

研 究 期 報

No. 111

令和元年 12 月

四 国 電 力 株 式 会 社
株 式 会 社 四 国 総 合 研 究 所

研究期報 1 1 1 号 目次

送電鉄塔の基礎コンクリート深部におけるひび割れ診断および補修技術について 1

The cracking diagnosis and repair for the deep part of concrete foundation of transmission tower

信号処理によるコンクリート内埋設物の探査精度向上に関する研究..... 5

Study on accuracy improvement to buried object detection by signal processing

超低消費電力フィールドモニタリングシステムの開発..... 10

Development of the ultra-low power wireless field monitoring system

ニッケルメッキ金属の腐食メカニズムに関する研究 16

Study on corrosion mechanism of Nickel plating

送電鉄塔の基礎コンクリート深部におけるひび割れ診断 および補修技術について

目 的

送電鉄塔では、基礎コンクリート深部（地中埋設部）において、アルカリシリカ反応による骨材周囲の生成ゲルが吸水膨張することによって、ひび割れが生じる場合がある。しかし、基礎コンクリート深部のひび割れを診断および補修するためには、基礎周辺の土砂を掘削する必要があり、大掛かりな土木工事が必要となる。今回、周辺土砂の掘削を不要とした基礎コンクリート深部のひび割れ診断および補修技術を提案する。

主な成果

1. 診断技術

基礎コンクリート深部のひび割れ診断として、小口径コア採取後の孔壁面をカメラ撮影・目視観察する方法を現地適用した結果、コア採取と孔壁のカメラ画像を併用することで、コンクリートにひび割れを発見でき、コンクリートの状態を正確に診断できた。

2. 補修技術

無筋基礎で床板が厚い基礎コンクリート深部の補修方法として、診断に用いたコア孔にせん断補強鉄筋を挿入する方法を検討し、送電用鉄塔基礎の1/6スケール試験体を引張試験した結果、2本以上のせん断補強筋を挿入することでせん断耐力を1～2割増加させることができ、ひび割れによってせん断耐力が低下した基礎コンクリートの補修に有効であることが確認できた。

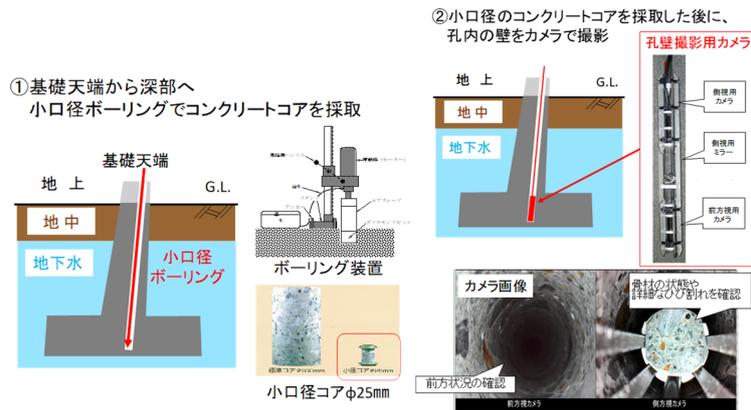


図1 基礎コンクリート深部のひび割れ診断技術

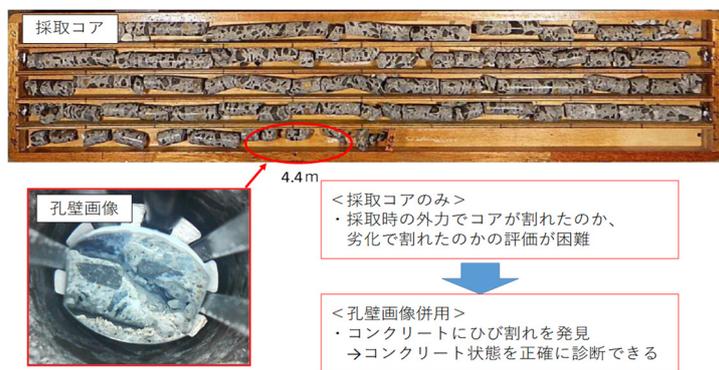


図2 採取コアと孔壁画像

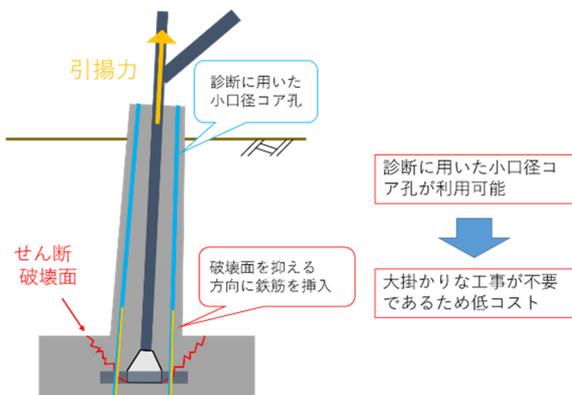


図3 せん断補強鉄筋による補修方法

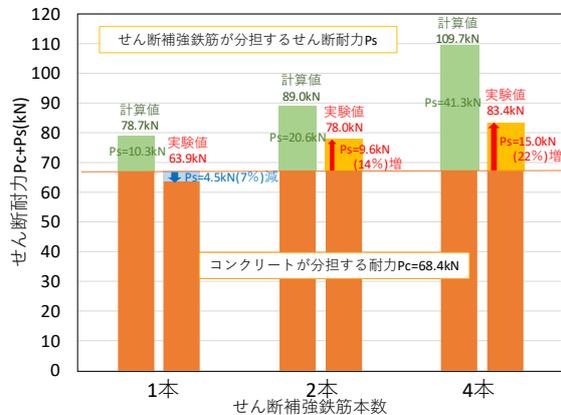


図4 各試験体の引張実験結果

研究担当者	山口純司, 新居浩治, 藤川真人 (株式会社四国総合研究所 電力技術部) 松島学, 山本翔大 (香川大学 創造工学部)
キーワード	基礎コンクリート, ひび割れ, 診断, 小口径, カメラ, 補修, せん断耐力, 鉄筋
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

信号処理によるコンクリート内埋設物の探査精度向上に関する研究

目 的

電磁波レーダ法は、小型探査装置の性能向上等により、コンクリート内埋設物探査に広く使われるようになったが、取扱いに難しいところがあるため、現場では特別な知識や技能を必要としない探査方法への期待が大きい。この問題に対する解決手段として、信号処理により埋設物探査精度を向上させる方法について検討した。

主な成果

1. 開口合成法による埋設物探査精度向上方法

開口合成法は、電磁波や超音波探査等において、複数の異なる位置の受信信号を合成することにより、位置分解能を向上させる信号処理技術である。応用例には、航空機や人工衛星などに搭載される移動式レーダがある。本研究では、コンクリート用レーダ探査装置のポスト信号処理として、開口合成法がコンクリート内埋設物の探査精度向上に有効であることを確認した。また、コンクリート表面で電磁波が屈折することによって生じる伝搬経路のずれを考慮することにより、さらなる探査精度の向上を図った。

2. 信号処理の適用例と探査精度の評価

50×50×30cmのコンクリート試験体に対して埋設物探査を実施し、本技術の有効性を評価した。その結果、通常探査で見られる近接埋設物信号の重なりが本技術により除去可能になるなどの効果を得られることが分かった。

また、実際に使われているコンクリート建築物の壁面に対して埋設物探査を実施した。その結果、通常探査では深度約10cm、ピッチ3cmの2本の鉄筋はほとんど1本にしか見えないが、本技術を適用することで、2本の鉄筋の判別が容易になることが分かった。

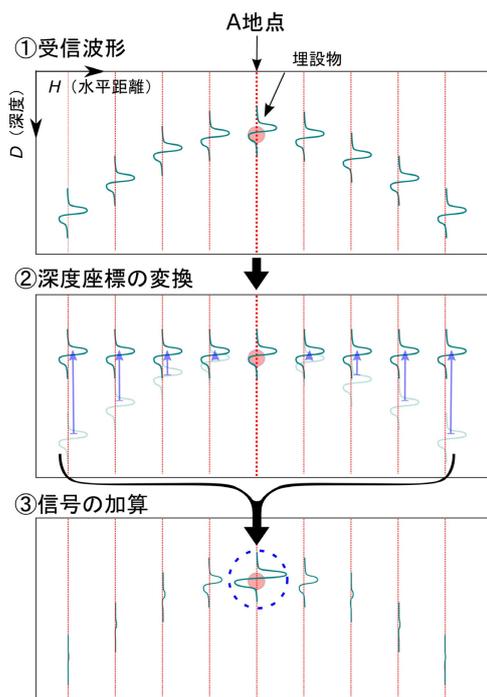


図1 開口合成法の適用手順

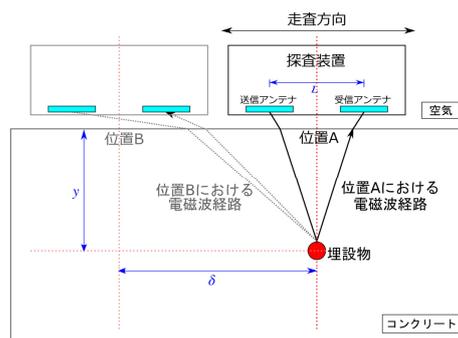


図2 屈折を考慮した電磁波の伝搬経路



図3 信号処理技術適用時の様子

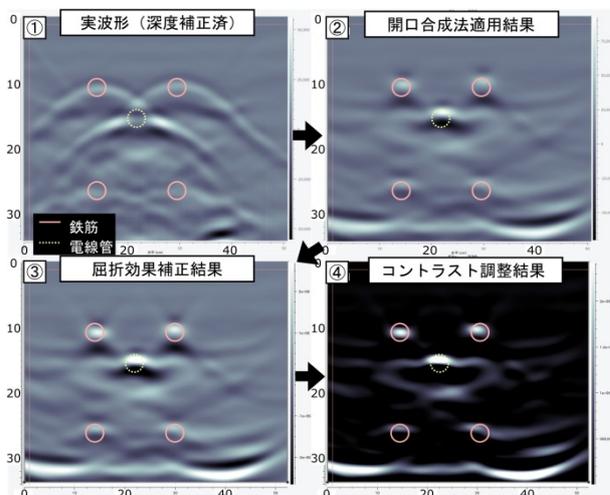


図4 コンクリート試験体への適用結果

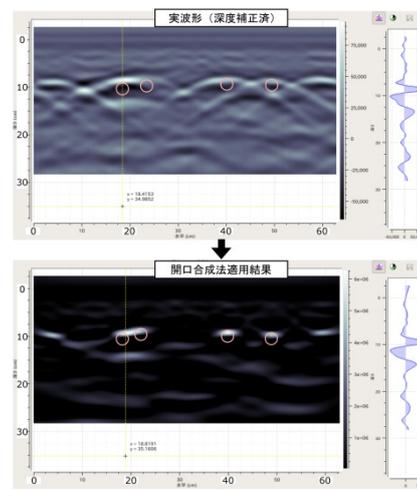


図5 コンクリート壁面への適用結果

研究担当者	岡部克也 (株式会社四国総合研究所 産業応用技術部)
キーワード	電磁波レーダ法, 地中レーダ, 開口合成法, 鉄筋コンクリート, 埋設物探査, 薄鋼電線管, 非破壊検査
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

