

# 落雷残留磁気計測による雷撃ルート特定のための調査活動

Activities to specify the root of lightning impulse current  
with detecting the remained magnetic field

(株)ジェイテック	佐藤 正史	Masashi SATO	Non-Member
(株)ジェイテック	河野 亮	Akira KAWANO	Non-Member
日本原燃(株)	河野 瑞穂	Mizuho KONO	Non-Member
九州大学 大学院	笹田 一郎	Ichirou SASADA	Non-Member
九州大学 大学院	加呂 光	Hikaru KARO	Non-Member
(株)NTT ファシリテース	佐藤 秀隆	Hidetaka SATO	Non-Member

In order to prevent the important facility from the influence of lightning, it is very effective to apply not only the adequate design of lightning impulse current resistance, but also additional countermeasures for lightning impulse current based upon the experience and information during the commission of each facilities. Especially when the facility was attacked by lightning, it is very important to get hold the roots of this lightning impulse current promptly.

August 2nd of 2015, we experienced the loss of function of many instruments simultaneously which were categorized as the group of safety function at the site of Rokkasho Reprocessing Plant.

We evaluated this cause as the influence of lightning impulse current, so for the purpose to specify this impact root, we applied the supersensitive magnetic field detecting system as called gradiometer and tried to confirm the magnetized state as a vector quantity which were remained and recorded in the ground and the steel constructs.

We introduce and report these activities to specify the root of lightning impulse current with this gradiometer as follows.

Keywords ; lightning impulse current, magnetic field detecting system, gradiometer, vector quantity

## 1. 緒言

重要な施設への雷害影響を防止するためには、設計段階での適切な耐雷設計に加えて、供用中に受けた落雷による雷撃ルート等を把握して、追加対策による耐雷機能の向上が重要である。2015年8月2日に六ヶ所再処理施設（以下、「施設」という。）において安全上重要な機器（計器類）の複数同時故障が発生した。落雷の影響による故障の可能性が高いと評価されたことから、その調査の一環として、高感度の磁気検出装置（グラディオメータ）を用い、雷撃電流によって周辺大地や構造物等に残留し記録された強力な帯磁量をベクトル量で測定することを試みた。

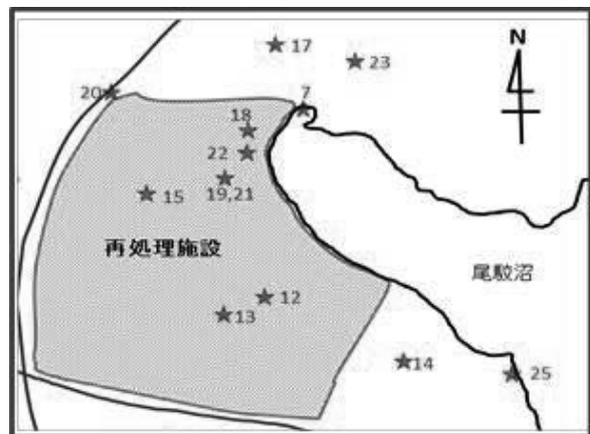
本稿は、このグラディオメータを用いた雷撃ルートの特定化に向けた活動を報告するものである。

連絡先:佐藤正史  
株式会社ジェイテック  
電気・計装保修部 計装グループ  
〒039-3212 青森県上北郡六ヶ所村尾駮字沖付 4-91  
E-mail: m-satou@j-tech66.co.jp

## 2. 再処理施設における落雷事象の概要[1]

### 2.1 落雷の発生状況について

機器故障事象発生当時(2015年8月2日 18時52分頃)施設周辺では、多数の落雷が発生していた。落雷の発生状況等についてJLDN\*での観測記録から、再処理施設敷地内（以下、「敷地内」という。）及び周辺における落雷想定箇所を図1に示す。



★No 落雷想定箇所

図1 敷地内及び周辺における落雷想定箇所

図2に示すように、敷地内での落雷想定範囲（落雷想定箇所を中心とした半径500mの範囲）の中でも最も大きい雷撃電流の波高値（雷撃の最大電流）は、負極性196kAという大きな雷撃電流が計測され雷撃半径を考慮すれば敷地内で最も高さが高い鉄塔（約150m）に落雷した可能性が考えられた。

