

漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査における劣化損傷の評価
に関する研究

令和 4年 1月

日本大学大学院理工学研究科博士後期課程

精密機械工学専攻

大 塚 賢 哉

目 次

記 号 一 覧	1
第 1 章 序 論	3
1. 1 はしがき	3
1. 2 ワイヤロープの破断事例とその廃棄基準や使用限度の基準	4
1. 3 漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査の現況	7
1. 3. 1 漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査において発生するノイズの評価 に関する研究	8
1. 3. 2 磁気センサアレイを用いたワイヤロープ検査手法に関する研究	8
1. 3. 3 劣化損傷の特徴量抽出のための信号処理に関する研究	9
1. 4 本研究の目的と特色	10
1. 5 本論文の構成	12
第 2 章 漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査におけるストランドノイズ評価	14
2. 1 はしがき	14
2. 2 ワイヤロープの構造や素線切れについて	15
2. 2. 1 ワイヤロープの構造	15
2. 2. 2 素線切れの特徴量抽出の計算方法	16
2. 2. 3 炭素鋼の磁気特性	17
2. 3 有限要素法を用いた静磁場の数値解析要領	17
2. 4 磁気飽和可能なワイヤロープテストの磁化器の検討	20
2. 4. 1 数値解析に用いるワイヤロープの検討	20
2. 4. 2 有限要素法を用いた静磁場解析によるワイヤロープテストの検討	21
2. 4. 3 損傷検出試験によるワイヤロープテストの検討	22
2. 5 有限要素法を用いた静磁場解析によるストランドノイズ評価	23
2. 6 損傷検出試験によるストランドノイズの評価	27
2. 6. 1 試験要領	27
2. 6. 2 感磁方向ごとのストランドノイズの評価	29
2. 7 結 言	33

第3章	二次元平面におけるマルチセンサデータの特徴量抽出による劣化損傷の評価	34
3.1	はしがき	34
3.2	マルチセンサを用いたワイヤロープテストによる測定	35
3.2.1	ワイヤロープテスト	35
3.2.2	損傷検出試験に用いるワイヤロープと素線切れについて	36
3.2.3	試験要領	39
3.2.4	ワイヤロープ周囲に発生する磁束密度の測定結果	40
3.3	二次元平面におけるマルチセンサデータによる素線切れの評価要領	43
3.3.1	カーネルサポートベクタマシンの分類評価	43
3.3.2	二次元平面におけるマルチセンサデータによる素線切れの特徴量抽出	49
3.3.3	混同行列による分類結果の評価	51
3.4	二次元平面におけるマルチセンサデータを用いた素線切れ評価	51
3.4.1	ロープ長手方向における素線切れ評価	51
3.4.2	ロープ円周方向における素線切れ評価	53
3.5	結 言	57
第4章	異種センサの複合センサデータによる劣化損傷の要因判別手法の検討	58
4.1	はしがき	58
4.2	異種センサを用いたワイヤロープテストによる測定	58
4.2.1	ワイヤロープテスト	58
4.2.2	損傷検出試験に用いるワイヤロープと劣化損傷について	59
4.2.3	試験要領	61
4.2.4	ワイヤロープの測定結果	62
4.3	異種センサの複合センサデータによる劣化損傷の要因判別	70
4.3.1	連続ウェーブレット変換による劣化損傷の特徴量抽出要領	70
4.3.2	素線切れ, 腐食錆, 摩耗の特徴量抽出の結果	72
4.4	結 言	75
第5章	結 論	76
5.1	本論文の成果	76
5.2	今後の課題	78

謝 辭79

参 考 文 献80

記 号 一 覧

(1) 電磁気関係

H : 磁場の強さ

E : 電場の強さ

B : 磁束密度

D : 電束密度

J : 電流密度

下添字 “1” : 媒質 1 を意味する

“2” : 媒質 2 を意味する

J_0 : 駆動電流密度

J_m : 等価磁化電流密度

ρ : 電荷密度

\mathbf{n} : 媒質の境界に与えられた法線ベクトル

A : 磁気ベクトルポテンシャル

Φ : スカラポテンシャル

M : 磁化ベクトル

(2) 材料特性

μ : 透磁率

ν : 磁気抵抗率

下添字 “0” : 磁性体を意味する

ε : 誘電率

σ : 導電率

(3) 信号処理関係

SNR : 信号対雑音比

S_p : ワイヤロープの 1 ピッチにおける磁束密度の分散 (劣化損傷が存在する場合)

N_p : ワイヤロープの 1 ピッチにおける磁束密度の分散 (劣化損傷が存在しない場合)

t : 計測時間

h : 計測信号

ψ : 局所的な基本参照波 (マザーウェーブレット)

a : 参照波の拡大縮小パラメータ

b : 参照波の平行移動パラメータ

(4) 機械学習関係

m : データの次元数

M_s : 教師データの個数

x : x 方向の教師データの値

y : y 方向の教師データの値

下添字 “ i ” : 1つ目の分類ラベルを意味する

“ j ” : 2つ目の分類ラベルを意味する

D_s : 線形分離可能な決定関数

w : データの次元係数ベクトル

W : 1次元の係数ベクトル

b_D : 決定関数の条件式のバイアス項

a_D : 超平面に垂直な線分のパラメータ

δ : 超平面への距離のマージン

S : サポートベクトルに対応する添字の集合

α_i : 非負のラグランジュ乗数

ξ_i : 非負の変数

(5) 形状・寸法関係

θ_s : ワイヤロープのストランドのより角度

l : ワイヤロープのストランドのピッチ長さ

r_s : ワイヤロープ中心からストランド中心までの距離

第1章 序 論

1. 1 はしがき

ワイヤロープは複数の素線を組み合わせた構造をしていることから、他の鋼材と比べて、可撓性を有しており引張強度も高いとされている。そのため、エレベータや橋梁、遊戯施設等の多種多様な用途に用いられており、ワイヤロープの構造や材質は用途によって異なる。ワイヤロープは日本産業規格（JIS：Japan Industrial Standards）のJIS G 3525において定められており、硬鋼線材が用いられている素線、複数の素線をより合わせたストランド、ロープ中心に位置する心網から形成されている。加えて、細かい施工管理についても各用途によって定められている。しかし、機器によっても用いられているワイヤロープの種類は異なるため、施工管理者ごとに点検を行い、安全性について判断していることが多く、経験が浅いことによって事故に繋がっている事例もある。点検は主に目視による手法が採用されていることから、素線切れを含めた劣化損傷の有無の判断だけに留まっていた。また、定性的で曖昧な判断になることが多いため、点検者の熟練度に委ねられている。

このような背景から、定量的な判断を行うために2000年頃から漏洩磁束探傷法を用いた劣化損傷の検出手法に関して検討が行われている。特にエレベータでは2007年の高層ビルで発生したエレベータのワイヤロープの損傷事故により、全国でエレベータに用いられているワイヤロープの緊急点検を行う必要があることから、従来の目視による検査手法よりも迅速で正確な判断が可能な検査手法の確立が重要な課題となった。当時は目視による検査を補う手法として漏洩磁束探傷法を用いたロープテストの検討を行い、目視では確認ができなかったロープ表面に発生する初期の劣化損傷の有無を電気信号として確認することに留まったが、近年ではロープ表面に発生する劣化損傷の数やロープ内部に発生する劣化損傷の有無について判断が可能なロープテストが検討されている。しかし、ワイヤロープが複雑な形状をしていることから様々な因子の影響を受けるため、劣化損傷の箇所（ロープ表面や内部）や形態、本数等の評価は難しい。そのため、漏洩磁束探傷法を用いた検査手法によるワイヤロープの劣化損傷の評価を行うには次のような課題がある。

- 1) 劣化損傷の検出の際にノイズとして発生している磁束密度の低減のためにワイヤロープの周囲に発生するワイヤロープの構造に起因した磁束密度の解明
- 2) 劣化損傷の箇所（ロープ表面や内部）や形態、本数といった劣化損傷の状態の特徴量について信号処理を用いて抽出し、分類を行う手法の検討
- 3) 検出器（磁気センサ）の適正な検出角度やセンサアレイを組み込んだ際の適正な位置

の検討

本研究では漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査の発展に寄与するため、上述の 1) の項目について有限要素法を用いた三次元の磁場解析により、ワイヤロープの周囲に発生するワイヤロープの構造に起因した磁束密度の解明を行う。また、上述の 2) の項目についてロープ円周に複数の検出器を配置したロープテストの隣接する検出器間の情報に着目することにより、劣化損傷の箇所や形態、本数といった劣化損傷の状態の特徴量について信号処理を用いて抽出し、分類を行う手法の検討を行う。これらの 1) および 2) の検証より、上述の 3) の項目について検出器の適正な検出角度やセンサアレイを組み込んだ際の適正な位置の検討を行い、ワイヤロープ検査の信頼性やワイヤロープの機械・構造要素としての安全性に寄与せんとするものである。

1. 2 ワイヤロープの破断事例とその廃棄基準や使用限度の基準

ワイヤロープも他の鋼材と同様に使用期間の経過とともに疲労、摩耗、腐食等によって劣化していく。特にワイヤロープは多数の鋼線を束ねた構造していることから可撓性に富んでいるが、劣化の進行が速くなる傾向がある。そのため、微細な劣化も早期に発見することがワイヤロープの安全性を確保するのに重要な課題となっている。

ワイヤロープの使用されている分野は多岐にわたっているが、使用形態は動索と静索の二つに大別することができる。動索はエレベータやクレーン等に用いられ、長尺で曲げやすいという特徴を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。静索は橋梁等に用いられ、長尺で高強度であるという特徴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。どちらの使用形態においてもワイヤロープは主たる機能を担う要素として用いられており、ロープの劣化が構造物の破壊や人的な被害をもたらす危険性がある。これより、ワイヤロープの劣化状況の把握は何れの使用形態においても重要である。

ワイヤロープの劣化形態は表 1-1 に示すように Short-term mechanism と Long-term mechanism による二つに大別することができる。Short-term mechanism で示すキンクやつぶれ等の使用状態によるものはワイヤロープが正しく使用されていない状態において起こるものであり、Long-term mechanism で示す素線切れや腐食、摩耗等の経年変化によるものは動索、静索のどちらの使用形態においてもワイヤロープを劣化させる基本的なもので回避することのできないものである。Short-term mechanism で示す使用形態および Long-term mechanism で示す経年変化による劣化はどちらもワイヤロープの強度低下をもたらす要因

である。使用形態による劣化は目視で確認することが容易でその要因もはっきりしていることが多いため、ワイヤロープの劣化状況の把握は容易であるが、経年変化による劣化は腐食による腐食錆や金属疲労による素線切れが多いことからロープの表面や内部に次第に進行していくため、目視による評価は難しく、ロープの劣化を正しく評価することが課題となっている。特にエレベータやクレーン等の用途で用いられている動索はロープ周囲にシーブ等の多数の機械部品が隣接しているため、点検および検査は容易ではなく点検者の技術も求められる。そのため、用途ごとに点検および検査の手法とワイヤロープの廃棄基準が定められている。一例として JIS A 4302 で定められたエレベータのワイヤロープの廃棄基準の素線切れに関する基準を表 1-2 に示し、摩耗に関する基準を表 1-3 及び図 1-1 に示す。また、素線切れにおいては主に二つの種類に大別されており、ロープとシーブ等の機械部品との摩擦によりロープ表面に発生する山切れ (Crown breakage)、ストランド同士の摩擦によりストランド間に発生する谷切れ (Valley breakage) がある。これらの発生個所に関して図 1-2 に示す。JIS B 8836 で定められたクレーンのワイヤロープの廃棄基準は素線切れの数が 1 より長さにおいて、素線の数の 10% 以上の場合とされている。

動索で用いられるワイヤロープの検査において、従来の目視による検査手法よりも迅速で正確な判断が可能な検査手法の確立が重要な課題となった 2007 年の高層ビルの事故ではワイヤロープの破損が報告された。エレベータに用いられている 8 本のメインロープのうち 1 本についてロープを構成するストランド 8 本のうち 1 本が破断していた。これが要因となり機械室にある滑車の側部保護カバーに接触し火花が飛び、その火花が滑車の下部保護カバー上面に堆積した粉塵に引火し発煙したとされている。事故を未然に防ぐための十分な点検および検査が行われていないことが原因の一つとして考えられるが、法令で義務付けられている目視検査ではワイヤロープに塗られている潤滑油やほこり等の影響により、発見が難しい劣化損傷が多数存在し、見落としによる検査のミスが発生しやすいため、熟練の点検者であっても難しい。しかし、全国に多数設置されているエレベータのワイヤロープの検査は常に求められており、迅速で正確な判断が可能な検査手法の検討は必要と考えられる。

Table 1-1 Deterioration mechanism and damage form.

Deterioration mechanism	Damage form
Short-term mechanism	Kinking
	Crushing
	Bird caging
	Core protrusion
Long-term mechanism	Breakage (Fatigue)
	Wear
	Corrosion

Table 1-2 Standards for disposal of elevator wire rope (JIS A 4302 Wire breakage)

素線の破断状態	基準
素線の破断が平均に分布している場合	1 構成より (ストランド) の 1 よりピッチ内での破断数 4 以下
破断素線の断面積が, 元の素線の断面積の 70% 以下となっているか, 又は, さびが甚だしい場合	1 構成より (ストランド) の 1 よりピッチ内での破断数 2 以下
素線の破断が 1 か所又は特定のよりに集中している場合	素線の破断総数が 1 よりピッチ内で 6 より鋼索では 12 以下, 8 より鋼索では 16 以下

Table 1-3 Standards for disposal of elevator wire rope (JIS A 4302 Wear)

主索直径 [mm]	ロープの構成記号及び摩耗長さ (l_w) [mm]		
	8×S (19)	6×W (19)	8×Fi (25)
8	2.8	3.2	2.6
10	3.6	4.0	3.3
12	4.2	4.8	4.0
14	4.9	5.6	4.4
16	5.6	6.3	5.4
18	6.3	7.2	6.2
20	7.1	8.1	6.5

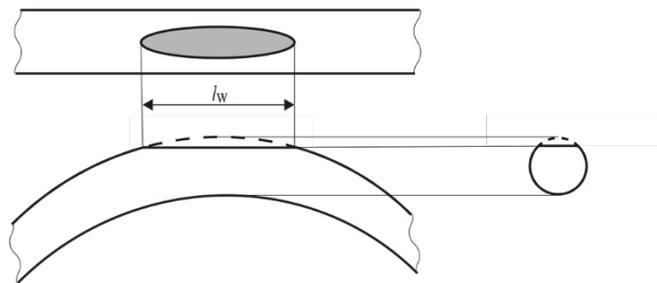


Fig.1-1 Wear length within wire rope disposal for standards.

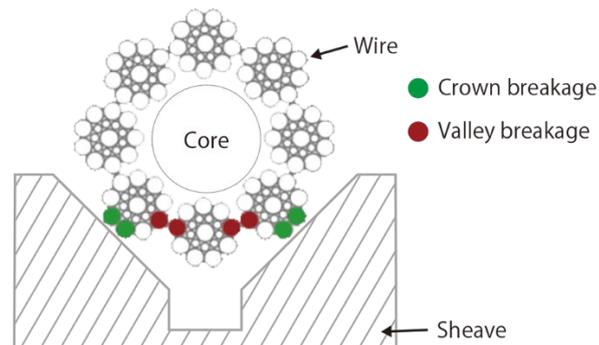


Fig.1-2 Type of wire rope breakages(crown and valley).

1. 3 漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査の現況

エレベータや橋梁等の構造物に用いられており、これらの構造物の重大事故を未然に防止する手段として、ワイヤロープの検査手法は様々なものが検討されている。それらには漏洩磁束探傷法や渦電流探傷法、アコースティック・エミッション法、超音波探傷法、X線等を用いた探傷法がある。近年ではカメラ等による検査手法も多く検討されているが、これらはロープ表面の劣化の検査に留まっており、内部での劣化損傷が発生するような用途のロープの場合は正確な判断を行い、安全性を確保することは難しい。磁気探傷試験（MRT：Magnetic rope test）に分類される漏洩磁束探傷法や渦電流探傷法等は多くの研究がされており、検出器としてホール素子や磁気抵抗素子等の高精度及び高感度センサを用いた非破壊検査装置が設計され、特許の取得もされている。その中でも漏洩磁束探傷法はワイヤロープ検査に広く使用されており、エレベータやクレーン、橋梁等の多くの構造物の非破壊検査の手法として用いられている。漏洩磁束探傷法の基本原理は強磁性体の試験体を磁化器によって磁化し、試験体にきず等の不連続部が存在すると、磁束が試験体の外部に漏洩する。このきずから漏洩する磁束の分布及び強度を検出器（磁気センサ）により測定し、きずを検出するものである。この基本原理を元に検出器の種類や検出方法、検出器の個数や配置、信号

の取得方法や処理方法等の多くの手法が検討されている。従って、ここでは漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査の際に発生するノイズの評価に関する研究、磁気センサアレイを用いたワイヤロープ検査手法に関する研究、劣化損傷の特徴量抽出のための信号処理に関する研究について順に述べる。

1. 3. 1 漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査において発生するノイズの評価に関する研究

ワイヤロープは複数の素線を組み合わせた複雑な構造であることから、漏洩磁束探傷法を始めとした磁気探傷試験によるワイヤロープ検査の場合に検出器によって検出できる波形は複雑である。そのため、小さな劣化損傷の波形だけ抽出して検出するのは難しい。これらの要因を特定し、漏洩磁束探傷法によるワイヤロープ検査の確立を行うために有限要素法を用いた三次元の磁場解析について検討されている。しかし、ワイヤロープに漏洩磁束探傷法を用いた手法について目視検査よりも劣化の判別に有用である（脇若他, 1999）と提案されていても測定値に含まれる周期的なノイズについて明言しているものは少ない。周期的なノイズの発生要因として、ロープの偏心による測定値への影響があることは損傷検出試験より確認されている（Pan et al., 2019）。また、有限要素法を用いた数値解析より劣化損傷に対してのストランドにより発生するノイズの影響についても検討されている（吉元他, 2010）。ワイヤロープ周囲に発生する磁束密度について詳細に数値解析を行い、漏洩する磁束密度は主にワイヤロープの軸方向に分布し、半径方向にはあまり分布しないことも述べられている（Wang and Tian, 2013）。

1. 3. 2 磁気センサアレイを用いたワイヤロープ検査手法に関する研究

漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査において、検出器に磁気センサを用いた場合の素線切れを含めた劣化損傷の要因の検出には劣化損傷の真上を通過することが前提であるため、ロープ円周方向に多数配置してセンサアレイを組んだロープテスタによる検査手法の検討が多くされている。四つの検出器を用いてワイヤロープの素線切れを含む局所的に発生する劣化の検出手法について提案されている（Park et al., 2012）。さらに磁気センサアレイに含まれる全ての測定値の総和から素線切れの数を評価する手法についても提案されており、マルチチャンネルのセンサアレイを取り入れることでロープの劣化検出に有効であることが述べられている（Park et al., 2012）。

センサアレイに組み込まれた磁気センサの測定値を画像に変換する手法も提案されている。この手法ではロープ円周方向に磁気センサを多数配置し、その測定値よりグレースケー

ルの画像として出力してワイヤロープの劣化を画像として認識するもの (Juwei and Shilei, 2019) で劣化の検出率が上がることが確認されている。他にはセンサの測定値を疑似カラー画像に変換することで劣化損傷の誤識別を減らし、劣化損傷の識別率を上げる手法についても提案されている (Pengbo and Juwei, 2018)。

1. 3. 3 劣化損傷の特徴量抽出のための信号処理に関する研究

検出器から検出された計測値から素線切れを含む劣化損傷について解析を行い、測定時の振動やワイヤロープの形状等が要因とされるノイズ等の環境条件を排除して、劣化損傷の検出精度を向上させる信号処理技術が多く提案されている。信号対雑音比 (SNR : Signal to noise ratio) による劣化要因の検出が有効であることは知られており、これに加えてインパルス応答フィルタや周波数及びスペクトル分析を含めた二次元や三次元の信号処理が提案されている (Gu and Chu, 2005)。前述での測定値を画像として出力して劣化を認識する手法においてもウェーブレット変換を用いて特徴量抽出を行い、劣化損傷の識別率の向上について検討されている (Juwei and Shilei, 2019)。連続ウェーブレット変換を用いて、検出器の測定値の時間周波数領域において劣化要因の周波数を特定し、ノイズ除去に離散ウェーブレット変換を用いることで劣化損傷の特徴量抽出を容易にする手法も提案されている (Jomdecha et al., 2003)。前述は検出器の測定値をそのままウェーブレット変換を適用させた例であるが、SN比の処理を実行した後にウェーブレット変換を適用させた手法も提案されている。これにより、漏洩磁束探傷法を用いた検査の際にノイズの要因として考えられる振動とワイヤロープの構造を起因としたノイズが低減されると述べられている (Lunin and Barat, 2002)。素線切れ以外の劣化要因の検出を行うためにウェーブレット変換とウェーブレットパケットエネルギー分析によって、分解及び再構築された劣化要因の測定値を解析し、素線切れ、摩耗、腐食の劣化要因の検出と位置の特定を含む手法も提案されている (Gao et al., 2015)。

ワイヤロープの正確な評価と検査を行うために、周波数解析による信号の特徴量抽出だけでなく、パターン認識等の手法も多く提案されている。多層ニューラルネットワークによるパターン認識によりワイヤロープの劣化の自動検出及び定量化手法が提案されている (Kim and Park, 2018)。前述でも挙げた検出器より得た測定値をグレースケールにして画像として視覚的に劣化を判別しやすくし、劣化の検出率を上げた手法では定量的な判別を行うためにニューラルネットワークを用いて劣化判別のエラーを減らすことに有用であると述べられている (Juwei and Shilei, 2019)。

1. 4 本研究の目的と特色

ワイヤロープは他の鋼材と比べて、可撓性を有しており引張強度も高いことから、静索の用途として用いられている橋梁や動索として用いられているエレベータやクレーンがある。特に動索として用いられているエレベータやクレーンでは日本全国でも実働されている件数が多く、稼働時間が長いことから、事故を未然に防ぐために漏洩磁束探傷法を用いた検査手法が採用されている。しかし、ワイヤロープが素線を多数組み合わせた複雑な構造していることから、劣化要因の中でも素線切れに関しては検出が難しい。そのため、検出器の組み合わせや信号処理手法による特徴量の抽出は様々な手法を用いて提案されているが、ワイヤロープの構造を起因としたノイズの低減やパターン認識を用いた定量的な判別は多くみられない。

本研究では、このような現状にある漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査における劣化損傷の検出精度の向上と劣化損傷の評価手法の確立に寄与するため、JIS G 3525 で定められた公称径 9mm の 6×24 を対象とし、以下の 1) を用いた数値解析によるワイヤロープの構造を起因としたノイズの低減が可能な検査手法を提示し、これらの計算結果と損傷検出試験の結果を比較検討して、ノイズ低減手法の有用性について考察を行ったもの、2) による素線切れの特徴量抽出手法を用いて従来手法の単一のセンサの閾値を用いた手法との比較検討をして、提案手法の有用性について考察を行ったもの、3) による異なる物理量を検出可能な検出器（磁気センサと光学式センサ）を用いたロープテストと従来手法である単一種の検出器（磁気センサ）を用いたロープテストの損傷検出試験の結果を比較検討して、多様に在る劣化損傷の要因の判別に提案手法が有用であるか考察を行ったものである。

次に本研究の主な特色について各提案手法に応じて列挙する。

1) 数値解析のモデルとして漏洩磁束探傷法を用いた磁化器と素線切れを有したワイヤロープを作成し、辺要素を用いた磁気ベクトルポテンシャル法による有限要素法を用いたワイヤロープの三次元静磁場解析を行った。不連続部としてワイヤロープの構造を起因として漏洩する磁束密度の結果や素線切れより漏洩する磁束密度の結果から三次元のベクトルにそれぞれ変換し、ノイズ低減可能な検査手法について提示した。また、損傷検出試験による磁束密度も測定を行い、計算結果と試験結果を比較検討した。このノイズ低減可能な検査手法には以下の特色がある。

(1) 数値解析モデルがワイヤロープ周囲に発生する磁束密度及びワイヤロープの構造を起因としたノイズの評価に有用であることを示唆し、損傷検出試験で得られた磁束密度の

結果は角度ごとの磁束密度の変化について、比較的良く一致した。

(2) ワイヤロープの構造を起因としたノイズの磁束密度の方向はストランドのより角度に対して垂直であることから、検出器の感磁方向をストランドのより角度にすることでノイズ低減可能で従来手法で用いられている検出器の感磁方向がワイヤロープの軸方向もしくは半径方向となっているものに比べて高い検出精度が得られる。

2) 漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査のロープテストとしてマルチチャンネルの磁気センサアレイによる測定値から、隣接する磁気センサ間の情報に着目して、二次元平面における素線切れの特徴量抽出手法について提示した。また、これらの素線切れの特徴量抽出手法の結果より、隣接する磁気センサの測定値をそれぞれ横軸と縦軸によって二次元平面を作り出し、パターン認識手法の一つであるカーネルサポートベクタマシン (Kernel-SVM : Kernel Support Vector Machine) により閾値を算出して、ワイヤロープの素線切れの定量的な評価手法の検討を行った。この素線切れの評価手法には以下の特色がある。

(1) 隣接する磁気センサの測定値をそれぞれ横軸と縦軸にとって二次元平面を作り出し、Kernel-SVM により算出した閾値と一般的なロープテストに用いられる従来手法の単一のセンサの閾値を用いた素線切れの特徴量手法と比較して、ワイヤロープ軸方向の素線切れの位置検出に高い精度が得られる。また、ワイヤロープ軸方向の素線切れの位置検出結果から隣接する磁気センサの測定値を用いて磁気センサの角度位置に合わせた演算を行い、円形レーダーチャートに図示することで、その位置におけるワイヤロープ円周方向の素線切れの位置の検出にも高い精度が得られる。

(2) 隣接する磁気センサの測定値を用いてセンサの角度位置に合わせた演算を行い、円形レーダーチャートに図示した結果から、波形の面積や最大のベクトルを算出することで素線切れの形態や大きさについても評価できる可能性を示唆した。

3) ワイヤロープ検査のロープテストとして異なる物理量の検出を行う検出器 (磁気センサと光学式センサ) による測定値より得られた時系列データの相互関係に注目し、異種の検出器を用いたワイヤロープテストによる損傷検出試験において検出された値から連続ウェーブレット変換 (CWT : Continuous Wavelet Transform) と主成分分析 (PCA : Principal Component Analysis) を行うことで特徴量を抽出し、機械学習の手法の一つである Kernel-SVM による分類を行う劣化損傷の要因判別手法について提示した。また、提案した判別手法と従来手法としてロープテストに用いられている単一種の検出器 (磁気センサ) による結

果と比較検討を行った。この劣化損傷の要因判別の評価手法には以下の特色がある。

(1) 各種の検出器の測定結果から、CWT を用いて算出することで素線切れ（山切れ、谷切れ）、腐食錆、摩耗の劣化損傷について要因判別できる可能性があることを示唆した。

(2) 異なる物理量の検出を行う検出器（磁気センサと光学式センサ）を用いたロープテストより得られた測定結果から、CWT と PCA を行うことで特徴量を抽出し Kernel-SVM によって分類を行うことで、従来手法の単一種の検出器（磁気センサ）を用いたロープテストと比べて高い分類性能が得られることを示唆した。