超低消費電力フィールドモニタリングシステムの開発

目 的

近年、従来の想定を超えた規模の自然災害が多発する中、多くの場所で水位や地すべりの常時モニタリングシステムの整備が喫緊の課題となっているが、既存のモニタリングシステムは非常に高価であること、コストの掛かるインターネットクラウドサービスの利用が前提となっているものが殆どであること、ならびに、センサ部の消費電力が大きく商用電源が必要となる場合が多いことなどが課題となり、地域住民の期待通りには導入が進んでいない。

上記を背景に、システム開発コストおよびデバイスコストを大きく低減すると共に、クラウドサービスに依存しないフィールドモニタリングシステム構築用共通プラットフォーム技術である openATOMS の開発、ならびに、それを活用した超低消費電力フィールドモニタリングシステムの開発を進めている。

主な成果

1. 超低消費電力フィールドモニタリング技術の開発

市販の様々なセンサを継続的に調査・選定し、その接続ドライバソフトウェアを整備することで、様々なモニタリングニーズに迅速に対応でき、かつ、ハードウェアとソフトウェアの工夫により、待機電流を $10\mu\text{A}$ 以下に低減するとともに、センサへの電源供給を厳密に制御することで、内蔵電池で長期間連続動作可能な超低消費電力フィールドモニタリング技術を確立した。

2. 無線通信式水位モニタリングシステムの開発

開発した超低消費電力フィールドモニタリング技術を利用して、超音波式水位センサ、転倒升式降雨量センサ、ならびに、高精細の静止画像カメラを搭載していながら、既存の類似製品と比べて大幅なコスト低減を実現するとともに、内蔵乾電池電源で5年間連続動作可能な無線通信式水位モニタリングシステムを開発し、実フィールド試験にてその実用性を確認した。



図1 水位モニタリングセンサユニット

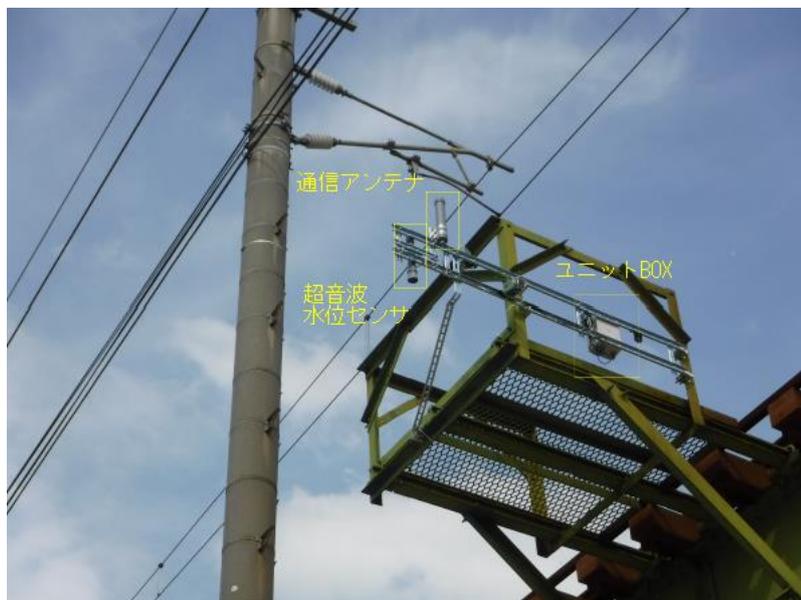


図2 フィールド試験の様子

研究担当者	中西 美一 (株式会社四国総合研究所 電子技術部) 藤本 知規 (株式会社四国総合研究所 土木技術部)
キーワード	フィールドモニタリング, 無線通信式, 超低消費電力
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

ニッケルメッキ金属の腐食メカニズムに関する研究

目 的

無電解ニッケル-リンメッキ (Ni-P メッキ) は、大気中の海塩等に対して比較的優れた耐食性を有するが、海塩等の腐食因子の少ない屋内大気環境下において短期間で素地の金属に達する腐食が生じるケースがある。

本研究では、その原因と対策の検討のため、実際に発錆が認められた Ni-P メッキ材料を用いて、メッキ層の腐食から発錆に至るメカニズムについて実験的に検討した。

主な成果

1. Ni-P メッキで生じた腐食原因の推定

発錆が確認された Ni-P メッキ材料ではメッキ層に素地まで貫通する欠陥が生じていた。腐食生成物 (錆) から、Ni が硫酸イオン (SO_4^{2-}) と反応して生成する硫酸ニッケル水和物が検出されたことから、メッキ層の欠陥は空気中の亜硫酸ガス等に由来する SO_4^{2-} 付着による Ni 腐食の可能性が疑われた。

2. 実機レベルの付着 SO_4^{2-} による腐食促進の確認

硫酸イオンの Ni-P メッキ腐食への影響を検証する試験を行った結果、塩水のみ付着させた試験片では顕著な腐食は見られなかったが、硫酸 (H_2SO_4) を添加した試験片では SO_4^{2-} が当該メッキ部材の腐食促進因子として働いており、屋内機器の拭き取り調査で測定されたレベルの付着 SO_4^{2-} 量でも短期間で素地に貫通するメッキ欠陥が生じることを確認した。

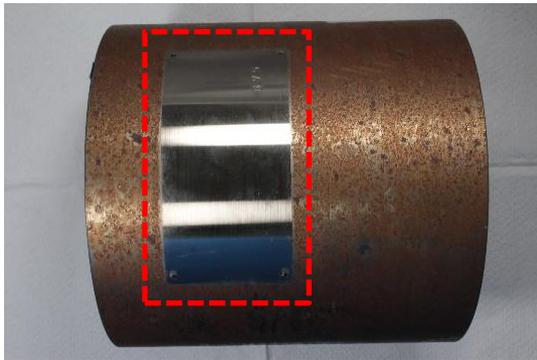


図-1 錆が生じた Ni-P メッキ部材の外観

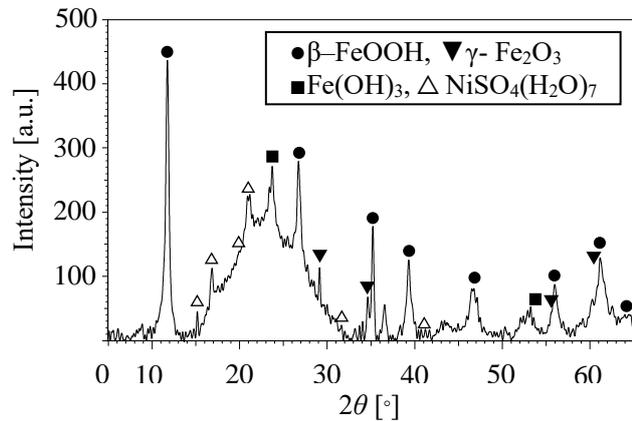


図-2 腐食生成物(錆)の X線回折分析結果

試験片	塩水のみ	塩水+H ₂ SO ₄ 添加	
付着 Cl ⁻ 量	1mmol/m ² (実機相当)		
付着 SO ₄ ²⁻ 量	0mmol/m ²	1mmol/m ² (実機相当)	2mmol/m ²
試験開始 1日目			
試験開始 28日後			

図-3 腐食再現試験の結果

研究担当者	山本松平, 奥田昌三, 濱口俊明 (株式会社四国総合研究所 化学バイオ技術部)
キーワード	ニッケルメッキ、大気腐食、硫酸イオン、亜硫酸ガス、海塩粒子
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp http://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

送電鉄塔の基礎コンクリート深部におけるひび割れ診断および補修技術について

(株)四国総合研究所 電力技術部 山口 純司
(株)四国総合研究所 電力技術部 新居 浩治
(株)四国総合研究所 電力技術部 (現: 四国電力(株)) 藤川 真人
香川大学 創造工学部 松島 学
香川大学 創造工学部 山本 翔大

キーワード: 基礎コンクリート
ひび割れ
診断
小口径
カメラ
補修
せん断耐力
鉄筋

Key Words: Concrete foundation
Cracking
Diagnosis
Small bore
Camera
Repair
Shear capacity
Reinforcement

The cracking diagnosis and repair for the deep part of concrete foundation of transmission tower

Shikoku Research Institute, Inc., Electric Power Technology Department
Junji Yamaguchi, Kouji Nii, Masato Fujikawa
Kagawa University, Faculty of Engineering and Design
Manabu Matsushima, Syouta Yamamoto

Abstract

The concrete foundation of transmission towers is used reactive aggregates. And, some concrete foundations of transmission towers exist at high ground water level. So, the foundations are easy to occur Alkali Silica Reaction, it is concerned that cracking is occurred by Alkali Silica Reaction. To diagnose and repair the cracking for the deep part of the concrete foundation, it is necessary to dig the ground around the foundation. This time, the proposed diagnosis and repair methods doesn't need that digging the ground.

The proposed diagnosis method obtains a concrete core by boring of small bore, and observes the inner wall of the borehole with a camera. As a result of applying the method to the foundation of transmission tower, this method was able to accurately diagnose the condition of the deep part of concrete foundation. The proposed repair method inserts a reinforcement using the borehole for diagnosis. This method can repair the unreinforced concrete foundation. And is effective particularly thick base foundation. As a result of tensile experiment on the concrete foundation of transmission tower of one-sixth the scale, the shear capacity of the concrete foundation increased 10-20% by inserting two or more reinforcements.

