

ワイヤロープ検査における健全性の自動判別に向けた素線切れの定量評価

日本大学 理工学部
助手 大塚 賢哉

1. はじめに

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、特に目視の検査では発見が困難なワイヤロープのストランド間に発生する谷切れの検出において有用である（脇若他、1999）（大塚他、2021）。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。しかし、検出した素線切れの種類や本数を正確に評価することが難しく、有無の判断に留まっている。素線切れの種類や本数の評価として、数値解析等で素線切れの大きさについて評価を行っている（吉元他、2010）が、ワイヤロープを磁化させた際のロープ周囲に発生する漏洩磁束について方向や大きさの評価が検討されていない。筆者らは先行研究としてワイヤロープの構造に着目し、検出器の配置角度の適正化を行うことで谷切れおよび山切れの素線切れの検出に有用であることを示している（大塚他、2021）。本研究ではワイヤロープの素線切れの評価手法の確立を目的として、素線切れの種類、本数に対してロープ表面と検出平面の距離を変化させてときのピークピーク値（Peak-to-peak）について有限要素法を用いた数値解析より検討を行う。

2. 有限要素法を用いた静磁場の数値解析

本研究で対象としたワイヤロープはJIS G 3525で定められた公称径8[mm]の8×S(19)である。本研究の数値解析において、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の軸（長手）方向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、円周方向をそれぞれ正方向として図1のように定義する。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。ワイヤロープと磁化器に用いたヨークの磁気特性は炭素鋼の場合は含有される炭素量に影響することがわかる（加藤、富岡、1965）。これより算出した磁気特性を図2に示す。磁石はネオジム磁石のN-40を用いたことから残留磁束密度は1.25~1.32[T]とされている。そのため、本報では下限値の1.25[T]とした。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こと（吉元他、2010）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、対象としたワイヤロープを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が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、対象として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、対象としているワイヤロープの素線径から、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ている。

ワイヤロープの損傷として素線破断があるが、これには使用状況によって2種類の破断が存在する。図3(a)～(c)に示すようなストランド同士の摩擦によって2つのストランド間に発生する谷切れ、図3(d)～(f)に示すようなワイヤロープと滑車の摩擦によってストランド頂部のロープ表面に発生する山切れである。本報では微小な損傷として図5に示すように数値解析および損傷検出試験において素線1本の破断で破断による隙間の距離をロープ軸方向に1[mm]とした。

本研究において数値解析に用いたロープテストを図5に示す。ロープテストの磁化器はヨークと磁石から構成されている。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ム磁石N-40を用いている。