1. 5 本論文の構成

本論文は「漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査における劣化損傷の評価に関する研究」と題し、漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査の信頼性やワイヤロープの機械・構造要素としての安全性の向上に寄与することを目的として、検査の際に発生するノイズについて数値解析と試験の両面から調べたものとロープテストに用いる多数の検出器から得られる測定値から劣化損傷の定量的な評価手法について試験により調べたものである。論文は5つの章で構成され、以下に各章ごとの概要を述べる。

第1章の「序論」では、過去のワイヤロープの破断事例と日本産業規格からワイヤロープの廃棄基準や漏洩磁束探傷法を用いた検査における素線切れの評価の必要性について触れ、これに関連した従来の研究を紹介し、漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査における問題点から本研究を行った動機と目的、そして本研究の特色について述べる。

第2章の「漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査におけるストランドノイズ評価」では、漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査の際のワイヤロープ周囲に発生する磁束密度について三次元の静磁場解析および損傷検出試験により調べる。検査の際に発生するノイズについて、特にワイヤロープの構造特性の中でもストランドのよりに注目し、山切れおよび谷切れの素線切れに対してストランドに起因したノイズの影響について有限要素法を用いた数値解析により三次元のベクトルで評価を行う。これより、検出器が一方向のみに測定可能であることを利用して、検出器の配置角度の適正化をすることがストランドに起因するノイズの低減に有用であるか検討を行う。また、損傷検出試験も行い数値解析の有用性について検討を行う。

第3章の「二次元平面におけるマルチセンサデータの特徴量抽出による素線切れ評価」では、素線切れの定量的な評価手法について検討を行う。ワイヤロープの検査ではロープ軸方

向に走査させて素線切れの検出を行う。その際に素線切れの検出の見落としがないように検出器（磁気センサ）を円形に多数配置している。そのため、多数配置された検出器の隣接する検出器の情報より、二次元平面におけるマルチセンサデータを用いた特徴量抽出による損傷検出手法を提案し、ワイヤロープの健全性評価に関して従来手法よりも高い精度での損傷検出が期待できることについて示す。

第4章の「異種センサの複合センサデータによる劣化損傷の要因判別手法の検討」では、劣化損傷の要因判別手法について検討を行う。従来用いられている単一種の検出器（磁気センサ）では素線切れだけでなく、腐食錆や摩耗を含めた多種多様な劣化損傷の判別が難しいことが挙げられるため、提案する異種の検出器（磁気センサと光学式センサ）を用いたロープテストにより損傷検出試験を行い、劣化損傷の判別に提案手法が有用であるか検討を行う。

第5章の「結論」では、本研究の成果を章ごとにまとめて述べ、さらに本研究で取り上げられなかった問題を今後の研究課題として言及する。

第2章 漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査におけるストランドノイズ評価

2.1 はしがき

漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査のロープテストに用いられる検出器として、コイルやホール効果、磁気抵抗効果を利用した素子がある。コイルは安価で製作ができ、設計の自由度が高いことから現在の現場で用いられているロープテストにも採用されているが、動作速度によって値が変動するため、微小な素線切れを検出するのが難しい。近年では半導体技術の発展もあり、ホール効果や磁気抵抗効果を利用した素子を用いることで検出精度を向上させ、検出器の小型化が可能となった。これより、第1章で述べたように平面に多数の検出器を配置する手法や検出器の種類を変えることによる検出精度向上に関して様々な手法により検討が行われているが、測定値に含まれる周期的なノイズについて明言しているものが少ない。周期的なノイズの発生要因の一つとしてワイヤロープの構成要素の一つであるストランドによるものが挙げられる。そのため、微小な素線切れの検出を行うためにはストランドに起因したノイズの磁束密度の大きさや向きについて解明することが重要である。本研究ではワイヤロープの構造に注目し、山切れおよび谷切れの素線切れに対してストランドに起因したノイズの影響について有限要素法を用いた数値解析により三次元のベクトルで評価を行う。これより、検出器が一方方向のみに測定可能であることを利用して、検出器の配置角度の適正化をすることがストランドに起因するノイズの低減に有用であるか検討を行う。また、損傷検出試験も行い数値解析の有用性についても検討を行う。

第2節では、初めに本研究で対象としている JIS G 3525 で定められた公称径 9mm の 6×24 のワイヤロープの構造について説明を行い、ワイヤロープの劣化要因の一つである素線切れとその特徴量抽出における計算方法について説明を行う。次に、材質に応じた磁気特性が炭素鋼の磁性に及ぼす炭素量の影響（加藤，富岡，1965）について説明を行う。

第3節では、三次元静磁場解析の解析式として良く知られ取り扱いの簡便な辺要素を用いた磁気ベクトルポテンシャル法について説明を行う。

第4節では、本研究において数値解析及び損傷検出試験で漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査を行うための対象のワイヤロープが磁気飽和可能なロープテストの着磁装置について有限要素法を用いた数値解析による結果から検討を行う。

第5節では、有限要素法を用いた静磁場解析によるワイヤロープの計算結果より、ストランドに起因するノイズの磁束密度について大きさと方向を算出し、素線切れに対するノイズの磁束密度について評価を行う。

そして、第6節では数値解析の結果より得られたストランドに起因するノイズの低減に有用である検出器の配置角度をもとに損傷検出試験を行い、数値解析の結果の妥当性を検討した上で、従来の検査に用いられていた検出器の配置角度がロープ軸方向もしくは円周方向の手法と比べて、ノイズ低減に有用であるか検討を行う。

2. 2 ワイヤロープの構造や素線切れについて

2. 2. 1 ワイヤロープの構造

ワイヤロープの構造は図 2-1 に示すように心網 (Core rope), ストランド (Strand), 素線 (Wire) の3つからなる。ストランドの数と形, ストランド中の素線の数と配置, 心網の種類, ストランドのより方によってワイヤロープの構造は多くの種類があり, 用途に応じてこれらの要素は構成されている。本研究では第1節も述べた JIS G 3525 で定められた公称径 9mm の6 (ストランドの数) ×24 (ストランド1つあたりの素線の数) のワイヤロープを対象としている。また, ワイヤロープの劣化による廃棄基準としてピッチ (Pitch) を参照しているものがある。図 2-2 に示すようにワイヤロープのピッチとは側面から見て, ある谷部からストランドの本数分先の谷部までの長さを指している。

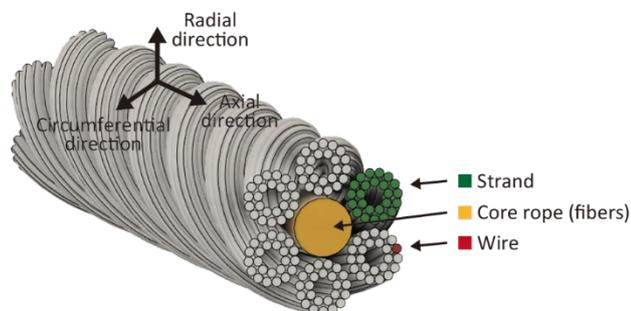


Fig.2-1 Structure of wire ropes and vector of magnetic flux density.

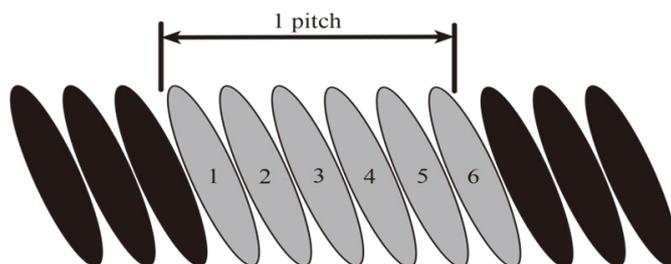
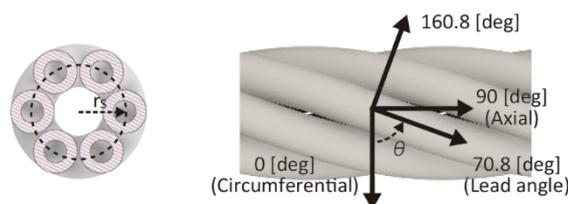


Fig.2-2 Pitch of wire ropes (6 strands)

本研究では数値解析及び損傷検出試験において、磁束密度の方向を明確にするために検出器の走査方向と平行なワイヤロープ軸（長手）方向（Axial direction）が走査方向と同じ向きを正方向としたときに検出器の検出平面上のワイヤロープの半径方向（Radial direction）、円周方向（Circumferential direction）を正方向として図 2-1 に示すように定義する。また、本研究で用いたワイヤロープでは検出器の検出平面におけるストランドのより角度 θ_s [deg]、ワイヤロープ中心からストランド中心までの距離 r_s [mm]、ストランドのピッチ l [mm]としたときに次式のように表せる。これより、図 2-3 に示すようにワイヤロープの円周方向を 0[deg]、ワイヤロープの軸方向を 90[deg]としたときにストランドのより角度は 70.8[deg]、ストランドのより角度に垂直な角度は 160.8[deg]となる。

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{l}{2\pi r_s} \quad (2-1)$$



2. 2. 2 素線切れの特徴量抽出の計算方法

漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープの損傷検出のための特徴量抽出方法として、第 1 章でも述べたように信号対雑音比が多く用いられている。劣化要因である損傷のないワイヤロープの 1 ピッチにおける磁束密度の分散 N_p を、1 ピッチ内で損傷が存在する場合の 1 ピッチにおける磁束密度の分散 S_p をとって、次式のような損傷の特徴量 SNR の算出を行う。

$$SNR = \frac{S_p}{N_p} \quad (2-2)$$

多くのロープテストにおいて上記の式 (2-2) に示す信号対雑音比を用いた特徴量抽出では単一のセンサの測定値をワイヤロープの種類や環境、ロープテストの構成から閾値を決定し、損傷の検出を行っている。

2. 2. 3 炭素鋼の磁気特性

炭素鋼の透磁率は炭素含有量の増加に伴い急速に減少すること（加藤，富岡，1965）が述べられており，今日までの電動機，発電機等の磁気回路の設計にも多くの炭素鋼が使用されている．本研究においても対象としているワイヤロープは含有されている炭素より算出を行い，磁気特性を示す．また，磁化器には炭素含有量の許容変動値が JIS G 4051 により規定されている機械構造用炭素鋼鋼材の S25C を使用した．図 2-4 に本研究で用いたワイヤロープと磁化器の磁気特性について示す．

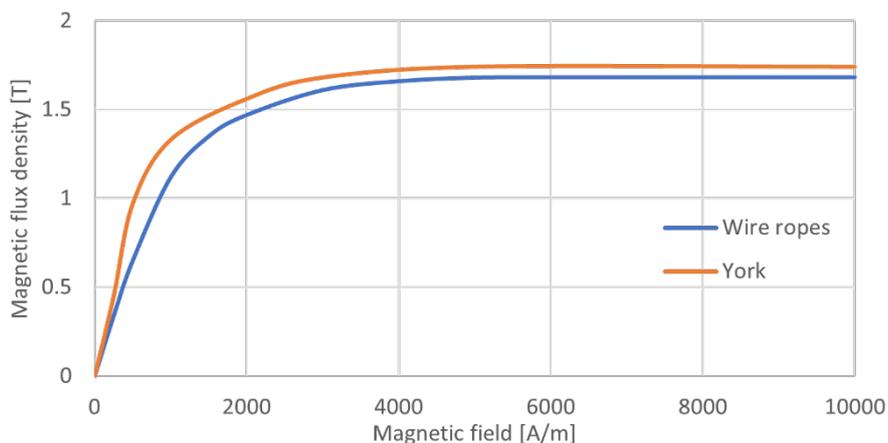


Fig.2-4 Magnetization curves of wire ropes and yoke.

2. 3 有限要素法を用いた静磁場の数値解析要領

有限要素法を用いた数値解析手法として，本研究では辺要素を用いた磁気ベクトルポテンシャル法による有限要素法を用いたワイヤロープの三次元静磁場解析を行った．また，境界条件は固定境界面に磁束密度が平行とした．磁気ベクトルポテンシャル法による有限要素法を用いた静磁場解析の式を以下に示す．

マクスウェルの方程式から磁性体やコイルを領域内に有し，静磁場の基礎方程式を導出する．マクスウェルの方程式は次の 4 つの式で表す．

$$\mathbf{rot} H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2-3)$$

$$\mathbf{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2-4)$$

$$\mathbf{div} B = 0 \quad (2-5)$$

$$\mathbf{div} D = \rho \quad (2-6)$$

ここで、磁場の強さ H 、磁束密度 B 、電束密度 D 、電場の強さ E 、電流密度 J 、電荷密度 ρ とする。上記の4つの式に続いて、次の3つの磁束密度 B 、電束密度 D 、電流密度 J の方程式は以下に示す。

$$B = \mu H \quad (2-7)$$

$$D = \varepsilon E \quad (2-8)$$

$$J = \sigma E \quad (2-9)$$

媒質の透磁率 μ 、媒質の誘電率 ε 、媒質の導電率 σ とする。異なる媒質をそれぞれ媒質1、媒質2とすると、媒質1及び2における境界条件は次の5つの式で与えられる。 \mathbf{n} は媒質の境界に与えられた法線ベクトルとする。

$$D_1 \cdot \mathbf{n} = D_2 \cdot \mathbf{n} \quad (2-10)$$

$$E_1 \times \mathbf{n} = E_2 \times \mathbf{n} \quad (2-11)$$

$$B_1 \cdot \mathbf{n} = B_2 \cdot \mathbf{n} \quad (2-12)$$

$$H_1 \times \mathbf{n} = H_2 \times \mathbf{n} \quad (2-13)$$

$$J_1 \cdot \mathbf{n} = J_2 \cdot \mathbf{n} \quad (2-14)$$

式(2-3)、式(2-4)では静磁場解析のため低周波問題では時間微分項は無視でき、どちらか一方を解く準定常問題へと縮小される。解析領域内に永久磁石ではない強磁性体があり、渦電流を無視した静磁場について考える。低周波領域に式(2-3)の変位電流の項は無視して良いので、式(2-3)で時間微分項を無視した式と式(2-5)の2つの式について次式に示す。

$$\mathbf{rot} H = J \quad (2-15)$$

$$\mathbf{div} B = 0 \quad (2-16)$$

式(2-16)より磁束密度は発散しないので磁束密度 B に対して、式(2-17)になるような磁

気ベクトルポテンシャルを定義することができる。また、磁気ベクトルポテンシャルは式 (2-18) より式 (2-5) が恒等的に満たされることがわかる。

$$B = \text{rot } A \quad (2-17)$$

$$\text{div} \cdot \text{rot } A = 0 \quad (2-18)$$

任意のスカラーポテンシャル Φ の勾配を加えた新たなベクトルポテンシャル A' を式 (2-19) のように定義し、このことから A' は式 (2-20) を満たす。

$$A' = A + \text{grad } \Phi \quad (2-19)$$

$$\text{rot } A' = \text{rot } (A + \text{grad } \Phi) = \text{rot } A \quad (2-20)$$

以上より、この時点では磁気ベクトルポテンシャル A に関するベクトル場はスカラーポテンシャル Φ の勾配だけ存在することになり、 Φ は任意のポテンシャルと見なせる。そのため、事実上ベクトル場は無限に存在すると言い換えることができる。

本研究における解析で用いる永久磁石を有する領域を解析する場合の式について導出する。永久磁石等の磁化のヒステリシスを考慮して磁性体を扱う場合は磁性体の磁気特性は磁化ベクトル M を用いて表現され、次式で表せる。

$$B = \mu_0 H + M \quad (2-21)$$

$1/\mu_0$ を磁気抵抗率 v_0 で置き換え、式 (2-21) を次式のように磁場の強さ H について表す式に変形する。

$$H = v_0(B - M) \quad (2-22)$$

式 (2-22) を式 (2-4) に代入すると、次式のように表せる。今回の磁場解析では低周波静磁場問題を対象としているため、変位電流の項は無視できる。ここで、駆動電流密度 J_0 とする。式 (2-17) の関係を式 (2-23) に代入すると式 (2-24) が得られる。式 (2-24) の左辺第2項は磁化によって生ずる項であり、電流と同じ次元を有しており、式 (2-25) で表す等価磁化電流密度 J_m と呼ばれる。

$$\text{rot } v_0(B - M) = J_0 \quad (2-23)$$

$$\mathbf{rot} v_0(\mathbf{rot} A - M) = J_0 \quad (2-24)$$

$$J_m = v_0 \mathbf{rot} M \quad (2-25)$$

以上より，支配方程式を用いて磁束分布を求める．

2. 4 磁気飽和可能なワイヤロープテストの磁化器の検討

ロープテストの磁化器はヨークと磁石で構成されており，数値解析及び損傷検出試験に用いたロープテストは図 2-5 に示す．検出器による磁束密度の検出平面は図 2-5 (a) に示すようにワイヤロープを挟んで磁化器の反対側とした．

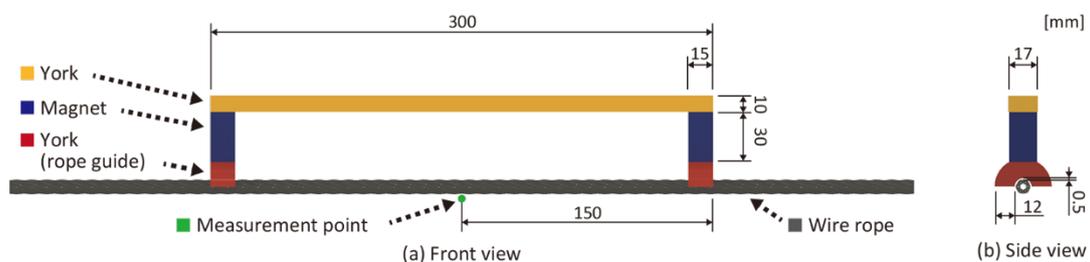


Fig.2-5 Structure of rope tester.

2. 4. 1 数値解析に用いるワイヤロープの検討

既往の研究ではストランドのみを再現した数値解析モデルでストランドが起因となるノイズが確認されている（吉元他，2010）ことから，本研究においても数値解析に用いるワイヤロープとして，対象とした 6×24 のワイヤロープのストランドのみで構成されたモデルとして用いる．本研究では数値解析を用いてストランドとストランドの間の谷部にストランドを起因とした磁束密度分布の変化を生ずることが確認できることよりも，その磁束密度がどちらの向きに発生しているのかについて注目をする．飽和磁束密度は試験体の材質と断面積に依存するため，損傷検出試験に用いるワイヤロープと数値解析に用いるワイヤロープのモデルの断面積は同じになるようにしなければならない．そのため，損傷検出試験に用いるワイヤロープの素線径が $0.5[\text{mm}]$ であることから，24本の素線の束からなるストランドの断面積を算出し，損傷の無いストランドのモデルとした．また，谷切れ及び山切れの素線切れが生じた数値解析モデルについては損傷の無いストランドモデルから素線1本の断面積を減少させたモデルとした．本研究では微小な損傷として，図 2-9 (d) に示すように数値解析及び損傷検出試験において素線1本の素線切れで破断による隙間の距離をロ

ープ軸方向に 1[mm]とした。図 2-6 に損傷の無いストランドモデル、図 2-7 に山切れの素線切れを有したストランドモデル、図 2-8 に谷切れの素線切れを有したストランドモデルを示し、図 2-9 (a) ~ (c) に各モデルの損傷部の断面図を示す。



Fig2-6 Numerical analysis model type of strand.



Fig2-7 Numerical analysis model type of strand include one crown breakage.



Fig2-8 Numerical analysis model type of strand include one valley breakage.

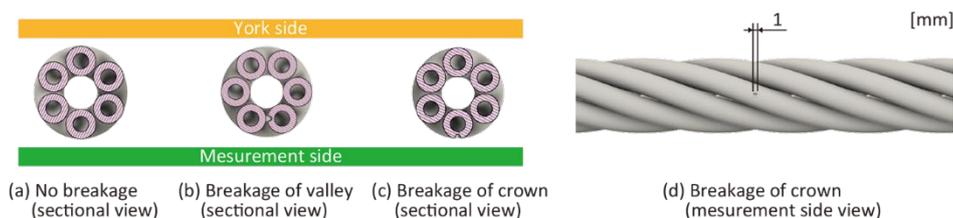


Fig.2-9 Relative position of breakages.

2. 4. 2 有限要素法を用いた静磁場解析によるワイヤロープテストの検討

数値解析に用いたモデルの各要素を色分けしたものを図 2-10 に示す。このとき、ワイヤロープ及び磁化器を除いた領域には材質を空気とした 600×600×600[mm]の立方体のものをモデルとした。磁化器は永久磁石を用いたものとし、永久磁石にはネオジウム磁石の N-40 を用いた。このことから、ネオジウム磁石 N-40 の残留磁束密度は 1.25~1.32[T]とされている。そのため、本研究では下限値の 1.25[T]として、計算を行った。図 2-11 に磁化器とワイヤロー

プの数値解析結果を示す。これより、ワイヤロープの磁束密度の最大値は1.7[T]であることから、磁気飽和していることがわかった。そのため、数値解析において図 2-5 に示すロープテスタはワイヤロープを磁気飽和させることができるため、漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査に妥当であることを示した。

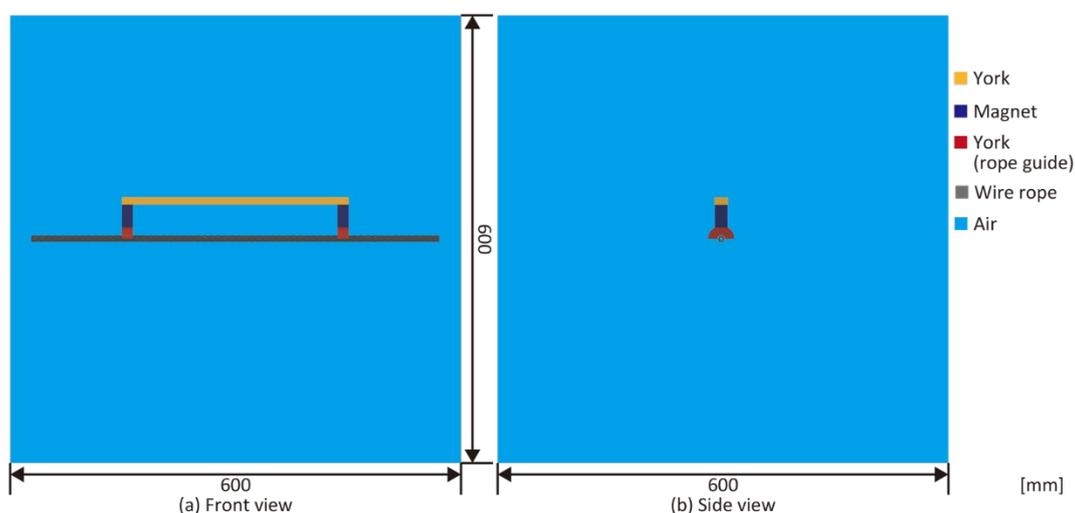


Fig.2-10 Wire ropes and rope tester model used for numerical analysis.

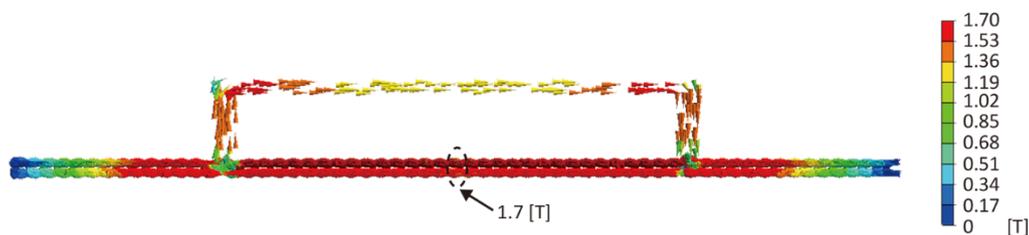


Fig.2-11 The magnetic flux density 3D vector diagram of the rope tester and wire rope (type : no breakage) in numerical analysis.

2. 4. 3 損傷検出試験によるワイヤロープテスタの検討

図 2-5 に示すロープテスタは本研究のストランドノイズの評価のために設計及び製作されたものである。そのため、測定結果の検証として、本研究で対象としているワイヤロープの構成（公称径 9[mm]の 6×24）と素線切れ（山切れ 1[mm]）の試料を用意し、同一の工程でワイヤロープの 3 ピッチ分で素線切れの位置は 85[mm]で 3 回の試験を行った。図 2-12 に 3 回の試験結果を示し、表 2-1 に各回における磁束密度の最小値，最大値，ピークピーク値を示す。図 12 の試験結果より、位置 85[mm]において素線切れの波形にずれは少ないこ

とがわかる。また、磁束密度の測定誤差については表 2-1 の 1~3 回のピークピーク値より、誤差が 0.07[mT]となっており、素線切れの波形のピークピーク値に対して 0.8[%]となった。このことから、同一の工程で試験を複数回行ったとしても波形のばらつきは少なく、本研究において図 2-5 に示すロープテスタを用いて損傷検出試験を行うことで機器による試験結果の影響は受けにくいと考えられる。

Table2-1 Signal-to-noise ratio in damage experiment.

Number of times	Magnetic flux density (3 pitch)		
	Minimum	Maximum	Peak-to-peak
1st	8.63 [mT]	17.19 [mT]	8.56 [mT]
2nd	8.69 [mT]	17.25 [mT]	8.56 [mT]
3rd	8.69 [mT]	17.31 [mT]	8.63 [mT]

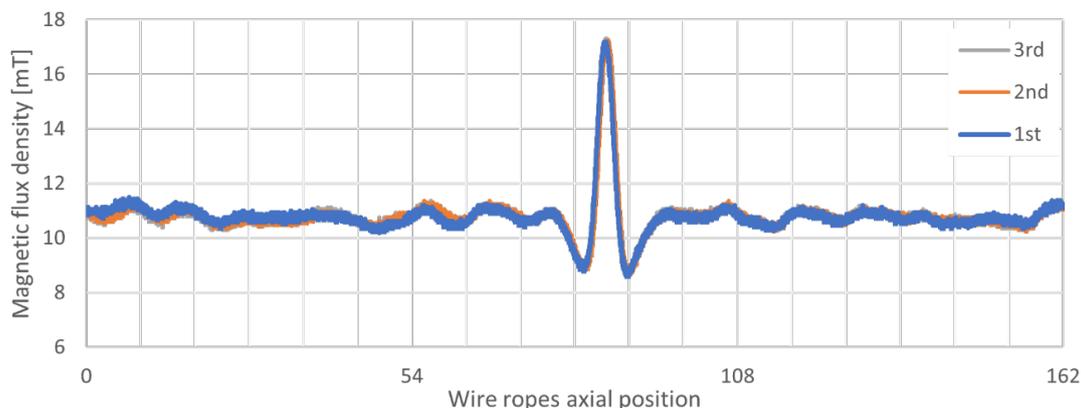


Fig.2-12 Results of magnetic flux density of a wire rope when scanning 3 pitches in rope tester verification.

2. 5 有限要素法を用いた静磁場解析によるストランドノイズ評価

図 2-11 の磁化器とワイヤロープの数値解析結果より、磁気飽和しているワイヤロープの磁化器の中心に位置するワイヤロープ断面について図 2-13 に損傷の無いストランドモデル、山切れの素線切れを有するストランドモデル、谷切れの素線切れを有するストランドモデルをそれぞれ示す。図 2-13 より、ストランドとストランドの間に注目すると、損傷の無いストランドモデル、山切れおよび谷切れの素線切れを有するストランドモデルのいずれの

数値解析モデルにおいて、ストランドとストランドの間の谷部にストランドを起因とした磁束密度分布の変化が生ずることがわかった。

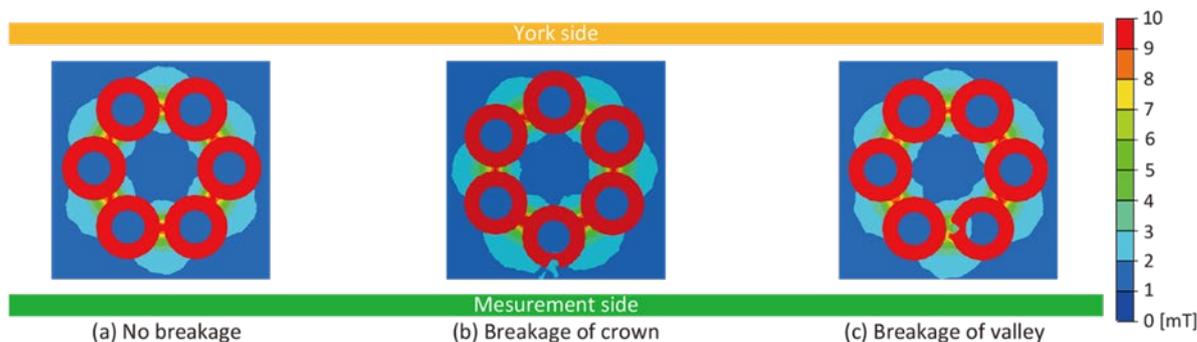


Fig.2-13 Magnetic flux density contour maps of wire ropes and displays the magnetic flux density contour bars in numerical analysis.

図 2-14～16 に素線切れの位置を 0[mm]として磁化器をワイヤロープの軸方向に走査させた際にワイヤロープ表面から 0.5[mm]だけ半径方向に離れた位置での磁束密度の結果について示す。これらの (a) には半径方向, 円周方向の 0[deg], 軸方向の 90[deg]を示し, (b) にはストランドのより角度の 70.8[deg]とこれに垂直な 160.8[deg]を示す。また, 表 2-2 は図 2-13 の損傷の無いストランドモデルにおける各角度の磁束密度の結果から 1 ピッチの分散を式 (2-2) の N_p とし, 図 2-15 の山切れおよび図 2-16 の谷切れの素線切れを有するストランドモデルにおける磁束密度の結果から 1 ピッチの分散を式 (2-2) の S_p として SN 比を算出した結果を示す。表 2-3 には感磁方向ごとのピークピーク値の結果を示す。

漏洩磁束探傷法では測定する際に検出器の感磁方向を検査対象物の表面に垂直な方向 (本研究における半径方向) か磁化器の長手方向 (本研究における軸方向) として設計されている。これは損傷による不連続部からこの二つの方向に漏れ出る磁束密度が大きくなるためである。このことは, 従来のワイヤロープテストにおいても同様である。これらより図 2-14 (a) の損傷の無いストランドモデルの軸方向 (90[deg]) におけるピークピーク値は 0.43[mT] であり, ストランドのより角度に垂直な方向 (160.8[deg]) では 0.95[mT] となっていることから, ストランドに起因するノイズはストランドのより角度に垂直な方向 (160.8[deg]) のワイヤロープ谷部に発生していることがわかる。ストランドのより角度 (70.8[deg]) ではピークピーク値が 0.15[mT] と軸方向 (90[deg]) より下回っていることもわかる。また, 図 2-15 の山切れの素線切れを含むストランドモデルのピークピーク値は軸方向 (90[deg]) で

0.98[mT], スtrandのより角度 (70.8[deg]) で 1.03 [mT]であるため, 同一角度における損傷のないstrandモデルの結果との差分に注目すると, strandのより角度 (70.8[deg]) において山切れの素線切れが存在する場合は磁束密度の変動が大きく検出が可能であることがわかる.

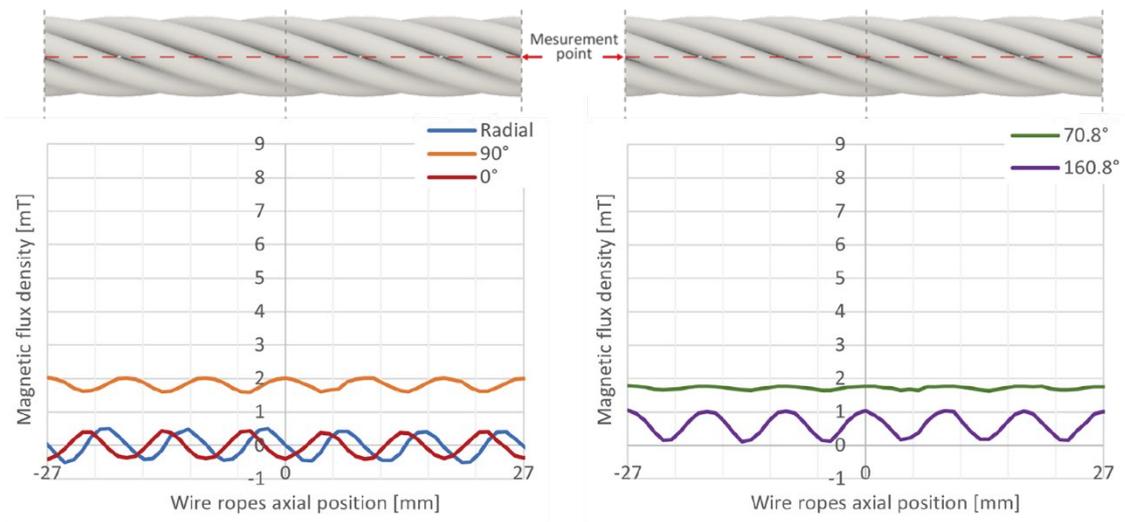
表 2-2 に示す SN 比では山切れと谷切れのどちらも軸方向 (90[deg]) に対してstrandのより角度 (70.8[deg]) において SN 比が高くなる解析結果が得られている. このことから, 検出器の感磁方向をstrandのより角度 (70.8[deg]) にすることで微小な損傷においても高い検出精度を発揮できることがわかる.

Table2-2 Signal-to-noise ratio in numerical analysis.

Breakage type	Sensing angle			
	0[deg]	70.8[deg]	90[deg]	160.8[deg]
Crown	1.31	41.7	3.38	0.96
Valley	1.14	1.69	1.30	1.16

Table2-3 Peak-to-peak in numerical analysis.

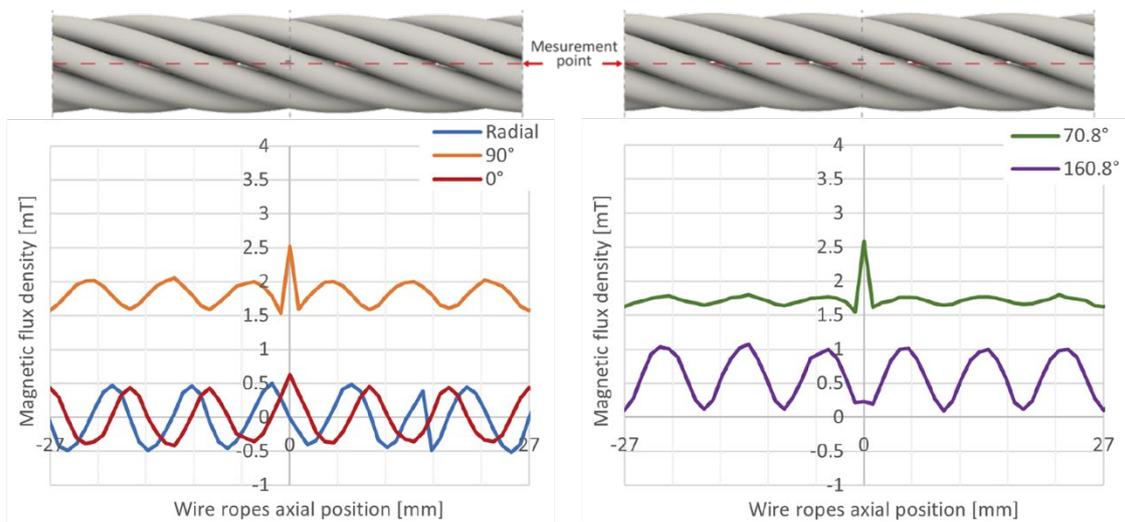
Breakage type	Sensing angle				
	0[deg]	70.8[deg]	90[deg]	160.8[deg]	Radial
No breakage	0.86 [mT]	0.15[mT]	0.43 [mT]	0.95 [mT]	1.02 [mT]
Crown	1.05 [mT]	1.03 [mT]	0.98 [mT]	0.98 [mT]	1.02[mT]
Valley	0.85 [mT]	0.20 [mT]	0.50 [mT]	0.96 [mT]	1.02 [mT]



(a) Radical, 90[deg], 0[deg]

(b) 70.8[deg], 160.8[deg]

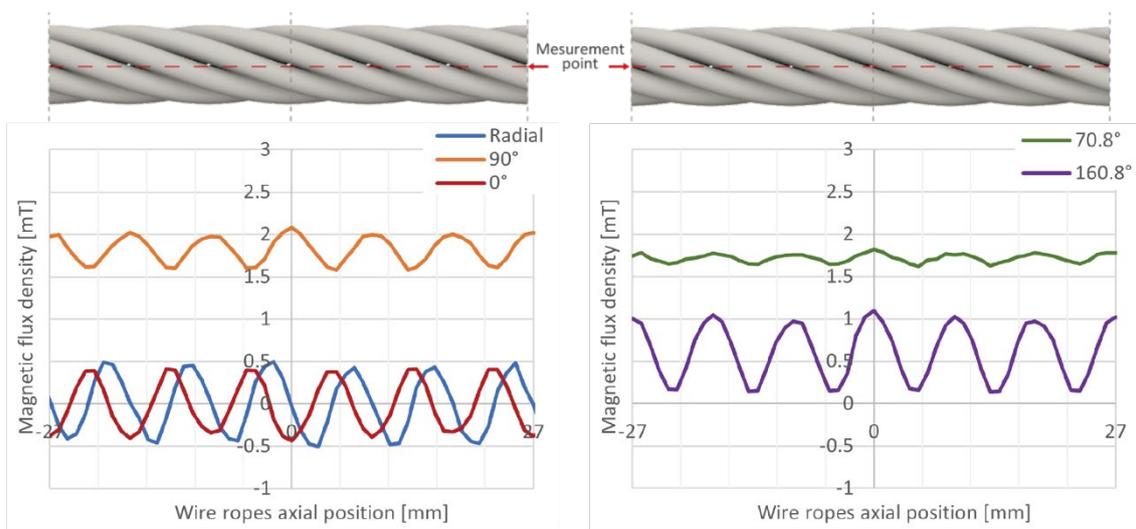
Fig.2-14 Results of magnetic flux density of a wire rope (type : no breakage) when scanning 1 pitch in numerical analysis.



(a) Radical, 90[deg], 0[deg]

(b) 70.8[deg], 160.8[deg]

Fig.2-15 Results of magnetic flux density when scanning 1 pitch with a crown breakage in numerical analysis.



(a) Radical, 90[deg], 0[deg]

(b) 70.8[deg], 160.8[deg]

Fig.2-16 Results of magnetic flux density when scanning 1 pitch with a valley breakage in numerical analysis.

2. 6 損傷検出試験によるストランドノイズの評価

2. 6. 1 試験要領

損傷検出試験に用いた試験装置と測定装置，試験要領および測定項目について項目別に説明を行う。

(1) 試験装置と測定装置

① 送り装置

送り装置は電気モータ方式の水平移動送り装置を用いた。この装置は計測装置固定台，ワイヤロープの張力測定可能なロードセル搭載のワイヤロープ固定台，電気モータおよび電気モータに直結のボールねじ等から構成された試験機である。これについて概観を図 2-17 に示す。また，詳細な性能表を表 2-4 に示す。

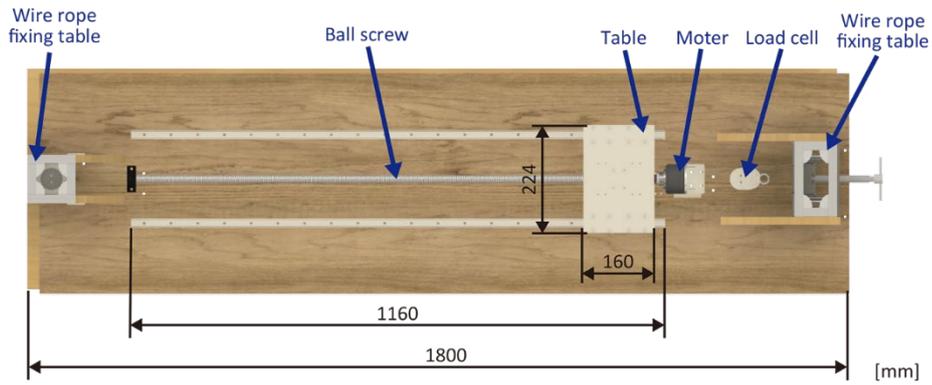


Fig.2-17 Name of each part and dimensions about feed table equipment.

Table2-4 Performance characteristic of feed table equipment.

Feed table equipment	Velocity	Max	30 [mm/s]
		Standard	25 [mm/s]
	Range		1000 [mm]
	Table size		224 x 160 [mm]
Motor	Model number		GM6020
	Manufacturing company		Da-Jiang Innovations Science and Technology Co., Ltd.
	Rated voltage		24 [V]
	Rotational speed (without payload)		320 [rpm]
	Rated torque (max continuous torque)		1.2 [N m]
Ball screw	Model number		BIF2005-5RRG0 +1010LC5A
	Manufacturing company		THK CO., LTD.
	Lead pitch		5 [mm]
Load cell	Model number		LTZ-100KA
	Manufacturing company		Kyowa Electronic Instruments CO., LTD.
	Rated capacity		1000 [N]

② 検出器

検出器には磁気センサの中でも磁気抵抗効果を利用した素子である巨大磁気抵抗（GMR：Giant Magnetic Resistance）素子を用いた。感度は $2.6[\text{mV}/\text{V}\cdot\text{mT}]$ であり、検出部の大きさは $0.92 \times 0.92[\text{mm}]$ である。本試験では電源電圧を $5[\text{V}]$ としたため、試験時の感度は $13[\text{mV}/\text{mT}]$ となる。

③ データロガー

平衡差動入力およびシングルエンド入力が選択可能で差動入力では最大 4 チャンネル、シングルエンド入力では 8 チャンネル測定可能である。本試験では差動入力を用いて検出器（GMR）の測定を行い、波形の確認および記録に使用した。測定周期は $1[\mu\text{s}] \sim 60[\text{s}]$ で、分解能は $14[\text{bit}]$ である。

(2) 試験要領

① 第 2. 2. 1 に示した公称径 $9[\text{mm}]$ の 6×24 のワイヤロープを送り装置のワイヤロープ固定台に設置し、第 2. 4. 3 において検討を行ったロープテストを送り装置の移動台に固定した。このとき、検出器（GMR）はワイヤロープ表面から $0.5[\text{mm}]$ だけ半径方向に離れた位置とした。

② 検出器（GMR）をデータロガーに接続し、第 2. 2. 1 に示した検出器の検出角度としてワイヤロープの半径方向（Radial direction）、円周方向（Circumferential direction） $0[\text{deg}]$ 、軸（長手）方向（Axial direction） $90[\text{deg}]$ 、ストランドのより角度 $70.8[\text{deg}]$ 、ストランドのより角度に垂直な角度 $160.8[\text{deg}]$ の計 5 つの条件で検出器をワイヤロープ上に走査させ、磁束密度の測定を行った。軸方向 $0.025[\text{mm}]$ ごとに測定を行った。

(3) 測定項目

第 2. 4. 3 において検討を行ったロープテストを用いて第 2. 2. 1 に示した公称径 $9[\text{mm}]$ の 6×24 のワイヤロープを対象とし、ロープ周囲に発生する磁束密度について測定を行った。また、それらの測定値より損傷のない場合の分散を算出し、第 2. 2. 2 の式（2-2）に示す SN 比について調べた。加えて、損傷を含む場合は損傷を示す波形のピークピーク値についても調べた。

2. 6. 2 感磁方向ごとのストランドノイズの評価

ワイヤロープの損傷検出試験において第 2. 4. 3 において検討を行ったロープテストを用いて得られた 3 ピッチ分の結果をそれぞれ図 2-18 に損傷の無いもの、図 2-19 に山切れ、図

2-20 に谷切れを示す。このときの検出器は磁化器をワイヤロープの軸方向に走査させた際にワイヤロープ表面から 0.5[mm]だけ半径方向に離れた位置として測定を行った。第 2.5 の数値解析結果から検出器の感磁方向をストランドのより角度 (70.8[deg]) にした結果が高い SN 比を得られるため、損傷検出試験では感磁方向をストランドのより角度 (70.8[deg]) と従来手法である軸方向 (90[deg]) で試験を行う。図 2-18~2-20 において、それぞれ (a) に検出器の感磁方向をストランドのより角度 (70.8[deg]) にした結果を示し、(b) に検出器の感磁方向を軸方向 (90[deg]) にした結果を示す。表 2-5 では図 2-18 に示す損傷の無いワイヤロープのそれぞれの角度においてワイヤロープ軸方向位置が 54[mm]から 108[mm]の磁束密度の結果から 1 ピッチの分散を式 (2-2) の N_p とし、図 2-19 の山切れおよび図 2-20 の谷切れを含んだワイヤロープにおける軸方向位置が 54[mm]から 108[mm]の磁束密度の結果から 1 ピッチの分散を式 (2-2) の S_p として SN 比を算出したものを示す。表 2-6 には検出器の各感磁方向におけるワイヤロープ軸方向位置が 54[mm]から 108[mm]間のピークピーク値を示す。

図 2-18 および表 2-6 より、損傷の無いワイヤロープにおけるピークピーク値は検出器の感磁方向をストランドのより角度 (70.8[deg]) のときに 1.51[mT]、軸方向 (90[deg]) のときに 2.43[mT]となっていることから、検出器の感磁方向をストランドのより角度 (70.8[deg]) にすることで軸方向 (90[deg]) と比べてストランドに起因するノイズの磁束密度の影響を小さくできることがわかる。図 2-19 に示す山切れを含むワイヤロープではピークピーク値がストランドのより角度 (70.8[deg]) で 9.06[mT]、軸方向 (90[deg]) で 9.19[mT]である。また、図 2-20 に示す谷切れを含むワイヤロープではピークピーク値がストランドのより角度 (70.8[deg]) で 3.84[mT]、軸方向 (90[deg]) で 3.93[mT]とどちらも感磁方向の角度による結果の差は小さいため、山切れと谷切れのどちらにおいても素線切れの磁束密度の大きさはほとんど変わらずにストランドノイズの磁束密度の大きさを小さくすることが可能である。

次に表 2-5 より、山切れおよび谷切れのどちらに対しても検出器の感磁方向をストランドのより角度 (70.8[deg]) にすることで SN 比が高くなる結果が得られており、軸方向 (90[deg]) の角度よりも高い検出能力が得られていることがわかる。このことから、数値解析のモデルだけでなく、実際の検出器においても同様の結果が得られたことからストランドに起因する磁束密度はストランドのより角度方向 (70.8[deg]) に漏れ出ており、検出器の感磁方向をストランドのより角度 (70.8[deg]) にすることで微小な損傷の検出に優位性があることがわかる。

一方で数値解析結果では損傷の無いワイヤロープの磁束密度の平均は軸方向 (90[deg]) で 1.82[mT], ストランドのより角度 (70.8[deg]) で 5.51[mT]となるが, 損傷検出試験の磁束密度の平均は軸方向 (90[deg]) で 11.64[mT], ストランドのより角度 (70.8[deg]) で 10.94[mT]であるため, 磁束密度に大きな差がある. また, 数値解析では軸方向 (90[deg]) の磁束密度がストランドのより角度 (70.8[deg]) に比べて 3.69[mT]だけ小さいが, 損傷検出試験では軸方向 (90[deg]) の結果が 0.70[mT]で差が小さい. これは数値解析モデルにおいて素線を再現せず, ストランドのみを再現したモデルであることが原因の一つとして考えられる. 本研究で使用した 6x24 のワイヤロープでは図 2-19 のように半径方向から見ると素線は軸方向 (90[deg]) に向かって撚って束ねられていることがわかる. これは磁化器の長手方向と平行な向きであるため, 磁束が素線の向きに向かって流れやすくなっている. また, 円形の素線が束ねられていることからストランド内には素線と素線の間には非磁性体の空間が生じる. しかし, 数値解析のモデルでは試験で使用したワイヤロープのストランドの断面積のみを再現し, 素線を 1 本ごとに再現していない. これより, 山切れおよび谷切れの素線切れのピークピーク値が数値解析結果では検出器の感磁方向をストランドのより角度 (70.8[deg]) にすることで軸方向 (90[deg]) の結果よりも磁束密度の変化が大きくなったのに対して, 本研究で行った損傷検出試験ではストランドのより角度 (70.8[deg]) よりも軸方向 (90[deg]) の磁束密度の変化が大きくなったと考えられる. しかし, ワイヤロープのストランドに起因したノイズに関しては数値解析結果と損傷検出試験結果において SN 比には同様の傾向が得られたため, 数値解析モデルがワイヤロープ周囲に発生する磁束密度およびストランドに起因するストランドノイズの評価に有用と考えられる.

Table2-5 Signal-to-noise ratio in damage experiment.

Breakage type	Sensing angle	
	70[deg]	90[deg]
Crown	23.8	21.4
Valley	6.57	3.14

Table2-6 Peak-to-peak in damage experiment.

Breakage type	Sensing angle	
	70[deg]	90[deg]
No breakage	1.51 [mT]	2.43 [mT]

Crown	9.06 [mT]	9.19 [mT]
Valley	3.84 [mT]	3.93 [mT]

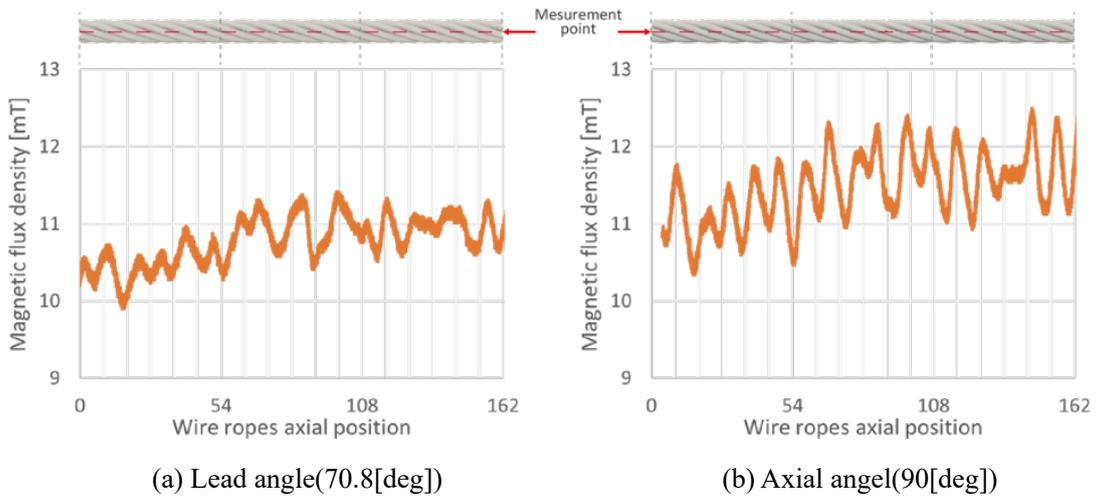


Fig.2-18 Results of magnetic flux density of a wire rope (type : no breakage) when scanning 3 pitch in damage experiment.

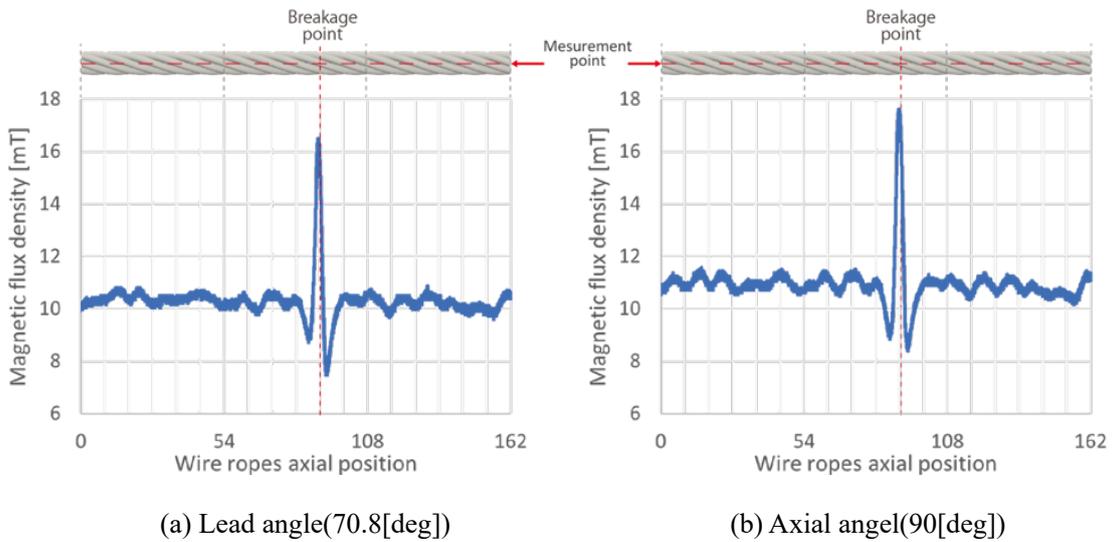


Fig.2-19 Results of magnetic flux density of a wire rope including a crown breakage when scanning 3 pitch in damage experiment.

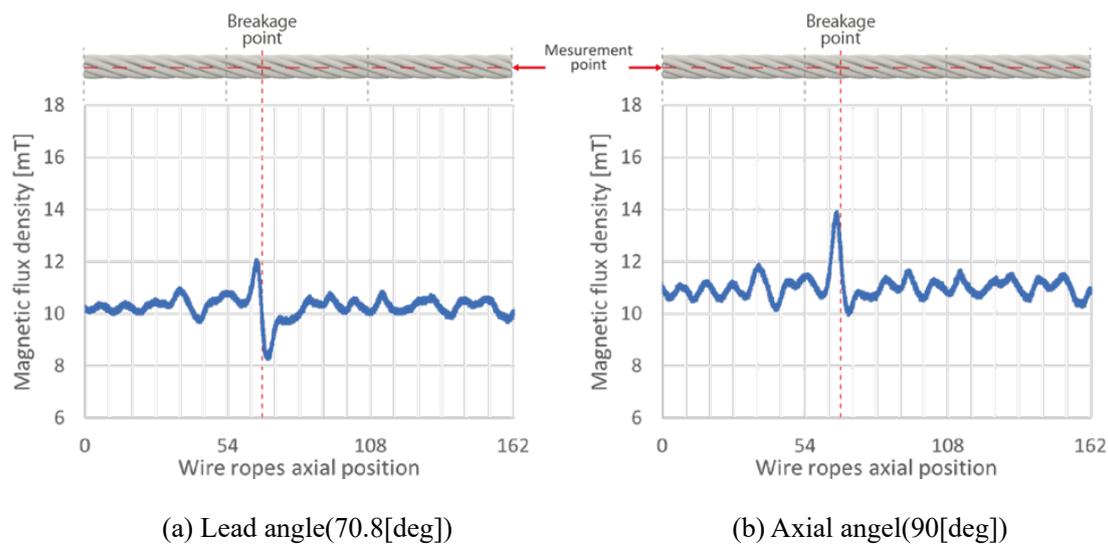


Fig.2-20 Results of magnetic flux density of a wire rope including a valley breakage when scanning 3 pitch in damage experiment.

2. 7 結 言

本章では漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査に発生するノイズの評価として、特にストランドとそのよりに起因するノイズについて有限要素法を用いた数値解析および損傷検出試験を行い、比較と検討をした。その結果以下に示す主要な結論を得た。

- (1) ストランドに起因する磁束密度の発生方向はストランドのより角度に対して垂直である。
- (2) 検出器の感磁方向をストランドのより角度にすることでノイズ低減が可能で、従来手法で用いられている軸方向と半径方向に比べて高い SN 比が得られた。
- (3) 数値解析モデルがワイヤロープ周囲に発生する磁束密度およびストランドに起因するストランドノイズの評価に有用であることを示唆した。

これらの結果より、漏洩磁束探傷法を用いた際の磁束密度について多種多様なワイヤロープにおいてもストランドのより角度について考慮することでノイズ発生原因を解明し、ノイズ低減可能なロープテストの設計に活用ができ、検出精度の向上が期待できる。

第3章 二次元平面におけるマルチセンサデータの特徴量抽出による劣化損傷の評価

3.1 はしがき

ワイヤロープは橋梁や索道、エレベータなど多岐に渡る構造物に用いられており、種類も数多く存在する。各業界でワイヤロープの保守保全に関して規定されており、特に交換や廃棄する基準は1ピッチあたりの素線切れの数や1ストランドあたりの素線切れの数で細かく取り決められているが、ワイヤロープは種類ごとに材質や素線、ストランドの構成が異なっているため、熟練の検査資格者であっても種類が違えばその健全性を評価することは難しい。このため、検査資格者に依存しない健全性評価手法として漏洩磁束探傷法を用いた損傷検出装置であるロープテストの検討が行われており、近年では検出器（磁気センサ）を多数配置するロープテストを用いることでワイヤロープの全周の磁束密度を計測し、健全性の評価を行っている。第1章でも述べたように多数配置した検出器の測定値を用いて機械学習等による劣化損傷の検出について様々な手法の検討が行われているが、ロープ長手方向における1ピッチあたりの素線切れの数の定量的な評価に有用であることのみが示されているものが多く、劣化損傷の大きさとロープ長手および円周方向の位置検出の全ての評価について検討を行っているものは少ない。ワイヤロープの健全性の評価を行うには劣化損傷の大きさとロープ長手および円周方向の位置検出の全ての評価が重要である。本研究では劣化損傷の中でも損傷の大きさが小さく検出や評価が難しい山切れおよび谷切れの素線切れを対象とし、ロープ円周方向に多数配置した隣接する磁気センサ間の情報に着目することでロープ円周方向における素線切れの位置検出手法について検討する。また、多数のセンサの出力値の和に着目したロープ長手方向における素線切れの定量的な評価手法と組み合わせることでワイヤロープ健全性評価として有用であるか検証する。

第2節では、多数の検出器（磁気センサ）をワイヤロープ円周方向に配置したワイヤロープテストと損傷検出試験に使用した素線切れについて説明を行い、損傷検出試験よりロープテストで得られた磁束密度の測定結果について言及する。

第3節では、本研究において提案する二次元平面におけるマルチセンサデータの特徴量抽出による素線切れ評価手法について、特に分類および特徴量抽出に関する手法の説明を行う。

そして、第4節では第2節で言及を行ったマルチセンサを用いたワイヤロープテストによる磁束密度の測定結果を第3節の分類および特徴量抽出手法により計算を行い、素線切れの大きさとロープ長手および円周方向の位置検出の評価に有用であるか検討を行う。

3. 2 マルチセンサを用いたワイヤロープテストによる測定

3. 2. 1 ワイヤロープテスト

本研究で用いたロープテストは図 3-1 (a) に示すように磁化器と磁気センサを用いた検出器からなる。磁気飽和の磁束密度は鉄鋼材の場合は炭素の含有量に依存するため、ヨークの材料には炭素の含有量が JIS G 4051 により定められている機械構造用炭素鋼の S25C を用いている。また、着磁の磁石にはネオジウム磁石 N-40 を用いている。磁気センサにはホール素子を採用し、ロープ円周方向の磁気センサの配置は図 3-1 (b) に示す 45 deg ごとに計 8 つとした。損傷検出試験に用いたロープテストの寸法を図 3-2 に示し、ワイヤロープに取り付けた際の外観を図 3-3 に示す。

図 3-1 及び図 3-2 に示すロープテストを用いて、最も検出が難しいとされる谷切れの素線破断数 1 本（素線切れは 160 mm の位置）の試験結果を図 3-4 (a) に示す。図 3-4 (a) より、谷切れの素線破断数 1 本の磁束密度の結果と素線切れのない健全な磁束密度の結果から SN 比を算出した結果を図 3-4 (b) に示す。160 mm の位置において SN 比が 4.6 となっており、素線切れのない健全な状態では最大で 340 mm 付近に SN 比が 1.8 となっている。最も検出が難しいとされる谷切れの素線破断 1 本において、SN 比の閾値を 1.8 以上 4.6 以下とすることで素線切れを識別できる可能性がある。

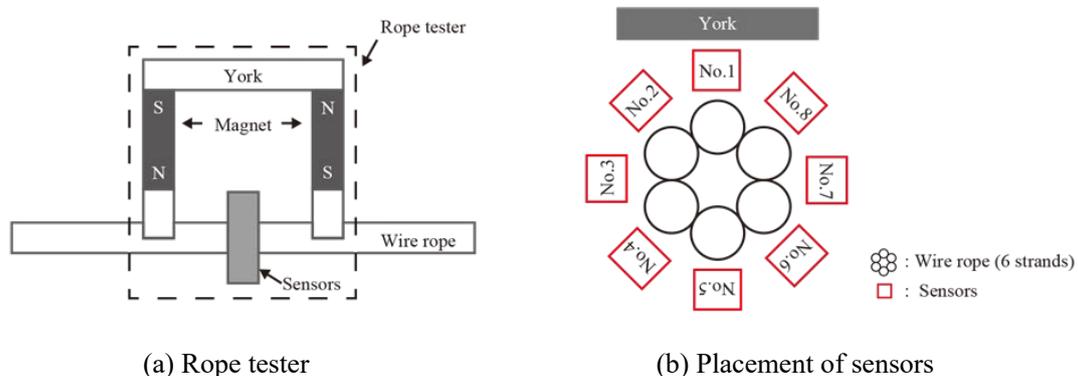


Fig.3-1 Structure of rope tester. It shows the rope tester used in the experiment. The sensors are arranged in the circumferential direction of the rope every 45 degrees and consist of a total of eight sensors.

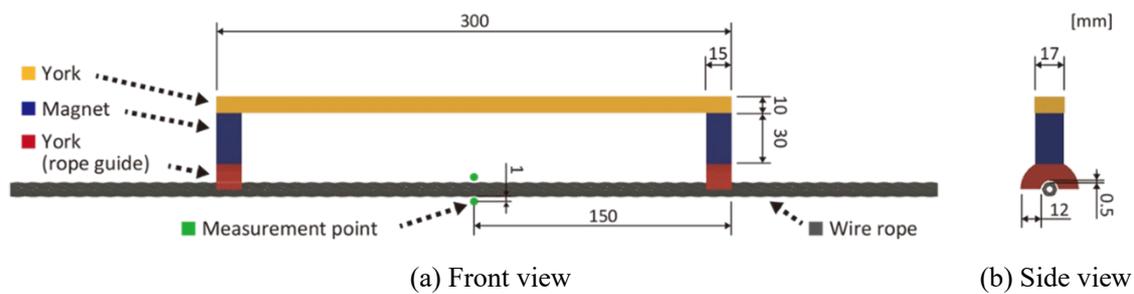


Fig.3-2 Dimensional drawing of rope tester. It shows the dimensions when the rope tester is attached to the wire rope. The distance from the magnetically sensitive position of the sensor to the surface of the wire rope was set to 1mm.

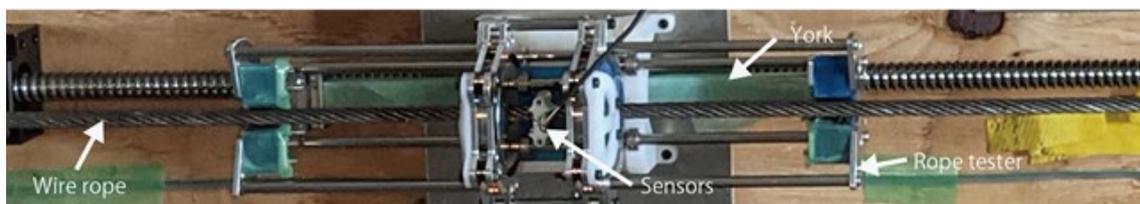


Fig.3-3 View of the rope tester attached to the wire rope during the experiment.

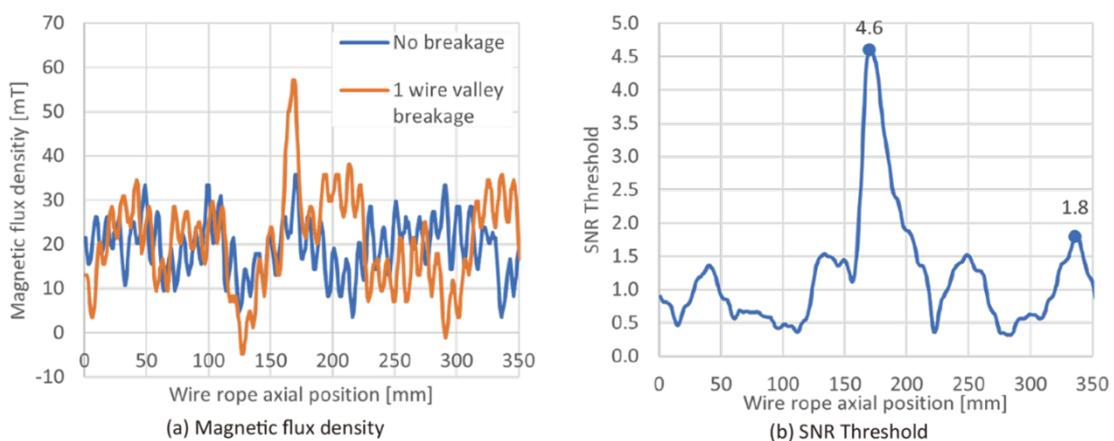


Fig.3-4 Results of magnetic flux density of the wire rope including a valley breakage.

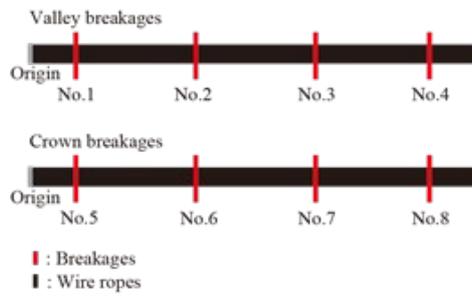
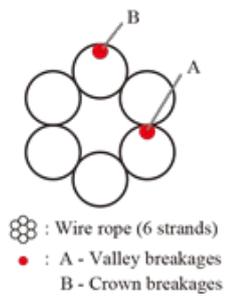
3. 2. 2 損傷検出試験に用いるワイヤロープと素線切れについて

本研究で対象としたワイヤロープは公称径 9[mm]の JIS G3525 で定められた 6×24 である。これはストランド数が 6 のストランドに束ねられた素線の数 が 24 のワイヤロープである。1 つのストランドがロープ中心かららせん状に一回転したときの長さであるピッチは今回対象としたロープの場合、54 [mm]である。ワイヤロープの主たる損傷として挙げられる素線切れには 2 種類ある。図 3-5 (a) の A に示すようなストランド同士の摩擦によって発生

する谷切れ，図 3-5 (a) の B に示すようなワイヤロープと滑車の摩擦によってロープ表面に発生する山切れである．日本クレーン協会規格 JCAS 0501-1986 のワイヤロープの廃棄基準では1ストランドが1ピッチで10%以上の素線切れが起きている場合とされているため，対象のロープでは1ピッチ中に2もしくは3本以上の素線切れが確認できる場合に廃棄の対象となる．このため，損傷検出試験では素線切れとして山切れと谷切れの2種類を用意して検証を行った．本研究における損傷検出試験に用いた素線切れは疲労破壊による破断の形態に似せた素線切れを用意した．図 3-6 に本研究の損傷検出試験で使用した素線切れの一例として1本の山切れの素線切れを示す．また，ロープ長手方向の1つの箇所においてロープ円周方向では1箇所しか存在しないように用意した．そのため，損傷は位置として長手方向では単位を[mm]と円周方向では単位を[deg]を用いて示し，その位置における局部的に発生する素線切れの本数を各箇所に応じて用意した．

評価用試料の素線切れの円周方向の位置，長手方向の位置に関しては表 3-1 に示す．損傷検出試験に際し，ロープ長手方向の原点は図 3-5 (b) に示すように谷切れの場合に素線切れ番号 1，山切れの場合に素線切れ番号 5 側の左端とし，ロープ円周方向は図 3-1 (b) に示すセンサ番号 7 を 0 [deg]として左回りを正とする．また，Kernel-SVM により閾値を求める素線切れの学習用の試料として5ピッチの長さをとったロープの長手方向の中央に素線切れ（山切れと谷切れを1，2，3，4本の計8種類）を施した計24本のロープを用意し，素線切れの検出の評価用として1800 [mm]長のロープに約400 [mm]の間隔で素線切れを1～4本の山切れと谷切れでそれぞれ分けて2本のロープを用意し，閾値の決定を行った．

マルチセンサデータを用いた素線切れの特徴量抽出によるロープ長手方向の素線切れの位置検出の性能評価として，従来の単一センサデータの閾値のみで素線切れの位置検出手法との比較を識別手法の評価に使われる混同行列によって行う．そのため，表 3-1 のロープ長手方向の損傷位置を基に識別の正解のラベルとして素線切れの位置を素線切れ番号ごとに示したものを表 3-2 に示す．ラベルは1[mm]を1ポイントとしており，素線切れの正解ラベルは素線切れの位置を中心に1ピッチ（54 [mm]）とした．



(a) Type and position.

(b) Number.

Fig.3-5 Type and position, number of breakages. (a) shows positions of crown and valley breakages using a wire rope diagram. (b) shows the position of breakages(Breakages No.) from the origin of the wire rope used in the experiment.



Fig.3-6 Wire rope with a crown breakage. There is a crown breakage of about 1 mm in the circle of the red line.

Table3-1 Parameter of breakages. About the number (Number of wire breakages) and position(Axial direction, Circumferential direction) of breakages for each breakage number(Breakage No.).

Type	Breakages No.	Number of wire breakages	Position	
			Axial direction [mm]	Circumferential direction [deg]
Valley	1	1	254	40
	2	2	663	90
	3	3	1091	320
	4	4	1490	140
Crown	5	4	208	140
	6	3	626	90
	7	2	1044	40
	8	1	1453	20

Table3-2 Positive label. Label for each breakages (Breakage No.) to judge the correctness of classification.

Type	Breakages No.	Positive label [mm]
Valley	1	227 ~ 281
	2	636 ~ 690
	3	1064 ~ 1118
	4	1463 ~ 1517
Crown	5	181 ~ 235
	6	599 ~ 653
	7	1017 ~ 1071
	8	1426 ~ 1480

3. 2. 3 試験要領

損傷検出試験に用いた試験装置と測定装置，試験要領および測定項目について項目別に説明を行う。

(1) 試験装置と測定装置

① 送り装置

送り装置は第2章と同様の電気モータ方式の水平移動送り装置を用いた。この装置は計測装置固定台，ワイヤロープの張力測定可能なロードセル搭載のワイヤロープ固定台，電気モータおよび電気モータに直結のボールねじ等から構成された試験機である。これについて概観を図2-17に示す。また，詳細な性能表を表2-4に示す。

② 検出器

検出器には磁気センサの中でもホール効果を利用した素子であるホール素子を用いた。感度は50[mV/mT]である。検出部の大きさは直径0.45[mm]である。

③ データロガー

平衡差動入力およびシングルエンド入力を選択可能で差動入力では最大4チャンネル，シングルエンド入力では8チャンネル測定可能である。本試験ではシングルエンド入力を用いて検出器（ホール素子）の測定を行い，波形の確認および記録に使用した。測定周期は1[μs]~60[s]で，分解能は14[bit]である。

(2) 試験要領

① 第 2. 2. 1 に示した公称径 9[mm]の 6x24 のワイヤロープを送り装置のワイヤロープ固定台に設置し、第 3. 2. 1 に示すマルチセンサを用いたロープテスタを送り装置の移動台に固定した。このとき、検出器（ホール素子）はワイヤロープ表面から 1.0[mm]だけ半径方向に離れた位置とした。

② 検出器（ホール素子）をデータロガーに接続し、検出器をワイヤロープ上に走査させ、磁束密度の測定を行った。軸方向 0.025[mm]ごとに測定を行った。

(3) 測定項目

第 3. 2. 1 に示すマルチセンサを用いたロープテスタを用いて第 2. 2. 1 に示した公称径 9[mm]の 6x24 のワイヤロープを対象とし、ロープ周囲に発生する磁束密度について測定を行った。また、損傷を含む場合は損傷を示す波形のピークピーク値についても調べた。

3. 2. 4 ワイヤロープ周囲に発生する磁束密度の測定結果

図 3-7 および 3-8 にロープテスタで使用したセンサにより測定したワイヤロープ周囲に発生する磁束密度の結果を示す。ここで、図 3-7 には谷切れの素線切れ、図 3-8 には山切れの素線切れの結果を示す。各センサの測定値だけではワイヤロープ軸方向において素線切れの波形を確認することは難しいものもある。特に小さい素線切れは波形を確認することが難しく、ロープ軸方向の位置検出がし難い。しかし、8つの磁気センサの結果において、図 3-5 (b) で示す本研究の試料の谷切れおよび山切れの素線切れの全ての劣化損傷の検出が確認できる。また、3本の素線切れを有する谷切れと山切れの測定値の結果を比べると、谷切れではピークピーク値がセンサ No.5 で 212[mT]、山切れではピークピーク値がセンサ No.1 で 413[mT]となっており、同じ素線切れの本数であっても山切れと谷切れで出力に差が生まれていることがわかる。これは磁気センサと劣化損傷との距離が理由の一つとして考えられ、山切れはワイヤロープ表面に発生する素線切れであるため、谷切れの素線切れよりも高い磁束密度の結果が得られたと考えられる。しかし、同じ谷切れの素線切れであり、本数が2本と3本で異なる Breakages No.2 および 3 では No.2 のピークピーク値が 230[mT]であり No.3 と変わらない磁束密度の結果を示している。これは Breakages No.2 の素線切れがワイヤロープの外形よりも大きくはみ出ていることが原因として考えられる。同じ谷切れや山切れの素線切れであっても、漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査において磁束密度を計測する場合は素線切れの本数だけでなく、形状についても考慮する必要がある。

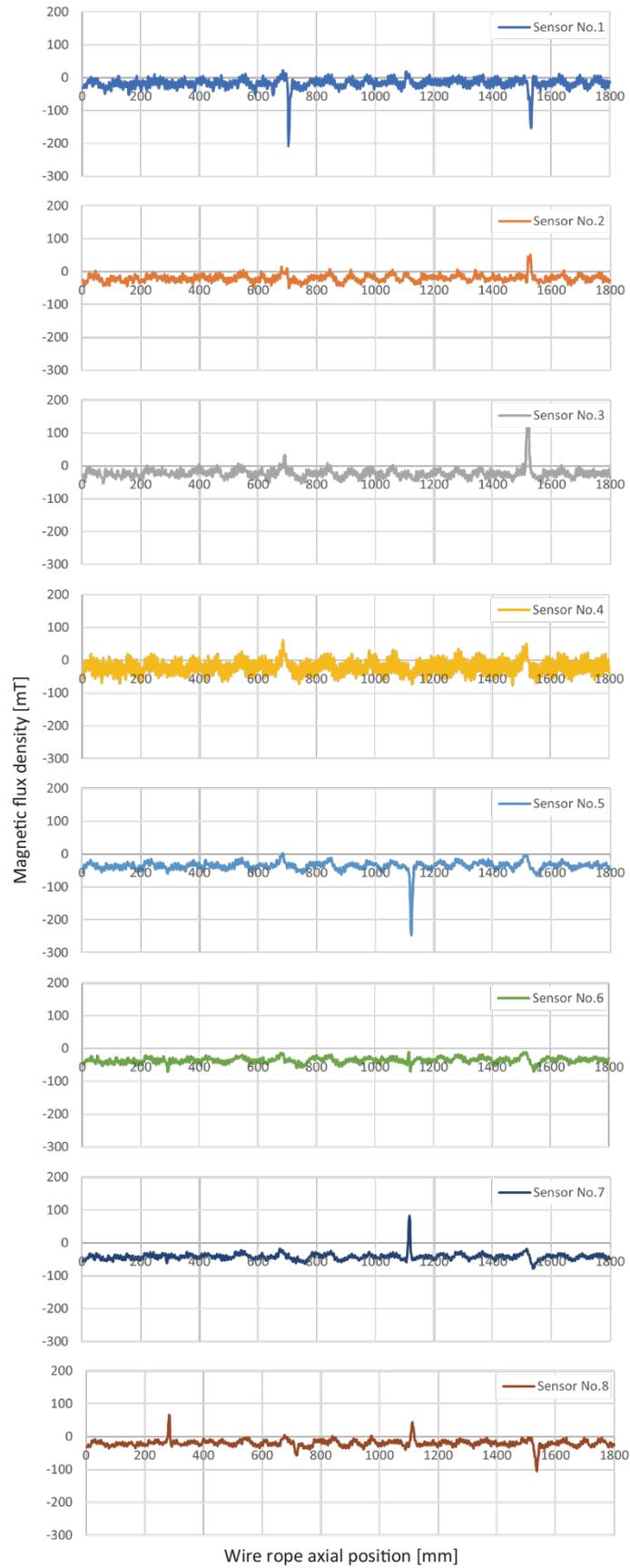


Fig.3-7 Measurement result of magnetic flux density generated around the wire rope(type: valley).

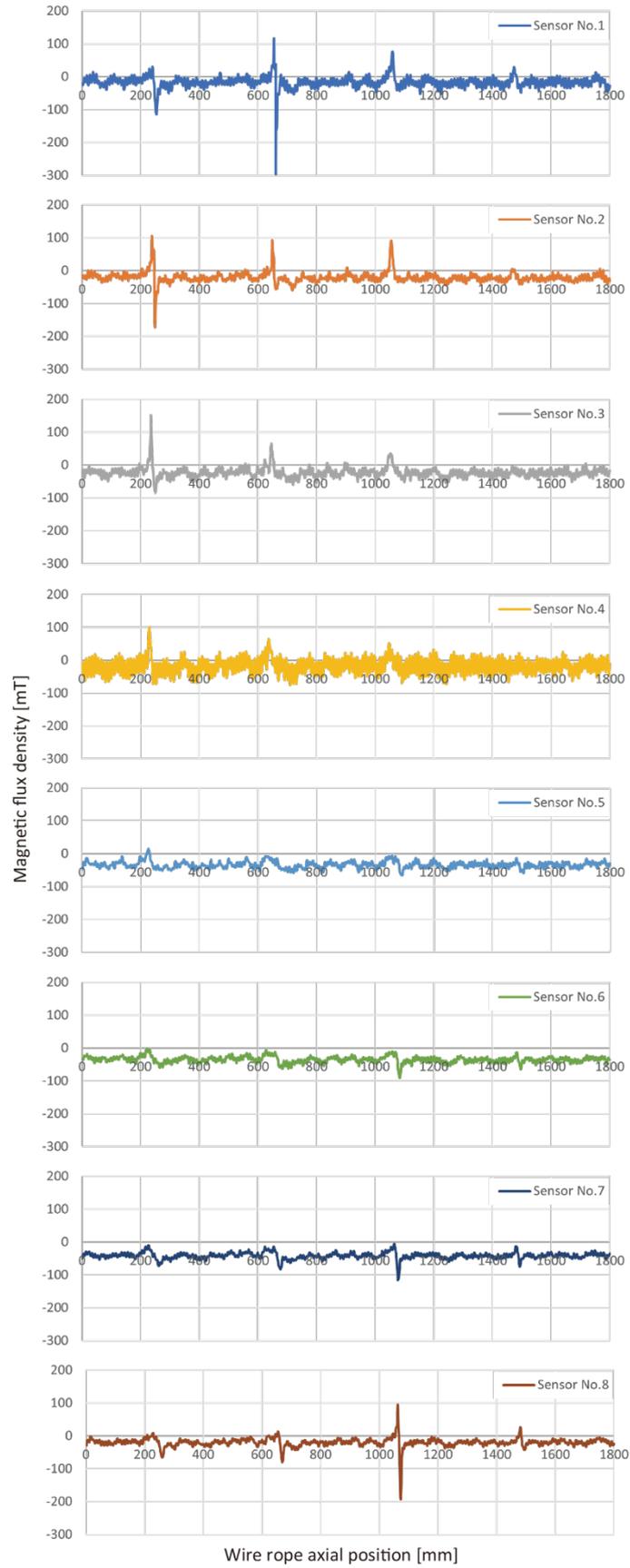


Fig.3-8 Measurement result of magnetic flux density generated around the wire rope(type: crown).

3. 3 二次元平面におけるマルチセンサデータによる素線切れの評価要領

3. 3. 1 カーネルサポートベクタマシンの分類評価 (Crammer らの式)

教師データを用いて従来のパターン認識器を学習するときは、教師データに対する認識率を最大にしようと学習する。しかし、パターン認識器が教師データを学習しすぎると、未知のデータに対する識別能力、すなわち汎化能力が低下する。この現象を過学習と呼ぶ。すなわち、教師データに対する認識率と汎化能力の間には、トレードオフの関係が存在する。このため、従来型のパターン認識器でも汎化能力を向上する方式がいろいろ検討されている。

これに対し、2クラス問題に対して定義される SVM では、教師データの認識率と汎化能力のトレードオフを考慮した学習が可能である。すなわち、まず入力空間を高次元特徴空間に写像することにより、線形分離性を高め、特徴空間で写像された教師データの分離を行う超平面を、教師データの認識率と汎化能力のトレードオフを考慮して決定する。

M_s 個の m 次元の教師データ $x_i (i = 1, \dots, M_s)$ がクラス 1, 2 のいずれかに属するとして、対応するクラスラベルを、クラス 1 のときに $y_i = 1$, クラス 2 のとき -1 とする。もし、これらのデータが線形分離可能であれば、次の決定関数を決めることができる。

$$D_s(x) = w^T x + b_D \quad (3-1)$$

ここで、 w は m 次元係数ベクトル、 b_D はバイアス項で、線形分離の条件より、決定関数は次の条件を満たす。

$$w^T x_i + b_D \begin{cases} > 0 & (y_i = 1) \\ < 0 & (y_i = -1) \end{cases} \quad (i = 1, \dots, M_s) \quad (3-2)$$

線形分離可能性より、 $w^T x + b_D = 0$ を満たす教師データはない。従って、クラス間の分離度を調整するために、式 (3-2) を次の条件で置き換える。このとき、式 (3-3) は式 (3-4) と等価となる。

$$w^T x_i + b_D \begin{cases} \geq 1 & (y_i = 1) \\ \leq -1 & (y_i = -1) \end{cases} \quad (3-3)$$

$$y_i(w^T x_i + b_D) \geq 1 \quad (i = 1, \dots, M_s) \quad (3-4)$$

2 入力の教師データに対する 2 つの分離超平面では各々の分離超平面が式 (3-4) を満たしており、かつ、どちらのクラスも等号を満たすデータが存在するとする。このとき 2 クラス

のデータを含む超平面は、分離超平面と並行で分離超平面からの距離が等しい。分離超平面とそれに最も近い教師データとの間の距離をマージン (margin) と呼ぶ。式 (3-4) を満たす超平面は無数に存在するが、汎化能力の観点から最適な超平面は、マージンが最大となる超平面で、これを最適超平面 (optimal hyperplane) と呼ぶ。マージンを最大化すると、クラス間が最も大きく分離されることになる。また、教師データと未知のデータの存在する分布が同一であるが、その分布自体はわからないとする。このとき、分離超平面を2つのクラスへの距離が等しい位置においたときに、統計的にみれば、汎化能力が最大になる。

この最適超平面を決定する方法を導く。まず、教師データ x_i から分離超平面への距離が $|D_s(x_i)|/\|w\|$ で与えられることを示す。超平面の係数ベクトル w は、超平面 $w^T x + b_D = 0$ と直交している。これは、超平面が原点を通るように平行に移動すると $w^T x = 0$ となるから、超平面 $w^T x = 0$ 上の x が w と直交していることよりわかる。次に、教師データ x_i を通り、超平面 $w^T x + b_D = 0$ に垂直な線分は、パラメータ a_D として、 $a_D w / \|w\| + x_i$ で与えられる。この線分は、次式で超平面と交差する。

$$D_s(a_D w / \|w\| + x_i) = 0 \quad (3-5)$$

これを a について解くと、 $a_D = -D(x_i) / \|w\|$ が得られる。このときの $|a_D|$ が、 x_i から超平面への距離を示している。従って、 δ をマージンとすると、すべての教師データは、式 (3-6) を満足する必要がある。

$$\frac{y_k D_s(x_k)}{\|w\|} \geq \delta \quad (k = 1, \dots, M_s) \quad (3-6)$$

(w, b_D) が解ならば、それを a_D 倍した $(a_D w, a_D b_D)$ も解になるから、解の一意性を保証するために、次の条件を設ける。

$$\delta \|w\| = 1 \quad (3-7)$$

式 (3-6)、式 (3-7) より、最適超平面を求めるためには、式 (3-4) を満たし、ノルムが最小となる w を求めればよい。すなわち、 w と b_D に関する次の最適化問題を解けばよい。

$$\min Q(w, b_D) = \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad (3-8)$$

$$\text{s.t. } y_i(w^T x_i + b_D) \geq 1 \quad (i = 1, \dots, M_S) \quad (3-9)$$

ここで、min は最小化を意味し、s.t. は subject to の略で、制約条件であることを示している。また、式 (3-8) で $\|w\|$ の代わりに $\|w\|^2$ の 2 乗を最小化しているのは、式 (3-8)、(3-9) の最適化問題を主問題 (primal problem) とする。

線形分離可能性を仮定しているために、式 (3-9) を満たす w 、 b_D は必ず存在する。ここで、制約条件を満たす解を許容解、あるいは実行可能解 (feasible solution) と呼ぶ。最適化問題が不等号制約付の 2 次の目的関数からなるために、たとえ解が非一意であっても、目的関数の値は一意となる。このため、解の非一意性は SVM では問題とはならない。これは、無数の局所最適解をもつ多層ニューラルネットに対する SVM の利点となる。式 (3-9) において等号制約を満たさないデータをすべて除いても、元の解と同じ階が得られる。等号制約を満たすデータの中にも、削除しても解が変わらないものが存在する。このようなデータを除いて、元の解と同じ解が得られるデータの集合に属するデータをサポートベクトルと呼ぶ。

式 (3-8)、(3-9) で与えられる最適化問題の変数は w 、 b であるから、変数の数は $m + 1$ となる。入力変数の数が少ないときは、このまま解くこともできるが、後で述べる入力変数を高次元空間に写像する場合は、変数の数が教師データの数と等しい双対問題 (dual problem) に変換して解くことが行われる。そのためにまず、式 (3-8)、(3-9) で与えられる制約付きの最適化問題を、次の制約なしの最適化問題にする。ただし、 $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_M)^T$ で α_i は非負のラグランジュ乗数 (Lagrange multiplier) である。

$$\min Q(w, b_D, \alpha) = \frac{1}{2} w^T w - \sum_{i=1}^{M_S} \alpha_i (y_i (w^T x + b_D) - 1) \quad (3-10)$$

式 (3-10) の最適解においては、式 (3-10) が w に関して最小で、 $\alpha_i (\geq 0)$ に対して最大となる。このように、変数により目的関数が最大であるのと最小であるのが混在するときの最適解を鞍形点と呼ぶ。このときの最適解となる条件は次式で与えられ、KKT 条件 (Karush-Kuhn-Tucker condition) と呼ばれる。

$$\frac{\partial Q(w, b_D, \alpha)}{\partial w} = 0 \quad (3-11)$$

$$\frac{\partial Q(w, b, \alpha)}{\partial b} = 0 \quad (3-12)$$

$$\alpha_i(y_i(w^T x_i + b_D) - 1) = 0 \quad (i = 1, \dots, M_S) \quad (3-13)$$

$$\alpha_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, M_S) \quad (3-14)$$

ここで、 0 は要素が 0 のベクトルであることを示す。特に式 (3-13) は $\alpha_i = 0$ が制約式のどちらかが満足すれば成立するので、KKT 相補条件と呼ぶ。式 (3-13) より、 $\alpha_i = 0$ か、または $\alpha_i \neq 0$ で $y_i(w^T x_i + b_D) = 1$ が満足されなければならない。ここで、 $\alpha_i \neq 0$ となる x_i をサポートベクトルと呼ぶ。式 (3-10) を用いると式 (3-11)、(3-12) は各々次式のようになる。

$$w = \sum_{i=1}^{M_S} \alpha_i y_i x_i \quad (3-15)$$

$$\sum_{i=1}^{M_S} \alpha_i y_i = 0 \quad (3-16)$$

式 (3-15)、(3-16) を式 (3-10) に代入すると、次の双対問題が得られる。

$$\max \quad Q(\alpha) = \sum_{i=1}^{M_S} \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^{M_S} \alpha_i \alpha_j y_i y_j x_i^T x_j \quad (3-17)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^{M_S} y_i \alpha_i = 0, \quad \alpha_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, M_S) \quad (3-18)$$

以上のように定式化された SVM は、ハードマージン SVM と呼ばれる。

$$\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^{M_S} \alpha_i \alpha_j y_i y_j x_i^T x_j = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^{M_S} \alpha_i y_i x_i \right)^T \left(\sum_{i=1}^{M_S} \alpha_i y_i x_i \right) \geq 0 \quad (3-19)$$

式 (3-17) を式 (3-18) の条件下で最大化する最適問題は、下に凸な 2 次計画問題になり、線形分離可能であれば、大域最適解が存在する。また、2 次計画問題では、解が存在するとき主問題と双対問題の目的関数の値は一致する。これを、双対ギャップ (duality gap) が 0 であるという。ここで、サポートベクトルの添え字の集合を S とすると、式 (3-15) より、

決定関数は式 (3-20) で与えられる。また、式 (3-13) の KKT 条件より、 b は式 (3-21) で与えられる。ただし、解法によっては、平均をとる式 (3-22) を用いる方がよい場合がある。

$$D_S(x) = \sum_{i \in S} \alpha_i y_i x_i^\top x + b_D \quad (3-20)$$

$$b_D = y_i - w^\top x_i \quad (i \in S) \quad (3-21)$$

$$b_D = \frac{1}{|S|} \sum_{i \in S} (y_i - w^\top x_i) \quad (3-22)$$

得られた決定関数により、データ x は $D_S(x) > 0$ ならクラス 1 に分類し、 $D(x) < 0$ ならクラス 2 に分類する。 $D_S(x) = 0$ のときは、 x はクラスの境界上にあり、分類できない。

ハードマージン SVM では、線形分離可能であることを仮定しており、もし線形分離可能でなければ、許容解は存在しない。従って、最適解を求めることはできない。そのため、ここでは線形分離可能でない場合にも適用できるように SVM を拡張する。このために、次のように、式 (3-4) に非負の変数 $\xi_i (\geq 0)$ を導入する。

$$y_i (W^\top x_i + b_D) \geq 1 - \xi_i \quad (i = 1, \dots, M_S) \quad (3-23)$$

このとき、 x_i が線形分離できないときも、 ξ_i もある正の値以上にすることにより、式 (3-23) を満たすことができる。従って、式 (3-23) の許容解は常に存在する。この非負の変数をスラック変数と呼ぶ。最大マージンをもたない教師データの数を最小にするような最適化問題を解くことは難しいので、次のような最適問題を考える。

$$\min \quad Q(w, b_D, \xi) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + \frac{C}{p} \sum_{i=1}^{M_S} \xi_i^p \quad (3-24)$$

$$\text{s.t.} \quad y_i (W^\top x_i + b_D) \geq 1 - \xi_i, \quad \xi_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, M_S) \quad (3-25)$$

ここで、 $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_M)^\top$ で、 C は式 (3-24) 右辺第 1 項のマージン最大化と第 2 項の誤認識の最小化のトレードオフを決定するマージンパラメータである。すなわち、 C の値を大きくすれば、教師データの認識率が上がるが、大きくしすぎると過学習が生じ、汎化能力が低下する。そのため、高い汎化能力を実現するためには、 C の値を適切に設定する必要がある。

p は1か2の値を取り、 $p = 1$ のとき L1 ソフトマージン SVM, 略して L1SVM と呼ぶ。また、 $p = 2$ のとき L2 ソフトマージン SVM, 略して L2SVM と呼ぶ。

これまでの SVM では、入力空間内の超平面で2つのクラスを分離するために、線形分離可能でない場合、例えば、各々のクラスがいくつかのデータの集まり（これをクラスターと呼ぶ）から構成されているような場合は、超平面をマージンが最大になるように決めても汎化能力が悪いことが予測される。すなわち、このような問題に対しては、入力空間内で非線形分離を行う必要がある。この問題を解決するために、まず、入力空間を高次元の特徴空間と呼ばれる内積空間に写像して、特徴空間上でマージンが最大となるように超平面を決定する方式が考案されている。ここで、 $M_s - 1$ 次元空間では、最大で M_s のデータを、任意の組み合わせで線形分離可能である。従って、入力空間から高次元空間に写像することにより、線形分離性が向上することがわかる。ここで、 m 次元の入力空間を、 l 次元の特徴空間に写像する関数を、 $\varphi(x) = (\varphi_1(x), \dots, \varphi_l(x))^T$ とすると、特徴空間での線形の決定関数は、次式で与えられる。

$$D_s(x) = W^T \varphi(x) + b_D \quad (3-26)$$

ただし、 W は l 次元係数ベクトルで、 b_D はバイアス項である。ここで、ある対称関数 $K(x, x')$ が、このとき、 x を内積特徴空間に写像する、次の関係を満足する関数 $\varphi(x)$ が存在する。

$$\sum_{i,j=1}^{M_s} h_i h_j K(x_i, x_j) \geq 0 \quad (3-27)$$

このとき、 x を内積特徴空間に写像する、次の関係を満足する関数 $\varphi(x)$ が存在する。式 (3-28) が満足されると式 (3-29) となる。

$$K(x, x') = \varphi^T(x) \varphi(x') \quad (3-28)$$

$$\sum_{i,j=1}^{M_s} h_i h_j K(x_i, x_j) = \left(\sum_{i=1}^{M_s} h_i \varphi^T(x_i) \right) \left(\sum_{i=1}^{M_s} h_i \varphi(x_i) \right) \geq 0 \quad (3-29)$$

すなわち、 $K(x, x')$ を i 行 j 列の要素とする $M_s \times M_s$ 行列は、固有値が非負の準正定行列となる。これをカーネル行列と呼ぶ。式 (3-27) あるいは式 (3-29) の条件はマーサーの条件と呼ば

れ、式 (3-27) あるいは式 (3-29) を満たす関数を、準正定カーネルあるいは単にカーネル (kernel) と呼ぶ。カーネルを用いる利点は、特徴空間の変数を陽に扱う必要がなく、入力データの無い計算でカーネル値が求まることである。すなわち、後で述べるように、学習及び認識において $K(x, x')$ を用いることにより、 $\varphi(x)$ を直接計算する必要がない。これをカーネルトリックと呼ぶ。また、このようにカーネルトリックにより陽に特徴空間の変数を扱わない手法をカーネル法と呼ぶ。カーネルを用いることにより、ソフトマージンサポートベクターマシン (L1 SVM) の特徴空間での双対問題は、次式で与えられる。

$$\max \quad Q(a) = \sum_{i=1}^{M_s} \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^{M_s} \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x, x') \quad (3-30)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{M_s} y_i \alpha_i = 0, \quad 0 \leq \alpha_i \leq C \quad (i = 1, \dots, M_s) \quad (3-31)$$

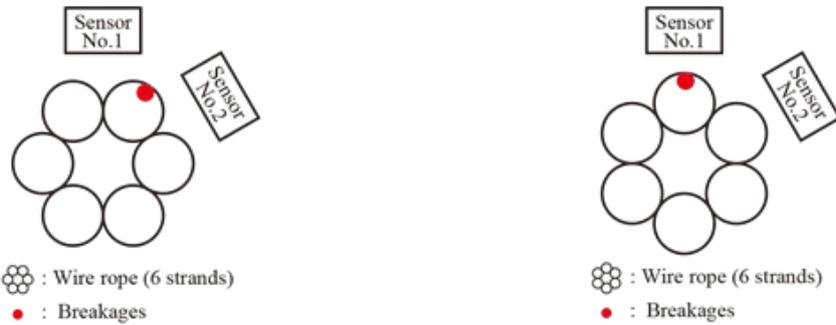
3. 3. 2 二次元平面におけるマルチセンサデータによる素線切れの特徴量抽出

従来の SN 比を用いた特徴量抽出では単一のセンサの出力値をワイヤロープの種類や環境、ロープテストの構成から閾値を求める一次元での識別を行っていた。しかし、損傷の度合いが全く同じであっても図 3-9 (b) で示すようなセンサが損傷の真上を通る場合に比べて、図 3-9 (a) のようなセンサとセンサの間を損傷が通過してしまう場合には損傷を識別する閾値を下回り、損傷として検出することが難しい場合がある。

そこで、図 3-10 のように隣接するセンサの出力値から SN 比より算出した特徴量を用いて、それぞれ横軸と縦軸にとって二次元平面を作り出すことで単一の閾値のみの損傷検出手法よりも損傷とセンサの相対位置に依存せずに損傷の大きさを評価することができる。また、従来の単一の閾値のみの識別手法では損傷検出が難しくなる図 3-10 の斜線部に示す領域において損傷検出が可能となるため、ロープ長手方向における損傷検出でも高い識別性能を示すことが可能である。

本研究で提案する手法は初めにロープ長手方向の損傷検出として、隣接するセンサの出力値から SN 比より算出した特徴量を用いて、それぞれ横軸と縦軸にとって二次元平面を作り出し、パターン認識の一つである Kernel-SVM により閾値を算出して損傷であるか健全であるかの分類を行う。これより、損傷と分類された結果から隣接するセンサの出力値を用いて

センサの位置に合わせて演算し、円形レーダーチャートに図示することで素線切れの形態についても評価を行う。



(a) Breakages between sensors.

(b) Breakages to the front of the sensor.

Fig.3-9 Relative position of breakages and sensors. About the position of breakages with respect to the position of sensors.

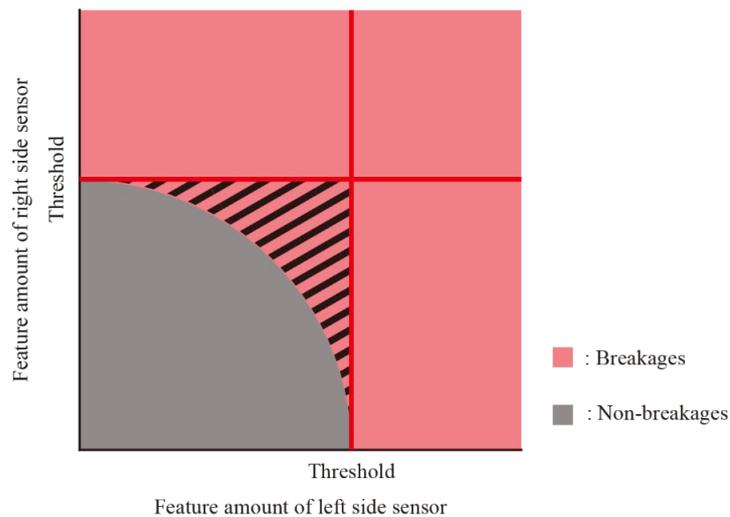


Fig.3-10 The feature extraction using multi-sensor data in two-dimensional plane. Gray areas are no breakage, red areas are breakages. The red line shows the breakage threshold of the left and right sensors, and the black shaded area shows what was actually broken but not broken when the breakage was classified by a single threshold indicated by the red line. Even if classification is performed using a two-dimensional plane using multi sensors, it is difficult to classify the area shown by the black diagonal line with a single threshold value. The breakage may also be present in the black shaded area, as the breakage does not necessarily pass directly above the sensor.

3. 3. 3 混同行列による分類結果の評価

本研究で提案する隣接する二つの磁気センサの測定データを用いて Kernel-SVM により閾値を決定し、識別した結果が有用であるかについて従来手法である単一のセンサの閾値を変化させた際の真陽性率と精度の結果から比較及び検討を行う。このとき、本研究で提案する損傷の識別手法には Kernel-SVM を用いて学習用の試料から得られたデータから閾値を決定し、従来手法の閾値は SN 比を 2.2~4.0 で変化させ、識別を行った。

主な評価として式 (3-32)、(3-33) に表すように素線切れの正解ラベルを正しく識別できているかを示す真陽性率 (True positive rate) と素線切れとして識別された中で間違った識別が少ないかを示す精度 (Precision) の二つを用いて行う。ここで素線切れの正解ラベルを素線切れと識別した結果を真陽性 (TP: True Positive)、素線切れの正解ラベルを健全と識別した結果を偽陰性 (FN: False Negative)、素線切れの無い健全のラベルを素線切れと識別した結果を偽陽性 (FP: False Positive)、健全のラベルを健全として識別した結果を真陰性 (TN: True Negative) とした。また、ロープ長手方向における素線切れの位置検出の性能評価を行うため、ロープテストで使用されるセンサの出力からそれぞれ識別を行い、その結果を全て足し合わせたときの本研究で提案する手法と従来手法の真陽性率と精度の結果を用いて、比較する。

$$\text{True positive rate} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3-32)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3-33)$$

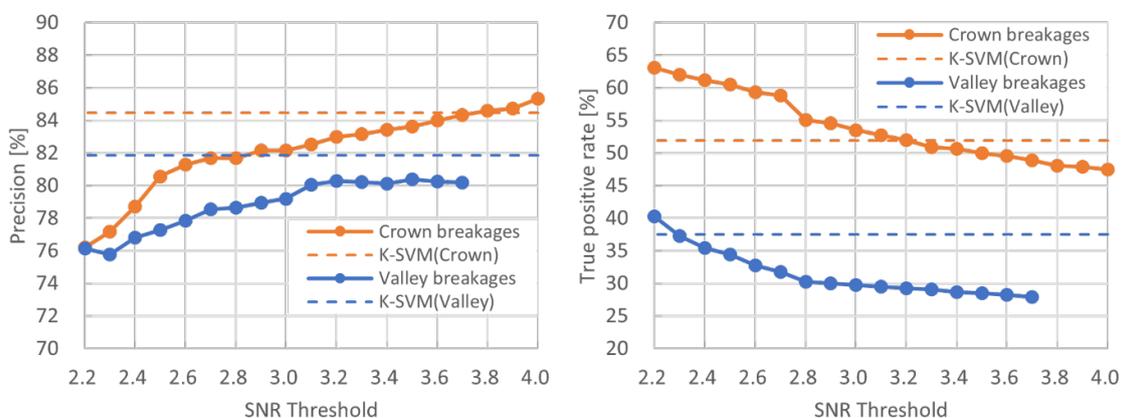
3. 4 二次元平面におけるマルチセンサデータを用いた素線切れ評価

3. 4. 1 ロープ長手方向における素線切れ評価

図 3-11 にロープテストで使用されるセンサの出力からそれぞれ識別を行い、その結果を全て足し合わせたときの本研究で提案する手法と従来手法の真陽性率と精度の結果を示す。検出が難しい谷切れは提案手法では真陽性率は 37.5%、精度は 81.8%であった。真陽性率を上回る従来手法の閾値 2.2 以下で、精度を超える場合の閾値は無かった。しかし、真陽性率を上回る閾値が 2.2 のときの精度は 76.1%と 5.7%低下していることがわかる。次に素線切れとしての検出が谷切れと比較して容易である山切れの本研究で提案する手法では真陽

性率は 51.9%, 精度は 84.5%であった。真陽性率を超える従来手法の閾値は 3.2 以下, 精度は 3.8 以上であった。閾値が 3.2 の場合の精度は 83.0%となり, 真陽性率が上回っても精度が 1.5%低下している。加えて, 閾値が 3.8 の場合の真陽性率は 48.0%であり, こちらも 3.9%低下していることがわかる。これより, 単一のセンサで閾値を決定し識別する従来手法では素線切れの誤った識別があっても検出数をあげるために閾値を下げて真陽性率を高くするか, 誤った識別を少なくして確実に素線切れを発見するために閾値を上げて精度を高くするかの二つの方法が考えられるが, 本研究で提案する隣接するセンサの出力値から Kernel-SVM による識別手法を用いることで山切れや検出が難しい谷切れにおいても高い精度を保ったまま, 真陽性率を上げることが可能であるといえる。

また, 図 3-12 に示す山切れの素線切れの場合の隣接するセンサの出力値から SN 比より算出した特徴量を用いて, それぞれ横軸と縦軸にとった図 10 の識別結果からも, 青色で示す健全と識別された結果とその他の損傷を表す結果の境界が図中の点線で示すような曲線で識別ができていたため従来手法では識別が難しかった素線切れに関しても識別が可能なのことがわかる。



(a) True positive rate

(b) Precision

Fig.3-11 Evaluation index of classification performance. Compare the true positive rate with the accuracy from the classification result when the SNR threshold of the conventional method is changed from 2.2 to 4.0 and when the threshold is determined from the result of training using Kernel-SVM as pattern recognition. It is possible to increase the true positive rate while maintaining high accuracy by using the identification method by Kernel-SVM from the output values of the adjacent sensors proposed in this report.

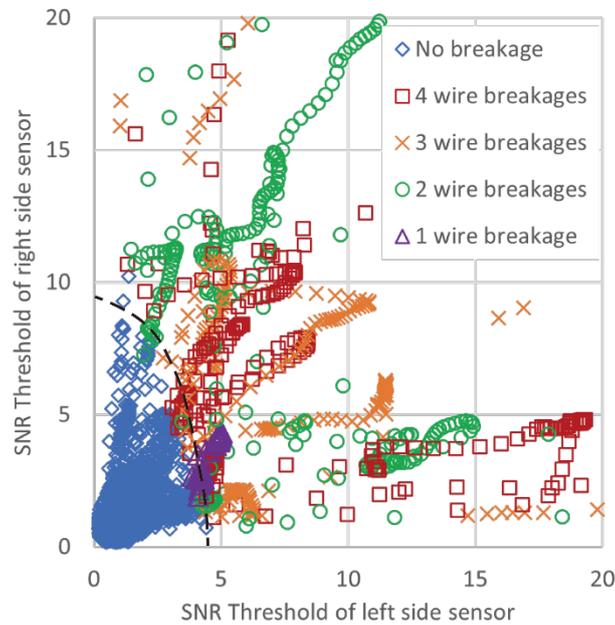


Fig.3-12 Feature extraction of crown breakages by two-dimensional plane using multi sensors data. It is possible to classify the breakage that is difficult to classify by the conventional method since the breakage can be classified by the curve shown by the black dotted line. The shape of the blue diamond is no breakage to the wire rope, other shapes are 1 to 4 crown breakages.

3. 4. 2 ロープ円周方向における素線切れ評価

前章よりワイヤロープの軸方向において本研究で提案する隣接するセンサの出力値を用いることで素線切れの識別性能が向上することが分かった。次に図 3-13 は提案手法を用いて縦軸に素線切れと識別したものを 1、健全と識別したものを 0 とし、横軸をワイヤロープの軸方向の距離としたときの識別結果であるが、8 つのセンサを配置した検出器において、表 1 に示す谷切れと山切れの素線切れの全てを位置検出できていることがわかる。特に大きな損傷である山切れの素線切れ数 4 本の軸方向位置 200 mm 付近の結果を見ると、全ての結果において素線切れがあると識別されているが、その結果の幅に注目するとセンサ No.2 と No.3 の結果が広く、センサ No.5 と No.6 の結果が狭く識別されている。これは漏洩磁束探傷法を用いたときのセンサの出力特性に影響を受けており、磁化させた際の不連続部の幅が広いと漏れ出る磁束の最大値が高く、走査させた方向にも広くなるからである。加えて、識別結果においても素線切れがセンサに近いほど結果の幅が広くなると考えられる。

これらの特性を用いることで、ロープ円周方向においても素線切れの位置検出が可能にな

る。そのため、隣接する磁気センサ間の出力値をセンサ番号ごとの配置に合わせて演算を行う。例えば、本研究で用いたロープテストのセンサ No.7 を 0 deg とした場合にセンサ No.7 と No.8 はグラフの第一象限の 0~45 deg の範囲に合わせて演算を行う。これをセンサ No.1 ~No.8 まで行い、図 3-14, 15 に示すように円形レーダーチャートに表した。図 3-14 は谷切れ、図 3-15 は山切れの結果を示し、各素線切れの値は素線切れの番号の正解ラベルの範囲の中央位置におけるセンサの出力値を参照した。また、識別結果から素線切れを詳細に評価するために全ての出力値を足し合わせたときの角度、隣接する磁気センサの出力の絶対値が最も大きいときの角度、隣接する磁気センサの出力の絶対値が二番目に大きいときの角度、絶対値の総和を表 3-3 に示す。表 3-3 の全ての出力値を足し合わせたときの角度では全ての素線切れにおいて角度が 10 deg の範囲で位置検出が可能である。

谷切れの素線切れ No.3 がストランドの内側で素線切れの端部が大きく開き、それぞれの端部が隣のストランドとの谷部付近に位置しており、この素線切れは本研究で用いたワイヤロープの撚り数が 6 の場合にストランドの谷部からその隣の谷部までが 60 deg であることから、素線切れの端部の円周方向の位置は 290 deg と 350 deg である。この素線切れが図 11 においてセンサ No.7 とセンサ No.5 の出力値が高くなっていることと合致する。また、表 3-3 に示す隣接する磁気センサ間の出力の絶対値が最も大きいときの角度と隣接する磁気センサ間の出力の絶対値が二番目に大きいときの角度を見ても 6 deg, 358 deg と 0 deg 付近に素線切れの端部が存在していることが確認できるため、素線切れの円周方向の位置だけでなく、素線切れの形態も検出可能と判断できる。

素線切れの数の検出に関しては表 3-3 のセンサ出力値の絶対値の総和が素線切れの数に応じて上昇する傾向がみられるが、谷切れの素線切れ No.3 と山切れの素線切れ No.7 のように例外も存在する。素線切れの形態が破断箇所の両端部がワイヤロープのストランドの撚りに影響を受けずに離れていない場合は漏洩磁束探傷法で検出される磁束密度は限りなく 1 箇所に近いが、端部がストランドの撚りに影響を受けて大きく開いてしまう場合はそれぞれの端部から漏洩磁束が発生するため、素線切れの本数が同一であったとしても端部が大きく開いてしまう場合の方がセンサの測定する出力値として大きくなる。そのため、この 2 つの No.3 と No.7 素線切れは他の素線切れと比べて素線切れの端部が大きく開いていたことから、出力値に影響を与えたと考えられる。センサ出力値の絶対値の総和だけでは端部が開いていなければ素線切れの本数を評価することが可能であるが、円形のレーダーチャートも用いて素線切れを詳細に評価するために全ての出力値を足し合わせたときの角度、隣

接する磁気センサの出力の絶対値が最も大きいときの角度、隣接する磁気センサの出力の絶対値が二番目に大きいときの角度を算出することでロープに存在する素線切れの形態や大きさの評価も可能になると考えられる。

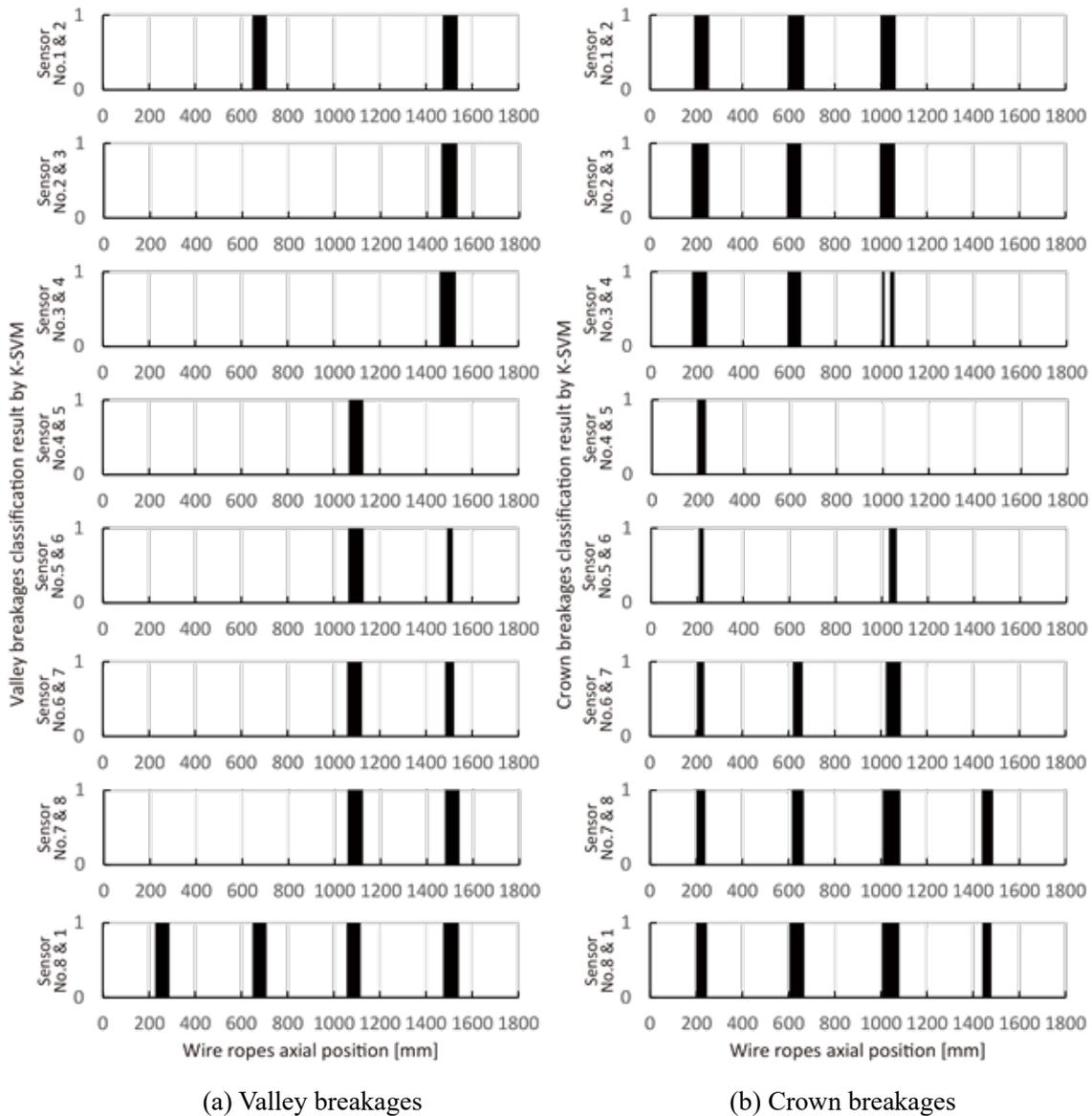
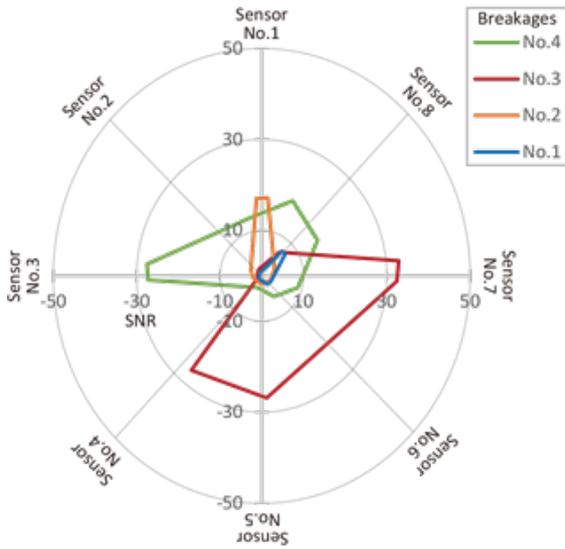
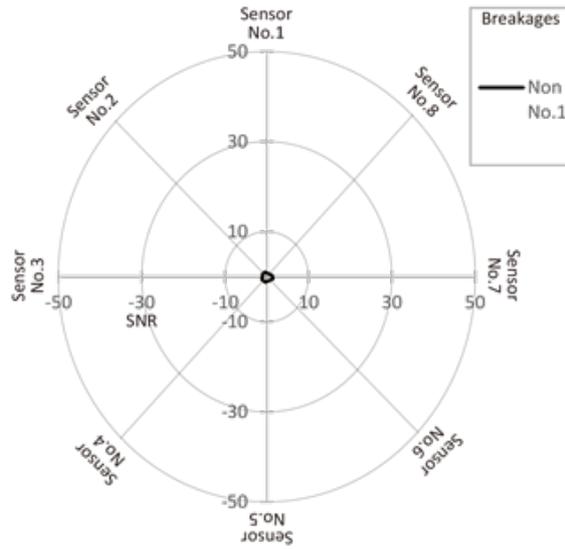


Fig.3-13 Evaluation index of classification performance by two-dimensional plane using multi sensors data. The value of the classification result shown on the vertical axis indicates 0 to 1 and it is classified as breakages when it is in the shape of a black band.

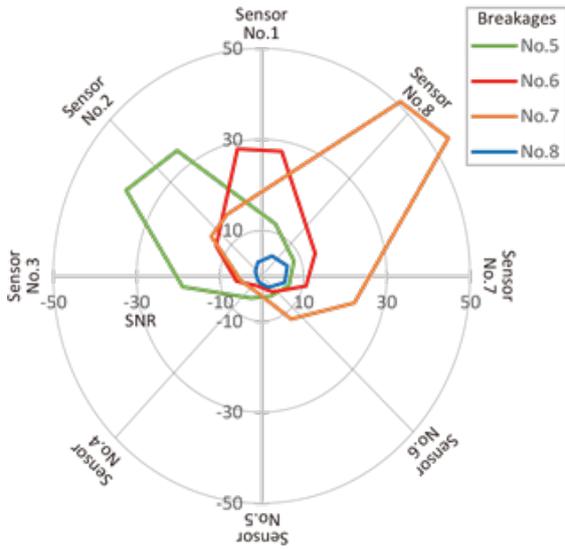


(a) Breakages

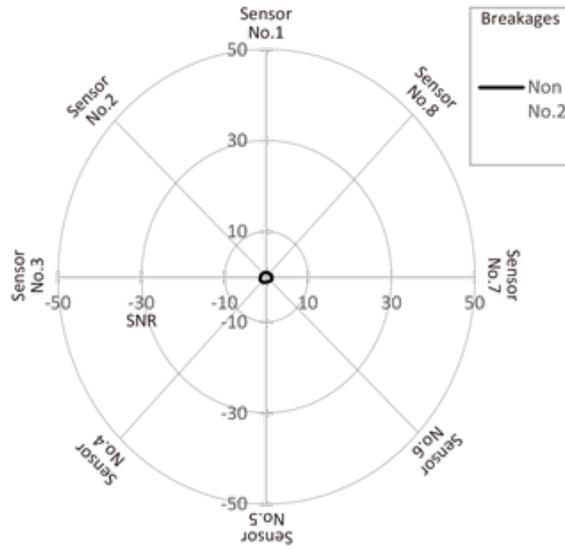


(b) No-breakages

Fig.3-14 Circular radar charts of the rope tester about valley breakages using the value of the adjacent magnetic sensors.



(a) Breakages



(b) No-breakages

Fig.3-15 Circular radar charts of the rope tester about crown breakages using the value of the adjacent magnetic sensors.

Table3-3 Breakages (=Positive label) data of classification performance. The form of wire breakages can be evaluated by calculating the angle when the absolute value of the output of the adjacent magnetic sensor is largest and second largest using a circular radar chart.

Type	Breakages No.	Position [mm]	Angle(total) [deg]	Angle(largest) [deg]	Angle(second) [deg]	Sum of absolute value (Breakage size)
Valley	1	254	31	40	48	22.6
	2	663	87	85	94	48.9
	3	1091	323	6	358	129.8
	4	1490	132	175	182	118.9
Crown	5	208	139	150	126	128.6
	6	626	83	102	80	106.9
	7	1044	41	34	49	179.3
	8	1453	24	20	346	28.1

3. 5 結 言

漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープの損傷検出手法として、二次元平面におけるマルチセンサデータを用いた特徴量抽出による損傷検出手法を提案した。その結果以下に示す主要な結論を得た。

- (1) 従来の単一のセンサの閾値を用いた特徴量抽出手法と比較して、提案手法はロープ軸方向の位置検出に有用であることを検証した。
- (2) ロープ円周方向においても ± 10 deg の範囲で素線切れの位置検出を可能とする結果を得た。
- (3) 隣接する磁気センサの出力値を用いてセンサの位置に合わせて演算し、円形レーダーチャートに図示することで素線切れの形態についても検出できる可能性を示唆した。

これらの結果より、ワイヤロープの健全性評価に関して従来手法よりも高い精度での損傷検出が期待できる。

第4章 異種センサの複合センサデータによる劣化損傷の要因判別手法の検討

4.1 はしがき

ワイヤロープでは主な劣化損傷要因として素線切れが挙げられるが、この素線破断にはワイヤロープの心網側にみられる谷切れとワイヤロープ表面にみられる山切れが存在する。しかし、磁気センサのみで行われる現行の検査手法では谷切れと山切れの素線切れの違いを判別することは難しい。そのため、異常検知技術で用いられている単一種の時系列データから規則性を発見し、異常検知及び予測を行う手法ではワイヤロープの劣化損傷要因の判別や劣化度合の同定を行うことが困難である。そこで、本研究では複数種のセンサより得られた時系列データに注目し、異種センサによる複合センサを用いたワイヤロープテストによる損傷検出試験において検出された値から連続ウェーブレット変換（CWT：Continuous Wavelet Transform）を行うことで特徴量を抽出し、異種センサの複合センサデータを用いることによるワイヤロープの異常検知技術と健全性評価手法としての可能性の検討を行う。また、ワイヤロープの劣化損傷要因として谷切れと山切れの素線切れ、腐食錆、摩耗の計4種類を用意し、損傷検出試験を行った。これらの劣化損傷要因の判別を行うため複合センサを用いたワイヤロープテストとして、磁気センサと光学式センサを用いたセンサアレイを製作した。これより、異種センサの複合センサデータをCWTにより導出した特徴量を用いることでワイヤロープの損傷要因の判別や劣化度合の同定に有用であるか検討を行う。

第2節では、多数の検出器（磁気センサおよび光学式センサ）をワイヤロープ円周方向に配置したワイヤロープテストと損傷検出試験に使用した素線切れについて説明を行い、損傷検出試験よりロープテストで得られた磁束密度の測定結果について、磁気センサおよび光学式センサでそれぞれ言及する。

そして、第3節では本研究で特徴量抽出に用いるCWTについて説明を行い、第2節で測定を行った異種センサの複合センサデータをCWTにより特徴量抽出を行い、ワイヤロープの損傷要因の判別や劣化度合の同定に有用であるか検討を行う。

4.2 異種センサを用いたワイヤロープテストによる測定

4.2.1 ワイヤロープテスト

既存で存在するワイヤロープテストには漏洩磁束探傷法を用いた磁気センサアレイによる素線切れ等の劣化損傷の探傷を行うものがある。しかし、磁気センサの単一種では素線切れや摩耗、腐食錆が存在することを検出できても、その劣化損傷の種類判別をすることは難

しい。そこで本研究では提案する異種センサを用いたワイヤロープテストにより、劣化損傷の測定を行い、劣化損傷の種類判別まで行うことを可能であるか検討を行う。

本研究で用いたロープテストは第3章と同様の図3-1(a)に示すように磁化器と磁気センサに加えて、磁気センサと同様の配置で構成された光学式センサを用いた検出器からなる。ワイヤロープテストは谷切れと山切れの素線切れを含む劣化損傷の検出が可能な磁気センサを主軸とし、腐食錆の表面の色の変化や摩耗の広範囲にわたる表面の形状変化の検出が可能な光学式センサからなる。以下に製作した各センサアレイシステムを表す。

- ・磁気センサアレイ
- ・光センサアレイ

また、各センサアレイシステム間の距離は磁気センサアレイを原点(0[mm])とすると、光センサアレイが34[mm]とし、損傷検出試験に用いた磁気センサおよび光学式センサを用いたロープテストの外観を図4-1に示す。

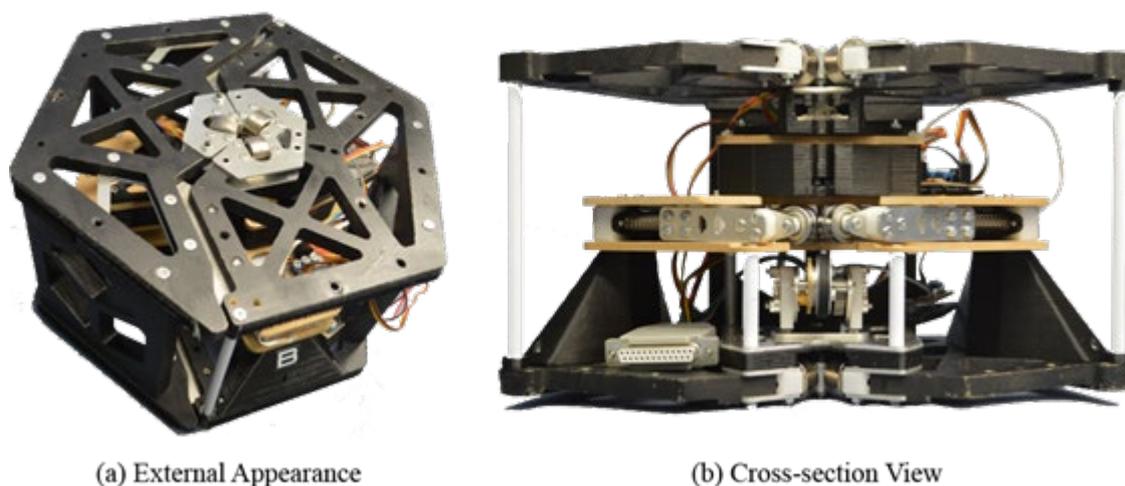


Fig.4-1 Wire Rope Flaw Detectors

4. 2. 2 損傷検出試験に用いるワイヤロープと劣化損傷について

本研究で対象としたワイヤロープは第3章で用いたものと同様の公称径9[mm]のJIS G3525で定められた6×24である。ワイヤロープの劣化損傷として素線切れ、腐食錆、摩耗の3種類が挙げられる。日本クレーン協会規格JCAS 0501-1986のワイヤロープの廃棄基準では素線切れの場合、1ストランドが1ピッチで10%以上の素線切れが起きている場合とされているため、対象のロープでは1ピッチ中に2もしくは3本以上の素線切れが確認できる場合に廃棄の対象となる。このため、損傷検出試験では素線切れとして山切れと谷切

れの 2 種類を用意して検証を行った。本研究における損傷検出試験に用いた素線切れは疲労破壊による破断の形態に似せた素線切れとした。また、ロープ長手方向の 1 つの箇所においてロープ円周方向では 1 箇所しか存在しないように用意した。そのため、損傷は位置として長手方向では単位を [mm] と円周方向では単位を [deg] を用いて示し、その位置における局部的に発生する素線切れの本数、ロープ全周を 1 としたときの腐食錆の割合、摩耗によるロープ直径の減少の割合を各箇所に応じて用意した。このときの腐食錆はロープ全周に対して 25[%], 50[%], 75[%], 100[%] を用意し、摩耗はロープ直径の減少率を 2[%], 4[%], 6[%], 8[%] を用意した。損傷検出試験に際し、それぞれの劣化損傷の位置と番号は図 4-2 に示すように谷切れの場合に劣化損傷番号 1~4, 山切れの場合に劣化損傷番号 5~8, 腐食錆の場合は劣化損傷番号 9~12, 摩耗の場合は劣化損傷番号 13~15 とした。劣化損傷番号に対する劣化損傷の大きさに関しては表 4-1 に示す。また、本研究の損傷検出試験で使用した劣化損傷の一例として 4 本の谷切れの素線切れを図 4-3, ロープ全周の 50[%] の腐食錆を図 4-4, ロープ直径の減少率 4[%] の摩耗を図 4-5 に示す。

Table 4-1 Parameter of damage(long-term mechanism).

Breakage				Corrosion		Wear	
Valley		Crown		No.	Percentage of circumferences [%]	No.	Percentage of decrease diameter [%]
No.	Number of wire breakages	No.	Number of wire breakages				
1	1	5	4	9	25	13	2
2	2	6	3	10	50	14	4
3	3	7	2	11	75	15	6
4	4	8	1	12	100	16	8

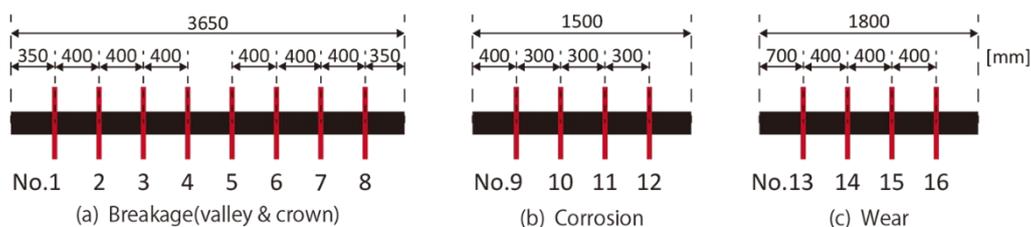


Fig.4-2 Position and number of damage.



Fig.4-3 Wire rope with valley breakage (4 wires).



Fig.4-4 Wire rope with corrosion.



Fig.4-5 Wire rope with wear.

4. 2. 3 試験要領

損傷検出試験に用いた試験装置と測定装置，試験要領および測定項目について項目別に説明を行う。

(1) 試験装置と測定装置

① 送り装置

送り装置は第2章と同様の電気モータ方式の水平移動送り装置を用いた。この装置は計測装置固定台，ワイヤロープの張力測定可能なロードセル搭載のワイヤロープ固定台，電気モータおよび電気モータに直結のボールねじ等から構成された試験機である。これについて概観を図2-17に示す。また，詳細な性能表を表2-4に示す。

② 検出器

検出器には磁気センサと光学式センサを用いた。磁気センサはホール効果を利用した素子であるホール素子を用いた。感度は50[mV/mT]である。光学式センサは反射型のフォトセンサを用いた。このフォトセンサは赤外線発光ダイオードから放出された光を対象に反射させ，フォトトランジスタで受光するものである。ここで，フォトトランジスタと発光ダイオードの中心間距離は2.8[mm]（ロープ軸方向），発光ダイオードの遮断周波数は1[MHz]，ピ

ーク発光波長 940[nm], フォトトランジスタの最大感度波長は 800[nm]である. 測定値は 0 ~255 の範囲で表し, 黒に近いほど値は大きくなり, 白に近いほど値は小さくなる.

③ データロガー

平衡差動入力およびシングルエンド入力を選択可能で差動入力では最大 8 チャンネル, シングルエンド入力では 16 チャンネル測定可能である. 本試験ではシングルエンド入力を用いて検出器 (ホール素子およびフォトセンサ) の測定を行い, 波形の確認および記録に使用した. 測定周期は 1[μ s]~60[s]で, 分解能は 14[bit]である.

(2) 試験要領

① 第 2. 2. 1 に示した公称径 9[mm]の 6x24 のワイヤロープを送り装置のワイヤロープ固定台に設置し, 第 4. 2. 1 に示すマルチセンサを用いたロープテストを送り装置の移動台に固定した. このとき, 検出器 (ホール素子およびフォトセンサ) はワイヤロープ表面から 1.0[mm]だけ半径方向に離れた位置とした.

② 検出器 (ホール素子およびフォトセンサ) をデータロガーに接続し, 検出器をワイヤロープ上に走査させ, 軸方向 0.025[mm]ごとに測定を行った.

(3) 測定項目

第 4. 2. 1 に示すマルチセンサを用いたロープテストを用いて第 2. 2. 1 に示した公称径 9[mm]の 6x24 のワイヤロープを対象とし, 磁気センサではロープ周囲に発生する磁束密度について, 光学式センサではロープ表面の状態について測定を行った.

4. 2. 4 ワイヤロープの測定結果

図 4-6 に磁気センサ, 図 4-7 に光学式センサの谷切れと山切れの素線切れの試験結果を示し, 図 4-8 に磁気センサ, 図 4-9 に光学式センサの腐食の試験結果, 図 4-10 に磁気センサ, 図 4-11 に光学式センサの摩耗の試験結果を示す.

図 4-6 の磁気センサによる素線切れの試験結果より, 谷切れおよび山切れの全ての素線切れが Sensor No.1~No.8 において検出できていることが見て取れ, 素線切れの本数が大きくなるほど, 漏洩する磁束密度も大きくなることから, 検出できるセンサも増えていることがわかる. また, 図 4-7 の光学式センサによる素線切れの試験結果ではワイヤロープ軸方向距離の 1800[mm]以降の山切れの素線切れでは Sensor No.5 の 2800[mm]付近や Sensor No.6 の 2500[mm]付近において検出できているように見て取れる. しかし, あくまで試験条件や磁気センサの検出位置と比べて同じ位置にあることから損傷の検出波形であることが確認で

きるため、Sensor No.4 のようにノイズが多く含まれる場合は判別が難しい。

次に図 4-8 に示す磁気センサによる腐食の試験結果より、磁気センサでは腐食の深度が浅いものは検出が難しい。漏洩磁束探傷法の計測原理では対象の磁性体の不連続部において磁束密度が漏洩するため、深度の浅い腐食の場合は不連続部として非磁性体となる腐食部分が小さく、計測できる磁束密度が小さいことが影響していると考えられる。しかし、図 4-9 に示す光学式センサによる腐食の試験結果より、Sensor No.4 の光学式センサの結果では定常的に 100 の値を計測していることに対して、腐食がある場所では 150 の値を検出しており、ワイヤロープ表面の色が変色する腐食においては検出ができる可能性がある。

最後に図 4-10 に示す磁気センサによる摩耗の試験結果より、Damage No.13~16 の全ての損傷を検出できていることが見て取れ、ロープ円周方向においても Damage No.13 は Sensor No.3, Damage No.14 は Sensor No.2, Damage No.15 は Sensor No.8, Damage No.16 は Sensor No.6 で大きく磁束密度を検出できていることから特徴量抽出の信号処理を行わずとも円周方向の位置について検出することができる可能性がある。また、この注目した損傷とセンサにおいて波形が素線切れの検出波形と比べて、細かく振動するように磁束密度が計測されている。これは摩耗により、複数の素線の切断もしくは断面積の減少が起きているためであると考えられる。図 4-11 に示す光学式センサによる摩耗の試験結果より、損傷個所において測定値が変動していることが見て取れるため、磁気センサの検出波形の特徴と光学式センサの検出波形を組み合わせることで素線切れおよび腐食とも判別することができる可能性がある。

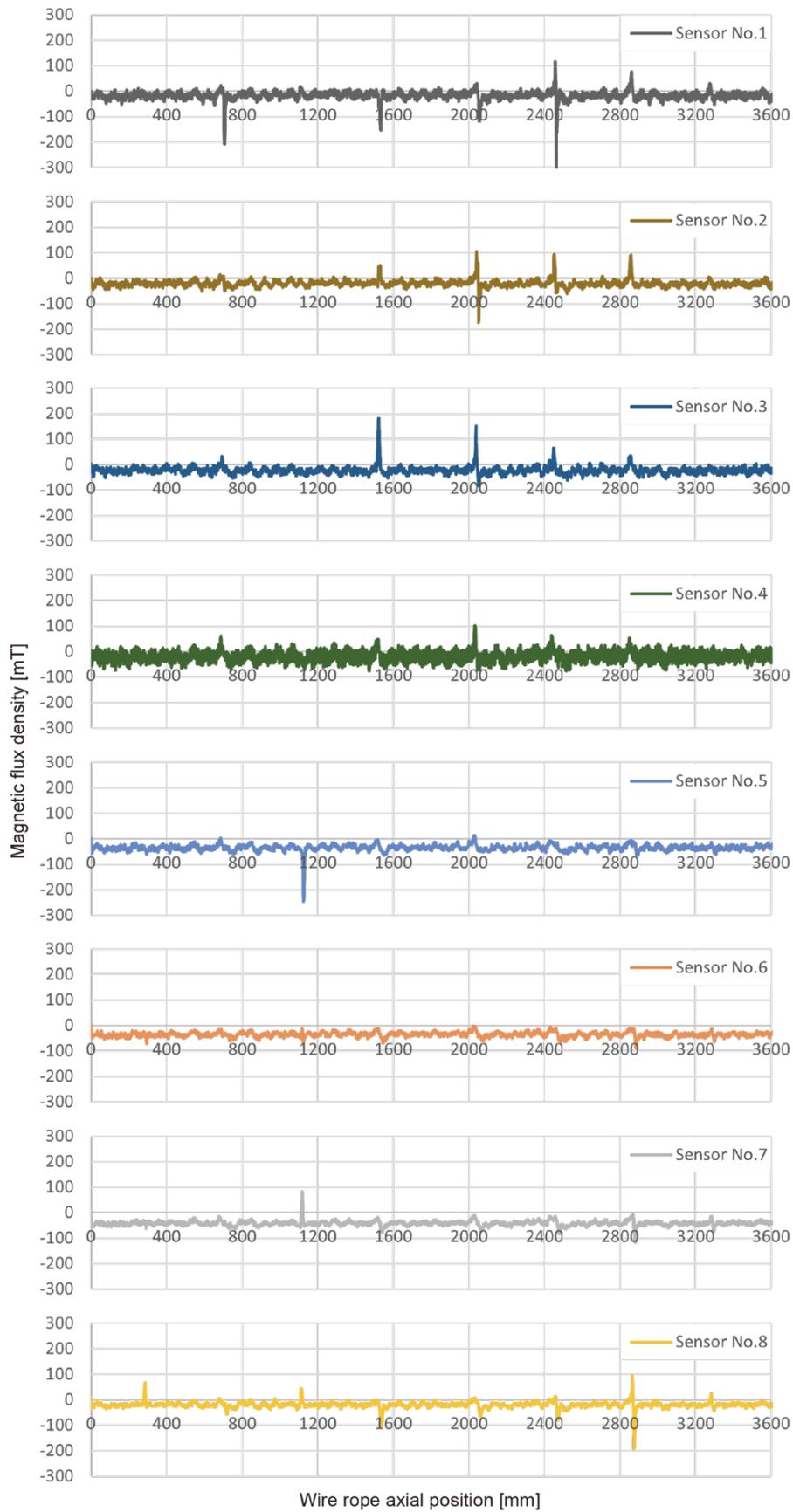


Fig.4-6 Measurement result of magnetic flux density (type: breakage)

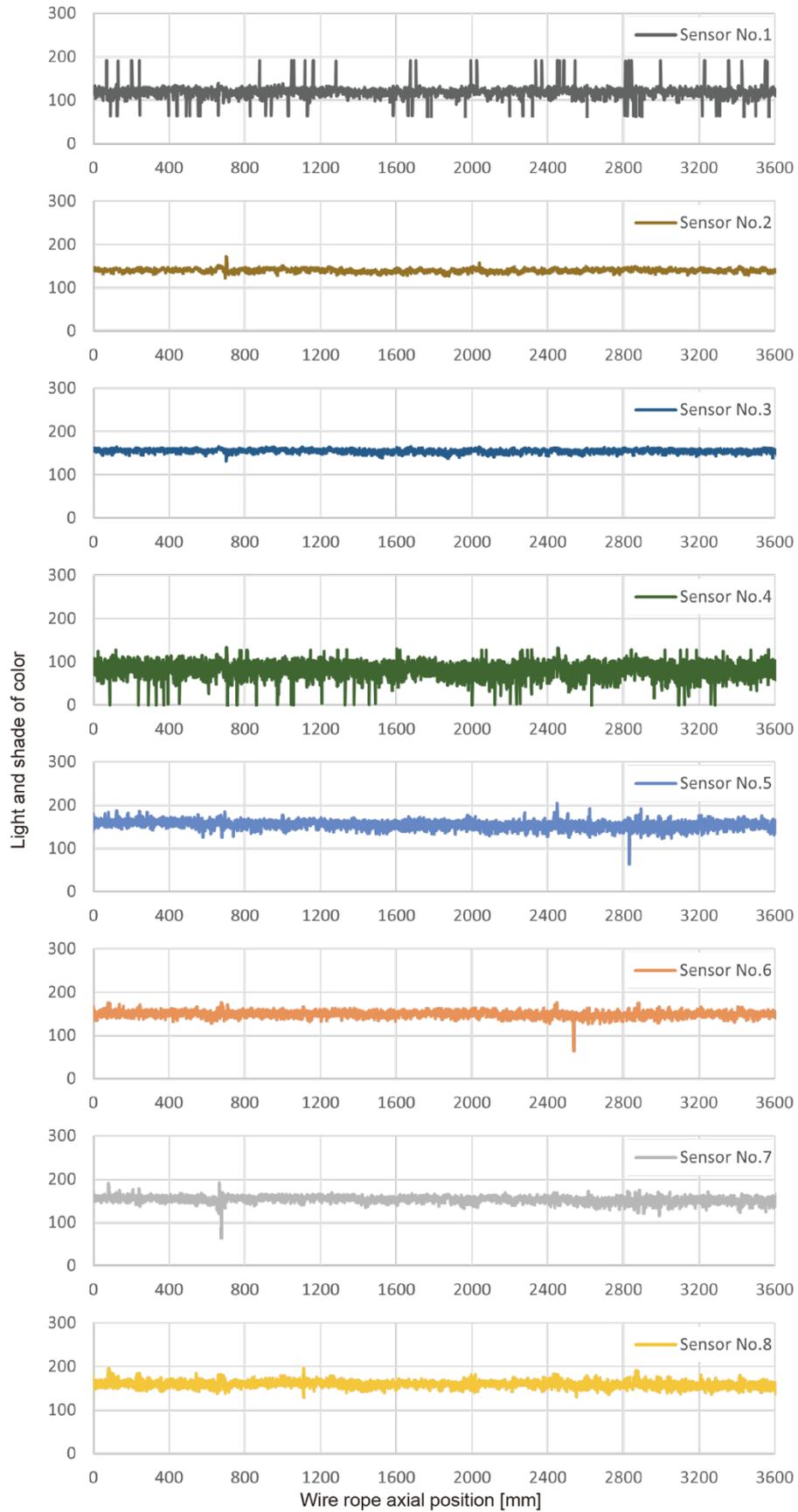


Fig.4-7 Measurement result of color light and shade (type: breakage)

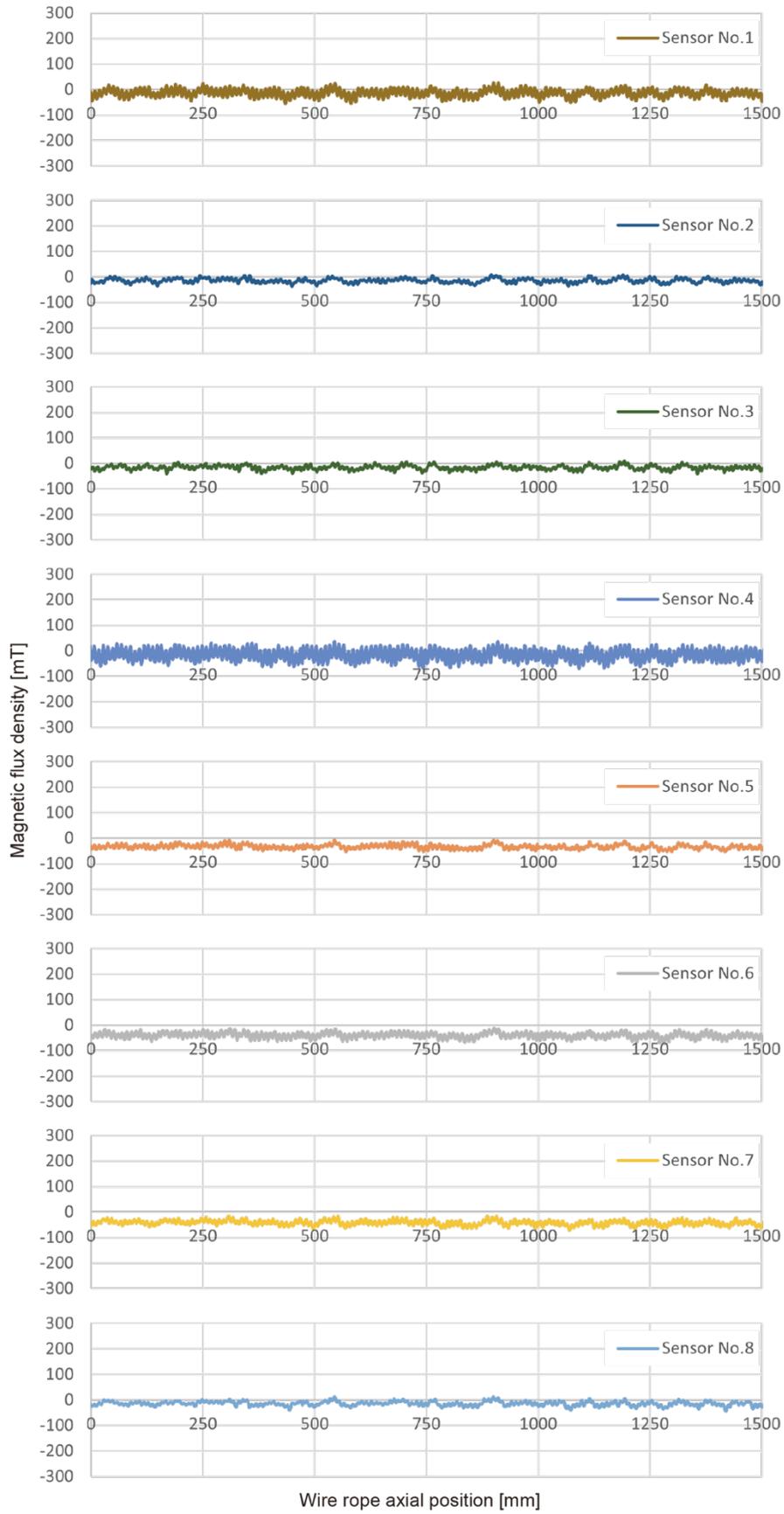


Fig.4-8 Measurement result of magnetic flux density (type: corrosion)

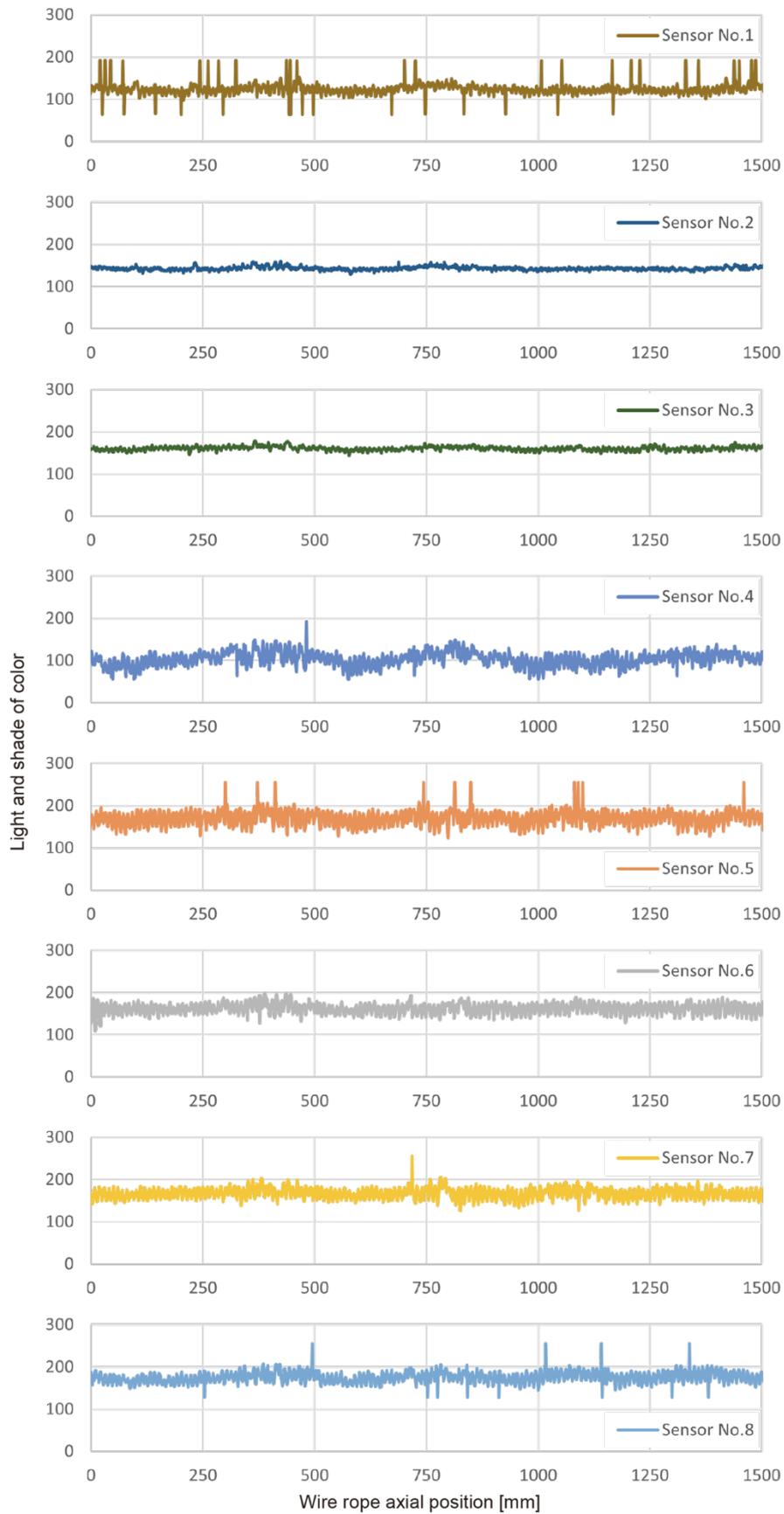


Fig.4-9 Measurement result of color light and shade (type: corrosion)

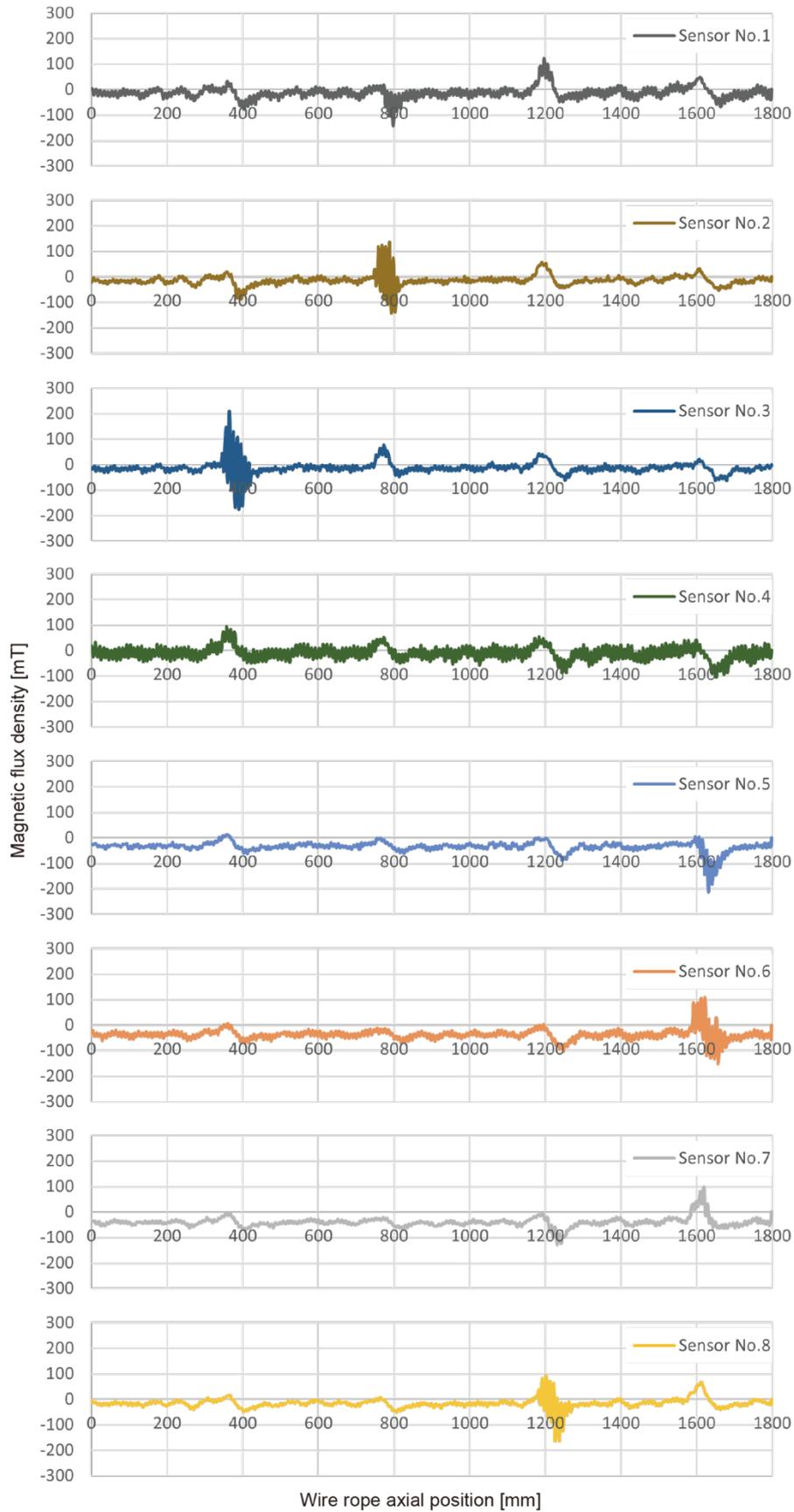


Fig.4-10 Measurement result of magnetic flux density (type: wear)

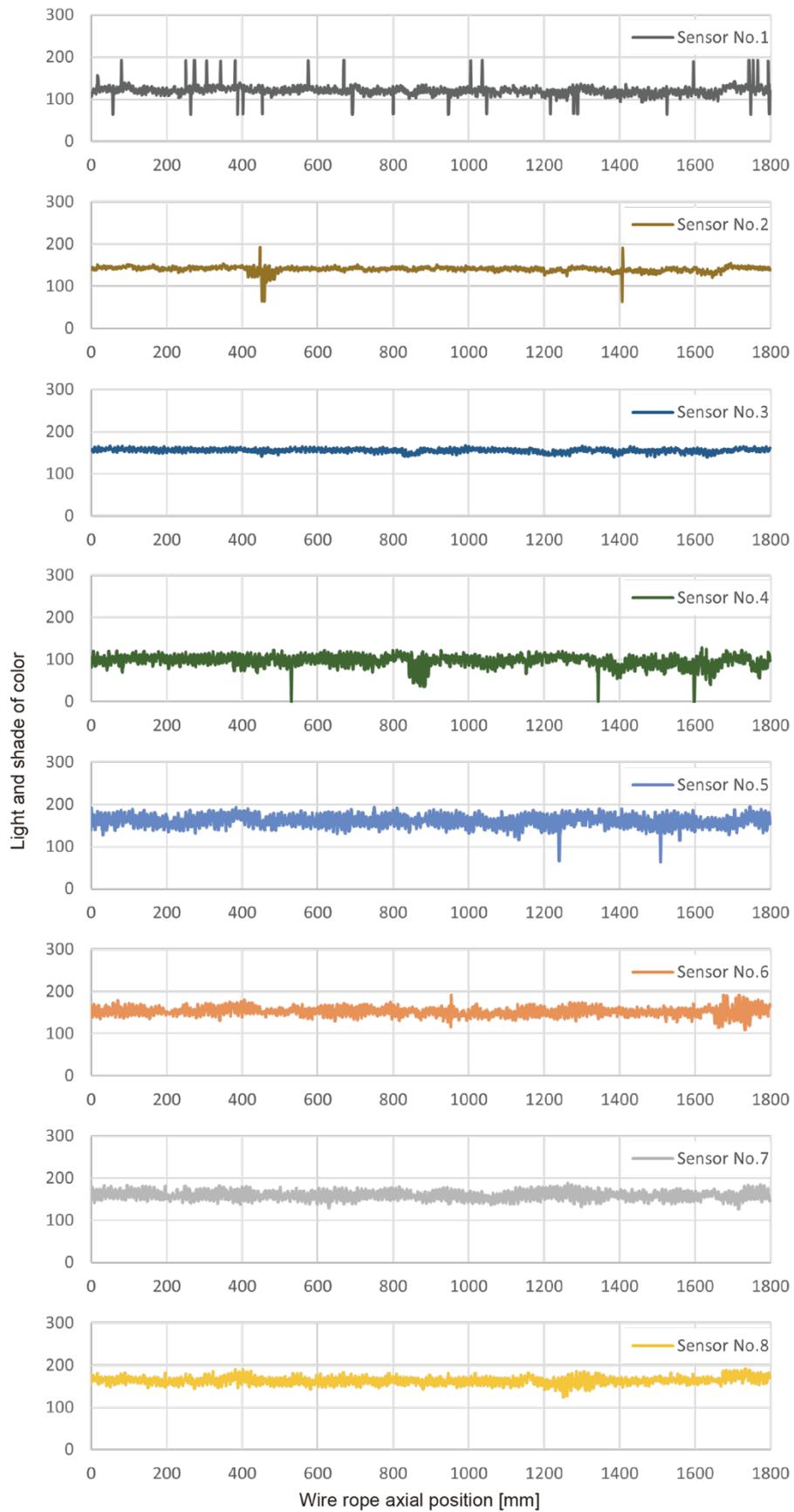


Fig.4-11 Measurement result of color light and shade (type: wear)

4. 3 異種センサの複合センサデータによる劣化損傷の要因判別

4. 3. 1 連続ウェーブレット変換による劣化損傷の特徴量抽出要領

ウェーブレット (Wavelet) は, 三角関数や対数関数のような特定の決まった関数ではなく, 局在する波を表すさまざまな関数の総称 (局所的な参照波とここでは呼ぶことにする) である. 語源は「波」“wave”と「小さな」“lets”の複合語であり, 時間と周波数の小さなさざ波のことである. 原点はガボールの短時間フーリエ変換と呼ぶ時間周波数解析方法であり, 不確定性原理の制約条件下において理論上最良であるガウス関数を窓関数として用いて観測パターンとして畳み込み, フーリエ変換する方法であった. これは後にガボール変換と呼ばれるようになり, 今日でも位相情報を保存するウェーブレット変換としてよく用いられている. 定常的な観測パターン, すなわち, 性質が時刻によって変わらない場合は時刻に応じて観測パターンの見方を変える必要がある. ガボール変換では着目している時刻を中心に窓を設定し, 窓関数で重み付けられた観測パターンに対してフーリエ変換するものである. この着目時刻をシフトしながらこの操作を繰り返す, 各時刻の局所フーリエ変換を得る.

観測された信号やパターン $h(t)$ に対して, ウェーブレットを用いてその信号 $h(t)$ の局所的様子を調べるためには, 局所的な基本参照波 $\psi(t)$ (これをマザーウェーブレットという) およびそれを拡大縮小し, 平行移動した参照波をいくつか用意して, これらとパターンとの関係を調べる. 次式に基本参照波 $\psi(t)$ を示す.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4-1)$$

この $\psi_{a,b}(t)$ をマザーウェーブレットから生まれたウェーブレットという意味からドウターウェーブレットと呼ぶこともある. ウェーブレット変換は次式で表す.

$$W_{\psi}(t)(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (4-2)$$

マザーウェーブレットを拡大縮小し, 平行移動したさまざまな参照波のことを単にウェーブレットと呼ぶ. これら平行移動パラメータ b と拡大縮小パラメータ a を適切に決定し, $\psi((x-b)/a)$ と置換することでパターンの局所的な性質を調べる.

$$\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} \cdot f(x) \quad (4-3)$$

マザーウェーブレット $\psi(x)$ による、関数 $h(x)$ の連続ウェーブレット変換（CWT）または、積分ウェーブレット変換は次式で与えられる。

$$(W_{\psi}h)(b, a) =_{def} \sqrt{\frac{1}{|a|}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} \cdot h(x) dx \quad (4-4)$$

$\psi((x-b)/a)$ が信号 $h(x)$ の部分に似ているときは積分の値は大きくなる。逆に、似ていないときは正と負の両方の領域に値が存在し、積分の値はほぼ0となる。

ウェーブレット $\psi((x-b)/a)$ は、マザーウェーブレット $\psi(x)$ を b トランスレーション（平行移動、シフト）し、 a スケール（拡大縮小）したものである。スケールパラメータ a に対応して $\psi(x)$ の幅が a 倍になることから、 $1/a$ が周波数に対応していることがわかる。すなわち、 a が大きいと基底関数は拡がり、小さいと狭まる。つまり、大きい a が低周波に、小さい a が高周波に対応する。マザーウェーブレット ψ およびスケールパラメータ a 、トランスレーションパラメータ b を適切に選ぶことにより、信号 $h(x)$ の局所的様子を調べることができる。逆に、ウェーブレット変換から元の信号 $h(x)$ を復元することもできる。つまり、逆ウェーブレット変換が存在し、それは次のように定義される。

$$h(x) =_{def} \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (W_{\psi}h)(b, a) \cdot \sqrt{\frac{1}{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \frac{1}{a^2} da db \quad (4-5)$$

ここで、右辺が定義できるためには、次のアドミッシブル条件が満たされなければならない。

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (4-6)$$

なお、 $\hat{\psi}$ は ψ のフーリエ変換である。しかし、実際においては以下の条件式が代用されることがある。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0 \quad (4-7)$$

この式は $\psi(x)$ が振動的であることを意味する。

ウェーブレット変換の定義式では、積分範囲は $-\infty$ から ∞ となっているが、マザーウェーブレットは範囲が限られているので、マザーウェーブレットの幅の範囲分だけ積分すればよい。ただし、マザーウェーブレットの幅はスケールパラメータ a によって変化する。

4. 3. 2 素線切れ, 腐食錆, 摩耗の特徴量抽出の結果

本研究の損傷検出試験によって得られた図 4-6~11 の計測信号に CWT の信号処理をかけた結果を図 4-12~に示す. また, ウェーブレット変換のパラメータは表 4-2 に示す. ワイヤロープ軸方向においてそれぞれの損傷の検出が可能であるか検討を行うため, 磁気センサと光学式センサはセンサアレイごとにセンサ 8 つを統合して処理を行った.

図 4-12 の磁気センサアレイスカログラムに注目すると, 谷切れと山切れの共に素線切れ位置を正確に検出できることがわかる. しかし, この結果だけではロープ断面内部と外部の違いまでは判断が難しい. 次に図 4-13 に示す光学式センサアレイスカログラムに注目する. 2000[mm]以降の山切れの素線切れを表す領域で広範囲にワイヤロープ表面の変化があることが見て取れる. また, 光学センサの 800mm 付近で $200\sim 300\times 10^{-3}[1/\text{mm}]$ の信号が検出できている. これは, 山切れの素線切れの時に現れている $500\times 10^{-3}[1/\text{mm}]$ の信号と比べると, 長い周期で検知されている. 山切れの素線切れの場合は素線 1 本を検知していたことに対し, 谷切れの素線切れに対してストランドが膨らんでいたため, ストランド径 3[mm]の周期で検出していたことがわかる. これより, 素線切れにおいて異種のセンサの値から特徴量抽出し, その相関を見ることで谷切れと山切れの素線切れを判別できる可能性がある.

図 4-15 の光学センサアレイスカログラムに注目する. 今回は赤錆を生じさせたため, 光学式センサが正確に位置を検出できているのがわかる. また, 図 4-14 より磁気センサもわずかに反応していることがスカログラムからも見て取れる. 磁気センサでも腐食があることは判別できるため, 腐食の深度によっては腐食の深度の度合まで推定できる可能性がある.

図 4-16 の磁気センサアレイスカログラムに注目すると摩耗の位置が正確に検出できることがわかる. 磁気センサの素線切れの特徴量抽出にはマザーウェーブレットに Paul を使用したが, 摩耗は損傷が広がっているため Paul のような鋭利なピークではなく Mexican Hat を用いて特徴量抽出を行った. 低い周波数で摩耗全体の周期を検出しているだけでなく, 素線切れの検出でも見られた高い周波数においても検出していることがわかる. ここで, 光学式センサアレイスカログラムを注目すると, 磁気センサが検出した付近に値が変動していることが見てとれることから, ワイヤロープの表面の変化を検出していることがわかる. 素線切れと摩耗の違いとして摩耗はワイヤロープ軸方向および円周方向に広範囲な損傷であるため, 磁気センサおよび光学式センサの特徴量抽出結果がワイヤロープ軸方向における検出距離が大きいものが摩耗と判別することができる.

Table 4-2 Wavelet parameters.

Damage type	Breakage		Corrosion		Wear	
Sensor type	Magnetic	Optical	Magnetic	Optical	Magnetic	Optical
Mother wavelet	Paul	Mexican hat				
Parameter	10	-	-	-	-	-

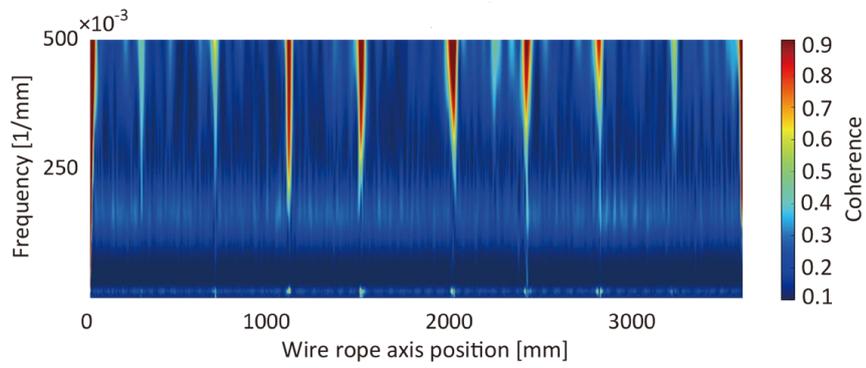


Fig.4-12 Wavelet scalogram of breakage (sensor : magnetic).

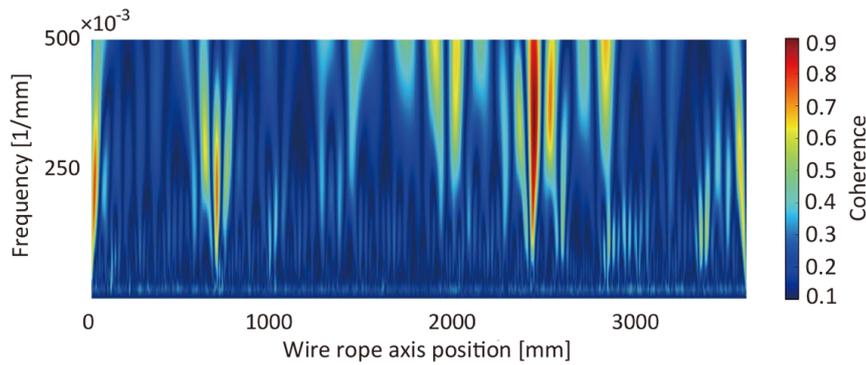


Fig.4-13 Wavelet scalogram of breakage (sensor : optical).

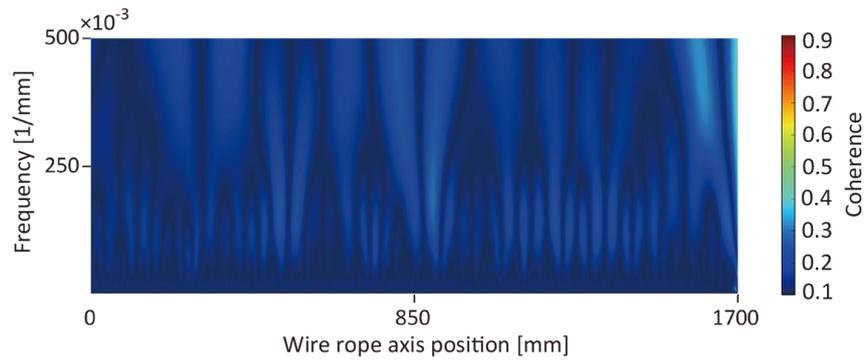


Fig.4-14 Wavelet scalogram of corrosion (sensor : magnetic).

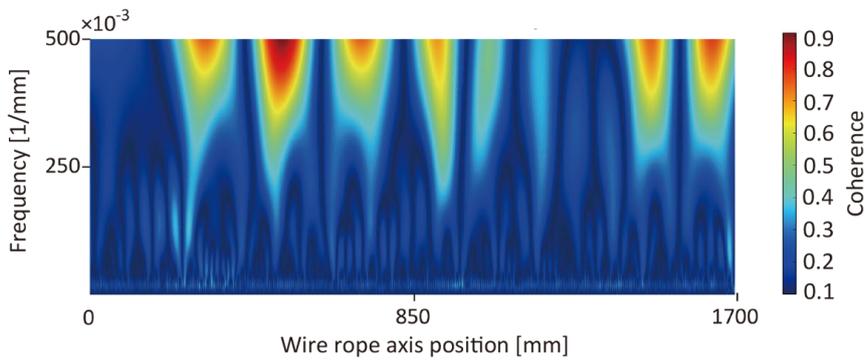


Fig.4-15 Wavelet scalogram of corrosion (sensor : optical).

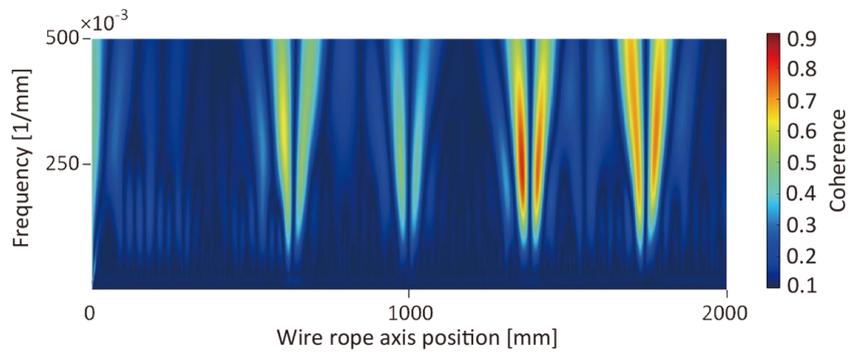


Fig.4-16 Wavelet scalogram of wear (sensor : magnetic).

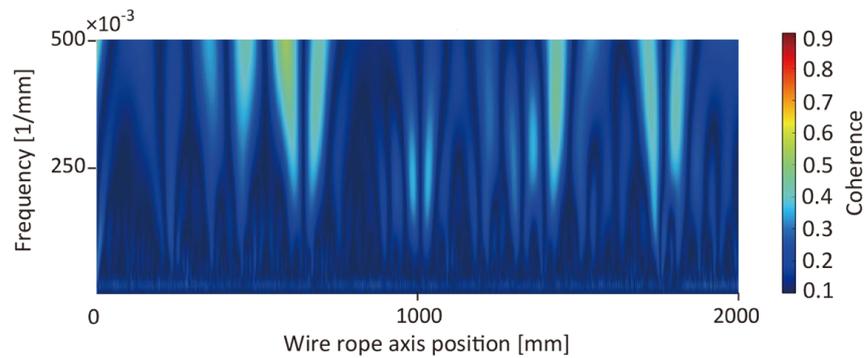


Fig.4-17 Wavelet scalogram of wear (sensor : optical).

4. 4 結 言

異種センサを搭載したワイヤロープテストを製作し，異種センサの複合センサデータとCWTを用いた特徴量抽出手法を活用する手法を提案した．その結果以下に示す主要な結論を得た．

- (1) 異種センサの複合センサデータを用いることで，劣化損傷の山切れおよび谷切れの素線切れ，腐食，摩耗の検出が可能である結果を得た．
- (2) センサアレイのセンサデータを統合し，CWTによる劣化損傷の特徴量抽出を用いることで劣化損傷の検出能力を向上させ，本研究で用いた磁気センサおよび光学式センサの値から劣化損傷の種類を判別に有用であることを示した．

これより，劣化損傷の程度，位置，種類の認知判断に対する可能性を示唆した．さらに，信号パターンの特徴抽出処理等を行うことで，具体的な損傷位置や複合損傷の分類，ならびに損傷進展度の予測にも応用できる可能性がある．

第5章 結 論

5. 1 本論文の成果

本研究では、第1章で述べたように漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査の信頼性やワイヤロープの機械・構造要素としての安全性の向上に寄与することを目的として、検査の際に発生するノイズについて数値解析と試験の両面から調べたものとロープテストに用いる多数の検出器から得られる測定値から劣化損傷の定量的な評価手法について試験により比較・検討を行った。

I) 第2章では、ワイヤロープの構造に注目し、山切れおよび谷切れの素線切れに対してストランドに起因したノイズの影響について有限要素法を用いた数値解析により三次元のベクトルで評価を行った。これより、検出器が一方向のみに測定可能であることを利用して、検出器の配置角度の適正化をすることがストランドに起因するノイズの低減に有用であるか検討を行った。また、漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査に発生するノイズの評価として、特にストランドとそのよりに起因するノイズについて有限要素法を用いた数値解析および損傷検出試験を行い、比較と検討をした。その結果以下に示す主要な結論を得た。

- (1) ストランドに起因する磁束密度の発生方向はストランドのより角度に対して垂直である。
- (2) 検出器の感磁方向をストランドのより角度にすることでノイズ低減が可能で、従来手法で用いられている軸方向と半径方向に比べて高いSN比が得られた。
- (3) 数値解析モデルがワイヤロープ周囲に発生する磁束密度およびストランドに起因するストランドノイズの評価に有用であることを示唆した。

II) 第3章では、劣化損傷の中でも損傷の大きさが小さく検出や評価が難しい山切れおよび谷切れの素線切れを対象とし、ロープ円周方向に多数配置した隣接する磁気センサ間の情報に着目することでロープ円周方向における素線切れの位置検出手法について検討を行った。また、多数のセンサの出力値の和に着目したロープ長手方向における素線切れの定量的な評価手法と組み合わせることでワイヤロープ健全性評価として有用であるか検討を行った。その中で漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープの損傷検出手法として、二次元平面におけるマルチセンサデータを用いた特徴量抽出による損傷検出手法を提案した。その結果以下に示す主要な結論を得た。

- (1) 従来の単一のセンサの閾値を用いた特徴量抽出手法と比較して、提案手法はロープ軸方向の位置検出に有用であることを検証した。

- (2) ロープ円周方向においても ± 10 deg の範囲で素線切れの位置検出を可能とする結果を得た。
- (3) 隣接する磁気センサの出力値を用いてセンサの位置に合わせて演算し、円形レーダーチャートに図示することで素線切れの形態についても検出できる可能性を示唆した。

III) 第4章では、複数種のセンサより得られた時系列データに注目し、異種センサによる複合センサを用いたワイヤロープテストによる損傷検出試験において検出された値から CWT を行うことで特徴量を抽出し、異種センサの複合センサデータを用いることによるワイヤロープの異常検知技術と健全性評価手法としての可能性の検討を行った。異種センサを搭載したワイヤロープテストを製作し、異種センサの複合センサデータと CWT を用いた特徴量抽出手法を活用する手法を提案した。その結果以下に示す主要な結論を得た。

- (1) 異種センサの複合センサデータを用いることで、劣化損傷の山切れおよび谷切れの素線切れ、腐食、摩耗の検出が可能である結果を得た。
- (2) センサアレイのセンサデータを統合し、CWTによる劣化損傷の特徴量抽出を用いることで劣化損傷の検出能力を向上させ、本研究で用いた磁気センサおよび光学式センサの値から劣化損傷の種類の判別に有用であることを示した。

5. 2 今後の課題

今後の研究課題として、以下の事が挙げられる。

(1) 本研究で、辺要素を用いた磁気ベクトルポテンシャル法による有限要素法を用いたワイヤロープの三次元静磁場解析を JIS G 3525 で定められた公称径 9mm の 6×24 のワイヤロープを対象として検討を行い、ストランドノイズの評価を行ったが、ストランドの数が 6 のみでの検討であったため、異なるストランド数のワイヤロープについても検討が必要である。また、昇降機に用いられるワイヤロープ検査のロープテスタでは振動による劣化損傷の判別が原因として挙げられているため、劣化損傷に対するノイズ評価を行う上でストランドに起因するノイズと合わせて検討を行う必要がある。

(2) ワイヤロープの診断基準の明確化を目的として、形態が数多く存在する素線切れを分類し、有限要素法を用いた数値解析および損傷検出試験による評価手法の確立を行う必要がある。これらの数値解析の結果から各素線切れの検出波形を分析し、本数、形態等とどのような関係があるのか解明すること。

謝 辞

本論文を書き終えるにあたり、本研究の題目の選択、研究の進め方、研究を行う上での姿勢など全般にわたり、終始適切なる御指導、御助言を賜りました日本大学教授 青木義男先生に深く感謝の意を表する次第であります。

また、本論文をまとめるにあたり数々の御指導を賜りました日本大学教授 今井郷充先生、篠田之孝先生、高橋聖先生に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- Ahn, H.J. and Kim, K.R., 2D hall sensor array for measuring the position of a magnet matrix, *International journal of precision engineering and manufacturing-green technology*, Vol.1, No.2, pp.125-129.
- Biagio, C., Carlo, M. and Walter, L., Hysteretic beam model for steel wire ropes hysteresis identification, *Structural Nonlinear Dynamics and Diagnosis*, Vol.168(2015), pp.261-282.
- Cao, Q., Liu, D., He, Y., Zhou, J. and John, C., Nondestructive and quantitative evaluation of wire rope based on radial basis function neural network using eddy current inspection, *NDT & E International*, Vol.46(2012), pp.7-13.
- Casey, N.F., White, H. and Taylor, J.L., Frequency analysis of the signals generated by the failure of constituent wires of wire rope, *NDT International*, Vol.18, No.6(1985), pp.339-344.
- Chen, Z. and Liu, Y., Broken steel wire rope inspection based on RBF neural network, *Advanced Materials Research*, vol.614-615(2013), pp.1734–1737.
- Christian, S., Carsten, L., Taimur, A., Patrick, R. and Oliver, P., Monolithic isotropic 3D silicon hall sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.247, No.15(2016), pp.587-597.
- Crammer, K. and Singer, Y., On the algorithmic implementation of multiclass kernel-based vector machines, *Journal of Machine Learning Research*, Vol.2(2001), pp.265-292.
- Daniel, P.R., Michael, E.R., Daniel, K.G., Hou, L., Nancy, K.L., Rajesh, R.N., Joshua, A.H., Ian, P. and Jason, C.H., Adhesive RFID sensor patch for monitoring of sweat electrolytes, *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*, Vol.62, No.6(2014), pp.1457-1465.
- David, A.G.T, Sushant, M.D. and Fathi, H.G., Mansour, K., An improved dipole model of 3-D magnetic flux leakage, *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.52, No.12(2016), 6201707.
- Devkita, J., Luong, T., Liu, J.S., Shen, H., Qin, F.X., Sun, J.F., Mukherjee, P., Srikanth, H. and Phan, M.H., A soft ferromagnetic multiwire-based inductance coil sensor for sensing applications, *Journal of Applied Physics*, Vol.116, No.23(2014), 254504.
- Fagaly, R.L., Superconducting quantum interference device instruments and applications, *Review of Scientific Instruments*, Vol.77, No.10(2006), 101101.
- Gao, G., Qin, Y., Lian, M. and Liu, Y., Detecting typical defects in wire ropes through wavelet analysis, *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol.57, No.2(2015), pp.98-105.
- Gu, W. and Chu, J., A transducer made up of fluxgate sensors for testing wire rope defects, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.51, No.1(2002), pp.120-124.
- Hiruma, S. and Igarashi, H., Fast 3-D analysis of eddy current in litz wire using integral equation, *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.53, No.6(2017), 7000704.
- Jan, D., Abhay, A.S., Martin, O., Watanabe, K., Taniguchi, T., Daniel, N. and Christoph, S., Ultra-sensitive hall sensors based on graphene encapsulated in hexagonal boron nitride, *Applied*

- Physics Letters, Vol.106, No.19(2015), 193501.
- Javier, G.M., Jaime, G.G. and Ernesto, V.S., Non-destructive techniques based on eddy current testing, Sensors, Vol.11, No.3(2011), pp.2525-2565.
- Jomdecha, C. and Prateepasen, A., Design of modified electromagnetic main-flux for steel wire rope inspection, NDT & E International, Vol.42, No.1(2009), pp.77-83.
- Judge, R., Yang, Z., Jones, S.W. and Beattie, G., Full 3D finite element modelling of spiral strand cables, Construction and Building Materials, Vol.35(2012), pp.452-459.
- 加藤哲夫, 富岡達也, 炭素鋼の磁性におよぼす炭素量の影響, 電気製鋼, Vol.36, No.3(1965), pp.107-115.
- Kalwa, E. and Piekarski, K., Design of hall-effect sensors for magnetic testing of steel ropes, NDT International, Vol.20, No.5(1987), pp.295-301.
- Kaur, A., Gupta, A., Aggarwal, H., Arora, K., Garg, N., Sharma, M., Sharma, S., Aggarwal, N., Sapra, G. and Groswamy, J.K., Non-destructive evaluation and development of a new wire rope tester using parallelly magnetized NdFeB magnet segments, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol.37(2018), 61.
- Kaur, A., Gupta, A., Aggarwal, H., Sharma, M., Sharma, S., Aggarwal, N., Sapra, G. and Goswamy, J., Selection of a hall sensor for usage in a wire rope tester, Computational Signal Processing and Analysis(2018), pp. 361–371.
- Kim, J. W. and Seunghee, P., Magnetic flux leakage sensing and artificial neural network pattern recognition-based automated damage detection and quantification for wire rope non-destructive evaluation, Sensors, Vol.18, No.1(2018), Paper No.109.
- Kwaśniewski, J., Roskosz, M., Witoś, M. and Molski, S., Applications of magnetometric sensors based on amorphous materials in diagnostic of wire ropes, Archives of Mining Sciences, Vol.63, No.1(2018), pp.221-227.
- Lei, H.M. and Tian, G.Y., Broken wire detection in coated steel belts using the magnetic flux leakage method, Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol.55, No.3(2013), pp.126-131.
- Li, Y., Tian, Y. G. and Ward, S., Numerical simulation on magnetic flux leakage evaluation at high speed, NDT & E International, Vol.39, No.5(2006), pp.367-373.
- Liu, S., Sun, Y., Ma, W., Xie, F., Jiang, X., He, L. and Kang, Y., A new signal processing method based on notch filtering and wavelet denoising in wire rope inspection, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol.38(2019), 39.
- Ma, X., Su, S., Wang, W., Yang, Y., Yi, S. and Zhao, X., Damage location and numerical simulation for steel wire under torsion based on magnetic memory method, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.60, No.2(2019), pp.223-246.

- Mison, N., Shin, N.W., Shafie, S., Marhaban, M.H. and Mailah, N.F., A mobile ferromagnetic shape detection sensor using a hall sensor array and magnetic imaging, *Sensors*, Vol.11, No.11(2011), pp.10474-10489.
- Mison, N., Ying, L.Q., Firdaus, R.N., Abdullah, N., Mailah, N.F. and Wakiwaka, H., Effect of inductive coil shape on sensing performance of linear displacement sensor using thin inductive coil and pattern guide, *Sensors*, Vol.11, No.11(2011), pp.10522-10533.
- 村山直樹, 大塚賢哉, 青木義男, 漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査におけるノイズ低減のための磁気センサ最適配置の検討, *Dynamics and Design Conference(2020a)*, Paper No.438.
- 村山直樹, 大塚賢哉, 青木義男, 漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査におけるノイズ低減可能な検査手法の検討, *昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩技術講演会講演論文集(2020b)*, Paper No.6112.
- 大塚賢哉, 青木義男, 遊戯施設ワイヤロープ健全性評価への SVM と複合センサデータの応用, *昇降機・遊戯施設等の最近の技術と進歩技術講演会講演論文集(2020)*, Paper No.105.
- 大塚賢哉, 青木義男, 複合センシングを用いた機械学習に基づくワイヤロープの健全性評価, *日本機械学会年次大会(2019)*, Paper No.J40133.
- 大塚賢哉, 青木義男, 二次元平面におけるマルチセンサデータを用いた特徴量抽出によるワイヤロープの損傷検出, *日本機械学会論文集*, Vol.87, No.902(2021), pp.21-00153.
- 大塚賢哉, 村山直樹, 青木義男, 漏洩磁束探傷法を用いたワイヤロープ検査におけるストランドノイズの評価, *日本機械学会論文集*, Vol.87, No.902(2021), pp.21-00204.
- Pan, S., Zhang, D. and Zhang, E., Nondestructive testing for shallow defect of ferromagnetic objects based on magnetic probe structure, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.54, No.11(2018), 4002406.
- Pan, S., Zhang, D. and Zhang, E., Analysis of the eccentric problem of wire rope magnetic flux leakage testing, *Institute of Electrical and Electronics Engineers 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference(2019)*, Paper No.18737996.
- Park, S., Kim, J.W., Lee, C., Lee, J. and Gil, H.B., Local fault detection technique for steel cable using multi-channel magnetic flux leakage sensor, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, vol.25, No.4 (2012), pp.287-292.
- Sharatchandra Singh, W., Rao, B., Mukhopadhyay, C. and Jayakumar, T., GMR-based magnetic flux leakage technique for condition monitoring of steel track rope, *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, vol.53, No.7(2011), pp.377-381.
- Singh, R.P., Mallick, M. and Verma, M.K., Studies on failure behaviour of wire rope used in underground coal mines, *Engineering Failure Analysis*, Vol.70(2016), pp.290-304.
- Sukhorukov, V.V., Slesarev, D.A. and Vorontsov, A.N., Electromagnetic inspection and diagnostics of

- steel ropes, *Materials Evaluation*, Vol.72, No.8(2014), pp.1019-1027.
- Sun, Y., Kang, Y. and Chen, Q., A permanent magnetic perturbation testing sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.155, No.2(2009), pp.226-232.
- Sun, Y., Kang, Y. and Chen, Q., A new NDT method based on permanent magnetic field perturbation, *NDT & E International*, Vol.44, No.1(2011), pp.1-7.
- Sun, Y. and Kang, Y., An opening electromagnetic transducer, *Journal of Applied Physics*, Vol.114, No.21(2013), 214904.
- Sun, Y., Liu, S., Deng, Z., Tang, R., Ma, W., Tian, X., Kang, Y. and He, L., Magnetic flux leakage structural health monitoring of concrete rebar using an open electromagnetic excitation technique, *Structural Health Monitoring*, Vol.17(2017), pp.121-134.
- Tan, X. and Zhang, J., Evaluation of composite wire ropes using unsaturated magnetic excitation and reconstruction image with super-resolution, *Applied Sciences*, Vol.8, No.5(2018), 767.
- Tumanski, S., A multi-coil sensor for tangential magnetic field investigations, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol.242-245, No.2(2002), pp.1153-1156.
- 脇若弘之, 矢島久志, 片岡康浩, 平間豊, エレベータ・ワイヤロープ用磁気探傷装置とその信号処理, 非破壊検査, vol.48, No.12(1999), pp.809-814.
- Wang, H.Y., Zhao, X.U., Gang, H., Jie, T., Zhou, B.B., Lu, Y.H. and Chen, F.J., Key technique of a detection sensor for coal mine wire ropes, *Mining Science and Technology*, Vol.19, No.2(2009), pp.170-175.
- Wu, J., Sun, Y., Feng, B. and Kang, Y., The effect of motion-induced eddy current on circumferential magnetization in MFL testing for a steel pipe, *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.53, No.7(2017), 6201506.
- Wu, X., Yuan, J. and Ben, A., A novel magnetic testing method for the loss of metallic cross-sectional area of bridge cables, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.39, No.1-4(2012), pp.195-201.
- Xu, F., Wang, X. and Wu, H., Inspection method of cable-stayed bridge using magnetic flux leakage detection: principle, sensor design, and signal processing, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.26, No.3(2012), pp.661-669.
- Xu, G., Da, J., Zhang, X., Han, M. and Xia, T., A novel tension monitoring device of multi-rope friction hoister by using acoustic filtering sensor, *Journal of Vibroengineering*, Vol.18, No.8(2016), pp.5537-5552.
- Yan, X., Zhang, D. and Zhao, F., Improve the signal to noise ratio and installation convenience of the inductive coil for wire rope nondestructive testing, *NDT & E International*, Vol.92(2017), pp.221-227.
- 吉元慎治, 小坂大吾, 橋本光男, 大西友治, 石田礼, 漏洩磁束探傷法によるワイヤロープ検

- 査の数値解析による評価, 非破壊検査, vol.59, No.3(2010), pp.131-137.
- Yun, H.B., Kim, S.H., Wu, L. and Lee, J.J., Development of inspection robots for bridge cables, The Scientific World(2013), pp.967508-967517.
- Zhang, D., Zhao, M., Zhou, Z. and Pan, S., Characterization of wire rope defects with gray level co-occurrence matrix of magnetic flux leakage images, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol.38(2013), pp.37-43.
- Zhang, D., Zhang, E. and Yan, X., Quantitative method of detecting internal and surface defects in wire rope, NDT & E International, Vol.119(2021), Paper No.102405.
- Zhang, J., Tan, X. and Zheng, P., Non-destructive detection of wire rope discontinuities from residual magnetic field images using the Hilbert-huang transform and compressed sensing, Sensors, Vol.17, No.3(2017), 608.
- Zhang, J. and Wang, S., Nondestructive testing of wire ropes based on image fusion of leakage flux and visible light, Journal of Failure Analysis and Prevention, Vol.19(2019), pp.551-560.
- Zhang, J., Zheng, P. and Tan, X., Recognition of broken wire rope based on remanence using EEMD and Wavelet methods, Sensors, Vol.18, No.4(2018), 1110.
- Zhang, Y., Jing, L., Xu, W., Zhan, W. and Tan, J., A sensor for broken wire detection of steel wire ropes based on the magnetic concentrating principle, Vol.19, No.17(2019), 3763.
- Zheng, P. and Zhang, J., Quantitative nondestructive testing of wire rope based on pseudo-color image enhancement technology, Nondestructive Testing and Evaluation, vol.34, No.3(2019), pp.221–242.
- Zhou, P., Zhou, G.B., Zhu, Z.C., He, Z.Z., Ding, X., Tang, C.Q., A review of non-destructive damage detection methods for steel wire ropes, Applied Sciences, Vol.9, No.13(2019), 2771.
- Zhou, P., Zhou, G., He, Z., Tang, C., Zhu, Z., Li, W., A novel texture-based damage detection method for wire ropes, Measurement, Vo.148(2019), 106954.
- JIS B 8836 (2019), Cranes-Wire ropes-Care and maintenance, inspection and discard.
- JIS A 4302 (2006), Inspection standard of elevator, escalator and dumbwaiter.
- JIS B 8817 (1991), Wire rope slings for lifting purposes.
- JIS G 3525 (2013), Wire ropes.