1. はじめに

送電鉄塔では、基礎コンクリート深部（地中埋設部）において、アルカリシリカ反応による骨材周囲の生成ゲルが吸水膨張することによって、ひび割れが生じる場合がある。このひび割れは基礎の地表部でも確認されることがあり、耐力を維持するためには基礎コンクリート深部のひび割れの診断および補修が必要となっている。

しかし、基礎コンクリート深部のひび割れを診断および補修するためには、基礎周辺の土砂を掘削する必要があり、大掛かりな土木工事が必要となる。

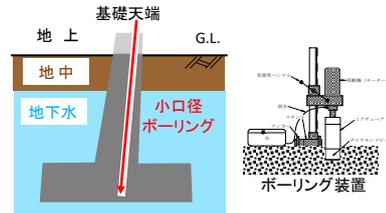
今回、周辺土砂の掘削を不要とした基礎コンクリート深部のひび割れ診断および補修技術として、小口径のコンクリートコア採取およびコア孔の空洞内撮影方法（診断技術）ならびに、診断に用いたコア孔に鉄筋を挿入してせん断耐力を補強する方法（補修技術）を提案する。

2. 診断技術

基礎コンクリート深部のひび割れ診断技術として、図1に示す基礎天端部から深部へ小口径ボーリングでコンクリートコアを採取するとともに、孔内の壁をカメラで直接確認し、コアと合わせて評価する方法を提案する。

一般的なコンクリートコア採取はφ100 mmが使用されているが、鉄塔基礎の形状では鉄塔材や鉄筋などを損傷する恐れがあるため、コンクリートコアが採取可能な最小のφ25 mmを採用した。しかし、コンクリートコアが細くなるため、コア採取時にカッターなどの外力でコンクリートコアに割れが生じる可能性が高い。そこで、小口径のコンクリートコアを採取した後に、孔内の壁をカメラで撮影することで、基礎コンクリート深部のひび割れなど劣化状況が直接確認でき、採取コアと合わせることでより詳細なコンクリートの状態評価が可能となる。

①基礎天端から深部へ
小口径ボーリングでコンクリートコアを採取



②小口径のコンクリートコアを採取した後に、
孔内の壁をカメラで撮影

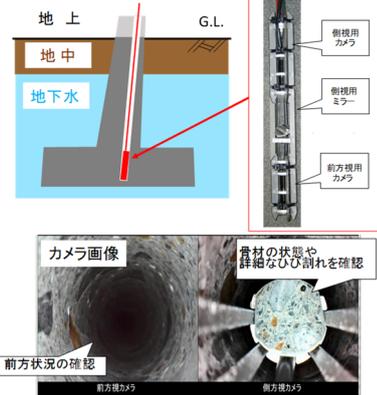


図1 基礎コンクリート深部のひび割れ診断技術

現地の送電鉄塔の基礎に対して、提案する診断技術を実施した例を図2に示す。採取コア4.4m付近の割れについて、採取コアだけではコア採取時の外力による割れなのか、劣化による割れなのか、評価が困難であった。ここに孔壁のカメラ画像を用いることで、孔壁のコンクリートにひび割れを発見し、外力による割れではないことが分かり、コンクリートの劣化を正確に診断できた。

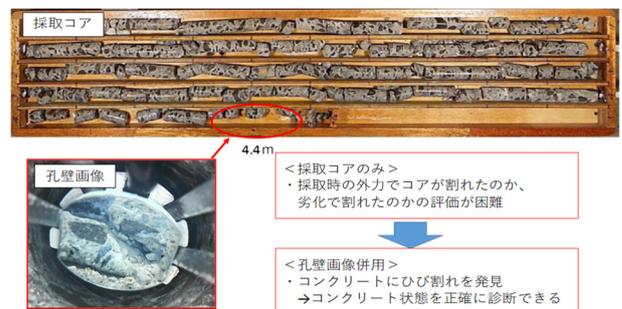


図2 採取コアと孔壁画像

3. 補修技術

3.1 補修方法の検討

基礎深部にひび割れが見られるコンクリートのコアを採取するとその多くにアルカリシリカ反応が確認できる。これによりコンクリートや鉄筋の強度が低下し、曲げ破壊やせん断破壊を起こす恐れがある。これらの補修方法としては、既設床板の上部に新基礎を設置する方法が考えられるが、基礎床板までの掘削を要することから、費用が高くなる。

ここで、劣化が少なくコンクリートや鉄筋の強度低下が小さい基礎であれば、診断に用いた小口径コア孔から破壊面を抑える方向に補強鉄筋を挿入する補修方法により、掘削せずに低下した強度分を回復することが期待できる。

今回、図3に示す基礎床板のせん断耐力低下を補修する方法について、実験を行い、その有効性を確認した。

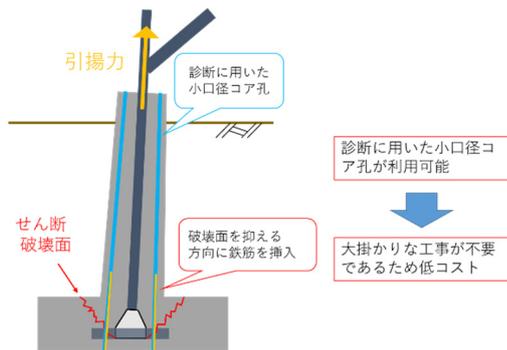


図3 せん断補強鉄筋による補修方法

3.2 せん断補強鉄筋による補修方法の対象基礎

図4に示すように基礎床板が破壊する様相には、曲げ破壊とせん断破壊があり、本補修方法はせん断破壊によって壊れる基礎を対象としている。せん断補強鉄筋による補修方法の適応の可否は基礎個別に検討を要する。鉄筋基礎はせん断破壊面上に既に鉄筋が配置されており、せん断破壊が生じにくいため適用対象となりにくい。また、基礎床板の厚さが薄い基礎では床板部の曲げ破壊が先行しやすい傾向がある。

以上から、本補修方法が適用可能となる基礎の特徴としては、無筋基礎で床板厚さが厚い基礎であることがあげられる。

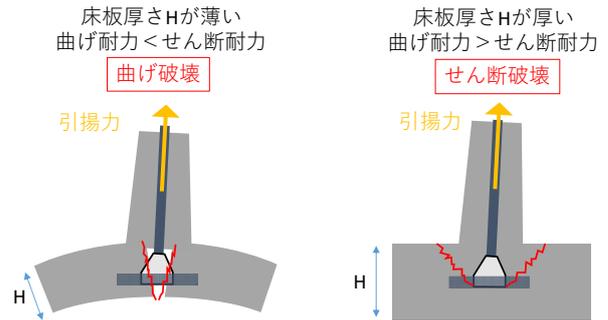


図4 床板部の形状による破壊様相の種類

3.3 試験体の引張実験

せん断補強鉄筋による補修方法の有効性を確認するため、送電用鉄塔基礎の1/6スケール試験体3体の引張実験を行った。

(1) 試験体

試験体のサイズには、引張実験装置に設置できる寸法である送電用鉄塔基礎の1/6スケール縦500mm×横500mmとした。試験体の構造を図5に示す。せん断補強鉄筋の本数によるせん断耐力の増加効果を確認するため、3体の試験体（せん断補強鉄筋1、2、4本）を準備した。

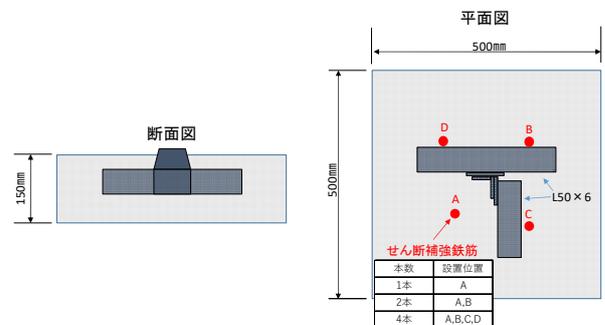


図5 試験体の構造

(2) 実験方法

図6に示す引張実験装置（島津製作所、油圧式サーボパルサ EHF-UG35-70L）を用いて、固定した試験体のいかり材を引張り、試験体の最大耐力（せん断耐力）を求める。試験体のいかり材はL型から平板に溶接加工のうえ実験装置に取り付けた。また、試験体を固定する引張実験装置の土台に合わせた架台を製作した。

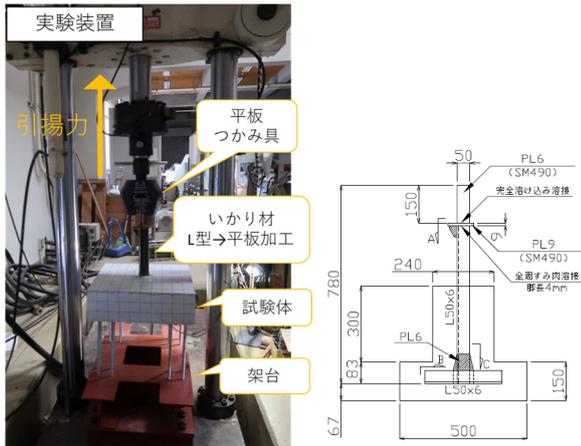


図6 実験装置・いかり材構造

(3) 実験結果

せん断補強鉄筋による補修方法を施した送電用鉄塔基礎の1/6スケール試験体3体について、引張実験を行った結果を図7に示す。

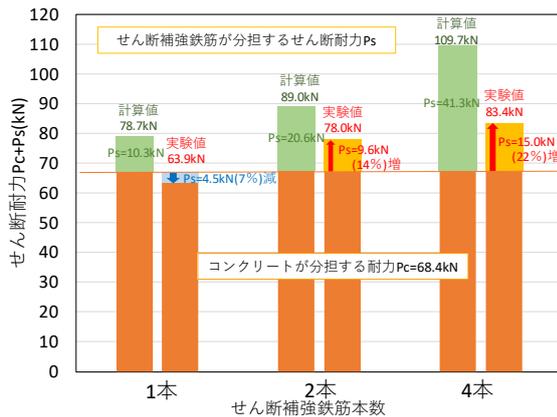


図7 各試験体の引張実験結果

せん断補強鉄筋1本(図5の位置A)を挿入した場合、せん断耐力は63.9kNとなり、コンクリートが分担する耐力の計算値68.4kNより4.5kN(▲7%)低い値であった。せん断補強鉄筋2本(図5の位置A, B)を挿入した場合、せん断耐力は78.0kNとなり、コンクリートが分担する耐力の計算値68.4kNより9.6kN(+14%)大きい値であった。また、せん断補強鉄筋4本(図5の位置A~D)を挿入した場合、せん断耐力の計算値は83.4kNとなり、コンクリートが分担する耐力値68.4kNより15.0kN(+22%)大きい値であった。

(4) 実験の評価

本実験において、2本以上のせん断補強鉄筋を挿入することで、せん断耐力を1~2割増加させることが確認できた。しかし、せん断補強鉄筋が分担するせん断耐力は、計算値と比較して半分以下の値であった。これは、せん断破壊面の状況からせん断補強鉄筋が十分に荷重のかかる位置に配置されていなかったためと考えられ、より効果があるせん断補強鉄筋の配置検討が今後の課題である。

4. まとめ

基礎コンクリート深部のひび割れ診断技術として、小口径コア採取後の孔壁面をカメラ撮影・目視観察する方法を現地適用した結果、コア採取と孔壁のカメラ画像を併用することで、コンクリートのひび割れを発見でき、コンクリートの状態を正確に診断できた。

無筋基礎コンクリート深部の補修技術として、診断に用いたコア孔にせん断補強鉄筋を挿入する方法を検討し、1/6スケールで引張実験を行った。この結果、2本以上のせん断補強鉄筋を挿入することでせん断耐力を1~2割増加できたことから、ひび割れによってせん断耐力が低下した基礎コンクリートの補修に有効であることが確認できた。

[謝辞]

本研究は、四国電力(株)送配電カンパニー送変電部殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

信号処理によるコンクリート内埋設物の探査精度向上に関する研究

(株)四国総合研究所 産業応用技術部 岡部 克也

キーワード： 電磁波レーダ法
地中レーダ
開口合成法
鉄筋コンクリート
埋設物探査
薄鋼電線管
非破壊検査

Key Words : Electromagnetic radar
Ground penetrating radar
Aperture synthesis
Reinforced concrete
Buried object detection
Thin steel conduit
Non-destructive inspection

Study on accuracy improvement to buried object detection by signal processing

Shikoku Research Institute, Inc., Industry Application Technology Department
Katsuya Okabe

Abstract

There are many buried objects such as conduits inside the walls and the floors of the reinforced concrete structures used in nuclear power plant buildings, some of which are related to the reliability of the reactor. It is necessary to prevent these buried objects from being damaged by drilling work in equipment work or repair work. The electromagnetic wave radar method is a method for detecting an embedded object by detecting a reflection echo of a pulsed electromagnetic wave from the surface of the embedded object. In recent years, with the improvement of the performance of small radar exploration equipment for concrete exploration, it has become widely used. On the other hand, detection may be difficult depending on the arrangement of the buried object, and in order to handle the exploration device appropriately, sufficient understanding about the propagation and reflection characteristics of the radar is often required. Some exploration devices are equipped with a function to automatically identify buried objects. For buried objects with irregularly arranged conduits, etc., the above-mentioned functions are not effective for the skilled person's discriminating ability, and in the actual situation, there is great expectation for exploration methods that do not require special knowledge and skills.