\* (株)フランクリンジャパン: JLDN (Japan Lightning Detection Network) (落雷の位置や雷撃電流の大きさを観測するシステム)

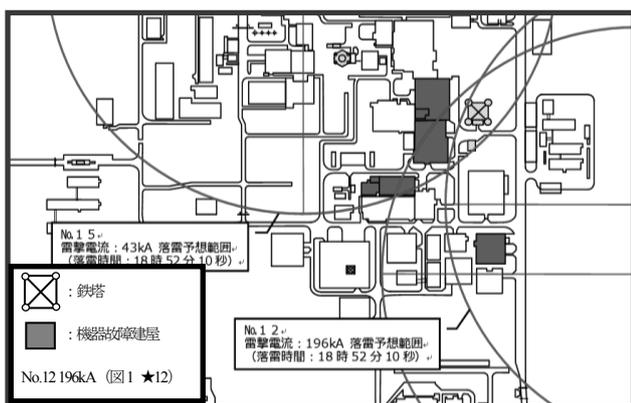


図2 敷地内落雷想定範囲

## 2.2 機器故障状況からの雷撃ルートの推定

安全上重要な機器（計器）の故障は、複数の建屋に跨っていること及び施設の耐雷設計を考慮すると、雷撃ルートは図3に示すように鉄塔から避雷設備を経由し、雷撃電流が接地網に伝搬する。この際、建屋間の地電位差による過電圧の発生、または誘導電圧の発生により建屋の機器を故障させ、ケーブルに流れて建屋の保安器を流れたものと推定された。

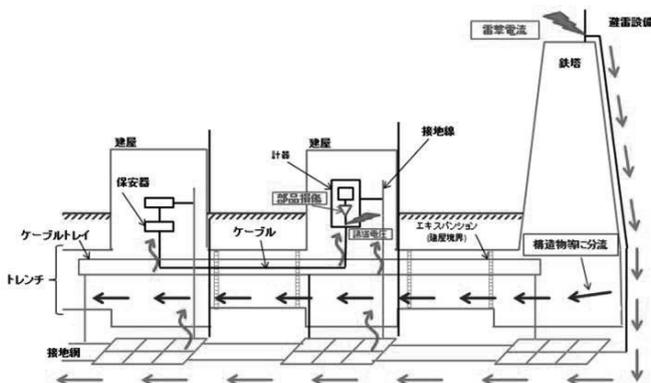


図3 雷撃ルート概要図

## 2.3 雷撃ルート特定の必要性

当該施設特有の構造として、建物、トレンチ等の構造物が多数配置されていることから、落雷による雷サージの侵入経路は複雑多岐に渡るため、あらかじめ測定器を設置し、網羅的に雷撃ルートを測定することは困難である。このため本事象で観測された施設内の落雷データのうち、過去20年間最大の雷撃電流(196kA)による磁気を記録している可能性があることから、雷撃ルートを特定する手法として残留磁気の存在に着目し、検討することとした。

## 3. 落雷残留磁気測定について

### 3.1 磁気検出装置の調査

従来の微弱な磁気検出装置は、液体窒素冷却による高温超電導 SQUID\*が主流であり、さらに地磁気等の影響を補正するために強力な磁気シールドルーム内で測定するのが一般的である。これらの装置を用いた雷サージによる残留磁気測定は非常に高価であり、施設等の巨大な構造体は磁気シールドルームに持ち込むことができないため、測定ができないなどの欠点があった。

九州大学において、図4に示すようなフラックスゲートによる、1pTまで測定可能な室温動作センサ[2]をベースに、センサヘッド近傍の一樣磁場の影響がキャンセルできるグラディオメータ（勾配型センサ）が開発されたことが報告された。その常温センシング性能及び磁気シールドルーム無しで測定できるメリットと取扱いの容易さから、施設における雷撃電流による残留磁気測定に適用できると考えた。

\* SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) (磁気センサ)

