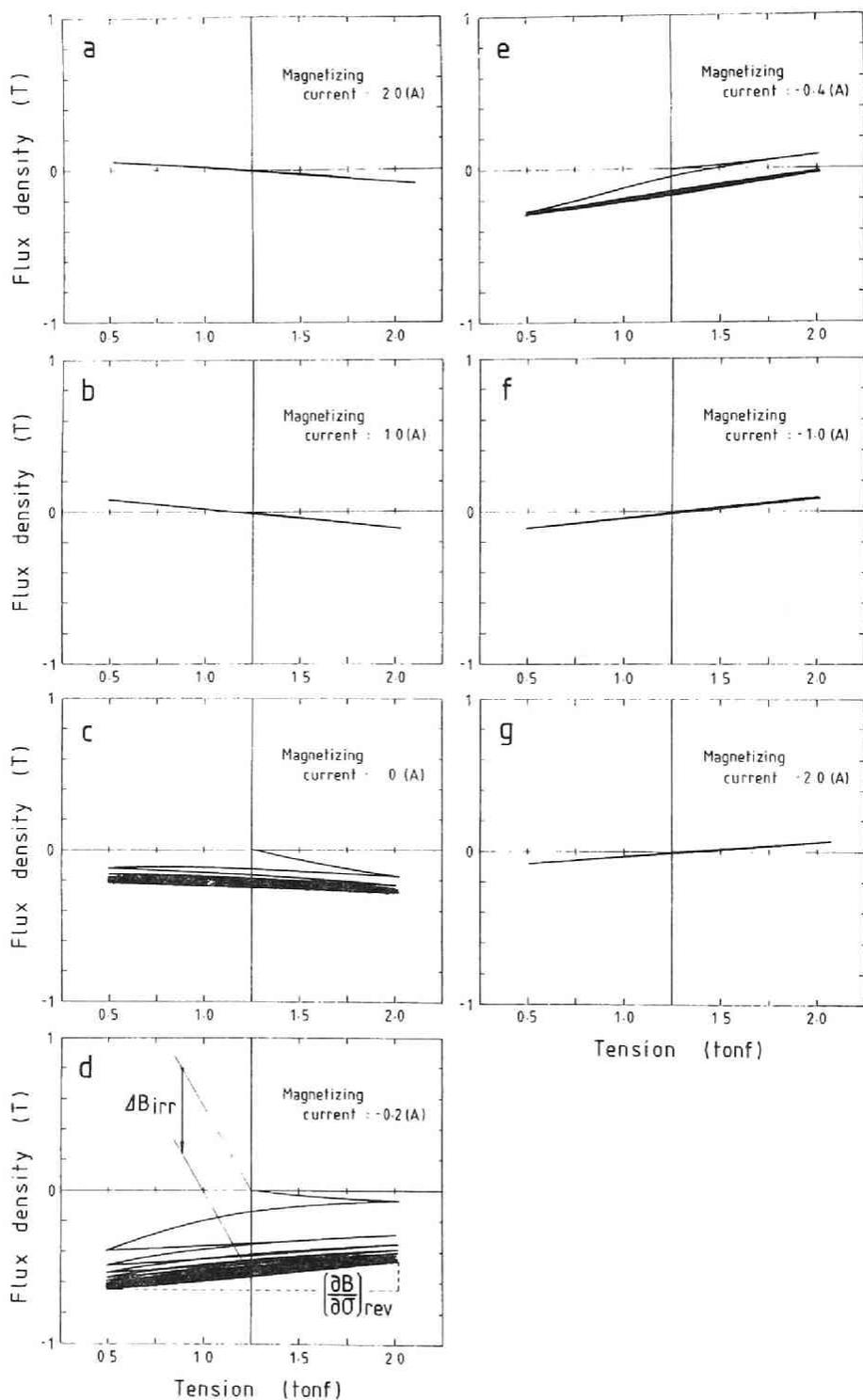
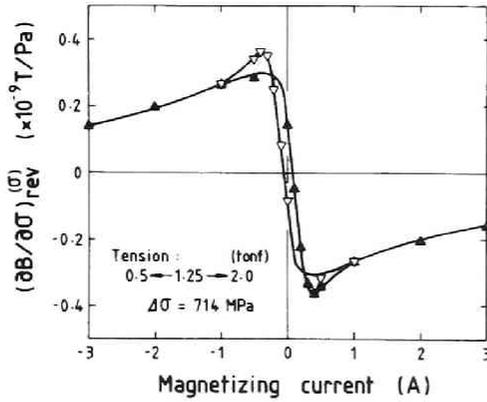
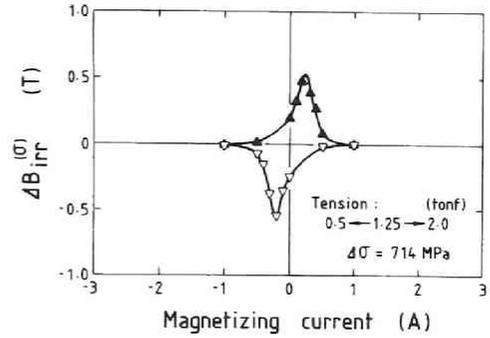


Fig.7.9 繰返し応力を作用させたときの磁化の変化 (a~g は Fig.7.8 の各点に対応する)



(a) 可逆応力磁気誘導率:  $(\frac{\partial B}{\partial \sigma})_{\text{rev}}(\sigma)$



(b) 不可逆成分:  $\Delta B_{\text{irr}}(\sigma)$

Fig.7.10 磁界の強さ(励磁電流値)と応力による磁化の変化の関係

#### 4) アンヒステリティックな磁化

応力変化に伴う磁化の変化に不可逆成分が含まれるのは、そのときの磁化状態が過去の磁気履歴の影響を受けているからである。そこで、履歴の影響のない磁化状態、つまりアンヒステリティック(anhyseretic)な磁化状態について検討する。アンヒステリティックな磁化状態は、一定の直流バイアス磁界のもとで交流消磁を行うことによって実現できる<sup>18), 19), 20)</sup>。Fig.7.11に示したように、磁化電流を一定のオフセット電流を中心として増減させることによって、その磁界の強さH<sub>bias</sub>でのアンヒステリティックな磁化(磁気誘導の値; B<sub>anhys</sub>)を決定することができる。Fig.7.12は、いくつかの磁界の強さのもとでのアンヒステリティックな磁化の値を求めたもので、磁気ヒステリシス・ループ内に(●)で示してある。磁界の強さが大きい領域では、磁気ヒステリシス環線が閉じている、

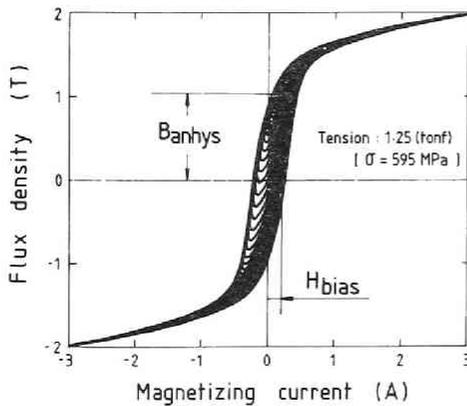


Fig.7.11 アンヒステリティックな磁化を実現する過程

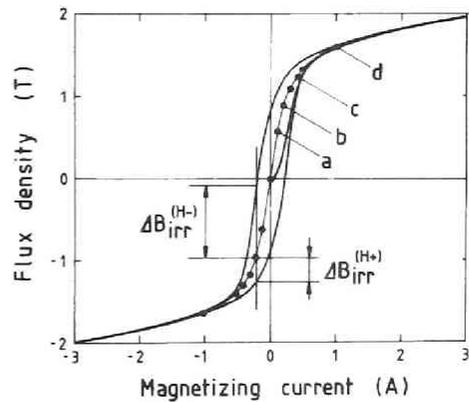


Fig.7.12 磁界の強さ(励磁電流値)とアンヒステリティックな磁化の関係

つまり、その範囲の磁化状態は履歴の影響がないものであるから、当然、アンヒステリティックな磁化の曲線は、その範囲においてヒステリシス環線と一致するものである。アンヒステリティックな磁化状態は過去の磁気履歴に影響がない磁化状態であるから、この状態で応力変動を加えた場合は、その磁化の変化に不可逆成分が含まれないものと予想される。Fig.7.13 は、その結果を示すもので、(a)~(d)は Fig.7.12 中の各点に対応する。アンヒステリティックな磁化状態では、Fig.7.9 に示した場合のような一方向性の不可逆変化は現われていない。しかし応力変動に対する若干のヒステリシスが認められる。(このことは、通常の磁化状態においても認められたことである。) Fig.7.13 におけるループの傾きをアンヒステリティックな磁化状態での応力磁気誘導率  $(\frac{\partial B}{\partial \sigma})_{\text{anhys}}$  と定義し、それを磁界の強さを横軸として描いたのが Fig.7.14 である。また、Fig.7.15 は Fig.7.12 において、アンヒステリティックな磁化の値と磁気ヒステリシス環線における磁化の値の差  $\Delta B_{\text{irr}}^{(H)} = (B_{\text{hys}} - B_{\text{anhys}})$  を求めたもので、磁気履歴の総量、言い換えれば最大不可逆変化量を表わすものといえる。Fig.7.14 と Fig.7.15 は、それぞれ、Fig.7.8 (a),(b) と傾向において良い対応を示している。

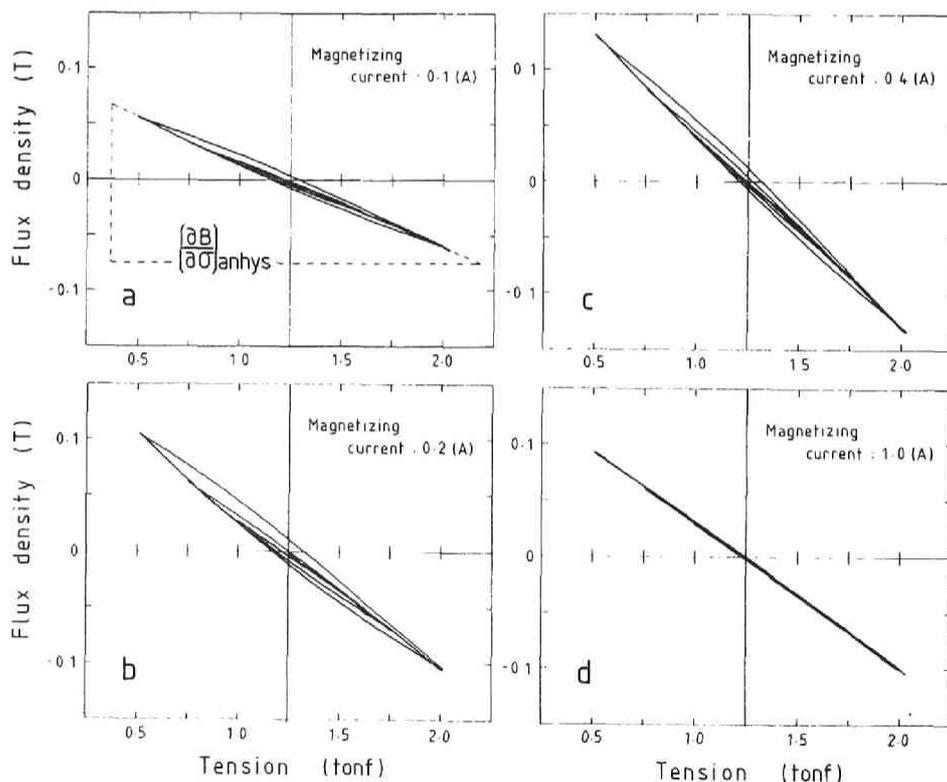


Fig.7.13 アンヒステリティックな磁化状態において  
繰返し応力を作用させたときの磁化の変化  
(a~d は Fig.7.8 中の各点に対応する)

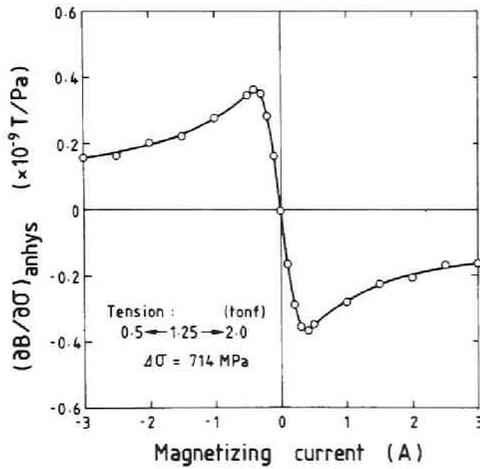


Fig.7.14 アンヒステリティックな磁化状態での  
 応力磁気誘導率： $(\frac{\partial B}{\partial \sigma})_{anhys}$

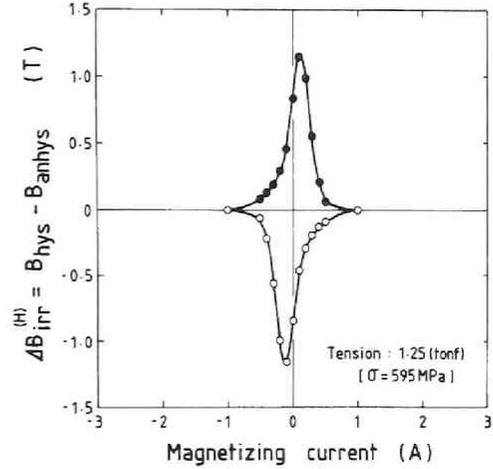


Fig.7.15 アンヒステリティックな磁化とヒステリティックな磁化の差：  
 $\Delta B_{irr}^{(H)} = (B_{hys} - B_{anhys})$

### 7.3.3 考察

#### 1) 磁歪率と応力磁気誘導率（逆磁歪率）の等価性について

7.3.2 の 2) において、Fig.7.6 の微分磁歪率  $(\frac{\partial \epsilon}{\partial H})$  と、Fig.7.3 や Fig.7.10 (a) の応力磁気誘導率  $(\frac{\partial B}{\partial \sigma})$  が、磁界の強さに対して同様の曲線を描くことについて述べた。このことは、磁歪率と応力磁気誘導率の等価性を暗示するものであるが、可逆過程における両者の等価性は、熱力学の立場から説明できることである<sup>23)</sup>。

系のエネルギーとしてひずみエネルギーと静磁エネルギーの両方を考慮する立場をとると、まず準静的過程において外から与えられた仕事 ( $d'W$ ) は、単位体積あたり

$$d'W = \sigma d\epsilon + HdI \quad (I: \text{磁化 } \text{Wb}\cdot\text{m}/\text{m}^3) \quad \dots (7.3)$$

であたえられる。外からなされた仕事 ( $d'W$ ) と外から与えられた熱 ( $d'Q$ ) の和は、内部エネルギーの増加量 ( $dU$ ) に等しいから、

$$d'Q = dU - d'W = dU - \sigma d\epsilon - HdI \quad \dots (7.4)$$

可逆過程においては

$$\frac{d'Q}{T} = dS \quad (S: \text{エントロピー}) \quad \dots (7.5)$$

であるから、

$$TdS = dU - \sigma d\epsilon - HdI \quad \dots (7.6)$$

が成り立つ。(なお、いままであえて  $d'$  なる記号を用いてきたのは、それが全微分  $d$  ではないことを示すためである。) ここで、Gibbs の自由エネルギー ( $G$ ) とその微分形

$$G = U - TS - \sigma \varepsilon - HI \quad \dots (7.7)$$

$$dG = dU - SdT - TdS - \varepsilon d\sigma - \sigma d\varepsilon - I dH - HdI \quad \dots (7.8)$$

について考えると、温度一定の条件下では、(7.6) を考慮して、

$$dG = -\varepsilon d\sigma - I dH \quad \dots (7.9)$$

が成り立つことになる。したがって、ひずみ ( $\varepsilon$ ) と磁化 ( $I$ ) は、それぞれ、エネルギー ( $G$ ) の偏微分係数として、

$$\varepsilon = - \frac{\partial G}{\partial \sigma}, \quad I = - \frac{\partial G}{\partial H} \quad \dots (7.10)$$

のようにあたえられることとなり、

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial H} = - \frac{\partial}{\partial H} \frac{\partial G}{\partial \sigma} = - \frac{\partial}{\partial \sigma} \frac{\partial G}{\partial H} = \frac{\partial I}{\partial \sigma} \quad \dots (7.11)$$

が成り立つことになる。つまり、可逆過程においては、

$$\left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial H} \right|_{\sigma} = \left. \frac{\partial I}{\partial \sigma} \right|_H \quad \dots (7.12)$$

であって、磁歪率と応力による磁化の変化率が全く等価であることが導かれる。今回の実験においては、(H) の設定や (I) の測定において厳密さを欠いているが、上に述べた議論から、微分磁歪率と応力磁気誘導率の値が励磁電流値に対して同様の曲線を描くことは、十分に納得できることである。

## 2) 応力による磁化の変化の現象について

応力状態を変化させることによって起こる磁化の変化  $\Delta B^{(\sigma)}$  には、不可逆成分と可逆成分があることを、7.3.2 の 3) において示した。ここでは、両成分について、現象論的な考察を行う。

< 不可逆成分:  $\Delta B_{irr}^{(\sigma)}$  >

Fig.7.15, Fig.7.10 (b) はそれぞれ  $\Delta B_{irr}^{(H)}$ ,  $\Delta B_{irr}^{(\sigma)}$  を磁界の強さを横軸として描いたものである。これらの図から以下のことがいえる。

- 応力変化に伴う磁化の不可逆変化  $\Delta B_{irr}^{(\sigma)}$  は、一方向性のものであって、その大きさは、現在の磁化状態がアンヒステリティックな磁化状態とどれだけの差にあるか、つまりその磁化状態にどれだけの履歴の影響が含まれているか  $\Delta B_{irr}^{(H)}$  にほぼ比例する。

•ただし、それより大きくなることはない。 $|\Delta B_{\text{irr}}^{(\sigma)}| < |\Delta B_{\text{irr}}^{(H)}|$   
 • $\Delta B_{\text{irr}}^{(H)} = 0$ の領域、つまり、磁気ヒステリシス環線が閉じている強い磁界の範囲では、応力による磁化の変化に不可逆成分が現われない。 $\Delta B_{\text{irr}}^{(H)} = 0 \rightarrow \Delta B_{\text{irr}}^{(\sigma)} = 0$   
 これらのことは、次のように解釈できる。磁気履歴をもった磁化状態（通常の磁化状態）においては、何か（pinning site）によって磁壁の移動が束縛されている。そこで、応力変化を与えるとその束縛が解かれ、アンヒステリティックな磁化に近づくように非可逆的に磁化の変化が生じるが、本実験で与えた応力の振幅では、すべての束縛を開放することはできないため、結果として、 $|\Delta B_{\text{irr}}^{(\sigma)}| < |\Delta B_{\text{irr}}^{(H)}|$  となったというわけである。

$$\langle \text{可逆成分} : \left( \frac{\partial B}{\partial \sigma} \right)_{\text{rev}} (\sigma) \rangle$$

Fig.7.3, Fig.7.10 (a), Fig.7.14 は、すべて応力磁気誘導率に関する量を磁界の強さを横軸として描いたもので、それぞれ  $\left( \frac{\Delta B}{\Delta \sigma} \right)_{\text{hys}}$ ,  $\left( \frac{\partial B}{\partial \sigma} \right)_{\text{rev}} (\sigma)$ ,  $\left( \frac{\partial B}{\partial \sigma} \right)_{\text{anhys}}$  である。これらの図から以下のことがいえる。

- 応力変化とそれによって起こる磁化の可逆変化は、ほぼ線形な関係にある。
- 磁気ヒステリシス環線上の磁化状態における可逆応力磁気誘導率の値  $\left( \frac{\partial B}{\partial \sigma} \right)_{\text{rev}} (\sigma)$  は、アンヒステリティックな磁化状態における応力磁気誘導率の値  $\left( \frac{\partial B}{\partial \sigma} \right)_{\text{hys}}$  とほぼ一致する。
- しかし、応力の繰返しによって生じた磁化の不可逆変化量が、磁気履歴の総量よりも少ない、つまり応力変動によっては履歴を十分に取り去ることができないため、磁界を上昇させる過程で求めた応力磁気誘導率の値と下降させる過程で求めた値には、若干の違いが生じる（ヒステリシス性が残る）ことになる。
- 磁界の強さと可逆応力磁気誘導率の関係を表わす曲線は、応力が異なる条件で求めた2つの磁気ヒステリシス曲線の差から求めた  $\left( \frac{\Delta B}{\Delta \sigma} \right)_{\text{hys}}$  の値の描く曲線と良く似たものとなるが、ヒステリシス性においては、後者ほど強いものではない。
- 強い磁界、つまり磁気ヒステリシス環線が閉じている範囲の磁化状態では、上に挙げた3つの応力磁気誘導率の値がすべて一致する。

$$\left( \frac{\Delta B}{\Delta \sigma} \right)_{\text{hys}} = \left( \frac{\partial B}{\partial \sigma} \right)_{\text{rev}} (\sigma) = \left( \frac{\partial B}{\partial \sigma} \right)_{\text{anhys}}$$

これらの傾向は、応力変化に伴う磁化の変化の可逆成分が、磁界の方向に自発磁化が回転する、回転磁化によって起こるものであると考えると説明ができる。回転磁化は可逆的な変化であって、それは、磁壁が動けない場合に生ずるものであり、その変化の大きさは、その時の磁区分布をそのまま反映したものとなるはずである。したがって、 $\left( \frac{\partial B}{\partial \sigma} \right)_{\text{rev}} (\sigma)$  の値は、アンヒステリティックな磁化状態で求めた  $\left( \frac{\partial B}{\partial \sigma} \right)_{\text{anhys}}$  の値と磁界の強さに対して同様の傾向の曲線となるが、履歴が残ったままで磁壁移動が停止した磁化状態、つまり、応力によってある程度まで磁壁移動が促進されたとはいえ完全にはアンヒステリティ