As a solution to this problem, we examined a method for improving the accuracy of buried object detection by performing appropriate signal processing on the received waveform.

1. はじめに

原子力発電所建屋等に用いられる鉄筋コンクリート構造物の壁や床等の内部には、電線管等の埋設物が多数存在し、中には原子炉の信頼性に関わるような重要なものもある。これらの埋設物が設備工事や改修工事の際に穿孔作業等によって損傷するのを防止する必要があり、そのためには事前の埋設物探査の実施が重要になる。電磁波レーダ法は、パルス電磁波の埋設物表面からの反射エコーを検出することにより埋設物を探知する方法であり、近年、コンクリート探査向けの小型レーダ探査装置の性能向上とともに広く使われるようになった。一方で、埋設物の配置によっては探知が困難になる場合もあり、適切に探査装置を扱うには、レーダの伝搬・反射特性等に関する十分な理解が必要になることも多い。埋設物を自動判別する機能を備えた探査装置もあるが、電線管等が不規則に並んだ埋設物に対しては、熟練者の判別能力に及ばないのが実情であるため、現場では、特別な知識や技能を必要としない探査方法への期待が大きい。

この問題に対する解決手段として、受信波形に適切な信号処理を行うことにより、電磁波レーダ法による埋設物の探査精度を向上させる方法について検討した。

2. 電磁波レーダ法の概要

電磁波レーダ法の基本的な考え方を図1に示す。

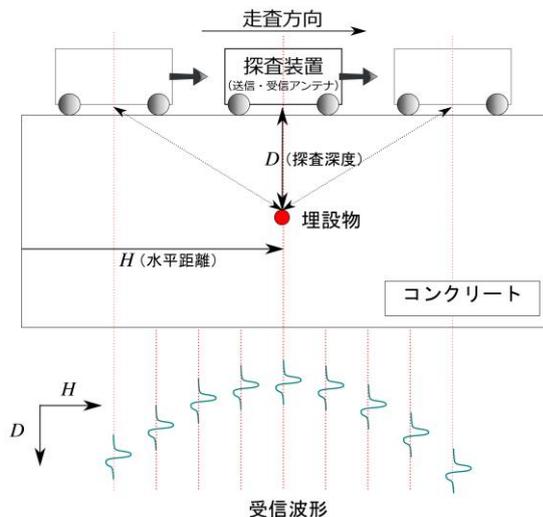


図1 電磁波レーダ法の概要

電磁波レーダ法では、一般に、電磁波の送受信アンテナとエンコーダ付きの車輪、ディスプレイを備えた探査装置を使用する(図2)。電磁波(周波数800~2,600MHzのパルス波)をコンクリートに向かって送信すると、コンクリート内に埋設物があれば、その表面からの反射エコーが受信される。埋設物の探査深度は電磁波の往復伝搬時間から判定することができ、埋設物までの水平距離は、探査装置を前方に走査することにより、車輪と連動するエンコーダを使って読み取ることができる。探査データは、通常、水平距離(エンコーダ値)を行、探査深度(往復伝搬時間)を列とする行列データ(いわゆるBスキャン画像)として記録・表示され、埋設物がアンテナの指向角の範囲内であれば、埋設物からの信号を受信することができる。電磁波の往復伝搬時間は埋設物とアンテナが離れるほど長くなるため、各地点で得られる埋設物の信号は、アンテナが埋設物の真上にある時を頂点として、山型の双曲線を描く。



図2 電磁波レーダ探査装置の例

3. 電磁波レーダ法の問題

コンクリート中を伝搬する電磁波は、コンクリート中の水分や空隙などによる吸収・散乱によって、空気中と比べて大きく減衰するため、電磁波レーダ法の探査可能な深度には限界が存在する。最新のコンクリート用電磁波レーダ探査装置の多くは、仕様上最大深度30~40cmまで探査可能とされるが、これは電磁波を妨げるものが存在しないような理想的な場合に限られ、埋設物の配置によっては、探査可能深度でも探知が困難であることが多い。図3①②に、特に探知が困難になる埋設物の配置の代表例を示す。

- ① 埋設物直上の鉄筋によって、電磁波がほとんど遮られる。例えば、鉄筋に固定された埋設電線管に多く見られる。
- ② 2本の鉄筋信号が交差点で干渉し、信号を強め合うことにより、埋設物が存在するかのような擬似信号を生じることがある。また同個所に埋設物があると、見落とされやすい。

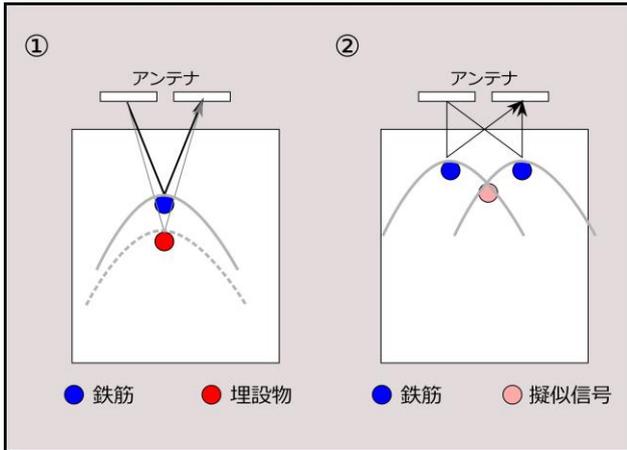


図3 探知困難な埋設物配置の例

4. 開口合成法による埋設物探査精度向上方法

開口合成法は、電磁波や超音波探査等において、複数の異なる位置の受信信号を合成することにより、位置分解能を向上させる信号処理技術である。2019年にブラックホールの直接観測に成功したことで話題になったイベントホライズンテレスコープも、この応用例の一つである。また、他の例としては、航空機や人工衛星などに搭載される移動式レーダにより連続的に受信された信号を合成する合成開口レーダがある。

電磁波レーダ探査装置も移動式レーダの一種と見なし、開口合成法を適用することが可能である。図4は、この開口合成法の適用手順を示したものである。まず、信号処理の対象となる波形の水平位置をA地点とし、ここに埋設物がある場合を考える。このとき、埋設物信号はA地点を中心として山型の双曲線を描く。次に、全ての地点で信号深度が揃うような深度方向の座標変換を探査データに適用する(図4②)。これは、A地点と信号の相対的位置関係で決まる幾何学的変換で、以下の式で表される。

$$y' = F(\delta, y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\sqrt{\left\{ y^2 + \left(\delta + \frac{L}{2} \right)^2 \right\} \left\{ y^2 + \left(\delta - \frac{L}{2} \right)^2 \right\}} + y^2 + \delta^2 - \left(\frac{L}{2} \right)^2 \right] \quad (1)$$

(y' , y : 座標変換前と後の深度座標、 δ : A地点と信号の水平距離、 L : 送信・受信アンテナの間隔)

最後に、変換した信号をA地点の信号に加算する。同じ計算を各走査位置で行うと、埋設物の位置にピークがあるような波形分布が得られると考えられる(図4③)。

最終的に、この信号処理により水平座標 x 、深度座標 y の探査データ $P(x, y)$ は以下の式に従って $Q(x, y)$ に変換される。

$$Q(x, y) = \sum_{x'=x-W}^{x+W} P(x', F(x'-x, y)) w(x'-x) \quad (2)$$

(w : 区間 $[-W, W]$ を台に持つ窓関数)

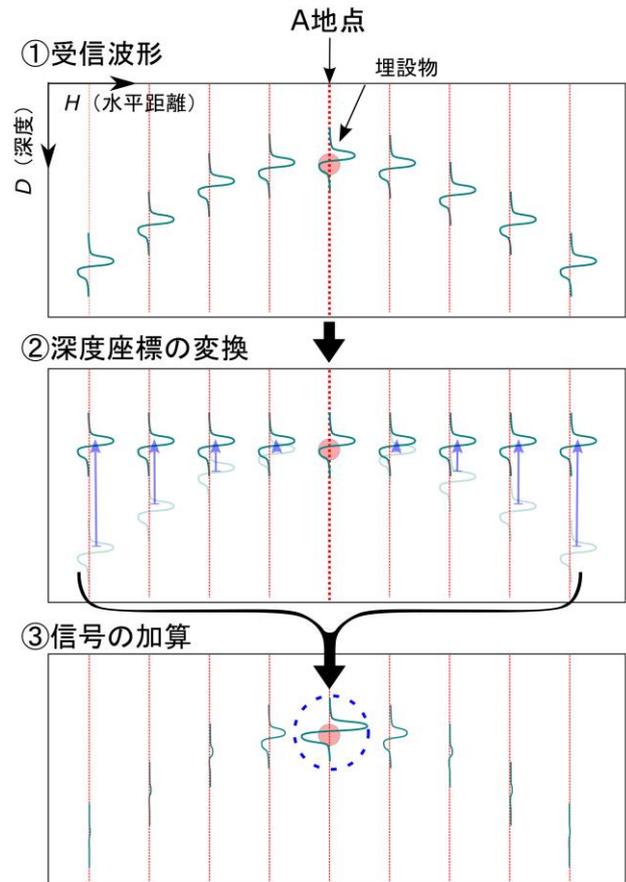


図4 開口合成法の適用手順

(1)式の導出においては、アンテナとコンクリート表面にほとんど隙間が無いと仮定している。しかし、実際の探査装置には、コンクリート表面を滑らかに走査する必要があるため、探査装置底面とコンクリート表面に数 mm 程度の隙間(空気層)が存在する。この間隔は探査深度と比較すると狭いが、屈折角が大きくなるため、電磁波の伝搬経路に与える影響は小さくない(図5)。屈折を考慮した電磁波の往復伝搬時間を初等関数で表すことはできないが、フェルマーの原理から、電磁波が最短で往復可能な伝搬経路を通るという特性を利用すると、容易に数値計算に有利な最適化問題に落とし込むことが可能である。ただし、式(2)の計算は変数 x, y, x' についての3重ループとなるため、関数 $F(\delta, y)$ の計算結果をプールする等、計算コストを低減する対策が必要となる。