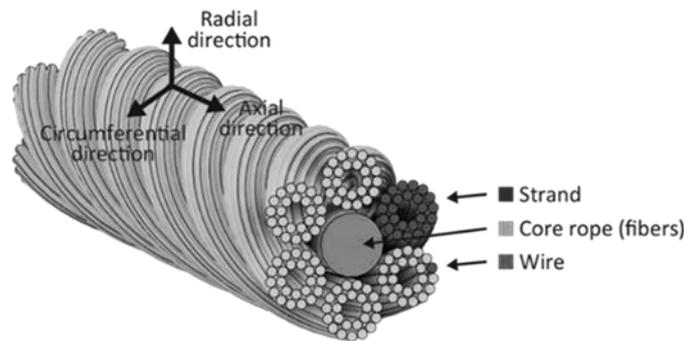


図 1. ワイヤロープの構造および磁束密度のベクトルの定義

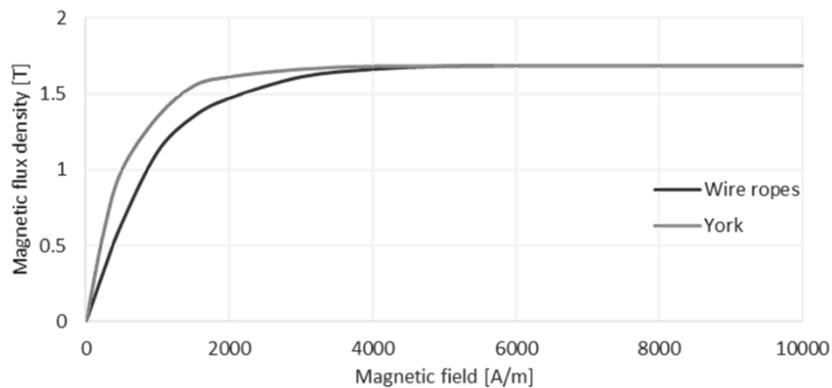


図 2. ワイヤロープおよび磁化器の磁気特性

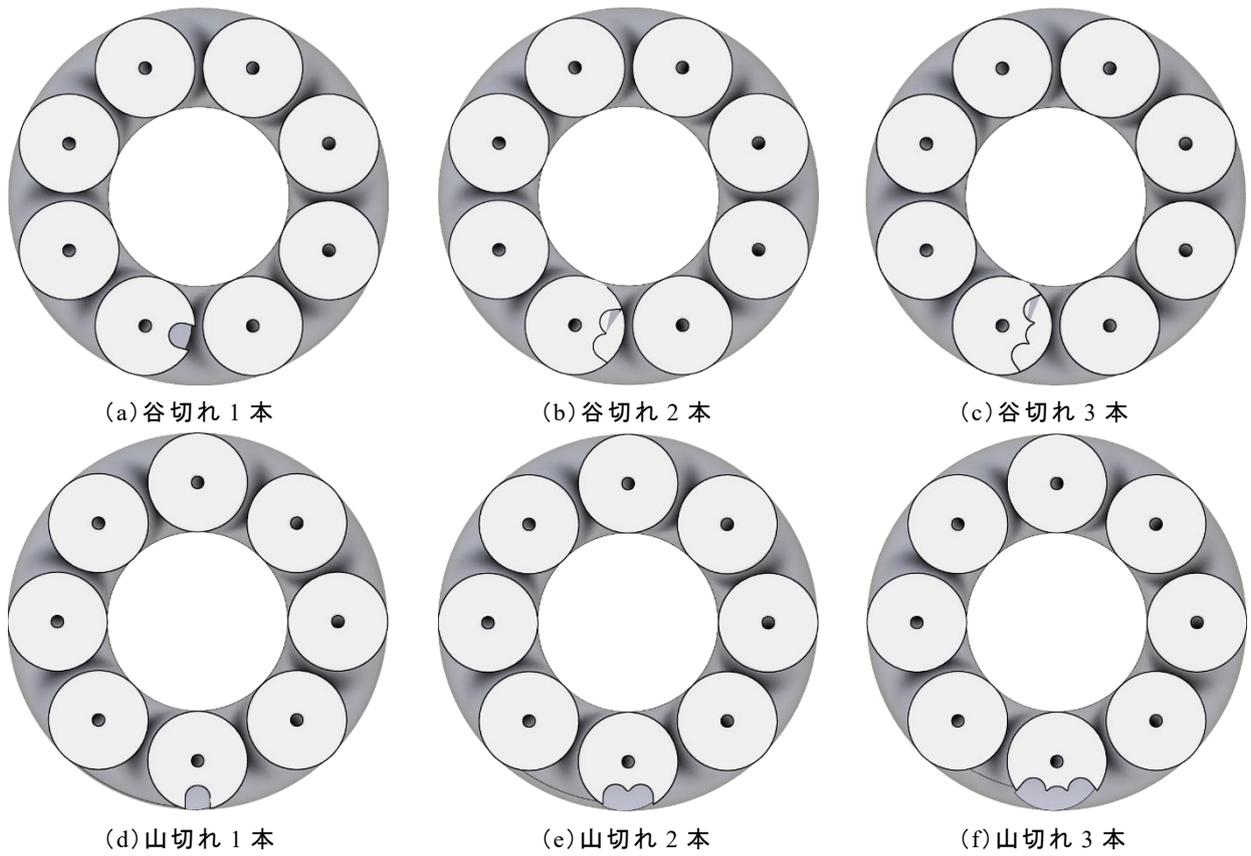


図 3. 素線切れのモデル

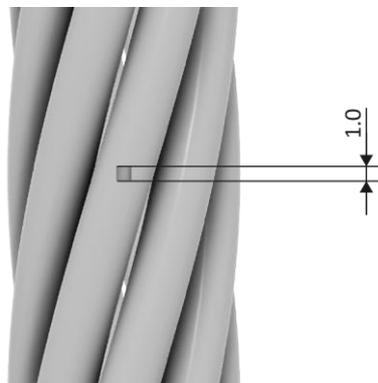


図 4. 素線切れの破断による隙間の距離

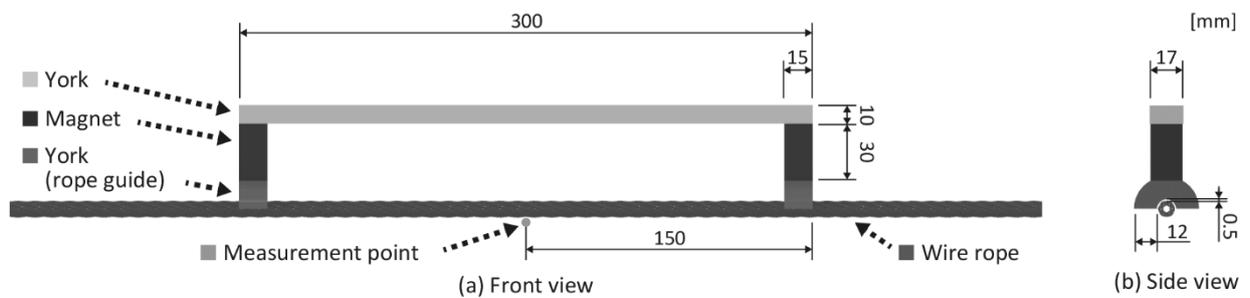
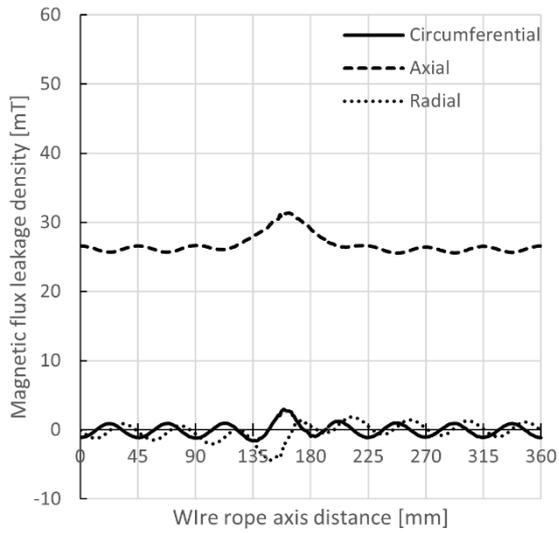


図 5. 磁化器

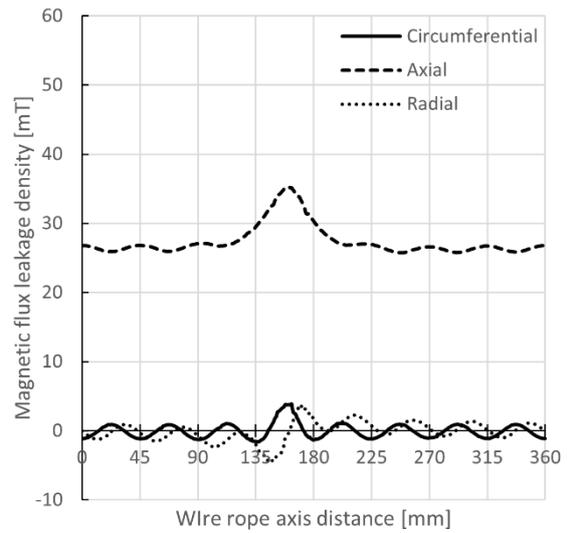
3. 数値解析結果

図 6 に数値解析により得られた結果の一例として、ロープ表面と検出平面の距離 0.7[mm] のときの素線切れの種類および素線の破断本数ごとの磁束密度の結果を示し、図 6 (a) ~ (c) に谷切れの 1~3 本, 図 6 (d) ~ (f) に山切れの 1~3 本の結果を示す。このときのピークピーク値は谷切れでは 1 本のとくに円周方向 4.49[mT]、軸方向 5.86[mT]、半径方向 6.26[mT]、2 本のとくに円周方向 5.43[mT]、軸方向 9.54[mT]、半径方向 8.15[mT]、3 本のとくに円周方向 7.03[mT]、軸方向 14.56[mT]、半径方向 12.17[mT]であった。また、山切れでは 1 本のとくに円周方向 5.79[mT]、軸方向 8.77[mT]、半径方向 9.40[mT]、2 本のとくに円周方向 6.04[mT]、軸方向 17.62[mT]、半径方向 10.91[mT]、3 本のとくに円周方向 8.55[mT]、軸方向 25.99[mT]、半径方向 11.35[mT]であった。これより、谷切れと山切れのどちらの素線切れの種類においても素線切れの本数が増加することにより磁束密度の大きさは大きくなっている。特に軸方向の磁束密度は素線切れ 1 本から 3 本に増加した際に谷切れでは 8.70[mT]、山切れでは 17.22[mT]と他の感磁方向よりも増加率が大きいことから、ロープ表面と検出平面の距離 0.7[mm]では素線切れの定量評価には軸方向の磁束密度の検出が有用である可能性がある。

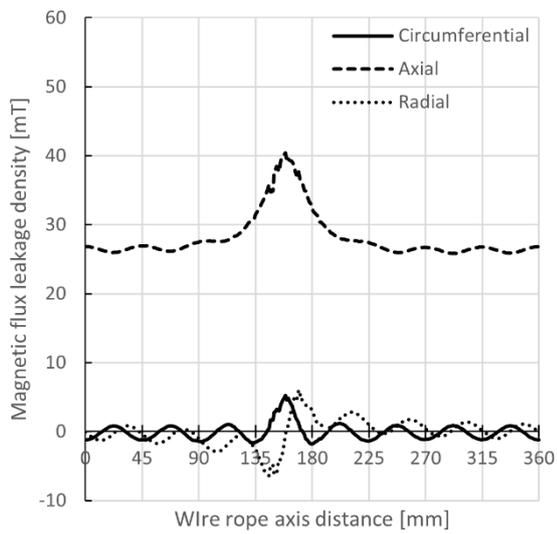
次にロープ表面と検出平面の距離を 0.1~1.0[mm]まで変化させたときの磁束密度のピークピーク値の影響について図 7 に示し、(a) では円周方向の磁束密度、(b) では軸方向の磁束密度、(c) では半径方向の磁束密度の結果を示す。ロープ表面と検出平面の距離と磁束密度のピークピーク値には比例の関係ではないことから、ロープ表面と検出平面の距離が近いほど素線切れの種類および本数の違いについて詳細に判別することができると考えられる。また、本研究においてロープ表面と検出平面の距離が最も近い 0.1[mm]のときにおいて、感磁方向が軸方向では前述のロープ表面と検出平面の距離 0.7[mm]の結果と同様に素線切れの種類によらず素線切れの本数が大きくなると磁束密度のピークピーク値も大きくなっているが、感磁方向が円周方向および半径方向では山切れのときに素線切れの本数が少ないほど磁束密度のピークピーク値が大きくなっている。しかし、ロープ表面と検出平面の距離 0.5[mm]以降では感磁方向が円周方向および半径方向において素線切れの本数が大きいほど磁束密度のピークピーク値も大きくなる関係である。これは図 3 のモデルの断面をみてもわかるように山切れ 1 本と比較して 2 本, 3 本は素線の数だけ空気領域が広がっていることが要因として挙げられる。谷切れではこのような傾向が見られなかった要因として図 3 に示すようなロープ軸方向に垂直な断面において、素線切れによって発生している空気領域の開けている向きがロープ表面に向いていないことが考えられる。これらの結果より、素線切れの種類および本数の判別には検出器の感磁位置をロープ表面から近いほど有用であり、それぞれの感磁方向に分けて検出することで素線切れの定量評価に有用であると考えられる。しかし、谷切れや山切れの種類だけでなく、詳細な破断形態（素線切れの破断面の平行度やロープ表面から半径方向への突出量など）から磁束密度にどのような影響を与えるかの検討が必要である。



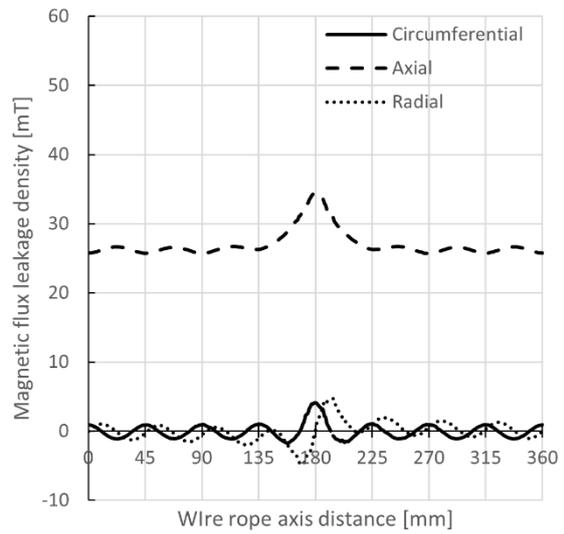
(a) 谷切れ 1 本



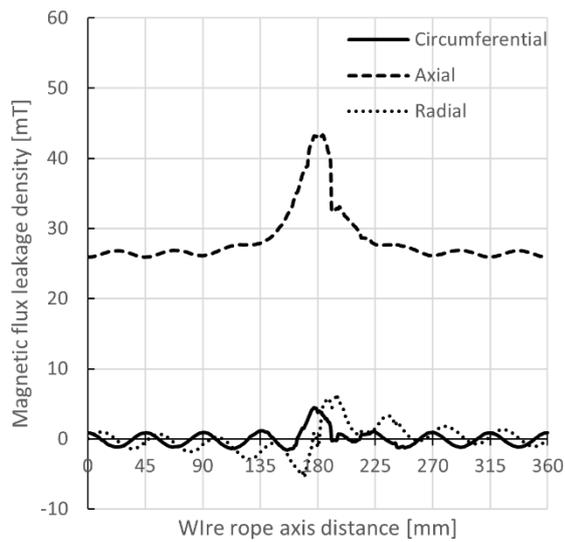
(b) 谷切れ 2 本



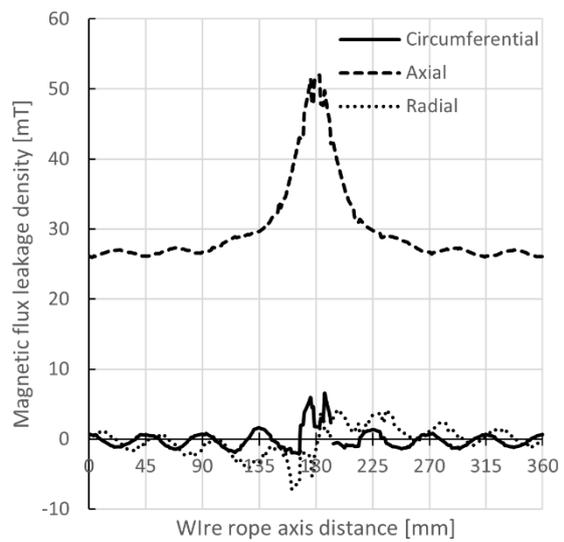
(c) 谷切れ 3 本



(d) 山切れ 1 本

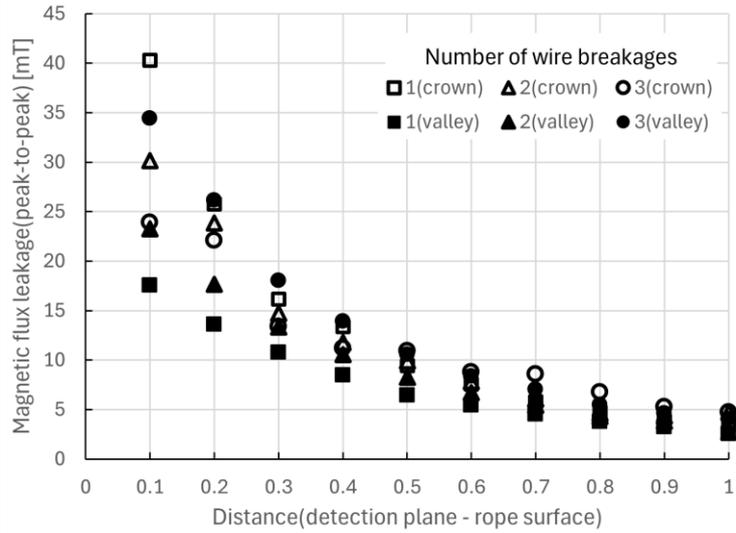


(e) 山切れ 2 本

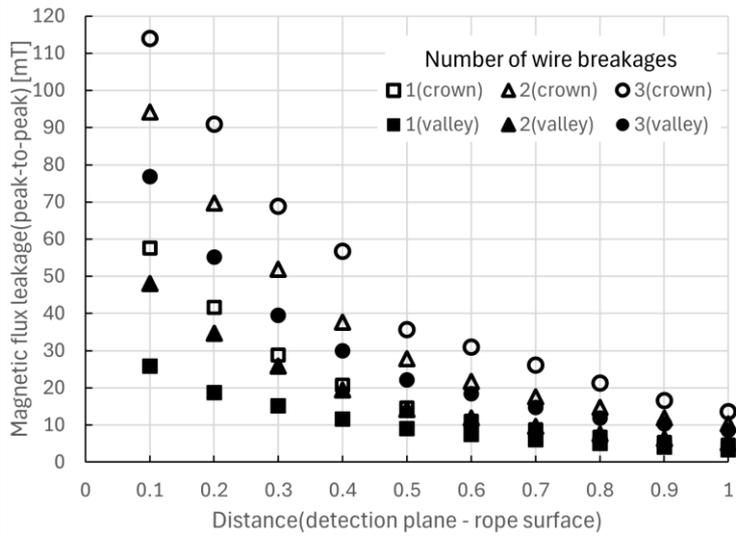


(f) 山切れ 3 本

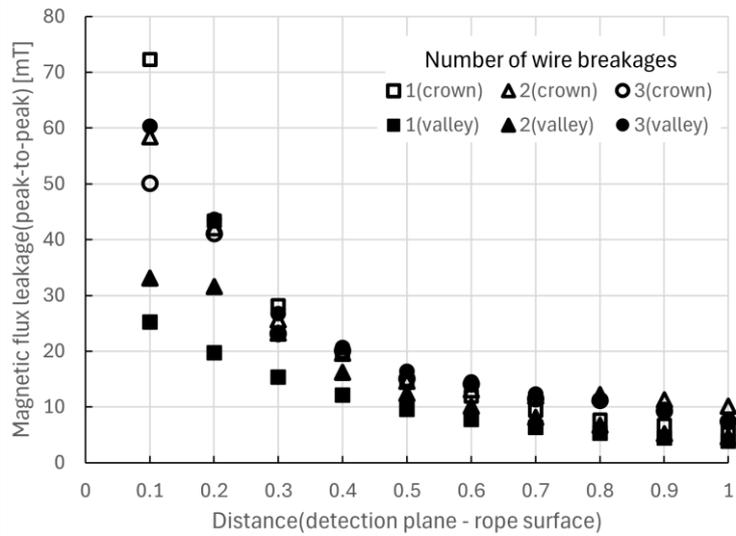
図 6. ロープ表面と検出平面の距離 0.7[mm]のときの磁束密度



(a) 円周方向



(b) 軸方向



(c) 半径方向

図 7. ロープ表面と検出平面の距離とピークピーク値の関係

4. まとめ

ワイヤロープの素線切れの評価手法の確立を目的として、素線切れの種類、本数に対してロープ表面と検出平面の距離を変化させてときのピークピーク値について有限要素法を用いた数値解析より検討を行った。今後は損傷検出試験を実施し、その素線切れの破断形態を数値解析にて再現することで、ワイヤロープの健全性の自動判別に向けて微小な損傷である素線切れの程度の判別および検出精度の向上に期待できる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、本研究助成金から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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(2021b), pp.21-00204.
- 4) Pan, S., Zhang, D. and Zhang, E., Analysis of the eccentric problem of wire rope magnetic lux leakage testing, Institute of Electrical and Electronics Engineers 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference(2019), Paper No.18737996.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) Zhang, D., Zhang, E. and Yan, X., “Quantitative method or detecting internal and surface defects in wire rope”, NDT & E International, Vol.119(2021), Paper No.102405.
- 8) Y. Li, G. Y. Tian : Numerical simulation on magnetic flux leakage evaluation at high speed, NDT & E International, 39(5), pp. 367-373, (2006)
- 9) W. Sharatchandra, P. C. R. Bhagi, C. K. Mukhopadhyay, T. Jayakumar : Finite element model based approach for magnetic flux leakage testing of steel plates using 2D tandem GMR array sensors, Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 56(12), pp. 683-690, (2014)
- 10) C. Musuroi, M. Oproiu, M. Volmer, J. Neamtu : Low field optimization of a non-contacting high-sensitivity GMR-based DC/AC current sensor, Sensors, 21(7), No.2564, (2021)