### ◆ 磁気微粒子検出例

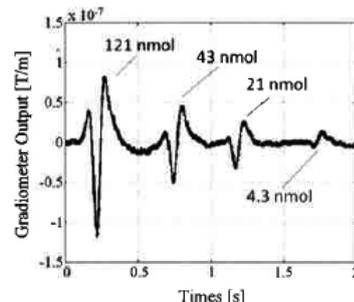


図4 磁気微粒子検知例 [3]

### 3.2 雷撃電流測定原理

高感度のグラディオメータを用いて、雷撃電流の作る強力な磁場により周囲大地、施設等の帯磁量(残留磁化を獲得する)をベクトル量で測定することにより、雷サージが流れた方向および電流値を推定する。

図5に示す雷撃電流Iに伴う磁界Bにより、土壌や施設等に残留磁化が残る。

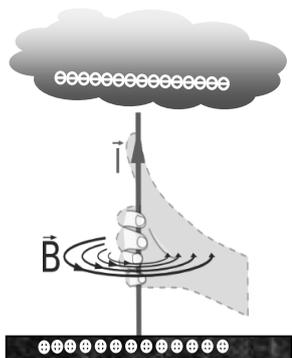
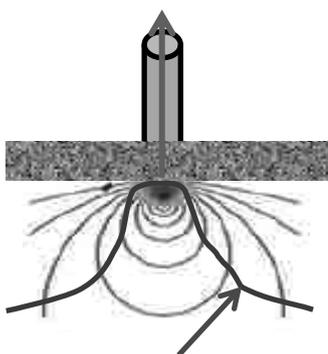


図5 雷撃電流と磁界の関係

例えば、1本の避雷針に200 kAの雷撃電流が流れ、地表面を放射状に流れた場合、1m離れた地表面での磁界はアンペールの法則の1/2より、16,000A/mの磁界が印加される。土壌に真空中の透磁率  $\mu_0 = 1.2 \times 10^{-6}$  を適用すると0.02 T (=Wb/m<sup>2</sup>)の磁束密度になる。これにより土壌が磁化され、図6に示す残留磁化の強さについては、土壌のマグネタイト Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> やヘマタイト Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> などの保磁力になる。[4]



#### 土壌残留磁場の強さ

超低雑音基本波型直交フラックスゲート  
(fundamental-mode-orthogonal fluxgate=FM-OFG)  
原理を利用する(室温動作センサでは世界最高性能)

図6 雷撃電流による残留磁場の強さ

### 3.3 グラディオメータについて

図7に示すように、センサヘッド1で測定される磁場強度から、センサヘッド2で測定される磁場強度を引き算する。正確に引き算し、差分を求めることで一様な地磁気の影響が補正され、局部的に存在する微弱な磁場が計測できる。(図8,9参照)

#### ◆ 提案技術のグラディオメータ

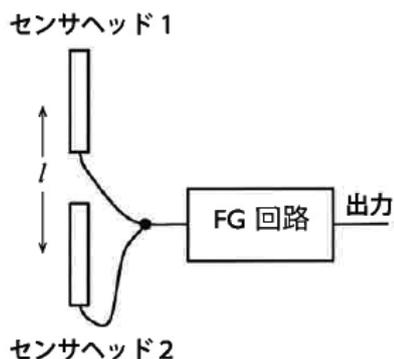


図7 グラディオメータ構成概要[3]



図8 グラディオメータ外観の写真

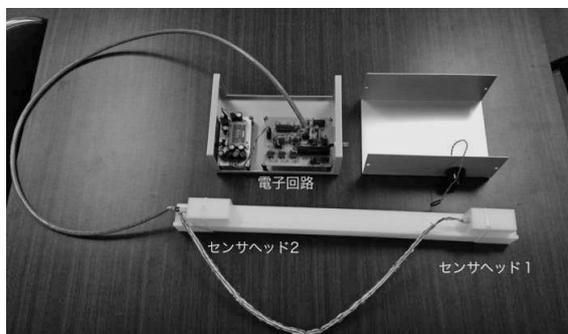


図9 グラディオメータ内部の写真

## 4. 残留磁気測定による雷撃ルートの推定

### 4.1 残留磁気測定目的

雷撃ルートの調査として鉄塔に落雷した雷撃が、施設内をどのような経路・雷サージ分流比で伝搬したかの知見を得ることを目的とし、落雷の影響で敷地に残されている残留磁気をグラディオメータを用いて測定した。

(図10参照)



図10 3軸グラディオメータによる測定時の写真

### 4.2 残留磁気測定箇所の検討

新技術を適用し、残留磁気を利用した雷撃ルート調査について、鉄塔への直撃雷が雷サージとして施設を拡散しながら伝搬するルートを検討する際、以下の導電性構造物等が考えられる。

- ① メッシュ・連結アース
- ② 大地
- ③ トレンチ・ケーブルトレイ

これらのうち残留磁気として計測でき、かつ計測の容易さから大地、ケーブルトレイ等を対象にして測定を実施した。

### 4.3 土壌サンプリングによる磁気測定結果[5]

鉄塔への落雷事実を裏付ける証拠として、鉄塔周囲の土壌が磁化され保存されていることに着目し、土壌サンプリングによる磁気測定を行った。(図11参照)

本手法[6]は、送電線鉄塔への雷撃による土壌磁化の研究として、富山大学及び北陸電力で行われている同様の手法である。鉄塔基礎部による接地線付近の土壌サンプルを採取し、最新のグラディオメータを用いて磁化方向を測定した。

図12のとおり残留磁化の向きが、接地線廻りを反時計まわりで回転している結果が得られた。明らかに地磁気

と異なり、落雷による影響と思われる残留磁気を測定することができた。

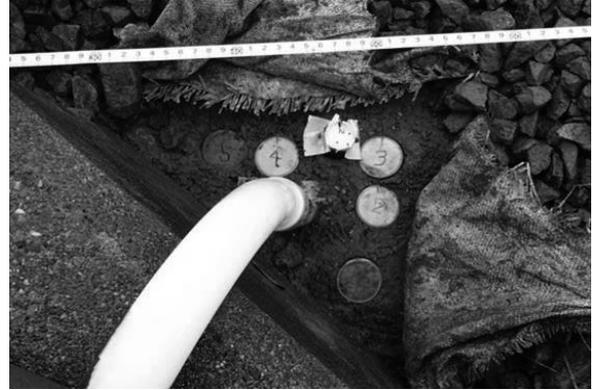


図11 土壌サンプル採取状況の写真

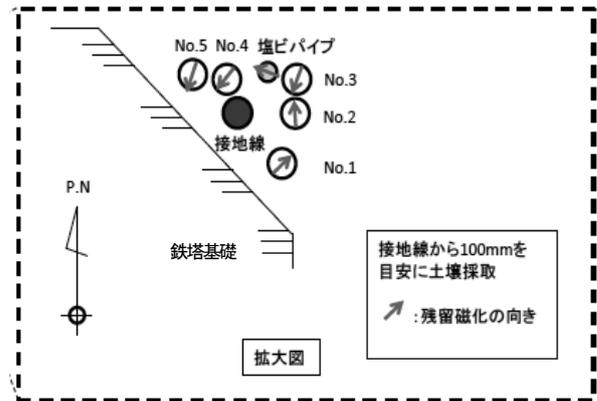


図12 磁気測定結果 土壌サンプル

### 4.4 鉄塔部磁気測定結果

鉄塔廻りの地面をグラディオメータによるダイレクト測定結果では、地磁気の影響や周囲の磁性体による磁性空間の歪がキャンセルできるため、雷撃による砂利及び土壌の帯磁磁化特性を検出できていると考えられる。

鉄塔A部の単位ベクトルを見ると、図13により磁界が鉄塔A部の周りを反時計まわりに回転している傾向から、負極性雷サージが流れた状況が伺える。

また、鉄塔を中心に反時計まわり方向の磁界分布であることから、土壌サンプルの磁気測定結果、図12からも伺えるが、電流が鉄塔または接地線を通った証拠となると考えられる。

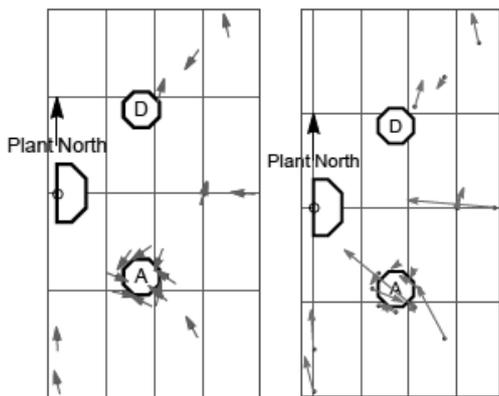


図5-2 グラディオメータによる測定結果  
 鉄塔A部の磁界ベクトル（地面水平成分）  
 主排気塔の磁界ベクトル（地面水平成分）  
 単位ベクトル（左）とベクトル/磁界強度（右）

図13 磁気測定結果 鉄塔A部周辺

#### 4.5 ケーブルトレイ磁気測定結果

鉄塔に落雷した雷サージはケーブルトレイを分流して流れるため、雷サージによりケーブルトレイの支持部材が磁化することから、一部のケーブルトレイ(図14)で鉄塔側から建屋側までの磁化状況を測定した。

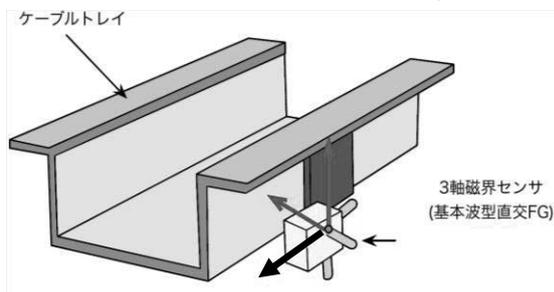


図14 ケーブルトレイとセンサ

測定の結果、ケーブルトレイ両端の出入り口およびケーブルトレイルートコーナー部（以下、「コーナー部」という。）では磁界強度が大きく、図15に示すように磁界強度の大きい場所では、約100  $\mu\text{T}$  以上（地磁気の一般的な値は45  $\mu\text{T}$ ）を示していたことから、雷撃電流の流入流出があったと考えられる。

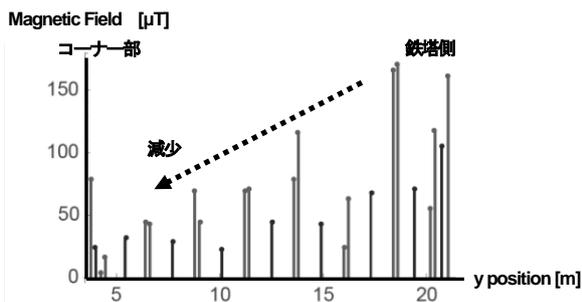


図15 ケーブルトレイ磁界強度

実際のケーブルトレイは、支持部材のボルトが鉄筋コンクリート内部で鉄筋と接触し電氣的に接続されておりコーナー部では接地線で接地されるなど、多点アース構造になっている。このためケーブルトレイを流れる雷サージは、減衰しながら流れることが推定された。図16に示す磁界強度の結果より鉄塔からコーナー部に向かって強度が減少していることから、雷撃電流が均一に流れておらず分流・拡散して減少しながら流れたと推定される。

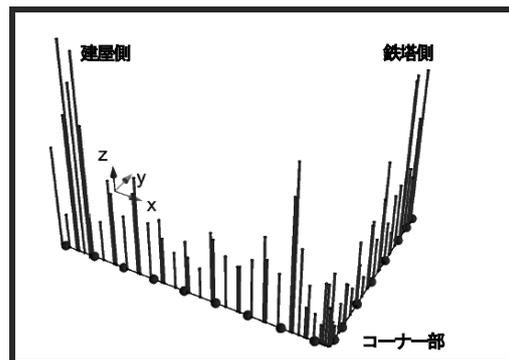


図16 ケーブルトレイ磁界強度

また、図17に示す磁界ベクトルの結果から、ケーブルトレイの場合、磁化方向が不規則であることがわかった。この磁界ベクトルは、ケーブルトレイに垂直な成分とケーブルトレイに沿った方向の合成ベクトルであった。これは、トレンチに沿って雷撃電流が流れた成分とサポートするボルトが外壁コンクリート内部の鉄筋と接触し、雷撃電流が分流して流れた成分との合成の可能性がある。

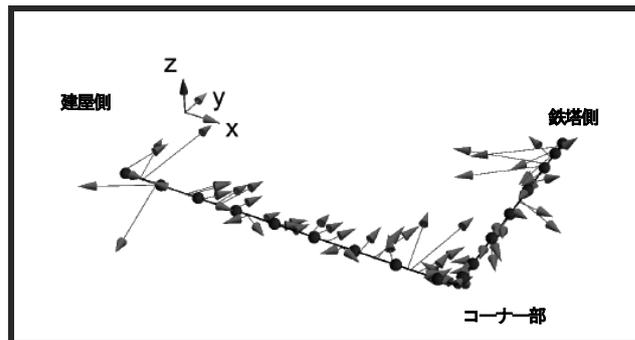


図17 ケーブルトレイ磁界ベクトル

一方、ケーブルトレイが事前に何らかの影響で、すでに磁化されており、たとえば建設初期段階でトレイの溶接電流などにより磁気を帯びていたものか、あるいは以前の雷撃による帯磁など、今回の雷サージが流れたことにより磁界が上書き保存されて、ある一定値以上の磁界だけに変化が生じたことも考えられる。

## 5. まとめ

落雷残留磁気測定の実用により、雷撃ルートの特定活動において、以下を確認することが出来た。

- ① 鉄塔周辺の土壌、トレンチ内ケーブルトレイの構造体における残留磁気調査の結果、負極性雷サージが流れたことを裏付ける磁界ベクトルの存在が確認された。
- ② ケーブルトレイの残留磁気測定においては、有効なデータは得られなかったが単純な経路にて雷サージは伝搬するのではなく、複雑な経路にて伝搬することを確認出来た。
- ③ 現場での磁力測定にあたっては、微小な磁力を測定することから、測定治具に金属を使用しないことや測定結果が電力線からの外乱磁気影響の判断をするなどの標準化も行っていく必要がある。

今回の残留磁気による計測では、落雷の影響と考えられる磁場が形成され、保存されていることがわかった。また、磁界ベクトルの方向から負極性雷撃による雷サージの伝搬経路を示している特徴が得られている。

しかし、すべてのデータが同じ傾向を示してはおらず局部的には何かしらの影響で外れているデータが存在するものの、雷サージ推定の有効性を否定する要素が無くむしろ今後、残留磁気の計測により落雷電撃ルートを推定する可能性を示すことが得られた。

## 参考文献

- [1] 日本原燃(株) 法令報告書 ”再処理施設 分離建屋における安全上重要な機器の故障について(最終報告)” (平成 27 年 12 月 7 日)
- [2] 笹田一郎, 加呂光: ”基本波型直交フラックスゲート”, 電学誌, 136 巻, 1 号, 2016 年 P18-P21
- [3] 笹田一郎: “50  $\mu$  m 級磁性異物、医用磁気マーク検出のための新技術”, 九州大学新技術説明会予稿集, 2015 P45-P48  
[https://shingi.jst.go.jp/past\\_abst/abst/2015/kyushu/tech\\_property.html](https://shingi.jst.go.jp/past_abst/abst/2015/kyushu/tech_property.html)
- [4] ”岩石磁化”, 広島大学  
[http://home.hiroshima-u.ac.jp/er/ES C\(3\).html](http://home.hiroshima-u.ac.jp/er/ES C(3).html)  
2015/11/19 P1/8-P2/8
- [5] 電気学会技術報告第 1133 号  
自然界や考古遺物の残留磁化に関する研究 P40-P41
- [6] 高野溪太, 泉吉紀, 上村研人, et al: “磁化による落雷のモニタの研究”, 平成 27 年電気学会基礎・材料・共通部門大会, P453