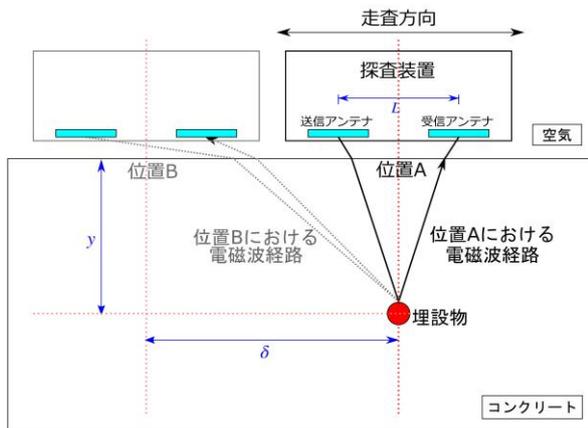


図5 屈折を考慮した電磁波の伝搬経路

5. 信号処理の適用例と探査精度の評価

本稿で扱う信号処理技術の効果を、幾つかの実例を通して紹介する。

図6は実際に信号処理技術を現場で適用したときの様子である。信号処理はノートPC上の専用ソフトウェアで行う。探査データは探査装置から取り込む必要があるが、更新分のみ一括で半自動的に取り込む機能を備えており、現場作業の負担にならないように工夫している。

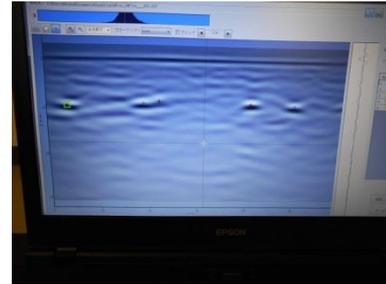


図6 信号処理技術適用時の様子

コンクリート試験体(図7)を矢印の方向に探査した結果を図8に示す。信号処理の効果を分かり易くするため、以下の信号処理ステップ毎の結果を示している。

- ① 深度方向に対する信号減衰に対する補正。
- ② ①に開口合成法を適用。
- ③ ②に屈折効果の補正を追加。
- ④ ③に加えて、埋設物信号を強調するためのコントラスト調整を実施。

開口合成法の効果として、上段の2本の鉄筋と電線管からの信号の交差部分の擬似信号が除かれていることが確認できる。屈折効果の補正は、作用は小さいものの、相対的に探査面に近い程効果が大きいことが確認できる。なお、左右の鉄筋は外径が異なるにもかかわらず、信号形状にほとんど違いが認められないことから、この方法により、数 cm オーダーの埋設物の外形を判断するのは困難であるといえる。

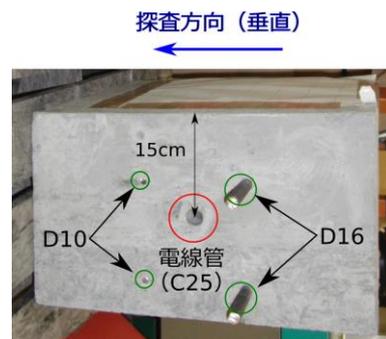


図7 コンクリート試験体

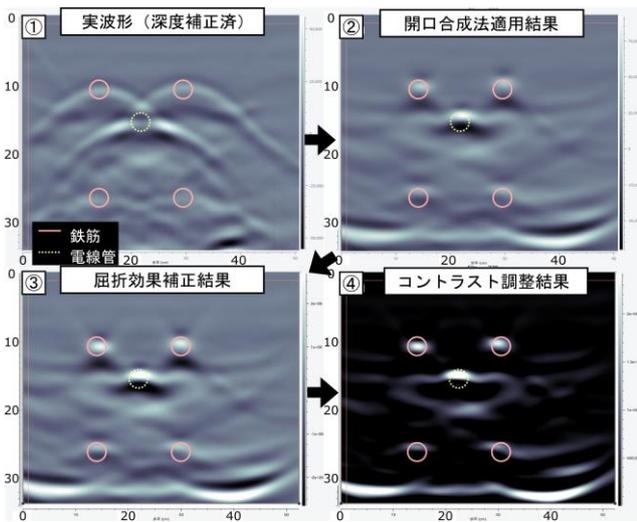


図8 コンクリート試験体への適用結果

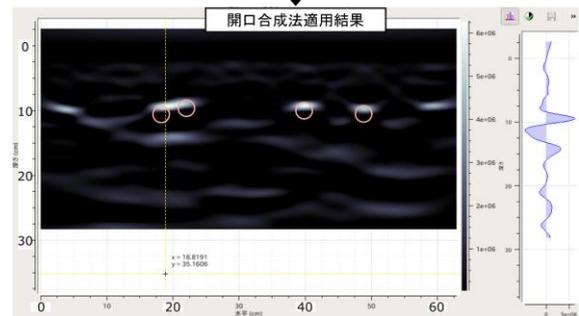
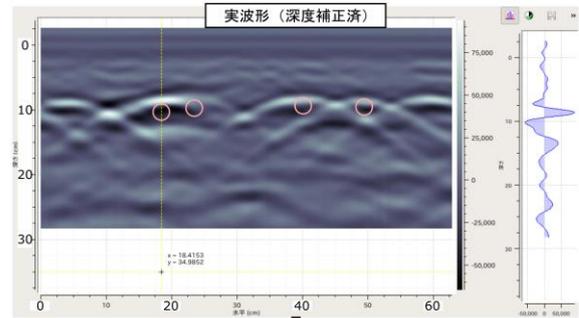
図9はコンクリート建築物の壁面の探査結果である。例1、例2は、同じ鉄筋を1m程離れた個所で探査を行っている。深度10cmのところに重ね継手と思われる2本1組の鉄筋が2組確認できるが、例1と例2では間隔に若干の違いがあるため、2本の鉄筋がわずかに傾いていることが分かる。例1の水平距離20cm付近にある鉄筋2本は特に間隔が狭く、実波形ではほぼ重なっている。一方、開口合成法適用結果では、信号に重なりはあるものの、それぞれの信号のピークを判別することは可能であり、それらが3cm程度離れていることが確認できる。このことから、信号処理の効果として、2本の鉄筋の水平方向に対する位置分解能が向上していることが分かる。

6. おわりに

本稿では、鉄筋コンクリート内の埋設物を電磁波レーダ法により高精度に特定する技術に関する研究成果を紹介した。この技術は、原子力発電所の改修工事で、はつり作業を実施する際に、電線管等の重要構造物が損傷するトラブル等の未然防止につながる事が期待できる。

この研究は、鉄筋や金属電線管等の金属埋設物を主な探査対象としていたが、現場では合成樹脂電線管の探査に対する需要も高いと考えられる。今後、合成樹脂電線管の探査精度の向上や、合成樹脂電線管と金属電線管や鉄筋との判別方法等についても検討を進める予定である。

例1



例2

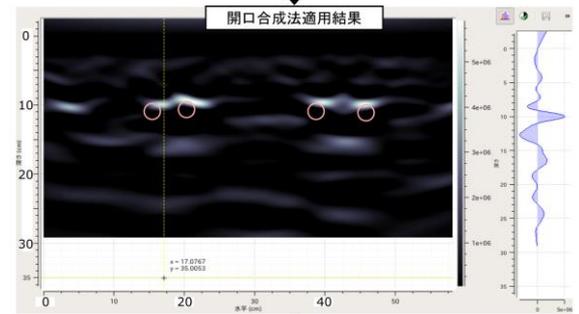
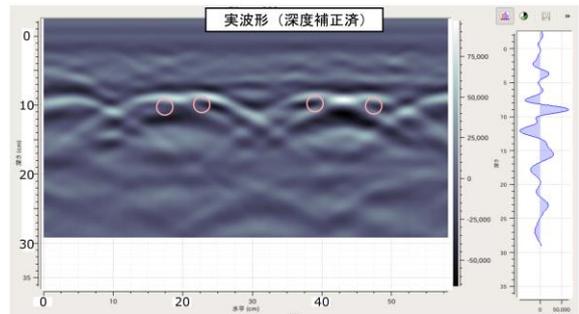


図9 コンクリート壁面への適用結果

[謝辞]

本研究は、四国電力(株)原子力本部殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

超低消費電力フィールドモニタリングシステムの開発

(株)四国総合研究所 電子技術部 中西 美一
(株)四国総合研究所 土木技術部 藤本 知規

キーワード： フィールドモニタリング
無線通信式
超低消費電力

Key Words : Field Monitoring
Wireless
Ultra-low Power

Development of the ultra-low power wireless field monitoring system.

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics Technology Department

Yoshikazu Nakanishi

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Tomoki Fujimoto

Abstract

Current our society doesn't equip enough field monitoring capability mainly due to high device cost and high electric power consumption. Ultra low electric power consumption and reasonable cost field monitoring systems are essential to protect our society from unprecedented natural disasters such as large scale inundation due to torrential rain along with huge typhoon.

We have been developing ultra-low power and reasonable cost wireless field monitoring platform technology which is called openATOMS. In this article, we show newly developed water level wireless monitoring system based on openATOMS. It equips ultrasound water level sensor, rainfall sensor and high-resolution still image camera, and it operates at least five years with internal battery.

1. はじめに

近年、従来の想定を超えた規模の自然災害が多発する中、多くの場所で水位や地すべりの常時モニタリングシステムの整備が喫緊の課題となっているが、既存のモニタリングシステムは非常に高価であること、コストの掛かるインターネットクラウドサービスの利用が前提となっているものが殆どであること、ならびに、センサ部の消費電力が大きく商用電源が必要となる場合が多いことなどが課題となり、地域住民の期待通りには導入が進んでいない。

著者らは、システム開発コストおよびデバイスコストを大きく低減すると共に、クラウドサービスに依存しないフィールドモニタリングシステム構築用共通プラットフォーム技術である openATOMS の開発、ならびに、それを活用した超低消費電力フィールドモニタリングシステムの開発を進めている。¹⁾²⁾³⁾⁴⁾

本稿では開発した超低消費電力フィールドモニタリングシステムの概要、ならびに、その具体的な実装例として無線通式水位モニタリングシステムについて報告する。

2. openATOMS の概要

openATOMS は、①IoT 無線通信機能と LTE 通信機能ならびにエッジクラウド機能を搭載したデータ収集ユニット、および、②IoT 無線通信機能を搭載したセンサユニットで構成されており、1 台の①に最大 100 台程度の②を IoT 無線通信で接続可能となっている。

センサユニットは、独自開発の超低消費電力マイコン基板である NICE32、および、市販の各種センサで構成される。各種センサを NICE32 へ接続する方法として、アナログ電圧、UART 通信、I2C 通信、SPI 通信、1Wire 通信、および、パルス入力に対応しており、市販の殆どのセンサを接続可能である。

2.1 NICE32 について

NICE32 はセンサユニットのコアデバイスとして独自開発したもので、低消費電力で処理性能の高い最新設計の MCU を中心に、各種センサを接続するための複数の IO 回路を搭載している。回路設計では徹底した低消費電力化対策を施してあ

り、NICE32 単体の待機電流は定期動作に必要な内蔵 RTC を動作させた状態で $7\mu\text{A}$ 程度と低く、各種センサを接続した場合もその電源供給を厳密に管理することで $10\mu\text{A}$ 以下となっている。

