

コンクリート舗装の点検・診断・措置技術に関する共同研究報告書

～点検・診断技術編（その1）～

2022年3月

(国研) 土木研究所  
(学) 東京農業大学  
(学) 北海道科学大学  
(独) 石川工業高等専門学校  
(一社) セメント協会  
コニカミノルタ (株)

Copyright © (2022) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

# コンクリート舗装の点検・診断・措置技術に関する共同研究報告書

～点検・診断技術編（その1）～

(国研) 土木研究所  
(学) 東京農業大学  
(学) 北海道科学大学  
(独) 石川工業高等専門学校  
(一社) セメント協会  
コニカミノルタ (株)

## 要 旨：

厳しい予算制約の下で、耐久性やライフサイクルコストの観点から、コンクリート舗装の活用が期待されており、平成 28 年に通知された舗装点検要領では、点検、診断、措置、記録から成る一連のメンテナンスサイクルを効率的に回していく重要性が示されている。これまでもコンクリート舗装の点検・診断及び措置に関する技術開発が行われてきたが、実道における広範調査への適用可能性や耐久性、交通開放までの所要時間等の点で課題を抱えている。

本共同研究では、コンクリート舗装の損傷メカニズムに基づく点検・診断技術及び措置技術に関する検討を行った。本報告書は共同研究の公募機関であるコニカミノルタ (株) から提案のあった点検・診断技術について、各種検討を実施したので、その結果について報告するものである。

キーワード：コンクリート舗装，点検，診断，措置，補修，舗装のメンテナンスサイクル



# 目次

第1章	はじめに	1
1.1	背景・目的	1
1.2	共同研究体制	2
第2章	研究内容	3
2.1	対象とする損傷	3
2.2	提案する点検・診断技術の概要	3
2.3	研究の手順	3
第3章	点検・診断技術	4
3.1	点検・診断技術の特徴	4
3.1.1	磁気ストリーム法の原理	4
3.1.2	漏洩磁束法の原理	5
3.2	点検・診断方法	5
3.2.1	検査装置	5
3.2.2	検査方法	7
3.3	評価方法	9
3.3.1	結果の読み方	9
3.3.2	磁気ストリーム法の評価方法	10
3.3.3	漏洩磁束法の評価方法	12
第4章	縮小供試体を使用した室内試験	14
4.1	鋼材のみ使用した供試体に対する適用性検証	14
4.1.1	磁気ストリーム法と漏洩磁束法の比較試験	14
4.1.2	磁気ストリーム法の磁石設置位置の検討試験	25
4.2	コンクリート舗装版の縮小供試体に対する適用性検証	27
4.2.1	試験方法	27
4.2.2	試験結果	29
4.2.3	漏洩磁束法の測定結果の検証	44
4.2.4	コンクリート舗装版の縮小供試体に対する実験結果の考察	45
第5章	舗装走行実験場における検証実験	46
5.1	新設コンクリート走行工区での実験	46
5.1.1	実験方法	46
5.1.2	実験結果	46
5.2	既設コンクリート走行工区での実験	52

5. 2. 1 実験方法	52
5. 2. 2 実験結果	52
5. 3 実験結果の考察と今後の展望	62
第6章 点検・診断技術活用上の留意点	63
第7章 研究のまとめ	67
7. 1 研究の成果	67
7. 1. 1 磁気ストリーム法について	67
7. 1. 2 漏洩磁束法について	67
7. 1. 3 その他	67

# 第1章 はじめに

## 1.1 背景・目的

厳しい予算制約の下で、舗装の長寿命化、ライフサイクルコストの低減が求められており、平成28年に国土交通省から通知された舗装点検要領では、効率的な修繕の実施を行うための点検、診断、措置、記録から成る一連のメンテナンスサイクルを効率的に回していく重要性が示されている。

現在、わが国ではアスファルト舗装が利用される割合が多いが、ライフサイクルコスト低減の観点から、近年、耐久性に優れたコンクリート舗装を適材適所で活用していく重要性が高まっている。コンクリート舗装は、直轄国道において約50年間大規模更新を行うことなく供用した事例<sup>1)</sup>があるなど、適切な維持管理を行うことによって、アスファルト舗装よりもライフサイクルコストを低減することができると考えられる。

適切な維持管理を行うためには、舗装のメンテナンスサイクルを効率的に回していく必要がある。これまでも、コンクリート舗装のマネジメントに関する技術開発が行われてきた。しかしながら、点検・診断分野では、実道における広範調査への適用可能性や構造上の弱部である目地部周辺の健全性評価等に関して課題がある。また、措置分野では、実道における耐久性や交通開放までの所要時間等に関して課題がある。これらの課題を克服することによって、ライフサイクルコスト低減の観点から、コンクリート舗装の活用が促進されるものと期待される。

そこで、本共同研究では、コンクリート舗装の損傷メカニズムに基づく点検・診断技術及び措置技術に関する検討を行った。本報告書は共同研究の公募機関であるコニカミノルタ（株）から提案のあった点検・診断技術について、各種検討を実施したので、その結果について報告するものである。

## 1. 2 共同研究体制

本共同研究は、(国研)土木研究所、(学)東京農業大学、(学)北海道科学大学、(独)石川工業高等専門学校、(一社)セメント協会、コニカミノルタ(株)の体制で実施した。本共同研究の参加者を表-1.2.1に示す。

表-1.2.1 共同研究参加者

機関	氏名	所属・役職	参加期間
(国研)土木研究所	藪 雅行	道路技術研究グループ(舗装) 上席研究員	2020.4~2022.3
	寺田 剛	道路技術研究グループ(舗装) 総括主任研究員	2020.4~2021.3
	前川 亮太	道路技術研究グループ(舗装) 主任研究員	2020.4~2022.3
	永塚 竜也	道路技術研究グループ(舗装) 専門研究員	2020.4~2022.3
	綾部 孝之	道路技術研究グループ(舗装) 研究員	2020.4~2022.3
	横澤 直人	道路技術研究グループ(舗装) 研究員	2021.10~2022.3
	枝廣 直樹	道路技術研究グループ(舗装) 交流研究員	2020.10~2022.3
	丸山 記美雄	寒地保全技術研究グループ(寒地道路保全) 上席研究員	2020.4~2022.3
	伊藤 憲章	寒地保全技術研究グループ(寒地道路保全) 総括主任研究員	2020.4~2022.3
	星 卓見	寒地保全技術研究グループ(寒地道路保全) 主任研究員	2020.4~2022.3
	井谷 雅司	寒地保全技術研究グループ(寒地道路保全) 研究員	2020.4~2022.3
	上野 千草	寒地保全技術研究グループ(寒地道路保全) 研究員	2020.4~2022.3
	佐藤 圭洋	寒地保全技術研究グループ(寒地道路保全) 研究員	2020.4~2022.3
(学)東京農業大学	小梁川 雅	地域環境科学部 生産環境工学科 教授	2020.4~2022.3
(学)北海道科学大学	亀山 修一	工学部 都市環境学科 教授	2020.4~2022.3
(独)石川工業高等専門学校	西澤 辰男	環境都市工学科 教授	2020.4~2022.3
(一社)セメント協会研究所	吉本 徹	コンクリート研究グループ リーダー	2020.4~2022.3
	野田 悦郎	コンクリート研究グループ 特別研究員	2020.4~2022.3
	泉尾 英文	コンクリート研究グループ サブリーダー	2020.4~2022.3
	瀧波 勇人	コンクリート研究グループ 研究員	2020.4~2021.3
コニカミノルタ(株)ビジネスイノベーションセンター ージャパン	丸山 一直	SenrigaN プロジェクト インキュベーションリード	2020.4~2020.10
	新山 将史	SenrigaN プロジェクト ビジネスデベロップメント	2020.4~2022.3
	大原 徳子	SenrigaN プロジェクト インキュベーションリード	2020.4~2022.3
	橋本 好之	SenrigaN プロジェクト アシスタントマネージャー	2020.4~2022.3
	高倉 一徳	SenrigaN プロジェクト	2020.4~2022.3

## 参考文献

1)日本道路協会：コンクリート舗装に関する技術資料，2009.



## 第2章 研究内容

### 2.1 対象とする損傷

コンクリート舗装内部のダウエルバーの破断を対象とする。

### 2.2 提案する点検・診断技術の概要

本研究ではコニカミノルタ株式会社の SenrigaN という検査装置を使用し、「磁気ストリーム法」「漏洩磁束法」の2つの手法を用いて、ダウエルバー破断の検出可能性を検討した。今回は「磁気ストリーム法」をメインの計測手法とし、従来法である「漏洩磁束法」は比較のために用いた。

磁気ストリーム法とは、検査対象物に対し、磁石を一定の距離と角度を保持して置き、磁力を印加した状態と、磁石を除去した状態でそれぞれ磁場を測定し、その差分から検査対象物の持つ磁場の特徴を検出する方法である。漏洩磁束法とは、検査対象物に対して磁力を印加した後、磁石を取り除いた状態で、磁化された検査対象物が発する磁場を検出する方法である。それぞれ破断箇所特有の磁場変化がみられることから検査対象物の破断の有無を確認できる。

### 2.3 研究の手順

本研究では、縮小供試体を対象とした室内実験及び実大舗装を対象とした実験を実施した。室内実験では、コニカミノルタ社でコンクリートを打設せずに鋼材のみで構成された供試体を作成し、磁気ストリーム法及び漏洩磁束法の適用性を検証した。次に、コンクリート舗装への適用性を確認するために、土木研究所でコンクリート舗装版の縮小供試体を用いた実験を実施した。

室内実験の成果をふまえて、(国研)土木研究所舗装走行実験場において検証実験を行った。ダウエルバーが健全な箇所と不健全な箇所を意図的に設けた新設走行工区に提案技術を適用し、実環境における適用可能性を検証した。なお、既設走行工区は、実道と同様、ダウエルバーの破断状況が不明であることから、参考として計測した。

表-2.3.1 各試験の目的と調査対象

目的	試験対象
検査方法の精度検証 精度向上手法の検討	コニカミノルタ社内 供試体実験 (鋼材のみ)
コンクリート舗装版への適用性検証	土木研究所 縮小供試体 (コンクリート舗装版)
実大舗装への適用性検証	土木研究所 新設走行工区における検証実験
実道における適用性検証 (参考)	土木研究所 既設走行工区における検証実験

## 第3章 点検・診断技術

### 3.1 点検・診断技術の特徴

#### 3.1.1 磁気ストリーム法の原理

磁気ストリーム法では、コンクリートの外側から磁石を使って内部鋼材に対して、1方向から磁力を印加する。内部鋼材に破断がある場合、磁力が途中で分断され、破断箇所を境に磁力の急減衰が生じることを利用して、鋼材の破断位置を特定することができる。

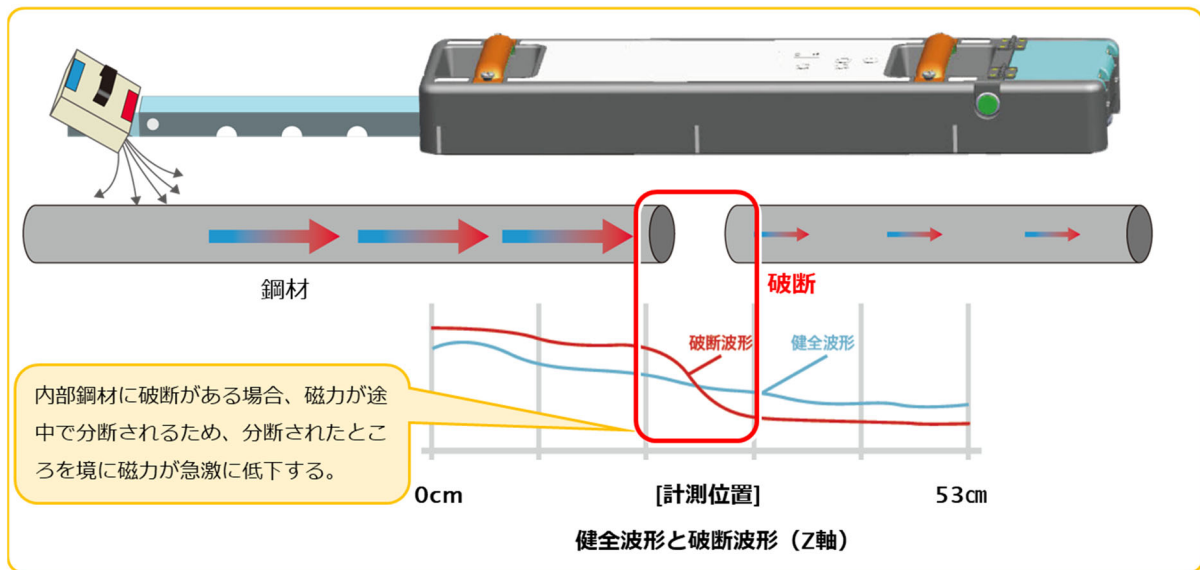


図-3.1.1 磁気ストリーム法のイメージ

### 3. 1. 2 漏洩磁束法の原理

漏洩磁束法はコンクリートの外側から磁石を用いて内部鋼材に磁場を印加することで磁気を帯びさせ、磁化した鋼材から漏洩する磁場を捉える方法である。健全なダウエルバーは1本の棒磁石のようにふるまい、破断したダウエルバーは破断箇所を境に2つの棒磁石のようにふるまう。破断部にS極とN極が生じることによる特徴的な磁場変化により鋼材の破断位置を特定することができる。

#### 磁場の変化を捉えて破断部を特定

健全なダウエルバーでは、末端にN極とS極が発生する。



ダウエルバーの破断箇所では、N極とS極が隣接して対向する。



図-3.1.2 着磁されたダウエルバーのイメージ

### 3. 2 点検・診断方法

#### 3. 2. 1 検査装置

SenrigaNの1回の検査可能面積は16cm×53cmである。検査装置には540個の3軸磁気センサが配置されている。検査面に近い270個のセンサをターゲットセンサ、ターゲットセンサから2cm離れた上段に設置された270個のセンサをリファレンスセンサと呼ぶ。各センサを長手方向に54個つないだラインをセンサラインと呼び、ターゲットセンサをセンサ1~5ライン、リファレンスセンサをセンサ6~10ラインとして用いる。主にターゲットセンサを判定に用い、リファレンスセンサは参照用とする。

図-3.2.2に示すように、センサ1~5ラインには1から順に赤・オレンジ・緑・青・紫の色が割り当てられており、検査結果は各センサに対応した色の波形としてグラフ化される。

センサは長手方向には1cm間隔、短手方向には4cm間隔で配置されており、どのセンサが反応したかによって破断位置を特定する。検査装置は磁気ストリーム法、漏洩磁束法ともに同じものを用いる。



図-3.2.1 磁石と検査装置

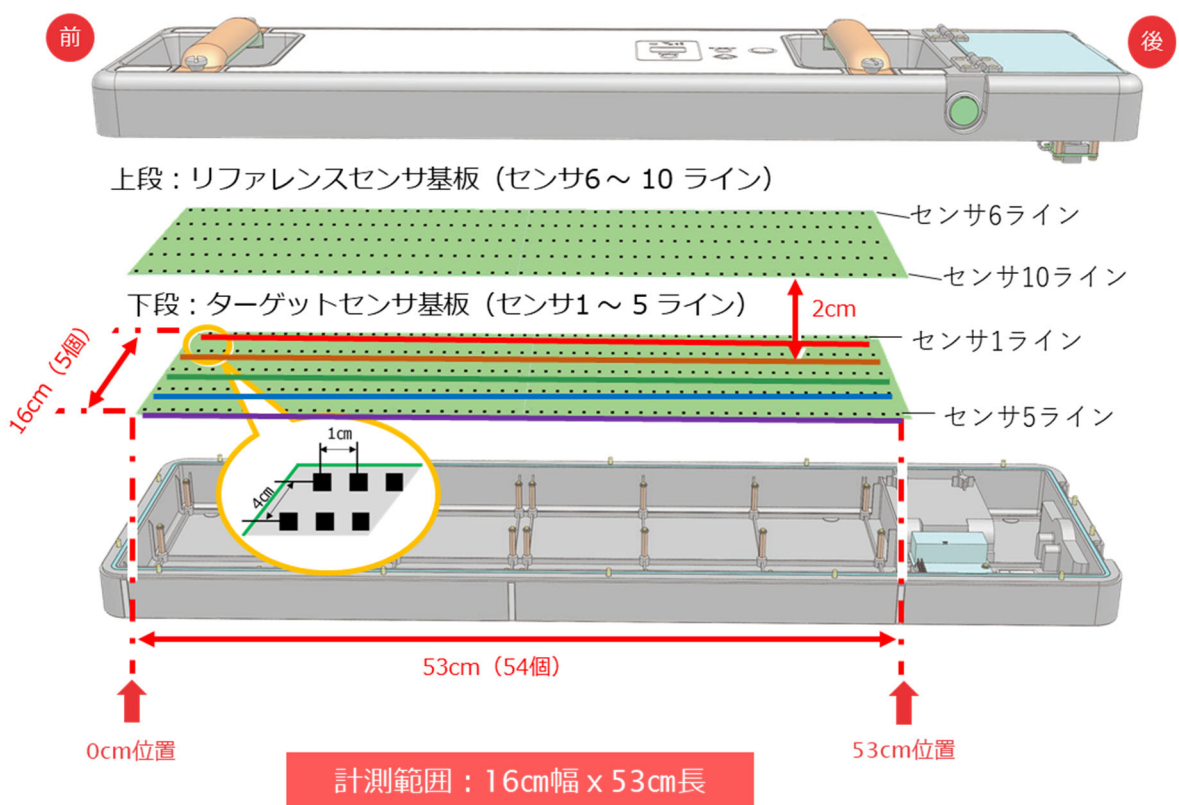


図-3.2.2 検査装置のセンサ配列

### 3. 2. 2 検査方法

#### (1) 磁気ストリーム法の検査方法

磁気ストリーム法では同じ位置で磁石をあてた状態での計測、磁石を取り除いた状態での計測を行い、その差分をとることで、共通して含まれる環境磁場ノイズ（地磁気や計測対象物に残留する磁力）を除去<sup>1)</sup>し、破断信号を検知する。

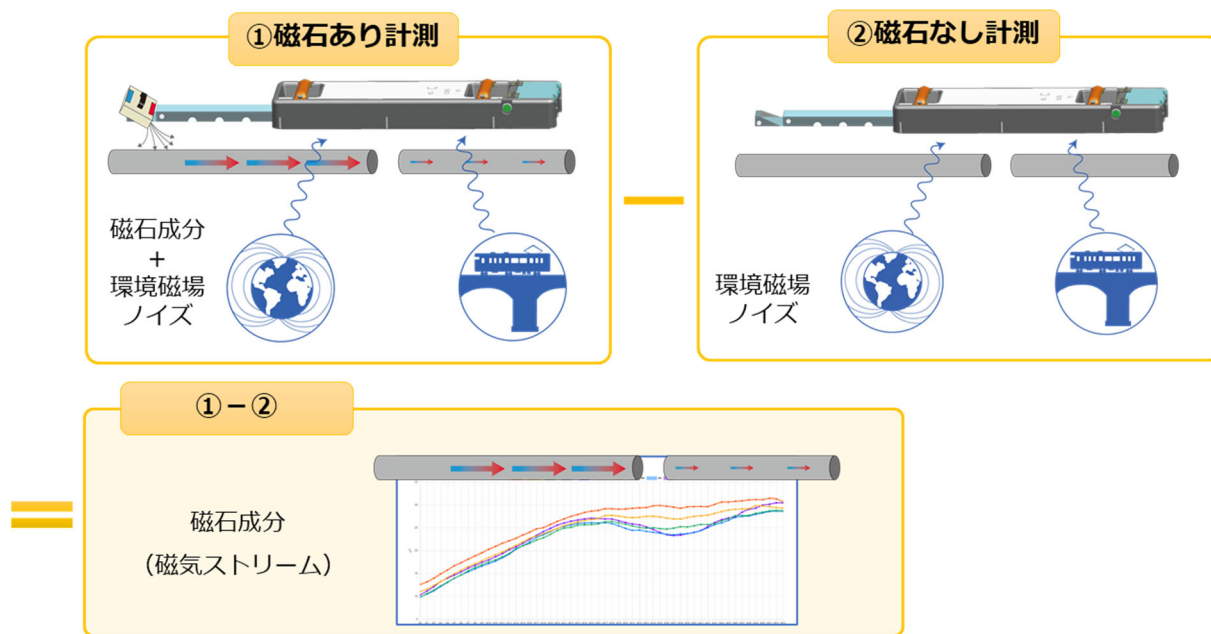


図-3. 2. 3 磁場ノイズ除去処理

現場では、ダウエルバーの位置を墨出ししてから検査する。ダウエルバーの位置にマーキングを行い、センサ 3 がその真上にくるように設置する。目地に検査装置の長手方向の中心（26.5cm 位置）が来るように位置を調整する。磁石と検査装置の距離を一定に保つため、磁石ガイドを検査装置に取り付け検査する。



図-3. 2. 4 磁気ストリーム法検査方法

## (2) 漏洩磁束法の検査方法

磁石を近づけ磁性体に磁気を帯びさせることを着磁という。下図のように、磁石のS極を地面に於て、ダウエルバーに添って磁石を動かして着磁する。予め墨出しをして、マーキングしておいたダウエルバーの真上を着磁していく。検査装置の0cm側から着磁をはじめ、53cm側に向かって磁石を動かす。ダウエルバーの端から端まで全てが磁化されるよう、ダウエルバーの長さより長く磁石を動かす。

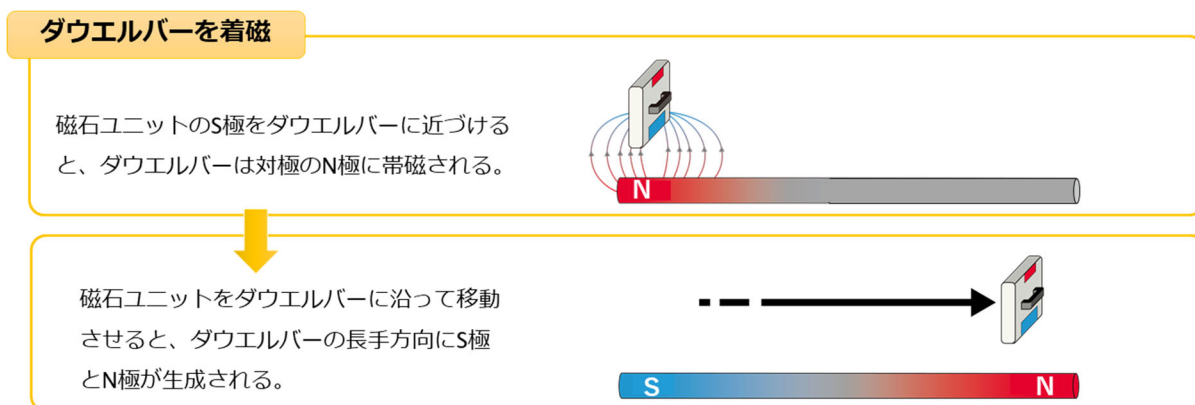


図-3.2.5 ダウエルバーの着磁

着磁後、センサ3の位置（緑）がダウエルバーの真上にくるように検査装置を設置する。目地に検査装置の長手方向の中心（26.5cm位置）が来るように位置を調整し、1回計測する。

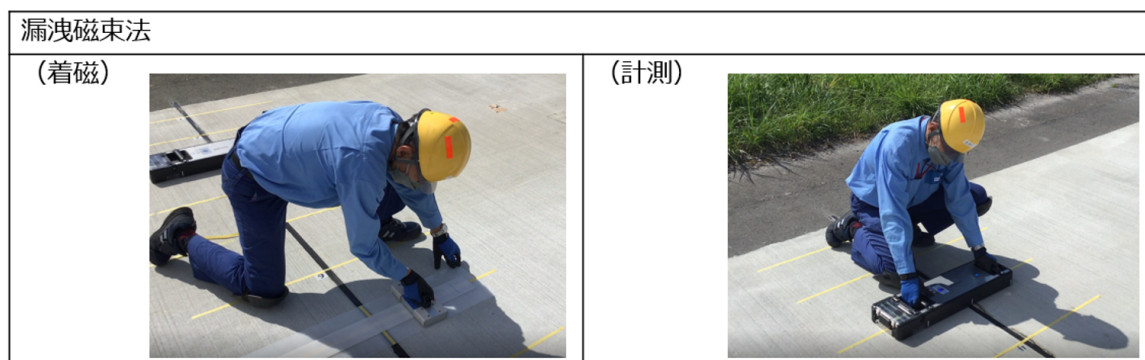


図-3.2.6 漏洩磁束法検査方法

### 3. 3 評価方法

#### 3. 3. 1 結果の読み方

Senriganには540個の3軸磁気センサが積載されている。3軸の方向をそれぞれ、長辺方向をX軸、短辺方向をY軸、深さ方向をZ軸と呼ぶ。



図-3.3.1 3軸の向き

データは横軸を検査位置（0cm～53cm），縦軸は漏洩磁束法では磁束密度（ $\mu\text{T}$ ）を，磁気ストリーム法では補正した磁束密度（ $\mu\text{T}$ ）を表す。補正した磁束密度とは磁力を印加した状態で計測した磁束密度と磁石を除去して計測した磁束密度の差分をとり，下記補正係数を乗じた値を指す。

対象センサを  $M_n$  ( $n=0\sim 53$ )，磁石から  $M_n$  までの距離を  $L(M_n)$  とする。 $M_n$  の補正係数を  $k(M_n)$  とするとき， $k(M_n)$  は以下の式(3.3.1)で表される。

$$k(M_n) = \left\{ \frac{L(M_n)}{L(M_0)} \right\}^3 \quad (3.3.1)$$

グラフはセンサ1～10ラインを各ラインに対応した色の10本の波形として表示する。X軸，Y軸，Z軸それぞれに1つのグラフを描き，1計測に対し3つのグラフが出力される。

図-3.3.2にグラフの凡例と健全なダウエルバーの磁気ストリーム法の波形の例を示す。

中でも深さ方向のZ軸は調査対象から検査装置に向かってくる方向の信号を検知するため，磁力の変化がもっとも現れやすく，破断判定に重要なデータである。そのため，グラフは上からZ，X，Yの順に表示する。

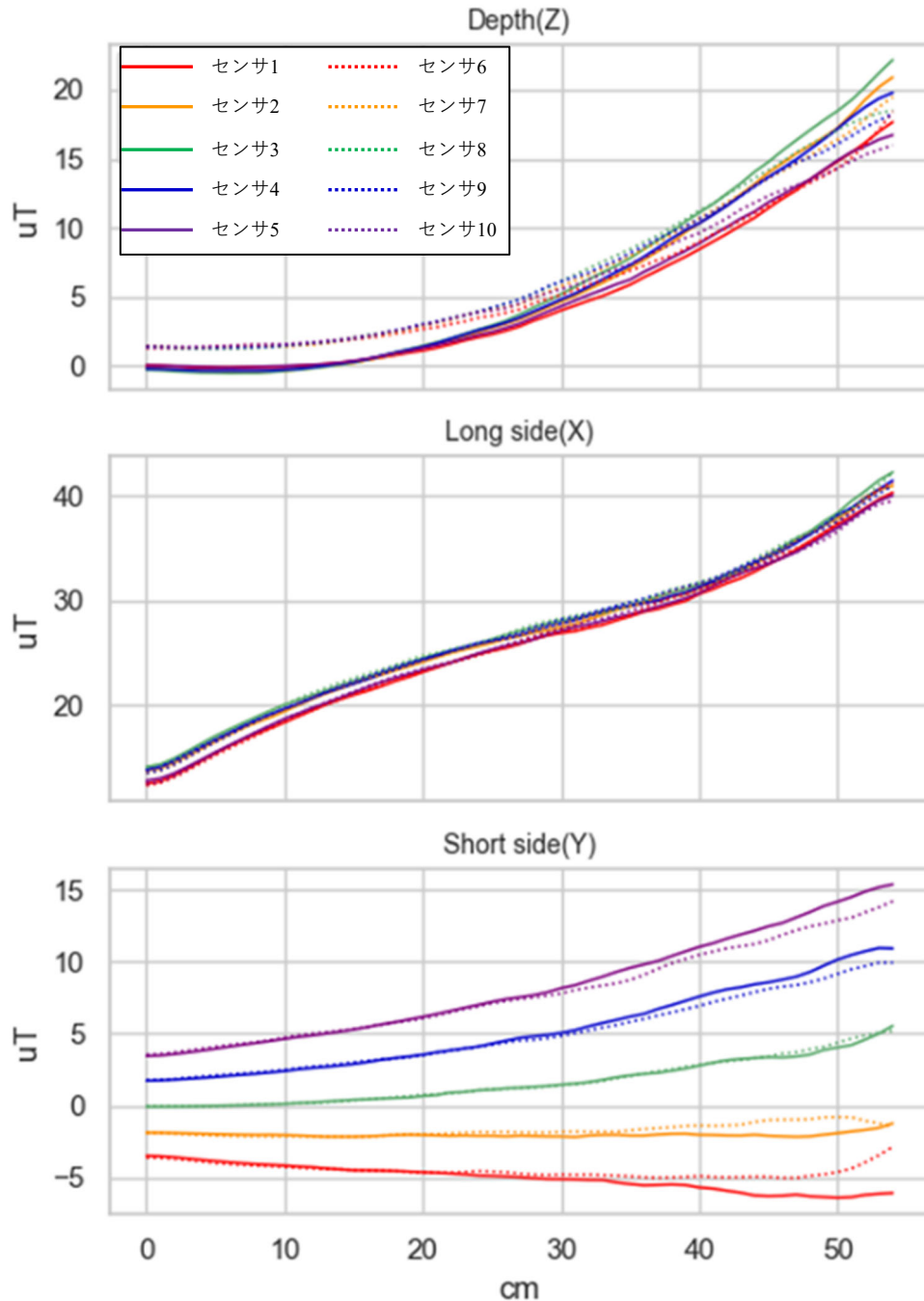


図-3.3.2 グラフの凡例と健全なダウエルバーの波形

### 3.3.2 磁気ストリーム法の評価方法

下図に磁気ストリーム法により、PC 桁フランジ下面を想定したモデルにおける健全な鋼材と破断した鋼材を検査した際のモデル実験結果を示す。健全な場合は Z, X, Y 各軸に大きな変化は見られない。一方破断している場合は、破断点において、Z 軸では破断箇所を境とする急減衰カーブ、X 軸では破断箇所をピークとする凸波形、Y 軸では鋼材直上の中央センサ 3 以外のセンサの絞りこみが観測される<sup>2)</sup>。



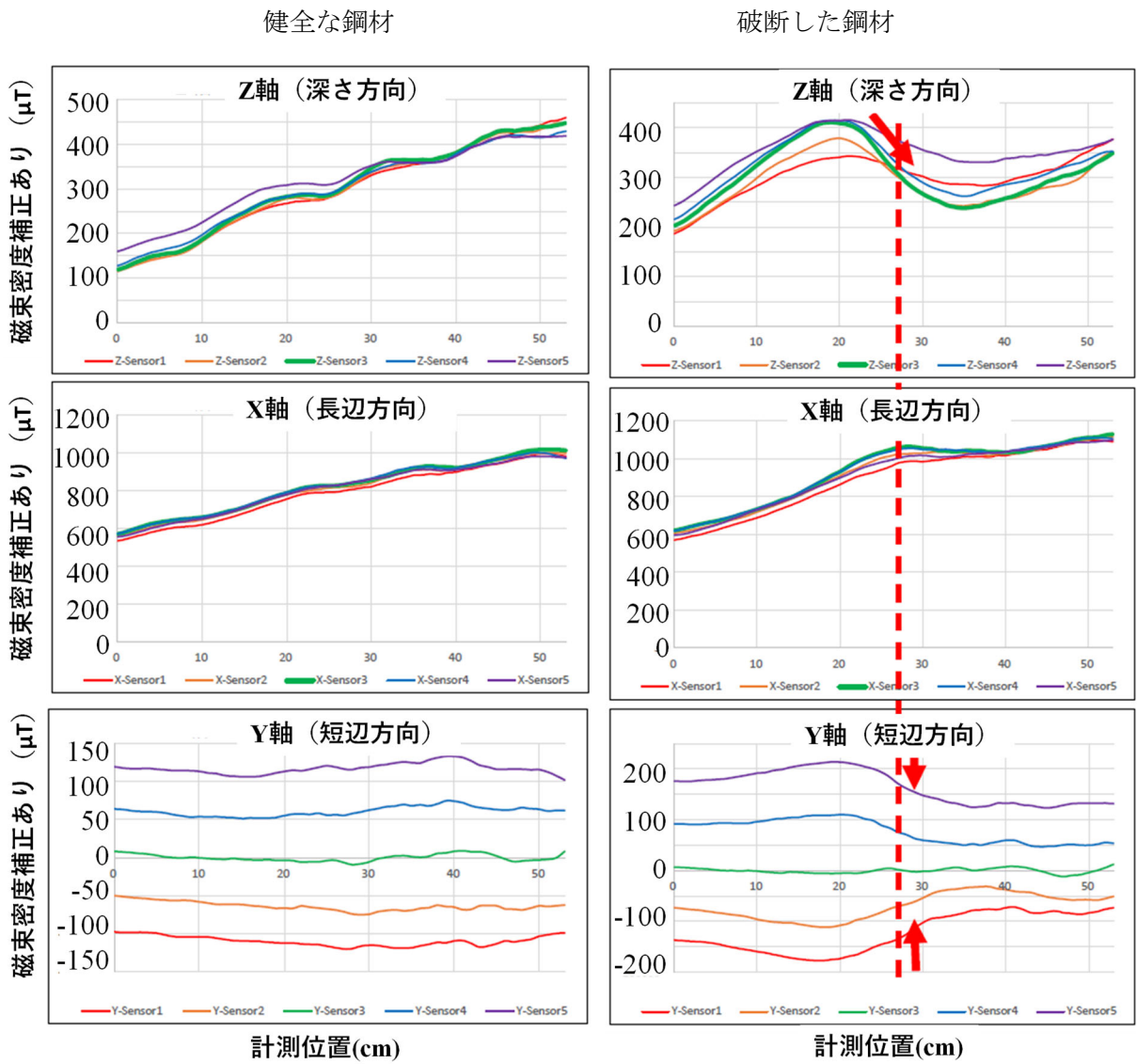


図-3.3.3 各軸の波形の例 (磁気ストリーム法)

### 3. 3. 3 漏洩磁束法の評価方法

下図に漏洩磁束法における健全な鋼材，破断した鋼材を検査した際のモデル実験結果を示す。健全な場合はZ，X，Y各軸ともに大きな変化は見られない。一方破断している場合は，破断点において，Z軸では破断箇所を境とするN・Sの反転を示すS字カーブ，X軸では破断箇所をピークとする凸波形，Y軸でも破断箇所を境に磁極が反転する現象を捉えたクロス波形が観測される<sup>3)</sup>。

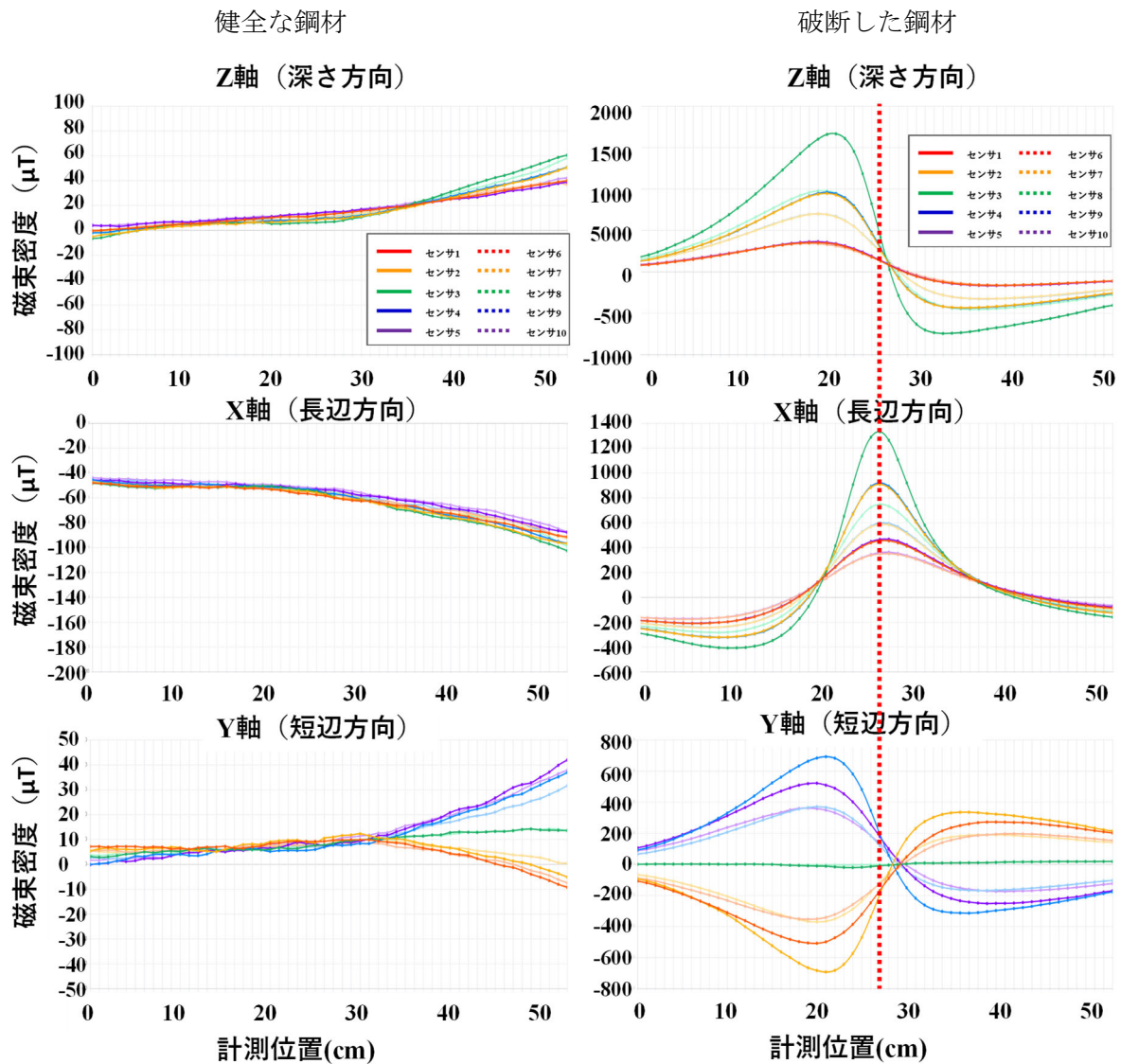


図-3.3.4 各軸の波形の例（漏洩磁束法）

## 参考文献

- 1) 森田博, 丸山一直, 阿部真之介, 橋本好之: 磁気ストリーム法による PC 橋の内部鋼材破断を検知する非破壊検査ソリューション, 土木学会西部支部 沖縄会 技術研究発表会 第 8 回研究会, 2019.
- 2) 唐澤恭平, 吉田幸司, 丸山一直, 森田博, 橋本好之: 磁気ストリーム法を活用した非破壊検査機器による PC 鋼材破断検知の有効性の検証, 令和元年度土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会, 74th, V-214, 2019.
- 3) 新山将史, 森田博, 橋本好之, 田中泰司: 旧弁天大橋における PC 鋼材の破断検出-漏洩磁束を用いた非破壊検査-, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 30<sup>th</sup>, pp409-412, 2021.

## 第4章 縮小供試体を使用した室内試験

### 4.1 鋼材のみ使用した供試体に対する適用性検証

#### 4.1.1 磁気ストリーム法と漏洩磁束法の比較試験

##### (1) 試験方法

写真-4.1.1に示すように、実験で用いた供試体はダウエルバーを想定した鋼棒(D25・長さ70cm)とクロスバー・チェア・メッシュから構成され、コンクリートが打設されていない状態での検査方法の適用性を比較検証する。ここでは、ダウエルバーが健全・破断しているケースとメッシュあり・なしのケースを想定した合計4つの供試体を作成した。

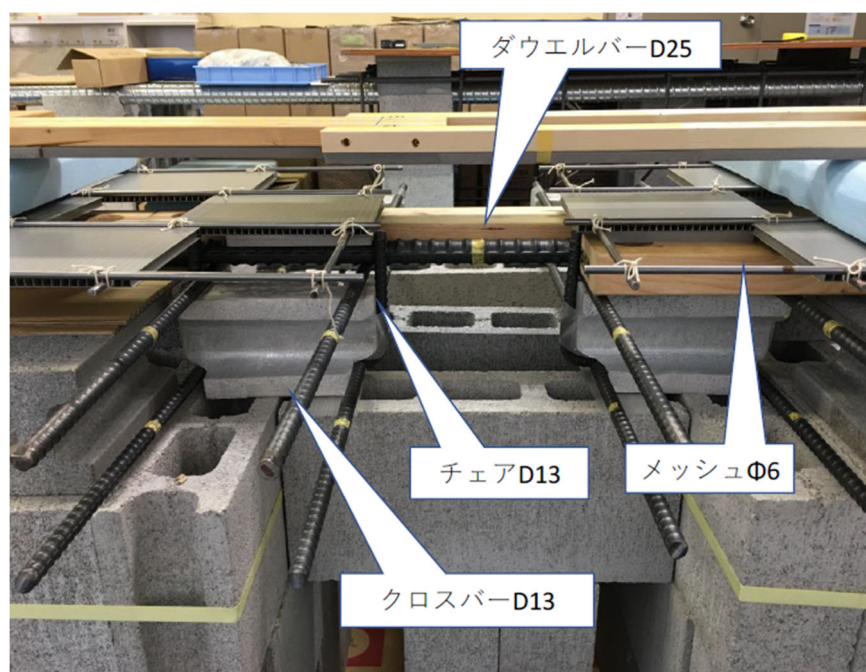


写真-4.1.1 ダウエルバーのモデル

##### (2) 結果

メッシュがないケースの結果を図-4.1.1～図-4.1.4に、メッシュがあるケースの結果を図-4.1.5～図-4.1.8に示す。

メッシュがないケースにおいて、磁気ストリーム法を適用した場合、Z軸で破断箇所における減衰が確認されたが、X軸、Y軸では明確な変化が確認されなかった。また、漏洩磁束法ではZ軸でS字カーブ、X軸で凸波形が確認されたが、Y軸でのクロス波形は確認されなかった。前章で取り上げたPC桁を対象にした測定結果とは異なるものの、Z軸に着目することで、磁気ストリーム法、漏洩磁束法ともにダウエルバーの損傷箇所を検出することが出来ている。

メッシュがあるケースでは、メッシュが無いケースと同様、磁気ストリーム法ではZ軸で破断箇所における減衰が確認されたが、X軸、Y軸では明確な変化は確認されなかった。その反面、

漏洩磁束法では、ダウエルバーの損傷によらず、Z軸でS字カーブ、X軸で凸波形が確認されており、波形の変化からは損傷箇所の検出が出来なかった。一方、ダウエルバーに一番近い位置を計測するセンサ3（図中緑線）のS字カーブ箇所の磁束密度の大小に着目すると、ダウエルバーが健全なときは、最大156.9 $\mu$ T、最小84.5 $\mu$ Tであり、破断しているときは、最大216.4 $\mu$ T、最小52.3 $\mu$ Tとなっていることから、S字カーブ箇所の磁束密度の大小関係から、損傷を抽出することが可能である。

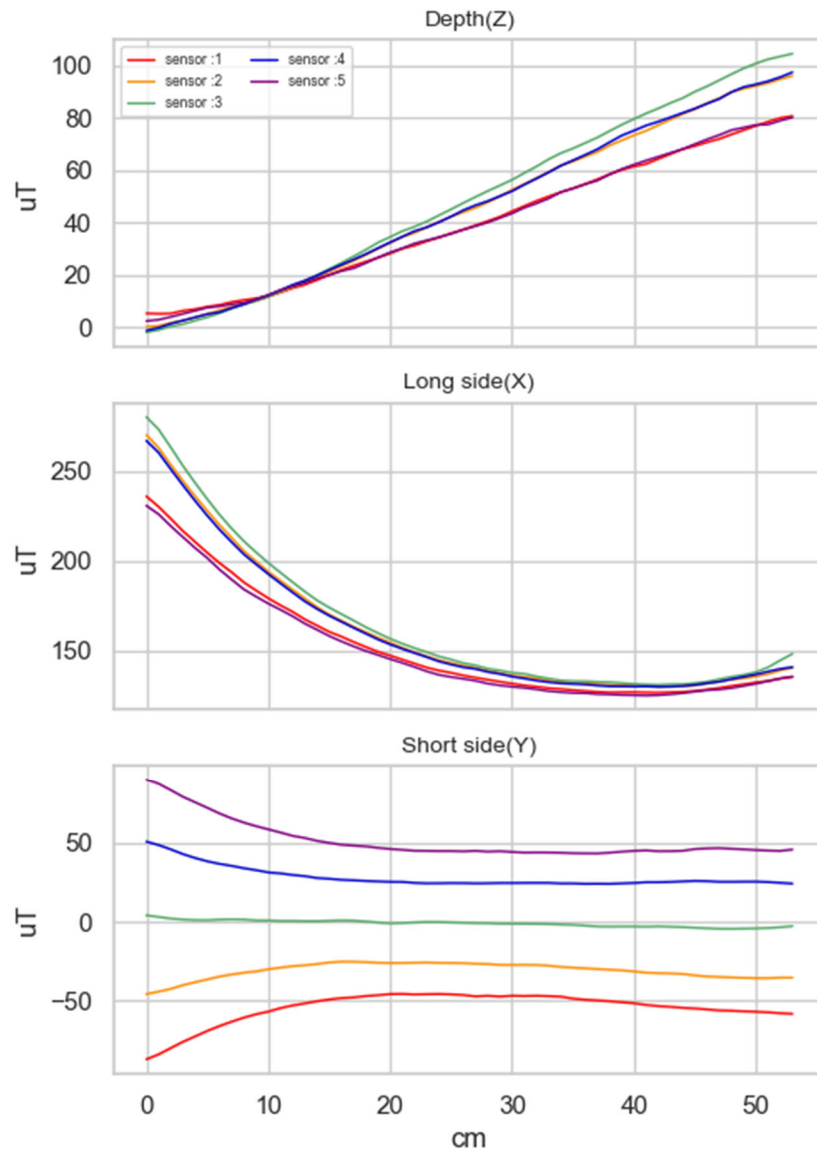


図-4.1.1 磁気ストリーム法・鋼棒健全・メッシュなし

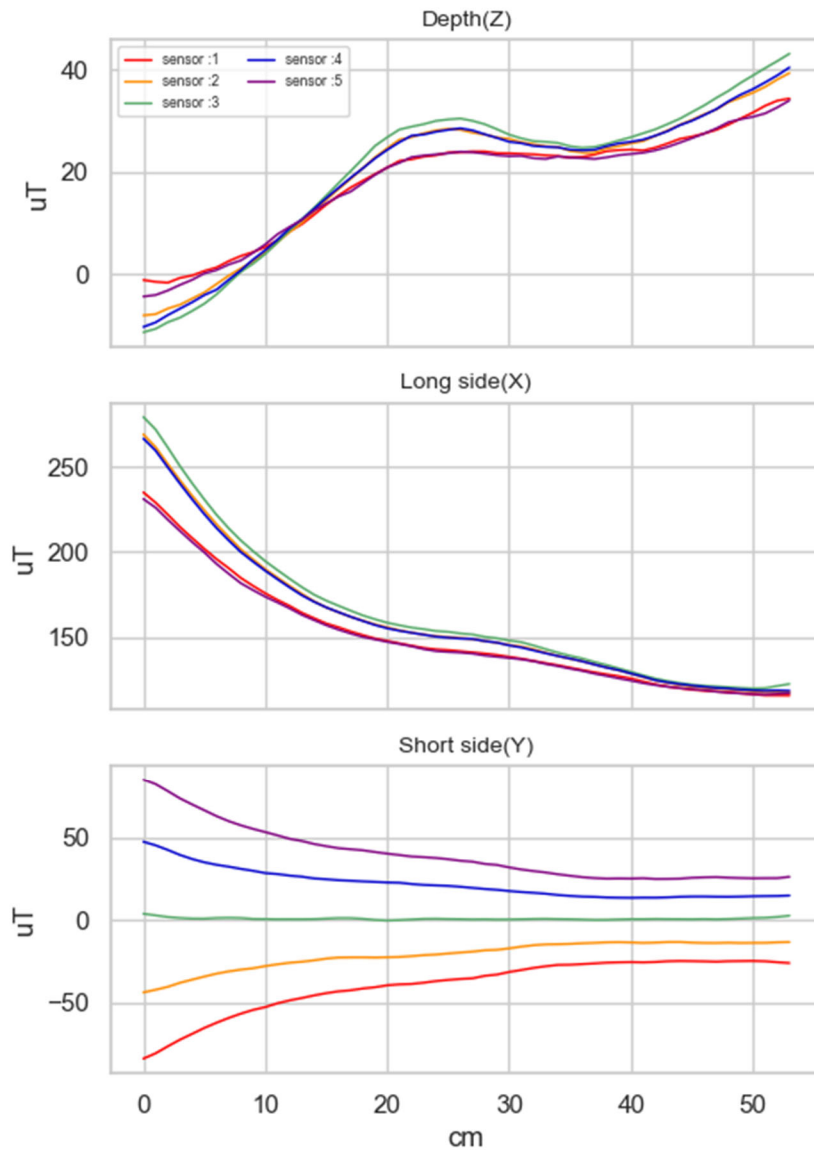


図-4.1.2 磁気ストリーム法・鋼棒破断・メッシュなし

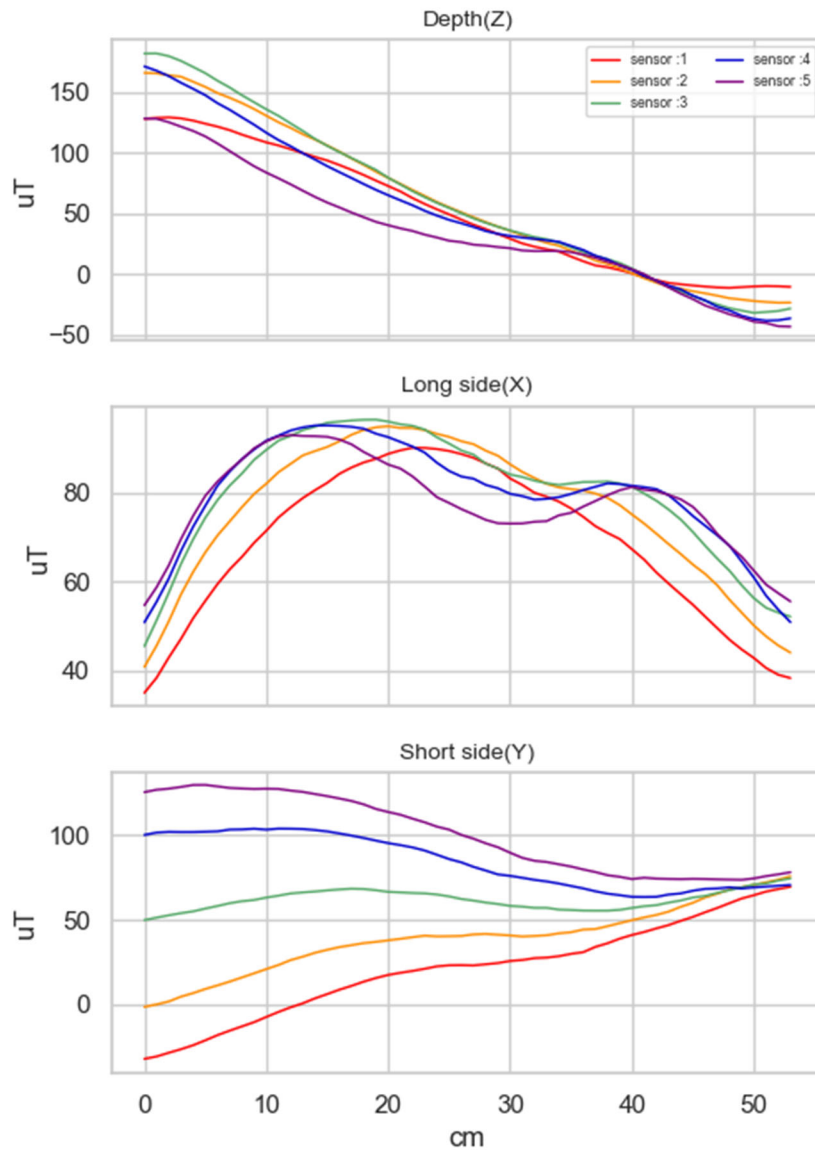


図-4.1.3 漏洩磁束法・鋼棒健全・メッシュなし

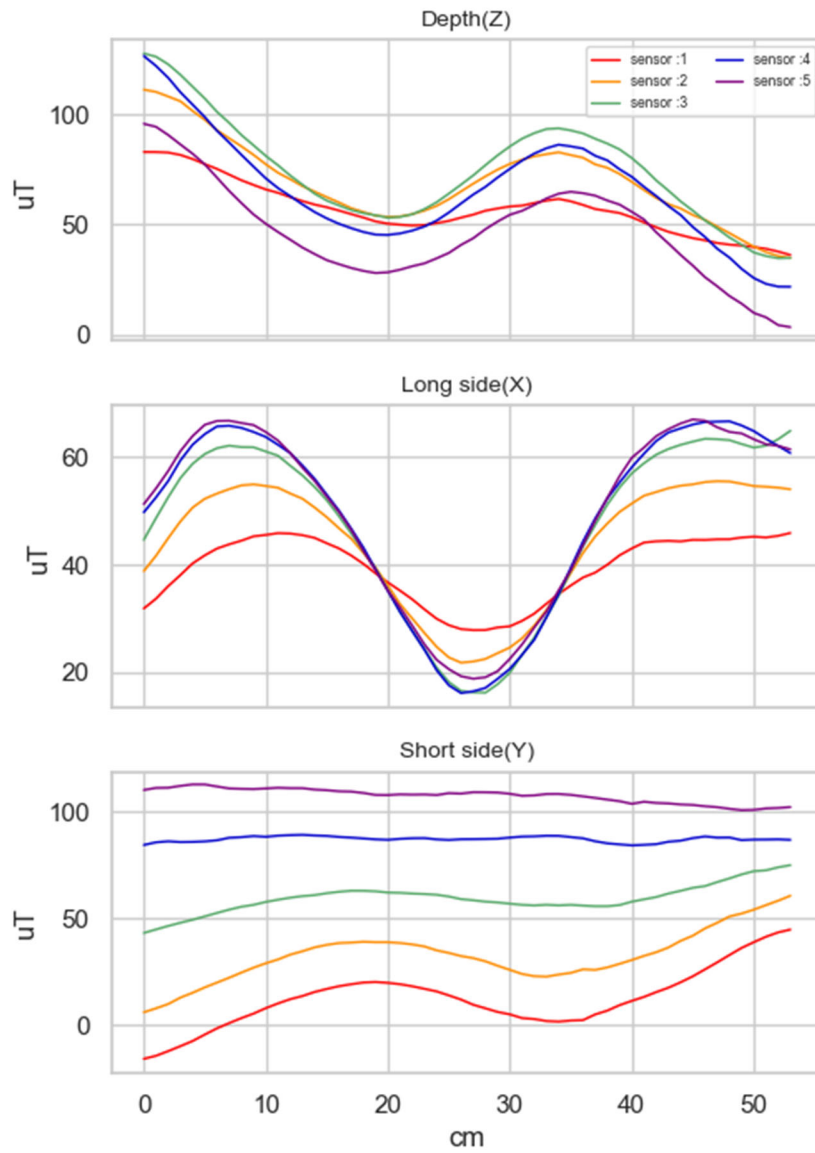


図-4.1.4 漏洩磁束法・鋼棒破断・メッシュなし



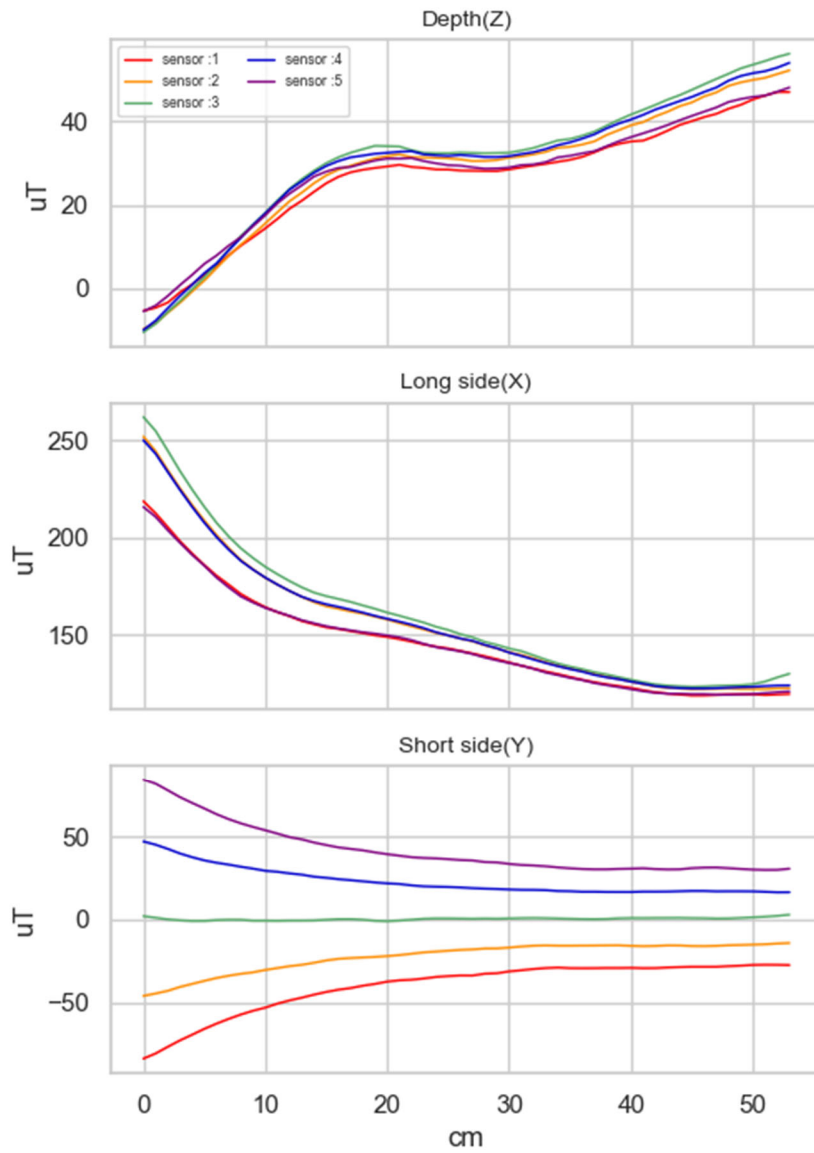


図-4.1.5 磁気ストリーム法・鋼棒健全・メッシュあり

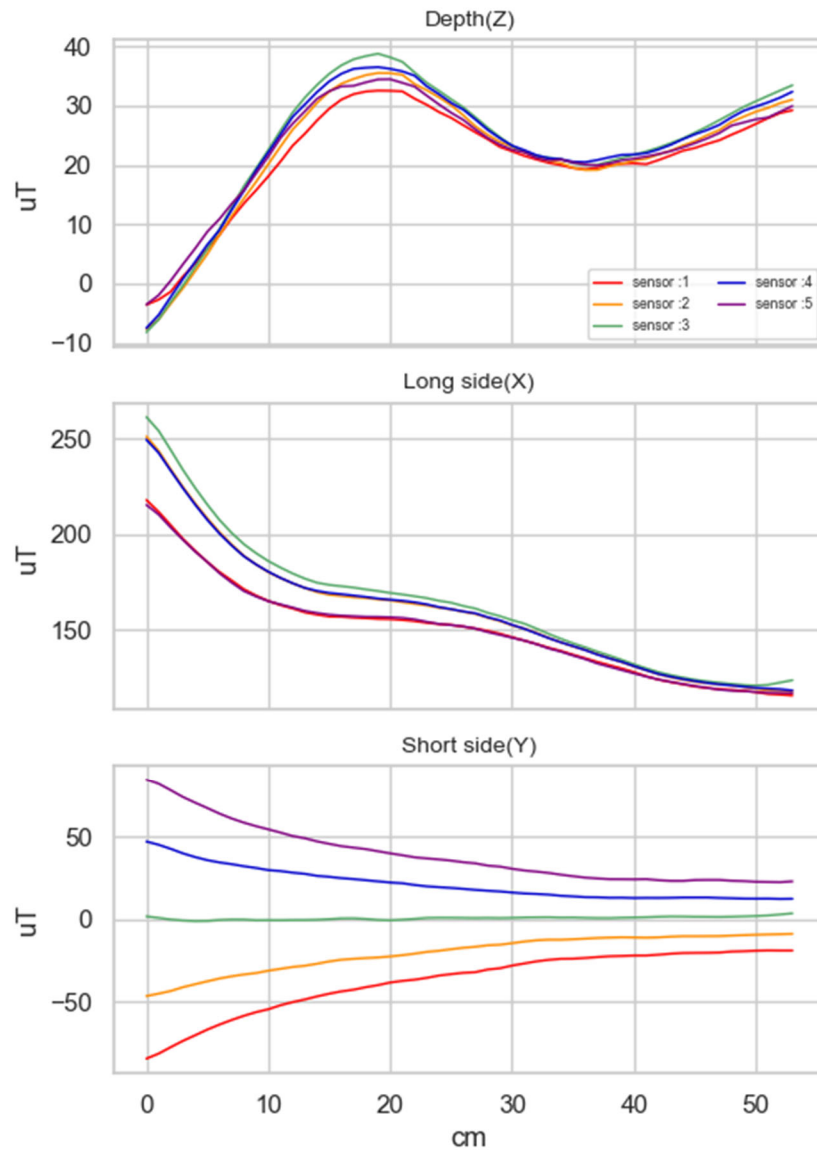


図-4.1.6 磁気ストリーム法・鋼棒破断・メッシュあり

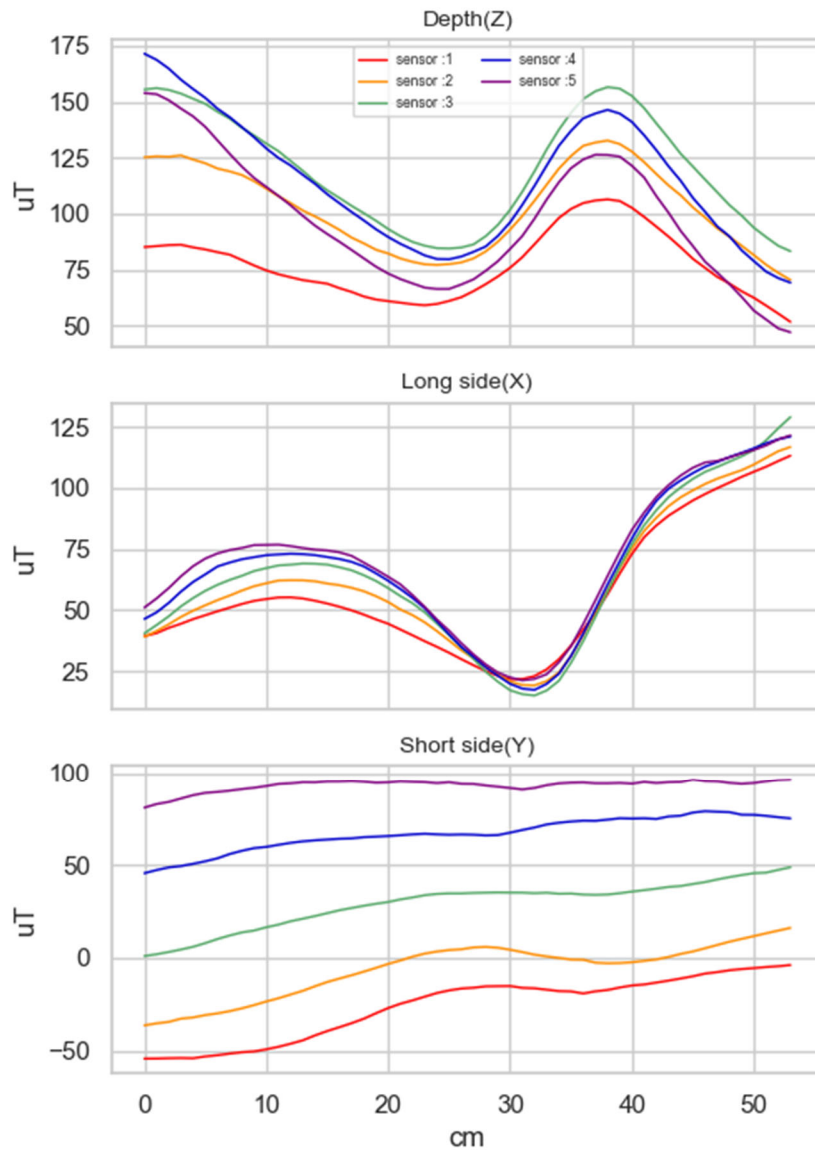


図-4.1.7 漏洩磁束法・鋼棒健全・メッシュあり

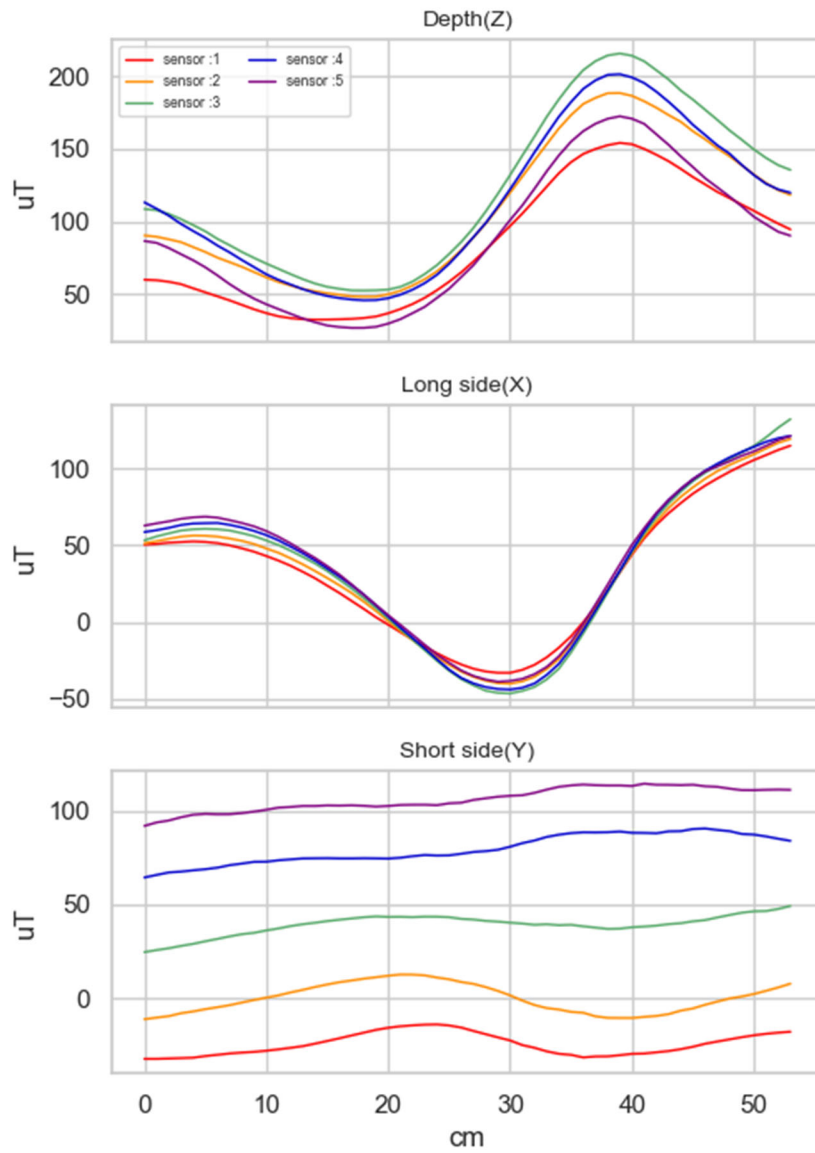


図-4.1.8 漏洩磁束法・鋼棒破断・メッシュあり

### (3) 考察

メッシュがないケースでは、磁気ストリーム法、漏洩磁束法ともにダウエルバーの損傷を検出することが可能であることが明らかになった。一方、PC 桁を対象とした測定結果と異なり、コンクリート舗装版内の鋼材を模擬した供試体においては、磁気ストリーム法では Z 軸の結果から、漏洩磁束法では Z 軸及び X 軸の結果からのみ損傷を検出できることが確認された。

メッシュがあるケースでは、磁気ストリーム法はメッシュが無いケースと同様に、Z 軸の波形変化から損傷を検出できた。一方、漏洩磁束法では波形変化から損傷の検出をすることは不可能であり、磁束密度の大小関係から損傷検出を行う必要があることが明らかになった。検査装置中心からみて両側のメッシュの端部が着磁されたときに、破断部が着磁された場合と同様に S 極・N 極が形成され、破断有無にかかわらず S 字の信号が出ていることが原因であると考えられる。波形の変化又は磁束密度の大小関係のいずれでも破断判定は可能であるが、健全部と損傷部が波形の変化として区別することが可能な磁気ストリーム法の方が精度が高い手法であると考えられる。

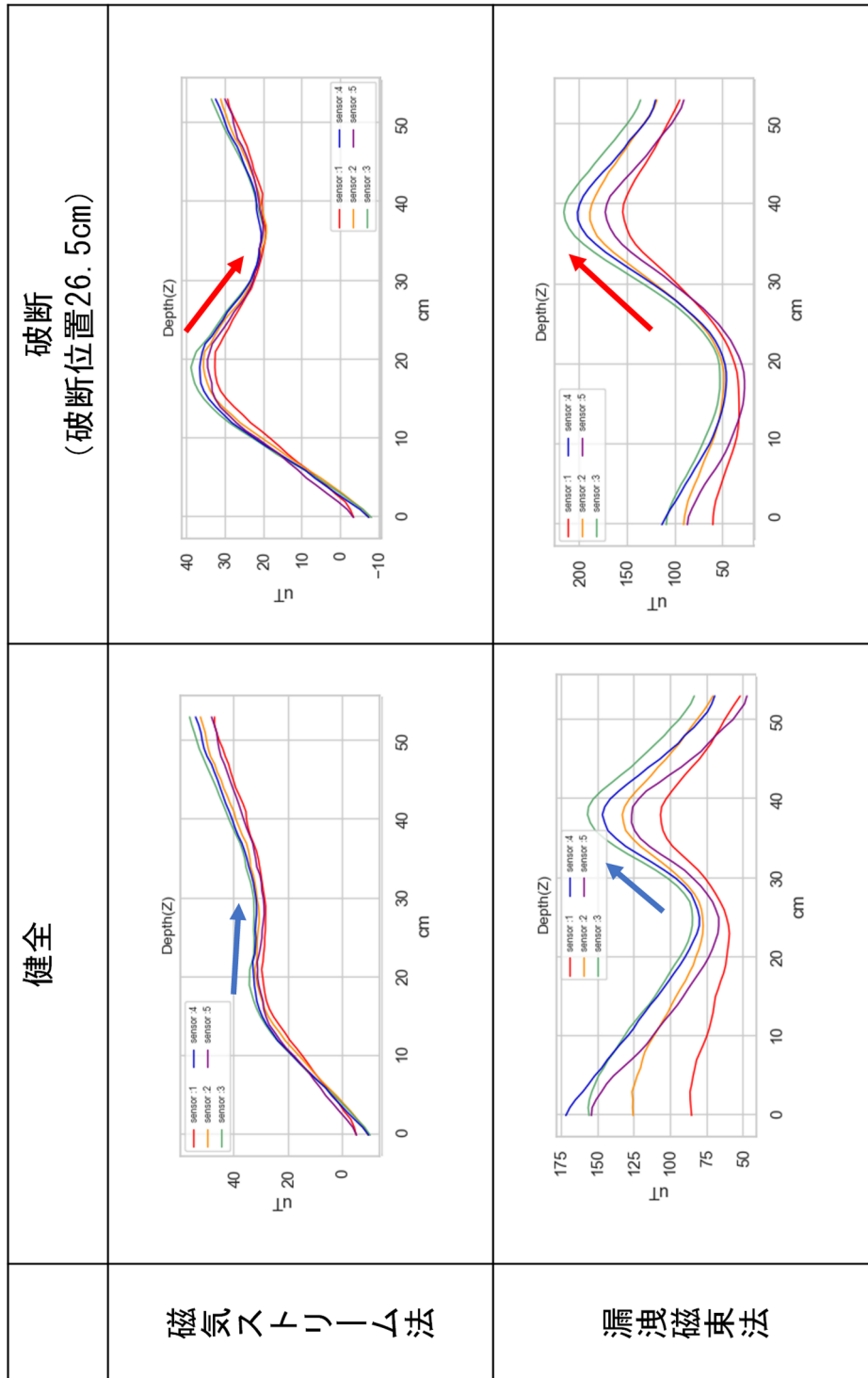


図-4.1.9 2手法の波形比較 (Z軸)

#### 4. 1. 2 磁気ストリーム法の磁石設置位置の検討試験

##### (1) 試験方法

磁気ストリーム法は、鋼材等に対して磁気を印加し、漏洩した磁力を測るものであるため、印加するための磁石の位置が計測結果に大きく影響する。ダウエルバーに対する適切な磁石の設置位置を把握するため、前項で使用したメッシュがある供試体を用いて、①検査装置端部から 7cm 離れたところ、②検査装置端部から 18.5cm 離れたところ、③検査装置端部から 28.5cm 離れたところの 3 箇所に設置し、それぞれ計測した。

##### (2) 結果

検査装置端部から 7cm 位置に磁石を設置した場合には、ダウエルバーの損傷有無によらず Z 軸での波形の変化は確認されなかった。一方、検査装置端部から 18.5cm 位置又は 28.5cm 位置に磁石を設置した場合、ダウエルバーが健全な場合には、20cm 付近で Z 軸の磁束密度の増加傾向が止まり、水平に近い波形となるのに対して、ダウエルバーが損傷している場合には、破断箇所付近で減衰が確認された。

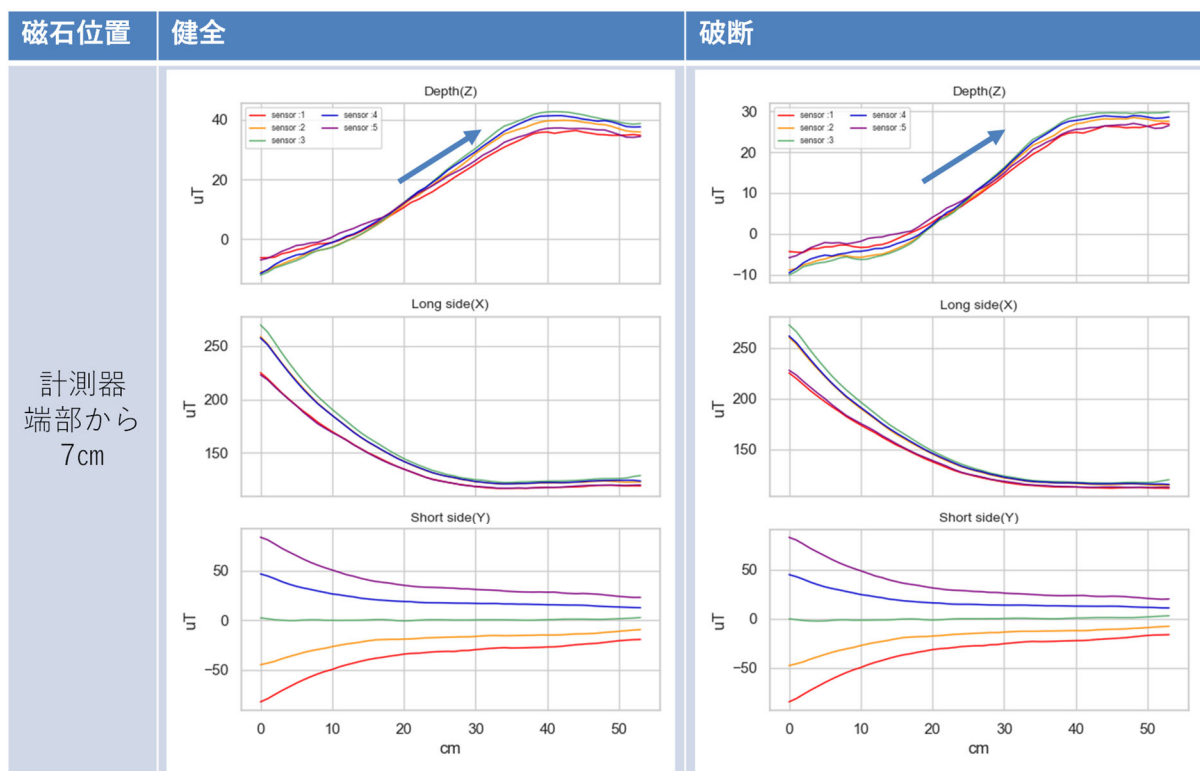


図-4.1.10 検査装置端部から 7cm 位置に磁石設置

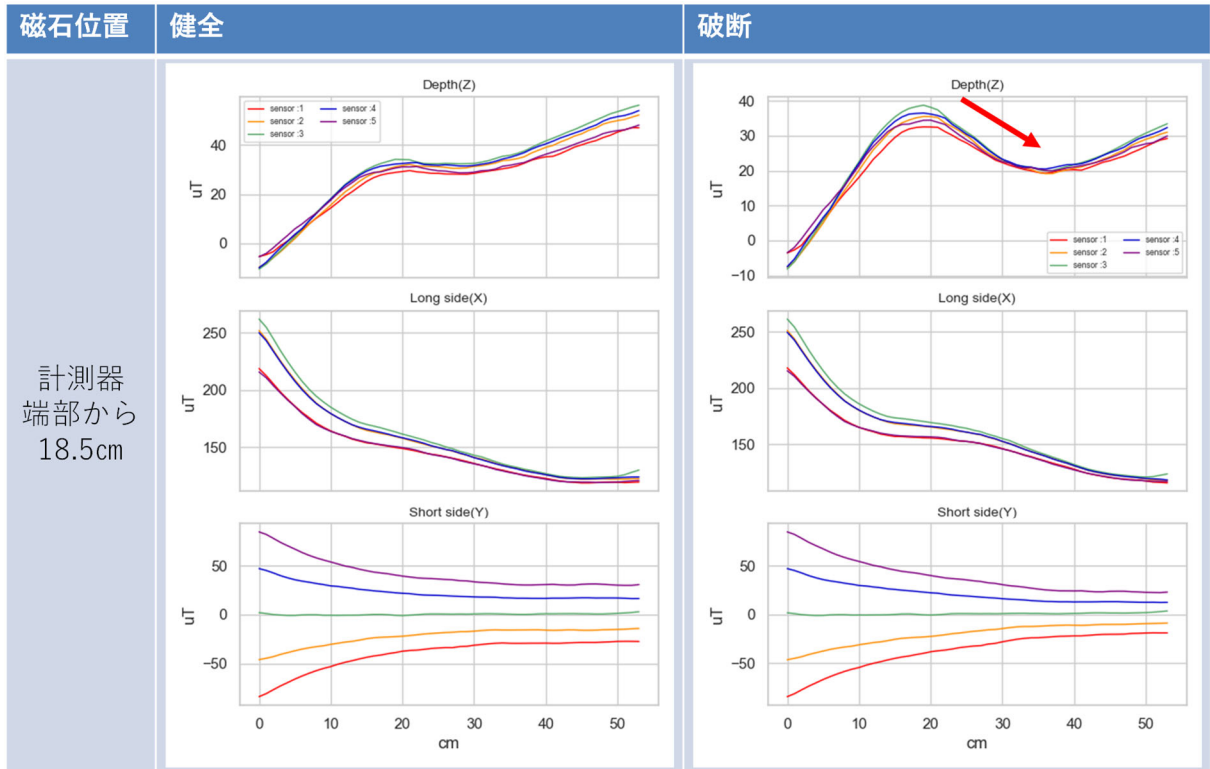


図-4.1.11 検査装置端部から 18.5cm 位置に磁石設置

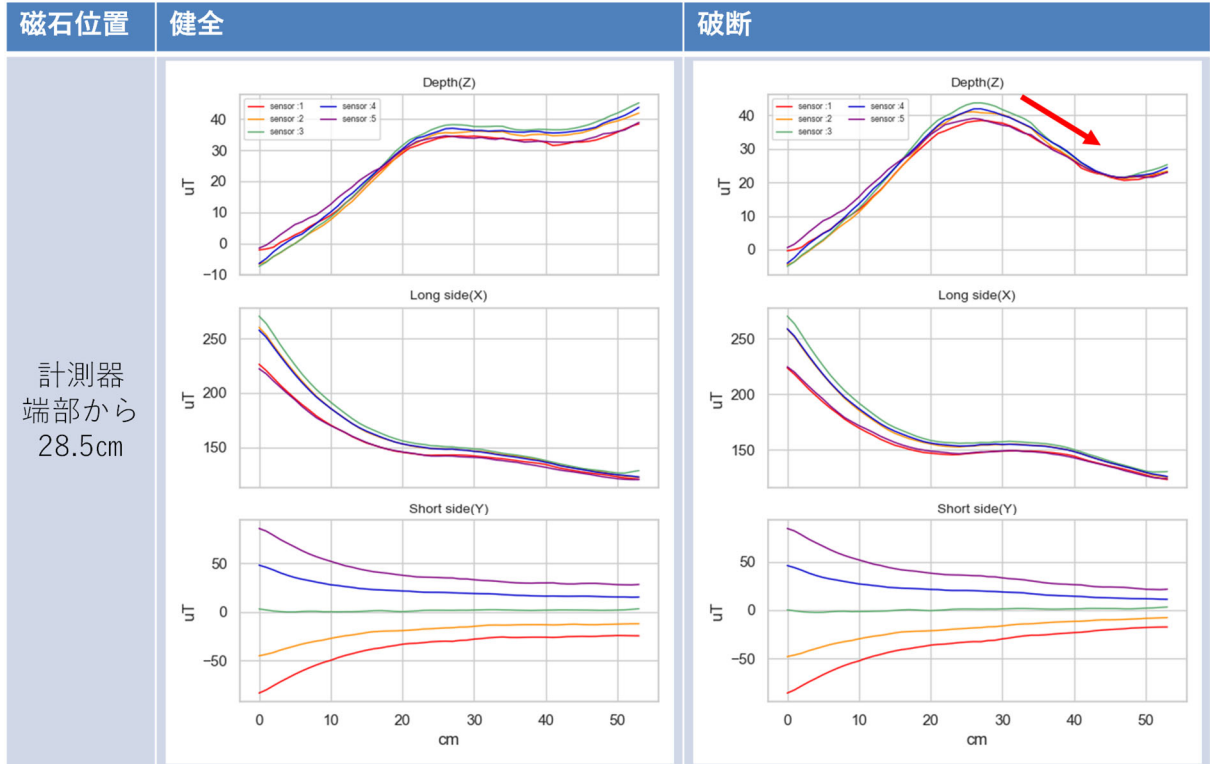


図-4.1.12 検査装置端部から 28.5cm 位置に磁石設置



### (3) 考察

検査装置から 7cm 位置に磁石を設置した場合は、検査装置のセンサと磁石が近すぎるため、鋼棒から漏洩した磁力でなく、磁石からの磁力をセンシングしたため、破断の有無が波形に影響を与えなかったものと考えられる。

検査装置から 18.5cm 又は 28.5cm 位置に磁石を設置した場合、損傷箇所付近で Z 軸に減衰が見られており、ダウエルバーから漏洩した磁力を捉えたグラフが得られた。磁石位置 18.5cm と 28.5cm の結果を比べると、破断位置でより変化が大きいのは 18.5cm の波形であった。操作性も担保しながら、損傷を抽出しやすい波形を得るために、次節以降では磁石の設置位置は装置端部から 20cm 離れた位置とすることにした。

## 4. 2 コンクリート舗装版の縮小供試体に対する適用性検証

### 4. 2. 1 試験方法

前節では鋼材のみ使用した供試体を対象に、磁気ストリーム法及び漏洩磁束法の適用性を検証したが、実際のコンクリート舗装版では、鋼材がコンクリートに覆われていることから、手法の適用性が異なる可能性がある。そこで、土木研究所において、表-4.2.1 に示すように、ダウエルバーの損傷有無、破断部の隙間、版厚が異なる 6 つの縮小供試体を作成した。縮小供試体は写真-4.2.1 に示すようにコンクリートの目地部を模擬したもので、ダウエルバー (φ25×700mm)、チェア (D13)、メッシュ (D6、格子間隔 150mm、かぶり 83~100mm) が設置されている。6 つの縮小供試体に対して、磁気ストリーム法と漏洩磁束法により計測を行い、コンクリート舗装版に対する検査手法の適用性を検証した。



写真-4.2.1 供試体計測の様子

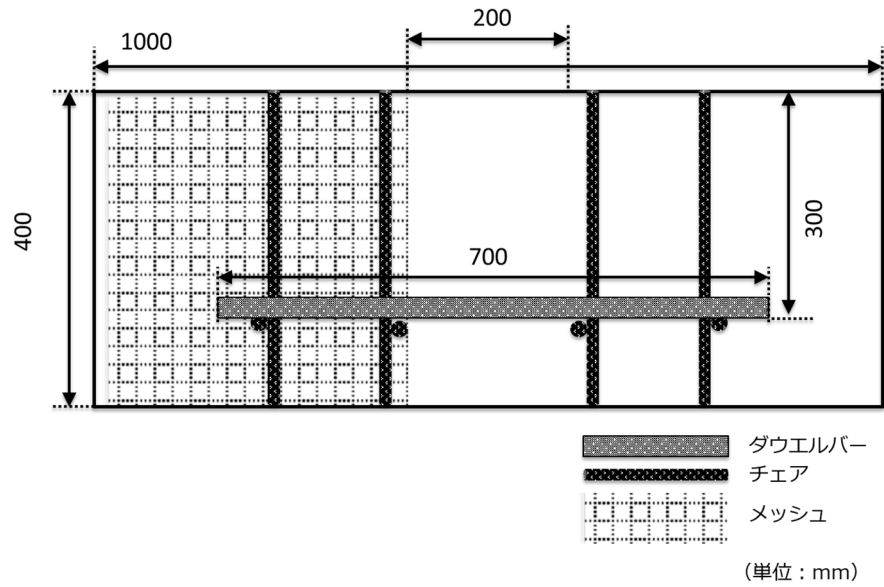


図-4.2.1 供試体平面図

表-4.2.1 供試体の種類

記号	ダウエルバーの状態	模擬破断部の隙間 (mm)	版厚 (cm)	芯かぶり (cm)	供試体寸法 (cm)
S	健全	-	25	12.5	100×40×25
B0-25	破断	0			
B5-25		5			
B10-25		10			
B0-30	破断	0	30	15	100×40×30
B5-30		5			

#### 4. 2. 2 試験結果

磁気ストリーム法の結果を表-4. 2. 2, 図-4. 2. 2～図-4. 2. 7に, 漏洩磁束法の結果を表-4. 2. 3, 図-4. 2. 8～図-4. 2. 13に示す。前節における実験結果をふまえて, 磁気ストリーム法の Z 軸の波形で右上がりを示すものを健全, 中央部分で水平を示すものを破断と判定し, 漏洩磁束法の Z 軸の波形で右下がりを示すものを健全, S 字を示すものを破断と判定することとした。

磁気ストリーム法では, ダウエルバーが健全である供試体 S とダウエルバーが損傷しているが破断部の隙間が 0mm である供試体 B0-25, B0-30 はいずれも「健全」と判断される。一方, 破断部の隙間が 5mm 以上確保されている供試体 B5-25, B10-25, B5-30 では減衰が見られ, 損傷していると判断される。また, 破断部の隙間が大きく, 版厚が薄い方が磁束密度が大きくなっている。

漏洩磁束法では, ダウエルバーが健全である供試体 S と破断部の隙間が 0mm である供試体 B0-25, B0-30 で, メッシュによる小さな下凸が見られるが, 計測位置 26.5cm 前後のダウエルバーの中心部を捉えた位置の磁束密度は変化がないため, いずれも「健全」と判断される。破断の隙間が 5mm 以上である供試体 B5-25, B10-25, B5-30 ではダウエルバーの中心部に S 字が見られ, 破断していると判断される。なお, 前節のモデルを用いた実験ではダウエルバー中心の両側にメッシュがあったため, それぞれのメッシュ端部が S 極・N 極になる事で偽陽性の S 字カーブが現れたが, 供試体ではメッシュが起点側にしかなかったため, メッシュによる波形は下凸の信号のみが現れた。ここで, グラフ横軸計測位置 0cm における磁束密度は健全と判断された場合の方が大きくなっているが, これはダウエルバーの末端からの磁力を捉えていると考えられる。健全な場合はダウエルバーは一つの長い棒磁石となり, 両端のみが N, S に強く着磁され, 中心部は磁束密度が 0 に近い値となる。そのため, 末端からの磁力を検知しやすい。破断している場合は破断点で切断された 2 つの弱い棒磁石となり, 末端からの磁力も弱くなっている可能性がある。ただし, ダウエルバー・メッシュなど以外の磁性体がある場合など, 環境磁場ノイズの影響が大きいことが考えられるため, 判定には利用しない。

表-4.2.2 磁気ストリーム法の計測結果

	S (健全)	B0-25 (破断の隙間0mm)	B5-25 (破断の隙間5mm)	B10-25 (破断の隙間10mm)
芯がぶり125mm				
芯がぶり150mm				

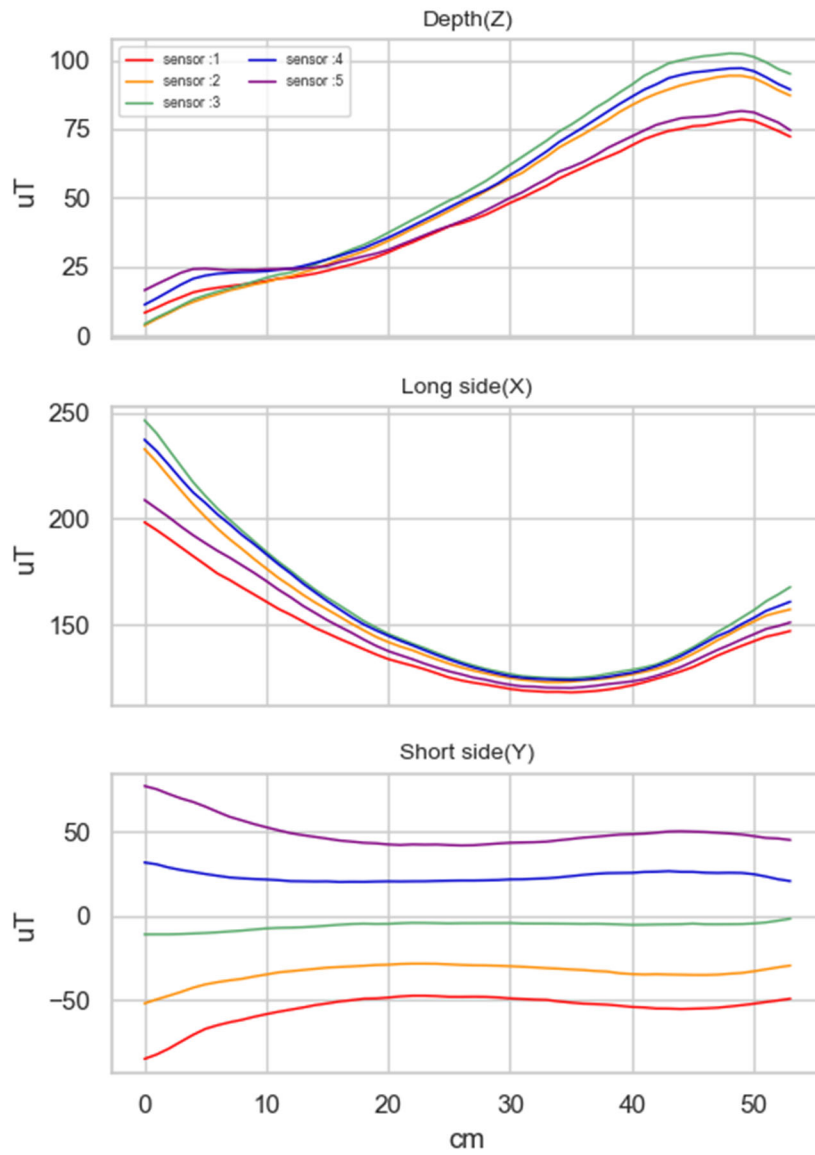


図-4.2.2 磁気ストリーム法・S (健全)

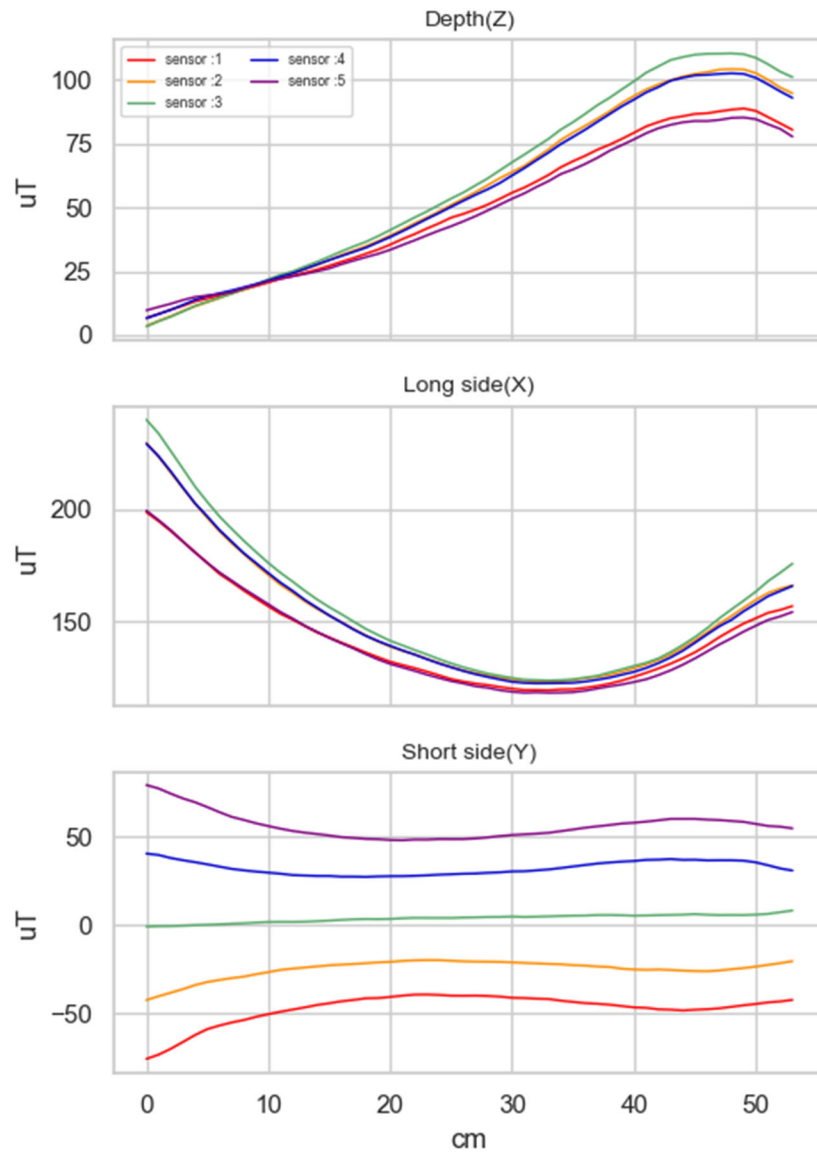


図-4.2.3 磁気ストリーム法・B0-25 (破断の隙間 0mm)

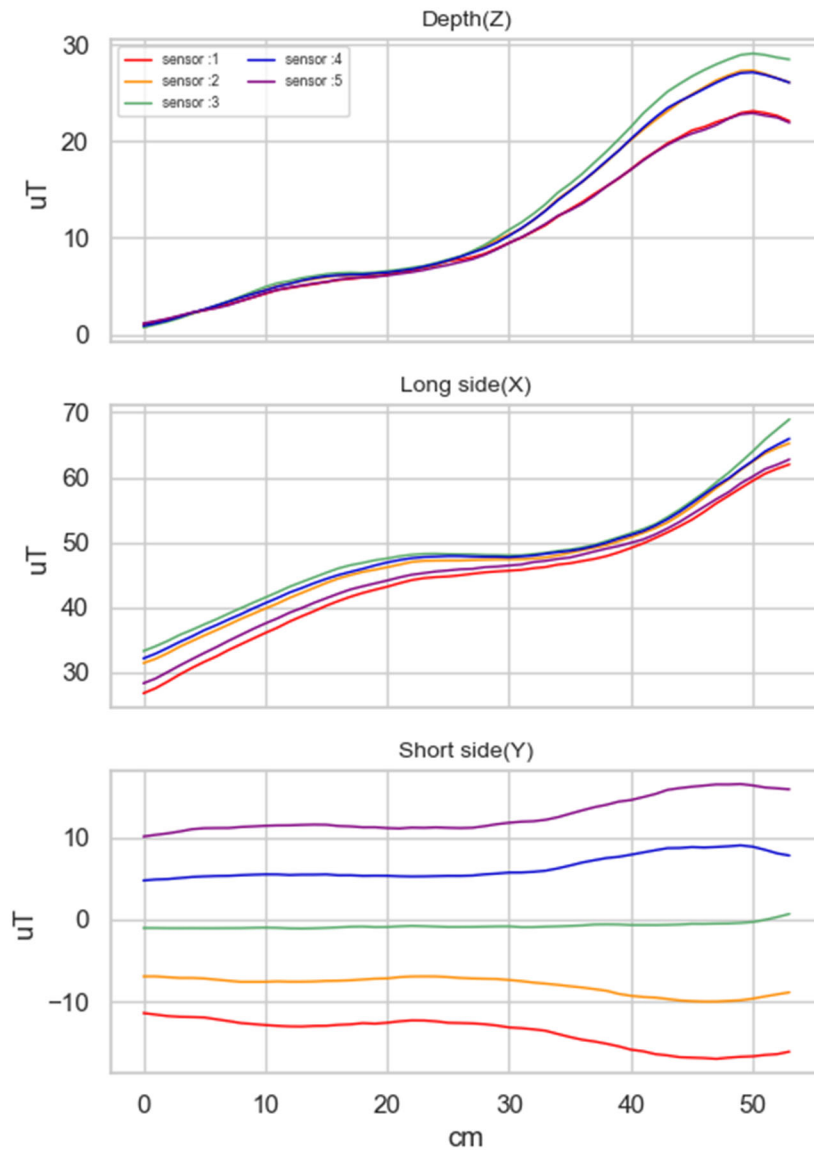


図-4.2.4 磁気ストリーム法・B5-25 (破断の隙間 5mm)

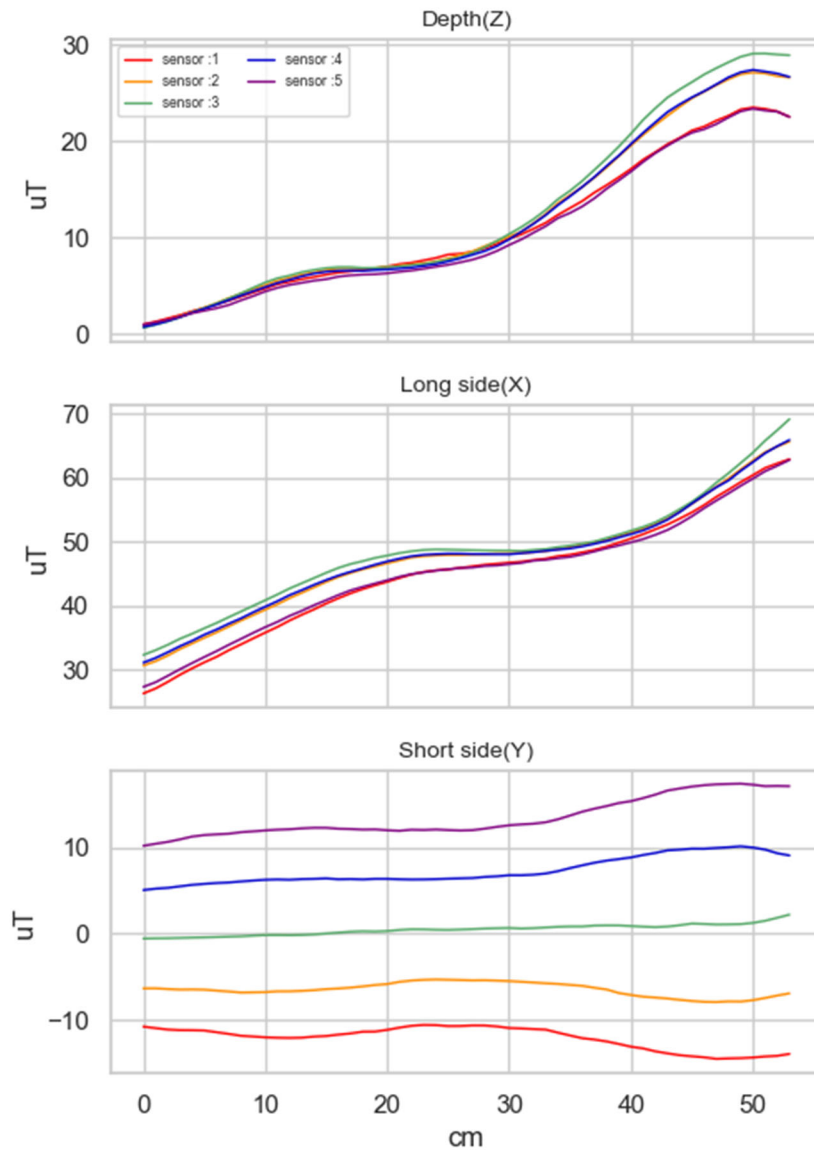


図-4.2.5 磁気ストリーム法・B10-25 (破断の隙間 10mm)



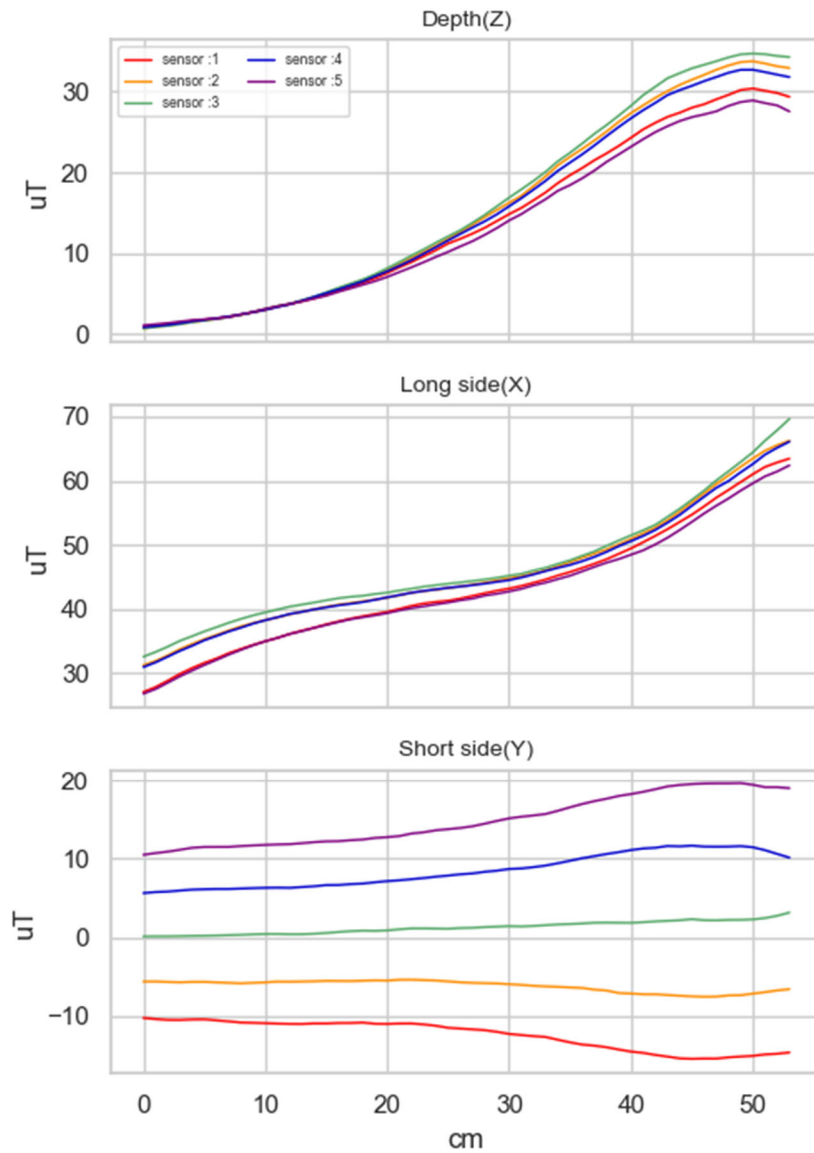


図-4.2.6 磁気ストリーム法・B0-30 (破断の隙間 0mm)

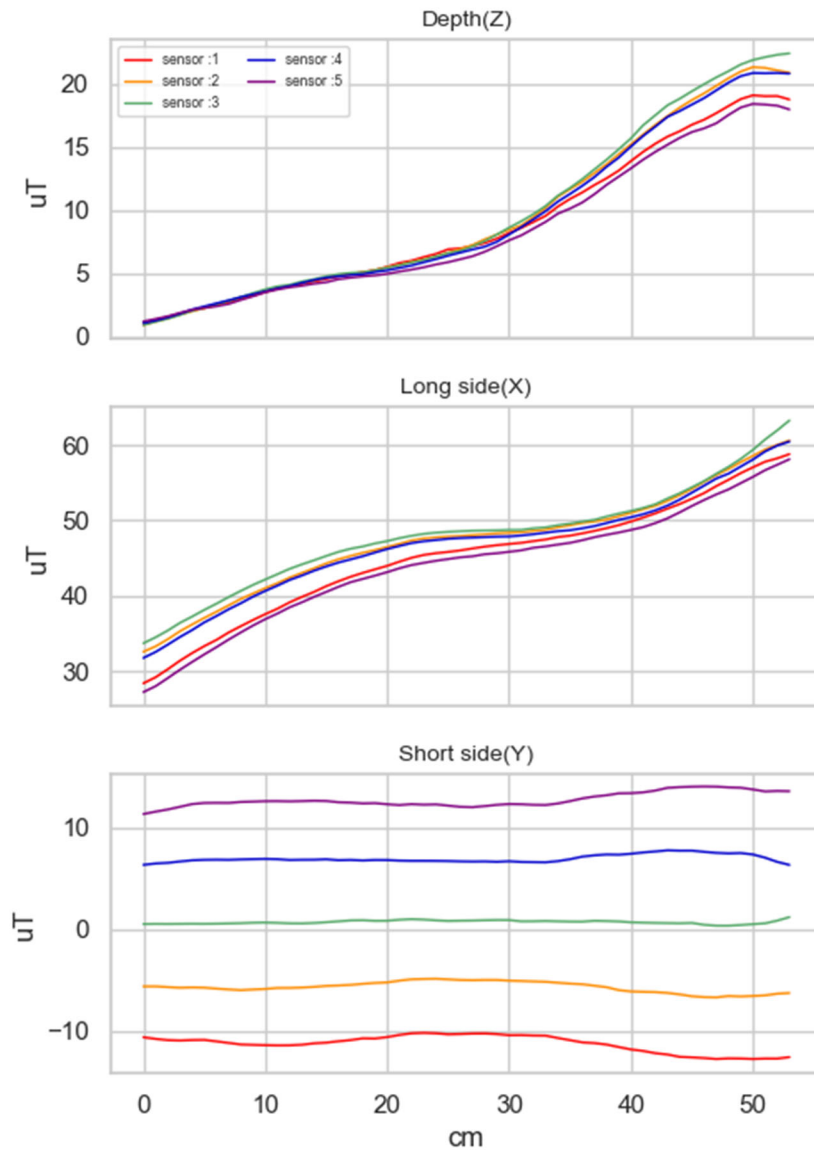
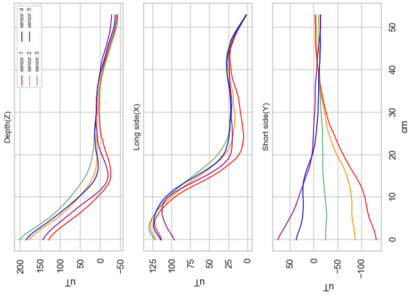
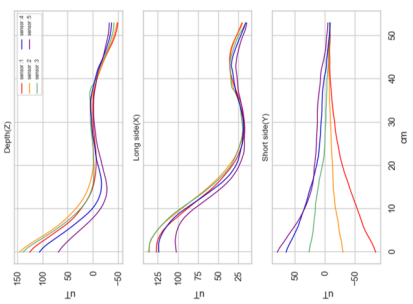
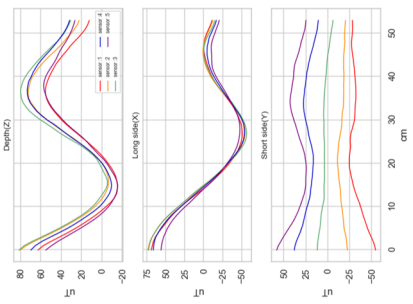
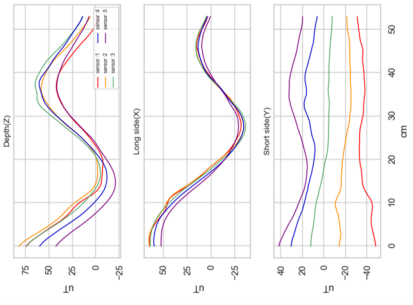
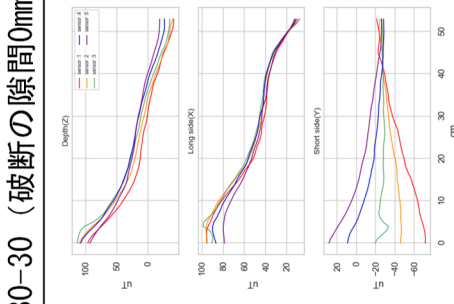
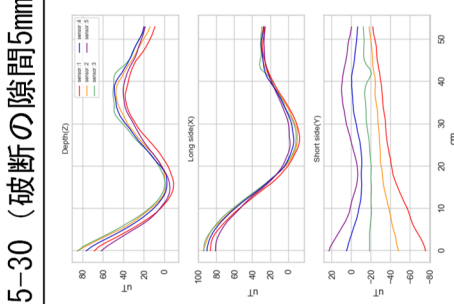


図-4.2.7 磁気ストリーム法・B5-30 (破断の隙間 5mm)

表-4.2.3 漏洩磁束法の計測結果

	S (健全)	B0-25 (破断の隙間0mm)	B5-25 (破断の隙間5mm)	B10-25 (破断の隙間10mm)
<p>芯がぶり125mm</p> 				
<p>芯がぶり150mm</p> 				

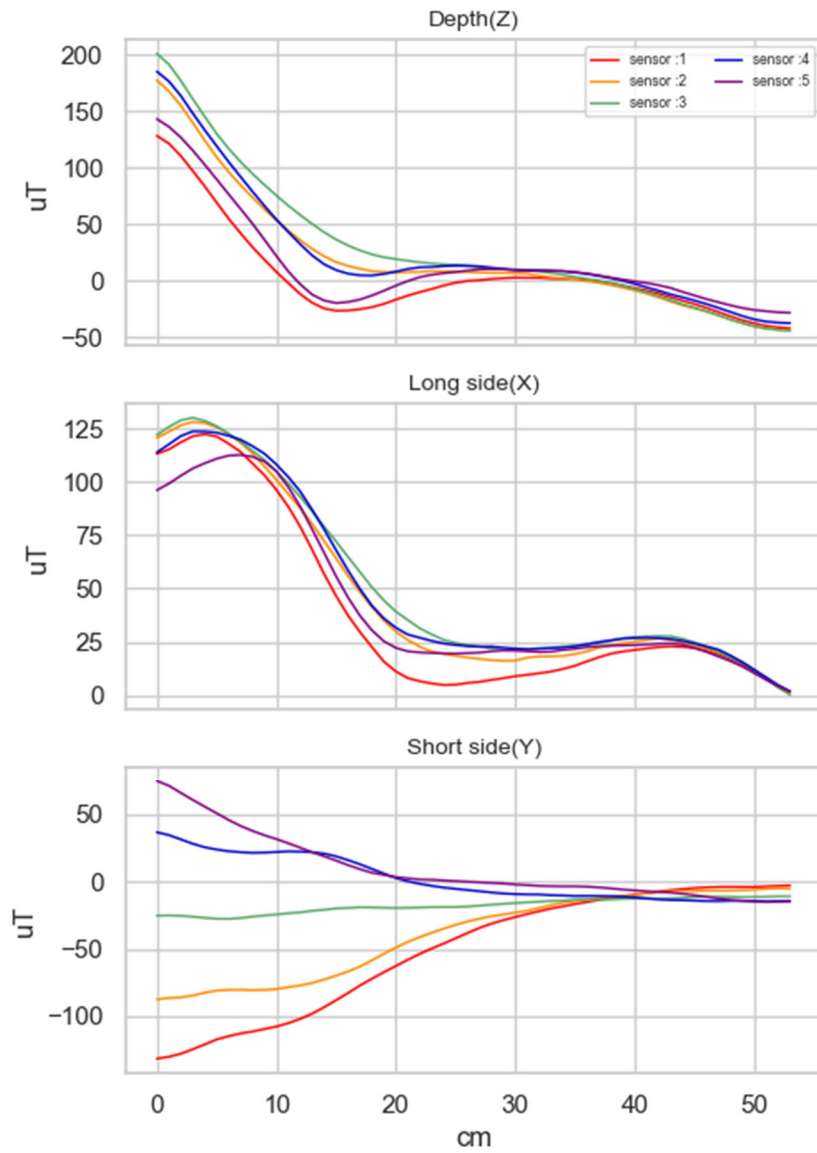


図-4.2.8 漏洩磁束法・S (健全)

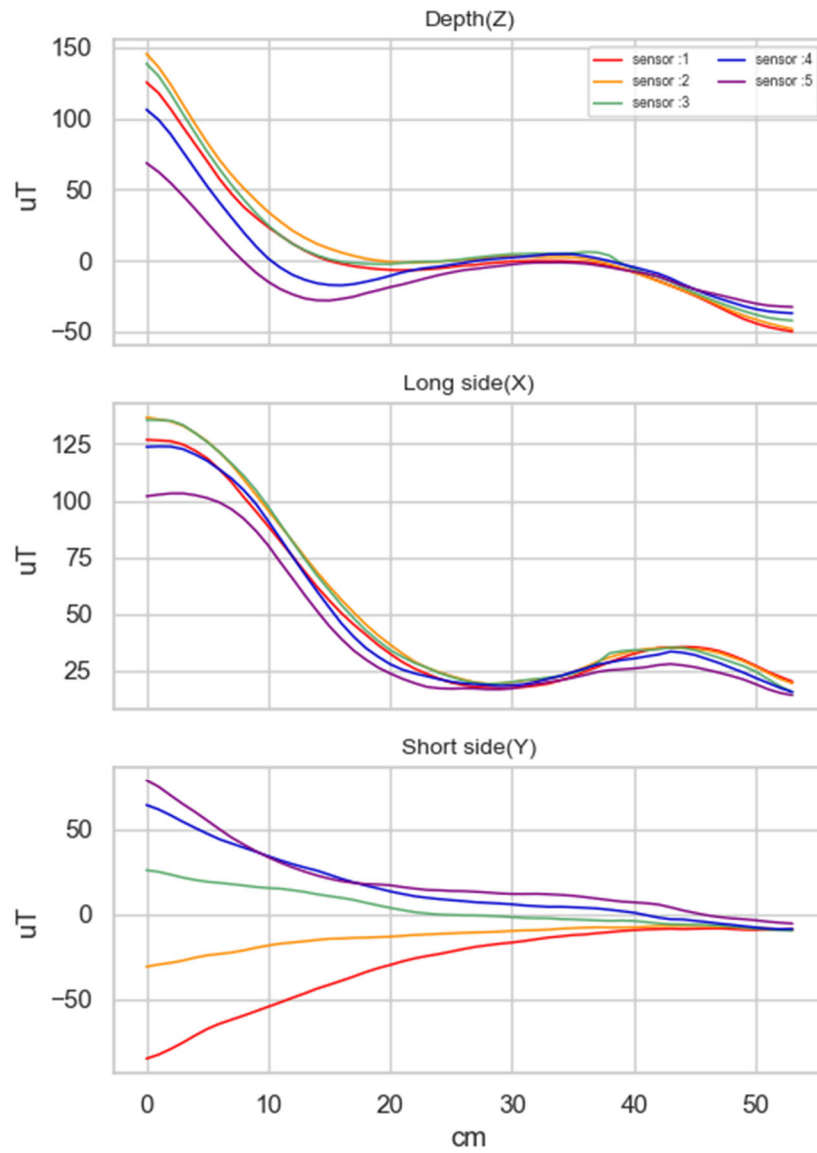


図-4.2.9 漏洩磁束法・B0-25 (破断の隙間 0mm)

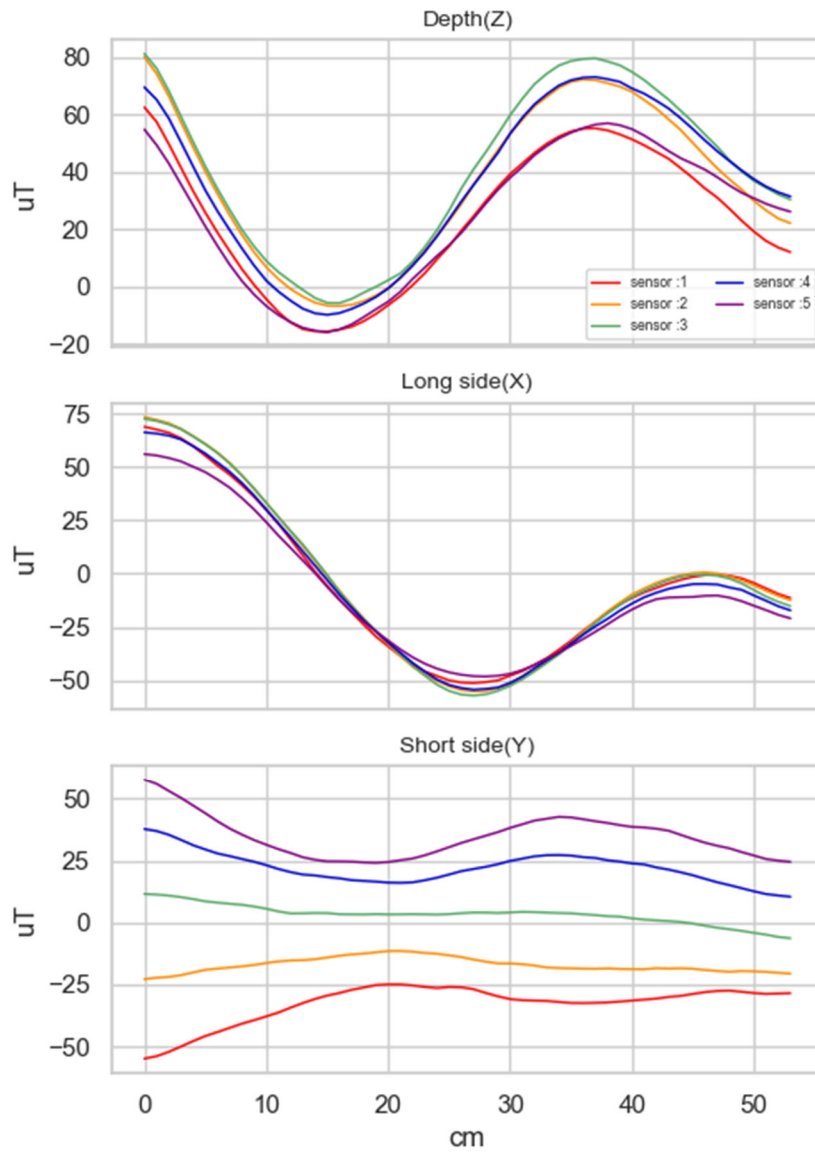


図-4.2.10 漏洩磁束法・B5-25 (破断の隙間 5mm)

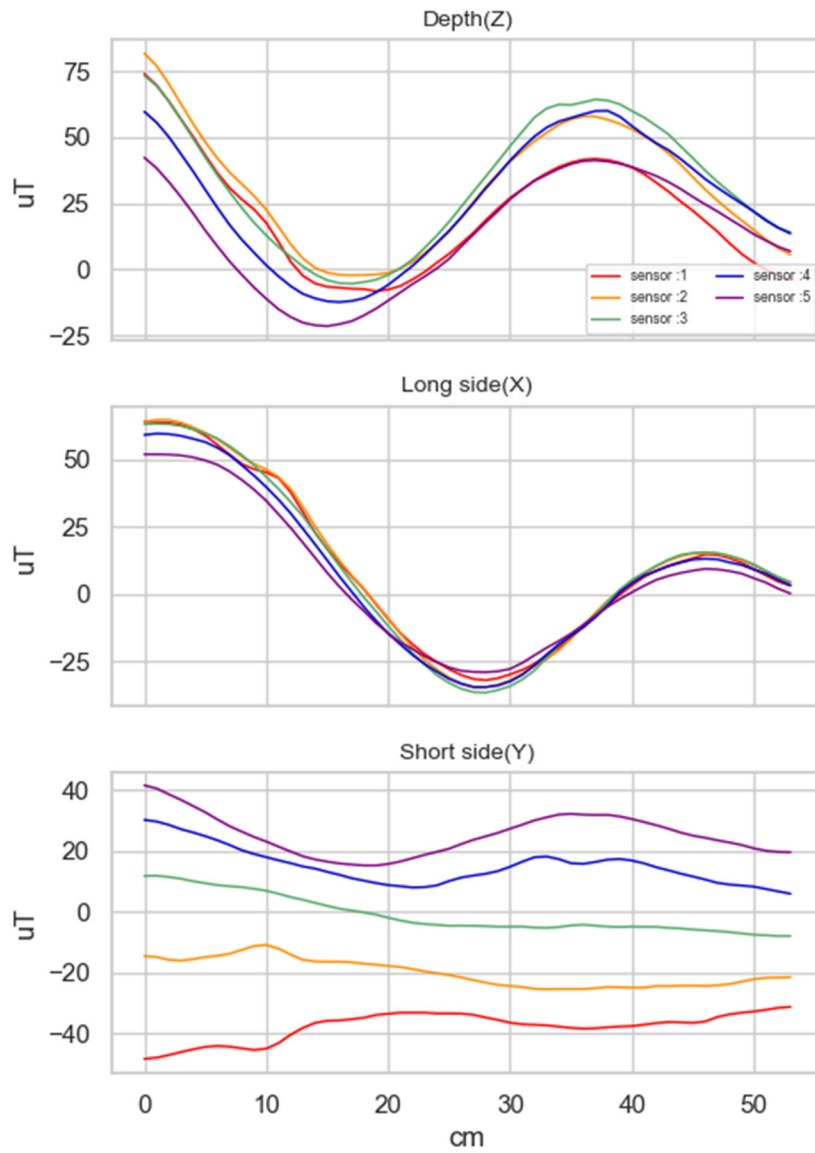


図-4.2.11 漏洩磁束法・B10-25 (破断の隙間 10mm)

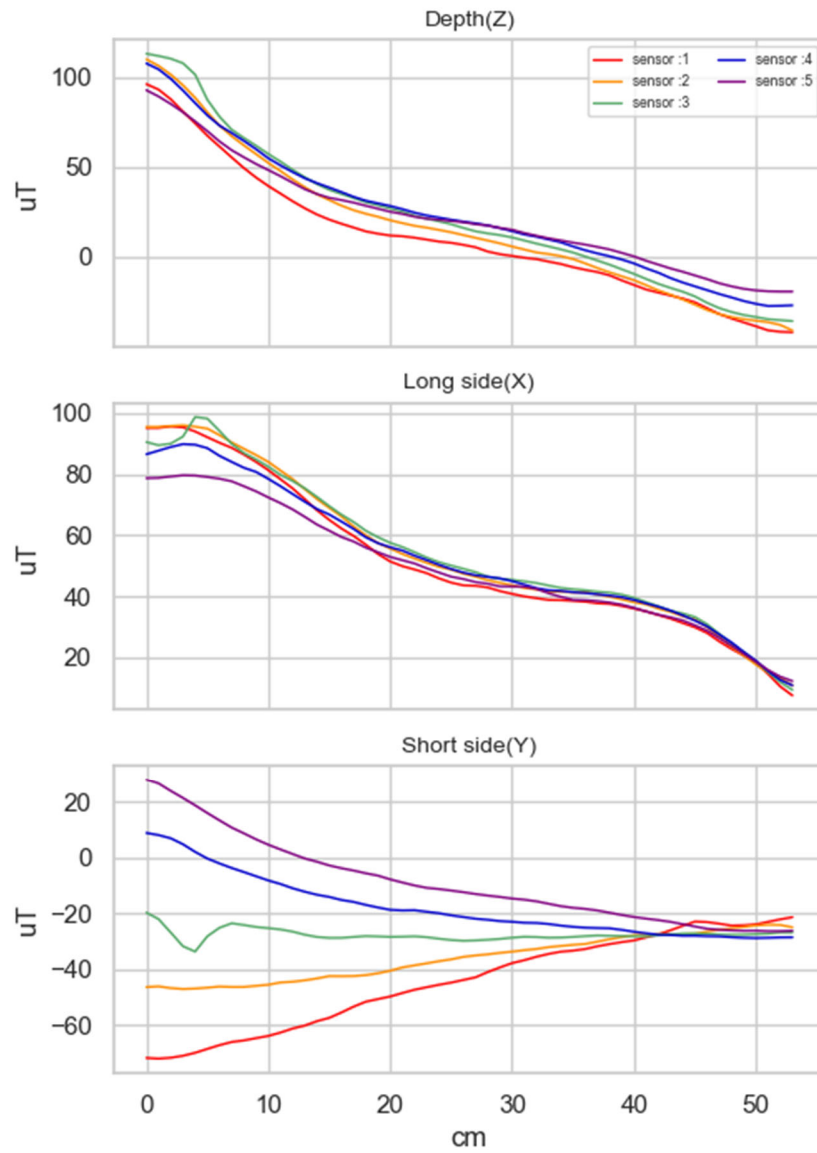


図-4.2.12 漏洩磁束法・B0-30 (破断の隙間 0mm)



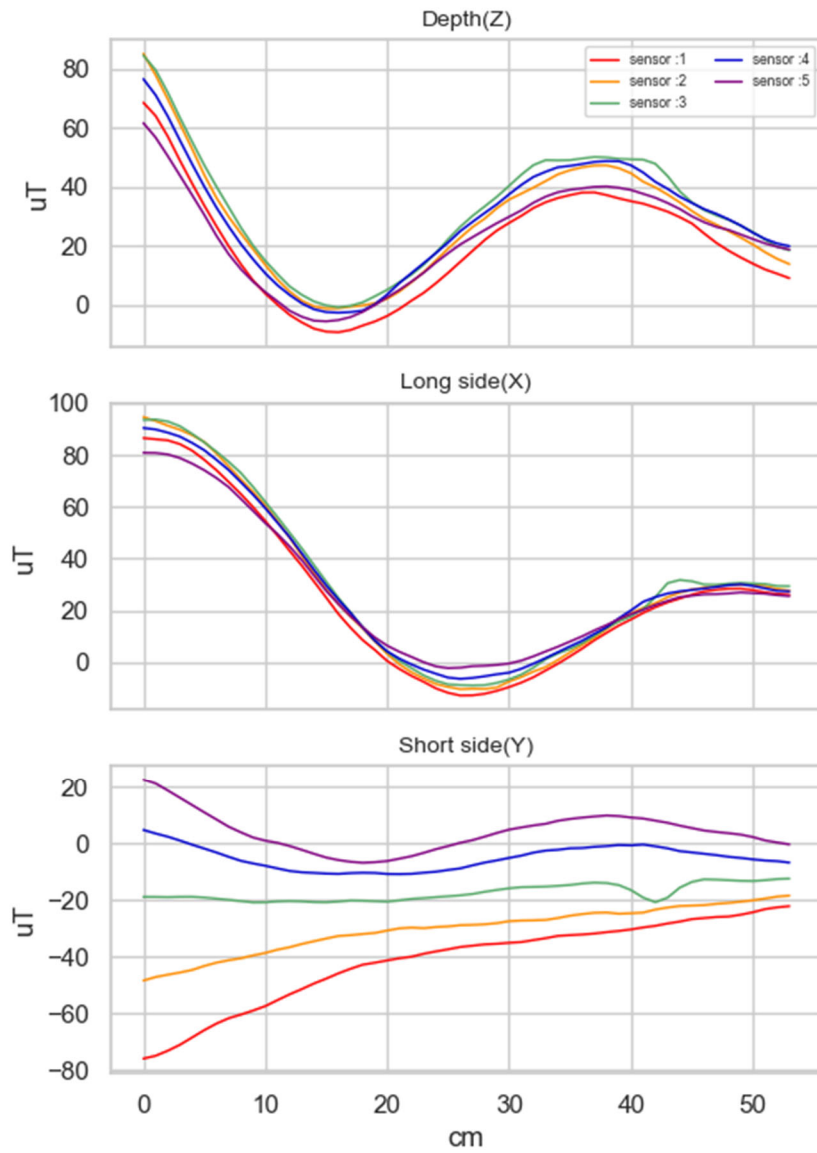


図-4.2.13 漏洩磁束法・B5-30 (破断の隙間 5mm)

### 4.2.3 漏洩磁束法の測定結果の検証

縮小供試体 S において、着磁が正しくできているか確認するため、着磁の向きを反対にして再度計測を行った。通常の着磁をしたダウエルバーは計測起点側が N 極に、終点側が S 極となり、Z 軸（深さ方向）グラフが右下がりとなる。反対方向に着磁をすると、計測起点側が S 極に、終点側が N 極となり、グラフは右上がりとなるはずである。

図-4.2.14 に着磁する方向を反対にした場合の波形を比較した結果を示す。逆向きに着磁した場合でも、Z 軸の波形は右下がりになっている。このことから、今回使用した縮小供試体は、以前に着磁されており、本研究で使用した磁石の磁力が相対的に小さく、上書きできていなかったため、磁束密度の大小関係に基づく損傷評価に用いることは不適切であると考えられる。

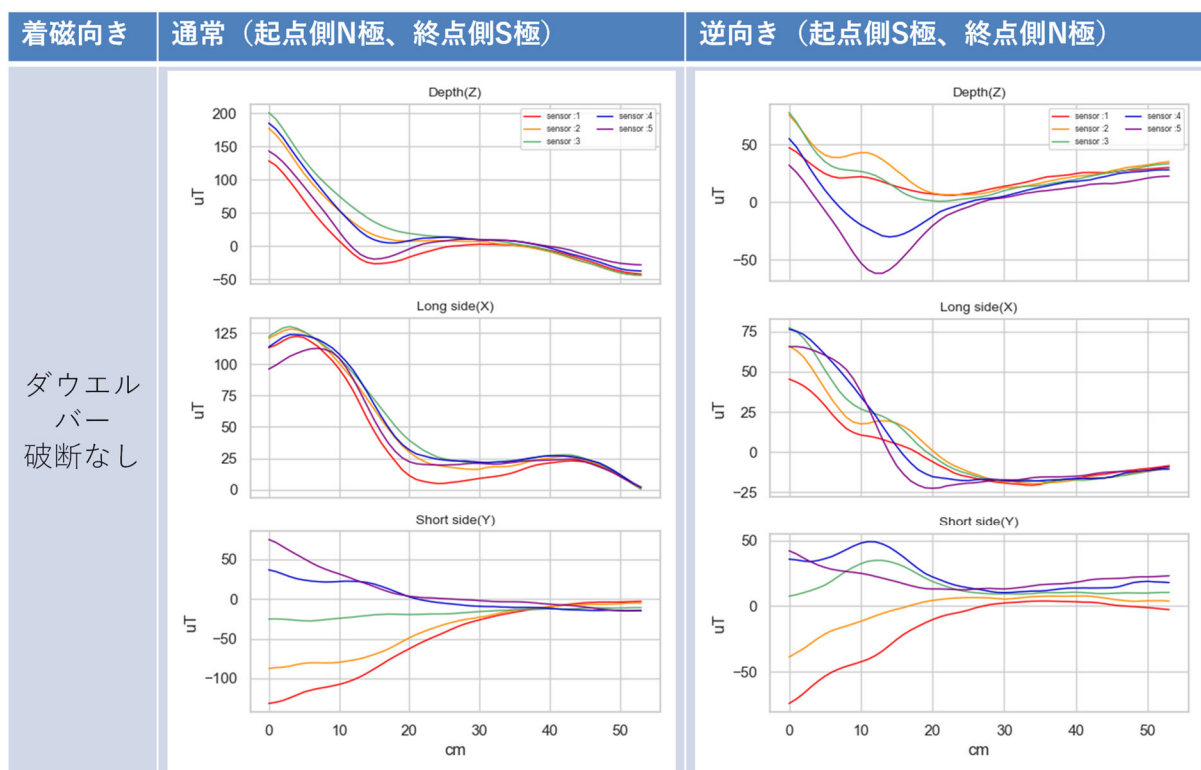


図-4.2.14 着磁方向を反対にした場合の計測結果の比較

#### 4. 2. 4 コンクリート舗装版の縮小供試体に対する実験結果の考察

磁気ストリーム法では、Z 軸の波形変化から、版厚によらずダウエルバーの破断箇所の隙間が 5mm 以上の場合に損傷を検出することが出来た。また、隙間が大きく、版厚が薄いほど磁束密度が大きくなることが明らかになった。

一方、ダウエルバーが健全な箇所と破断しているが隙間が 0mm の場合にはともに健全であると判断されたことから、磁気ストリーム法を適用する場合には、破断の初期段階では損傷として検出することが出来ず、損傷が進展し、破断したダウエルバー間の距離が開いていった時点で損傷として検出することが出来る点に留意する必要がある。

漏洩磁束法では、実験で使用した縮小供試体が既に着磁しており、今回使用した磁石では上書きできなかったことから、正しい測定結果を得ることが出来なかった。一方、実道においては、舗装版の点検履歴や点検時に使用した検査手法が明らかでない場合が多く、また過去に漏洩磁束法を適用し、強力な磁石で着磁されている可能性もある。仮にその着磁が不適切であった場合にも上書きできない状態で検査してしまう可能性が否定できない。

磁気ストリーム法は、環境磁場ノイズを除去して計測を行うため、着磁の状態によらずに計測可能であることから、今回使用した縮小供試体においても、損傷箇所の抽出をすることが可能であった。この点において、磁気ストリーム法は漏洩磁束法と比較して、実道における適用性が高い手法であると考えられる。

## 第5章 舗装走行実験場における検証実験

### 5.1 新設コンクリート走行工区での実験

#### 5.1.1 実験方法

新設コンクリート走行工区では、図-5.1.1に示すように、1目地あたり13本のダウエルバーを設置し、No.5とNo.10の2本のダウエルバーを施工時に意図的に破断させている。このうち、No.5は破断した鋼材同士を非接触の状態に、No.10は接触した状態にしている。本節では、13本のダウエルバーを対象に磁気ストリーム法による測定を実施した。

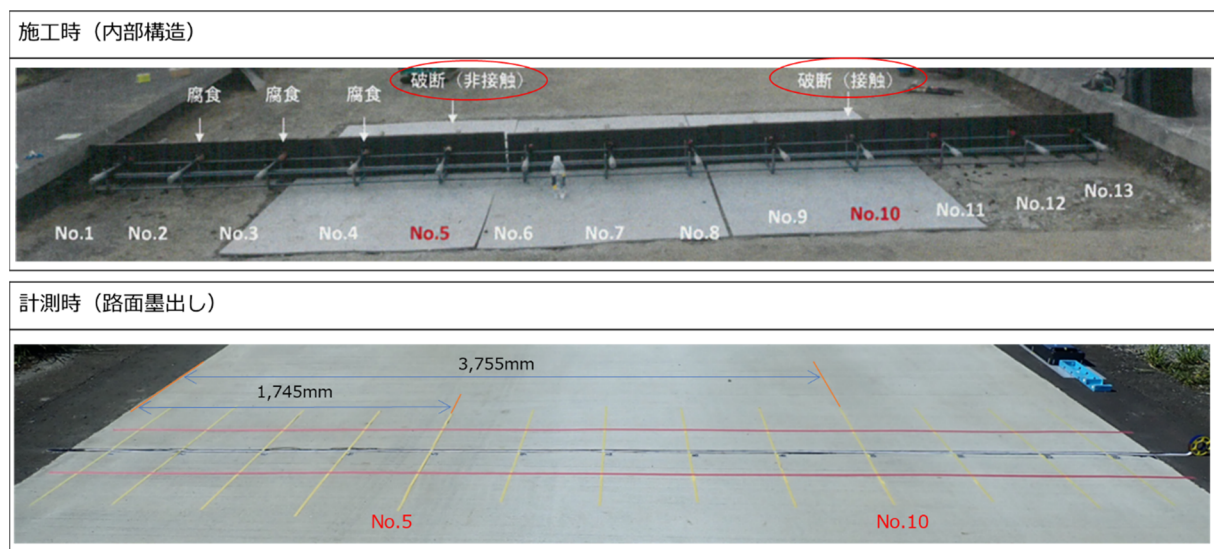


図-5.1.1 模擬損傷工区（施工時・計測時）

#### 5.1.2 実験結果

ダウエルバー直上に設置されたセンサ3の測定結果から、No.5とNo.10のみZ軸の中央部で破断の信号が現れ、ダウエルバーの破断が検出された。No.5よりもNo.10の信号が緩慢なのは、No.10では破断させた鋼材を接触させているためであると考えられる。またNo.5と10を除く波形はいずれも減衰は確認されなかった。

表-5.1.1～表-5.1.4に13本の計測結果を示し、表-5.1.5にそのうち健全と判定したNo.1と破断と判定したNo.5、No.10のセンサ3の結果を示す。

表-5. 1. 1 磁気ストリーム法での計測結果 No.1~4 (Z 軸)

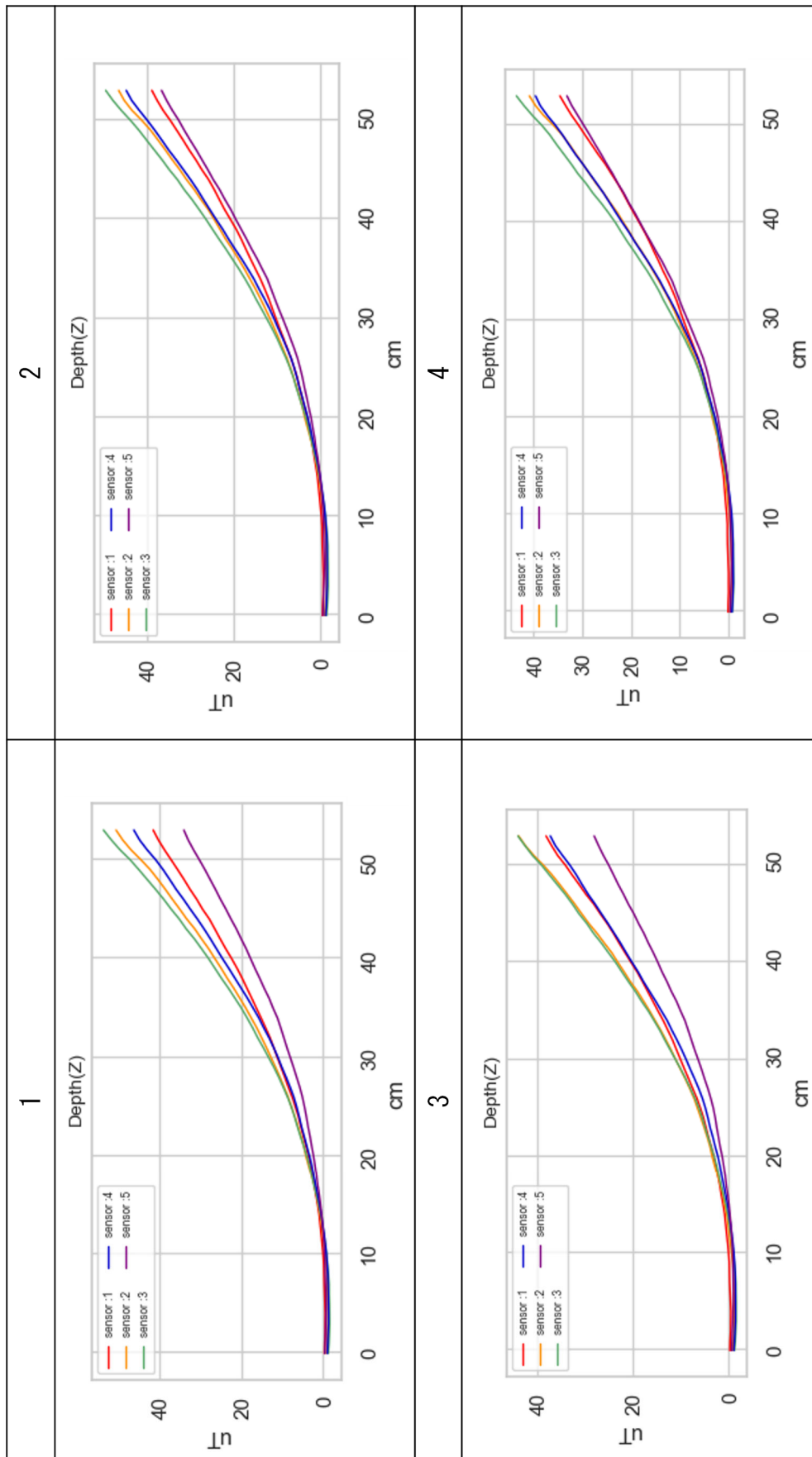


表-5.1.2 磁気ストリーム法での計測結果 No.5~8 (Z軸)

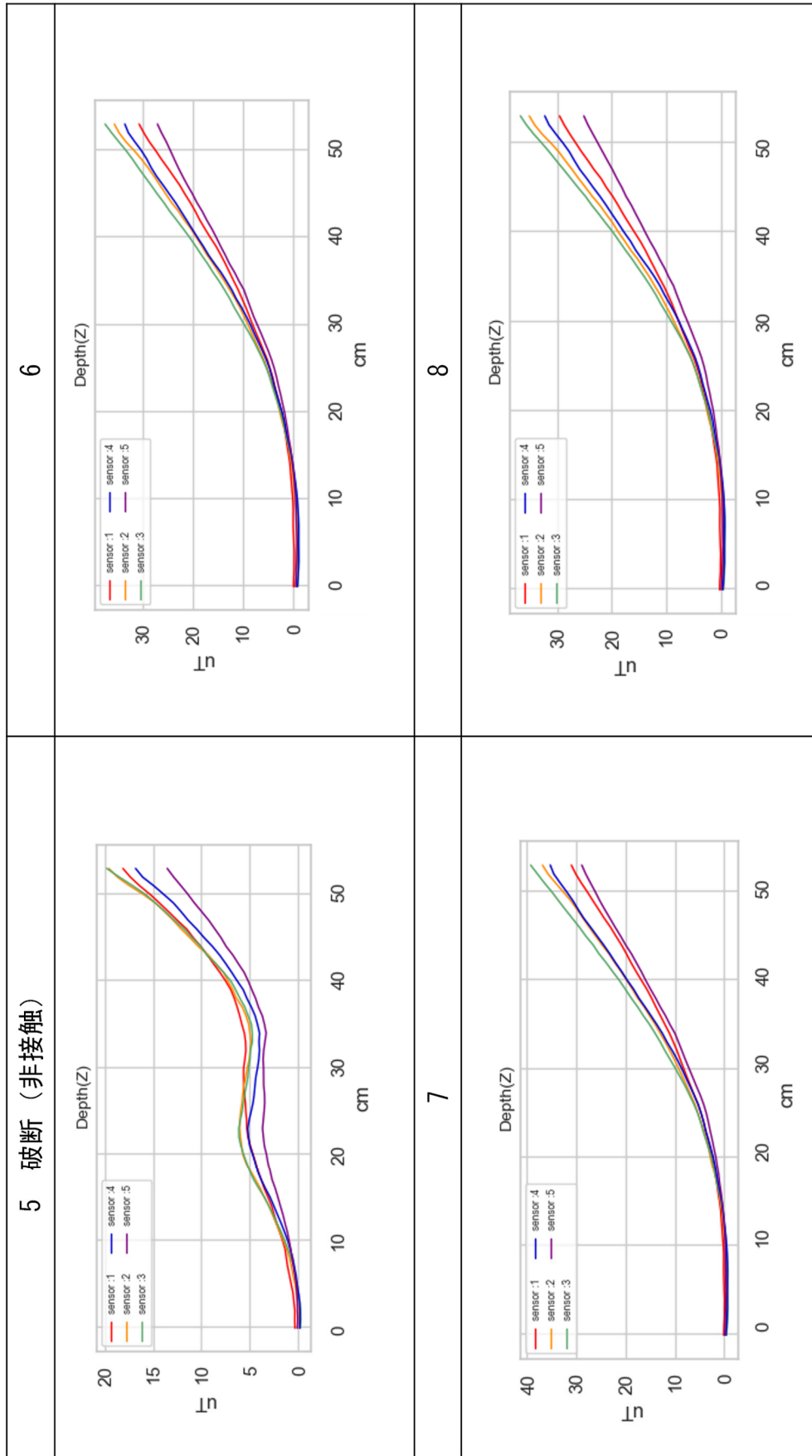


表-5.1.3 磁気ストリーム法での計測結果 No.9~12 (Z軸)

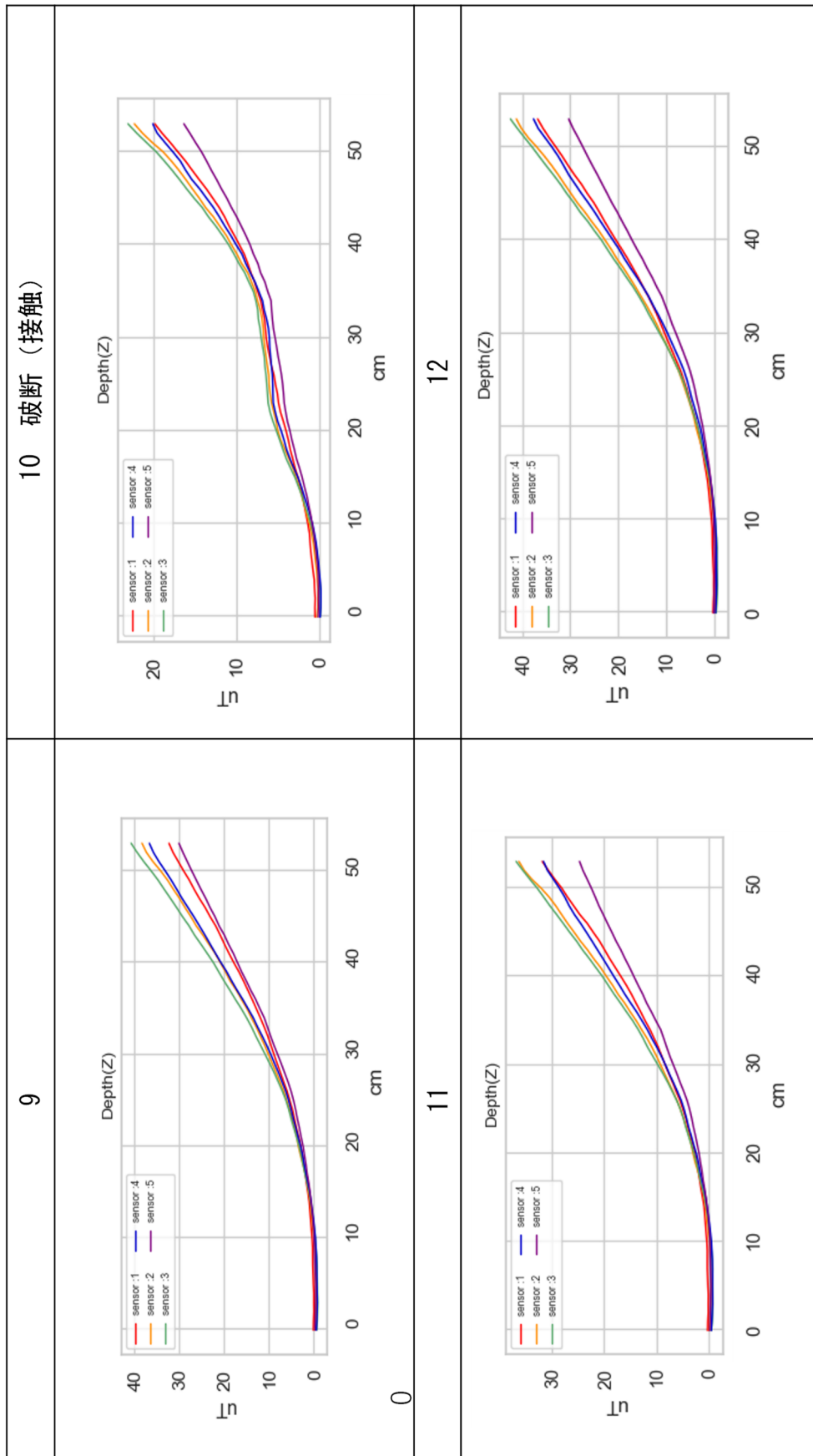


表-5.1.4 磁気ストリーム法での計測結果 No.13 (Z 軸)

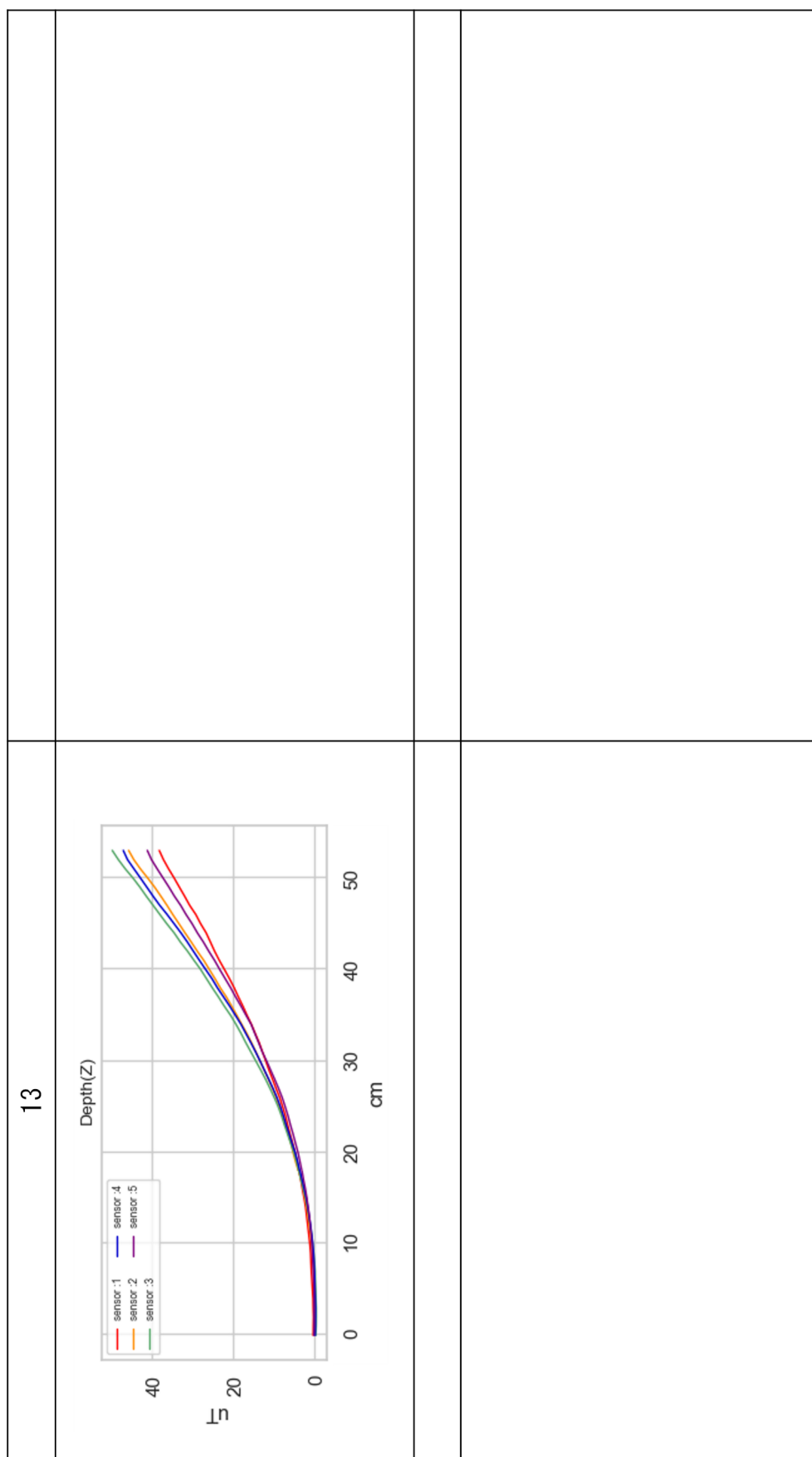
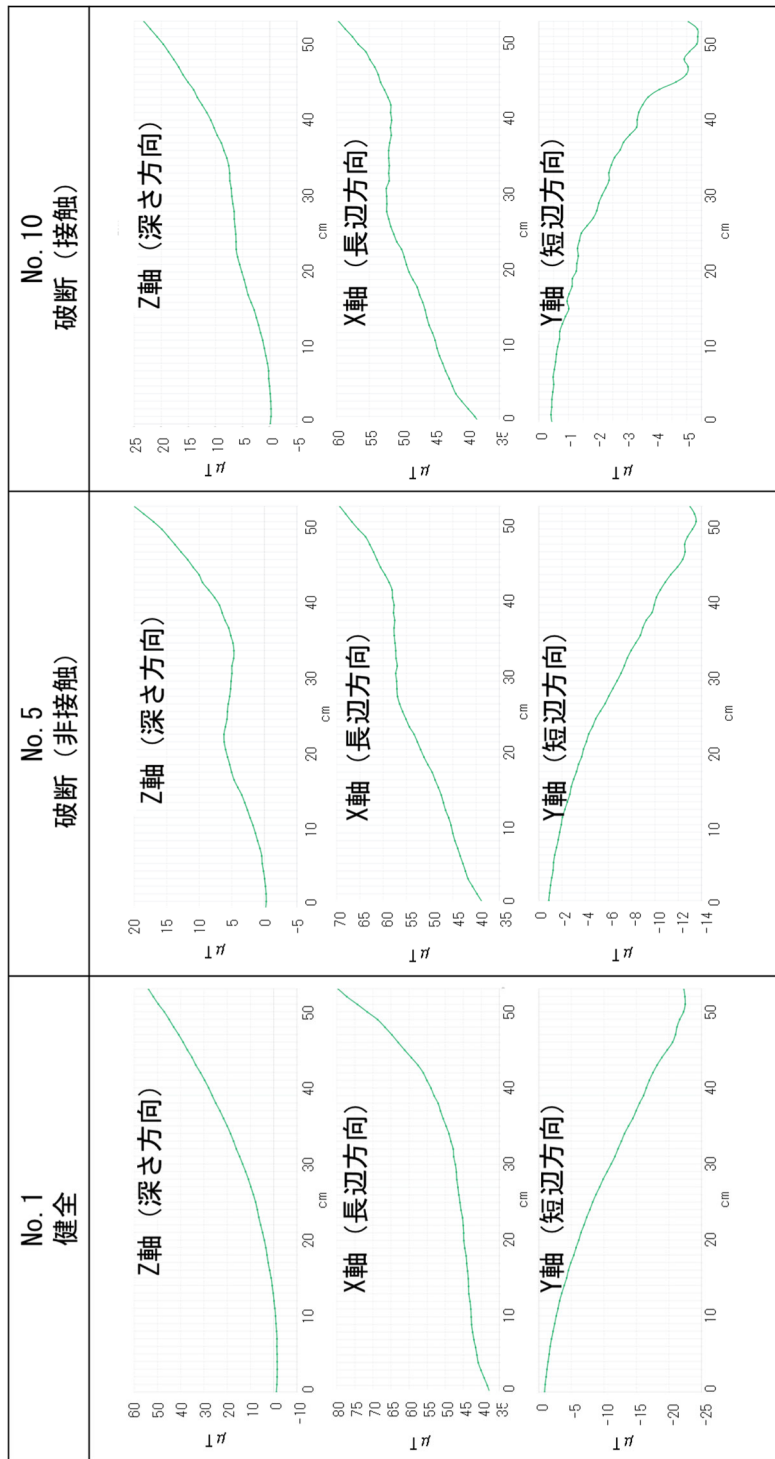




表-5.1.5 センサ3計測結果No.1・No.5・No.10



## 5. 2 既設コンクリート走行工区での実験

### 5. 2. 1 実験方法

図-5.2.1に(国研)土木研究所舗装走行実験場内に設置されている既設コンクリート走行工区の概要を示す。図-5.2.1では、車両進行方向に向かって左側から各目地のダウエルバー番号を1, 2, 3...12としており、本章では目地No.10の1本目のダウエルバーを「10-1」のように記載する。

本研究では、目地No.10, No.12, No.16に設置されているダウエルバー36本を対象として磁気ストリーム法で計測した。なお、当該ダウエルバーは施工時には健全な状態で設置されているが、経年により破断が起きているかどうかは不明であるため、本研究では参考として測定した。

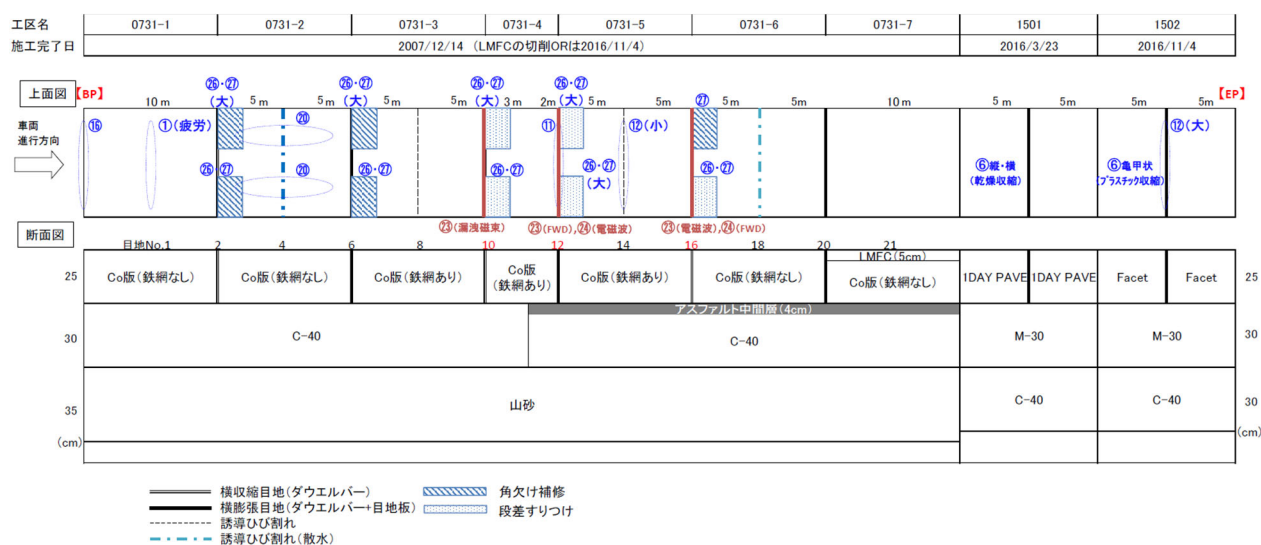


図-5.2.1 舗装走行実験場(既設コンクリート走行工区)

### 5. 2. 2 実験結果

10-1~10-12, 12-1~12-12, 16-1~16-12の波形は互いに近似し、いずれも破断波形は確認されず、既設コンクリート走行工区にはダウエルバーの破断がないと判断された。測定対象としたダウエルバーのZ軸波形を以下に示す。

表-5.2.1 目地 No.10 の計測結果 10-1~10-4 (Z 軸)

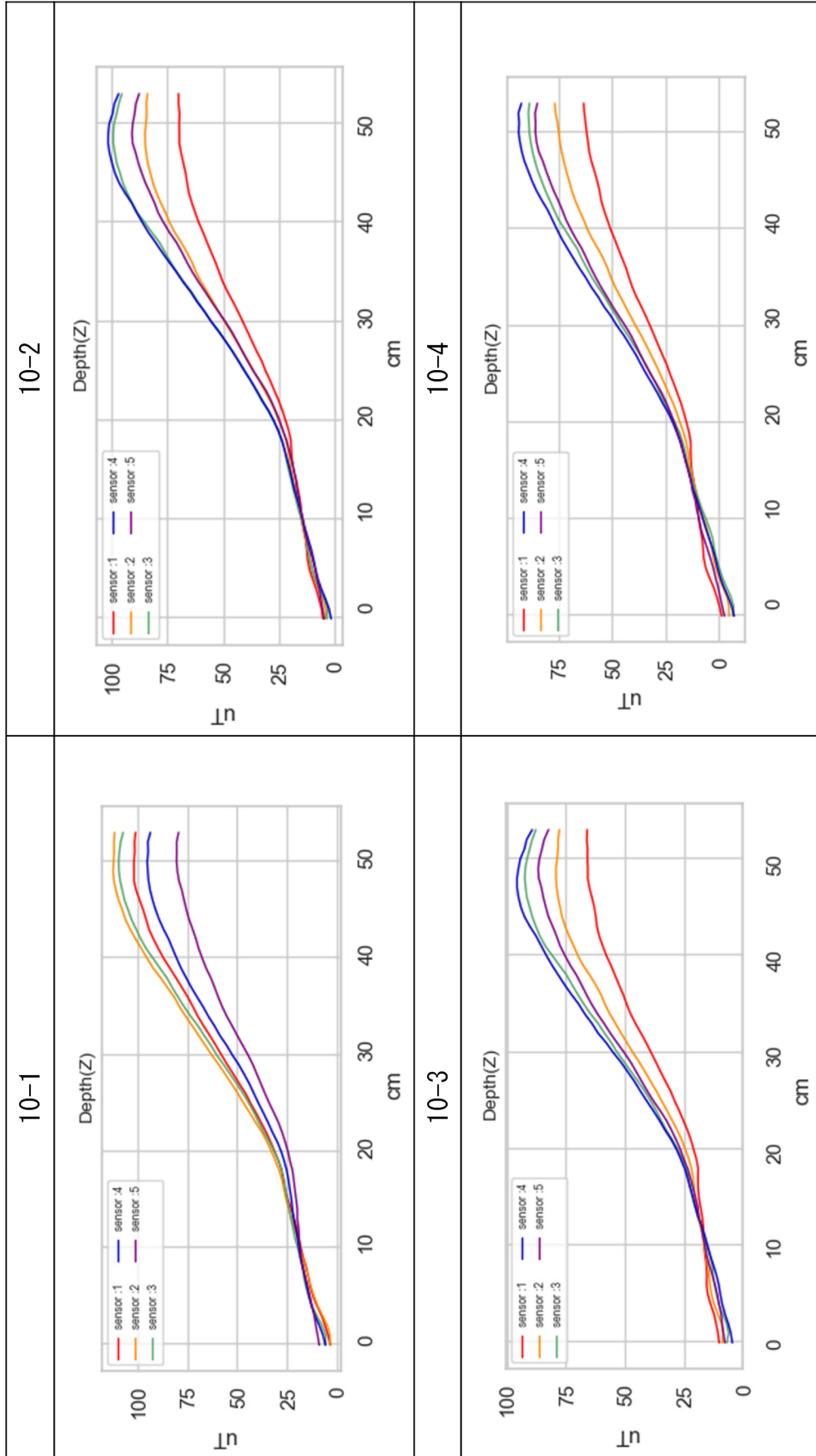


表-5.2.2 目地 No.10 の計測結果 10-5~10-8 (Z 軸)

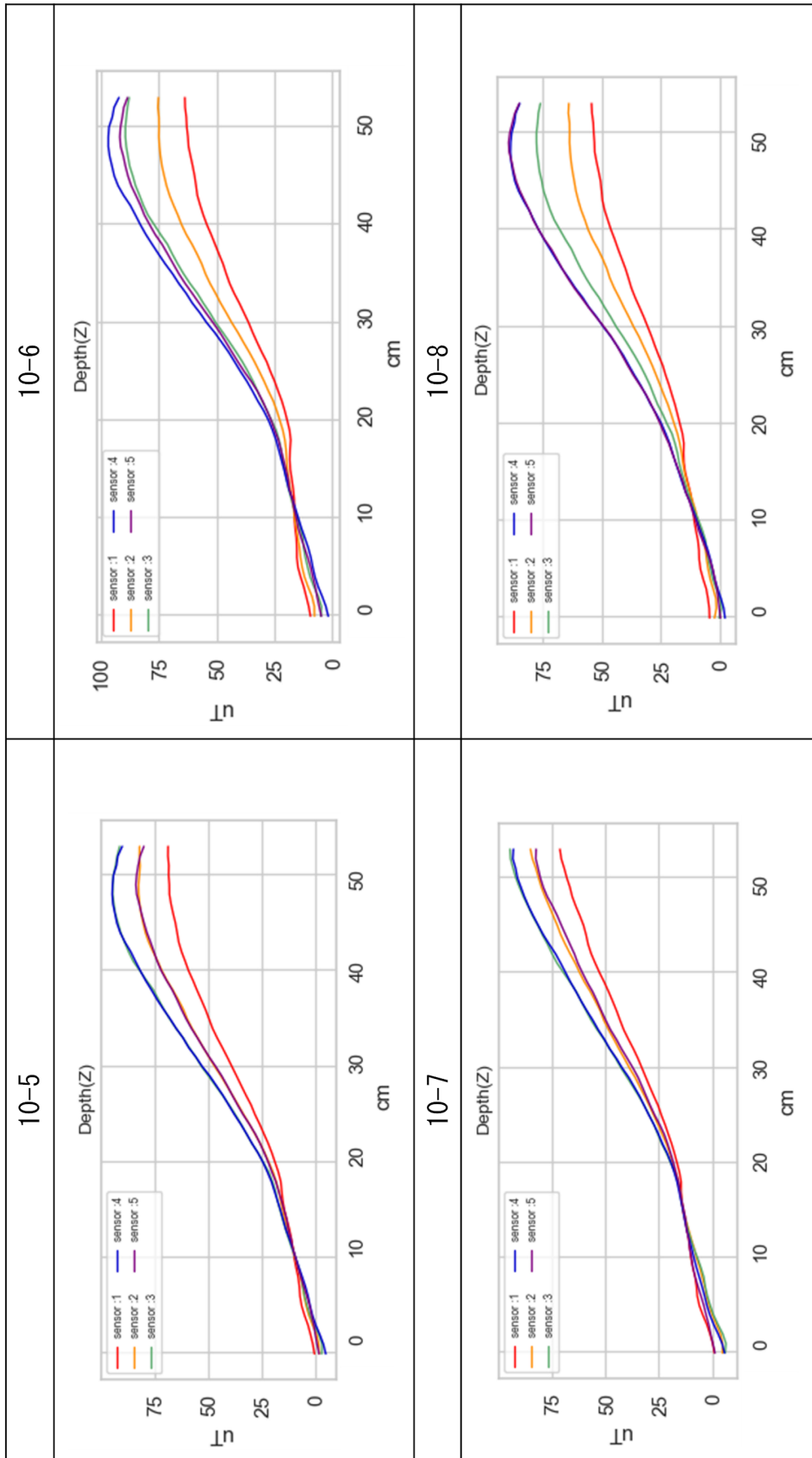


表-5.2.3 目地 No.10 の計測結果 10-9~10-12 (Z 軸)

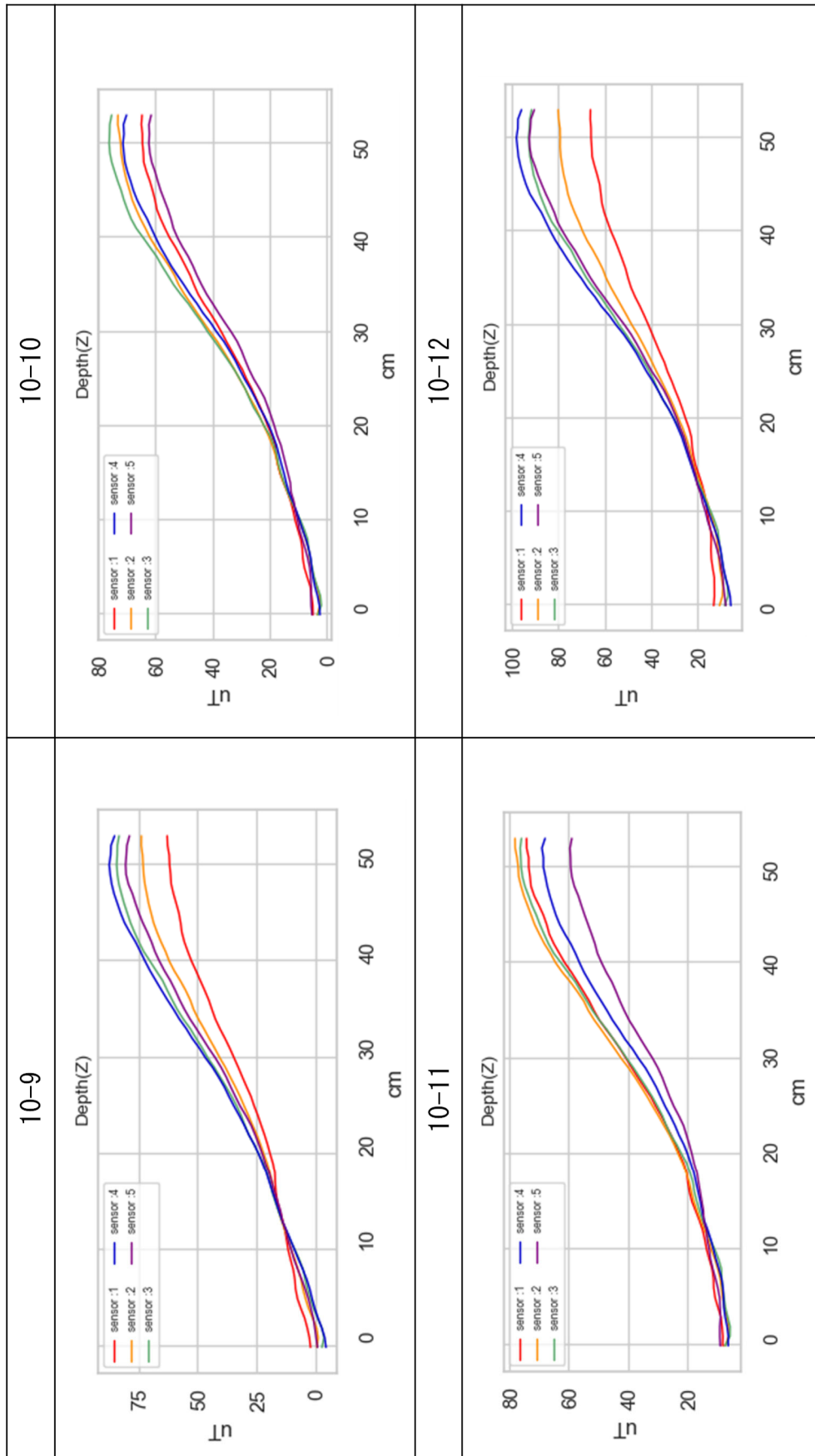


表-5.2.4 目地 No.12 の計測結果 12-1~12-4 (Z 軸)

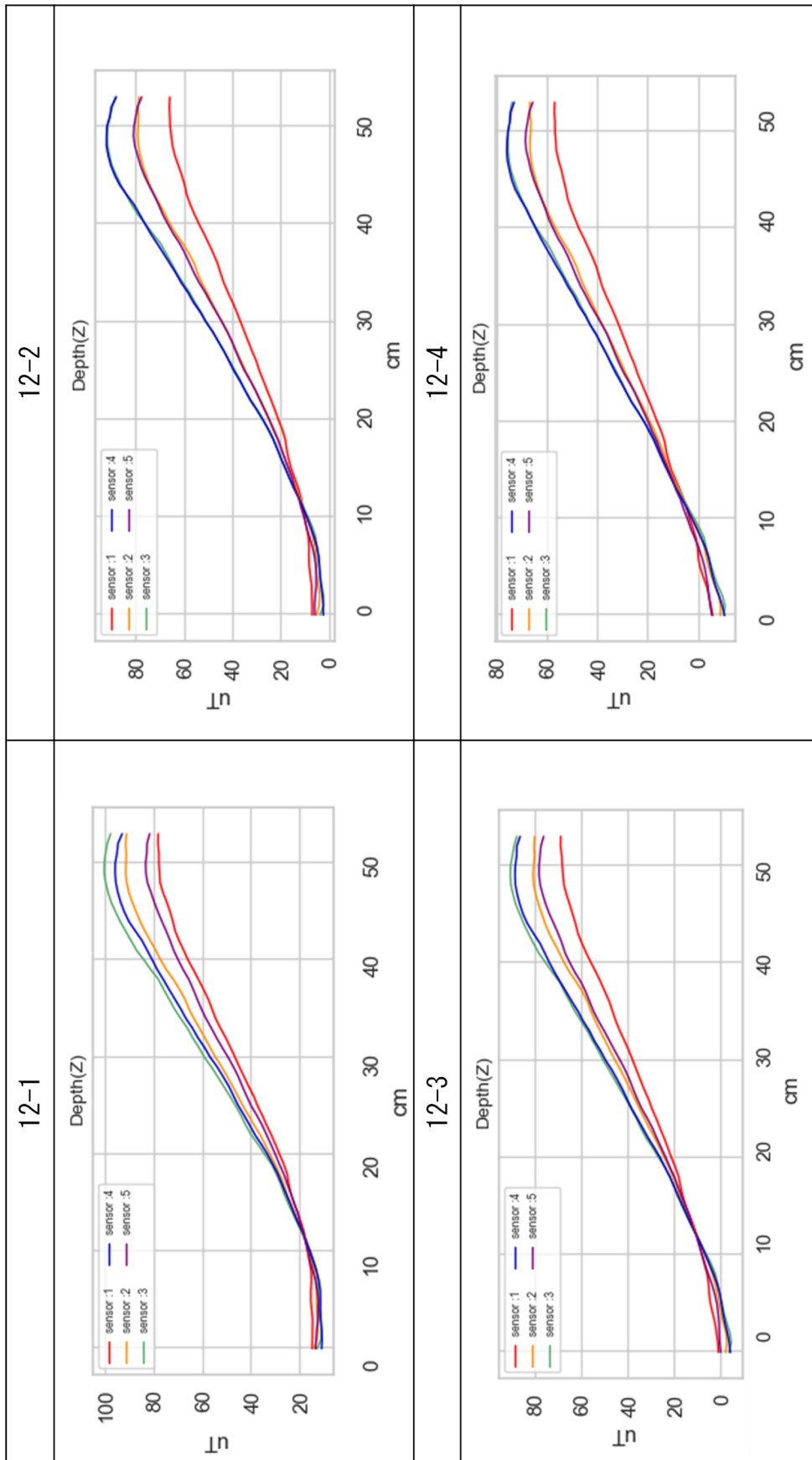


表-5.2.5 目地 No.12 の計測結果 12-5~12-8 (Z 軸)

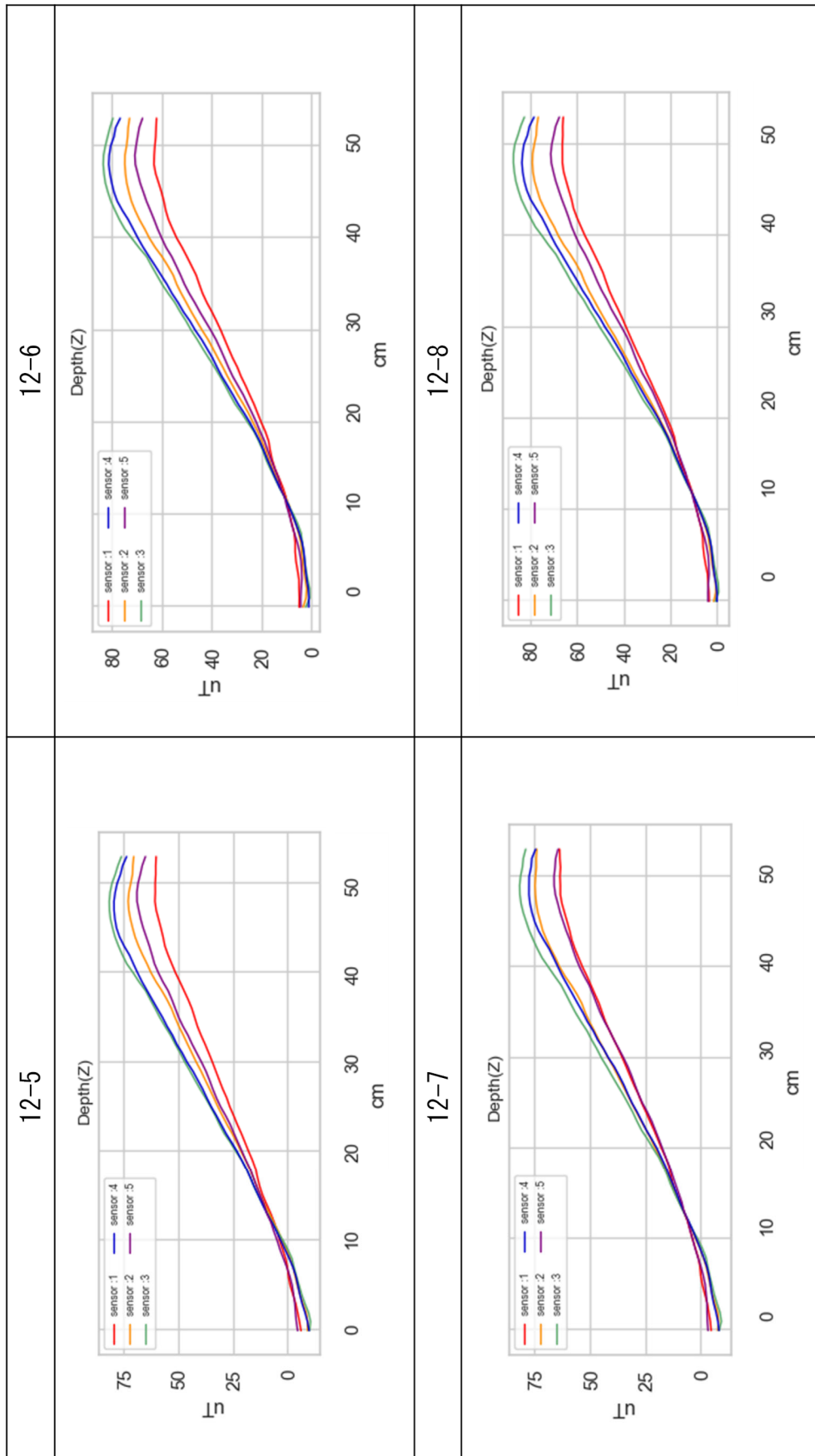


表-5.2.6 目地 No.12 の計測結果 12-9～12-12 (Z 軸)

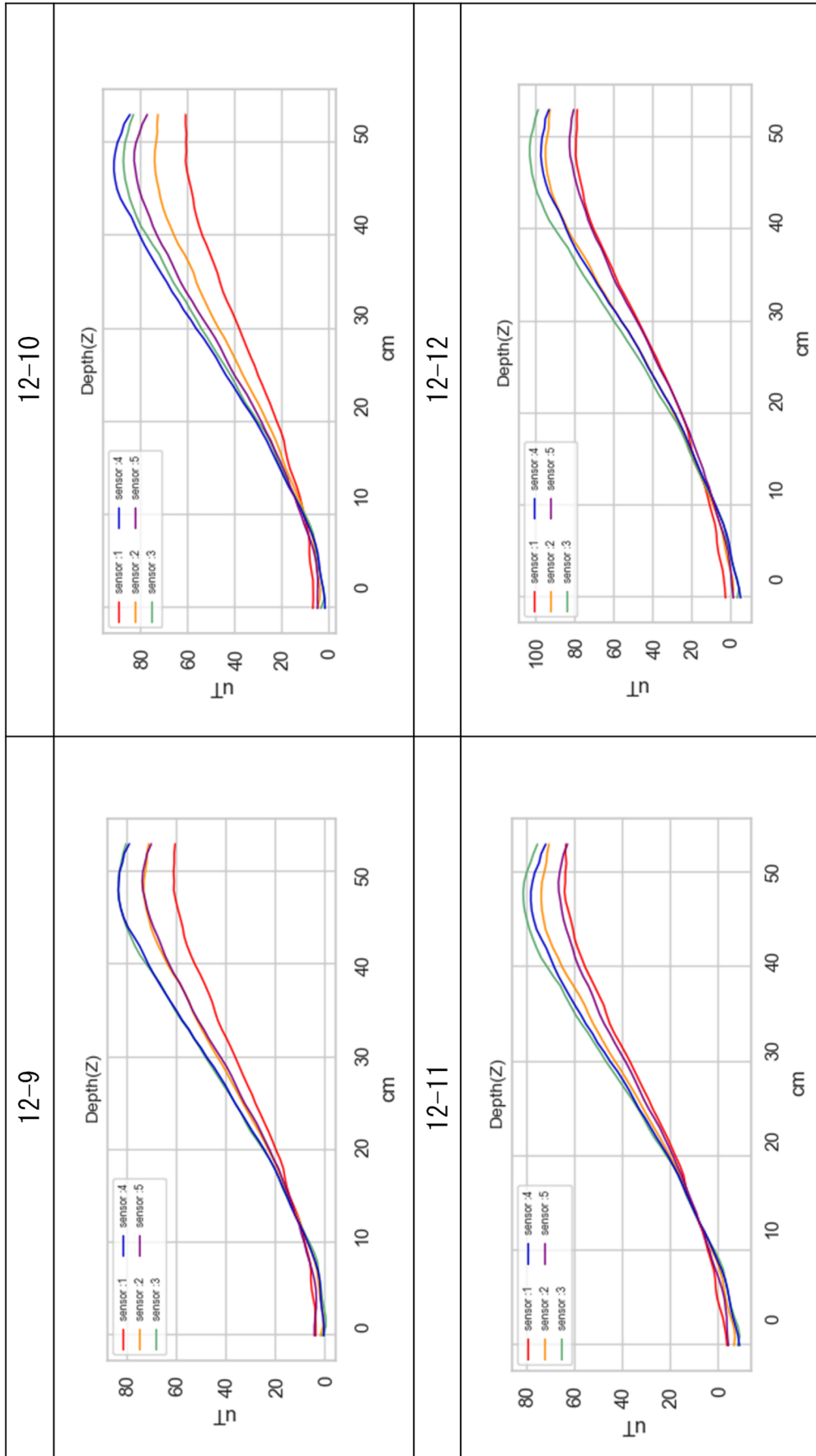




表-5.2.7 目地 No.16 の計測結果 16-1~16-4 (Z 軸)

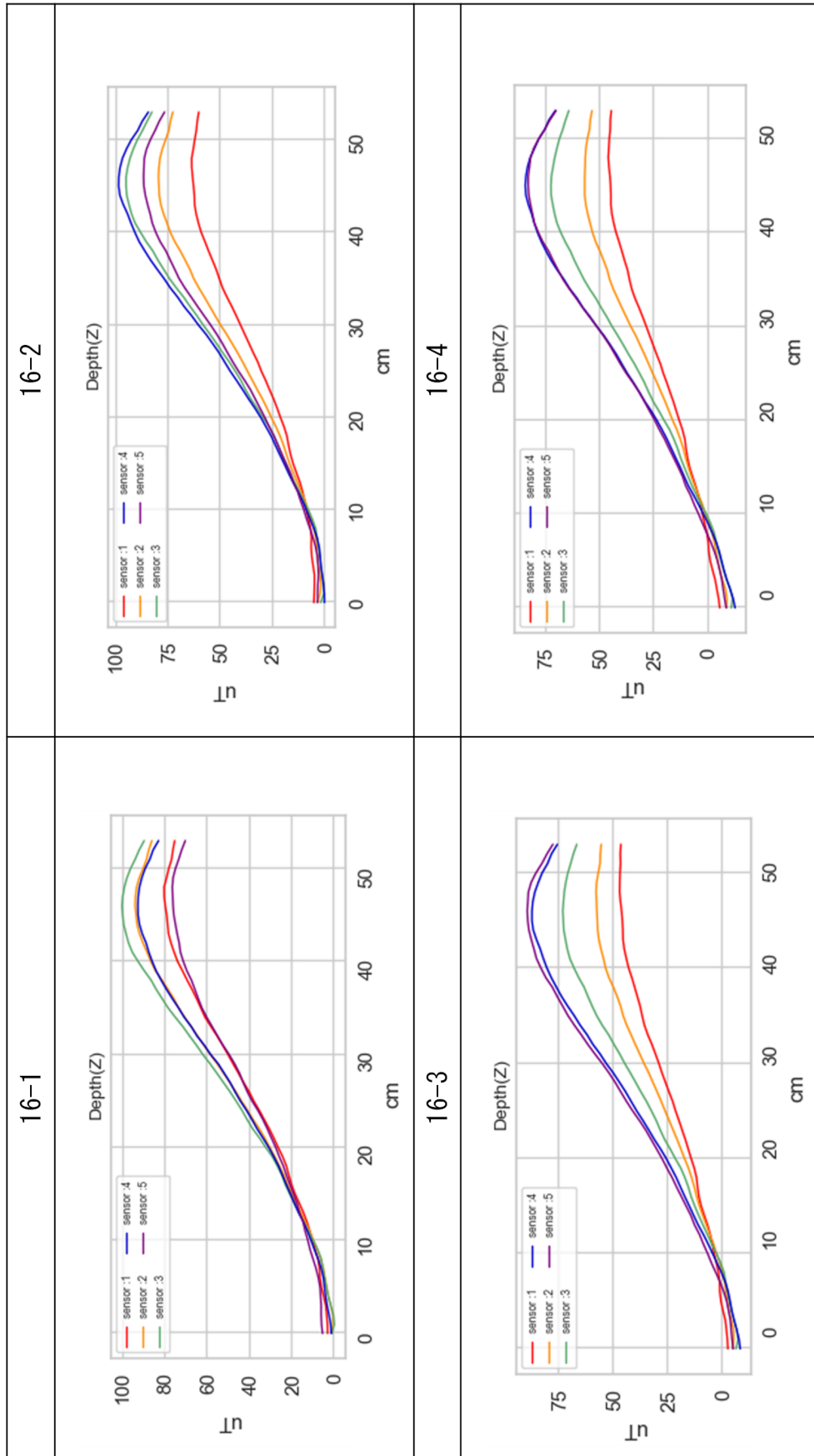


表-5.2.8 目地 No.16 の計測結果 16-5~16-8 (Z 軸)

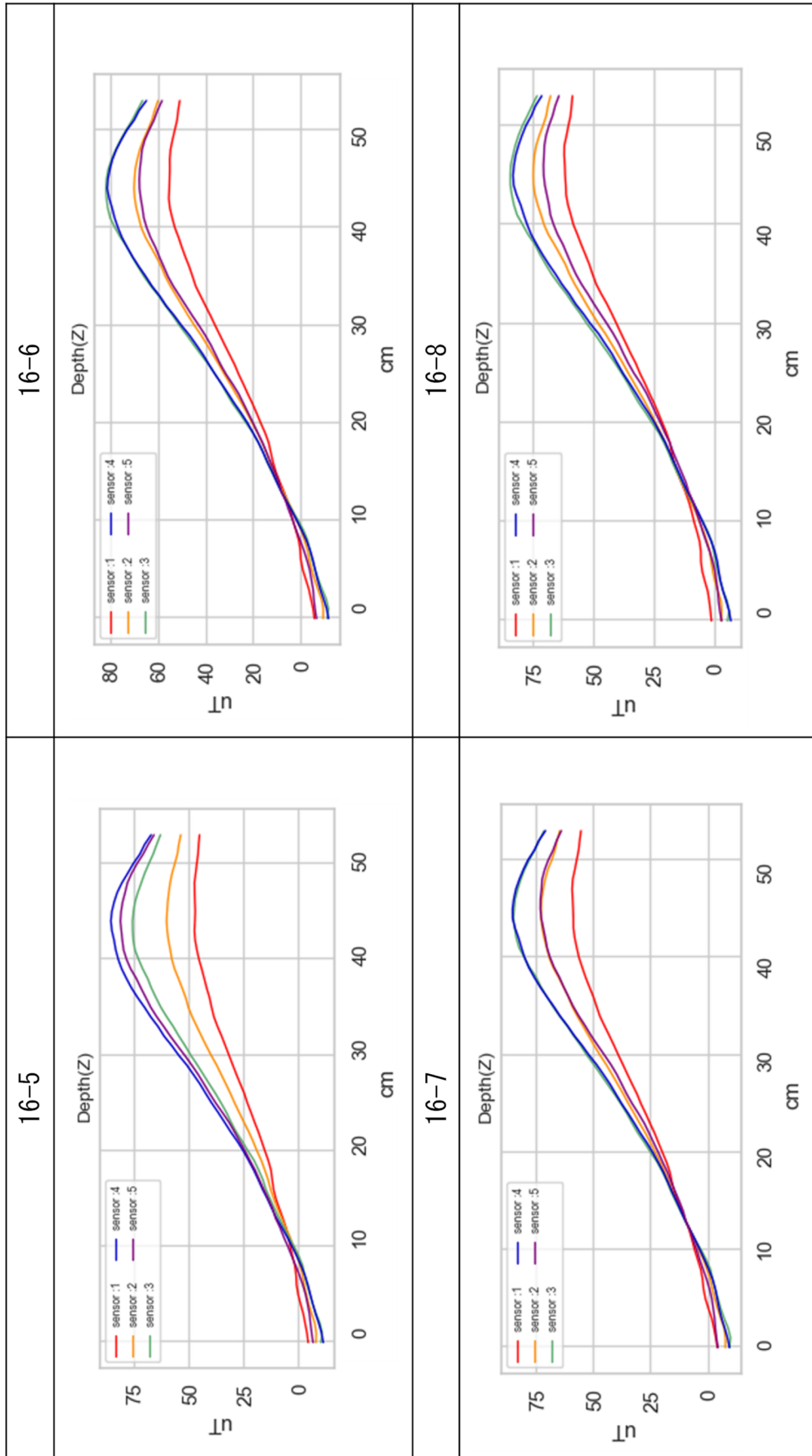
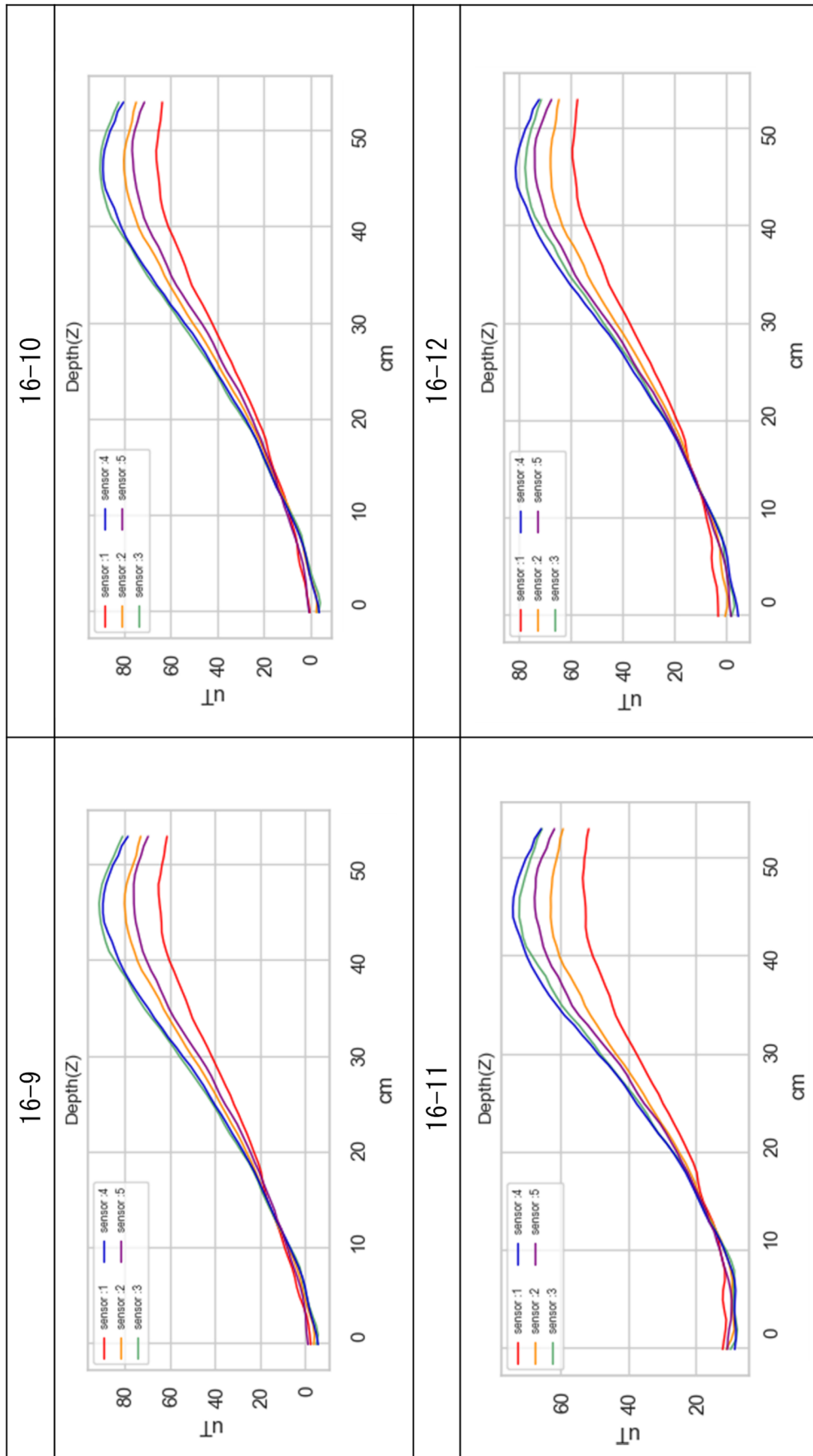


表-5.2.9 目地 No.16 の計測結果 16-9~16-12 (Z 軸)



### 5. 3 実験結果の考察と今後の展望

新設コンクリート走行工区における実験結果から、実大のコンクリート舗装に対して、磁気ストリーム法で Z 軸の波形変化に着目することによって、ダウエルバーの健全部と損傷部を区別することが可能であることが確認された。なお、前章では、破断部の隙間が 0mm の場合には波形変化が見られなかったが、新設コンクリート走行工区において破断させた鋼材を接触させたダウエルバーNo.10 でも波形の変化が確認されており、No.10 では鋼材の接触が外れ、鋼材間に隙間が生じていると考えられる。

また、既設コンクリート走行工区において 36 本のダウエルバーを対象に測定を行ったところ、全てのダウエルバーが健全であると判定された。現時点では当該ダウエルバーの損傷有無は不明であるが、今後コンクリートをはつってダウエルバーの健全性を調査する際、調査結果と本研究における測定結果の比較検証を行う予定である。

## 第6章 点検・診断技術活用上の留意点

ひび割れなどの外部変状が見られ、ダウエルバーの破断が心配な場合に SenrigaN で検査を行う。SenrigaN を用いたダウエルバー破断検査において、以下に留意したい。

### 【注意事項】

磁石の取り扱いには十分注意する。計測の際には強力な磁石を用いるため、鉄の床や壁などに磁石が吸いつき、指などを挟む危険がある。ペースメーカーなど磁力の影響を受ける機器を入れた人のそばに磁石を近づけない。また、検査中は検査装置と磁石を接触させないように注意する。検査装置と磁石が接触した場合、センサに異常をきたす。センサの異常が疑われる場合は、キャリブレーションを行った上で計測を行う。

ダウエルバーやワイヤメッシュ、チェア以外の磁性体が存在する場合、検査結果に影響を与える可能性がある。そのため、可能な限り事前に図面を入手し、構造を把握したうえで検査することが望ましい。

以下に SenrigaN の磁気ストリーム法でのダウエルバー破断検査の手順を示す。

### 【手順1】墨出し

ダウエルバー計測の前に、鉄筋レーダーを用いて正しくダウエルバーの墨出しを行う。



写真-6.1 墨出し

ダウエルバーの位置に目地を挟んで 1.5m 程度の計測中心線を描く。検査装置を設置する際の目安とする。



写真-6.2 ダウエルバー上に中心線を描く

#### 【手順2】キャリブレーション

周囲 1m程度に磁性体がない環境で、計測時と同じ向きに検査装置を持ちキャリブレーションを行う。検査中、磁石が検査装置に近づきすぎるとセンサに異常をきたす。この疑いがある場合は、再度キャリブレーションを行う。

#### 【手順3】磁石ガイドの装着

磁石と検査装置の距離を一定に保つため、磁石ガイドを検査装置に取り付ける。

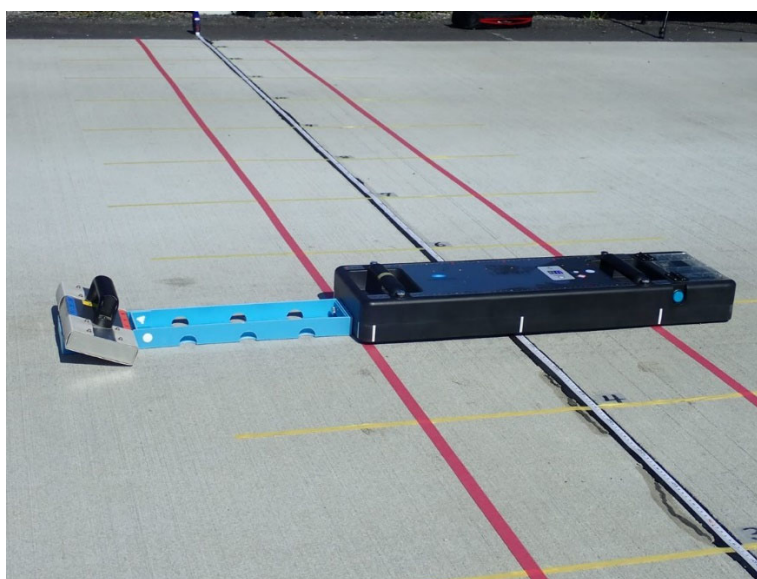


写真-6.3 磁石ガイドを取り付けた検査装置

【手順4】 検査装置の設置

計測時、検査装置のセンサ3の位置がダウエルバーの真上にくるように設置する。目地に検査装置の長手方向の中心（26.5cm位置）が来るように位置を調整する。



写真-6.4 検査装置センサ3をダウエルバーに合わせて設置する

【手順5】 計測

磁石ガイドに磁石のN極を下にして置き、1回目の計測を行う。検査装置を動かさず、磁石だけ取り除き、検査装置及び、計測中のダウエルバーから磁石を50cm以上離れた状態で2回目の計測を行う。

手順4、5を繰り返し、対象の目地の全てのダウエルバーを検査する。

磁気ストリーム法

(磁石あり計測)



(磁石なし計測)



写真-6.5 磁石あり計測と磁石なし計測

【手順6】 波形判読

SenrigaNの磁気ストリーム法のデータは縦軸が補正した磁束密度( $\mu\text{T}$ )、横軸が計測位置(0cm~53cm)を示す。センサ1からセンサ5までの5本の波形を表示している。ダウエルバーはセン

サ 3 の直下にあるため、センサ 3 が最も重要である。特にダウエルバーから検査装置に向かってくる磁束密度を検知する、深さ方向の Z 軸で変化をとらえやすいため、Z 軸を中心に判読を行う。図-6.1 に典型的な健全波形と破断波形を示す。健全の場合は中心部に磁場の反転を示す変曲点は見られないが、破断の場合、中央部に減衰が見られる。

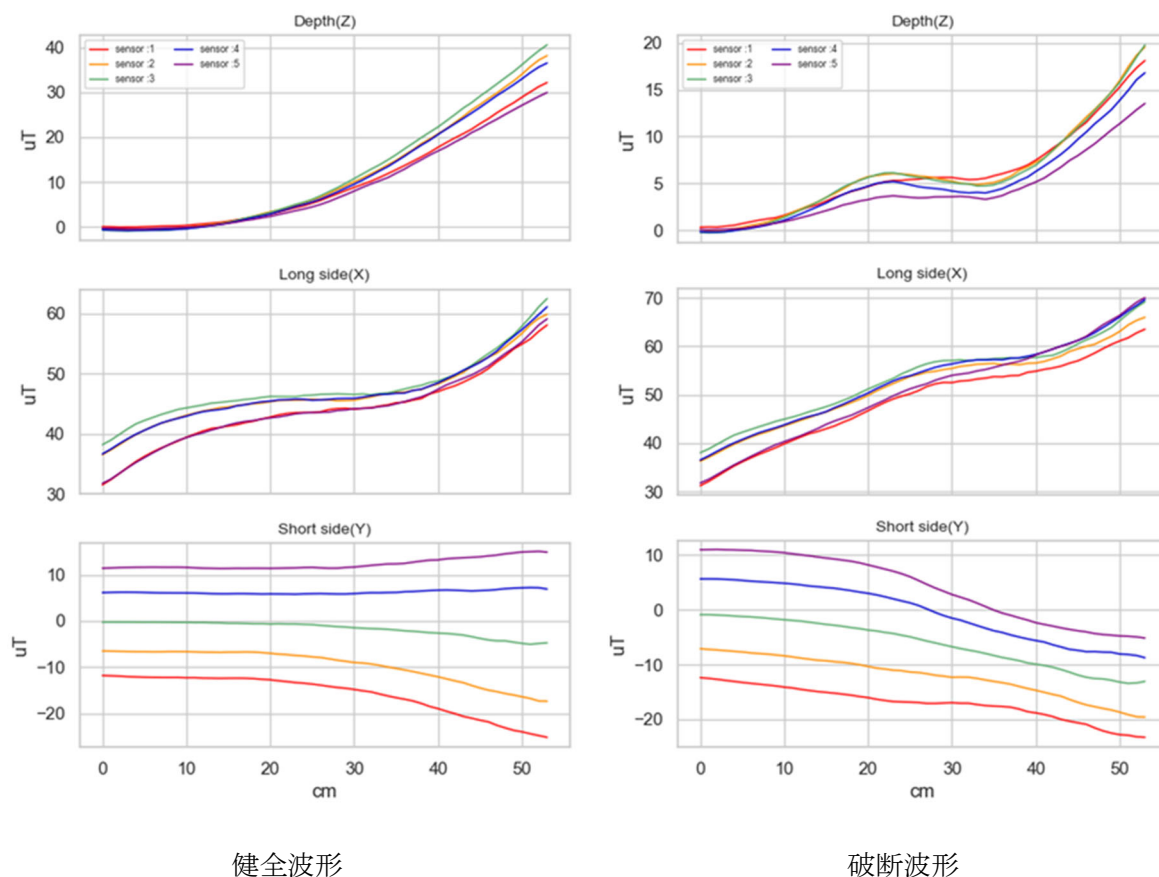


図-6.1 ダウエルバーの健全波形と破断波形

ダウエルバーは、舗装の継ぎ目に同じ形状のものが多数埋設されているため、それらの波形を比較して破断を判定することを推奨する。ダウエルバーは舗装内の位置によって強いストレスに晒されるものがある一方、ストレスの小さいものも多いため、前者が破断しても後者が健全な場合が多いと考える。よって、破断が疑われるダウエルバーだけでなく、同じ継ぎ目の中で健全と思われるものをあわせて計測し比較することで、健全と破断の違いに基づいて判読することが可能となり、判読が容易になる。

【手順 7】

疑わしい波形が見られた箇所は再度計測し、再現性を確認する。



## 第7章 研究のまとめ

### 7.1 研究の成果

本研究では、目地部のダウエルバーの損傷検出を対象に、磁気ストリーム法及び漏洩磁束法の適用可能性を検証した。室内実験及び実大舗装での実験の結果から、磁気ストリーム法の方が高精度であり、実道での適用性が高いことが確認された。本研究で得られたそれぞれの手法に関する知見を以下に示す。

#### 7.1.1 磁気ストリーム法について

- (1) 破断部の鋼材間に隙間があれば検出可能である（破断した鋼材が接触していると検出不可能）。
- (2) 検査時の磁石とダウエルバーの位置は検出精度と関係があり、検査装置の端部から20cm程度の位置に置いた場合に検出精度が最も高い。
- (3) 着磁状態が不明な対象に対しても磁気ストリーム法は有効である。
- (4) Z軸が信号の変化を最も強く検知するため、Z軸の波形を用いて破断判定することが有効である。
- (5) 同一目地における健全と破断のデータを比較することで、より高い精度で破断判定をすることが可能になる。

#### 7.1.2 漏洩磁束法について

- (1) 漏洩磁束法でもダウエルバーの破断は検出できることがわかった。
- (2) ワイヤメッシュによる偽陽性が強く出現するため、健全と破断の比較により破断判定を行う必要がある。
- (3) 今回用いた磁石では、土木研究所の供試体で見られたような強い磁石により着磁済みのダウエルバーに対して、上書きして着磁することが出来なかった。今後漏洩磁束法による計測が求められる場合も想定して、より強力な磁石を用いた計測など、実地での計測技術確立に努めたい。

#### 7.1.3 その他

本研究で提案した技術は、タイバーに対しても適用できることが期待される。





---

共同研究報告書

Cooperative Research Report of PWRI

No. 567 March 2022

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

---

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所企画部業務課

〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 電話 029-879-6754