ックな状態に至っていない状況のもとでは、その曲線に若干の履歴性が残ることになるというわけである。また、履歴のない、磁気ヒステリシス曲線の閉じている、高磁界の範囲では、磁壁移動が完全に終了しており、応力に伴う磁化の変化は、全く可逆的なものとなり、その値は、応力の異なる条件で求めた磁化の差と一致するというわけである。

## 7. 4 磁歪効果を利用した超音波の非接触励起・検出

### 7. 4. 1 鋼線への適用

前節で確認したように、鋼線の軸方向に磁界を与えると、鋼線はその方向に縮む。したがって、鋼線と同軸に配置したコイルにパルス状の電流を送り込むことによって瞬時的な磁界の変化を与えてやれば、鋼線内に超音波を励起することができる。また逆に、鋼線を磁化させておけば、応力変化があった場合にはその磁化が変化することになるから、鋼線内を伝播してくる弾性波（応力波）によって生ずる瞬時的な磁化の変化を、鋼線と同軸に配置したコイルに生ずる誘導起電力として検出することができる。ここでは、この2つのことについて実験的に確認する。

#### 1) 超音波の励起

Fig.7.16 は、磁歪効果によって鋼線内に超音波を励起する実験の装置を示したものである。試料は、前節でその磁歪特性を測定したPWS鋼線である。試料中央に、鋼線と同軸に1,000回巻のコイル（巻幅10mm）をおき、それに50V peakのパルス電圧（パルス幅3.5 $\mu$ s）を印加する。急激な磁界の変化によって発生した超音波は、試料の片端に接着した圧電素子（PZT）によって検出される。なお、超音波発生用コイルを置いた試料部分は、ソレノイド（前節で用いたものと同じ）によって一定の強さに磁化される。ソレノイドに流す電流を-3から+3Aまで増加させながら、つまり磁気ヒステリシス環線の上昇曲線上のいくつかの磁界の強さのもとで、超音波を発生させることを行った。Fig.7.17 は、その際にPZTで観測された超音波の検出波形を示したものである。磁化電流0.2Aを境として波形の正負が逆転していることがわかる。なお、ウェーブメモリのサンプリングタイムは0.1 $\mu$ sで、波形は256回のアベレージングを行って得たものである。Fig.7.18 は、検出波形のPeak to Peak値を、励磁電流値すなわち外部磁界の強さを横軸として描いたものである。

#### 2) 超音波の検出

Fig.7.19 は、逆磁歪効果によって鋼線内を伝播している超音波を検出する実験の装置を示したものである。1)で述べた実験における送信と受信とを全く逆にしたもので、PZTにパルス電圧を印加して超音波を発生させ、伝播して来た超音波を試料中央のコイルで検出するものである。Fig.7.20 は、Fig.7.17と同様、各励磁電流値のもとでのコイル

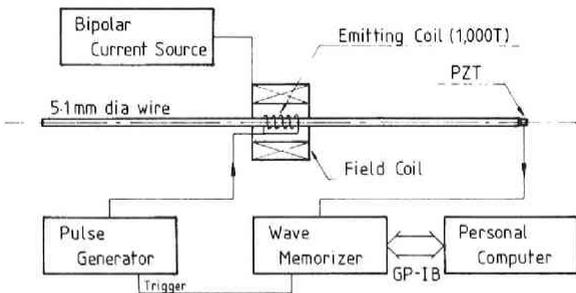


Fig.7.16 磁歪効果によって鋼線内に超音波を励起させる実験

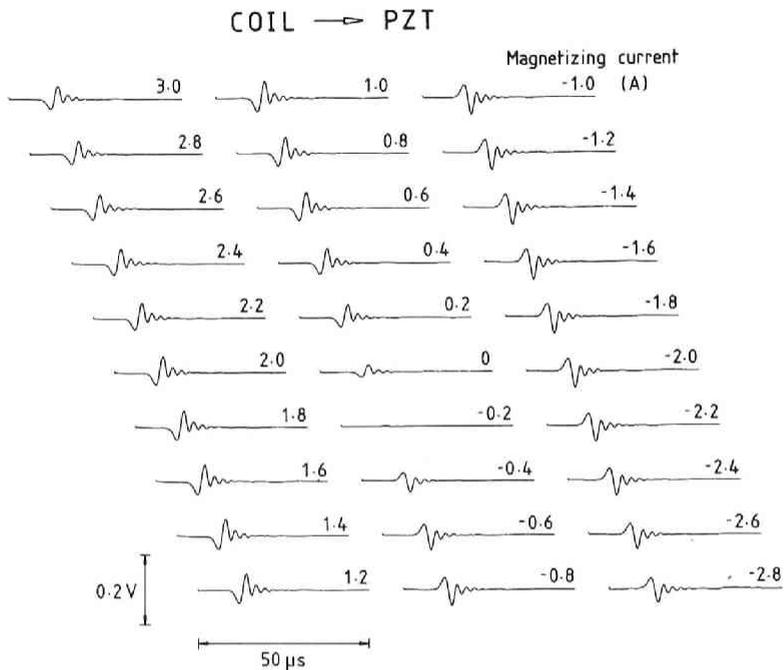
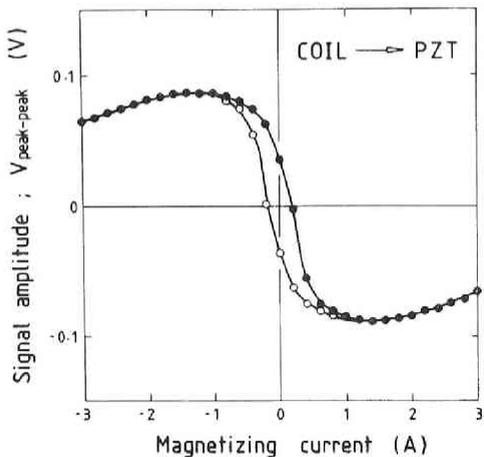


Fig.7.17 検出波形 (コイルで発信, PZTで受信)

← Fig.7.18 磁界の強さ (励磁電流値) と励起される超音波の大きさ (受信波形の peak to peak 値) の関係

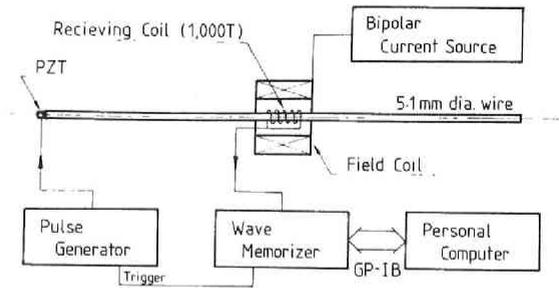


Fig.7.19 逆磁歪効果によって鋼線中を伝播している超音波を検出する実験

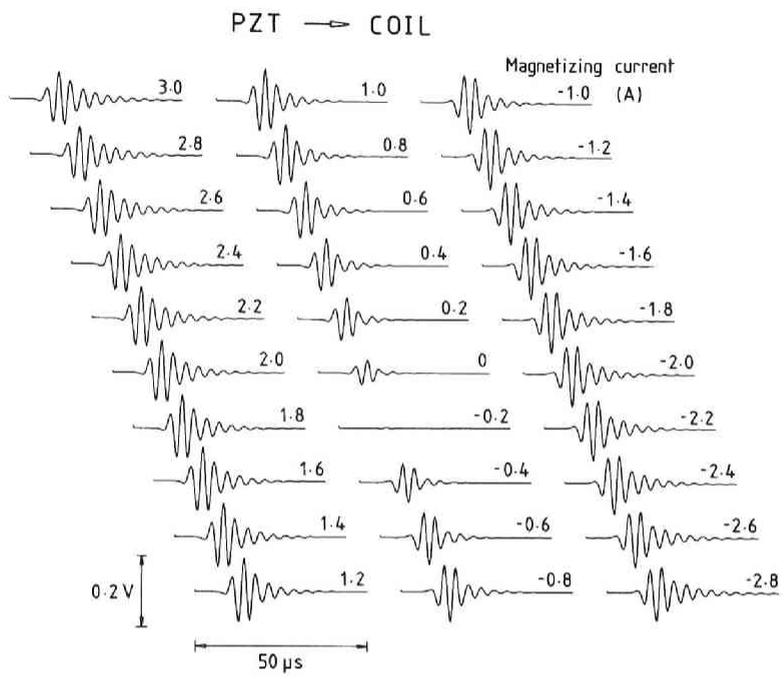
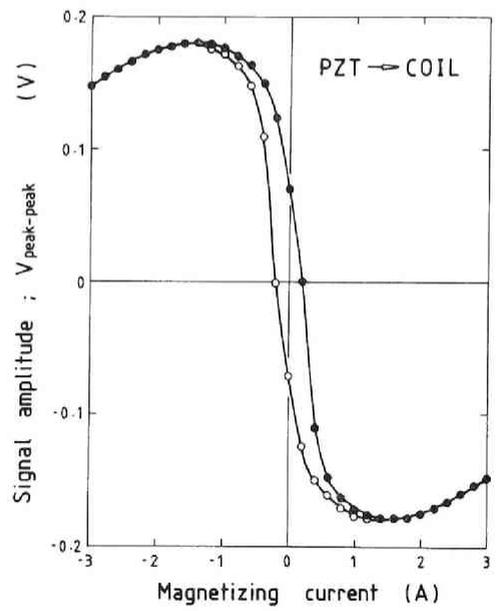


Fig.7.20 検出波形 (P Z Tで発信, コイルで受信)

← Fig.7.21 磁界の強さ (励磁電流値) と検出される超音波の大きさ (受信波形の peak to peak 値) の関係

による観測波形を示したもので、検出の場合も、励起の場合と同様に磁化電流 0.2A を境として波形の正負が逆転している。Fig.7.21 は、検出波形の Peak to Peak 値を、励磁電流値すなわち外部磁界の強さを横軸として描いたものである。

Fig.7.18 と Fig.7.21 は、全く同様の結果を与えており、超音波の発生においても検出においても、ともに磁化電流値としては 1.5A 程度にするのが、有利であるといえる。発生において、コイルによって与えた瞬時磁界と超音波との変換効率をきめるのは、磁歪率である。また検出において、超音波と磁化変化によって誘起されるコイルの起電力との変換効率を決めるのは、応力磁気誘導率である。したがって、発生・検出の効率が磁界の強さに対してともに同様の傾向をもつことは、7.3.3 において考察した、磁歪率と応力磁気誘導率の等価性から、必然的に結論づけられることである。しかし、Fig.7.18 や Fig.7.21 の曲線は、鋼線の磁歪測定において求めた磁歪率や可逆応力磁気誘導率の曲線とよく似た傾向はもつものの、必ずしも一致しているわけではない。超音波の発生・検出の過程は動的なものであって、磁界や磁化の瞬時的な変化の際には、それに伴って材料内に渦電流が生じる。したがって、実際の現象には、この渦電流が大きく関与しているものと考えられ、このことが、静的な過程で求めた Fig.7.6 や Fig.7.10 (a) の曲線が Fig.7.18 や Fig.7.21 と必ずしも一致するものとはなっていない理由であると考えられる。

#### 7.4.2 ワイヤロープへの適用

磁歪効果を利用して超音波を非接触に励起・検出できることをワイヤロープ用鋼線において確認したので、次に実際のより構造ロープに対しての実験を行った。Fig.7.22 は、その実験の概要を示したものである。試料は、直径 16mm の 6×7 ロープで、ラングよりのものと普通よりのものを用意した。それらの諸元は、Table 7.1 に示したとおりである。より構造ロープの場合は、ロープの締め具合が超音波の励起・検出の効率や伝播減衰に大きく影響すると考えられるので、ロープを引張試験機に設置して、いくつかの段階の張力 (0.5~3.5tonf) を加えることにした。超音波励起用のコイルは

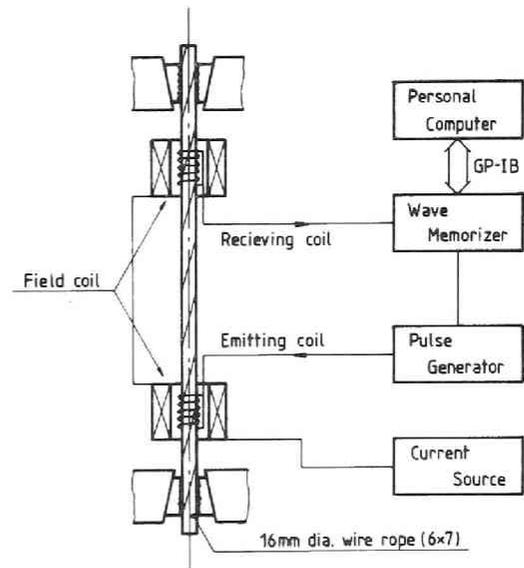
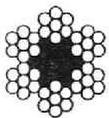


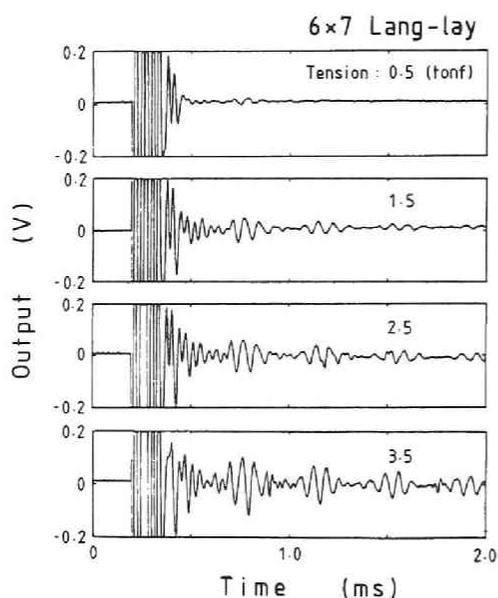
Fig.7.22 ワイヤロープでの  
超音波の非接触励起・検出

100回巻で、検出用のコイルは 2,000回巻である。超音波を励起させるための瞬時磁界は、15 kV で充電したコンデンサからの放電電流を励起用コイルに流すことによって発生させることにした。放電電流の瞬時値は約 600 A で、周波数は約 100kHz である。

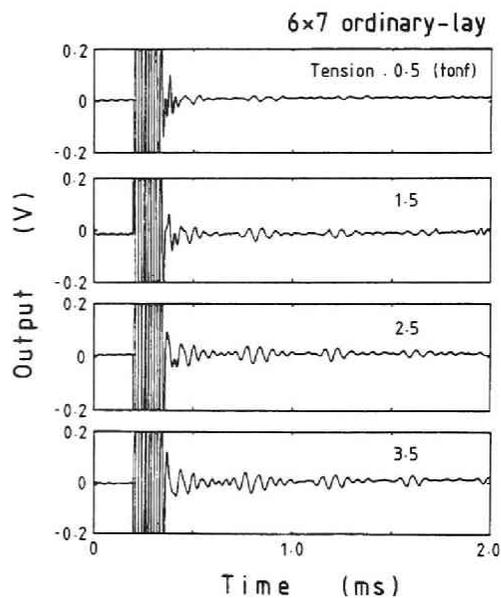
Fig.7.23 (a),(b) は、その結果を示したものである。測定波形の最初のところが振切れたようになってきているのは、放電の際に発生した電磁波を検出コイルが直接的に検知したものであり、それ以後に繰返し現われている波形が、ロープ内を反

Table 7.1 供試ロープ諸元

6×7 (普通より, ラングより)		
直径	16	mm
外層素線径	1.78	mm
断面積	105	mm <sup>2</sup>
破断強度	16.9	tonf
断面形		



(a) 6×7ラングより



(b) 6×7普通より

Fig.7.23 観測波形 (ワイヤロープの張力による変化)

射・伝播している波動を示すものである。これらの図から、通常より構造ロープにおいても、磁歪効果によって非接触式に超音波を励起・検出できることがわかる。より構造ロープの場合は、張力が大きくロープが良く締まった状態であるほど発生と検出の効率が良くなるが、ある程度以上の張力のもとでは、ほぼ一定の効率となる傾向があるといえる。また、普通よりロープよりもラングよりロープのほうが、張力による影響が大きいようで

ある。記録上には、ロープ内を繰返し反射・伝播している波動を次々検出している小波形が認められるが、それらの波形の大きさの比はどの張力でもそれほど変わらないように見受けられる。したがって、張力が大きいほど検出される波形が大きくなるのは、ロープのしまりによって波動伝播の減衰が少なくなることによるよりも、超音波の励起や発生効率そのものが良くなることによる影響の方が大きいと考えられる。

## 7.5 結 言

ワイヤロープの超音波検査やAE検査をより実用性の高いものとするために、磁歪効果を利用して、ロープと非接触に超音波を励起・検出する方法を開発した。

まず、ワイヤロープ用の鋼線の磁歪特性について検討し、以下のことが明らかとなった。

1) ワイヤロープ用鋼線は、伸線加工段階での塑性変形の影響が強く、一般の鋼材と異なって、磁界の強さの全範囲において負の磁歪を示す材料である。

2) 応力変化に伴って現われる磁化の変化には、不可逆成分と可逆成分がある。

3) 不可逆成分の大きさは、現在の磁化状態とアンヒステリティックな磁化状態との磁気誘導の差（つまり総履歴量）にほぼ比例するが、それより大きくなることはない。

4) 一方、可逆変化の大きさの指標である可逆応力磁気誘導率の値は、ヒステリシスの影響しない強い磁界のもとでは、応力の異なる条件で測定した磁気ヒステリシス曲線における磁気誘導の差の応力差に対する比や、アンヒステリティックな磁化状態でもとめた応力磁気誘導率の値と、完全に一致するが、ヒステリシス環線内の弱い磁界のもとでは、両者のちょうど中間的な傾向を示すものとなる。

5) 磁歪曲線から求めた微分磁歪率と、可逆応力磁気誘導率は、ともに磁界の強さに対して同様な傾向の曲線を描くが、このことは、熱力学的考察によって導かれる磁歪率と応力磁化変動率の等価性によって保証されることである。

つぎに、鋼線に対して、磁歪効果を利用して非接触に超音波を励起・検出できることを実験的に確認するとともに、超音波を励起・検出するにあたって、最適な外部磁界の強さが存在することを明らかにした。さらに、実際のより構造ロープを対象とした実験を行って、この電磁的な非接触超音波励起・検出法が、ワイヤロープの超音波検査およびAE検査に十分実用できるものであることを確認した。

## 参考文献

- 1) 塚田和彦, 花崎紘一, 藤中雄三: ワイヤロープの非接触検査における磁歪効果の利用について, 日本非破壊検査協会, 第3分科会資料, No.3896, pp.9-16, (May 1988)
- 2) Casey, N.F., K.M.Holford and J.T.Taylor: The Acoustic Evaluation of Wire Ropes Immersed in Water, NDT International, Vol.20, No.3, pp.173-176, (June 1987)
- 3) Matthews, J.R. and M.R.Black: Acoustic Emission Signature of Variable Depth Sonar Tow Cable, International Advances in Nondestructive Testing, Vol.7, pp.181-214, (1981)
- 4) Kawashima, K.: Theory and Numerical Calculation of the Acoustic Field Produced in Metal by an Electromagnetic Ultrasonic Transducer, The Journal of Acoustical Society of America, Vol.60, No.5, pp.1089-1099, (Nov.1976)
- 5) 川島捷宏: 電磁超音波の基礎と応用, 非破壊検査, Vol.34, No.11, pp.796-803, (Nov.1985)
- 6) 菊池喜充: 磁歪振動と超音波, 増補版, コロナ社, (1959)
- 7) たとえば, 実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦監修: 超音波便覧, 日刊工業新聞社, p.779, (1960)
- 8) Thompson, R.B.: Mechanisms of Electromagnetic Generation and Detection of Ultrasonic Lamb Waves in Iron-Nickel Alloy Polycrystals, Journal of Applied Physics, Vol.48, No.12, pp.4942-4950, (Dec.1977)
- 9) Polanschutz, W.: Inverse Magnetostrictive Effect and Electromagnetic Non-destructive Testing Methods, NDT International, Vol.19, No.4, pp.249-258, (Aug.1986)
- 10) Jiles, D.C.: Review of Magnetic Methods for Nondestructive Evaluation, NDT International, Vol.21, No.5, pp.311-319, (Oct.1988)
- 11) 古屋泰文, 島田平八: バルクハウゼンノイズ解析による材料強度評価, 非破壊検査, Vol.35, No.8, pp.532-537, (Aug.1986)
- 12) 小幡充男, 中居則彦, 伊藤勇一, 島田平八: 磁化曲線の変曲点を利用した非接触ひずみ測定, 昭和62年度日本非破壊検査協会春季大会, 非破壊検査, Vol.36, No.2別冊, pp.152-153, (Feb.1987)
- 13) 吉永昭男, 滝沢千嘉子, 吉井徳治, 熊谷親徳, 山田久俊: 磁気ひずみ効果を利用した残留応力の測定(せん断応力差積分法を用いた場合), 日本機械学会論文集(第1部), Vol.43, No.365, pp.65-75, (1977)
- 14) 安福精一, 磯野敏雄: 磁気プローブによる溶接部残留応力分布の測定, 非破壊検査, Vol.35, No.11, pp.805-810, (Nov.1986)
- 15) 柏谷賢治, 坂本博, 伊藤昌之, 上野善且, 山田一: 交流消磁法を併用した磁気異方性センサーによる応力測定, 非破壊検査, Vol.34, No.3, pp.201-207, (Mar.1985)

- 16) Atherton, D.L., L.W. Coathup, D.C. Jiles, L. Longo, C. Welbourn and A. Teitsma : Stress Induced Magnetization Changes of Steel Pipes — Laboratory Tests, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-19, No.4, pp.1564-1568, (July 1983)
- 17) Atherton, D.L., C. Welbourn, D.C. Jiles, L. Reynolds and J. Scott-Thomas : Stress Induced Magnetization Changes of Steel Pipes — Laboratory Tests, Part II, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-20, No.6, pp.2129-2136, (Nov.1984)
- 18) Jiles, D.C. and D.L. Atherton : Theory of the Magnetisation Process in Ferromagnets and its Application to the Magnetomechanical Effect, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol.17, No.6, pp.1265-1281, (1984)
- 19) Jiles, D.C., D.L. Atherton, H.E. Lassen, D. Noble, J. deVette and T. Astle : Micro-computer-based System for Control of Applied Uniaxial Stress and Magnetic Field, Review Scientific Instruments, Vol.55, No.11, pp.1843-1848, (Nov.1984)
- 20) Dobranski, L.G., D.C. Jiles, and D.L. Atherton : Dependence of the Anhyseretic Magnetization on Uniaxial Stress, Journal of Applied Physics, Vol.57, No.1, pp.4229-4231, (Apr.1985)
- 21) Atherton, D.L. and D.C. Jiles : Effects of Stress on Magnetization, NDT International, Vol.19, No.1, pp.15-19, (Feb.1986)
- 22) Atherton, D.L. and J.A. Szpunar : Effect of Stress on Magnetization and Magnetostriction in Pipeline Steel, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-22, No.5, pp.514-516, (Sep.1986)
- 23) Atherton, D.L., T. Sudersena Rao, Virginia De Sa and M. Schönächler : Thermodynamic Correlation Tests between Magnetostrictive and Magnetomechanical Effects in 2% Mn Pipeline Steel, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-24, No.5, pp.2177-2180, (Sep.1988)

## 8.1 緒言

第7章において、ワイヤロープ用鋼線の磁歪・逆磁歪特性について検討し、この性質を利用することによって、鋼線やワイヤロープ内に弾性波を非接触で励起できること、また逆に、伝播中の弾性波を非接触で検出できることを示した。このことは、ワイヤロープ中で素線が破断したときに発生するAEを検出するのに利用することができる。しかもこの方法は、ロープと同軸になるように配置したコイルを検出器とするものであるから、第6章で述べたような加速度計を端末に接着するような方式とは違って、ロープ内を伝播している波動を、なんら介在物を通すことなく直接的に検出することができ、再現性や、ソケット内部等でのノイズとの弁別性においても、優れた方法であると期待される。

そこで、いくつかの構造の異なるワイヤロープ試料について引張試験を行い、この方法による素線破断AEの検出を試み、第6章で述べた加速度計による方法との比較検討を行った。本章では、その実験結果について述べるとともに、この方法によって検出される波動の周波数および距離減衰特性について考察する。

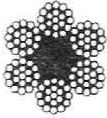
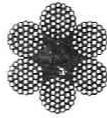
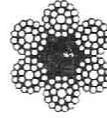
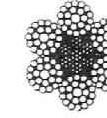
## 8.2 実験

本研究で行う引張試験に用いた試料は、すべて直径16mmのB種ワイヤロープで、その構造・諸元は、Table 8.1 に示したとおりである。各試料の長さは2mで、両端に垂鉛コーンを取り付けて、横型引張試験機に装着できるようにした。Fig.8.1 は、実験装置の概略を示したものである。AEの検出は、ロープと同軸に配置した直径25mm、巻幅40mm、巻数1,000回のコイルによって行った。このコイルは、その部分のロープに長手方向の外部磁界を与えるために設けた電磁石の極間中央に置かれたものであり、この実験では同じセットをロープに沿った2か所に配置した。極間部分のロープが磁気飽和の状態になるように、これらの電磁石にはともに8,000ATの起磁力を与えた。検出コイル付近のロープを近飽和状態まで強く磁化したのは、7.3.2 で述べたごとく、応力変化によって生ずる磁化の変化が可逆的となる状態を実現するためである。一方、片側のコーン部端面には、第6章の実験と同じように加速度ピックアップを接着し、その出力も比較のために記録するようにした。

試験開始後は、引張荷重を増加させながら、素線破断が発生するたびに、2つのコイルの出力電圧波形（あるいは、一つのコイルと加速度計の出力）を、一端2チャンネルのウエ

ープメモリに記憶させ、それをパーソナルコンピュータに転送しディスクに保存するようにした。なお、本研究では、ロープ表面の数か所において素線にあらかじめのこ刃によってノッチを入れておき、素線の破断は必ずその場所で発生するようにした。また、検出コイルからの出力電圧は、十分な大きさをもっていたので、なんら増幅を行わずに直接ウェーブメモリに導いた。なお、ウェーブメモリのサンプリングタイムは5または1 $\mu$ s、電圧の分解能は10ビット、ディスクに保存したデータは各チャンネル3072ワードである。

Table 8.1 供試ワイヤロープ（直径16mm）の諸元

ロープ構造	6×7 ラングより	6×19 普通より	6×37 普通より	6×Fi(29) 普通より	7×7+6×Fi(29) 普通より
外層素線径	1.78 mm	1.06 mm	0.76 mm	0.92 mm	0.92 mm
断面積	105 mm <sup>2</sup>	100 mm <sup>2</sup>	101 mm <sup>2</sup>	109 mm <sup>2</sup>	128 mm <sup>2</sup>
規定切断荷重	15.5 tonf	14.1 tonf	13.8 tonf	15.4 tonf	17.6 tonf
単位重量	0.950 kgf/m	0.932 kgf/m	0.920 kgf/m	1.01 kgf/m	1.13 kgf/m
断面形					

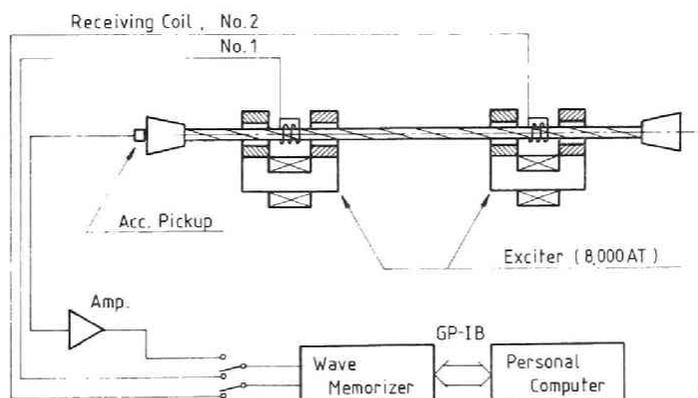


Fig.8.1 実験装置および素線破断AE非接触検出システム

### 8.3 結果

Fig.8.2 は、6×19（ $\phi$ 16mm、普通より）の引張試験において、あらかじめノッチをつけた素線が破断したときに得られた両チャンネルの検出コイルの信号電圧波形（サンプリング

グタイム $5\mu\text{s}$ )を示したものである。出力電圧は $10\text{V}$ をこえるほどのものであり、この方法が感度のよい方法であることがわかる。また、素線破断時の波動は、ロープ内を往復伝播する間、約 $10\text{ms}$ で減衰することがわかる。Fig.8.3は、同じく $6\times 19$ についての結果で、上図がソケットに接着した加速度ピックアップ(1ch)の出力、下図がコイル(2ch)からの出力である。この図からも、コイルによる検出は、端末部に接着した加速度計による方法よりも高感度であることがわかる。しかも、コイルによる受信波形からは、素線破断時に発生した波動の最初の到達波だけでなく、その端末からの反射波も確実に識別できることがわかる。これらの反射波の到達時刻を讀取ることによって、素線破断の発生位置を、両コイル間だけでなくロープ全区間にわたって、精度よく標定することが可能となる。

Fig.8.4は、構造の異なる5つのロープ試料についての素線破断AEの検出電圧波形を併示したものである。これらと比較すると、まず、波動の振幅は素線破断した素線の断面積にほぼ比例していることがわかる。波形の性状もロープ構造の違いを反映してそれぞれかなり異なっているが、 $6\times 37$ ,  $6\times \text{Fi}(29)$ ,  $7\times 7+6\times \text{Fi}(29)$ の3つは、ともに高周波成分を含んだ似た波形となっていることがわかる。

Fig.8.2, 8.3, 8.4は、ともに近飽和磁化状態における検出波形を示したものである。しかし、7.3.2で述べたとおり、励磁電流値を0とした残留磁化状態においても、応力変

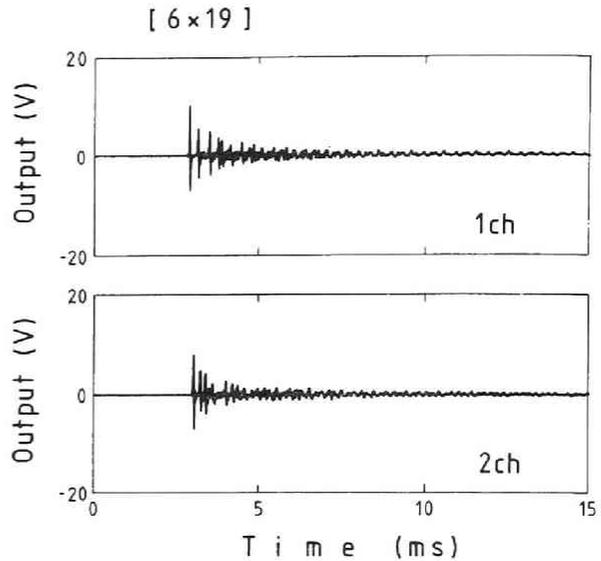


Fig.8.2 素線破断AEの検出波形例  
( $6\times 19$ の場合)

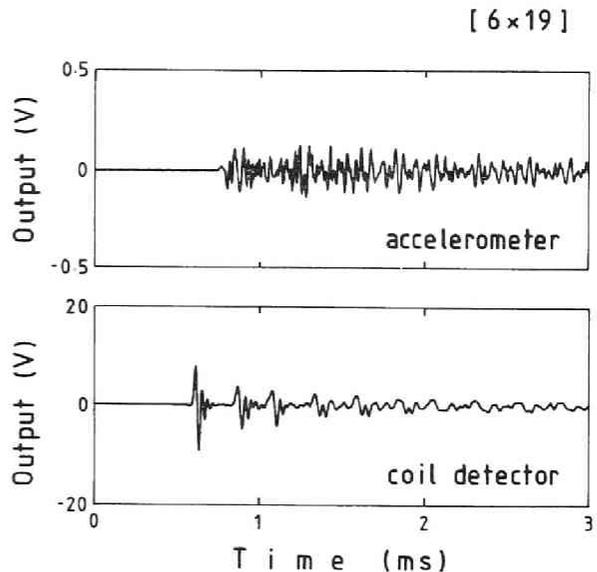
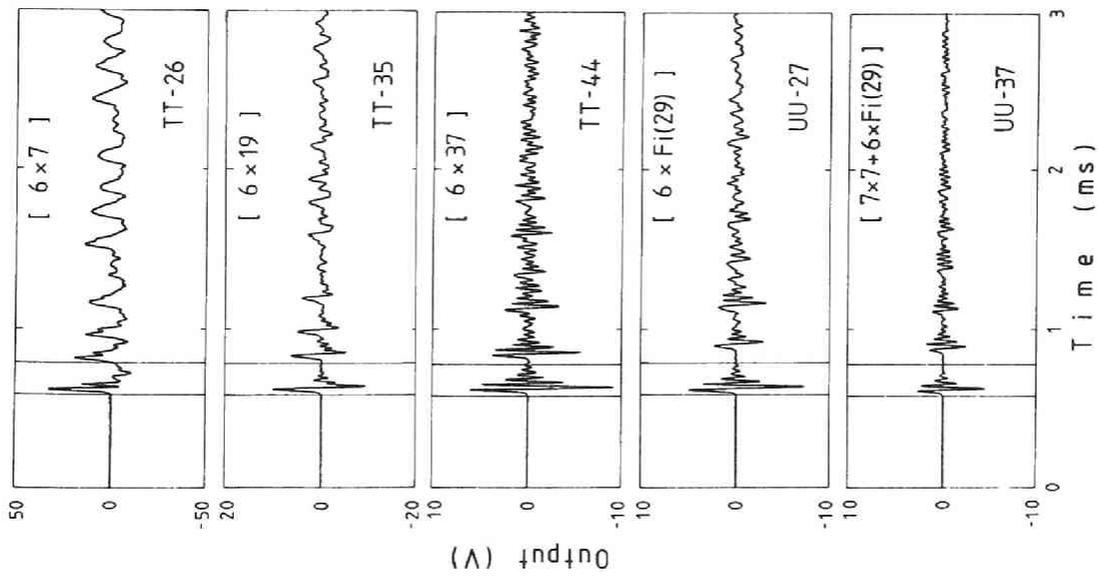


Fig.8.3 コイルと加速度計による  
素線破断検出波動の比較



← Fig. 8.4 ロープ構造による素線破断検出波形の違い

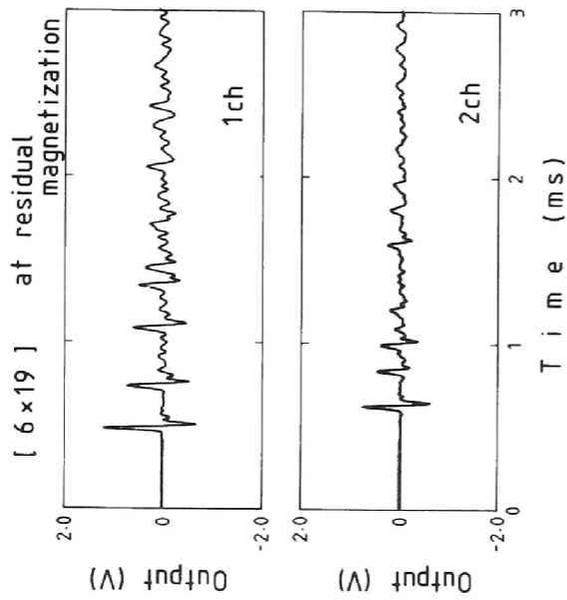


Fig. 8.5 残留磁化状態における波動検出の結果

化に伴って磁化の変化が現われるから、その状態でも、弾性波の検出が可能である。（このことは、7.4.1の鋼線に対する実験においても確認されたことである。） Fig.8.5は、励磁器への電流の供給を停止した状態で、素線破断A Eの検出を行った結果を示したものである。これによれば、残留磁化状態においては、検出感度が1/10程度に減少するだけで、その検出波形にもほとんど変化がなく、十分に波動の検出が可能であること、また、検出のために励磁器に常時電流を供給することは必ずしも必要ではないことがわかる。

## 8.4 考察

### 8.4.1 検出波動の周波数

Fig.8.6は、Fig.8.4に示した波形の周波数解析結果を示したものである。原波形には第1到達波だけでなく複数の反射波も含まれているので、周波数解析は、Fig.8.4中に示した第1到達波の部分（図中縦線2本で囲んだ範囲：200ワード分）だけを対象とした。周波数解析の方法としては、短い波形でも精度がよく、しかも安定なスペクトル予測のできる、MEM（Maximum Entropy Method）<sup>4)</sup>を用いることにした。なお、MEMにおける予測誤差フィルターの項数は、すべての場合について等しく30とした。

Fig.8.6から、どの構造のロープでも40kHz以上の高周波成分がほとんど描かれていないことがわかる。これは、逆磁歪効果によってコイルで波動を検出する本方式固有の周波数特性による影響を強く受けているものと考えられる。弾性波伝播速度が約4,500 m/sであるから、たとえば周波数が40 kHzのときの波長の半分は約56 mmであり、この値はコイルの幅40mmよりもすこし大きい程度である。このことから、コイル幅も検出システムの周波数特性を決定する一つの重要な要素であると想像される。

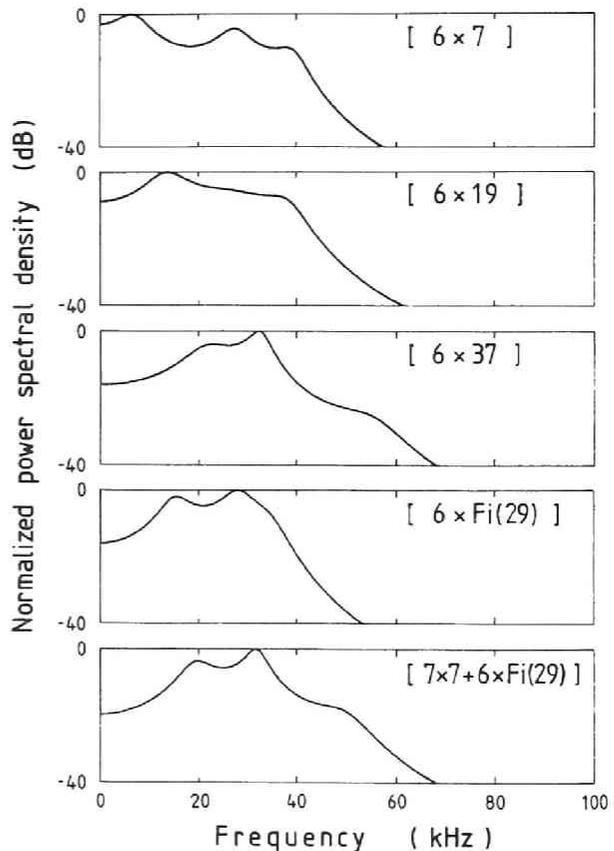


Fig.8.6 素線破断A E検出波形の周波数解析結果

ワイヤロープの構造によって検出波形がかなり異なることは、その周波数分布にも顕著に現われている。まず  $6 \times 7$  の場合、低周波成分を多く含んだ周波数分布となっているが、これは、このロープが最も構成素線数が少なくしかもラングよりであり、素線が破断したときに応力の開放される素線部分の長さが、他の構造のロープよりも長いためであると考えられる。 $6 \times 37$ ,  $6 \times \text{Fi}(29)$ ,  $7 \times 7 + 6 \times \text{Fi}(29)$  の3種は、卓越周波数の値に差はあるものの、ともによく似た周波数分布を示しており、構成素線数が多くて複雑な構造をもつロープでは、その素線破断時に発生する波動の形に、それほどの変異が生じないものと思われる。一方、 $6 \times 19$  の場合は、これらの中間的な分布となっており、その卓越周波数は約 15 kHz である。なお、逆磁歪効果を利用してコイルで波動を検出する場合は、電磁誘導の原理から明らかなように、波動の伝播速度がその検出電圧や周波数の大きさを支配する大きな要素である。したがって、互に構造の異なるロープについて、検出された波形の周波数の値や大きさを単純に比較することはできない。

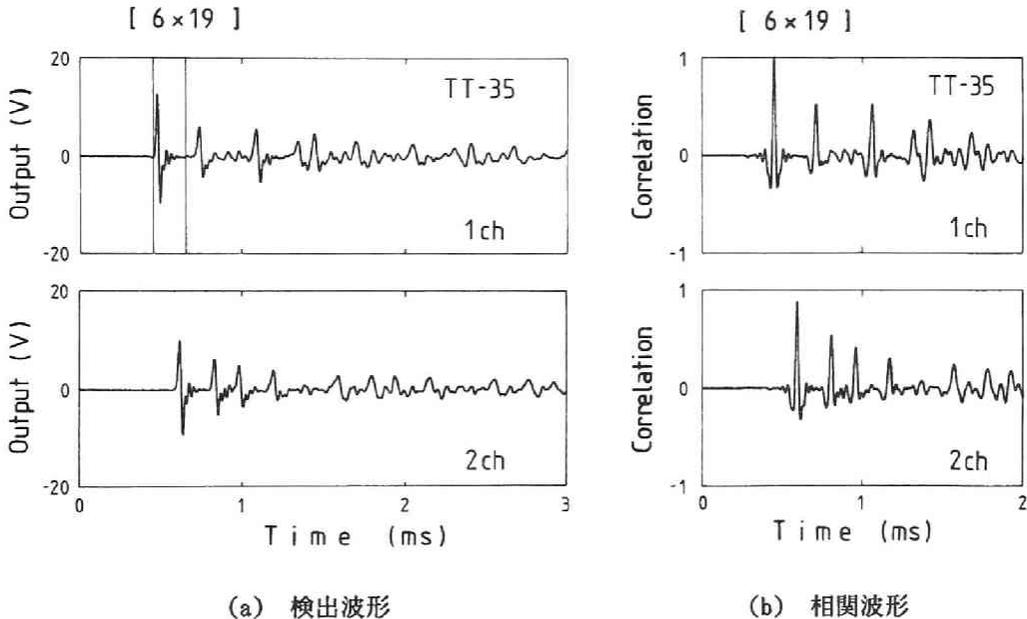


Fig.8.7 素線破断AE検出波形とその相関処理

#### 8. 4. 2 波動伝播と減衰

Fig.8.7 (a) は、 $6 \times 19$ における検出波動の一例である。同図 (b)は、(a)の波形のうち早く到達した側 (1ch) の第1到達波の部分 (図中に2本の縦線で囲んだ範囲) を参照波形として用い、両チャネルの全体波形 (ただし2ms まで) にわたって相関をとったものである。相関波形のピーク位置は各波動の到達時刻に対応し、その高さは参照波形の振幅を1としたときの相対振幅値を与えることになる。相関波形のピークのうち両チャネルと

も最初の4つ程度までは比較的明瞭である。そこで、各チャネルとも第1から第4までのピーク位置の値を用いて、素線破断位置の標定と弾性波伝播速度の推定（その方法については、第9章および付録Ⅱで詳述する。）を行った。

検出波形に現われている各波動のピーク値が時間とともに小さくなるのは、伝播による減衰と反射による損失の2つが原因であるとみなすと、標定した破断位置をもとにして、伝播減衰率および反射損失率の推定を行うことができる。各波動の振幅比は、次式で表わされると仮定した。

$$20 \log_{10} \frac{V_i}{V_0} = -(\alpha d_i + \eta_R m_i + \eta_L n_i)$$

- $V_0$  : 原波動の振幅値
- $V_i$  : 各波動の振幅値
- $d_i$  : その波動の伝播距離
- $m_i$  : 右側の末端で反射した回数
- $n_i$  : 左側の末端で反射した回数
- $\alpha$  : 伝播減衰率 (dB/m)
- $\eta_R$  : 右側末端での反射損失係数 (dB)
- $\eta_L$  : 左側末端での反射損失係数 (dB)

検出波形に含まれる各波動の振幅比として、Fig.8.7 (b) に示した、相関波形のピーク値を用い、上式を最小二乗法によって解き、 $\alpha$ 、 $\eta_R$ 、 $\eta_L$ の各係数を求めた。（詳細は付録Ⅱ参照）

Table 8.2 素線破断発生位置の標定および伝播速度と減衰率の推定結果

構造	No.	ノッチ位置 (m)	標定位置 (m)	弾性波伝播速度 (m/s)	伝播減衰率 (dB/m)	反射損失	
						右	左 (dB)
6×7	TT-25	1.46	1.478	4896	1.106	3.304	2.398
	TT-26	0.76	0.832	4867	0.974	2.946	3.406
6×19	TT-31	1.475	1.495	4557	1.272	2.904	3.522
	TT-34	1.475	1.496	4596	1.669	2.478	2.939
	TT-35	0.875	0.838	4599	1.085	2.561	4.518
	TT-36	1.075	1.156	4590	0.963	2.526	3.279
	TT-37	0.875	0.840	4600	0.879	2.942	5.164
6×37	TT-43	1.065	1.173	4584	1.199	2.317	5.410
	TT-44	1.065	1.173	4582	1.157	2.387	5.430
6×Fi(29)	UU-26	0.965	1.084	4142	1.268	5.997	4.679
	UU-27	0.965	1.084	4147	1.357	5.746	4.354
7×7+ 6×Fi(29)	UU-34	0.765	0.782	4357	0.941	2.202	3.882
	UU-35	0.765	0.782	4354	1.409	1.965	3.804
	UU-37	0.965	1.087	4359	1.410	2.315	4.141
	UU-38	0.965	1.086	4364	1.350	2.104	3.842

Table 8.2 は、その結果をワイヤロープの構造ごとに示したもので、各構造とも、それぞれ1本のロープ試料について得られた2～5個の素線破断波動にもとづいて解析したものである。破断位置の標定はおおむね良好な結果が得られており、推定した伝播速度には構造によってかなりの違いがあることがわかる。一方、伝播減衰率は、0.9～1.4dB/m程度となっている。それぞれの値からは、構造による違いが読取れるが、伝播減衰はそのロープの張力状態に大きく左右されると考えられ、ある程度長い試料についてさらに詳しい測定を行わないと正確には判断できない。

## 8.5 結 言

逆磁歪効果を利用した超音波非接触検出法を、ワイヤロープの引張試験時に発生する素線破断AEの検出に適用し、その実用性を確認した。その結果、明らかとなったことをまとめると以下のようなものである。

- 1) この方法は、加速度計等を端末に接着するような方法よりも高感度である。
- 2) 残留磁化状態においても波動の検出が可能である。したがって、ロープを磁化するために、励磁電流を常に通電しておく必要はない。
- 3) この方法によって検出した波形からは、波動の第一到達波のみならず端末からの反射波の到達時刻および振幅の大きさを読取ることができる。
- 4) それらをもとにして、素線破断の発生位置、ロープ内の弾性波伝播速度、弾性波伝播減衰率等の推定が可能である。
- 5) 伝播速度や、素線破断波動の周波数および伝播減衰率は、ロープ構造によって異なり、一般に、構成素線数が多いほど、伝播速度は遅く、また波動の周波数は高くなる傾向がある。

## 参考文献

- 1) Tsukada, K., K. Hanasaki and Y. Fujinaka: Non-contact Acoustic Detection of Wire Breakage in Steel Wire Ropes Utilizing Inverse Magnetostrictive Effect, Non-destructive Testing, Proceedings of the 12th World Conference on NDT, Amsterdam, April 23-28, 1989, edited by J. Boogaard and G.M. van Dijk, Vol.2, pp.1267-1269, (Apr.1989)
- 2) 塚田和彦, 花崎紘一, 藤中雄三: ワイヤロープの引張試験中に発生する素線断線の非接触検出, 昭和63年度日本鉱業会春季大会, 講演要旨集, 3207, pp.311-312, (Apr.1988)
- 3) 塚田和彦, 花崎紘一, 藤中雄三: 逆磁歪効果を用いるワイヤロープの素線破断の非接触検出(2) - 検出波動の周波数及び減衰特性について -, 昭和63年度資源素材関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, M-11, pp.41-44, (Oct.1988)
- 4) たとえば, 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, p.86 および p.210, (1977)

## 第9章 ワイヤロープ引張疲労試験における劣化過程の監視<sup>1)</sup>

### 9.1 緒言

吊構造物の支索など、いわゆる構造用ワイヤロープの需要が増大するにつれて、ワイヤロープの引張疲労特性についての研究が盛んに行われるようになって来た<sup>2-3)</sup>。それらの研究の中には、ワイヤロープの引張疲労被害への Miner則適用の可否<sup>2)</sup>や、引張疲労寿命へのプリロードの影響の検討<sup>3)</sup>など、特徴的なものもあるが、現在のところ、長大橋のハンガロープについてなど、実際の使用に際しての設計資料を得るための実験、つまり、疲労限や時間強さの値を求めることに主眼の置かれた研究が、その大部分である。しかし、実使用下にある構造用ワイヤロープの保守管理の立場からは、引張疲労環境下でのワイヤロープの劣化過程について明らかにされることが要請されており、たとえば、断線がどの程度発生すれば、ロープ寿命のどれぐらいの時期にあたるのかと言ったことが判断できる資料を得ることが必要とされている。また、設計資料としての時間強度（一般には $2 \times 10^6$ 回とされているようである<sup>4)</sup>）についてみても、それを初断線の発生をもって規定するか、5%あるいは10%断線箇所率<sup>5), 6)</sup>をもって規定するかは、断線の増加傾向が応力の大小によって変わってくる<sup>4), 7)</sup>こともあって、明確な判断が下せないのが現状である。

引張疲労の場合も、5.2 で述べた曲げ疲労の場合と同様、その劣化過程において、素線断線の発生、ロープ伸び量の増加、ロープ剛性の変化などの諸現象が現われる。素線断線については、上述の時間強度の問題とも絡んで、引張疲労試験においては以前から、その発生を注意深く観測することが行われており、今日では、その断線確認方法も、目視からより確実な、加速度計などを用いたいわゆる A E 的な方法へとかわって来ている<sup>4-7)</sup>。しかし、伸び<sup>9)</sup>や剛性の変化を測定した例は少なく、又、それらの諸現象を劣化進行の指標として捉え、繰返し引張荷重下でのワイヤロープの挙動について詳しく検討したような例はほとんどない。Casey は、引張疲労試験中のロープの挙動を連続的に監視することが重要であることを初めて指摘し、その監視システムの開発を行った<sup>10), 11), 12)</sup>。彼は、試験中のロープの伸びや剛性の変化を観測することによって、その試験結果が供試ロープの耐疲労性を正しく反映したものであるか、あるいはソケット不良などの他の原因によってもたらされたものであるかを判定できると述べている。

著者は、第7, 8章において、ワイヤロープの素線が破断したときに発生する A E を、ロープと非接触で電磁的な手段によって検出する方法を開発した。そこで、この素線破断検出法を、ワイヤロープの引張疲労試験に適用するとともに、試験中のロープの伸びや荷重を連続的に監視するシステムを構成して、繰返し引張荷重下でのワイヤロープの挙動と、

その劣化進行過程について詳しく検討した。本章では、構造用ワイヤロープを対象として行った引張疲労試験における、ロープの伸び、剛性の変化および素線断線数の推移の関係について述べ、あわせて、非接触検出法によって得られる素線破断A Eの受信波形から素線破断の発生位置を標定した結果についても述べる。

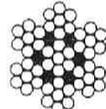
## 9.2 実験

### 9.2.1 供試体および引張疲労試験機

供試体としては、直径が 20mm で、構造用ワイヤロープの典型的な構成の1つである、7×7普通よりロープを用いた。諸元および断面形は、Table 9.1 に示したとおりである。

Fig.9.1 は、引張疲労試験機に取り付けた試料と、伸び、荷重、素線破断A Eの連続監視システムを示したものである。各試料は、その両端に垂鉛鑄込み式のソケットづけをした後、疲労試験機のクロスヘッド間に取り付けられる。この疲労試験では、周波数 2 Hz の正弦波状の繰返し張力を作用させた。その平均応力 ( $\sigma_m$ ) は、ロープ破断荷重の 1/3 ( 45 kgf/mm<sup>2</sup> ) とし、応力変動幅 ( $\sigma_R$ ) は、30 kgf/mm<sup>2</sup> とした。

Table 9.1 供試ワイヤロープの諸元

7×7 (普通より)		
直径	20	mm
外層素線径	2.0	mm
断面積	195	mm <sup>2</sup>
破断強度	26.3	tonf
断面形		

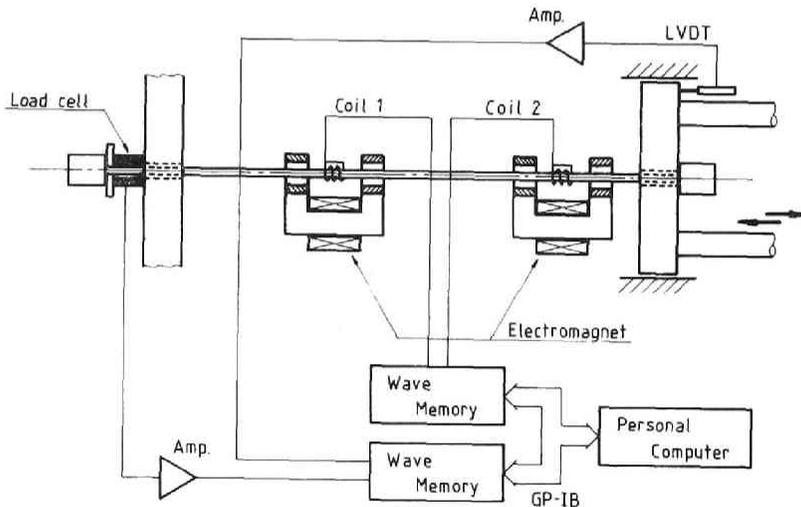


Fig.9.1 引張疲労試験機と連続監視システム

## 9. 2. 2 素線破断AEの検出

素線破断AEの検出センサは、ロープと同軸に配置した小型コイル（直径 30 mm, 巻幅 10 mm, 250 回巻）である。その配置する位置は、素線破断位置標定のための考慮にもとづいて、固定側クロスヘッドからロープの全長のちょうど  $2/5$  と  $4/5$  に相当する2箇所とした。コイルが置かれている部分のロープは、極間型電磁石（極間 約 200 mm, 起磁力 8,000 AT）によって、ほぼ飽和に近い状態に磁化される。

Fig.9.1 に示したように、本実験の検出システムでは、両コイルの出力がそれぞれウェーブメモリに導かれており、設定したトリガレベル以上の波動が検知されると、両チャンネルの波形がその発生時刻とともにパーソナルコンピュータのフロッピディスクに記録されるようになっている。なお、ウェーブメモリのレンジは2Vで、その分解能は10ビット、サンプリングタイムは1 $\mu$ sで、記録は各チャンネル 3,072ワードである。

## 9. 2. 3 荷重・伸びの計測

試験中の荷重は、固定側のクロスヘッドに取り付けたロードセルによって、また、伸びは、引張側のクロスヘッドの変位量として差動トランスによって計測した。それぞれの出力は、アンプを通してウェーブメモリに導き、一定時間ごとにパーソナルコンピュータのフロッピディスクに記録するようにした。ウェーブメモリの分解能は14ビット、サンプリングタイムは 0.5ms で、記録量は荷重、伸びとも 2,048ワード（約1秒間：2サイクル分）である。

## 9. 3 結果・考察

### 9. 3. 1 ロープの伸びおよび剛性の変化と素線断線数の推移の関係

Fig.9.2 は、サイクル数が 30、153,700、509,100 のときに描かれた荷重・伸び曲線を示したものである。荷重と伸びの関係は線形でなく、曲線は狭いヒステリシスループを描いている。サイクル数の増加に伴いロープの伸びが増大し、荷重・伸びのヒステリシスループは次第に右へ移行して行く。図には現われていないが、ループの傾きは、一旦最大になったのち徐々に小さくなっていく。また、ループの面積は、傾きとは逆に一旦最小になったのち徐々に大きくなる傾向が認められた。荷重・伸び曲線からは、このようにロープの引張疲労進行の指標となる3つの量を定義することができる。それは、平均伸び（各サイクルでの伸びの平均値）、ロープの剛性（荷重変動幅/伸び変化幅：ヒステリシスループの傾き）、ヒステリシス損失（荷重・伸び曲線の描くループの面積）で、これらは、N. F. Casey によって提唱されたものである<sup>12)</sup>。今回の実験では、疲労試験中の荷重変動幅の一定性がそれほど期待できなかったので、平均伸びとロープの剛性の2つについてのみ

検討することとした。一定時間（一定繰返し回数）ごとに計測した荷重と伸びの変動波形から2サイクル分のデータを取り出し、平均伸びは、伸びの計測値の単純な平均として、また、ロープの剛性は、荷重と伸びの関係を最小二乗法によって直線近似したときの傾きとして求めた。

Fig.9.3 は、モニタリング結果の一例で、ある試料についてのサイクル数と平均伸びおよびロープの剛性の変化の関係を、コイルによって非接触検出したAEの累積イベント数の変化とともに示したものである。平均伸びは、

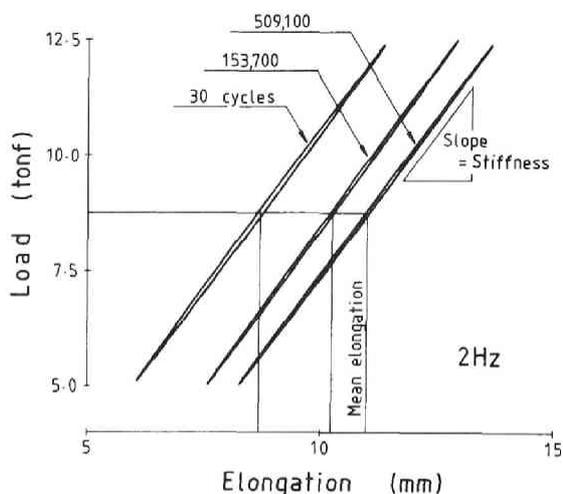


Fig.9.2 引張疲労試験中のワイヤロープの荷重・伸び曲線

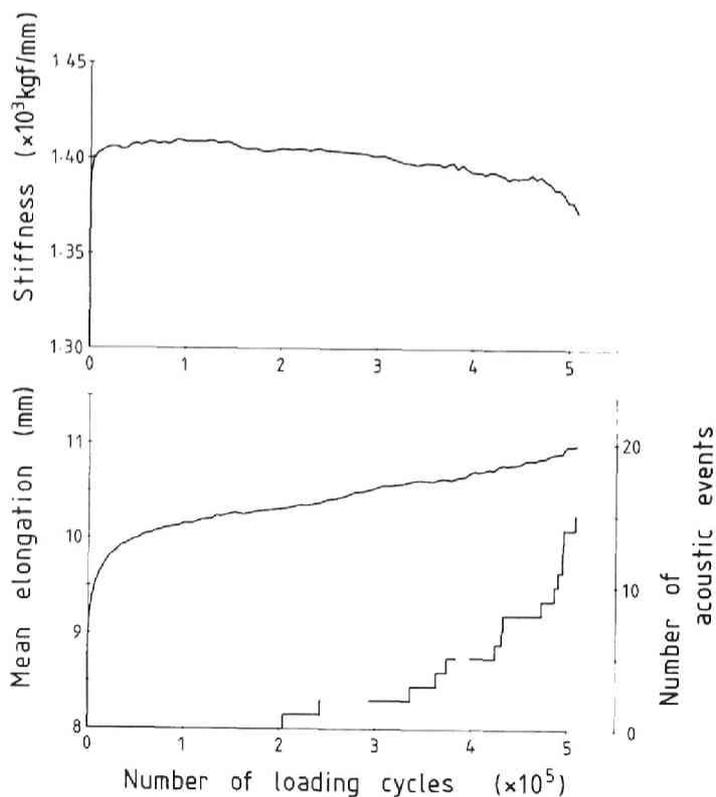


Fig.9.3 繰返し回数とロープの平均伸び・剛性の変化および素線破断数の推移

試験開始時には急激に増大するが、その後はなだらかな直線的増加を示し、素線破断が急増する 480,000 サイクル前後からはその傾きが少し大きくなっているようである。ロープの剛性は、伸びよりもロープの疲労劣化に敏感で、試験開始直後急激に大きくなり、150,000 サイクル前後まではほぼ一定である。その後は、素線破断の発生に呼応するように徐々に小さくなっていき、素線破断が急増する 480,000 サイクル前後からは急激に下がり始める。この実験では、素線破断の検出データの取込において空白時間があり、分解検査の結果確認された素線破断 22 箇所のうち、イベントとして検出されたのは 15 個であった。

### 9.3.2 素線破断位置の標定

Fig.9.4 は、素線破断 AE の検出波形の一例である。全体は、3 ms の記録である。1 ch として示した波形は、固定側からロープの長さの  $2/5$  の位置のコイルによって検出された波形で、2 ch は  $4/5$  の位置のコイルによって検出された波形である。両チャンネルとも、初動の小さい波が破断位置から直接コイルに到達した波で、後はすべて端面で反射往復している波を捉えたものである。各チャンネルの波形は、4 つの小波形が一組となって繰返されるかたちで形成されていることが認められる。素線破断時に発生した応力波は、破断位置から左右に伝播する。どちらの方向に伝播した波も、ロープの右端と左端で一回ずつ反射して元の破断位置に戻って来たときには、それぞれ等距離（試料長の 2 倍）を通過しており、そこで波頭が一致することになり、それ以後は、全く同じ過程が繰返されることとなる。

(Fig.9.5 参照) 左右どちらに向って出た波もこの 1 過程の間に検出コイルを 2 回ずつ通過するから、それぞれのコイルでの検出波形は、4 つの小波形を 1 組とする繰返しとなるわけである。このように検出波形からは反射波が明瞭に識別できるので、これを利用することによって、ロープ全長にわたって素線破断の位置を標定することができる。

（Fig.9.5 参照） 左右どちらに向って出た波もこの 1 過程の間に検出コイルを 2 回ずつ通過するから、それぞれのコイルでの検出波形は、4 つの小波形を 1 組とする繰返しとなるわけである。このように検出波形からは反射波が明瞭に識別できるので、これを利用することによって、ロープ全長にわたって素線破断の位置を標定することができる。

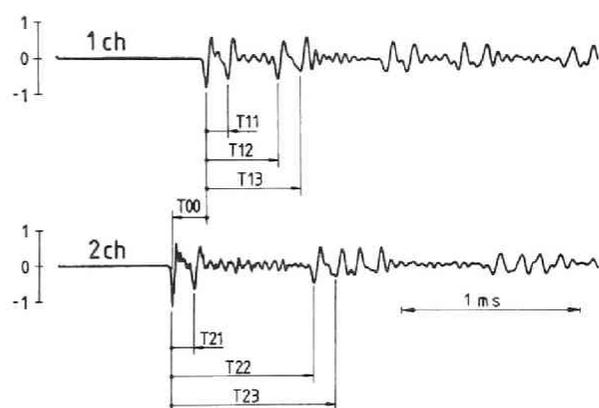


Fig.9.4 素線破断 AE の非接触検出波形と位置標定のための時間差の定義

Fig.9.4 中に示したように、両チャンネルの最初の 4 つの小波形から  $T_{00}, T_{11} \sim T_{23}$  などの 7 つの時間差を求め、それをもとに位置標定を行うのである。波の到達時間差は各小波形の立上がりではなくピーク位置で求めることにした。両チャンネルの最初の計 8 つの小波

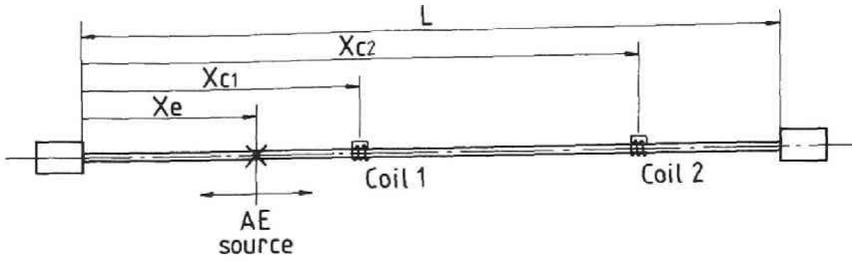


Fig.9.5 検出コイルと素線破断位置

形それぞれが、破断位置から左右2方向に出た波のどれにあたるかは、2つのコイルと破断位置との相対的な位置関係によって、9つの場合に分けられる（詳細は付録Ⅱ参照）。コイルや破断位置を、Fig.9.5 に示したように表わすとすると、それらが、たとえば

$$X_e < X_{c1} < X_{c2} \quad ; \quad L < X_e + X_{c1} < X_e + X_{c2}$$

であるような関係を満たす位置に存在する場合には、波形からもとめた7つの時間差と応力波の伝播速度  $V_p$  および破断位置  $X_e$  との間には、

$$\begin{bmatrix} 2T_{00} & 0 \\ T_{11} & 0 \\ T_{12} & -1 \\ T_{13} & -1 \\ T_{21} & 0 \\ T_{22} & -1 \\ T_{23} & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_p/2 \\ X_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{c2} - X_{c1} \\ L - X_{c1} \\ 0 \\ L - X_{c1} \\ L - X_{c2} \\ 0 \\ L - X_{c2} \end{bmatrix}$$

のような関係式が成立つ。これを最小二乗法によって解くことによって、伝播速度と素線破断位置が決定できる。ただし、 $X_e$  の存在位置によって、ここに示した関係式は、上述の9つの場合についてそれぞれ異なったものとなる。そこで、実際の位置標定においては、まず  $X_e$  の存在範囲を仮定し、得られた波形から読取った7つの時間差をもとにして破断位置  $X_e$  を計算し、その値が仮定した範囲内であるときのみ、その値は真であるとした。この作業を9つの範囲（実質的には5つの範囲のみ有効となる。詳細は付録Ⅱ参照）のそれぞれについて行うことによって、真の伝播速度と破断位置を決定することができる。

Fig.9.6 は、素線破断位置の標定を行った試料についての、疲労試験結果を示すものであり、この試料の場合は、その試験中の素線破断の全数を検知することができた。Table 9.2 は、位置標定と伝播速度推定の結果を示したもので、Fig.9.7 は、素線破断位置の標定結果と、分解検査によって明らかとなった実際の素線破断位置を併示したものである。7つ時間差をその波形の立上がりではなく、ピーク位置で読取っているにもかかわらず、標定した位置は、実際の素線断線位置とよい一致をみている。

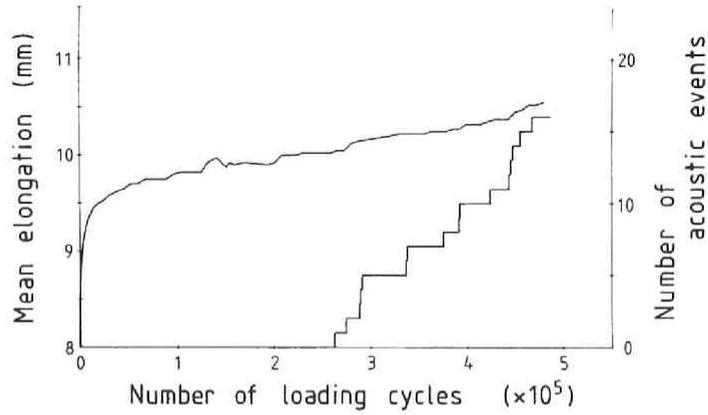


Fig.9.6 AE位置標定を行った試料の疲労試験結果

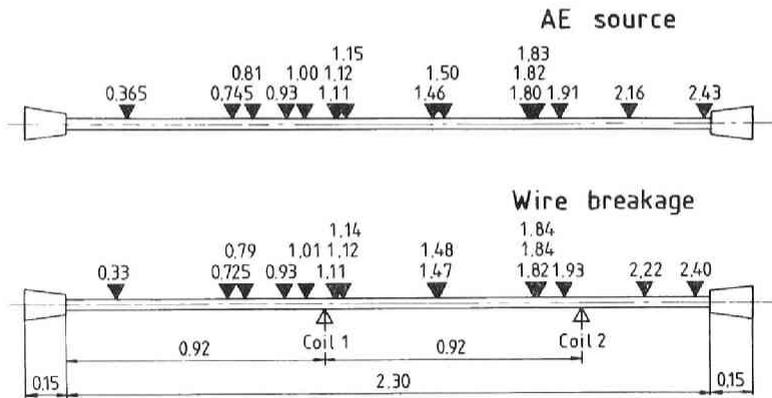


Fig.9.7 素線破断AEの位置標定結果

Table 9.2 素線破断発生位置および伝播速度の推定結果

No.	繰返し回数 ( $\times 10^5$ )	素線破断位置 (m)	AEの標定位置 (m)	推定伝播速度 (km/s)
1	2.629	1.82	1.80	4.89
2	2.681	1.84	1.82	4.50
3	2.891	1.47	1.46	4.63
4	2.902	1.12	1.12	4.46
5	2.919	2.22	2.16	4.46
6	3.369	1.93	1.91	4.59
7	3.385	1.01	1.00	4.50
8	3.757	0.79	0.82	4.50
9	3.917	0.725	0.745	4.89
10	3.927	2.40	2.43	4.69
11	4.250	0.93	0.94	4.73
12	4.435	1.48	1.50	4.60
13	4.460	0.33	0.37	4.71
14	4.476	1.14	1.15	4.53
15	4.561	1.11	1.11	4.51
16	4.678	1.84	1.83	4.55

## 9. 4 結 言

構造用ワイヤロープの引張疲労試験を実施し、繰返し引張荷重下におけるワイヤロープの挙動と劣化進行の過程について、ロープの伸び・剛性の変化ならびに素線破断数の推移に注目して検討した。得られた結果を要約すると以下のようである。

1) 構造用ワイヤロープの引張疲労試験においては、各繰返しサイクルでのロープの平均伸びや剛性の変化も、その劣化の進行度合いを知るための指標として有用である。とくにロープ剛性は、劣化の進行に対して敏感で、その変化は素線破断の発生とよく対応する。

2) 逆磁歪効果を利用する非接触超音波検出法は、ワイヤロープ引張疲労試験時の素線破断の発生を連続的に監視するのに有効な方法である。

3) この方法で得られる検出波形からは、素線破断時に発生した波動の伝播および端末での反射の状況をかなり明瞭に読取ることができるので、このことを利用することによって、素線破断の発生した位置を、2つのコイルの間だけでなく、ロープ全長にわたって精度良く標定することができる。

## 参考文献

- 1) 塚田和彦, 花崎紘一, 藤中雄三: ワイヤロープの引張疲労試験における素線破断の連続監視, 日本非破壊検査協会, 第3分科会資料, No.3925, pp.1-7, (May 1989)
- 2) 上野勲, 林久男: 引張り疲労におけるワイヤロープの疲労被害について, 昭和54年度全国地下資源関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, S-12, pp.40-43, (Oct.1979)
- 3) 田中義久, 大津留喬久, 岡田昭寿, 上野勲: プリロードの引張り疲労寿命に及ぼす影響について, 昭和57年度全国地下資源関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, P-5, pp.15-18, (Oct.1982)
- 4) 土井明, 富岡敬之, 篠原浩一郎: ロックドコイルロープの部分片振り疲労試験と応力解析, 昭和54年度全国地下資源関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, S-14, pp.48-51, (Oct.1979)
- 5) 半沢貢, 横田彦二郎, 戸田陽一, 横山邦彦, 吉田正人, 高橋瞳: ワイヤロープの引張り疲労特性について - 海洋構造物用鋼索の疲労特性に関する研究(3) -, 鉄と鋼, Vol.65, No.11, p.553, (1979)
- 6) 吉田正人, 小野田武, 汐谷益雄, 林隆一: ワイヤロープの引張疲労特性, 昭和57年度全国地下資源関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, P-4, pp.11-14, (Oct.1982)
- 7) 早崎清志, 福田喜久夫, 玉井鬼子雄, : スパイラルロープの引張疲労試験結果, 昭和62年度資源素材関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, F-4, pp.12-15, (Sep.1987)
- 8) 早崎清志, 福田喜久夫, 玉井鬼子雄, : 構造用高強度亜鉛めっきロープの諸特性について, 昭和63年度資源素材関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, M-1, pp.1-7, (Oct.1988)
- 9) 立田潤, 浜松茂徳: 繰り返し荷重下のワイヤロープの伸びについて, 昭和54年度全国地下資源関係学協会合同秋季大会, 分科研究会資料, S-13, pp.44-47, (Oct.1979)
- 10) Casey, N.F. and Waters, D.M.: Observations on the Stiffness and Elongation of Large Diameter Wire Rope during Tensile Fatigue Testing, Wire Industry, Vol.54, No.641, pp.300-303, (May 1987)
- 11) Casey, N.F. and Waters, D.M.: Presentation of the Findings of a Test Programme Conducted to Determine the Fatigue Behaviour of Large Diameter Wire Ropes, Wire Industry, Vol.55, No.653, pp.371-378, (May 1988)
- 12) Casey, N.F.: Monitoring Wire Rope Properties during Tension-Tension Fatigue Testing, Wire Industry, Vol.55, No.659, pp.758-761, (Nov.1988)

## 第10章 素線破断AE非接触検出法のワイヤロープ曲げ疲労試験への適用<sup>1)</sup>

### 10.1 緒言

ワイヤロープへのAE法の適用は、現在のところ引張疲労試験における素線破断の監視に対するものがほとんどであり、実際の構造物のケーブルに適用された事例はきわめて少なく<sup>2)</sup>、まして、一般の運搬設備に動索として使用されているワイヤロープについては皆無である。ワイヤロープの曲げ疲労試験においては、わずかに、加速度計を屈曲用シーブを通らないロープ部分に取り付けて素線破断を監視した例が報告されている<sup>3)</sup>に過ぎない。著者は、第7～9章で述べたとおり、ワイヤロープ中の素線が破断したときに発生するAEを電磁的に非接触で検出する方法を開発し、引張および引張疲労試験においてその実用性を確認した。本方法は、非接触方式であることを第一の特徴としており、それゆえ、動いているロープにも適用できると予想される。運搬設備などのワイヤロープでは、シーブ上での繰返し曲げによって疲労が進行し、それに伴って、シーブ上をロープが通過する際にその部分で素線破断が発生する。したがって、動索として使用されているワイヤロープについても、このAE検出法を素線破断の進行の監視に利用すれば、その使用劣化に関して、非常に良い情報が得られるものと考えられる。

第5章で、ワイヤロープの曲げ疲労特性について検討し、構造によってその劣化の現われ方が大きく異なることを指摘した。その中でFロープと称した、IWRC 7×7+6×Fi(29)の場合、素線断線が表面に現われにくく、また心ロープでの断線が多発する傾向があり、漏れ磁束探傷を用いても、劣化の早期発見や、その進行状況の把握において十分ではなかった。このようなロープについては、AE的な探傷の方法がより有効であると考えられ、断線箇所数とAEイベント数との1対1対応性は望めないとしても、非接触AE検出法によって劣化の進行を十分監視することができると予想される。

本章は、逆磁歪効果を利用する非接触AE検出法を、ワイヤロープの曲げ疲労試験中に発生する素線破断の監視に適用した結果について述べるものである。

### 10.2 実験

実験は、第5章に述べた方法に準じて行った。供試体も、Fig.5.1, Table 5.2 に示したものと同一であり、本章でも以下、IWRC 7×7+6×Fi(29)をFロープ、それにデルタファイラーをより込んだものをDFロープと呼ぶことにする。(ただし、DFロープについては、その後に素線径の変更が行われたので、第5章で用いたロープとは異なり、その疲労

特性にも多少の差異がある。) 曲げ疲労試験と測定システムも、Fig.5.1 に示したものと同一であるが、それらにさらに、素線破断AE検出システムを付加した。Fig.10.1 は、その部分を示したものである。疲労試験においては、漏れ磁束探傷を継続的に実施したので、素線破断AEの検出に必要とされる外部磁界は、この探傷器と共用することとした。つまり、Fig.10.1 に示したとおり、漏れ磁束探傷器の励磁器の極間に、波動検出用のコイル(巻幅 40mm, 1,000回巻)を設置した。

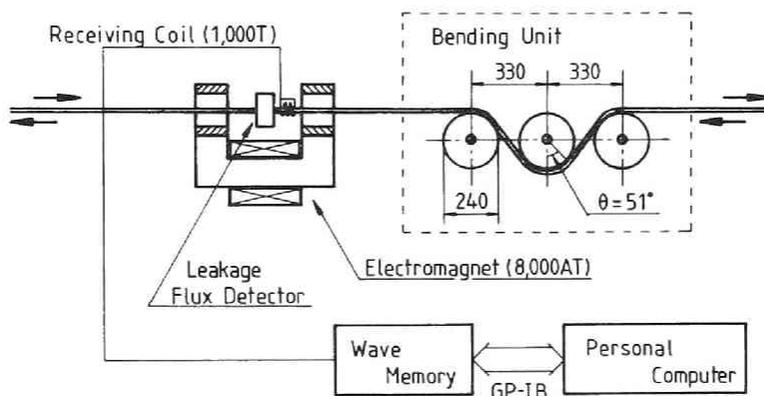


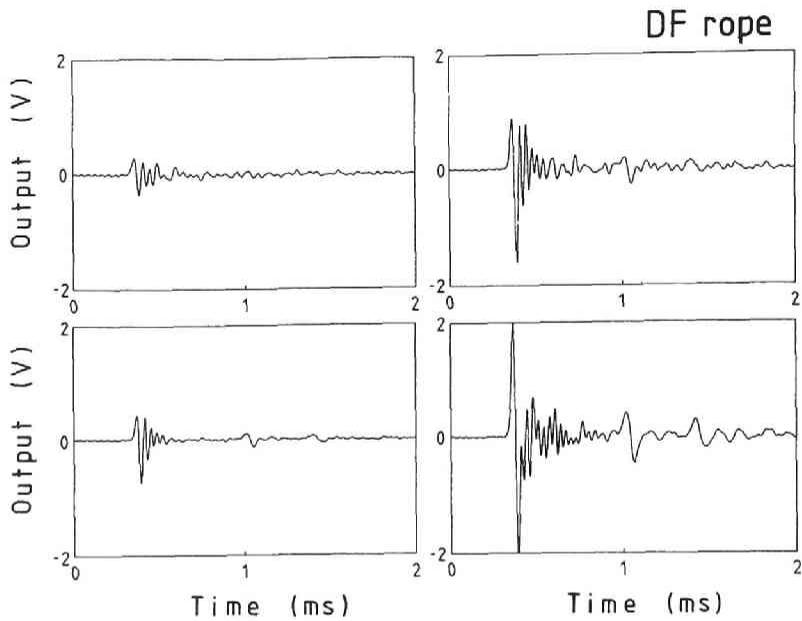
Fig.10.1 曲げ疲労試験における素線破断AE検出システム

コイルの出力は、直接ウェーブメモリに導かれており、設定したトリガレベルを越える波動については、その波形がコンピュータのフロッピディスクに記録されるようになっている。ただし、波動を検出してそれをディスクに保存し、再びもとの監視状態に戻るまでには、1~2秒のデッドタイムがあるので、その間に素線破断が発生したとしても、それは検出もれとなる。なお、ウェーブメモリのレンジは2V、分解能は10ビットで、サンプリングタイムは1 $\mu$ s、記録は2048ワードである。疲労試験機の往復運動に伴って発生する、往復切換え時の油圧電磁弁のノイズがかなり大きく、これを避けるためトリガレベルは比較的高めの50~100mV程度に設定した。

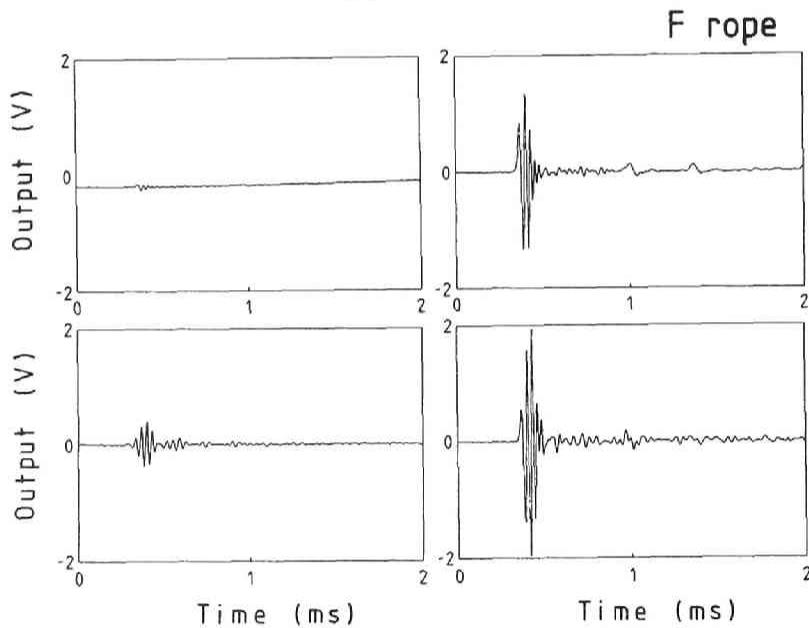
この疲労試験においては、ロープの張力を破断荷重の1/5(安全率5)に設定した。試験中には、素線破断AEの観測とともに、第5章で述べたとおり、ロープ伸び量の計測、漏れ磁束探傷、および目視による表面断線数の確認も継続的に行った。また試験終了時には、ロープの分解検査を行って、素線断線箇所の総数を求めた。

### 10.3 結果・考察

Fig.10.2 は、素線破断AEの検出波形例である。(a)はDFロープ、(b)はFロープ



(a) DFロープ



(b) Fロープ

Fig.10.2 素線破断AE検出波形例

についてのものである。検出波形は、S/Nもよく、十分な感度で測定できている。構造によって波形に違いが認められるが、これは、DFロープの場合には、素線破断が表面素線で発生するのに対し、Fロープの場合には、ストランド間や心ロープでの断線が主であ

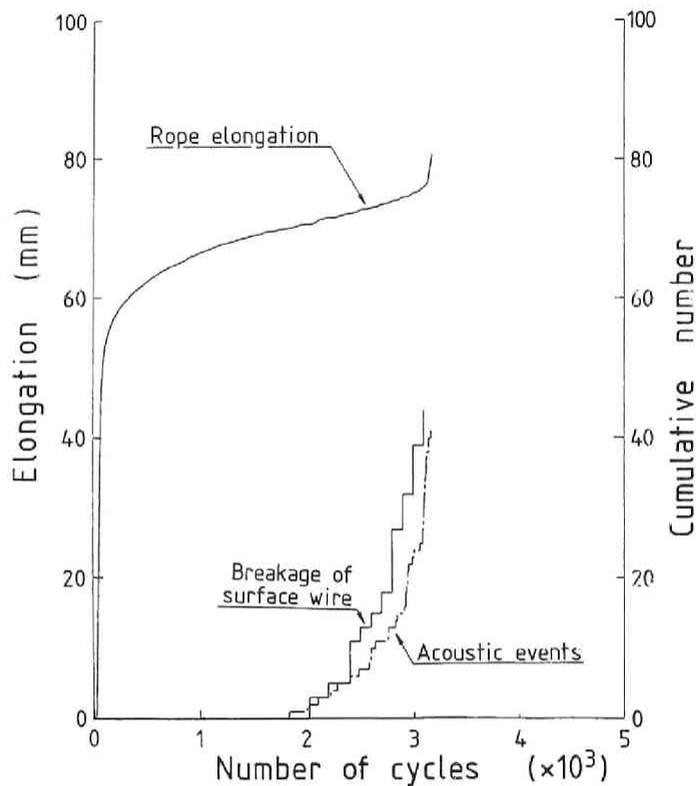
るといふ、素線破断発生の傾向の違い（どの部分の素線が破断したかによってその際の応力開放の状況が異なる）を反映したものであると考えられる。また、素線の径が様々であること（Fig.5.1 および Table 5.3 参照）に加えて、素線が最終的に破断するときの断面積が、それまでに形成された疲労破面の占める割合によって異なってくることを反映して、検出波動の大きさは様々である。波形記録のいくつかには、1 ms と 1.4 ms 付近に少し大きな波動が観測されているが、これは、シーブとロープとの接触部分からの反射波を検出したものであると思われる。しかし、検出波形記録のすべてにこのような波形が現われたわけではない。

Fig.10.3 と Fig.10.4 は、それぞれDFロープとFロープの疲労試験結果を示したものである。各図とも、(a)は、繰返し回数に伴うロープの伸び量、AEイベント数、目視確認された表面断線数の変化を示したもので、(b)は、いくつかの繰返し回数における漏れ磁束探傷結果を併示したものである。DFロープ、Fロープとも、繰返し回数 2,000 回ごろからAEが観測され始める。

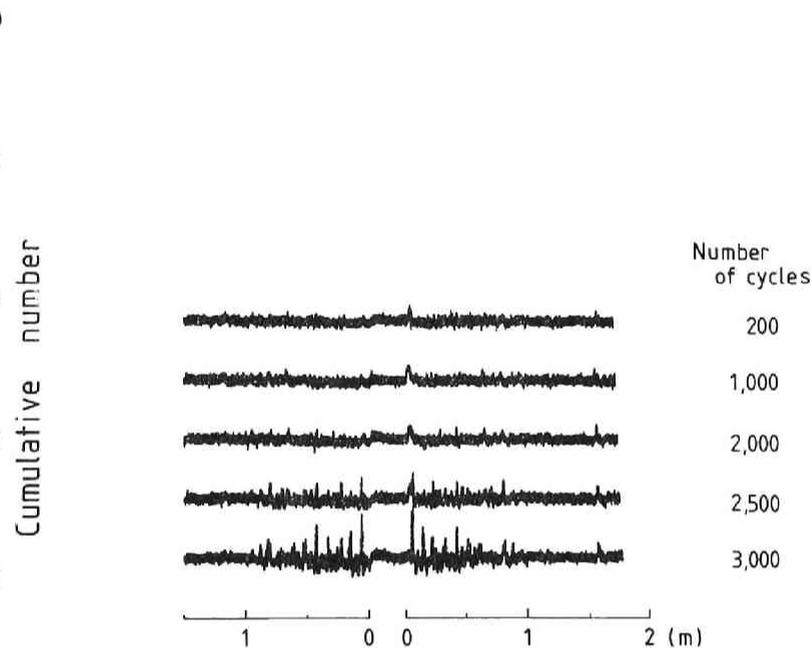
Fig.10.3 に示したDFロープの場合、表面断線の発生時期、AEが観測され始める時期、漏れ磁束探傷記録に乱れが出始める時期は、どれも繰返し回数 2,000 回程度である。また、AEイベント数と表面断線数の増加傾向はほぼ同じである。これらのことから、DFロープでは、劣化の進行に伴って、ストランド最外層素線で断線が先行的に発生するものと考えられる。これらの断線の発生に呼応するかのように、ロープの伸びは、それ以前の定率的な変化から逸脱し始め、AEイベント数が急増し始める繰返し回数 3,000 回ごろには、伸びも急激に増加するとともに、漏れ磁束探傷記録にも大きなインパルス波形が多数発生するようになっている。

一方、Fig.10.4 に示したFロープの場合、断線が表面に現われ目視で確認され始めるのは、3,500 回程度であるが、AE検出では既に 2,000 回ごろからイベントが観測され始めており、表面断線が発生する頃からは、AEイベント数の増加傾向がさらに激しくなるように見受けられる。このことから、Fロープでは、ロープ内部、とくに心ロープでの断線が先行的に発生するものと考えられる。しかし、伸びの曲線や漏れ磁束探傷記録では、表面断線が発生する頃からやっとな変化が現われ始めているに過ぎず、Fロープのような劣化傾向を示すロープについては、とくにAE検出が劣化の監視において有効であるといえる。

あるFロープの試験後（繰返し回数 4,000 回、表面断線数 0）の分解検査によると、素線断線箇所数の総数 400 のうち、ストランド内での断線箇所数は 25 であった。また、このロープの試験中に観測されたAEイベント数は 55 であった。このように、現在のシステムでは、試験機自体の発生するノイズのためにトリガレベルを比較的高くせざるを得ず、開放エネルギーの小さい断線を見逃すことになったこと、さらに、波形の保存を行ったので、

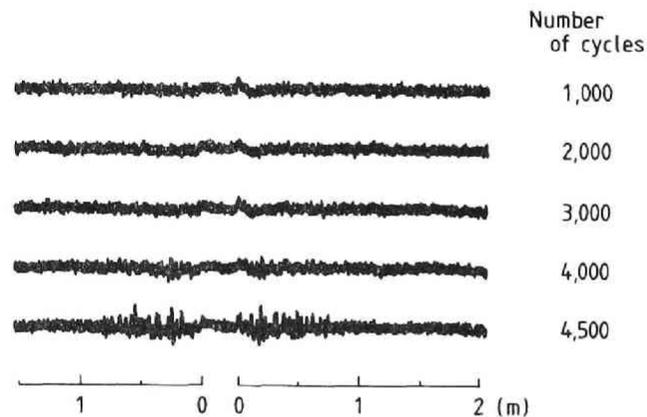
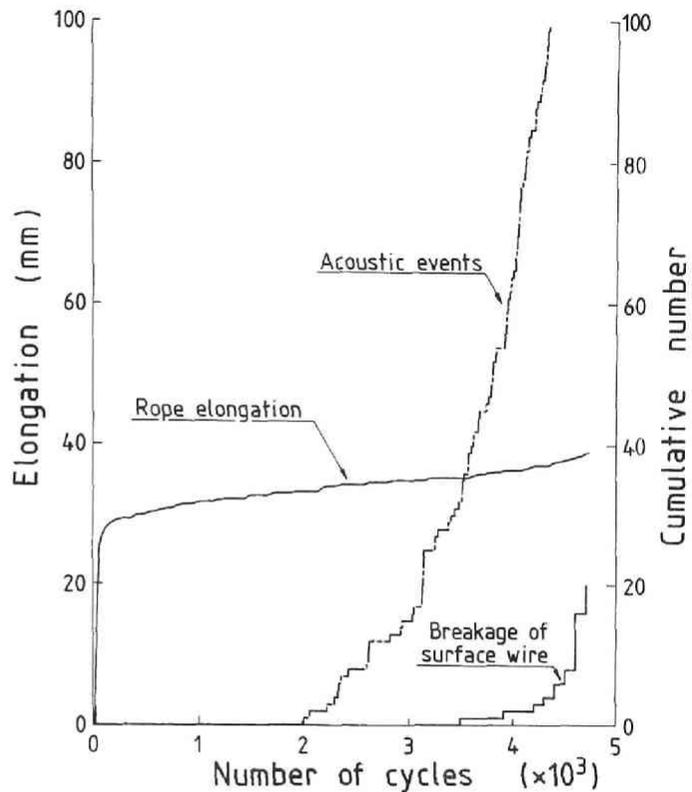


(a) 繰返し回数とロープの伸び,  
AEイベント数および表面断線数の関係



(b) 漏れ磁束探傷記録

Fig.10.3 繰返し回数の増加に伴うロープの伸び, AEイベント数,  
表面断線数および漏れ磁束探傷記録の推移 (DFロープの場合)



(b) 漏れ磁束探傷記録

(a) 繰返し回数とロープの伸び,  
AE イベント数および表面断線数の関係

Fig.10.4 繰返し回数の増加に伴うロープの伸び, AE イベント数,  
表面断線数および漏れ磁束探傷記録の推移 (F ロープの場合)

そのたびにデッドタイムがあることなどの理由によって、すべての素線破断を捉えることはできなかった。しかし、Fig.10.4 のFロープについての結果を、第5章で述べた繰返し回数と残存強度の関係（Fig.5.6 の右側の図）と比べると、AEイベントの開始時期が強度低下の開始時期と一致してばかりでなく、両者の変化の傾向も良く対応しており、したがって、曲げ疲労劣化によるロープ強度低下を知るのにも、このAE検出法はかなり有効であるといえる。

#### 10.4 結 言

電磁的な非接触AE検出法を、ワイヤロープ曲げ疲労試験中に発生する素線破断の監視に適用した。その結果を要約すると、以下のようなものである。

- 1) 逆磁歪効果を用いる非接触AE検出法は、動いているワイヤロープにも適用できる。
- 2) 繰返し回数にともなうAEイベント数の推移は、曲げ疲労によるワイヤロープの強度低下の傾向と良く一致する。
- 3) IWRCロープのように、曲げ疲労劣化において、素線断線がロープ内部とくに心ロープで先行的に発生するようなロープには、この断線検出法が漏れ磁束探傷法よりも有効である。

## 参考文献

- 1) 塚田和彦, 花崎紘一, 藤中雄三: ワイヤロープ曲げ疲労試験中の素線断線の非接触検出, 日本非破壊検査協会平成元年度春季大会, 非破壊検査, Vol.38, No.2A, pp.199-200 (Mar.1989)
- 2) ASNT: Nondestructive Testing Handbook, Vol.4, Acoustic Emission Testing, 2nd Edition, Technical Editor: R.K.Miller, Editor: P.McIntire, p.340-341, (1987)
- 3) Babel,H.: Destructive and Non-destructive Test Methods to Determine the Life of Wire Ropes, Part I, Wire, Vol.28, No.6, pp.263-270, (1979); Part II, Wire, Vol.29, No.1, pp.38-44, (1980)

## 結 論

鉱山の巻上げ設備やエレベータ、クレーン、索道などにおいては、それらの主要な要素として使用されているワイヤロープの劣化状態を、常に監視することが、ロープの不時破断による災害を防止し、適切でむだのない取替時期を選定するために、重要なこととなっている。したがって、このような運搬設備に動索として使用されているワイヤロープについては、古くからその非破壊検査に対する関心もたれ、今日までかなりの研究がなされてきた。しかし、未だ、十分に信頼性のある検査手段が確立されているとは言い難い。また、今日では、長大橋などの大型吊構造物の張力部材として用いられるワイヤロープの需要が増大するとともに、既存構造物が次第に老朽化する時期を迎えており、このような現場に静索として用いられているワイヤロープについても、その劣化状態を適正に評価できる非破壊検査方法の開発が希求されている。

そこで、著者は、ワイヤロープの劣化の非破壊検査法として、磁気を用いる方法と、A Eを利用する方法の2つに焦点を絞り、研究を行った。本研究で得られた成果を以下に総括する。

第I部においては、比較的古くから研究のなされている磁気を用いる方法について、ワイヤロープの劣化状態をより定量的に評価できる検査方法の確立を目標とする研究を行った。

第1章では、従来からワイヤロープの検査に用いられている漏れ磁束探傷法において、その検出要素として、出力に速度依存性のない、ホール素子などの感磁性半導体素子を用いることについて検討し、その際に採用すべきワイヤロープの磁化方法や検出器の基本的構成法を提示した。また、サーチコイルを検出要素とする従来の方法では、それほど問題とならなかった、ワイヤロープの磁気ヒステリシス性が探傷に及ぼす影響について明らかにした。

第2章では、第1章の考察にもとづき、吊屋根用のPWSケーブルを直接の対象として、大径静止索にも適用できる漏れ磁束探傷装置の開発を行った。また、その装置を用いて、雨水による局所的な腐食が問題となっている吊屋根ケーブルの現地探傷を実施し、その実用性を確認するとともに、探傷結果から、その腐食の程度を断面積損失率として定量的に評価する方法を提案した。

第3章では、第2章で問題とした、局所的な腐食損傷をもつPWSケーブルについて、探傷結果から求めた断面積損失率をもとにした、引張変形挙動のシミュレーションによっ

て、その残存強度を推定する方法を考案した。また、探傷から強度推定までの一連の劣化評価法について、模擬試料を用いて実験的な検証を行い、さらに、実際の腐食ケーブルに対してこの方法を適用して、その有用性を確認した。

第4章では、漏れ磁束法では困難な、摩耗や腐食など、ロープ長手方向にある程度広がりをもつ損傷の評価に適している、全磁束法について検討し、ロープ内の磁束変化を計測するこの方法の基本的な探傷特性について明らかにした。また、この方法を応用して、腐食した鋼線の長さに沿った断面積の変化を簡便に測定する方法を開発するとともに、この方法が、その精度においても、断面写真法などと遜色のないものであることを確認した。

第5章では、曲げ疲労環境下でのワイヤロープの劣化過程を監視する方法の確立を意図として、構造によってかなりの劣化様相の違いを示す2種類のIWR Cロープについて、シーブ曲げ疲労試験を実施し、実際のロープ管理において劣化の指標として利用されている、ロープの伸びや表面断線数について、その強度低下率との関係を明らかにした。また、試験中に漏れ磁束探傷と全磁束探傷を実施して、漏れ磁束探傷結果からは、ストランド内の断線数が評価できること、また、全磁束探傷結果からは、心ロープ部分も含めて、ロープ全体としての長さに沿った断線密度分布が評価できることを示した。

第Ⅱ部においては、AEを利用する方法について、ワイヤロープに適するより実用的な検査法の開発を目的とする研究を行った。

第6章では、引張疲労過程でのワイヤロープのAEを、加速度計によって観測することについて検討し、端末部に加速度計を接着する方法によって、十分な感度をもってワイヤロープの素線破断が検知できることを示した。

第7章では、より実用的なワイヤロープの素線破断検出法として、新たに磁歪効果を利用する非接触方式のAE検出法を開発した。開発においては、まず、ワイヤロープ用鋼線の磁歪特性について検討し、応力変化に伴う磁化の可逆・不可逆変化の性質を明らかにした。さらに、磁歪効果によって、ワイヤロープ内に超音波を非接触で励起できることと、逆磁歪効果によって、ロープ内を伝播している超音波を非接触で検出できることを示すとともに、その効率の磁界依存性について明らかにした。

第8章では、第7章で開発した非接触AE検出法を、ワイヤロープの引張試験に適用し、その実用性の確認を行うとともに、この方法によって得られるAE検出信号の周波数特性とそのロープ構造による差異、および、ワイヤロープ内での素線破断AE波動の減衰特性について明らかにした。

第9章では、引張疲労環境下でのワイヤロープの劣化過程を監視する方法の確立を意図として、構造用ワイヤロープの引張疲労試験を行い、非接触AE検出法によって求められる素線破断数と、ロープの伸び、剛性の変化などの劣化指標との関係について明らかにし

た。また、逆磁歪効果を利用する非接触検出法によって得られる波形からAEの発生位置を標定する方法を提案した。

第10章では、著者が開発した非接触AE検出法が、動いているロープにも適用できるものであることを、第5章で取りあげたシーブ曲げ疲労試験において確認するとともに、AEイベント累積数の増加傾向と強度低下の傾向が良く一致することを示した。

ワイヤロープの劣化検査の最終的な目標は、そのロープが、あとどれほどの使用に耐えるか、つまり余寿命を評価することにある。したがって、ワイヤロープの非破壊検査法としても、劣化を検知できることはもちろんのこと、それをなんらかの量として測定できることが要求される。また、検査したロープを廃棄すべきか否かを判断するためには、その検査結果をもとにして、ロープの残存強度が評価できることが望ましい。しかし、ワイヤロープの力学的挙動が十分に定式化されていない現時点では、第2，3章で取りあげたPWSケーブルなど、構造の簡単なロープを除いて、非破壊検査によって残存強度を求めることは困難であると言わざるを得ない。したがって、ワイヤロープの管理においては、定量性あって、互に相補的な能力を備えたいくつかの非破壊検査手段を複合的に用いて、その劣化状況を総合的に判断することが重要であり、また、それらの検査法によって実際に劣化過程を監視したような事例が、数多く蓄積されることが必要であると考えられる。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、終始かわらぬ御懇篤な御指導と御示唆を賜った京都大学工学部教授藤中雄三博士、同助教授花崎紘一博士に深く感謝するとともに、身に余る御激励を頂いた京都大学工学部資源工学教室の諸先生方に厚く御礼申し上げます。

本論文第Ⅰ部の研究において、その初期に有益な御討議と惜しみない御協力を頂いた京都大学招へい外国人学者朴承鳳先生（現中華人民共和国阜新鉅業学院副教授）に感謝するとともに、現場計測や実験において数々の便宜を計って頂いた株式会社神戸製鋼所および神鋼鋼線工業株式会社の方々に謝意を表します。また、本論文第Ⅱ部の研究においては、東京製鋼株式会社研究所の方々に実験の全てにおいて御協力を頂いた。ここに深く感謝する次第です。

本研究における数々の実験は、京都大学工学部資源工学教室応用計測学講座の大学院生や学生諸氏の御協力によって実施したものである。ここに記して謝意とする。



# 付 録



## 付録 I ワイヤロープ磁気探傷の損傷検出信号とその処理について

直流磁界のもとで行うワイヤロープの磁気探傷法には、第1, 2章で述べた漏れ磁束法と、第4章で述べた全磁束法があった。漏れ磁束法は、局所的な損傷の検知に優れており、逆に、全磁束法は、ロープの長手方向に広がりをもつような損傷の評価に適している。このように、両者には、互に相補的な特質の違いがある。しかし、2つの方法が本質的に異なっているわけではなく、両者の特質の違いは、検出信号の処理の差異にもとづくものである。つまり、両者とも、原理的には、ロープの長手方向に沿った磁束分布の異常を観測するものといえるが、漏れ磁束法が、その異常の距離に対する密度、つまり磁束密度の変化を探傷出力とするものであるのに対して、全磁束法は、異常の累積分布、つまり前者の距離に対する積分値を探傷出力とする方法なのである。

ここでは、より基本的な立場に立ち返り、損傷を含んだロープを長手方向に磁化したときの、漏れ磁束のロープ半径方向成分と軸方向成分、およびロープ内の磁束、の3つの量を観測することを行い、それらの観測値出力の基本的な特性の違いについて検討するとともに、それらの出力の処理方法について再考する。また、探傷出力から損傷の大きさや分布を推定する、いわゆる逆問題を解く方法として、最適化法を適用する試みについても述べる。

### I・1 漏れ磁束法および全磁束法の損傷検出信号の基本的特性

漏れ磁束検出器として、半径方向用と軸方向用の2つ、それに全磁束検出器の合わせて3つの検出器を製作し、それぞれの出力の基本的特性について比較検討した。

Fig. I.1 は、実験装置および測定系統について示したものである。本実験は、第4章の実験に準じて行うこととし、探傷対象としたPWS37も、その励磁方法および設定諸条件も、4.3において述べたものと同じである。Fig. I.2 は、3つの検出器の構造を示した

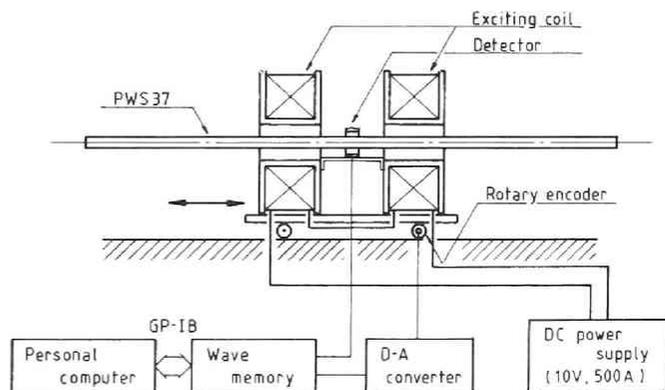


Fig. I.1 実験装置および測定系統

ものである。漏れ磁束検出器は、両者とも外径 48mm の硬質塩化ビニル管にホール素子を環状に 24 個等間隔に配置したもので、1 つは、PWS の半径方向 ( $r$  方向) の磁束密度 ( $B_r$ ) に感応する向き、もう 1 つは、軸方向 ( $z$  方向) の磁束密度 ( $B_z$ ) に感応する向きでホール素子を配置したものである。各素子の出力を加算増幅 (100 倍) し、検出器出力 ( $B_r$ ,  $B_z$ ) とした。一方、全磁束法の検出器は、同じ塩化ビニル管にコイルを巻いたもので、巻幅 6 mm 巻数 100 回のサーチコイルである。本来の全磁束法では、サーチコイルからの出力 (コイルを走査させることによって生ずる誘導起電力) をフラクスメータなどによってアナログ的に積分して検出器出力としていたが、本実験では、サーチコイルの出力を一端そのままデジタル計測することとし、その後数値的な積分を行うことで、磁束に対応した探傷出力 ( $\Phi$ ) を得るようにした。実験においては、PWS 内部に欠陥 (素線を欠落させたもの) を設け、励磁コイルとその中間に設けた検出器とを一体としながら、PWS の中央約 0.8m 程度の区間を移動させて探傷を行った。

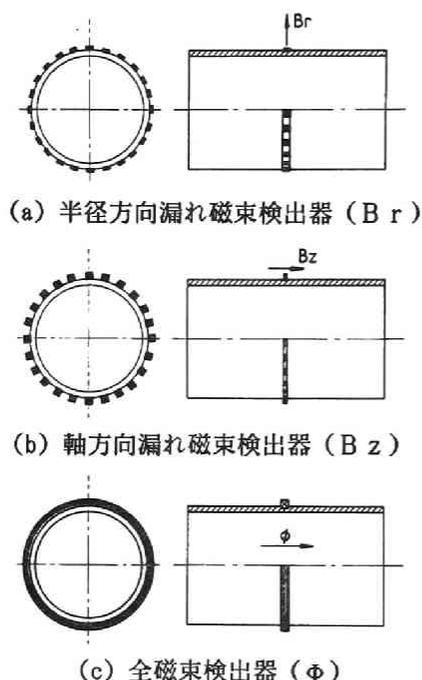


Fig. I.2 検出器の構造

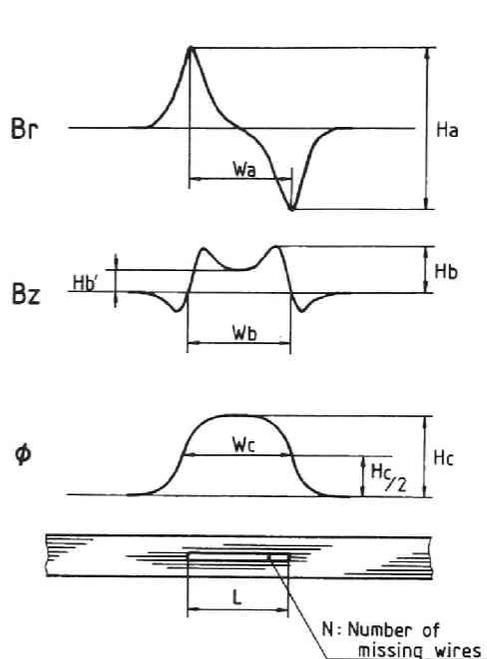


Fig. I.3 波形の特徴値の定義

Fig. I.3 は、それぞれの検出器 ( $B_r$ ,  $B_z$ ,  $\Phi$ ) による損傷検出の典型的な波形を示したものである。一方、Fig. I.4 は、実験で得られた探傷記録を示したものである。横軸は、すべて PWS に沿った距離を表わしている。これらの記録は、PWS の中央で素線が 2 本欠落している場合 ( $N=2$ ) のもので、図中の  $L=40$  mm などは、欠落している区間の長さである。なお、欠落素線のローブ断面内での位置の違いによる出力の変化は、

本実験においてはほとんど無視できるものであった。半径方向漏れ磁束検出で得られた記録 ( $B_r$ ) は、中央のゼロクロス点で点対称性の波形となっており、その Peak to Peak 値は、欠陥部の長さが短くなるほど小さくなっている。軸方向漏れ磁束検出で得られた記録 ( $B_z$ ) は、欠陥の中央において線対称性の波形となっており、欠陥が短い時は単峰のインパルス波形となるが、長さの大きい欠陥では両端にピークをもつ波形となる。一方、全磁束検出の記録 ( $\Phi$ ) は、数値積分で得られたものであるが、第4章の実験で得られたものとはほぼ同じ波形となっている。欠陥部がある程度以上長くなると丘状の波形の頂部が平坦となり、その高さは、ちょうど欠陥部分の断面積減少量に相当する磁束変化となる。

半径方向、軸方向漏れ磁束、全磁束の3つの検出波形について、Fig. I.3 に記入されているような特徴値 (高さ) を定義し、その値について整理すると、Fig. I.5 のようになる。波形の幅として定義したそれぞれの値 ( $W_a$ ,  $W_b$ ,  $W_c$ ) は、欠陥素線数 (すなわち損傷の断面積) には関係なく、欠陥の長さとの関係にある。半径方向漏れ磁束の場合、欠陥の長さのすべての範囲において、( $W_a$ ) は欠陥の長さ ( $L$ ) に一致する。軸方向漏れ磁束の場合は ( $L$ ) が 100mm 以上で、全磁束の場合は 300mm 以上で、波形の幅と欠陥の長さが一致する。一方、波形の高さとして定義した値 ( $H_a$ ,  $H_b$ ,  $H_b'$ ,  $H_c$ ) は、欠陥の長さによって変化するが、欠陥素線数との比例性は欠陥の長さのすべての範囲において保たれている。半径方向漏れ磁束と全磁束の場合は、欠陥の長さの増大に伴って波形の高さ ( $H_a$ ,  $H_c$ ) が増し、徐々に一定値に近づいていく。半径方向漏れ磁束では、150mm 以上の範囲で、全磁束では 400 mm 以上で、一定値となる。軸方向漏れ磁束の場合は、欠陥の長さが 80mm 以下ではシングルピークの波形であるが、それ以上の範囲ではダブルピークの波形となっている。

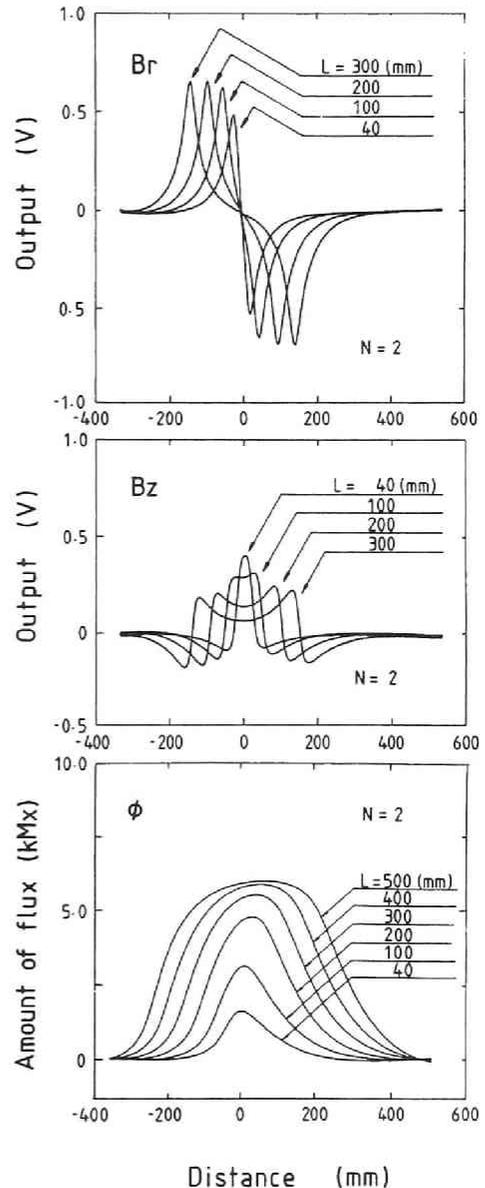


Fig. I.4 種々の欠陥に対する3つの方法による探傷結果

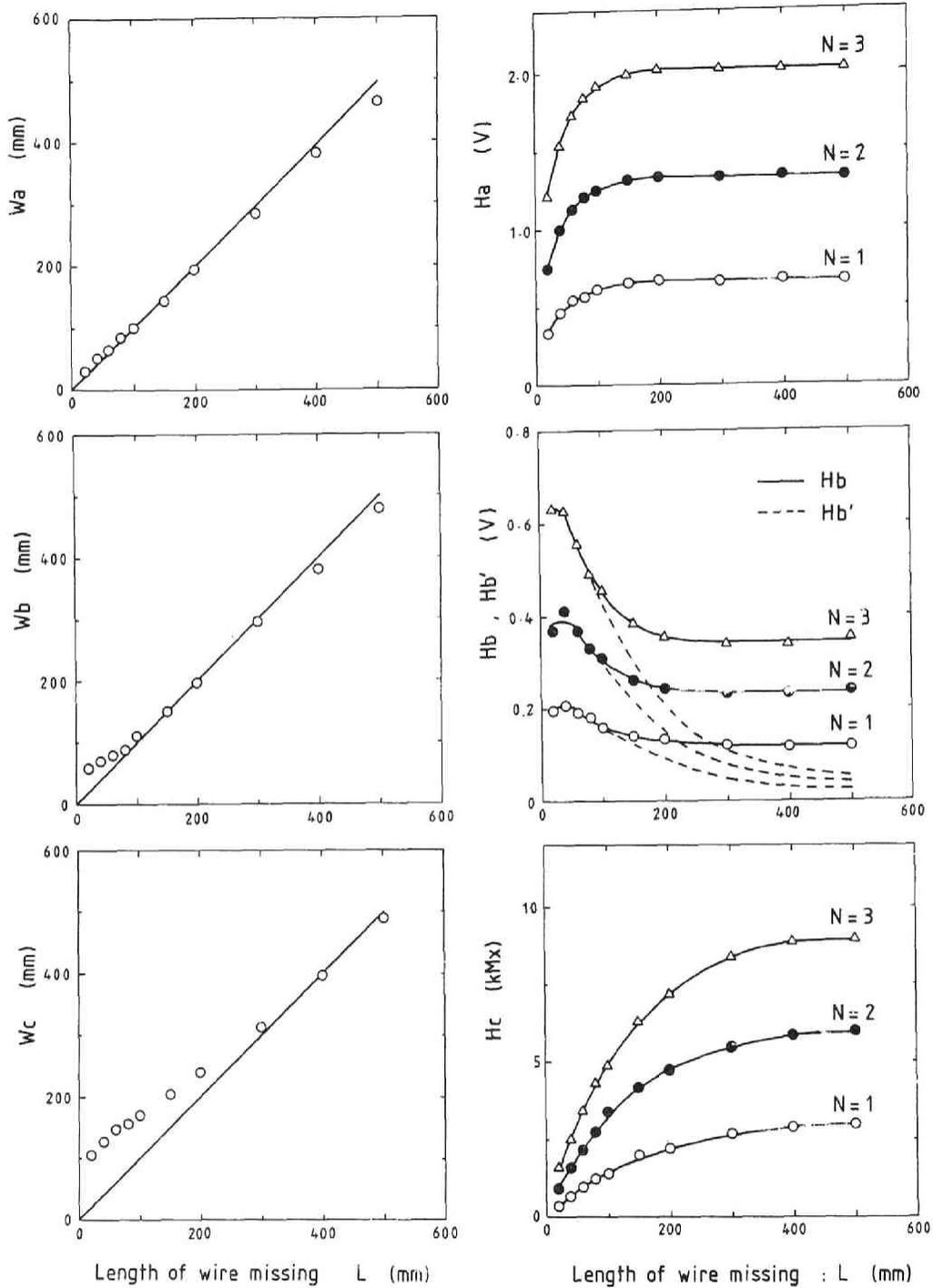


Fig. I.5 欠陥の幅および大きさ（欠落素線数）と波形の特徴値の関係

## I・2 漏れ磁束検出信号のベクトル軌跡表示

2つの検出器によって、漏れ磁束の半径方向成分 ( $B_r$ ) と軸方向成分 ( $B_z$ ) を測定できるので、両者の合成によって磁束密度ベクトル ( $B_r, B_z$ ) を描くことができる。

Fig. I.6 は、縦軸を ( $B_r$ ) 横軸を ( $B_z$ ) として、PWSに沿った各点での磁束密度ベクトルについて、距離を無視してそれらのベクトルが描く軌跡だけを示したものである。(a) は、欠陥素線数が2で、その長さ ( $L$ ) が種々異なる場合のベクトル軌跡を示したものである。(b) は、欠陥の長さを一定にして、本数を変化させた場合の結果である。欠陥の長さが短い時は、横向きハート型のいわゆるカルジオイド曲線のようなになる。欠陥が長くなるにしたがって、ハート型曲線は、徐々にその底部がへこんで上下に広がっていく。なお、ベクトルの大きさは欠陥素線数に比例する。

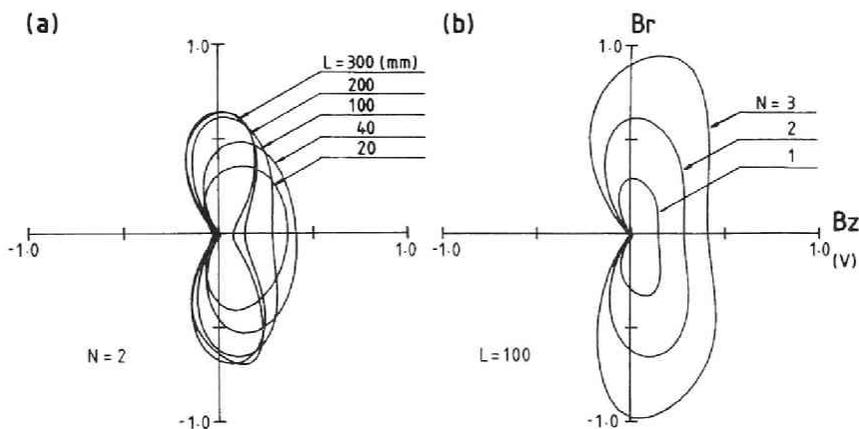


Fig. I.6 漏れ磁束ベクトル ( $B_r, B_z$ ) の軌跡

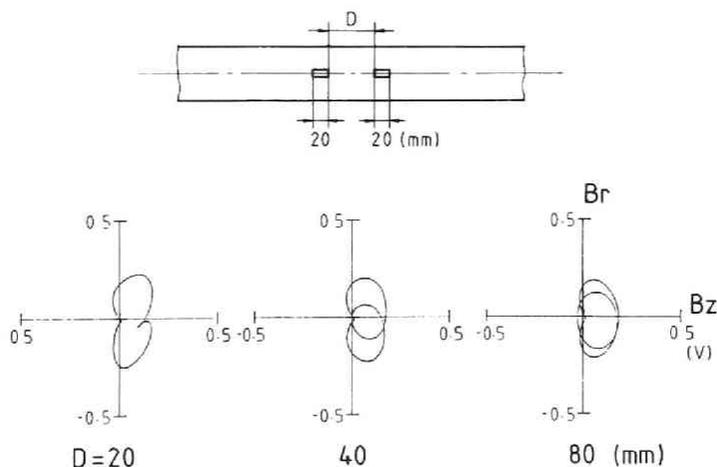


Fig. I.7 隣接欠陥とその漏れ磁束ベクトル軌跡

次に断線が隣接しているような場合のベクトル軌跡を考えてみる。長さ 20mm の欠陥が (d) 離れて 2 つ存在している場合、(d) がそれぞれ 20mm, 40mm, 80mm のときのベクトル軌跡図は、Fig. I.7 のようになる。このようにベクトル軌跡図を書くことによって、損傷の評価を視覚的に行うことができるとともに、断線損傷が長手方向に複数存在するような場合でも、その隣接度合いを図形的に判断することができる。

### I・3 漏れ磁束信号からの全磁束信号の合成

全磁束法は、ロープ長手方向にある程度広がりをもった損傷の検知に適し、その定量性においても優れた方法である。しかし、サーチコイルを 2 分割にすることは困難で実用性においては漏れ磁束法に劣るものである。最初に述べたように、漏れ磁束法は全磁束法と原理的に差異のあるものではないから、その検出信号を処理することによって、全磁束法と同じ特性を備えた探傷信号を生成することができる。

Fig. I.8 のような状況を考える。損傷のない場合にロープ内に誘起される磁束  $\Phi_0$  は、損傷のある部分では、その一部が漏れ磁束  $\Phi_{leak}$  となってロープ外周空間へ現われ出る。

$$\Phi_0 = \Phi_{leak}(z) + \Phi_{res}(z).$$

全磁束法の出力  $E_c$  は、サーチコイル (巻数  $n$ ) の誘導起電力

$$e_c = -n \frac{d\Phi_{res}}{dt}$$

の時間積分として与えられる。

$$\begin{aligned} E_c &= \int e_c dt = -n \int \frac{d\Phi_{res}(z)}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} dt \\ &= -n \int_0^z d\Phi_{res}(z) = -n [\Phi_{res}(z) - \Phi_{res}(0)] \\ &= n (\Phi_0 - \Phi_{res}(z)) = n \cdot \Phi_{leak}(z). \end{aligned}$$

したがって、全磁束法の出力  $E_c$  は、漏れ磁束の長手方向分布  $\Phi_{leak}(z)$  を与える。一方、

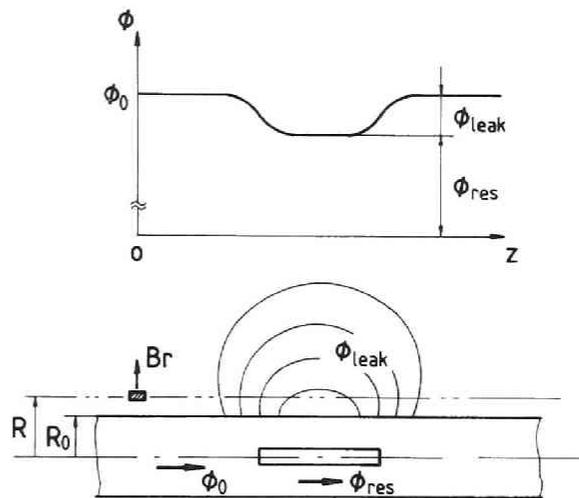


Fig. I.8 欠陥と漏れ磁束

半径方向漏れ磁束検出では、 $B_r(z)$ が探傷結果として与えられる。磁束分布が軸対称的であり、ホール素子のリフトオフが0である（ホール素子の位置 $R =$ ロープの半径 $R_0$ ）と仮定すると、

$$2\pi R_0 \cdot B_r(z) = \frac{d\Phi_{leak}(z)}{dz}$$

$$\Phi_{leak}(z) = \int_0^z d\Phi_{leak}(z) = 2\pi R_0 \int_0^z B_r(z) dz$$

となり、漏れ磁束の長手方向分布  $\Phi_{leak}(z)$ が、半径方向漏れ磁束密度の  $z$  方向距離積分として与えられることになり、これは、全磁束探傷出力と同じ結果を与えるものであることがわかる。

Fig. I.9 は、(a)  $L=40$  mm の欠陥（欠陥素線1本）が3つ隣接している場合、(b)  $L=200$  mm の欠陥（欠陥素線1本）が2つ隣接している場合のそれぞれについて、半径方向と軸方向の漏れ磁束探傷結果を示したもので、(a) (b) とも、最も右の図が、半径方向漏れ磁束密度の  $z$  方向距離積分を行って得られた波形である。この図から、従来局部的損傷の検知にのみ優れていると考えられてきた漏れ磁束探傷においても、その信号処理によって全磁束法と同じように、長手方向にある程度広がりをもった損傷の評価に適する探傷出力を得られることがわかる。また、半径方向よりも軸方向の漏れ磁束探傷信号のほうが、損傷の評価には適していることがわかる。

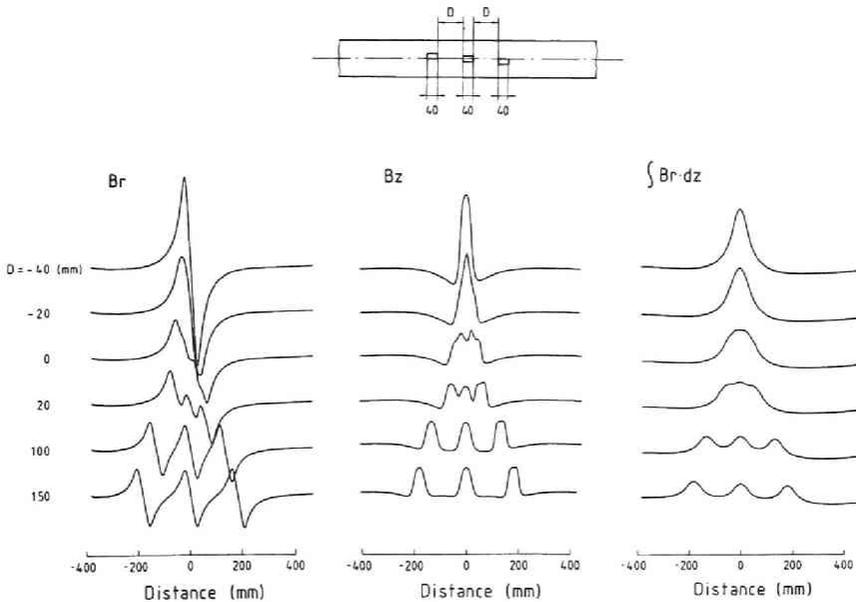


Fig. I.9 隣接欠陥に対する漏れ磁束波形と半径方向漏れ磁束の距離積分で得られる波形  
(a)  $L=40$  mm の欠陥が3つ隣接している場合

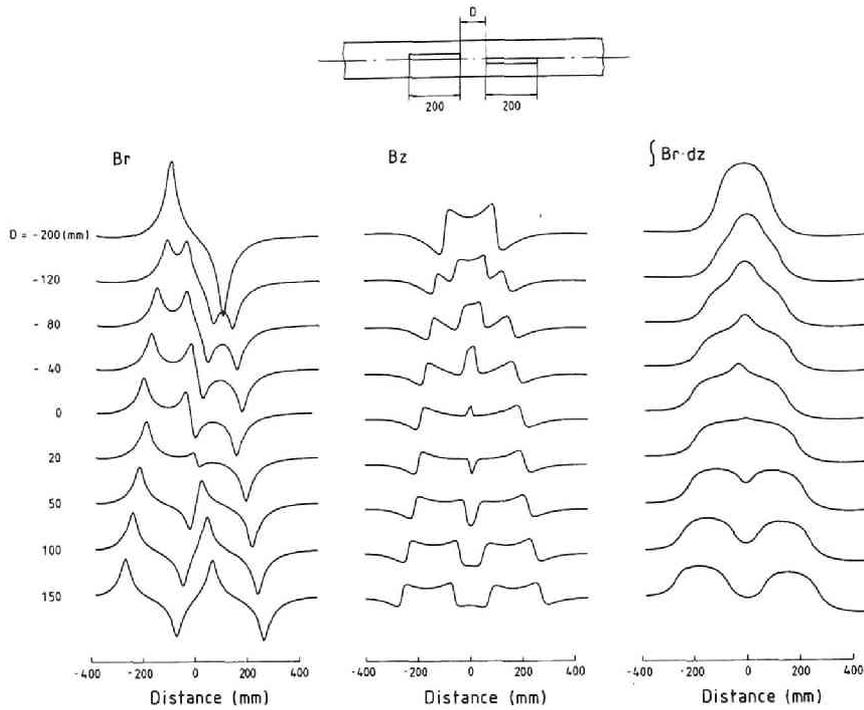


Fig. I.9 隣接欠陥に対する漏れ磁束波形と半径方向漏れ磁束の距離積分で得られる波形  
(b)  $L = 200 \text{ mm}$  の欠陥が2つ隣接している場合

#### I・4 漏れ磁束信号にもとづいた損傷の大きさの推定

対象とするロープが完全な飽和磁化状態にある場合を考える。この場合、ロープの透磁率  $\mu$  は、真空の透磁率  $\mu_0$  と等しいから、ロープ内と外周空間を全く同等に扱うことができる。損傷として断線を想定し、それが磁極の強さ ( $m$ ) 長さ ( $l$ ) の磁気双極子で表わされると考える。この場合、磁極の強さ ( $m$ ) は断線の断面積 (本数) と飽和磁束密度との積に、長さ ( $l$ ) は断線の破面間隔に相当する。このように仮定すると、ロープ中心部に断線が存在する場合、半径 ( $R$ ) のリング型漏れ磁束検出器で観測される長手方向に沿った検出波形 ( $B_r(z)$ ,  $B_z(z)$ ) は、次の式で与えられる。

$$B_r = \frac{m}{4\pi} \cdot \left[ \frac{R}{((z-u-1/2)^2 + R^2)^{3/2}} - \frac{R}{((z-u+1/2)^2 + R^2)^{3/2}} \right]$$

$$B_z = \frac{m}{4\pi} \cdot \left[ \frac{z-u-1/2}{((z-u-1/2)^2 + R^2)^{3/2}} - \frac{z-u+1/2}{((z-u+1/2)^2 + R^2)^{3/2}} \right]$$

ただし、 $u$  は双極子中央点の  $z$  軸上での位置である。Fig. I.10 は、断線の長さ ( $l$ ) が

種々異なる時の、距離にそった検出器の出力波形 ( $B_r(z)$ ,  $B_z(z)$ ) を、上式にもとづいて描いたものである。この図と Fig. I.4 とを比較すると、両者の波形の性状はかなりよく一致しており、断線損傷は、その破面間隔と等しい長さの磁気双極子モデルで近似できるといえる。

つぎに、いくつかの断線がローブ長手方向に隣接して存在している場合について、探傷によって得られる漏れ磁束検出波形から、それらの数および長手方向の位置と長さを求める、いわゆる逆問題について考察してみる。

今、観測波形  $y(z)$  は、 $y(j)$ ;  $j = 1 \dots n$  として、距離に沿った  $n$  個の離散系列として計測されているとする。一方、この観測波形を近似すべきモデル波形  $c(j, \rho)$  は、断線箇所数に対応する  $N$  個の磁気双極子の合成波形として与えられるものとする。1つの双極子で得られる波形  $f_i$  は、長手方向の位置  $u_i$ 、磁極の強さ  $m_i$ 、長さ  $l_i$  の3つをパラメータとする関数(上にあげた  $B_r$ ,  $B_z$  の式)で与えられるから、モデル波形としては、

$$c(j, \rho) = \sum_{i=1}^N f_i(j; u_i, m_i, l_i) \quad ; j = 1 \dots n$$

を考えることになる。ただしここで  $\rho$  は、

$$\rho = \{u_1, m_1, l_1, \dots, u_N, m_N, l_N\}$$

の  $3 \times N$  個の要素よりなるパラメータベクトルである。結局、観測波形から断線数や位置と長さを求める問題は、 $y(j)$  に最も近い波形  $c(j, \rho)$  を与えるパラメータベクトル  $\rho$  を求める問題となる。そこで評価関数  $E(\rho)$  として、観測波形とモデル波形の残差二乗和

$$E(\rho) = \sum_{j=1}^n [y(j) - c(j, \rho)]^2$$

を採用し、これが最小となるような  $\rho$  を求めることにした。実際にこの非線形最適化問題

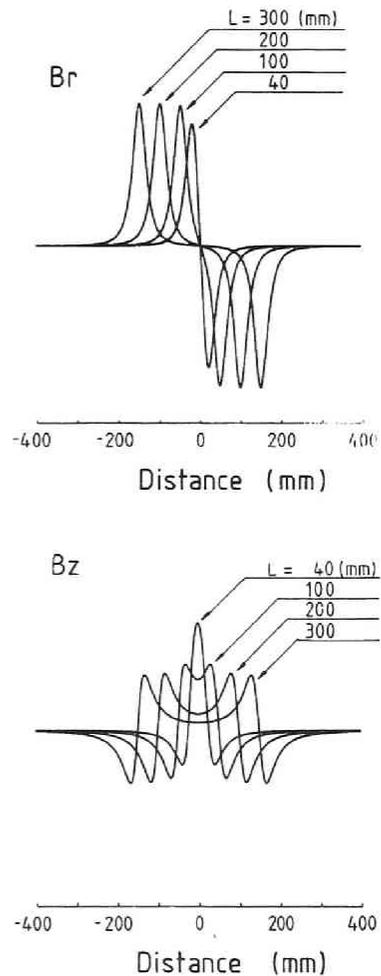


Fig. I.10 磁気双極子モデルによる漏れ磁束密度分布の計算

を解くにあたっては、その方法としてシンプレックス法を用いた。また、観測波形としては、半径方向漏れ磁束の検出波形のみを扱うことにした。

Fig. I.11 は、その結果の1例を示したものである。対象としては、Fig. I.9 にあげた、 $L=40\text{mm}$ の欠陥が間隔 $20\text{mm}$ で3つ隣接している場合をとりあげた。Fig. I.11 の上半部は、観測波形（太実線）とモデル波形（細実線）を、下半部は、両者の残差を示したもので、観測波形がほぼ同じ大きさで長さをもつ3つの双極子（点線）の合成として良く近似できていることがわかる。

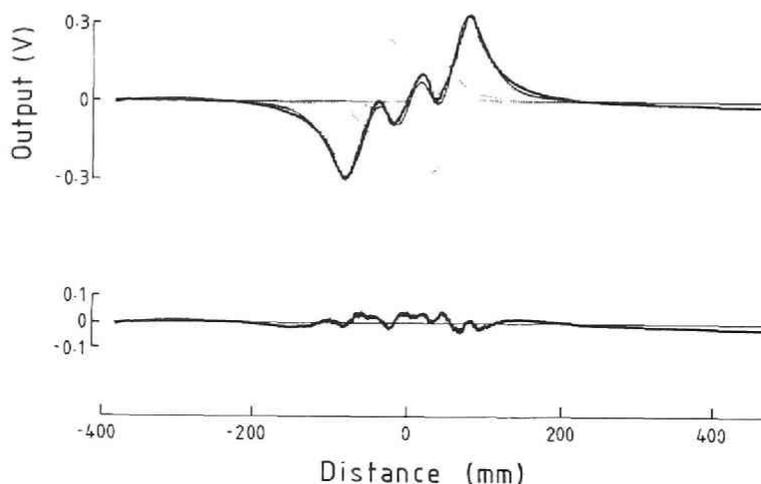


Fig. I.11 隣接欠陥に対する半径方向漏れ磁束波形と  
その双極子モデル近似波形（最適化計算結果）

## 付録Ⅱ 素線破断AEの発生位置の標定と伝播減衰率の推定の方法について

### Ⅱ・1 AEの発生位置の標定方法

まず、Fig.Ⅱ.1に示したように、検出コイルが1つの場合について考える。ロープの全長を $L$ 、AEの発生位置を $X_e$ 、検出コイルの位置を $X_c$ とする。また、発生位置から右へ伝播する波を $W_R(R_0, R_1, R_2, \dots)$ 、左へ伝播する波を $W_L(L_0, L_1, L_2, \dots)$ と表わすことにする。なお、添字は、反射回数を表わし、たとえば、 $W_R$ についていえば、 $R_0$ は直接波で、 $R_1$ はそれが右端で1回反射して来た波、 $R_2$ はそれがもう一度左端で、計2回反射して戻って来た波を表わす。 $R_0, R_1, R_2, L_0, L_1, L_2$ のそれぞれの波がコイルに到達するまでに伝播した距離は、TableⅡ.1中に示したようになる。コイルで観測された信号波形上の最初から4つの小波形を( $W_0, W_1, W_2, W_3$ )と名付けることにすると、それらが( $R_0, R_1, R_2, L_0, L_1, L_2$ )のどれに対応するかは、 $X_e, X_c, L$ の相対関係によって、TableⅡ.1に示したように、4つの場合にわけられる。場合わけの条件式を( $X_c, X_e$ )平面で描くとFig.Ⅱ.2のようになり、検出コイルの位置( $X_c$ )を固定すれば、4つのうち現実には3つの場合しか起こりえないことになる。

次に、上述の考察にもとづいて、検出コイルが2つある場合について考える。Fig.Ⅱ.3に示したように、検出コイル1および2の位置を、それぞれ $X_{c1}, X_{c2}$ とするが、ここでは、 $0 < X_{c1} < X_{c2} < L$ と、コイルの配置順序はかえないものとする。たとえば、発生位置から右へ出た波 $W_R(R_0, R_1, R_2, \dots)$ は、まず $R_0$ がコイル1、コイル2の順序で観測され、次にその反射波である $R_1$ がコイル2、コイル1の順序で観測される。コイルで検知されるこれらの波動を、そのコイル番号を冠して、 $W_R$ については( $1R_0, 2R_0, 2R_1, 1R_1, 1R_2, 2R_2, \dots$ )  $L$ については( $2L_0, 1L_0, 1L_1, 2L_1, 2L_2, 1L_2, \dots$ )と名付けることにすると、それぞれ波動がコイルに到達するまでに伝播した距離は、TableⅡ.2中に示したようになる。それぞれの波動が、コイル1およびコイル2で観測された信号波形上の最初から4つの小波形( $1W_0, 1W_1, 1W_2, 1W_3$ ) ( $2W_0, 2W_1, 2W_2, 2W_3$ )のどれに対応するかは、 $X_e, X_{c1}, X_{c2}, L$ の相対関係によって、TableⅡ.2中に示したように、9つの場合にわけられる。Fig.Ⅱ.4に示したように、実際には $X_{c1}, X_{c2}$ は決まった値であるから、9つのうち現実には5つの場合しか起こりえない。第9章の実験において、コイル1とコイル2をロープ長の $2/5$ と $4/5$ の位置においたのは、これら5つの区間が共に同じ長さになるようにするためである。

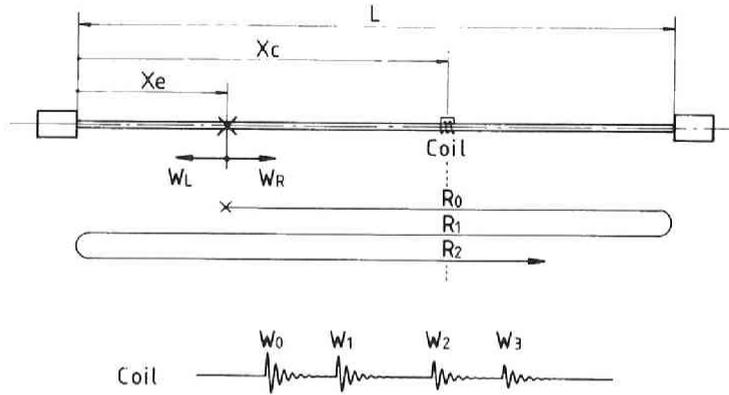


Fig. II.1 検出コイルの配置と観測波形 (コイルが1つの場合)

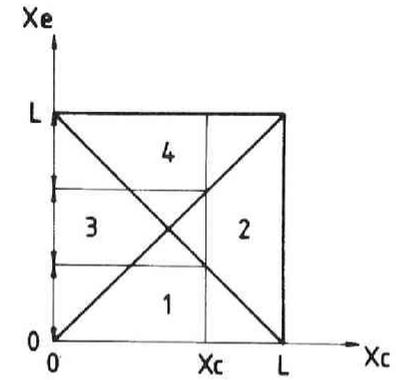


Fig. II.2 位置標定における場合わけ条件 (コイルが1つの場合)

Table II.1 波動伝播と観測小波形との対応 (コイルが1つの場合)

波動	伝播距離	$X_e < X_c$		$X_c < X_e$	
		$X_c + X_e < L$	$L < X_c + X_e$	$X_c + X_e < L$	$L < X_c + X_e$
$R_0$	$X_c - X_e$	$W_0$	$W_0$	$\times$	$\times$
$R_1$	$2L - X_c - X_e$	$W_2$	$W_1$	$W_2$	$W_1$
$R_2$	$2L + X_c - X_e$	$(W_4)$	$(W_4)$	$W_3$	$W_3$
$L_0$	$-X_c + X_e$	$\times$	$\times$	$W_0$	$W_0$
$L_1$	$X_c + X_e$	$W_1$	$W_2$	$W_2$	$W_2$
$L_2$	$2L - X_c + X_e$	$W_3$	$W_3$	$(W_4)$	$(W_4)$

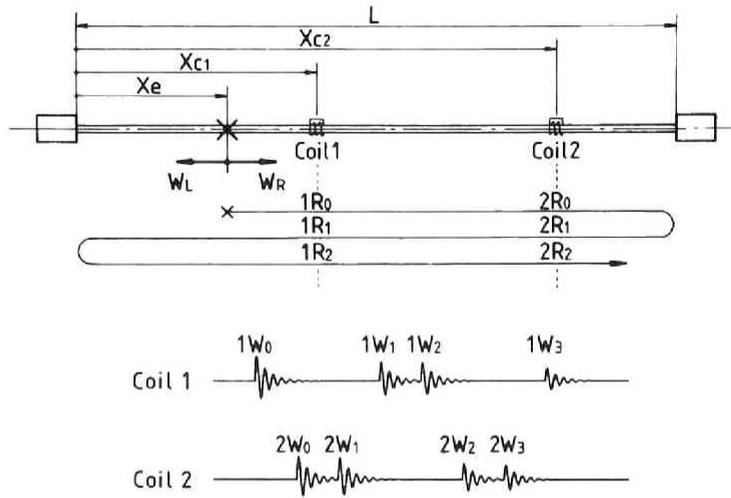


Fig. II.3 検出コイルの配置と観測波形 (コイルが2つの場合)

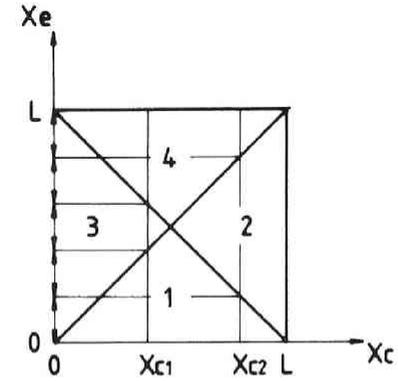


Fig. II.4 位置標定における場合わけ条件 (コイルが2つの場合)

Table II.2 波動伝播と観測小波形との対応 (コイルが2つの場合)

波動	伝播距離	反射係数	$X_e < X_{c1} < X_{c2}$			$X_{c1} < X_e < X_{c2}$			$X_{c1} < X_{c2} < X_e$		
			$X_{c1} + X_e < L$		$X_{c2} + X_e > L$	$X_{c1} + X_e < L$		$X_{c2} + X_e > L$	$X_{c1} + X_e < L$		$X_{c2} + X_e > L$
			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
$1R_0$	$X_{c1}$	$-X_e$	$1W_0$	$1W_0$	$1W_0$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$
$2R_0$	$X_{c2} - X_e$		$2W_0$	$2W_0$	$2W_0$	$2W_0$	$2W_0$	$2W_0$	$\times$	$\times$	$\times$
$2R_1$	$2L - X_{c2} - X_e$	$\eta_R$	$2W_2$	$2W_1$	$2W_1$	$2W_2$	$2W_1$	$2W_1$	$2W_2$	$2W_1$	$2W_1$
$1R_1$	$2L - X_{c1} - X_e$	$\eta_R$	$1W_2$	$1W_2$	$1W_1$	$1W_2$	$1W_2$	$1W_1$	$1W_2$	$1W_2$	$1W_1$
$1R_2$	$2L + X_{c1} - X_e$	$\eta_R \eta_L$	$1W_3$	$1W_3$	$1W_3$	$1W_3$	$1W_3$	$1W_3$	$1W_3$	$1W_3$	$1W_3$
$2R_2$	$2L + X_{c2} - X_e$	$\eta_R \eta_L$	$2W_3$	$2W_3$	$2W_3$	$2W_3$	$2W_3$	$2W_3$	$2W_3$	$2W_3$	$2W_3$
$2L_0$	$-X_{c2} + X_e$		$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$2W_0$	$2W_0$	$2W_0$
$1L_0$	$-X_{c1} + X_e$		$\times$	$\times$	$\times$	$1W_0$	$1W_0$	$1W_0$	$1W_0$	$1W_0$	$1W_0$
$1L_1$	$X_{c1} + X_e$	$\eta_L$	$1W_1$	$1W_1$	$1W_2$	$1W_1$	$1W_1$	$1W_2$	$1W_1$	$1W_1$	$1W_2$
$2L_1$	$X_{c2} + X_e$	$\eta_L$	$2W_1$	$2W_2$	$2W_2$	$2W_1$	$2W_2$	$2W_2$	$2W_1$	$2W_2$	$2W_2$
$2L_2$	$2L - X_{c2} + X_e$	$\eta_R \eta_L$	$2W_3$	$2W_3$	$2W_3$	$2W_3$	$2W_3$	$2W_3$	$2W_3$	$2W_3$	$2W_3$
$1L_2$	$2L - X_{c1} + X_e$	$\eta_R \eta_L$	$1W_3$	$1W_3$	$1W_3$	$1W_3$	$1W_3$	$1W_3$	$1W_3$	$1W_3$	$1W_3$

Fig.9.4 で定義したとおり、位置標定は、検出波形から読取った7つの時間差 ( $T_{00}, T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{21}, T_{22}, T_{23}$ ) をもとにして行う。これらの時間差に伝播速度  $V_p$  をかけた値は、各コイルでの観測された信号中の小波の伝播距離 ( $\overline{1W_0}, \overline{1W_1}, \dots, \overline{2W_0}, \overline{2W_1}, \dots$  と表わすことにする) の差に対応するから、

$$\begin{bmatrix} T_{00} \\ T_{11} \\ T_{12} \\ T_{13} \\ T_{21} \\ T_{22} \\ T_{23} \end{bmatrix} \cdot V_p = \begin{bmatrix} \overline{2W_0} \\ \overline{1W_1} \\ \overline{1W_2} \\ \overline{1W_3} \\ \overline{2W_1} \\ \overline{2W_2} \\ \overline{2W_3} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \overline{1W_0} \\ \overline{1W_0} \\ \overline{1W_0} \\ \overline{1W_0} \\ \overline{2W_0} \\ \overline{2W_0} \\ \overline{2W_0} \end{bmatrix}$$

したがって、9つの場合のそれぞれについて、 $V_p$  と  $X_e$  を求める連立方程式

$$S_{ij} \cdot \begin{bmatrix} V_p/2 \\ X_e \end{bmatrix} = D_i \quad (i = 1, 2, \dots, 7; j = 1, 2)$$

は、Table II.3 のようになる。実際の位置標定においては、まず  $X_e$  の存在範囲を仮定し、上の式を解いて  $V_p$  と  $X_e$  をもとめ、 $X_e$  がはじめに仮定した範囲内にあれば、その  $X_e$  は真の値であるとした。

Table II.3 AE発生位置の標定方程式群

	$X_e < X_{c1} < X_{c2}$		$X_{c1} < X_e < X_{c2}$		$X_{c1} < X_{c2} < X_e$	
	[Sij]	[Di]	[Sij]	[Di]	[Sij]	[Di]
$X_{c1} + X_e < X_{c2} + X_e < L$	$2T_{00} \ 0$ $T_{11} \ -1$ $T_{12} \ 0$ $T_{13} \ -1$ $T_{21} \ -1$ $T_{22} \ 0$ $T_{23} \ -1$	$-X_{c1} + X_{c2}$ $0$ $L - X_{c1}$ $L - X_{c1}$ $0$ $L \ -X_{c2}$ $L \ -X_{c2}$	$2T_{00} \ 2$ $T_{11} \ 0$ $T_{12} \ 1$ $T_{13} \ 1$ $T_{21} \ -1$ $T_{22} \ 0$ $T_{23} \ -1$	$X_{c1} + X_{c2}$ $X_{c1}$ $L$ $L + X_{c1}$ $0$ $L \ -X_{c2}$ $L \ -X_{c2}$	$2T_{00} \ 0$ $T_{11} \ 0$ $T_{12} \ 1$ $T_{13} \ 1$ $T_{21} \ 0$ $T_{22} \ 1$ $T_{23} \ 1$	$+X_{c1} - X_{c2}$ $X_{c1}$ $L$ $L + X_{c1}$ $X_{c2}$ $L$ $L \ +X_{c2}$
$X_{c1} + X_e < L < X_{c2} + X_e$	$2T_{00} \ 0$ $T_{11} \ -1$ $T_{12} \ 0$ $T_{13} \ -1$ $T_{21} \ 0$ $T_{22} \ -1$ $T_{23} \ -1$	$-X_{c1} + X_{c2}$ $0$ $L - X_{c1}$ $L - X_{c1}$ $L \ -X_{c2}$ $0$ $L \ -X_{c2}$	$2T_{00} \ 2$ $T_{11} \ 0$ $T_{12} \ 1$ $T_{13} \ 1$ $T_{21} \ 0$ $T_{22} \ -1$ $T_{23} \ -1$	$X_{c1} + X_{c2}$ $X_{c1}$ $L$ $L + X_{c1}$ $L \ -X_{c2}$ $0$ $L \ -X_{c2}$	$2T_{00} \ 0$ $T_{11} \ 0$ $T_{12} \ 1$ $T_{13} \ 1$ $T_{21} \ 1$ $T_{22} \ 0$ $T_{23} \ 1$	$+X_{c1} - X_{c2}$ $X_{c1}$ $L$ $L + X_{c1}$ $L$ $X_{c2}$ $L \ +X_{c2}$
$L < X_{c1} + X_e < X_{c2} + X_e$	$2T_{00} \ 0$ $T_{11} \ 0$ $T_{12} \ -1$ $T_{13} \ -1$ $T_{21} \ 0$ $T_{22} \ -1$ $T_{23} \ -1$	$-X_{c1} + X_{c2}$ $L - X_{c1}$ $0$ $L - X_{c1}$ $L \ -X_{c2}$ $0$ $L \ -X_{c2}$	$2T_{00} \ 2$ $T_{11} \ 1$ $T_{12} \ 0$ $T_{13} \ 1$ $T_{21} \ 0$ $T_{22} \ -1$ $T_{23} \ -1$	$X_{c1} + X_{c2}$ $L$ $X_{c1}$ $L + X_{c1}$ $L \ -X_{c2}$ $0$ $L \ -X_{c2}$	$2T_{00} \ 0$ $T_{11} \ 1$ $T_{12} \ 0$ $T_{13} \ 1$ $T_{21} \ 1$ $T_{22} \ 0$ $T_{23} \ 1$	$+X_{c1} - X_{c2}$ $L$ $X_{c1}$ $L + X_{c1}$ $L$ $X_{c2}$ $L \ +X_{c2}$

## II・2 伝播減衰率の推定方法

A E の発生位置が標定されれば、第 8 章で述べたように、波動の伝播減衰率  $\alpha$  や左右両端での反射損失率 ( $\eta_R, \eta_L$ ) を求めることができる。Table II.2 を参照すれば、たとえば、 $X_e$  が⑥の範囲にある場合、次のような連立方程式が成立つ。

$$\begin{array}{l}
 1R_0: \\
 2R_0: \\
 2R_1: \\
 1R_1: \\
 1R_2: \\
 2R_2: \\
 \\
 2L_0: \\
 1L_0: \\
 1L_1: \\
 2L_1: \\
 2L_2: \\
 1L_2:
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 & X_{c_1} & -X_e & 0 & 0 \\
 & & X_{c_2} - X_e & 0 & 0 \\
 2L & & -X_{c_2} - X_e & 1 & 0 \\
 2L - X_{c_1} & & -X_e & 1 & 0 \\
 2L + X_{c_1} & & -X_e & 1 & 1 \\
 2L & & +X_{c_2} - X_e & 1 & 1 \\
 \\
 & -X_{c_2} + X_e & 0 & 0 & 0 \\
 & -X_{c_1} & +X_e & 0 & 0 \\
 & X_{c_1} & +X_e & 0 & 1 \\
 & & X_{c_2} + X_e & 0 & 1 \\
 2L & & -X_{c_2} + X_e & 1 & 1 \\
 2L - X_{c_1} & & +X_e & 1 & 1
 \end{bmatrix}
 \cdot
 \begin{bmatrix}
 \alpha \\
 \eta_R \\
 \eta_L
 \end{bmatrix}
 = 20 \log
 \begin{bmatrix}
 \times \\
 \langle 2W_0 \rangle / V_0 \\
 \langle 2W_1 \rangle / V_0 \\
 \langle 1W_1 \rangle / V_0 \\
 \langle 1W_3 \rangle / V_0 \\
 ? \\
 \\
 \times \\
 \langle 1W_0 \rangle / V_0 \\
 \langle 1W_2 \rangle / V_0 \\
 \langle 2W_2 \rangle / V_0 \\
 \langle 2W_3 \rangle / V_0 \\
 ?
 \end{bmatrix}$$

ただし、 $\alpha, \eta_R, \eta_L$  は dB 値であり、 $\langle \rangle$  はその波形の大きさ（電圧）を表わす。 $V_0$  は、基準となる伝播距離 0 での検出電圧であるが、実際には未知であるので、基準電圧として、1 ch での第一到達波（直接波）の検出電圧  $\langle 1W_0 \rangle$  を採用することとすれば、伝播減衰率等を求めるための連立方程式は次のようになる。

$$\begin{array}{l}
 2R_0: \\
 2R_1: \\
 1R_1: \\
 1R_2: \\
 \\
 1L_0: \\
 1L_1: \\
 2L_1: \\
 2L_2:
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 & X_{c_1} + X_{c_2} - 2X_e & 0 & 0 \\
 2L - & X_{c_1} - X_{c_2} - 2X_e & 1 & 0 \\
 2L + & X_{c_1} & -2X_e & 1 & 0 \\
 2L + 2 & X_{c_1} & -2X_e & 1 & 1 \\
 \\
 & 0 & 0 & 0 \\
 & 2X_{c_1} & 0 & 1 \\
 & X_{c_1} + X_{c_2} & 0 & 1 \\
 2L + & X_{c_1} - X_{c_2} & 1 & 1
 \end{bmatrix}
 \cdot
 \begin{bmatrix}
 \alpha \\
 \eta_R \\
 \eta_L
 \end{bmatrix}
 = 20 \log
 \begin{bmatrix}
 \langle 2W_0 \rangle / \langle 1W_0 \rangle \\
 \langle 2W_1 \rangle / \langle 1W_0 \rangle \\
 \langle 1W_1 \rangle / \langle 1W_0 \rangle \\
 \langle 1W_3 \rangle / \langle 1W_0 \rangle \\
 \\
 1 \\
 \langle 1W_2 \rangle / \langle 1W_0 \rangle \\
 \langle 2W_2 \rangle / \langle 1W_0 \rangle \\
 \langle 2W_3 \rangle / \langle 1W_0 \rangle
 \end{bmatrix}$$