外部記憶装置として、最大 32GB の microSD メモリを搭載可能で、動作パラメータの設定や IoT 無線通信では伝送できない大量のデータの保存もできるようになっている。

通信方式は 2.4GHz_ZigBee、920MHz_MultiHop、920MHz_LPWA(LoRa) から用途に応じて選択でき、通信方式が変わってもそのプロトコルの違いは接続ドライバソフトウェアが吸収し、アプリケーションソフトウェアからはほぼ共通の API で通信可能となっている。

また、基本ソフトウェアとして、極低消費電力動作をサポートする独自開発の S.OS_32 を搭載している。S.OS_32 では極低消費電力で動作する MCU 内蔵 RTC による間欠動作が可能で、待機時には MCU のクロックを停止する他、接続されたセンサへの電源供給をミリ秒単位で制御することにより消費電力を低減している。

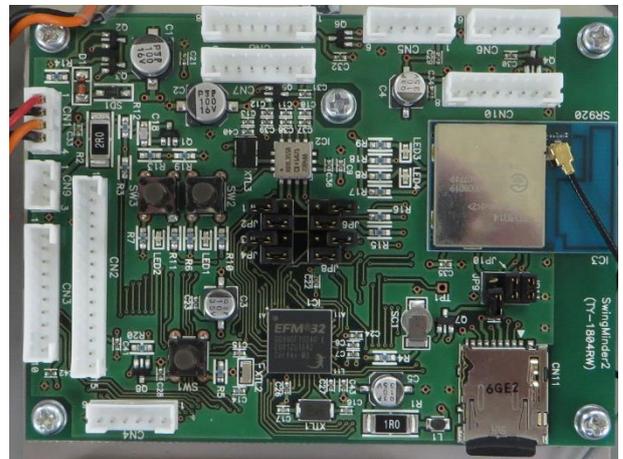


図-1 NICE32 電子回路基板

2.2 センサについて

センサ類の選定は常に難しい問題である。性能、コスト、消費電力を調査し、目的別に最適と思われるセンサを選定し、その接続ドライバソフトウェアを開発しなければならない。必要になってから探していたのでは間に合わないため、定期的に市販センサの状況を調査し、使えそうなセンサを事前評価すると共に接続ドライバソフトウェア

を開発し、必要な時は直ぐに使えるように準備するという地道な作業を10年以上継続してきた。

センサユニットは現時点で、超音波水位センサ、降雨量センサ、気温・湿度センサ、マルチポイント温度センサ、放射温度センサ、日射センサ、照度センサ、CO₂濃度センサ、傾斜センサ、地すべりセンサ、振動センサ、騒音センサ、塵埃センサ、人検知センサ、静止画像カメラ等に対応している。選定基準は必要十分な性能を有しかつ安価であることで、騒音センサなどは300円のMEMSマイクとソフトウェアによる信号処理を組み合わせで実現している。

静止画像カメラは1600×1200の高画質タイプを選定しており、JPEG圧縮後のデータサイズが100KB以上となるため、無線送信はせずNICE32に搭載されているmicroSDメモリに保存する仕様とした。1撮影当たりの所要時間はmicroSDメモリへの保存時間を含めて3秒以下で電流消費量は330mA・secであり、単三型Li乾電池×2本で3万枚程度の撮影が可能である。画像を無線伝送できないカメラの価値に疑問を抱かれるかもしれないが、センサと連動した撮影画像を回収できれば災害の発生状況の分析等に有効であることは容易に想像できるであろう。

2.3 データ収集ユニットについて

データ収集ユニットはIoT無線ネットワークとインターネット間のゲートウェイとしての機能と計測データを蓄積・処理するエッジクラウドサーバとしての機能を搭載している。コンピュータ基板には安価なオープンソースハードウェアであるBeagleBoneとオープンソースソフトウェアであるLinuxを採用し、様々なフィールドモニタリングに柔軟に対応できる独自開発のソフトウェア(ATOMSエンジン)を搭載している。ATOMSエンジンは移植性を考慮してJava言語で記述しており、使用するコンピュータハードウェアを変更してもほぼ無修正で動作する。

3. 水位モニタリングシステムとしての実装例

センサユニットには様々なセンサを搭載できるが、ここでは超音波水位センサ、降雨センサおよび静止画像カメラを搭載した、920MHz LPWA無線通式水位モニタリングシステムとしての実

装例について報告する。openATOMSを利用することで、開発期間は1ヶ月程度と当社における従来のシステム開発期間の1/5以下とすることができた。(人件費換算で10百万円→2百万円)

3.1 基本仕様

[水位センサユニットの仕様]

- ・水位計測範囲 : 0.5~10m
- ・降雨量計測範囲 : ~100mm/hr
- ・画像解像度 : 1600×1200 pixel
- ・無線通信距離 : 20mW出力 最大5km程度
250mW出力 最大15km程度
- ・電池寿命 : 3~5年
(画像撮影頻度による)
- ・重量 : 2kg
- ・動作可能温度 : -20~60°C

[データ収集ユニットの仕様]

- ・インターネット接続 : LTEモバイル回線
- ・センサユニット接続数 : 16
- ・データ蓄積および参照 : 内蔵クラウドサーバ
- ・消費電力 : 11W
- ・動作可能温度 : 0~40°C
- ・LTE通信費 : 900円/月

水位計測は現場設置の容易な超音波距離計測方式とし、降雨量計測は転倒升方式とした。超音波水位センサの部品コストは9,300円、降雨センサは19,000円、静止画像カメラは3,000円程度で、さらに防水加工などの追加コストが掛かり、これらはセンサユニットの製造コストのうちかなりの部分を占めている。

カメラを使用せず、10分間隔で水位計測を行った場合のセンサユニットの平均消費電力は0.7mW程度と小さいため、その電源はコスト、信頼性およびメンテナンス性を考慮し、単三型Li乾電池を6本内蔵し5年間電池交換なしで使用できる設計とした。Li乾電池は自己放電率が1%/年未満と極めて小さく、また、-40~60°Cの温度帯で安定して使用可能であることから、現時点では他の如何なる電源方式よりも信頼性が優れており、かつ、安価である。

一方、無線中継局は常時100mW程度の電力を消費するため乾電池電源での動作は現実的ではなく、商用電源を確保できない場合はA4サイズ程

度の太陽電池と Li-ion 蓄電池を組み合わせる方式が最良の選択肢である。

データ収集ユニットの消費電力は 11W 程度と大きいため、商用電源が必要である。

静止画像は予め NICE32 に設定した撮影時間帯で、水位計測と連動して撮影されるようになっている。また、水位計測の時間間隔は水位の変化率に応じて自動調整できるようにもなっている。

NICE32 には 16GB の microSD メモリを搭載しており、10 万枚程度の静止画像を保存できるが、1 撮影当たり 330mA・sec の電流消費量があるため、3 万枚の撮影を行うと電池寿命が 2/3 程度 (5 年→3 年) となる。

河川の急激な増水や斜面の崩壊をセンサで検知しても、センサ情報だけではその現象の原因を解析し、今後の予防手段を講じるには不十分であることが多い。センサの計測値に大きな変動があった時の静止画像が記録できていれば、それらの作業の迅速化と高精度化に役立つものと思われる。



図-2 カメラ画像サンプル

IoT 無線通信方式には 920MHz_LPWA (LoRa) を採用しており、電波利用料の不要な 20mW 出力タイプでも、見通しを確保できれば 5 km 程度の通信距離があり、市街地でも 1 km 程度の通信は可能である。また、400 円/年の電波利用料の納付が必要になる 250mW 出力タイプを使用すれば、3 ~ 15km の通信距離があり、より広範囲のモニタリングが可能である。更には、太陽電池電源の無線中継局を設置することにより 4 ホップ程度の無線中継が可能となるため、大規模な水位モニタリ

ングシステムが容易に構築可能である。

3.2 センサユニットの外観

図-3 に降雨センサを除くセンサユニットの外観を示す。ユニット本体は簡易防水構造の ABS 樹脂ケース内に NICE32 電子回路基板と電池ボックス (単三×6 本) を収容している。NICE32 および電源は -20~60℃ で安定動作するため、特別な耐環境対策は不要で、屋外の直射日光下に暴露設置可能である。

本体左側の塩ビパイプの下側先端に超音波水位センサを接続している。右側の塩ビパイプの中には、920MHz_LPWA 無線通信モジュールとアンテナを収容している。センサモジュール、通信モジュールを接続するケーブル長は最大 5 m となっている。安価で耐候性に優れた塩ビパイプを利用することで防水構造を安価に実現している。ただし、超音波水位センサは音速補正用の温度センサを内蔵しているため、直射日光を当てないように日よけを設置することが望ましい。

本体下のカメラモジュールも簡易防水構造となっているが、レンズの汚損を防止するため、現場設置時には雨よけを取り付けることが望ましい。カメラモジュールと NICE32 間は 4 Mbps の高速通信を行っており接続ケーブルの最大長は 70cm と短い。別途長距離通信用のドライバモジュールを使用すれば 10m 程度まで延長可能である。カメラは撮影角 52° のピンホールレンズを搭載しているが、M12 マウント方式の任意の撮影角のレンズに交換可能である。



図-3 センサユニットの外観

3.3 フィールド試験

図-4 にフィールド試験におけるセンサユニットの設置状況を示す。超音波水位センサモジュールはその下方の障害物を避けて設置する必要がある。また、無線通信モジュールはできるだけ高所に設置することが望ましい。本体ボックスはメンテナンスのためアクセスが容易な設置方法とすることがある。

センサユニットの設置とメンテナンスは簡単ではない場合が多いため、コンパクトかつ軽量で、内蔵電池電源で長期間動作可能であることのメリットは非常に大きい。また、優れたパッケージングは設置作業の省力化とメンテナンス性の向上に大きく寄与するため、様々な現場での利用を想定したデザインとする必要がある。



図-4 センサユニットの設置状況

データ収集ユニットはセンサユニットの設置場所から 1 km 程離れた商用電源の確保できる場所に設置しており、台風に伴う豪雨時にも安定して水位計測データの受信が行えることを確認し

ている。データ収集ユニットにはコンパクトなクラウドサーバ機能が搭載されており、インターネット経由で PC、スマホなどの WEB ブラウザを接続し、現在水位の参照や過去の水位変動グラフを表示することができるようになっている。また、スマホからの簡単な操作で、任意の水位でメール通報するように設定することもでき、近隣住民の安全を守る街角水位計として必要十分な機能を搭載している。

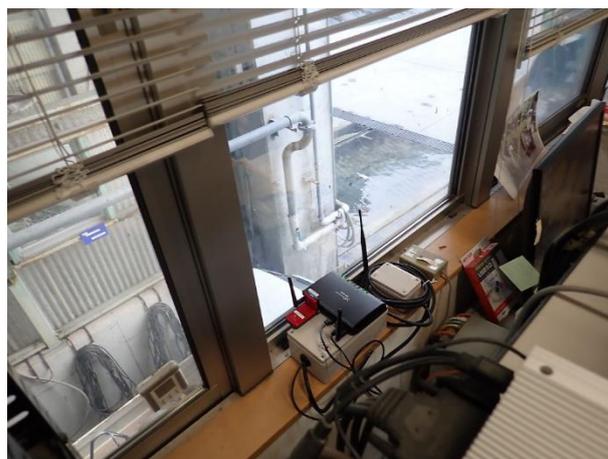


図-5 データ収集ユニットの設置状況

4. まとめ

本報告では、openATOMS の概要ならびにそれをベースに開発したフィールドモニタリングシステムの一例として「無線通信式水位モニタリングシステム」を紹介した。コスト低減対策としては、openATOMS という共通プラットフォーム技術の利用により開発コストを抑制するとともに、性能とコストのバランスに優れたセンサを選択することで、既存の製品に対して 50%以上の低コスト化を実現している。また、センサユニットの低消費電力化対策としては、低消費電力で高性能な 32bitMCU の採用ならびに LPWA 無線通信技術の採用というハードウェア面の工夫に加えて、低消費電力動作を実現する独自開発の基本ソフトウェアと、センサへの電源供給制御を厳密に行うというソフトウェア面の工夫により、内蔵乾電池電源で 5 年間の連続動作を実現している。

開発した無線通信式水位モニタリングシステムは、現在フィールド試験により実環境下での実用性検証を継続して実施しており、今後いくつかの改良を加えた後に製品化の予定である。本シス

テムが地域社会の安全安心の向上に多少なりとも貢献できれば幸いである。

[謝辞]

本研究は、四国電力(株)新規事業部殿より委託を受け実施したものである。

最後に、無線通信式水位モニタリングシステムの開発ならびにフィールド試験に多大なるご協力を頂いた、香川高等専門学校、高松琴平電気鉄道(株)、四国旅客鉄道(株)の関係各位に深く感謝いたします。

[参考文献]

- 1) 中西美一：openATOMS を活用した各種フィールドモニタリングシステムの開発と運用，電気学会全国大会論文集（C部門），2011
- 2) 中西美一：高性能かつ安価な農業用環境モニタリングシステム（HaPPiMinder）の開発，電気学会全国大会論文集（C部門），2013
- 3) 中西美一：次世代 openATOMS の開発について，四国電力・四国総合研究所研究期報 No. 107 ，2017
- 4) 天野雄一郎他：無線式振動モニタリングシステム SwingMinder の開発，四国電力・四国総合研究所研究期報 No. 109 ，2018

ニッケルメッキ金属の腐食メカニズムに関する研究

(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 山本 松平
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 奥田 昌三
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 濱口 俊明

キーワード： ニッケルメッキ
大気腐食
硫酸イオン
亜硫酸ガス
海塩粒子

Key Words : Nickel plating
Atmospheric corrosion
Sulfate ion
SO₂ gases
Seasalt particles

Study on corrosion mechanism of Nickel plating

Shikoku Research Institute, Inc., Chemical Technology and Biotechnology Department
Shohei Yamamoto, Shozo Okuda, Toshiaki Hamaguchi

Abstract

Nickel-phosphorus plating (Ni-P plating) is anti-corrosive under atmospheric surroundings where are contaminated with such as seasalt particles. But, in an indoor environment, Ni-P plating corrosion was found where the base metal (iron) under the plating was disclosed until a short period (ca. 3 years).

In this study, we investigated the cause of Ni-P plating corrosion in the case. As the results, nickel sulfate hydrates was detected in corrosion products deposited on the plating surface. It suggests that Ni in the plating reacts with sulfate to expose the base iron. In addition, test pieces of Ni-P plating material were adhered with sulfate ions and seasalt particles in the same amount of actual environment. It was confirmed that the test materials with sulfate ions were more quickly corroded than that with seasalt particles.

Therefore, it was estimated that the present-Ni-P plating corrosion was accelerated by sulfate ions adhered on the surface, which was originated from SO₂ gases in the atmosphere.

1. はじめに

ニッケル(Ni)メッキは、大気中の酸素や水分(湿気)などに対し比較的安定なNiを用いて環境遮断することによって、素地の金属を保護する表面処理方法である¹⁾。Niメッキのうち、外部電流の代わりに還元剤として次亜リン酸塩を用いてメッキ被膜を析出させたものを無電解Ni-リン(P)メッキ(以下Ni-Pメッキ)と呼び、P含有率を増加させることで大気中の海塩等に対する耐食性をさらに向上させることができる²⁾³⁾。しかし、海塩等の比較的少ない屋内大気環境下において、短期間の内にこのようなNi-Pメッキが損傷し、素地の金属が腐食するケースがある。

本研究では、その原因と対策の検討のため、実際に腐食が生じたNi-Pメッキ材料の腐食状況観察、化学分析および腐食再現試験を行い、メッキ層の腐食から発錆に至るメカニズムについて実験的に確認した結果を報告する。

2. Ni-Pメッキの発錆原因調査

2.1 供試材料

図-1に、調査に供したNi-Pメッキ部材を示す。外径および長さ約15cmの円筒型の炭素鋼にNi-Pメッキが施されたもので、約3年間の屋内使用により赤錆部を除いた表面全体に赤褐色の錆が生じている。一方、赤錆部は銘板が取り付けられていた箇所、大気環境から遮断されていたため錆が生じず、メッキ施工当初の状態が保たれた状態であった。当該部材のうち錆が生じている箇所を発錆部、生じていない箇所を正常部として試験に用いた。

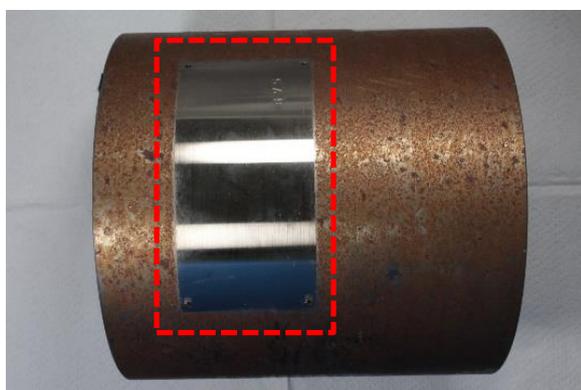


図-1 錆が生じたNi-Pメッキ部材の外観
(赤枠内：錆が生じなかった正常部)

2.2 試験方法

(1) メッキ施工状況調査

当該部材のメッキ施工状況を確認するため、メッキ正常部を切り出し、光学顕微鏡により断面を観察するとともに、蛍光X線(XRF)分析によりメッキ層の膜厚およびP含有率を測定した。また、発錆部と正常部の両方を含む箇所を試験片として切り出し、希硝酸(0.05N)を塗布した綿棒で試験片全体を軽くこすり錆を除去した後、鉄分と反応する試薬を塗布してメッキ欠陥(ピンホール)の有無を検出するフェロキシル試験(JIS H8617)を行った。

(2) 腐食状態の観察

メッキ層の腐食状態を観察するため、メッキ正常部と発錆部それぞれの表面および断面について、光学顕微鏡観察、電子線マイクロアナライザ(EPMA)を用いた電子顕微鏡(SEM)観察およびエネルギー分散型X線分光法(EDX)による元素マッピング(MAP)分析を行った。なお、表面観察時は2.2(1)と同様の手法で錆を除去したものを用了。

(3) 腐食生成物の性状分析

メッキ部材表面の腐食生成物(錆)の性状を把握するため、薬さじを用いて部材表面をこすり、回収した腐食生成物について、EDXにより元素組成、X線回折(XRD)法により化学形態の分析を行った。

2.3 試験結果と考察

(1) メッキの施工状況

当該部材に施工されていたNi-Pメッキ層の分析結果を図-2に示す。当該部材では、素地の表面に厚さ約13 μm でほぼ均一にメッキ層が形成され、通常の屋内向け仕様の目安である8 μm 以上⁴⁾が十分に確保されていることから、施工時の膜厚管理は適正に実施されていたと言える。また、メッキ層のP含有率は約10%で、海塩等に対する耐食性が良好とされる9~11%の範囲内にあった²⁾。

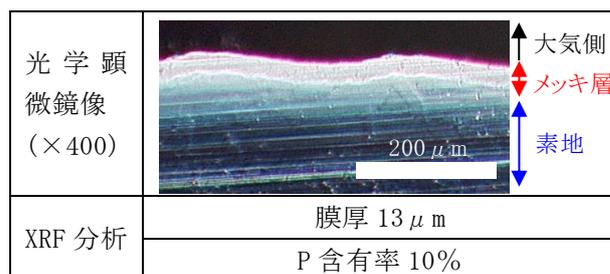


図-2 メッキ性状の分析結果

図-3 にフェロキシル試験によりメッキ欠陥の有無を観察した結果を示す。発錆部では、素地である炭素鋼に含まれる鉄(Fe)と試薬が反応して青色の発色が認められ、メッキ層を貫通した欠陥が生じていた。Ni-P メッキにおいては、素地の状態(表面粗さ等)によって施工時から欠陥が生じる可能性があるが⁵⁾、正常部ではこのような欠陥を示す発色は認められなかった。

以上の結果から、当該部材に対するメッキ処理は適切に施工されており、発錆は設置後の環境に起因したメッキ層の腐食によるものと推定した。

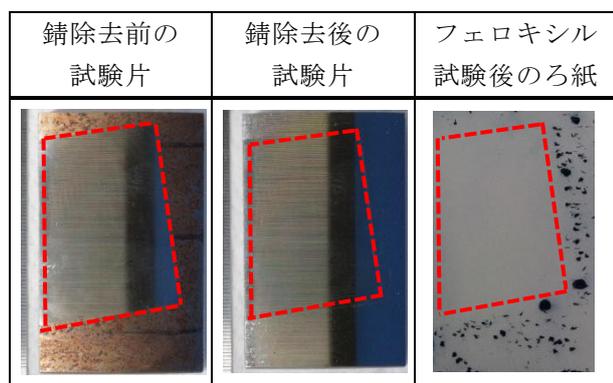


図-3 フェロキシル試験の結果(赤枠内：正常部)

(2) 腐食状態の観察

メッキ正常部と発錆部それぞれの表面のSEM像およびMAP像を図-4に示す。正常部の表面はヘアライン加工による縞模様の他は特に異状は認められないが、発錆部では矢印で示すように局所的にえぐれたような箇所が観察された。当該箇所ではMAP分析においてFeが検出されており、2.3(1)の結果と同様に腐食によりメッキ層に貫通欠陥が生じ、素地の炭素鋼が露出している状態が観察された。

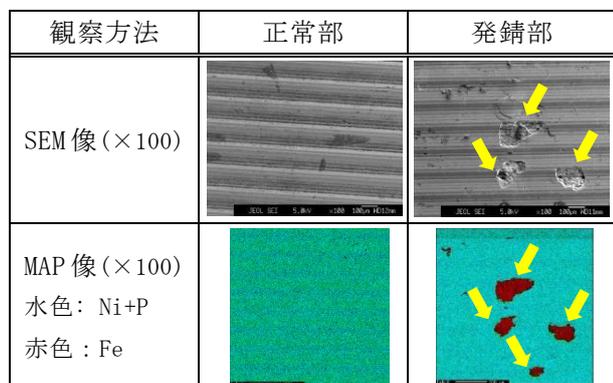


図-4 正常部および発錆部表面のSEM像とMAP像(黄色矢印：メッキ欠陥箇所)

発錆箇所の断面の光学顕微鏡観察結果およびMAP像を図-5に示す。発錆箇所ではメッキ層に亀裂状の欠陥が生じており、その下部の炭素鋼に腐食が認められた。また、メッキ層上には欠陥箇所から漏出したと思われる錆(腐食生成物)が上載している。当該箇所の鉄の分布密度を表すMAP像から、欠陥下部やメッキ層に上載した錆の主成分はFeであることが判った。

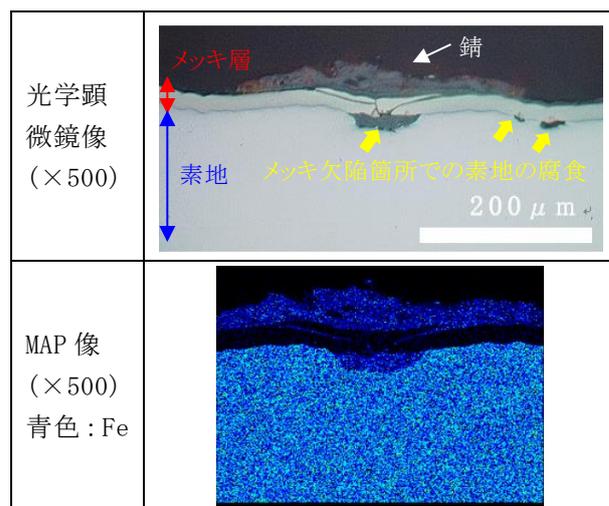


図-5 発錆部断面の光学顕微鏡観察像とMAP像

(3) 腐食生成物の性状分析

EDXによる腐食生成物の元素組成分析結果を表-1に、XRDによる化学形態の定性結果を図-6に示す。腐食生成物中の結晶性成分の大半は塩素イオン(Cl⁻)の存在下で生成され易いオキシ水酸化鉄(β -FeOOH)や、マグヘマイト(γ -Fe₂O₃)等であった。また、Niは硫酸ニッケル水和物(NiSO₄(H₂O)₇)の形態で検出された。SO₄²⁻はNiの腐食促進因子として知られており⁶⁾、その腐食生成物であるNiSO₄(H₂O)₇が検出されたことから、当該Ni-Pメッキの腐食原因として亜硫酸ガス(SO₂)等に由来する付着SO₄²⁻の影響が疑われた。

表-1 腐食生成物の元素組成分析結果(EDX)

元素	重量%
Fe	55
O	22
Ni	20
S	2
Cl	1

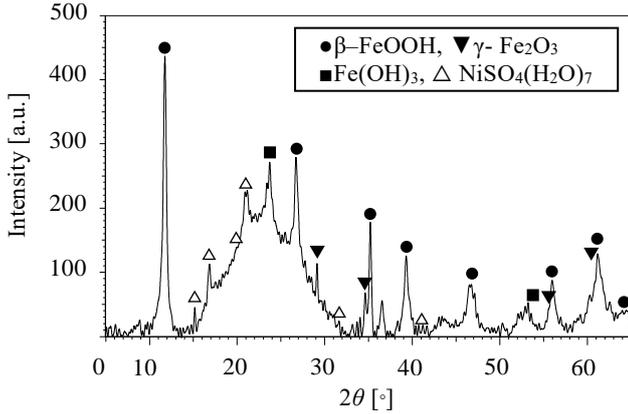


図-6 腐食生成物の XRD 分析結果

(4) 腐食メカニズムの推定

当該部材で生じた腐食について、腐食生成物の性状等と、すでに報告されている Ni メッキの腐食機構⁷⁾を考慮し、図-7 のような腐食メカニズムを推定した。まず、正常な Ni-P メッキ表面には酸化ニッケル (NiO) の被膜が形成されており、微視的な水膜に取り込まれた海塩からの Cl⁻等に対して防食の役割を果たしている (a)。この水膜中に SO₂ 等が取り込まれて酸化し、メッキ表面に SO₄²⁻が生じると、NiO は徐々に保護性の低い塩基性の硫酸ニッケルからなる被膜に形態が変わり、メッキ層の浸食が始まることとなる (b)。さらにメッキ層の浸食が進行して素地まで貫通すると、Ni に対してイオン化傾向の大きい Fe が選択的に水膜中に溶出し、メッキ層上に β-FeOOH や NiSO₄(H₂O)₇ 等からなる腐食生成物を形成したと推定される (c)。

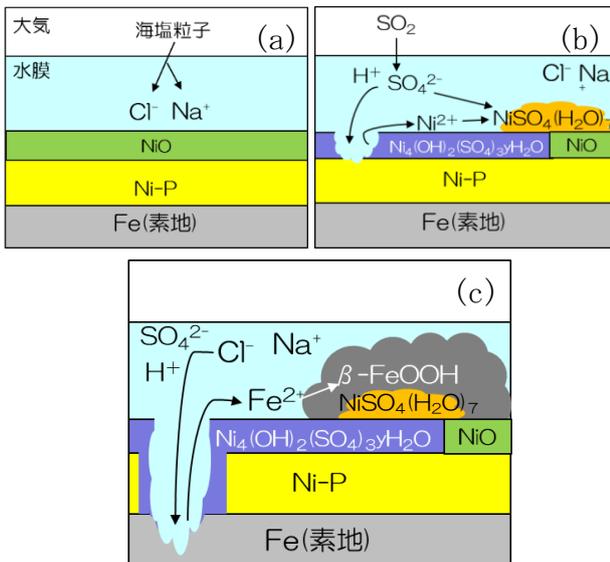


図-7 当該 Ni-P メッキの推定腐食メカニズム

3. 腐食再現試験

Ni 材料の腐食に及ぼす SO₂ 等の腐食性ガスの影響については種々報告⁶⁾⁸⁾されているが、Ni メッキの腐食に対する付着 SO₄²⁻量の影響を調査した報告はほとんどない。これは、先に述べたようにメッキ方法や膜厚により腐食に対する感度や程度が異なることから、汎用的な知見を得ることが難しいためと考えられる。本試験では、当該 Ni-P メッキの正常部を試験材料として、実際に付着していた SO₄²⁻量によって腐食が生じるか再現試験を行った。

3.1 試験方法

鋼材の腐食に対する付着塩等の影響を調査した手法⁹⁾を参考に試験を行った。即ち、図-1 の Ni-P メッキ正常部を試験片に用い、塩水のみを塗布したもの、硫酸 (H₂SO₄) を塩水に混和した液で実機相当およびその 2 倍の付着 SO₄²⁻量となるように塗布したものを乾燥させた後、相対湿度 75%程度に調湿したデシケータ内に室温 (20~25℃) で約 1 ヶ月間静置した。1 ヶ月後、試験片の外観から腐食の有無を比較した。

3.2 試験結果

結果を図-8 に示す。塩水のみを塗布した試験片では、変色は生じるものの発錆には至らなかった。一方、実機相当およびその 2 倍の付着 SO₄²⁻量の試験片では素地の炭素鋼の腐食を示す赤褐色の発錆が認められ、当該 Ni-P メッキに実機相当の SO₄²⁻量が付着した場合、SO₄²⁻が Ni-P メッキの腐食促進因子として働き、1 ヶ月程度の短期間でメッキ欠陥が生じることを確認した。

試験片	塩水のみ	塩水+H ₂ SO ₄ 添加	
付着 Cl ⁻ 量	1mmol/m ² (実機相当)		
付着 SO ₄ ²⁻ 量	0mmol/m ²	1mmol/m ² (実機相当)	2mmol/m ²
試験開始 1 日目			
試験開始 28 日後			

図-8 腐食再現試験の結果

4. まとめ

発錆が確認された Ni-P メッキ材料について調査した結果、発錆部ではメッキに腐食が生じており、腐食は素地まで貫通していた。このようなメッキ層の欠陥は正常部には見られなかったことから、発錆部で見られたメッキ欠陥は、設置後の環境に起因して生じたものと推定した。

腐食生成物(錆)の化学形態は、その大半は Cl^- 存在下で生成される Fe の腐食生成物であった。また、Ni が SO_4^{2-} と反応して生成する $\text{NiSO}_4(\text{H}_2\text{O})_7$ が検出されたことから、メッキ層の欠陥は空気中の SO_2 等から生じる SO_4^{2-} 付着による Ni 腐食が疑われた。

SO_4^{2-} の Ni 腐食への影響を検証する試験を行った結果、塩水のみを試験片では顕著な腐食は見られなかったが、 H_2SO_4 を添加した試験片では SO_4^{2-} が当該 Ni-P メッキ部材の腐食促進因子として働いており、屋内機器の拭き取り調査で測定されたレベルの付着 SO_4^{2-} 量で、素地に貫通するメッキ欠陥が生じることを確認した。

今後は、大気中の腐食性ガス成分の濃度や屋内機器表面への SO_4^{2-} 等の腐食因子の蓄積挙動について調査することにより、腐食因子の管理手法や腐食環境のモニタリング手法¹⁰⁾等について検討を加えたい。

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 電気鍍金研究会, “現代めっき教本”, 日刊工業新聞社, (2011)
- 2) 黒坂成吾, 佐藤誠, “無電解ニッケルめっき被膜の特性”, 表面技術, Vol. 65, No. 3 (2014)
- 3) 社団法人 腐食防食協会, “腐食・防食ハンドブック”, 丸善株式会社, (2000)
- 4) H. H. ユーリック, R. W. レヴィー, “腐食反応とその制御(第3版)”, 産業図書株式会社, (1989)
- 5) 横井昌幸, 城間成信, 森川務, “無電解ニッケルめっきの防食性能について”, 大阪府立産業総合研究所, 報告技術資料 No. 3 (1989)

- 6) S. Zakipour, J. Tidbled, C. Leygraf, “Atmospheric Corrosion Effects of SO_2 , NO_2 , and O_3 ” J. Electrochem. Soc., 144, 3513 (1997).
- 7) 中島但, “普及版・腐食診断事例解析と腐食診断法”, ㈱テクノシステム (2017)
- 8) 高沢壽佳, “金属材料の大気腐食に及ぼす NO_2 の影響”, 防食技術, 34, 612-617 (1985).
- 9) 押川渡, 糸村昌祐, 福島敏郎, “ステンレス鋼の大気中孔食に及ぼす相対湿度と付着塩の影響”, 琉球大学工学部紀要 第49号 (1985)
- 10) 布施則一, 朱牟田善治, 長沼敦, 谷純一, 堀康彦, “大気腐食モニタリングセンサを用いた送電鉄塔腐食環境解析法の確立”, 電力中央研究所報告, H18005 (2018)

最後に執筆者、編集ならびに審査にあられた方々のご協力に対して厚くお礼申し上げます。

研究期報 第111号 (無断転載を禁ず)

編集兼発行人 堀 田 宏 司
株四国総合研究所

発 行 株四国総合研究所
〒761-0192
香川県高松市屋島西町 2109 番地 8
T E L (087) 843-8111
E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp