

研 究 期 報

No. 109

平成 30 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 0 9 号 目次

塗膜剥離に影響する因子の考察および塗膜剥離抑制塗料の開発	1
Consideration of factors influencing coating film peeling and development of paint film peeling control paint	
無線式振動モニタリングシステム Swing Minder の開発.....	6
Development of the structural vibration multipoint synchronization monitoring system "Swing Minder"	
石炭サイロ発熱監視装置の研究開発	14
Development of Coal Fever Monitor	
架空地線の素線溶損時における残存引張荷重特性に関する研究	22
Study on residual strength properties of ground wire at strand melted	
OPGW の水浸入障害に対する補修工法の開発	26
Development of repairing method for water penetration in OPGW	

塗膜剥離に影響する因子の考察および塗膜剥離抑制塗料の開発

目 的

高度経済成長期に建造された鋼構造物は、塗替え補修が何度も行われ、塗膜剥離限界の目安とされる 1 ミリ程度に達しているものが散見される。しかし、旧塗膜を全て除去する高額な工法を実施していくにはコスト的に無理があり、新たな延命手法が求められている。そこで、このニーズに応える工法を開発するため、厚膜化で塗膜剥離が生じる現象の影響因子について検討し、塗膜剥離抑制塗料（ α シリーズ）を開発した。

主な成果

1. 耐剥離性促進試験方法の考案

塗膜の耐剥離性を評価する試験規格は無い。そこで、新たな試験方法を考案する為、容易に剥離するビニル樹脂層の上に耐剥離性を評価したい塗装系を塗り重ねし（表 1）、ヒートサイクル試験（ -30°C →常温→ 50°C →常温）を行ったところ、短期間に現場で生じた塗膜剥離を再現することが可能であった。そこで、本試験方法を耐剥離性試験として採用し、様々な評価に用いた。

2. 塗膜剥離に影響する因子の特定

塗膜剥離に影響を与えそうな要因を抽出し、現場で塗膜剥離を起こした塗装系を含め、様々な塗装系を用いて、前項で考案したヒートサイクル試験を行った。その結果、塗膜剥離に最も影響を及ぼす原因は、塗膜の線膨張係数であることが判明した（表 2）。

3. 塗膜剥離が抑制可能な線膨張係数値

従来塗膜は厚膜ほど塗膜剥離が顕著である。しかし、線膨張係数が小さい塗膜は厚膜ほど剥離が抑制される傾向がある。そこで、塗膜剥離傾向が変化する閾値を確認する為、線膨張係数を傾斜的に変化させた塗膜を用いてヒートサイクル試験を行ったところ、塗膜の線膨張係数を $3.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 以下にすると厚膜ほど塗膜剥離を抑制できることが判った（表 3）。

表1 耐剥離性促進試験の剥離層仕様

	塗料種	膜厚
1層目 【脆弱層】	ビニル樹脂 (塩化ビニル/酢酸ビニル 共重合体)	50 μm
2層目以降	供試塗料	規定の膜厚

表2 塗膜剥離に影響する因子の特定試験結果

	仕様1	仕様2	仕様3	仕様4	仕様5
サイクル試験後外観					
	60サイクル後	60サイクル後	60サイクル後	60サイクル後	6サイクル後
外観評価	×	◎	○	◎	××
E ₁	小	大	大	大	極大
T _g	低	高	高	高	高
α ₁	大	小	小	小	極大

表3 塗膜剥離の閾値確認試験結果

	100% (C)	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0% (D)
薄膜 (60 μm)											
								130cで終了	130cで終了	130cで終了	20cで終了
厚膜 (360 μm)											
						80cで終了	50cで終了	30cで終了	20cで終了	10cで終了	4cで終了

研究担当者	大捕秀基, 西森修次, 坂口聡彦 (株式会社四国総合研究所 化学バイオ技術部)
キーワード	防食塗料, 鋼構造物, 補修塗装, 塗膜剥離, 内部応力, 線膨張係数
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]

無線式振動モニタリングシステム Swing Minder の開発

目 的

近年、MEMS 技術を利用した無線式振動モニタリングシステムが開発されているが、主に 2.4GHz 帯の電波を使用しており建物内等の遮蔽物の多い場所では通信が困難であるため高価な有線式のシステムが採用されることが多い。このため、920MHz 帯の通信を利用し透過性が良くかつ安価で高精度の時刻同期機能を具備した無線式振動モニタリングシステム“Swing Minder”を開発した。

主な成果

1. 920MHz 帯における高精度な時刻同期手法の開発

MEMS 加速度センサに高精度なプログラマブル MEMS 発信器(誤差 0.002% 以下)を導入することにより任意の間隔で正確に時刻を刻むことが可能となった。また、NC(データ収集ユニット)と NICE(センサユニット)の間では、1 分おきに定期的な無線通信によるタイムスタンプを発信することで正確な時刻同期を行い、これらを組み合わせることで、振動解析に必要な時刻同期精度である $\pm 5\text{ms}$ 以下を達成することができた。

2. 試験体および実建物でのシステム検証

計測精度検証のために、モックアップや実大試験体を用いた加振試験を行い、各層の加速度時刻歴を計測した。これらの結果では、変位計で計測した値と計測した加速度の値を積分して求めた変位が概ね一致することを確認した。また、四国内の実建物 3 棟に Swing Minder を設置し、層間変形角の判定や通信状況確認を含めた長期的な計測を行い良好な稼働状況を確認している。

3. 高性能センサユニット新型 NICE の開発

専用基板による更なる小型化と電気ノイズ等の低減による通信機能等の高性能化を目的とした新型 NICE の開発に取り組んだ。この結果、外形寸法は $125 \times 125 \times 35(\text{mm})$ と従来の NICE に比べ一回り小型化でき、電気ノイズ等の低減により時刻同期精度は $\pm 3\text{ms}$ 以下となった。また、ゲイン補正機能を追加することで加速度の計測誤差が 0.1%以内と向上し、通信アルゴリズムの改良によるデータ転送時間の短縮やトリガー計測機能なども新たに追加した。

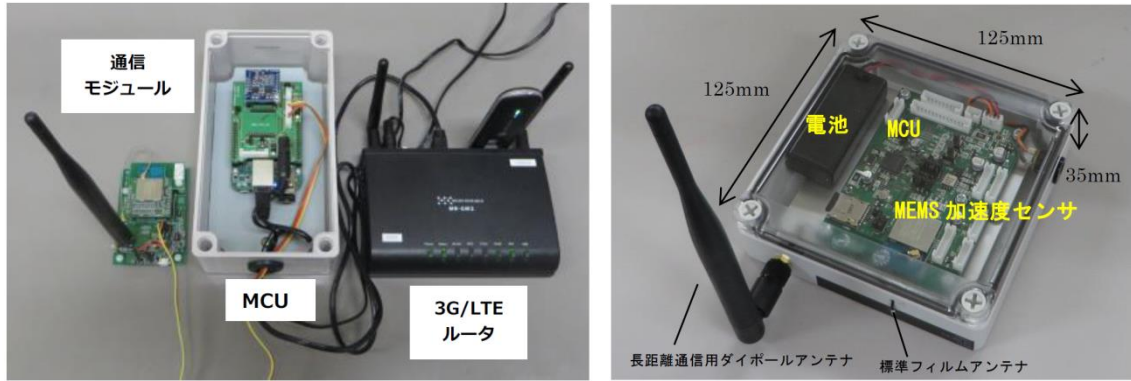


図1 Swing Minder 外観

(左図:NC(データ収集ユニット) 右図:新型 NICE(センサユニット))

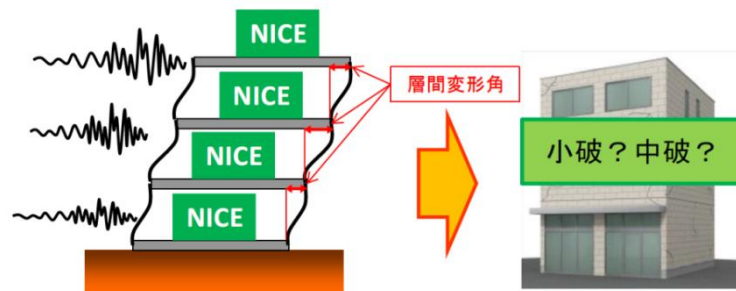


図2 層間変形角による被害推定イメージ

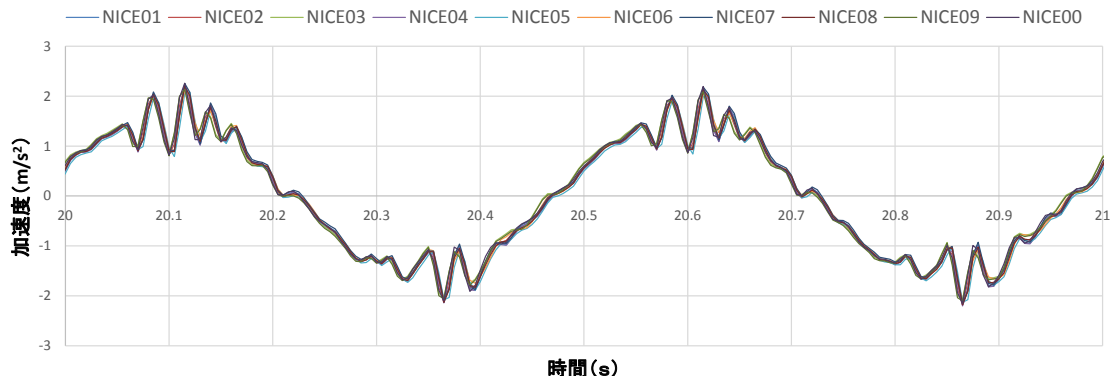


図3 新型 NICE 同期精度試験結果

研究担当者	天野雄一郎, 山崎崇寛 (株式会社四国総合研究所 土木技術部) 中西美一 (株式会社四国総合研究所 電子技術部) 岡田将敏, 木戸智之 (四国電力株式会社 土木建築部)
キーワード	加速度モニタリング, 振動, 無線式, 多点同期, MEMS
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]

石炭サイロ発熱監視装置の研究開発

目 的

近年、石炭火力発電所では、コスト削減を目的に亜瀝青炭等の低品位炭を使用するケースが増えてきている。しかし、低品位炭は自然酸化による発熱現象が起りやすく、サイロ内等での火災発生が懸念される。

そこで、赤外線熱画像カメラによる石炭表面の温度分布画像や、各種センサによるガス濃度等のデータを活用した石炭サイロ発熱監視装置 (CFM; Coal fever monitor) を研究開発した。

主な成果

1. 石炭サイロ発熱監視装置の製作

石炭サイロ内のガス濃度データと赤外線熱画像データを収集、記録、解析表示する石炭発熱監視装置の製作を行った。(図 1、図 2)

2. 石炭サイロ発熱監視装置の長期運用性の確認

同装置を石炭火力発電所の石炭サイロに仮設して動作状況を確認した結果、石炭粉塵雰囲気下での長期運用が可能であることが確認できた。(図 3、図 4)

3. 石炭サイロ発熱監視装置の実用性の確認

同装置の運用中に発生したサイロ内石炭の発熱現象を早期に検知することに成功した。これにより、同装置がサイロ火災の未然防止に有効であることの確認ができた。(図 5)

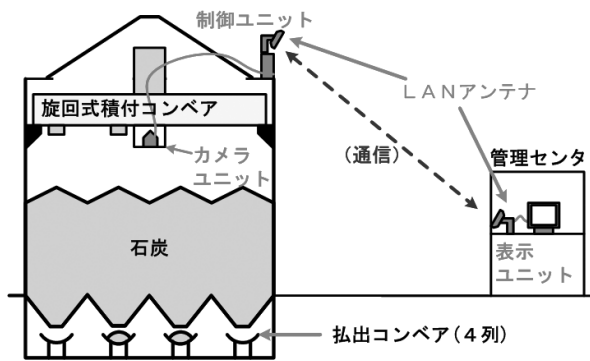


図1 石炭サイロ発熱監視装置 概略構成図

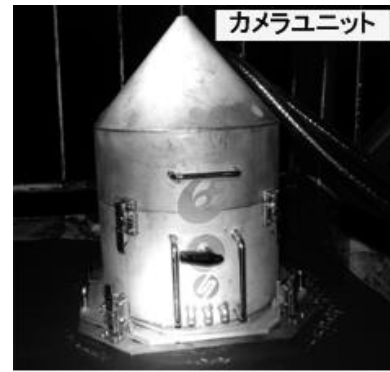


図2 カメラユニット

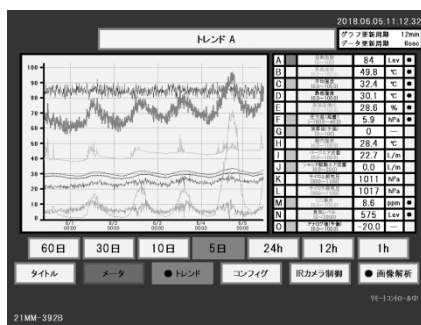


図3 トレンド監視画面例

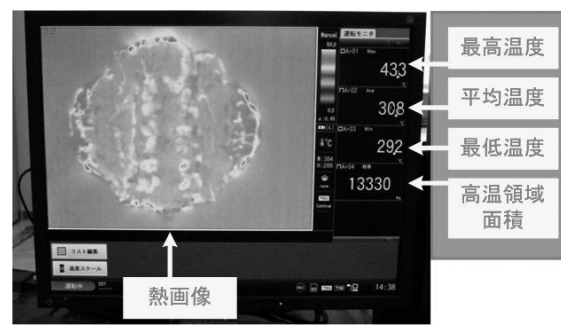


図4 熱画像監視画面例

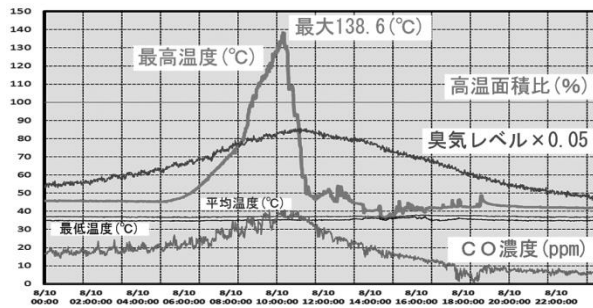


図5 発熱時のトレンド

研究担当者	宮崎 習 (株式会社四国総合研究所 エネルギー技術部)
キーワード	石炭サイロ, 低品位炭, 自然発熱, 赤外線熱画像カメラ, 発熱監視装置
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]

架空地線の素線溶損時における残存引張荷重特性に関する研究

目 的

架空地線の素線が溶損した場合、溶損した断面積を素線本数に換算し、その本数に応じて軽微なものはアーマロッド補修など簡易な補修を行い、重大なものは溶損個所の部分的な新線への張替等を行っている。

しかしながら、溶損断面積の素線本数換算は主観に頼っているところがあり、また、素線が溶損したより線は素線切れとは異なり、溶損度合いによる残存引張荷重が明確には分からない。このため、残存引張荷重を定量的に推定する手法について研究を行い、設備保全の合理化をはかる。

主な成果

素線が溶損した架空地線の残存引張荷重の減少度合いは、溶損したより線断面積の減少度合いより大きいことが分かった。さらに、各素線の状態から残存引張荷重を定量的に推定する手法を得たことで、損傷具合に応じた、より適切な補修方法の選択ができることと期待される。

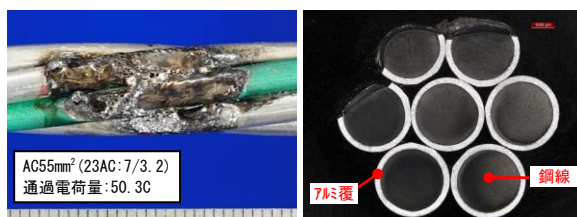


図1 素線溶損より線サンプルの様相

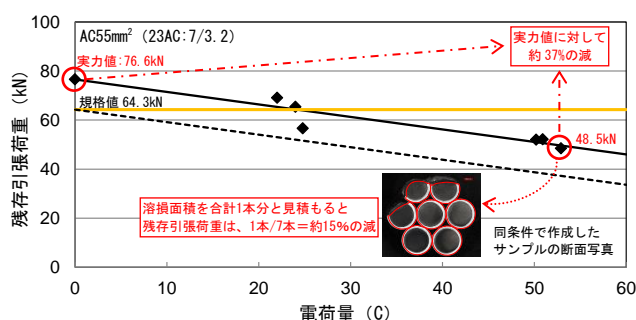


図2 より線引張試験結果

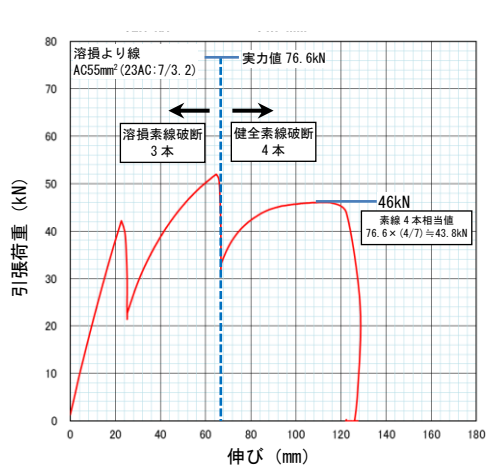
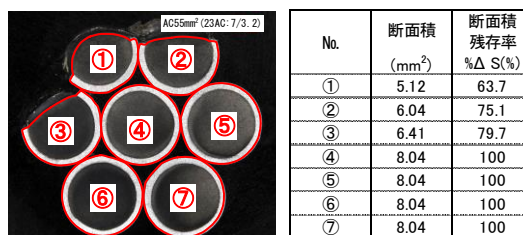


図3 引張荷重-伸び特性



健全なより線の最小引張荷重(実力値)を76.6kNとし、各素線の断面積残存率を引張荷重残存率として考えると、
 ①→②→③→④⑤⑥⑦の順に、
 ①・・・76.6 × (7/7) × 63.7% = 48.8
 ②・・・76.6 × (6/7) × 75.1% = **49.3**
 ③・・・76.6 × (5/7) × 79.7% = 43.6
 ④⑤⑥⑦・・・76.6 × (4/7) × 100% = 43.8
 付近の引張荷重で各素線が破断に至るものと想定される。
 このため、溶損したより線の残存引張荷重は、おおよそ49.3kNと推定される。

図4 より線残存引張荷重推定

研究担当者	村上知則, 新居浩治 (株式会社四国総合研究所 電力技術部)
キーワード	架空地線, 溶損, 残存引張荷重, レプリカ, 3Dデータ
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]

OPGWの水浸入障害に対する補修工法の開発

目 的

電力保安通信ネットワークを構成する OPGW (光ファイバ複合架空地線) では、強風振動等によって生じたアルミ管亀裂部から内部に浸入した雨水が冬期に凍結して、通信回線障害を発生することがある。

こうした水浸入障害の恒久対策には OPGW 張替等が行われるが、復旧にかかる期間短縮とコスト削減をねらいとして、運用上支障のないレベルまで機能回復を図る補修工法の研究を実施した。

主な成果

1. 水抜き・乾燥工法

OPGW アルミ管内に浸入した水を除去する加圧乾燥と減圧乾燥の 2 種類の方法について、より効果を得るための適用条件や効果を得るまでの必要時間等を調査した。

また、フィールド実験を行い、長径間の設備でも実用上支障ないレベルまで機能回復できる可能性があることを確認した。

さらに、加圧乾燥や気密試験の際に、光ファイバを切断することなく OPGW アルミ管の中に窒素ガスや乾燥空気を注入できるアタッチメントを開発した。

2. アルミ管亀裂部の補修工法

アルミ管内の水を除去した後、再び水が浸入しないように亀裂部を補修する工法を考案し、補修効果の実効性を各種試験により確認した。

3. 現場事情を踏まえた補修工法の選定・適用方法

OPGW の障害位置やその設置場所、周辺環境等は多種多様であり、現場毎の事情を勘案しながら補修工法を選定・適用する必要があるが、今回の実験結果をもとに、

- ・作業時間や作業電源
- ・アルミ管亀裂部位置や水浸入区間の位置関係

などを条件として、水抜き・乾燥工法の選定の考え方を提言した。

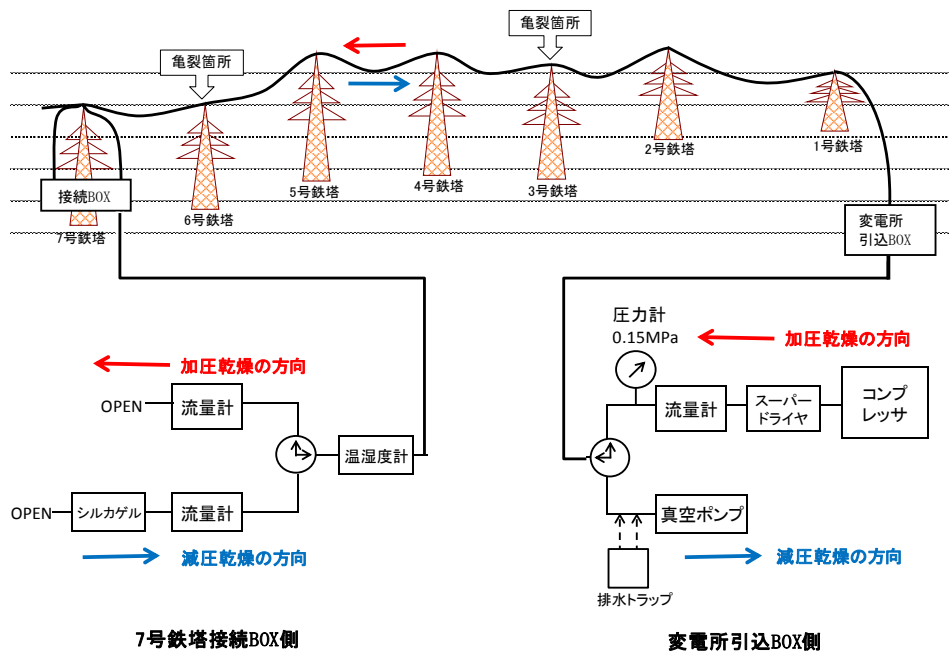


図1 OPGW フィールド実験の構成

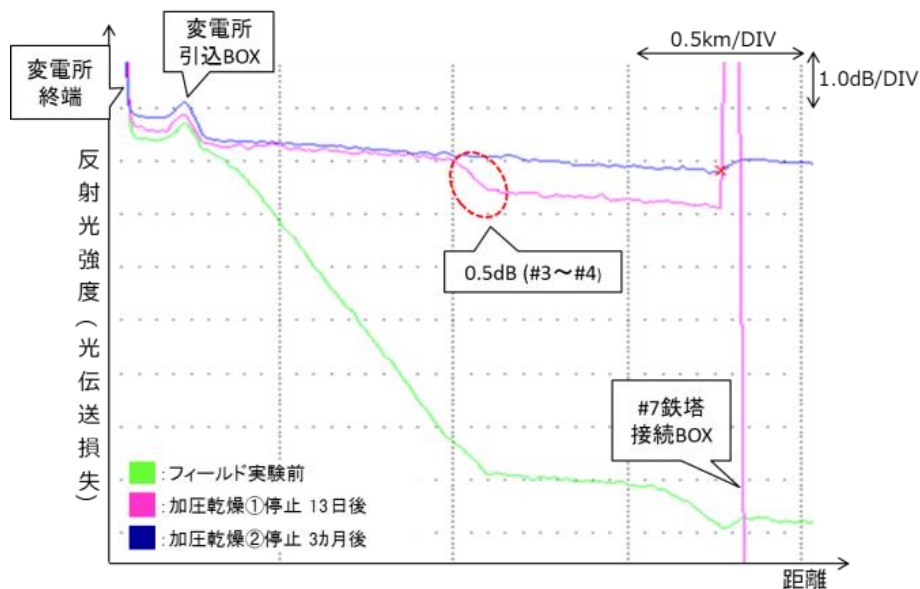


図2 フィールド実験での OTDR 測定結果

研究担当者	徳永 洋一郎, 松木 一隆, 阿部 素久 (株式会社四国総合研究所 電子技術部) 西村 浩一 (四国電力株式会社 送配電カンパニー 通信システム部)
キーワード	OPGW, 補修工法, 加圧乾燥, 減圧乾燥, アタッチメント
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]

塗膜剥離に影響する因子の考察および塗膜剥離抑制塗料の開発

(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 大捕 秀基
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 西森 修次
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部 坂口 聡彦

キーワード： 防食塗料
鋼構造物
補修塗装
塗膜剥離
内部応力
線膨張係数

Key Words : Anticorrosion paint
Steel structure
Repair paint
Coating peeling off
Internal stress
Coefficient of linear expansion

Consideration of factors influencing coating film peeling and development of paint film peeling control paint

Shikoku Research Institute, Inc., Chemical and Biological Technologies Department
Hideki Otori, Shuji Nishimori and Toshihiko Sakaguchi

Abstract

When the repair coating of steel structure is repeated, the coating film thickens. Stress is accumulated inside the paint film by applying paint on the paint film, and when the internal stress exceeds the adhesion force between the paint film and the base material, there is a high possibility that the whole paint film peeling will occur.

In order to verify the technique for suppressing this coating film peeling phenomenon, we devised our own test method and conducted various tests. As a result of those tests, we found out the factors influencing the peeling of the coating film are that the linear expansion coefficient α_1 of the coating dominates. Further, we found out the peeling was difficult due to the change in film peeling easiness depending on the film thickness, by changing the linear expansion coefficient α_1 of this coating film to $3.2 \times 10^{-5} (/^\circ \text{C.})$ as a result of consideration of a threshold value.

By using this paint focusing on this linear expansion coefficient α_1 , it is possible to drastically extend the interval of repair painting and to reduce the maintenance cost of steel structure, so this result will cause a change in the formulation design of the paint industry in the future.

1. はじめに

橋梁やプラント設備等の鋼構造物における補修塗装（塗替え）では、旧塗膜の劣化が顕著である場合や、従来の補修方法では性能が維持できないと判断された場合、1種ケレン（ブラスト処理）後に多層塗りで補修が行われることが多い¹⁾。しかし、旧塗膜の劣化程度が維持可能と判断された場合、3種ケレンや4種ケレン程度の素地調整で旧塗膜を多く残したまま塗り重ねが行われるケースがある。この塗り重ねが繰り返され過膜厚になると、塗膜の内部応力の増大により、全面的な剥離のリスクが高くなる^{2,3)}（図1）。

このような設備保守における差し迫った問題に対応すべく、筆者らは塗膜の耐剥離性維持に寄与する防食塗料の開発を行った。本稿では、耐剥離性に影響する塗膜物性について検証した結果を報告する。



図1 剥離した塗膜の断面

2. 応力理論に基づく塗膜剥離要因の考察

塗膜剥離は、塗膜が収縮・膨張した際に発生する応力によって引き起こされる。すなわち、塗膜が収縮・膨張すると塗膜と素地の界面で応力が発生するが、塗膜の付着力を上回る応力が発生するとその箇所から剥離する。

塗膜の収縮・膨張は、①樹脂の硬化反応によるもの（硬化収縮）、②温度変化によるもの（熱膨張・収縮）があるが、ここでは本研究で特に着目した②の熱膨張・収縮について述べる。

実環境下において塗膜は温度変化に晒される。環境温度が $T_1 \sim T_2$ に変化するとき塗膜に生じる応力 σ は次式で表される。

$$\sigma = \int_{T_1}^{T_2} \alpha \cdot E \, dT = \int_{T_1}^{T_g} \alpha_1 \cdot E_1 \, dT + \int_{T_g}^{T_2} \alpha_2 \cdot E_2 \, dT \quad (1)$$

式(1)において、 T_g は塗膜のガラス転移温度を示し、 α_1 、 α_2 はガラス領域及びゴム領域にお

ける塗膜の線膨張係数を示し、 E_1 、 E_2 は同様に弾性率を示す。

ここで、 $\alpha_1 < \alpha_2$ 、 $E_1 \gg E_2$ より、式(1)は次のように簡略化される。

$$\sigma \approx \int_{T_1}^{T_g} \alpha_1 \cdot E_1 \, dT \quad (2)$$

式(2)より、 σ を小さくするためには T_g 、 α_1 、 E_1 を小さくすることが有効である。従来の一般大気部向け塗料に対する設計では T_g や E_1 を下げる手法が多く用いられてきたが、この手法は塗膜の耐湿性が低下する為、防食塗料としては本来望ましくない。そこで、 α_1 を意識的に下げるアプローチを取ることによって、防食性を確保しつつ耐剥離性を向上させることが可能と考えた。



3. 耐剥離性確認試験

3.1 耐剥離性促進試験方法

塗膜の耐剥離性を評価する試験規格は無い為、試験方法の検討を行った。現場の塗膜剥離は、下層に付着性が悪くなった旧塗膜が存在することから、旧塗膜を再現する為容易に剥離するビニル樹脂を用いた。そのビニル樹脂層の上に、某現場で塗膜剥離が発生した塗装仕様や耐剥離性を評価したい塗装系を塗り重ねし、ヒートサイクル試験（ $-30^\circ\text{C} \rightarrow \text{常温} \rightarrow 50^\circ\text{C} \rightarrow \text{常温}$ ）を行った。

結果、現場で生じた塗装仕様は顕著に塗膜剥離が発生し（表1）、現場の状況を再現することが出来た。そこで、本試験方法を耐剥離性試験として採用し、今後の様々な評価に用いる事とした。

表1 ヒートサイクル試験結果

	弱溶剤型仕様(現場仕様)	強溶剤型厚膜仕様
下塗	弱溶剤型エポキシ (100 μm)	強溶剤型エポキシ (50 μm)
中塗	弱溶剤型ウレタン (30 μm)	強溶剤型厚膜エポキシ (175 μm)
上塗	弱溶剤型ウレタン (30 μm)	強溶剤型ウレタン (50 μm)
サイクル試験後外観		
実観	塗膜剥離多発	塗膜剥離ほぼ無し

3.2 既存の防食塗装仕様を用いた試験

α_1 をはじめとする各種塗膜物性と剥離の関係を確認するため、既存の防食塗料製品を用いた耐剥離性試験（ヒートサイクル）を行った。

供試塗料は、実際の鋼構造物に補修塗装されている防食塗装仕様を参考とした5つの仕様（表2）とした。

表2 供試塗料一覧

		塗料種	膜厚
仕様1	下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料 (α_1 大)	100 μ m
	中塗	弱溶剤形エポキシ樹脂塗料 (α_1 大)	30 μ m
	上塗	弱溶剤形ウレタン樹脂塗料	30 μ m
仕様2	下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料 (α_1 小)	50 μ m
	中塗	厚膜形エポキシ樹脂塗料 (α_1 小)	175 μ m
	上塗	ウレタン樹脂塗料	35 μ m
仕様3	下塗	-	-
	中塗	厚膜形エポキシ樹脂塗料 (α_1 小)	175 μ m
	上塗	ウレタン樹脂塗料	35 μ m
仕様4	下塗	-	-
	中塗	厚膜形エポキシ樹脂塗料 (α_1 小)	350 μ m
	上塗	ウレタン樹脂塗料	35 μ m
仕様5	下塗	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料 (α_1 大)	50 μ m
	中塗	超厚膜形エポキシ樹脂塗料 (α_1 極大)	350 μ m
	上塗	ウレタン樹脂塗料	35 μ m

素地（SPCC-SD 鋼板 70×150×3.2mm）には容易に剥離する層（ビニル樹脂）を形成し、十分養生をしたのちに供試塗料を塗り重ねた（表3）。

表3 試験片の仕様

	塗料種	膜厚
1層目 【脆弱層】	ビニル樹脂 (塩化ビニル/酢酸ビニル 共重合体)	50 μ m
2層目以降	供試塗料	規定の膜厚

養生後、試験片の上部および下部の2箇所に素地まで達する#型のカットを挿入し、ヒートサイクルに供した。

塗膜外観に顕著な差が見られた60サイクル後の結果を表4に示す（ただし、早期に剥離した仕様5については6サイクル後の外観）。

表4 試験結果と各種塗膜物性の対応

	仕様1	仕様2	仕様3	仕様4	仕様5
サイクル試験後外観					
外観評価	×	◎	○	◎	××
E_1	小	大	大	大	極大
T_g	低	高	高	高	高
α_1	大	小	小	小	極大

この結果より、たとえ E_1 が大きく T_g が高くとも、 α_1 さえ小さければ塗膜剥離し難いことが判った。

3.3 α_1 が異なる仕様の膜厚別試験

塗膜剥離に α_1 が支配的に寄与することから、 α_1 の値が異なる2種類の塗料を用いて、膜厚との関係性を確認する試験を行った。供試塗料は α_1 が比較的大きく実構造物で過膜厚時に塗膜剥離を生じた塗装仕様A（従来品）と、意図的に α_1 が小さくなるように配合した塗装仕様B（開発品）を用い、ヒートサイクル試験を行った。

結果（表5）、3.2の試験同様、 α_1 が大きいAは110サイクルと早い段階で大きく剥離し、 α_1 が小さいBは130サイクルでも軽微な剥離であった。また、Aはこれまで知られている通り厚膜ほど剥離面積が大きくなったが、Bは厚膜ほど剥離面積が小さいというこれまでの知見とは異なる驚くべき結果が得られた。

表5 α_1 が異なる仕様の膜厚別試験結果

塗装仕様A(従来品) 線膨張係数 α_1 : 大		塗装仕様B(開発品) 線膨張係数 α_1 : 小	
薄膜	厚膜	薄膜	厚膜
ヒートサイクル 110c		ヒートサイクル 130c	

3.4 剥離傾向が変化する閾値の確認試験

前述の試験結果より、塗膜の α_1 を変化させることで、厚膜化するほど塗膜剥離が生じ易くなる領域と、厚膜化するほど塗膜剥離し難くなる領域の境界値、つまり閾値が存在することが推察された。そこで、この閾値を確認するため、 α_1 を極端に小さくした塗料 C (100%) と、 α_1 を極端に大きくした塗料 D (0%) を試作し、この2種類の塗料をブレンドすることで傾斜的に α_1 の値を変化させた 11 種類の供試塗料を作製した。また、膜厚は薄膜仕様の $60\mu\text{m} \times 1$ 回と、厚膜仕様の $120\mu\text{m} \times 3$ 回 ($360\mu\text{m}$) の2水準とし、これまでと同様のヒートサイクル試験を行った。

その結果 (表 6)、 α_1 が大きい D (0%) は厚膜ほど早期に塗膜剥離面積が拡大し、薄膜ほど剥離面積が小さくなる傾向を示した。一方、 α_1 を小さくした C (100%) は厚膜ほど剥離面積が小さくなる傾向を示した。そして、この従来の概念とは異なる厚膜ほど剥離面積が小さくなる現象は、ブレンド率 70%以上から生じており、その閾値を測定したところ塗膜の線膨張係数 α_1 が $3.2 \times 10^{-5} [^\circ\text{C}]$ 以下であることが判った。

3.5 塗膜剥離抑制塗料の実機展開

塗膜は塗替え補修が行われ厚膜化すると遮断性が増す。一方、付着力は厚膜化することで内部応力が大きくなり、相対的に素地との付着力は小さくなる。何度も塗替え補修を行うといずれ内部応力が素地との付着力を上回り、塗膜の割れや剥離が発生する (図 2)。

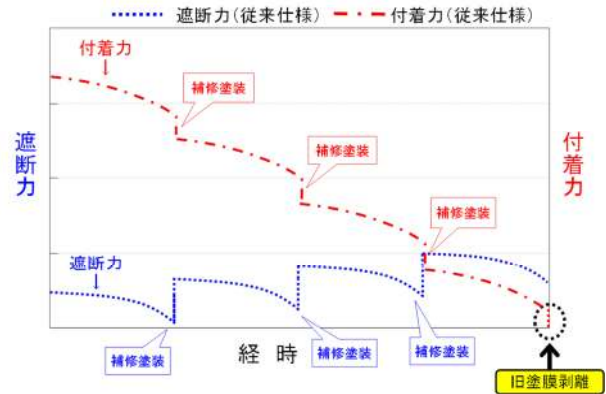


図 2 従来塗料を用いた補修塗装

これらは従来の塗料を使用している限り避けられない現象であり、これを未然に防ぎ健全な防食状態を維持するためには、ある時期にブラスト等による旧塗膜の除去が必要となる。

しかし、 α_1 が小さい開発塗料 (α シリーズ) を用いると、塗替え補修時に遮断性が向上する点は同じであるが、厚膜ほど剥離し難くなる特徴があるため、素地との付着力は保持され、塗膜剥離の危険性を回避あるいは延命することが可能になる (図 3)。

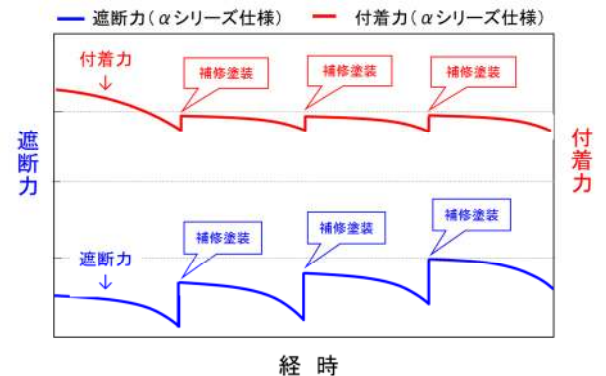


図 3 α シリーズを用いた補修塗装

表 6 閾値確認試験結果

	100%(C)	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%(D)
薄膜 ($60\mu\text{m}$)											
								130cで終了	130cで終了	130cで終了	20cで終了
厚膜 ($360\mu\text{m}$)											
								80cで終了	50cで終了	30cで終了	20cで終了
								10cで終了	4cで終了		

また、この α_1 が小さい開発塗料は、予防保全的になるべく早めの補修塗装の段階で導入する事によって、より付着力の高いレベルを保持することが可能である（図4）。

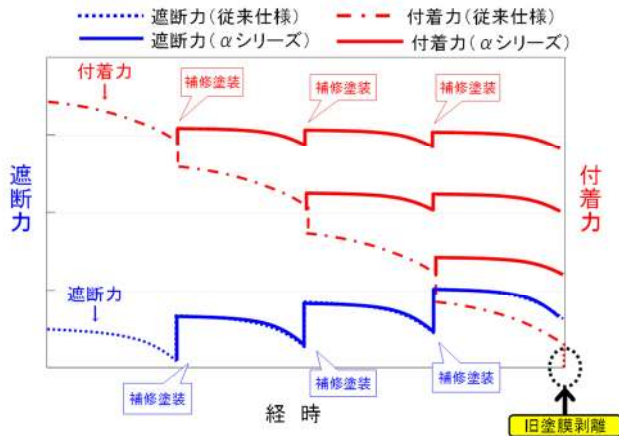


図4 α シリーズを導入後の付着力

4. まとめ

高度経済成長期に建造された鋼構造物は、塗替え補修が何度も行われ、塗膜剥離限界膜厚とされる1ミリ程度に達しているものが散見される。しかし、それらは今後も供用する必要があり、更に超長期の延命が望まれるが、それらを維持する費用は縮小される傾向にある。そのため、旧塗膜を全て除去する高額な工法を実施していくにはコスト的に無理があり、新たな延命手法を見出す必要がある。

そこで今回、塗膜の線膨張係数 α_1 に着目した塗料の開発を行ったところ、これまでの常識を覆す塗膜の挙動が明らかになり、この技術を用いることで超長期に使用する必要がある鋼構造物を延命出来る可能性が見えてきた。これまで塗料業界では α_1 に着目した塗料開発は行われていなかったが、今後は α_1 に着目した配合設計に進化していくものと思われる。

既にこの塗料を用いた実機塗装や試験塗装を実施しており、今後、追跡調査を行う予定である。

【謝辞】

本研究は平成25年度から5年間にわたって大手塗料メーカー3社（関西ペイント㈱、大日本塗料㈱、神東塗料㈱）と共同で研究し、得られた成果である。ご協力戴いた関係各位に謹んで感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) (公社) 日本道路協会：鋼道路橋防食便覧（第Ⅱ編 塗装編），pp.116-118（2014）
- 2) 関西鋼構造物塗装研究会：塗る，pp.95-99（2014）
- 3) (公財) 鉄道総合研究所：鋼構造物塗装設計施工指針，I 解-17（2013）

無線式振動モニタリングシステム Swing Minder の開発

㈱四国総合研究所 土木技術部	天野雄一郎
㈱四国総合研究所 電子技術部	中西 美一
㈱四国総合研究所 土木技術部	山崎 崇寛
四国電力(株) 土木建築部	岡田 将敏
四国電力(株) 土木建築部	木戸 智之

キーワード： 加速度モニタリング
振動
無線式
多点同期
MEMS

Key Words : Acceleration Monitoring
Vibration
Wireless Type
Multipoint Synchronization
Micro Electro Mechanical Systems

Development of the structural vibration multipoint synchronization monitoring system "Swing Minder"

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Yuichiro Amano, Takahiro Yamasaki

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics Technology Department

Yoshikazu Nakanishi

Shikoku Electric Power Co., Civil & Architectural Engineering Department

Masatoshi Okada, Tomoyuki Kido

Abstract

Newly developed low cost MEMS based acceleration sensors have enough accuracy and stability to monitor shaking of facilities caused by earthquake and analyze damages of facilities after strong shaking. We have developed a practical shaking monitoring system using the MEMS based acceleration sensors and the 920MHz multi-hop radio communication technique that can offer reliable radio wave communication even in large scale facilities. It is required to install an acceleration sensor unit on each floor to evaluate damages of facilities due to earthquake. In this kind of system, each sensor unit's base clock has to be highly synchronized to the master clock to minimize acceleration phase synchronization error. In the developed system, the acceleration phase synchronization error among multiple sensor units could be contained three milliseconds based on our patent-pending technology.

1. はじめに

大規模な地震発生時においては、建物の安全性を迅速に判断する必要があり、判断手法の一つとして応急危険度判定士による危険度判定制度が整備されている。この方法は判定士が現地で建物を確認し、損傷具合や傾きなどから総合的に判断するもので、非常時であるため人的確保の観点から被害対象建物が多数に亘る場合は、たとえ防災拠点などの重要性の高い建物であったとしても迅速な診断を行い災害復旧拠点としての安全性を判断できるとは言い難い。

昨今、橋梁などの構造物や高層建物を対象とした加速度センサや変位計などを用いた多点同時計測による振動モニタリングシステムが普及しはじめている。このシステムを利用することにより地震直後に瞬時に地震時の構造物や建物の挙動を解析し被害状況を推定できる他、場合によっては避難警報等を情報発信することや遠方に被災状況を発報することが可能となってきている。これらのシステムを導入することで、これまでの応急危険度判定の課題解決が可能と考えられるものの、これらのシステムは計測センサやロガーなどの計測機器が有線式のもので構成されることが多く、機器本体や機器の設置にかかるコストが高いこともあり、いまだに導入が進んでいないのが現状である。

近年、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術による超小型、低価格、高性能の加速度センサの開発や従来から使用されている 2.4GHz 帯に加え、障害物の透過性、伝達性に優れた 920MHz 帯の高性能通信モジュールの開発・普及、高性能 MCU (Micro Controller Unit) の汎用化および省電力化を背景に、配線が不要な無線式で電池でも長期間計測が可能モニタリングシステムの構築が可能となっている。しかし、多点同時計測による振動モニタリングで最も重要とされているセンサ間の時刻同期については、時間軸を高精度で合わせる必要があり、GPS 時刻同期のように高精度であるが屋外でのみ使用できる同期手法だけでなく、GPS 電波の届かないような屋内でも使用できる同期手法の確立が必須である。

既往の研究では、澤田ら¹⁾が 1250MHz 帯の特定小電力無線を使いブロードキャストタイムス

ランプを用いた時刻同期手法を提案しており、RC 造の実建物での同期精度の実証がなされているが、1つのセンサで2つのMCUを使用しているなど機器の構成や制御プログラムがやや煩雑となっている。また、高瀬ら²⁾が橋梁を対象とし透過性、伝達性に優れた 920MHz 帯の通信による加速度やひずみの計測システムを構築しているが、同期手法としては屋外のため GPS 同期手法を採用している。

このような背景から本研究では、より安価で施工性の高い無線式の振動多点同期モニタリングシステムの開発に併せ、耐震壁などの障害物の多い建物内での使用を考慮した 920MHz 帯の通信モジュールによる高精度の時刻同期手法を確立することを目的としている。

2. システム概要

本研究で開発している無線式振動モニタリングシステム (以降, Swing Minder) は、中西^{3) 4)}が開発に取り組んできたオンデマンド・モニタリング技術 openATOMS[®]を応用した計測システムを用いている。これまでは ZigBee などに代表される 2.4GHz 帯を利用していたが、920MHz 帯を利用することで、屋外での 1 ホップの通信距離が電波出力 20mW で最大 1,000m 程度と長距離対応ができ、30 ホップ程度までのマルチホップ機能を活用し自動的に無線通信経路の構築も可能となる。また、無線ネットワーク全体を間欠動作させることにより、無線通信デバイスを低消費電力動作させることができるため、電源確保の困難な場合でも大規模な無線通信ネットワークを構築し易いという特徴を持つ。しかし、連続動作時の通信速度は 100kbps と比較的高速であるが、低消費電力化の為に間欠動作とした場合は通信速度が低下する。

Swing Minder は図 1, 2 に示すように、データ収集ユニット: NC (Network Computer) と複数のセンサユニット: NICE (Networked Intelligent Cell) で構成しており、NICE から通信されたデータは NC に集約し、3G/LTE などのインターネット回線を経由して、外部の遠隔監視端末などにデータを送信する仕組みとした。データは csv 等の汎用データ形式に変換でき、遠隔での解析が可能である。NICE は 32bit の MCU を

搭載しており加速度データを収集し逐次記録媒体（microSD）に保存しながら、リアルタイム FFT 演算処理などが可能な仕様とした。ネットワーク上の通信速度の制約上、単位時間あたりに送信できるデータ量が制限されるが、あらかじめ NICE でデータ処理して必要なデータのみ送信することで解決を図った。また、記録開始となる加速度の閾値は各 NICE で設定することができ、必要なデータのみ取得することで前述のデータ送信制限に対応できる。

地震時や災害時には、長時間の停電が発生すると懸念されるが、NICE には常用のコンセント給電に加えバックアップ用の電源としてリチウムイオン電池を備えており、数日間は電池のみで作動できる。また、NC は無停電電源装置から給電を行うことで、停電時にも継続的に稼働できる。加速度センサは、安価で高精度な MEMS の 3 軸加速度センサを採用し、加速度は 0.1~8000 gal、水平傾斜角は 0.01°単位での計測が可能である。

計測開始のトリガー機能として、各 NICE で設定する閾値の他、トリガーとなる NICE からの信号や外部入力による計測開始を設定することができる。初期微動などを計測するため、計測開始より以前の 10 秒間のデータと、トリガーの閾値を下回った後、任意の時間のデータが計測可能な設定にした。各設定は microSD 内の設定ファイルを書き換えることで簡単にできる。また、試作型 NICE は 175×125×60(mm)の樹脂製の箱体に納め、狭い場所でも設置できる寸法とした。

地震時における建物の安全性を評価する指標としては一般的に層間変形角が使用されている。本システムでも層間変形角を指標として建物の構造を評価する。また、NICE を設置した各階の加速度から天井などの内装材や建築設備などの 2 次部材の評価を実施する。層間変形角は、地震を受けている間の加速度データをもとに加速度を 2 回時間積分することにより時刻歴の変位量を算出し、この結果に建物の階高などの情報を加えて算出する。この層間変形角をクライテリアと比較し、建物の安全性を評価する。

3. 時刻同期手法と同期精度

MEMS 加速度センサが標準で装備している RC 発信器では、発信周波数精度が悪く 100ms 単位での時刻同期は可能であっても、地震波の計測に必要とされる 10ms 以下の同期は困難であった。そこで、各 MEMS 加速度センサに高精度なプログラマブル MEMS 発信器（誤差 0.002% 以下）を導入することにより任意の間隔で正確に時刻を刻むことが可能となった。また、NC と NICE の間では、1 分おきに定期的な無線通信によるタイムスタンプを発信することで正確な時刻同期を行い、これらを組み合わせることで、当初目標としていた時刻同期精度である±5ms 以下を達成することができた。時刻同期精度を確認するために、複数台の NICE を、同一の加振台で同時に加振する試験を実施し、同期誤差が±5ms 以下となることを確認している（図 3）。

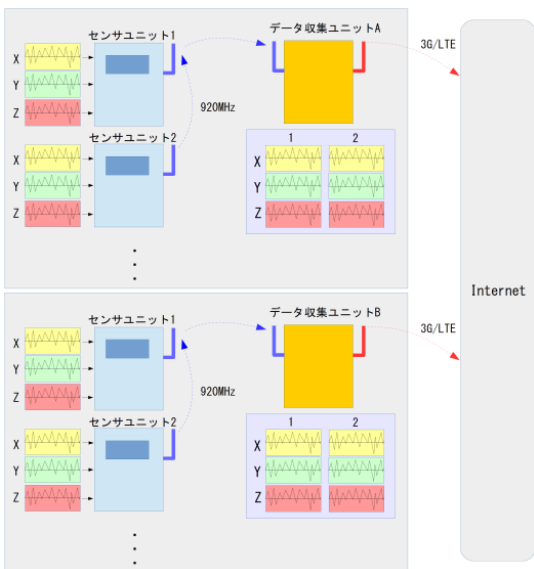


図 1 Swing Minder のシステム構成図

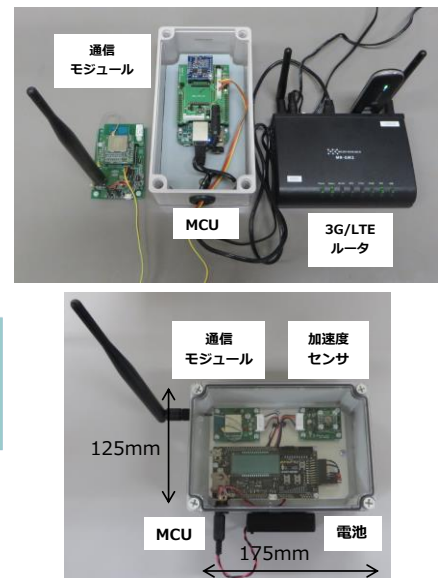


図 2 機器外観(上図: NC 下図: NICE)

4. 加振試験の概要

Swing Minder の計測精度検証のために、モックアップや実大試験体を用いた加振試験を行い、各層の加速度時刻歴を計測した。

4.1 モックアップを用いた加振試験

図 4 に示す高さ 595mm、重量 20.77kg のモックアップに 1 個 580g の加速度計 NICE を振動台面、3 層目、5 層目の計 3 台を乗せ、図 5 の小型振動台で加振試験を行った。なお、本試験では基準加速度計を設置せずに、NICE と同位置にワイヤー変位計を設置し、変位を基準値とした。入力波は、El-Centro 波の NS 成分で、加振方向は X 軸方向である。

4.2 実大試験体を用いた加振試験

図 6 に示す高さ 2,512.5mm、重量 1,524kg のヒノキの実大試験体に 506kg のおもりを乗せ、図 7 の大型振動台で加振試験を行った。

振動台面と梁上に NICE を設置し、基準加速度計として ARS-200S001（東京測器研究所製）を設置した。入力波は、試験体の固有振動数 2.3Hz を含む Sweep 波 2~3Hz で、加速度を 10gal と 50gal の 2 パターンとし、加振方向は X 軸方向とした。

5. 加振試験の結果

5.1 モックアップを用いた加振試験結果

モックアップを用いた加振試験では、変位を比較するため、等時間間隔 Δt ごとに、得られた加速度の時刻歴 $\dot{y}(t)$ を積分して速度 $\dot{y}(t)$ 、変位 $y(t)$ を求める。時刻 $t + \Delta t$ における速度および変位は式(1)、(2)、求めた変位を基線補正した修正値 $\hat{y}(t)$ は式(3)~(5)で表される⁵⁾。ここで、 T は継続時間とした。計測した加速度の時刻歴から式(1)~(5)を用いて応答変位を算出し、各層ごとにワイヤー変位計の値と一致するか検証した。

NICE の加速度を積分して求めた応答変位とワイヤー変位計の値を比較して図 8 に示す。振動台面では最大 0.21cm、3 層目では最大 0.29cm、5 層目では最大 0.30cm、NICE で計測した加速度を用いて算出した応答変位の方が大きくなったが、最大変位が約 3cm であることから精度良く計測、解析ができていると考えられる。また、高層になるにつれて誤差が若干大きくなったが、ワイヤー変位計で計測した値と概ね一致した。

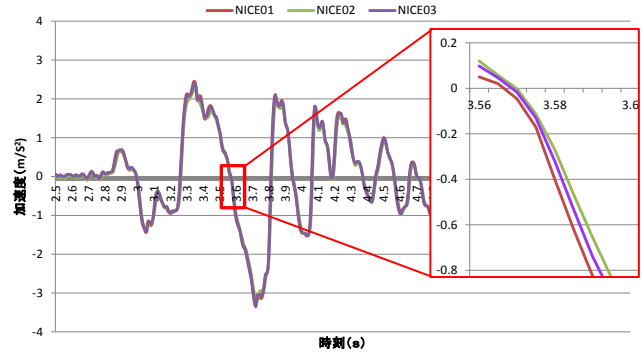


図 3 NICE 同期試験結果

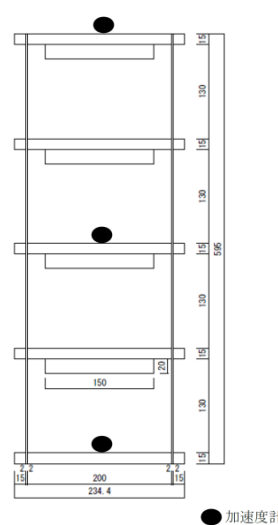


図 4 モックアップ立面

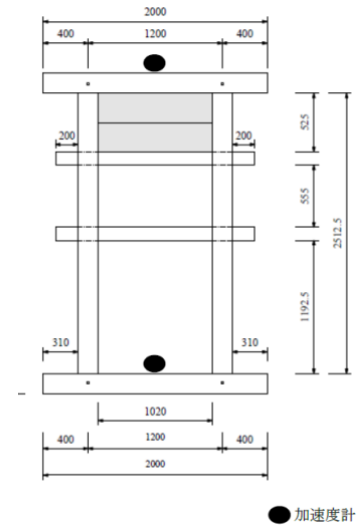


図 6 実大試験体立面



図 5 小型加振台外観



図 7 加振試験状況

$$\dot{y}_{t+\Delta t} = \dot{y}_t + (\ddot{y}_t + \ddot{y}_{t+\Delta t}) \frac{\Delta t}{2} \quad (1)$$

$$y_{t+\Delta t} = y_t + \dot{y}_t \Delta t + \left(\frac{\ddot{y}_t}{3} + \frac{\ddot{y}_{t+\Delta t}}{6} \right) (\Delta t)^2 \quad (2)$$

$$\hat{y}(t) = y(t) - \left(\frac{1}{2} a_0 t^2 + \frac{1}{6} a_1 t^3 \right) \quad (3)$$

$$a_0 = \frac{\dot{y}(T) - a_1 T^2 / 2}{T} \quad (4)$$

$$a_1 = \frac{28}{13} \cdot \frac{1}{T} \left[2\dot{y}(T) - \frac{15}{T^5} \int_0^T y(t)(3Tt^2 - 2t^3) dt \right] \quad (5)$$

5.2 実大試験体

実大試験体を用いた加振試験では、NICE の加速度と基準加速度計で計測した値が一致するか検証した。NICE の加速度と基準加速度計の値を比較した結果を図 9, 10 に示す。Sweep 波 10gal の場合、振動台面では最大 4cm/s^2 、梁上では最大 5cm/s^2 、NICE で計測した加速度の方が大きくなった (図 9)。Sweep 波 50gal の場合、振動台面では最大 5cm/s^2 、梁上では最大 17cm/s^2 、NICE で計測した加速度の方が大きくなった (図 10)。梁上の方が振動台面より誤差が大きくなったが、基準加速度計の値と概ね一致した。

6. 実建物でのシステム検証

これまでの加振試験等で、NICE 間の同期精度や計測精度については有線式の加速度計測システムと比べて、遜色無く計測に使用することができる仕様であることを確認した。

Swing Minder を建物に設置する場合には、伝送の障害となるコンクリート耐震壁や床スラブ等の影響を考慮する必要がある。今回、RC 造や鉄骨造を対象とした実証試験として T ビル (徳島市、RC 造：8 階建+PH)、K ビル (高知市、RC 造：8 階建+PH)、N ビル (四万十市、鉄骨造：

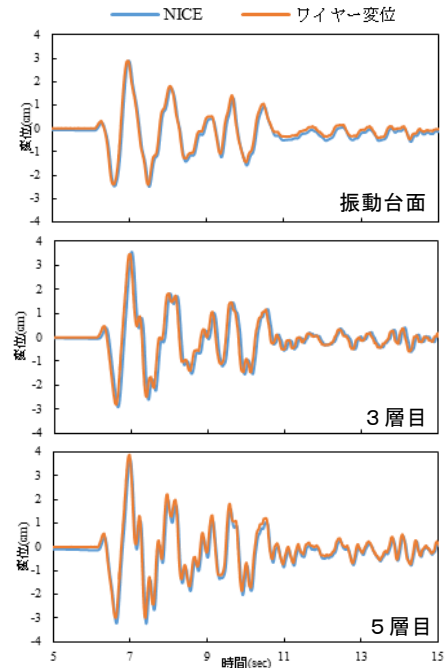


図 8 時刻歴変位の比較

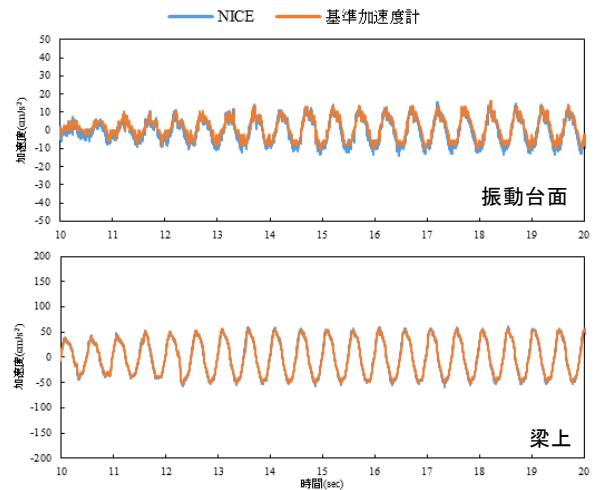


図 9 時刻歴加速度の比較 (Sweep 波 10gal)

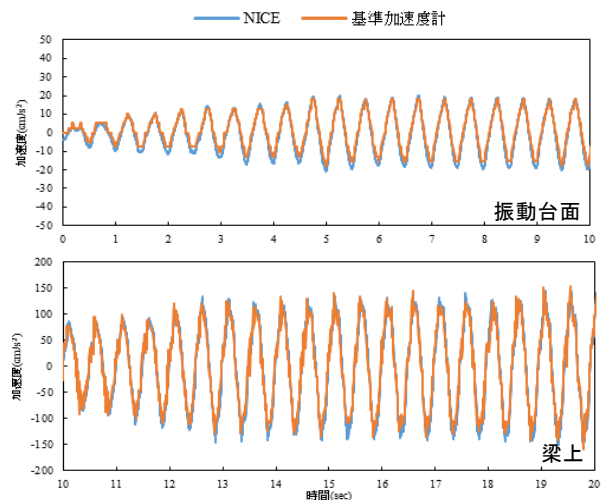


図 10 時刻歴加速度の比較 (Sweep 波 50gal)



図 11 N ビル設置状況図

(左図：ビル外観 右上図：NC, NICE 設置状況 (最上階)
右下図：NICE 設置状況 (5 階シャフト))

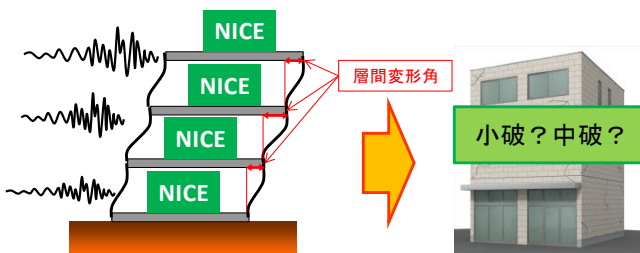


図 12 層間変形角の解析イメージ

7 階建+PH) の 3 建物の各階に Swing Minder を設置し実証試験を行っている。N ビルにおける設置状況を図 11 に、解析イメージを図 12 に示す。

地震等の発生などにより 5gal 以上の有意な振動を感知すると、各 NICE は計測を始め x, y, z 方向の 3 軸の 200Hz, 10 秒間のデータを作成し microSD に保存すると同時に NC へと送信する。設置前に電波強度を確認しているが、高知支店ビルでは、中央コアの空調シャフトに置いた 1 階と 5 階の NICE の間で良好な通信が可能であった。RC 造の建物において、ある程度の距離や障害物があったとしても、電波到達が可能であることを確認した。計測は平成 30 年 5 月から開始し、現在、遠隔からデータ収集を行っている。遠隔からのデータ表示画面例 (10 秒データ情報) を図 13 に示す。NICE に設定されているトリガーを超えずに計測状態にならない場合でも、10 秒間の平均加速度や最大加速度、平均加速度から求まる傾斜角度などの情報を NC に蓄積する。

平成 30 年 6 月の大阪府北部地震では約 400km 離れた四万十市は震度 1 以下であったが、N ビルの上階に設置していた NICE6~8 (6, 7, PH 階) で 5gal 以上の有意な振動を 40 秒間計測していた (図 14)。

今後も引き続き長期計測を行うことで機器動作および通信状況の確認に加え、地震動を観測した場合には、各階の加速度を積分して変位に換算し、層間変形角等を概ね自動的に解析する仕組みを構築する予定である。

7. センサユニット NICE の改良

7.1 改良型センサユニット NICE の開発

実証試験では、ある程度空間的に自由である空調シャフトなどに設置することができた。しかし、そのようなスペースが確保できない場合には、執務室のフリーアクセスフロア内などの限られた狭いスペースに設置する必要がある。これらの背景より、センサユニット NICE の更なる小型化と通信機能の更なる向上に取り組むこととした。

新しく開発した Swing Minder の新型 NICE の外観を図 15 に示す。小型化に際し、専用基板を設計し MEMS 加速度センサを基板上に配置することにより、機器の影響によるモーメントや電気ノイズなどを軽減することができた。併せて同

Swing Minder

sm170001 1 : 2018/10/04 13:24:30

センサー名	データ	単位
日時	2018/10/04 13:24:30	date
X軸平均加速度	0.106	m/s ²
Y軸平均加速度	-0.362	m/s ²
Z軸平均加速度	9.891	m/s ²
X軸最大加速度	0.004	m/s ²
Y軸最大加速度	0.004	m/s ²
Z軸最大加速度	0.006	m/s ²
X軸傾斜角度	0.61	deg
Y軸傾斜角度	-2.09	deg

図 13 データ表示画面の例

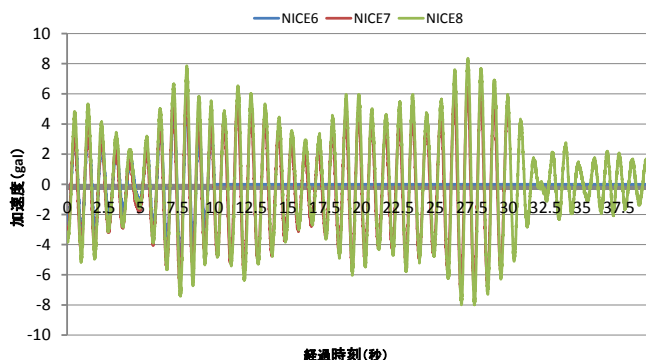


図 14 N ビル加速度時刻歴

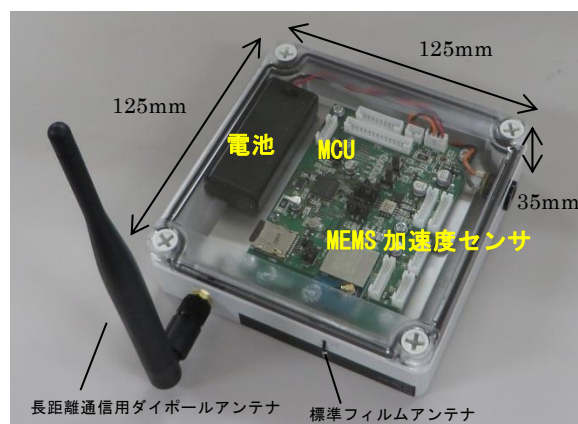


図 15 新型 NICE の外観

期精度も差異が±3ms 以下に向上した。また、ダイポールアンテナの他、薄型のフィルムアンテナも設置状況に併せて選択できるようにした。これらにより、外形寸法は 125mm×125mm×35mm と大幅に小型化することに成功した。

7.2 ゲイン補正手法の検討

Swing Minder に採用している MEMS 加速度センサ (Analog Devices 製 : ADXL355) は出荷時において内蔵しているスプリング等の固有誤差があることが分かっており、初期補正としてゲイン補正などを実施する必要がある。初期補正

を実施しない場合には、10%程の誤差を生じる可能性があることが分かっている⁸⁾。このことをふまえ、新型 NICE ではゲイン補正を実施することとした。ゲイン補正には、x, y, z 軸方向にそれぞれセンサを回転させ、重力加速度を利用して補正する方法がある。本研究では、アクリル製の正方形の箱の底面に新型 NICE を設置し、高性能加速度計を使って水平にした面上を回転させることで、ゲイン補正を実施した。補正式を (6), (7) に示す。求めた係数で補正した新型 NICE の表示値の例を図 16 に示す。x, y 方向の平均加速度は概ね 0 となり、z 方向に対しては高松における重力加速度とほぼ一致する結果になった。

今後はこの補正手法により出荷時における初期補正を実施する。また、設置後の差異も同様の手法で補正できるパラメータを設け、設置後においても補正ができるようにした。

$$AX0 = -((X1+X2) / 2a) \quad \dots (6)$$

$$AX1 = -2g / (X1 - X2) \times b \quad \dots (7)$$

AX0 : 機器オフセット補正係数

AX1 : 機器ゲイン補正係数

X1 : x 軸を上面にに向けた x 軸方向の加速度計測値

X2 : x 軸を下面にに向けた x 軸方向の加速度計測値

a : 計測分解能(=0.0006125m/s²)

b : 整数化係数 (=10000)

g : 重力加速度 (=9.79698m/s² : 高松)

※y および z 方向においても同様の手法で補正

7.3 固定方法の違いによる影響の検証

実建物に設置する際には、設置場所や設置方法等の制限を受ける可能性が考えられる。NICE を床に堅牢に固定する必要があるため、異なる設置方法での計測結果の差異を、加振試験により確認をした。加振台に固定方式毎に両面テープ (厚) (NICE01~03)、木ねじ (NICE04~06)、コンクリート用接着剤 (NICE07~09)、両面テープ (薄) (NICE00) によって固定した。試験の状況を図 17 に、sin 波を入力した場合の計測結果を図 18 に示す。

固定方法による明確な差異を確認することはできなかった。この検証結果により、堅牢に固定できれば固定方法による差異は概ねないという結果を得ることができた。

Swing Minder		
sm170005 0 : 2018/12/04 17:05:20		
センサー名	データ	単位
日時	2018/12/04 17:05:20	date
X軸S平均加速度	-0.004	m/s ²
Y軸S平均加速度	0.003	m/s ²
Z軸S平均加速度	9.798	m/s ²
X軸V最大加速度	0.006	m/s ²
Y軸V最大加速度	0.004	m/s ²
Z軸V最大加速度	0.006	m/s ²
X軸傾斜角度	-0.02	deg
Y軸傾斜角度	0.02	deg
電源電圧	2940	mV
気温	0.0	°C
湿度	0.0	%

図 16 補正後の新型 NICE の表示値の例



図 17 固定方法の違いによる差異の確認

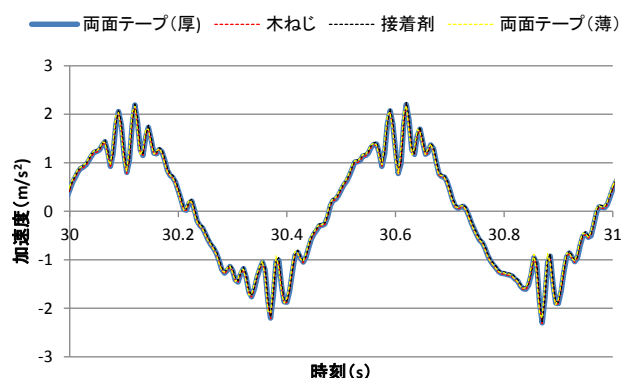


図 18 固定方法の差異による比較結果
(sin 波 2Hz 振幅 5mm)

7.4 新型 NICE の同期精度確認

補正を行った新型 NICE を加振台に 10 台設置し同期精度の確認を行った。入力波は sin 波 (2Hz および 5Hz), sweep 波 (0.1~20Hz) で行った。sin 波 2Hz の場合における測定結果を図 19 に示す。この結果により、新型 NICE においては、各機器間の同期誤差が目標としていた ±3ms 以内

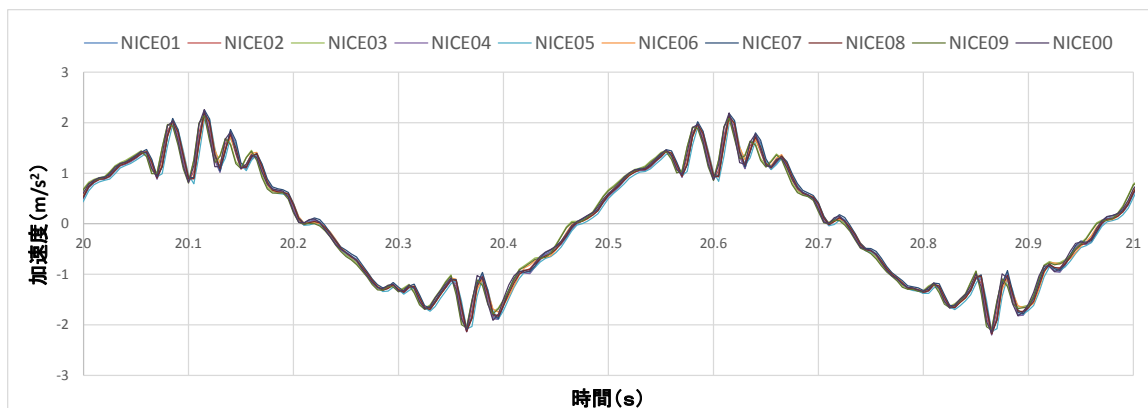


図 19 新型 NICE 同期精度試験結果
(sin 波 2Hz 振幅 5mm, 新型 NICE10 台)

となることを確認できた。また、新型 NICE10 台で取得した 40 秒の地震データを通信時間 3 分程度で NC にデータ集約できることを確認した。

8. まとめ

本研究では、無線式の振動モニタリングシステム Swing Minder を開発し、加振試験等による精度検証の結果、変位計や基準加速度計などの計測値と概ね一致することを確認した。

今後も引き続き更なる精度向上に向けた検討と共に、改良を行った Swing Minder を実建物に導入し、長期的な実証試験を通して最適な設置方法や解析手法等についての検討を行う予定である。

[謝辞]

本研究は、四国電力(株)土木建築部殿より委託を受けた「地震発生後の建物被害推定に関する研究(その2)」において実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

また、Swing Minder の開発にあたって、香川大学創造工学部の宮本慎宏准教授、大田佳奈氏、福田隆晟氏にご協力頂きました。

加振試験の実施にあたって、高知工業高等専門学校池田雄一准教授、奈良女子大学の瀧野敦夫講師、近畿職業能力開発大学校の藤村悦生特任教授、宇都宮直樹准教授、香川工業高等専門学校の小竹望教授にご協力頂きました。ここに謹んで深甚なる謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 澤田他: 加速度計測のための無線センサネットワークの実用的な時刻同期手法の開発, 第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集, 2010
- 2) 高瀬他: 省電力化を図ったワイアレスセンサによる橋梁の継続的遠隔モニタリングシステムの概要, コンクリート工学 Vol56 No.1, 2018
- 3) 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
- 4) 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), 2013.1
- 5) 大崎順彦, 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 2011.1, pp133-138
- 6) 天野雄一朗他: 無線式振動モニタリングシステムの開発 (その 1) 開発目的とシステム概要, 日本建築学会学術講演梗概集 (東北), 2018.9
- 7) 大田佳奈他: 無線式振動モニタリングシステムの開発 (その 2) 加振試験と解析結果, 日本建築学会学術講演梗概集 (東北), 2018.9
- 8) 岡田敬一他: 建造物の被害推定システム構築のためのデータ管理・利活用に関する研究 (その 2) 大型振動台実験に適用する各種無線型加速度センサー性能の検証, 日本建築学会学術講演梗概集 (東北), 2018.9

石炭サイロ発熱監視装置の研究開発

(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 宮崎 習

キーワード: 石炭サイロ
低品位炭
自然発熱
赤外線熱画像カメラ
発熱監視装置

Key Words: Coal silo
Low grade coal
Natural fever
Infrared thermal camera
Fever monitor

Development of Coal Fever Monitor

Shikoku Research Institute, Inc., Energy Engineering Department
Manabu Miyazaki

Abstract

In recent years, coal-fired thermal power plants use low-grade coal like sub-bituminous coal for cost reduction. However, there is a fear of a fire because the low-grade coal stored in a coal silo has the potential to exothermic phenomenon due to natural oxidation.

So we developed a coal fever monitor using an infrared thermal camera with picture analysis technology. As a result of actual use at the coal silo, the reliability of the coal fever monitor was confirmed.

1. はじめに

近年、石炭火力発電所では、コスト削減を目的に亜瀝青炭等の低品位炭を使用するケースが増えてきている。しかし、低品位炭は自然酸化による発熱現象が起りやすく、サイロ内等での火災発生が懸念される。

そこで、赤外線熱画像カメラによる石炭表面の温度分布画像や、各種センサによるガス濃度等のデータを活用した石炭サイロ発熱監視装置（CFM；Coal fever monitor）を研究開発した。

本監視装置を石炭火力発電所の石炭サイロに仮設して、長期にわたる発熱状況を監視した結果、サイロ火災の未然防止に有効であることが確認できたため、これを報告する。

2. 石炭サイロの構造

対象の石炭サイロ（四国電力株式会社橘湾発電所No.4サイロ）の構造を図1に示す。

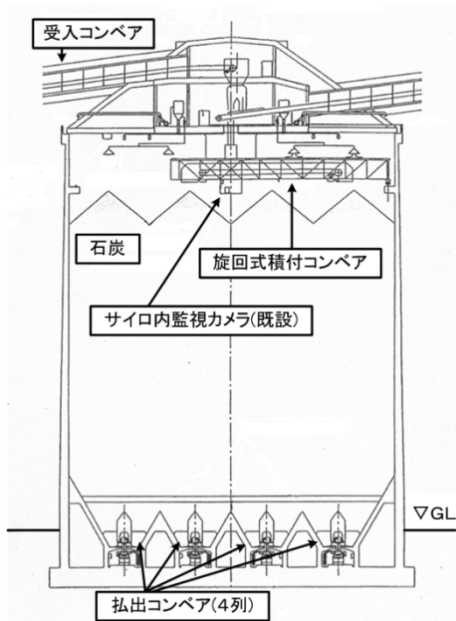


図1 石炭サイロの構造

同サイロは、旋回式積付コンベアを有し、サイロ内に同心円状に石炭を投入することにより、石炭を平坦に積付けすることが可能である。

石炭の払出しについては、サイロ底部にある4列の払出コンベア上の可動式払出口を用いており、通常は4列中任意の2列を順次切替えながら稼働させて、石炭面を平坦に保ったまま払出しを行っている。

また、稼働払出口を固定して、任意の座標の石炭だけを払出すことも可能な構造になっている。

3. 発熱監視方法

石炭の発熱監視方法にはいくつかの方法がある。以下に代表的な方式について記載する。

3.1 ガス検知方式

石炭サイロ内の各種のガス濃度を測定することにより石炭の発熱を監視する手法である。

(1) 臭気

石炭に含まれる石炭酸などの臭気ガスは、石炭の発熱に対する濃度上昇が他種類のガスよりも比較的早く、早期の発熱検知に有効である。

CFMでは、特に炭化水素系ガスに対して感度が高い酸化インジウム系熱線型焼結半導体式の臭気センサ（既設装置）からのデータを利用した。

(2) CO

COガスは、石炭発熱の直接的な指標として用いることができる。

CFMでは、安定したセンサ出力が得られる電気化学方式のCOセンサ（既設装置）からのデータを利用した。

(3) CO₂

CO₂ガスは臭気ガスに次いで石炭の温度上昇に敏感であることに加え、非分散赤外線吸収式のCO₂センサは構造が単純なことから、センサ寿命が長く、メンテナンス性が良好である。

さらにセンサ出力の通常値がCOセンサのように0(ppm)ではなく、大気中のCO₂濃度である約400(ppm)を出力することから、センサの良否を判定しやすいメリットがある。

(4) 絶対湿度

石炭が発熱した際に発生する水蒸気量を測定することにより、間接的に石炭の発熱を検知することができる。石炭粉塵の雰囲気中で絶対湿度を安定して測定するには、ほぼメンテナンスフリーである熱計測式センサの使用が必要不可欠である。

ガス検知方式は、安価なセンサが利用できる利点があるが、石炭サイロのように内部空間容積が大きい場合には、局所的に発生したガスがガスセンサの設置箇所まで拡散するのに時間を要するのが難点である。

CFMの開発に当たっては、後述の赤外線熱画像カメラを主な監視方法とすることから、ガスセンサについては既設装置の臭気レベル・COガス濃度信号を利用することにした。

3.2 放射温度センサ走査方式

サイロ内石炭の表面温度を測定して発熱状況を検知する方式であり、一般的には安価な放射温度センサが用いられるケースが多い。

しかし、放射温度センサは原理上、測定角（測定範囲）の問題が存在する。

測定角が広いセンサでは、測定対象の表面温度が広範囲にわたって均一である必要があり、部分的な発熱に対しては、石炭温度を過小評価してしまう恐れがある。また、測定角が狭いセンサでは発熱した箇所を的確に捕らえなければ温度上昇を検知できない。

この問題を解決するには、測定角の狭い放射温度センサを上下左右に機械的に走査して石炭サイロ内全域を測定する方式が有効であるが、1回の走査に時間を要するのが難点である。

3.3 赤外線熱画像カメラ方式

石炭表面温度を測定するのに赤外線熱画像カメラを用いる方式であり、リアルタイムにサイロ内石炭表面温度分布を測定することができることに加え、局所的な温度上昇も測定することが可能である。

さらに、熱画像を画像解析することにより、石炭発熱の自動監視が可能になる利点があることから、CFMの主たる監視方式に採用した。

4. 設計・製作

CFMについては、実用的な発熱監視機能を持たせるとともに、石炭サイロ内の粉塵汚損に耐え、長期にわたってメンテナンスフリーであることに重点を置いた設計とした。

4.1 構成

CFMは、全体を5つのユニット（カメラユニット、制御ユニット、コンプレッサユニット、電源ユニット、表示ユニット）で構成しており、各ユニット間はワンタッチ防水コネクタ接続とすることにより、設置やメンテナンスが容易に行える構造にした。全体構成を図2に、内部構成を図3に示す。

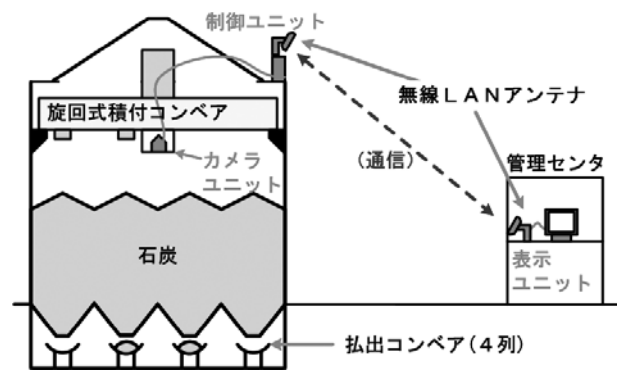


図2 CFM全体構成

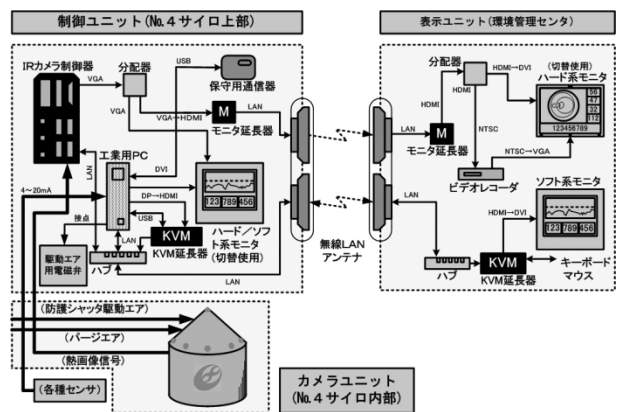


図3 CFM内部構成

(1) カメラユニット

カメラユニットは、耐圧防爆ケースに入った赤外線熱画像カメラと防護シャッター機構、およびそれらを格納するケースで構成されており、石炭サイロ内の旋回式石炭積付コンベア中央下部にある既設サイロ内監視カメラ設置用の吊りステーに設置した。(図4)



図4 カメラユニット外観

使用した赤外線熱画像カメラの仕様は、次のようになっている。

- ・非冷却マイクロボロメータ式
- ・解像度=384dot×288dot (画素数 110, 592dot)
- ・測定温度範囲=-40~150℃

当該カメラを赤外線窓付きの耐圧防爆ケースに入れ、石炭受入れ時の石炭粉塵による赤外線窓の汚損防止用防護シャッター機構とともにステンレス製のカメラユニットに組み込んだ。(図5)

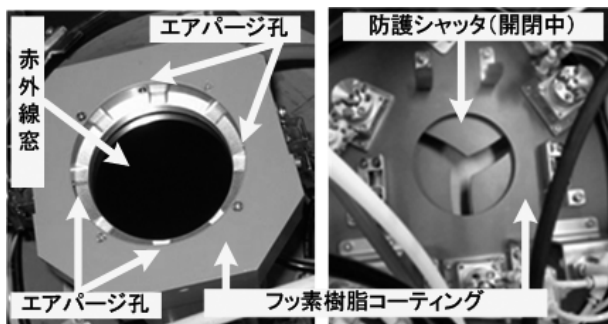


図5 赤外線窓・防護シャッター外観

カメラユニットの内部はパージエアで加圧されており、加圧後のパージエアは赤外線窓周囲に配置された複数のエアパージ孔からサイロ内に放出されることによりゲルマニウム製の赤外線窓の汚損を防ぐ構造とした。

また、耐圧防爆ケースやカメラユニットの継手部の固定にはボルトナット類ではなく、ワンタッチ錠を使用することにより、工具なしの分解点検を可能とし、サイロ内へのボルトナット類や工具の落下を防止している。

(2) 制御ユニット

制御盤ユニットは、石炭サイロの上部屋外に設置しており、赤外線熱画像カメラの制御装置、熱画像記録・解析用工業用パソコン（以下、工業用PC）、無線LAN機器等を組み込んだ。(図6)



図6 制御ユニット他外観

(3) コンプレッサユニット

コンプレッサユニットは、カメラユニット用パージエアと防護シャッター駆動用エアの供給源である。ユニット内には、エアパージ用の低圧リアコンプレッサと防護シャッター駆動用の中圧スクロールコンプレッサを組み込んだ。(図6)

(4) 電源ユニット

電源ユニットは、表示ユニットを除く全ユニットへの電源供給元であり、ユニット内には、ノイズカットトランスと無停電電源装置（UPS）を組み込んだ。(図6)

(5) 表示ユニット

表示ユニットは、石炭サイロから離れた管理センタに設置されており、無線LAN機器、液晶モニター（ハード系モニターとソフト系モニター）、およびビデオレコーダから構成される。(図7)

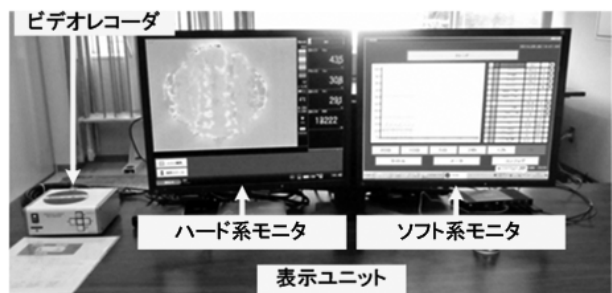


図7 表示ユニット外観

4.2 監視方法

CFM には、ガスセンサ等からのアナログデータを用いたトレンド監視、赤外線熱画像カメラによる熱画像監視、および熱画像の全画素毎の温度データを工業用 PC で処理した画像解析監視の 3 種類の監視方法を有している。

以下にそれぞれの監視方法について記載する。

(1) トレンド監視

各種センサから得られる臭気ガス、CO ガス等のデータと赤外線熱画像カメラからの温度データを 6 秒毎に取り込んでソフト系モニタにトレンドグラフとして表示する。(図 8)

これにより、石炭サイロ内の変動状況を把握することができるとともに、通常のデータ変動範囲から逸脱した異常データの早期把握が可能である。

なお、データは 1 分毎に工業用 PC に記録 (CSV ファイル・1,000 日分) しており、別途 USB メモリ等の記録媒体に抜き出すことが可能である。

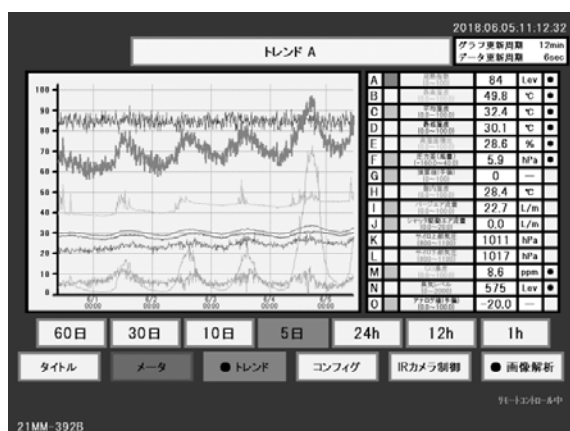


図 8 トレンド監視画面例(ソフト系モニタ)

(a) 温度

赤外線熱画像カメラからの全画素毎の温度データから、最高値と平均値および最低値を抜き出してグラフ化したもので、サイロ内の石炭表面温度の監視を行う。

(b) ガス濃度

既設の別装置からの臭気レベルと CO ガス濃度信号を利用し、グラフ化している。どちらのガス濃度も石炭表面温度の上昇に先立って上昇する傾向がある。

(c) 気圧差

石炭サイロ内外の気圧差は、間接的に払出コンベア室→石炭層→サイロ上部換気装置→サイロ外へ流れる換気空気量としてグラフ化している。石炭層に供給される空気量が多い箇所ほど温度上昇しやすい傾向があるため、参考情報として監視している。

(2) 熱画像監視

赤外線熱画像カメラからの出力信号は、疑似カラーによる熱画像信号と全画素毎のデジタル温度データ信号がある。

熱画像信号には、石炭サイロ内の温度分布の他に、最高・平均・最低温度と高温領域面積値を表示させている。これらは、赤外線熱画像カメラの制御装置から直接出力される信頼性の高いハードウェアデータであり、ハード系モニタに表示している。

さらに、全画素温度データ信号を工業用 PC で処理して得られるソフトウェアデータとして、ノーマライズ画像、熱画像解析(相関)、熱画像解析(差分)があり、ソフト系モニタに表示している。

(a) 最高、平均、最低温度

熱画像の全画素温度の最高・平均・最低温度をリアルタイム表示している。この中で特に最高温度は、局所的な発熱を検知できることから、極めて有効な発熱監視ファクタである。(図 9)

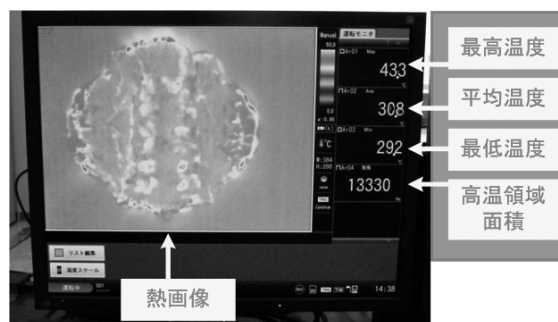


図 9 熱画像監視画面 (ハード系モニタ)

熱画像監視画面では、図 10 のように、円形の石炭サイロ壁面と稼働中の払出コンベア (中央縦 2 列のライン) 部分の温度が高いことが確認できる。これは、空気がサイロ底部から石炭層を抜けている箇所で石炭の発熱が発生していることを示している。

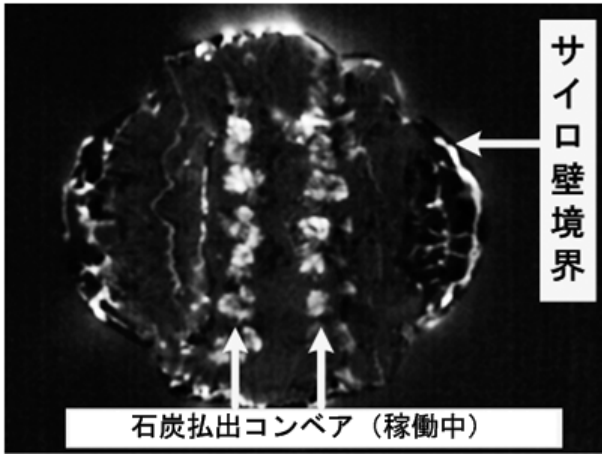


図 10 石炭払出時の熱画像監視画面の一例

(b) 高温領域面積

熱画像のうち、設定値以上の温度に達したエリアの面積を表示させており、参考値として監視している。

(c) ノーマライズ画像

ハード系モニタの熱画像の表示レンジは固定(例；0℃～60℃)で運用されているため、画像内の温度差が小さい場合は、画面全体がほぼ同一色になってしまい、判別が困難となる。

そこで全画素毎の温度データを工業用 PC で処理し熱画像を作成した後、ノーマライズ処理(画像中の最低温度と最高温度をそれぞれ 0%と 100%に割り当て)を行うことにより、視認性を向上させた画像をソフト系モニタに表示させている。(図 11)

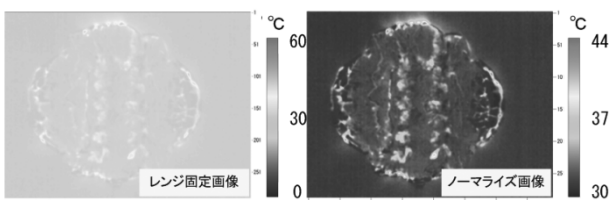


図 11 ノーマライズ処理による判別性向上

これにより、画像のコントラストが常に最大になることから、サイロ内石炭温度分布の把握が容易になり、温度上昇傾向のより早期の監視を実現している。(図 12)

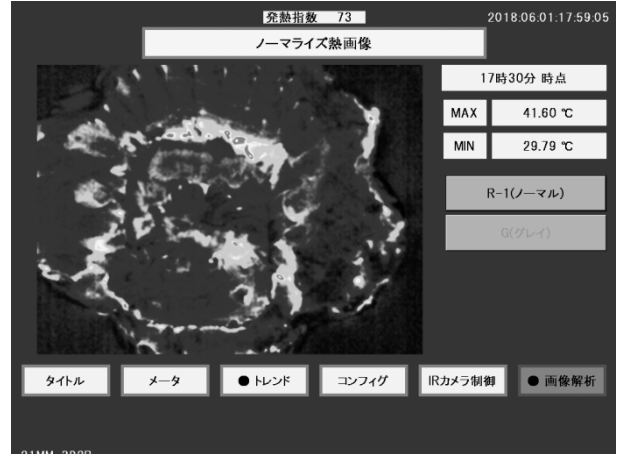


図 12 ノーマライズ画面 (ソフト系モニタ)

(d) 熱画像解析(相関)

図 10 に示すとおり、石炭とサイロ壁の境界や使用中の払出コンベア上部のように、空気が流れこむ箇所の温度が上昇する傾向があり、熱画像は特定の画像パターンを示すケースが多い。

このため、現状の熱画像が発熱時の熱画像と同じパターンになりつつあるかどうかを、画像処理によって数値化できれば、早期の自動発熱検知が実現できる可能性がある。

そこで、疑似カラーの熱画像を白黒化(2値化)した後、あらかじめ登録した参照画像と実際の熱画像との画像相関値を定期的(30分毎)に自動計算して、相関値トレンドとして表示させるとともに、相関値が設定値以上で警報表示させるようにした。(図 13、図 14)

なお、白黒化した熱画像データに対しては、以下の前処理を自動実行する機能を付加しており、石炭レベルの変動や旋回式積付コンベアの動作による画像変化の影響等を抑制するようにした。

・自動拡大・縮小機能

熱画像を自動拡大・縮小させて、石炭の積付けレベルの変化による熱画像パターンの大きさ変化をキャンセルする。

・自動回転機能

画像を自動回転させて、旋回式積付コンベアの旋回による熱画像パターンの回転変化をキャンセルする。

・自動膨張・収縮

白黒熱画像の白画素を自動膨張・収縮させて石炭面の平均温度変化による熱画像パターン変化の影響を抑制する。

画像番号	参照画像	実画像	モデル図A	モデル図B	モデル図C
	対象画像				
ア		1.000	0.437	0.166	0.185
イ		0.175	0.189	0.422	0.253
ウ		0.320	0.298	0.276	0.475
エ		0.000	0.013	0.081	0.002

○→横軸最大値

図 13 相関値計算結果例

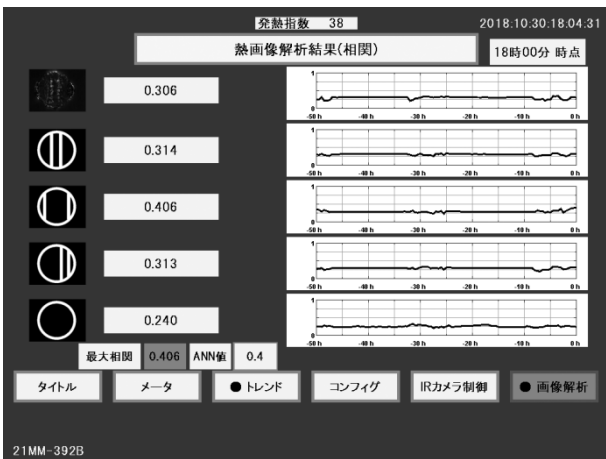


図 14 熱画像解析(相関) (ソフト系モニタ)

(e) 熱画像解析(差分)

石炭の発熱が発生した場合、発熱に先だって熱くなった空気が石炭層内を上昇した後に表面の石炭を加熱して、局部的に温度の高いエリアを形成する場合があります。

図 15 の例では、画像左側に現れた高温部の領域が次第に大きくなっていることが分かる。

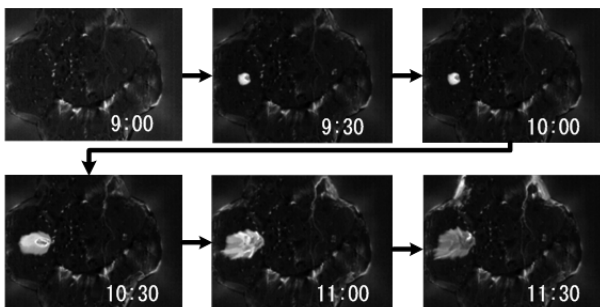


図 15 局部的な温度上昇例

この様なゆっくりした変化を監視しやすくするために、定期的 (30 分毎) に熱画像上の指定面積以上の温度上昇エリアを自動解析して表示する機能を組み込んだ。(図 16)

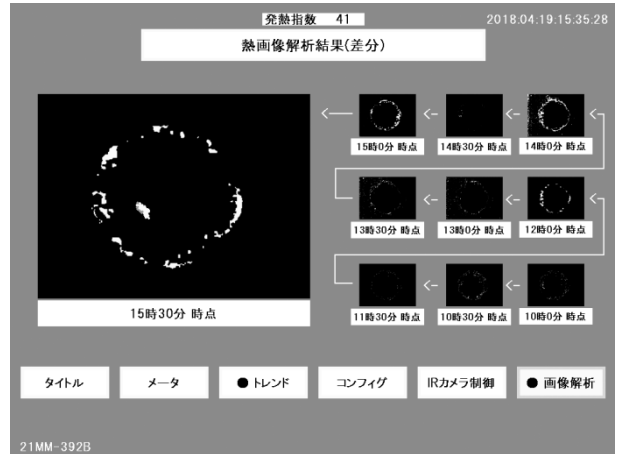


図 16 熱画像解析(差分)画面(ソフト系モニタ)

5. 仮設・試験結果

以上の性能を有する CFM を設計製作し、平成 27 年 9 月に四国電力株式会社橘湾発電所 No.4 サイロに仮設して、連続監視を行った。

5.1 稼働状況

CFM は仮設後、ほぼ 3 カ年間連続稼働している。当初懸念された赤外線窓の粉塵汚損もパージェアの効果によって一切生じておらず、ほぼノーメンテナンスでの稼働を実現することができている。

5.2 石炭発熱監視

平成 30 年 8 月に実際に石炭の発熱が発生したが、CFM による異常検知によって早期の発熱対策を行うことができた。

その時の CFJ の監視画面等を以下に示す。

石炭表面温度が上昇し始めたのは当日の 5 時頃であり、およそ 5 時間後に石炭表面最高温度が 46℃から 140℃に急上昇した。

温度上昇は極めて局所的であったため、熱画像上では発見することは困難であったが、最高温度表示機能により石炭発熱を検知することができた。(図 17、図 18)

また、石炭サイロレベルが高い場合、石炭表面温度と払出石炭温度は必ずしも一致しないが、当

日は石炭サイロレベルが比較的 low、熱画像と併せることにより発熱箇所を特定し、発熱箇所の石炭を集中的に払出すことによって発熱を抑制することができた。

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)火力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。



図 17 発熱時熱画像（ハード系モニタ）

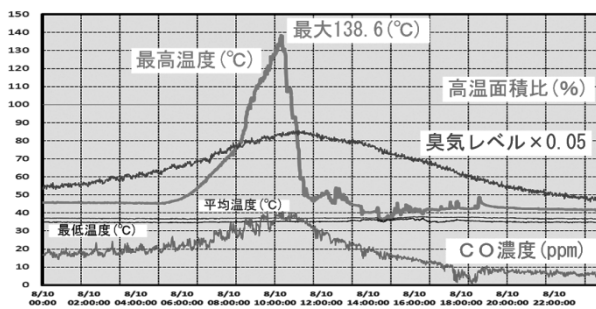


図 18 トレンドデータ（保存周期=1分）

なお、この発熱現象後に、ハード系モニタ画面上への温度高の警報表示機能および温度高警報接点出力機能を追加し、発熱監視機能のさらなる強化を図った。

6. まとめ

CFM は、四国電力株式会社殿からの委託研究である「石炭サイロ発熱監視装置の研究開発」の成果である。同研究により石炭サイロ内の発熱監視においては、ガス濃度のトレンド監視に加え、赤外線熱画像カメラによる広範囲の温度分布監視が有効であることを確認できた。

特に、赤外線熱画像カメラでは、発熱温度に加えて発熱箇所を監視できることから、発熱箇所に応じた対処（スポット的な石炭の抜き取りや循環運転）が行え、的確かつ効率的な発熱防止を図れることが分かった。

赤外線熱画像カメラは比較的高額な測定器ではあるが、石炭サイロの発熱を監視することで火災を防止できる可能性があることから、亜瀝青炭等の低品位炭用石炭サイロへの適用は有用と考える。

架空地線の素線溶損時における残存引張荷重特性に関する研究

(株)四国総合研究所 電力技術部 村上 知則
(株)四国総合研究所 電力技術部 新居 浩治

キーワード： 架空地線
溶損
残存引張荷重
レプリカ
3D データ

Key Words : Ground wire
Melting
Residual strength
Replica
3D data

Study on residual strength properties of ground wire at strand melted

Shikoku Research Institute, Inc., Electric Power Technology Department
Tomonori Murakami and Kouji Nii

Abstract

When strand of ground wire melts, the melted cross sectional area is converted into the number of strands. If the number is less than the threshold value, the ground wire will be repaired by a minor method such as repair of armor rod, and if the number is larger than the threshold value, the melting point of ground wire will be partly exchanged to the new line.

However, converting from the melted cross sectional area to the number of strands depends on the subjectivity and unlike wire breakage, the ground wire that strand has melted is not so clearly understood the degree of decrease in residual strength related to the extent of melting loss.

In this study, we found that the degree of reduction of the residual strength was larger than the rate of the disappeared cross sectional area of the ground wire which strand was melted. By using this result, it is expected that the more appropriate repair method according to the state of damage can be selected by obtaining a method for quantitatively estimating the residual strength from the state of each strand.

1. はじめに

ヘリや自走器による架空地線点検において、素線の溶損を発見した場合、溶損断面積を素線本数に換算し、軽微なものはアーマロッド補修など簡易な補修を行い、重大なものは溶損個所の部分的な新線への張替等を行っている。

しかしながら、溶損断面積の素線本数換算は主観に頼っているところがあり、また、素線が溶損したより線は素線切れとは異なり、溶損度合いによる残存引張荷重が明確には分からない。このため、溶損した架空地線の残存引張荷重を定量的に推定する手法について研究を行ったので紹介する。

2. 素線溶損より線サンプル

素線溶損度合いの違いによる残存引張荷重特性を把握するため、溶損ケース別のサンプルを作成し、引張荷重試験等を実施した。

サンプルは、直撃雷を模擬したインパルス電流発生装置および直流アーク発生装置により通過電荷量の条件を変えて作成した。

図1に作成したAC55mm²サンプルの様相例を示す。素線切れまでは至っていないものの、アークを受けた個所は、アルミ覆鋼線のアルミ覆が消失し、鋼線の断面積が減少しているのが分かる。

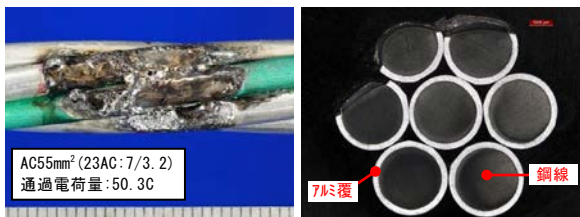


図1 素線溶損より線サンプルの様相

3. より線引張試験

作成したAC55mm²サンプルの引張試験結果を図2に示す。

電荷量が大きくなるにしたがって、残存引張荷重が減少傾向を示し、その度合いは溶損したより線の断面積減少の度合いより大きいことが分かった。

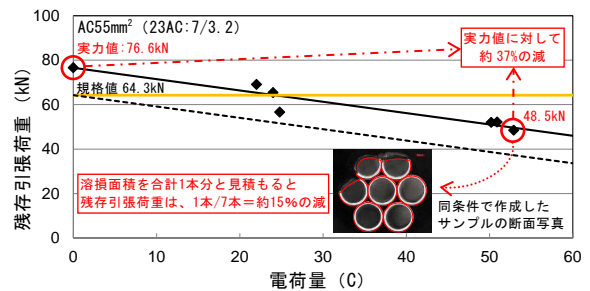


図2 より線引張試験結果

一方、図3に示すように「引張荷重-伸び特性」については、健全なより線は一般的に全素線が同時に破断するのに対し、溶損より線はのこぎり状の変化を示している。これは、溶損による引張荷重の低下度合いが大きい素線から順次破断したためと考えられる。

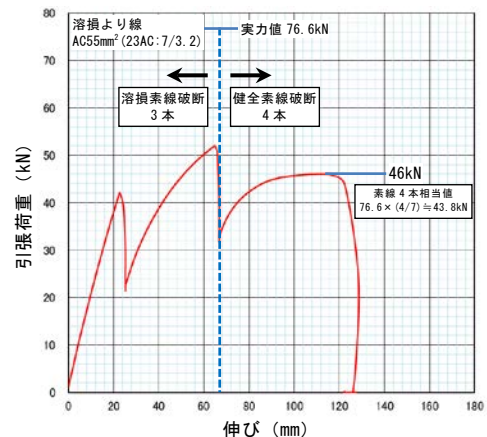
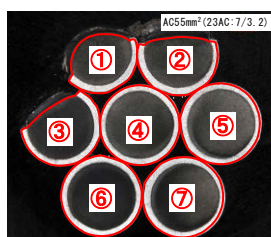


図3 引張荷重-伸び特性

4. より線残存引張荷重推定

素線が溶損したより線については、図4に示すように、各素線の溶損度合い(断面積残存率)と残存素線本数による荷重分担との関係を数式化することにより、「引張荷重-伸び特性」における素線の破断過程を推定し、最終的なより線の残存引張荷重を算出できると考えられる。



No.	断面積 (mm ²)	断面積 残存率 %ΔS(%)
①	5.12	63.7
②	6.04	75.1
③	6.41	79.7
④	8.04	100
⑤	8.04	100
⑥	8.04	100
⑦	8.04	100

健全なより線の最小引張荷重(実力値)を76.6kNとし、各素線の断面積残存率を引張荷重残存率として考えると、
 ①→②→③→④⑤⑥⑦の順に、
 ①・・・76.6×(7/7)×63.7%=48.8
 ②・・・76.6×(6/7)×75.1%=**49.3**
 ③・・・76.6×(5/7)×79.7%=43.6
 ④⑤⑥⑦・・・76.6×(4/7)×100%=43.8
 付近の引張荷重で各素線が破断に至るものと想定される。
 このため、溶損したより線の残存引張荷重はおおよそ49.3kNと推定される。

図4 より線残存引張荷重推定

いくつかのサンプルに対して上記手法を試したところ、概ね推定値に近い残存引張荷重となることが確認できた。

5. アーマロッド補修の適用可否判定

上記より線残存引張荷重推定手法と同様の考え方により、アーマロッド補修の適用については、図5に示す各素線の引張荷重残存率を基にしたフローから可否判定が可能と考えられる。

7本より線において、アーマロッド補修の適用範囲を素線切れ1本以下(規格値ベース)とする場合、溶損したより線の引張荷重残存率は規格値の6/7≒0.86まで許容できる。このため、判定条件は「①各素線の引張荷重残存率が86%以上」、あるいは「②最も小さい引張荷重残存率が86%未満の場合は残り6本が健全」となる。

一方、8本より線において、アーマロッド補修の適用範囲を素線切れ2本以下(規格値ベース)とする場合、溶損したより線の引張荷重残存率は規格値の6/8=0.75まで許容できる。このため、判定条件は「①各素線の引張荷重残存率が75%以上」、「②最も小さい引張荷重残存率が75%未満の場合は二番目に小さい引張荷重残存率が86%以上」、あるいは「③二番目に小さい引張荷重残存率が86%未満の場合は残り6本が健全」となる。

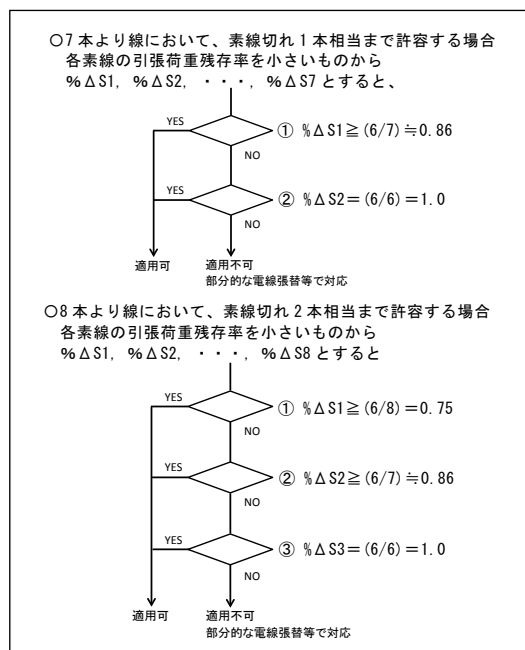


図5 アーマロッド補修適用可否判定フロー

6. 各素線の引張荷重残存率推定

これまで述べたように、溶損したより線の残存引張荷重を推定するためには、各素線の断面積残存率(引張荷重残存率)を把握する必要がある。

現地では、より線の断面を観察し、各素線の断面積残存率を把握することはできない。そのため、図6に示す溶損素線の引張試験結果から得られた「素線外径比と引張荷重比の関係」を基に、ノギス等で測定したより線外径の値から、各素線の外径減少度合いを把握することで、引張荷重残存率の推定が可能となる。

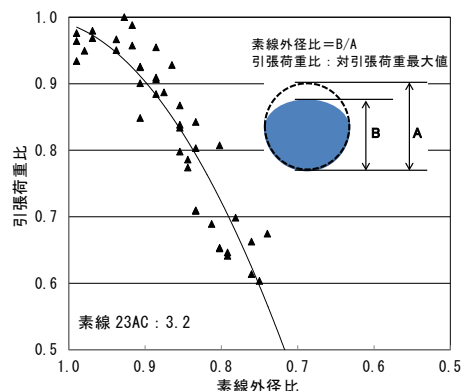


図6 素線外径比と引張荷重比の関係

7. 3D データを応用したより線残存引張荷重推定

ノギス等によるより線外径の測定が困難な場合において、溶損部を 3D データ化し、各素線の断面積残存率を把握することで、より線の残存引張荷重を推定する手法を図 7 に示す。

手順は以下のとおり。

- ① 溶損部をゴム状の高分子材料等で型取り
- ② 型に石膏などを流し込みレプリカを作成
- ③ レプリカをレーザースキャニングし 3D データ化
- ④ 3D データの断面画像から各素線の断面積を把握
- ⑤ 得られた各素線の断面積を基に算出した断面積残存率(引張荷重残存率)と残存素線本数による荷重分担との関係から、より線の残存引張荷重を推定(4. より線残存引張荷重推定手法に同じ)



この手順により、溶損したより線サンプルの残存引張荷重を推定した結果、実測値に近い値を得ることができたことから、更なるスキャニングの精度向上等を図ることにより、残存引張荷重の推定に本手法が適用できる見通しを得た。

8. まとめ

本研究において、素線が溶損した架空地線の残存引張荷重を定量的に推定する手法を得た。これを適用することにより、損傷度合に応じた、より適切な補修方法が選択できるものと期待される。

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)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。

- ⑤ 推定
 - ・ 3D データ化した溶損部の断面状況から得られる各素線の断面積を基に算出した断面積残存率(引張荷重残存率)から $5.27/8.04 \approx 0.65$
 - ① $76.6 \times (7/7) \times 0.65 \approx 49.8 \text{ kN}$
 - ② $76.6 \times (6/7) \times 0.65 \approx 42.7 \text{ kN}$
 - ③ $76.6 \times (5/7) \times 1.00 \approx 54.7 \text{ kN}$
 - ④ $76.6 \times (4/7) \times 1.00 \approx 43.8 \text{ kN}$
- 付近の引張荷重において、それぞれの素線が断線すると推定

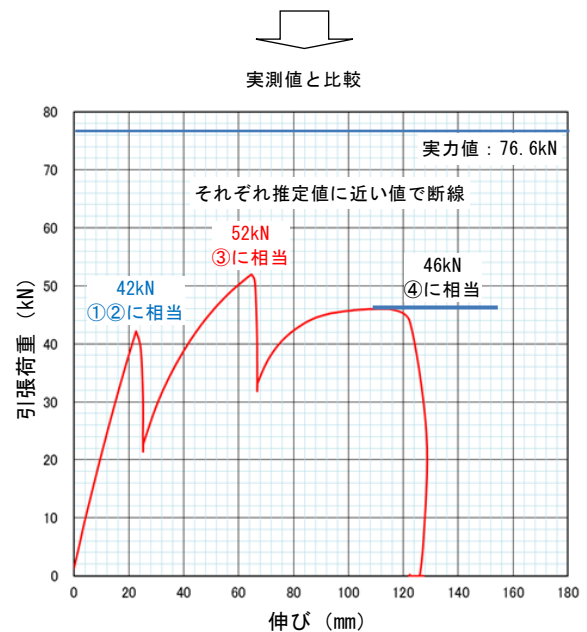


図 7 3D データを応用したより線残存引張荷重推定

OPGWの水浸入障害に対する補修工法の開発

(株)四国総合研究所 電子技術部 徳永 洋一郎
(株)四国総合研究所 電子技術部 松木 一隆
(株)四国総合研究所 電子技術部 阿部 素久
四国電力(株) 送配電カンパニー 通信システム部 西村 浩一

キーワード : OPGW
補修工法
加圧乾燥
減圧乾燥
アタッチメント

Key Words : OPTical fiber composite overhead Ground Wire
Repairing method
Pressurized drying
Vacuum drying
Attachment

Development of repairing method for water penetration in OPGW

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics Technology Department.
Yoichiro Tokunaga, Kazutaka Matsugi and Motohisa Abe
Shikoku Electric Power Co., Power Transmission & Distribution Company
Telecommunication Systems Department.
Koichi Nishimura

Abstract

OPGW(Optical fiber composite overhead Ground Wire) is constituting the communication network for electric power companies. In this OPGW, cracks due to metal fatigue arise from vibration caused by strong winds occur in aluminum tubes that contain optical fibers. Rain water infiltrated through cracks may freeze in winter. And frozen water may squeeze the optical fiber and cause communication troubles.

In many cases, the OPGW that includes the crack location connecting joint boxes will be replaced to fix the trouble. This recovery method requires a lot of time and a large cost.

In order to solve this problem, we developed a repairing method to remove infiltrated water and repair cracks. As a result, we succeeded in restoring the function to a level that would not interfere with operation.

1. はじめに

送電線の架空地線に光ファイバを内蔵したOPGW (OPtical fiber composite overhead Ground Wire) は、信頼性が求められる電力保安通信ネットワークを構成する重要な通信基盤である。

OPGW は強固な構造で自然災害等に強い信頼性の高い設備であるが、長期に亘って過酷な自然環境下で運用されるため、強風振動等によりOPGW内部にて光ファイバを収容するアルミ管 (以下「アルミ管」という) に金属疲労による亀裂が生じ、そこから雨水が浸入することがある。この雨水が冬季に凍結・膨張することで、光ファイバを圧迫し、歪みによる回線障害を引き起こすことがある。また、最終的には光ファイバの断心に至ることもある。

回線障害は凍結解消により復旧する 경우가多いが、本障害は繰り返し発生する可能性が非常に高いため、雨水とアルミ管との腐食反応により発生する水素による光伝送損失を検知できる波長 $1.24\mu\text{m}$ のOTDR (Optical Time Domain Reflectometer) により心線の損失を測定¹⁾することで浸水の有無・場所を確認し、必要に応じて通信回線を迂回させるなどの予防保全の取り組みを行っている。

しかし、恒久対策としてOPGWに浸入した雨水を除去することは難しく、断心した場合は、OPGWの張替やGWWOP (架空地線巻付型光ファイバケーブル) の新設による対応が必要となる。これには、資材調達や作業時期の調整などに時間がかかり、異常を認知してから本復旧完了までにかかなりの期間を要する。また、工事には高度な専門技能を有する多数の作業員を複数地点に配置する必要があり、多額の費用が必要となる。

今回、これらの課題を解決するために、アルミ管内に雨水が浸入したものの断心には至っていない状態のOPGWについて、運用上支障のないレベルまで機能回復する補修工法に関する研究を実施したので報告する。

2. 補修工法の内容

OPGWの構造は図1のとおり、中心部にアルミ管内に収納した光ファイバを配置し、これをアルミ覆鋼より線 (AC線) で覆った構造となっている。このアルミ管に発生した亀裂から雨水が浸入し、凍結・膨張することで、光ファイバを圧迫し

歪みによる回線障害を引き起こすことがある。本研究は、図2のとおり、アルミ管内に浸入した雨水を除去 (水抜き・乾燥) した後に、亀裂部から再び雨水が浸入しないように、アルミ管亀裂部の補修を行うものである。

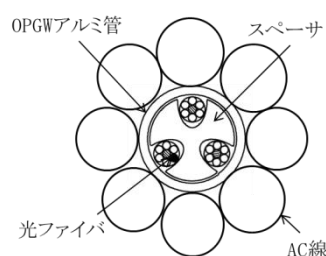


図1 OPGWの構造

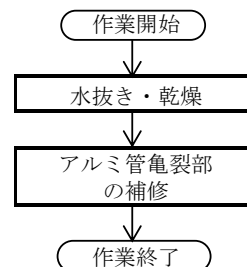


図2 補修工法の流れ

水抜き・乾燥工程では、アルミ管内に浸入した雨水を除去する方法として、アルミ管内に窒素ガスや空気などの圧力気体を注入し、管内の雨水や湿潤気体を押し出しながら乾燥を促す方法 (以下「加圧乾燥」という)、アルミ管内の空気を吸引・排気して管内の圧力を下げつつ、もう一方の開放端からの空気の流れて乾燥を促す方法 (以下「減圧乾燥」という) の2つの方法が考えられる。これらの得失を抑えた上で、現場状況に応じて使い分けることができれば、効果的な雨水除去が可能になる。

また、アルミ管亀裂部の補修工程では、再び雨水が浸入しないように亀裂部を塞ぐとともに、運用上支障のないレベルの強度が保てるよう保護・補強を実施する。

これら補修工法の流れに沿って、研究内容を報告する。

3. 水抜き・乾燥

細径かつ長尺のアルミ管はその内部に光ファイバを多数収容する複雑な構造であり、浸入した雨水を短時間で除去するにはかなりの時間を要するため、可能な限り効果的に雨水を除去することが重要となる。

また、アルミ管に浸入した雨水をどの程度の期間で除去できるかは明らかにされておらず、雨水除去の条件とそれに対する必要な時間を見通す手法があれば、復旧計画を策定する上で非常に有用になる。

そこで、加圧乾燥および減圧乾燥を適用して、

アルミ管内に浸入した水を除去する実験を行い、より効果的な条件や、効果を得るまでに必要な時間などを調査した。

3.1 加圧乾燥

(1) 実験方法

長さ 30m の OPGW(スぺーサ型, SM6C×3)アルミ管(内径 3.9mm)の両端に、それぞれの長さが 145m と 135m のナイロンチューブ(内径 2mm)を接続して、全長 310m のアルミ管を模擬した実験設備を構築した(図3)。

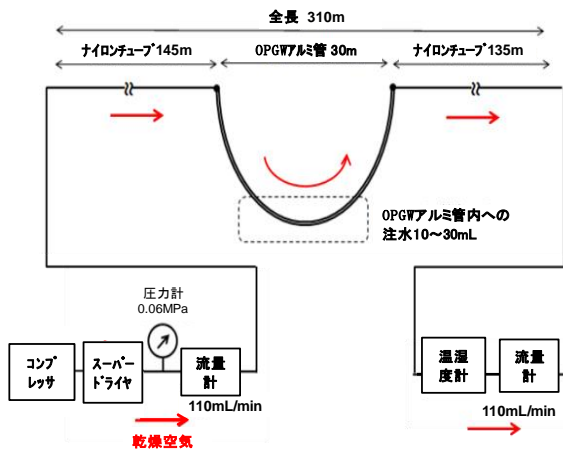


図3 加圧乾燥の実験設備の構成

長さ 30m のアルミ管部分に水を入れ、片端からコンプレッサで圧力 0.06MPa の乾燥空気(流量 110mL/分)を注入し、もう一方の端に出てくる空気の温度と相対湿度を測定する。これにより、ナイロンチューブ出口の湿度変化から、アルミ管内部水の有無等の状態を検知可能にした。

(2) 実験結果

長さ 30m のアルミ管部分への注水量を 10mL, 20mL, 30mL と変えて測定した結果を図4~6に示す。本実験においては、アルミ管内部水が無くなれば、アルミ管内外の湿度はほぼ等しくなり、実験設備のナイロンチューブ出口で測定した相対湿度が最低レベルに下がることから、相対湿度が最低レベルに下がった時点で乾燥が終了したと判断することとした。

また、この実験結果の正当性を確認するため、測定した温度、相対湿度、空気流量などをもとに、次の関係式から乾燥水分量を算出し、図中に青線で表示した。

$$\text{乾燥水分量} = (\text{飽和水蒸気量} \times \text{相対湿度})$$

$$\times \text{空気流量} \times \text{経過時間} \dots [1]$$

この結果、乾燥が完了したと判断した時点の乾燥水分量の計算値が、各々の注水量とほぼ等しくなることが分かり、本実験結果および式[1]の正当性を確認することができた。

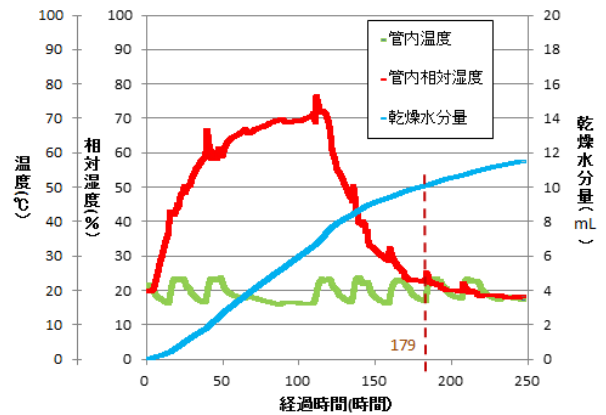


図4 加圧乾燥の実験結果(注水量 10mL の場合)

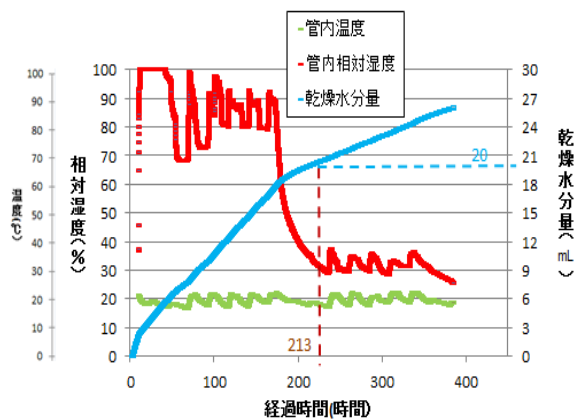


図5 加圧乾燥の実験結果(注水量 20mL の場合)

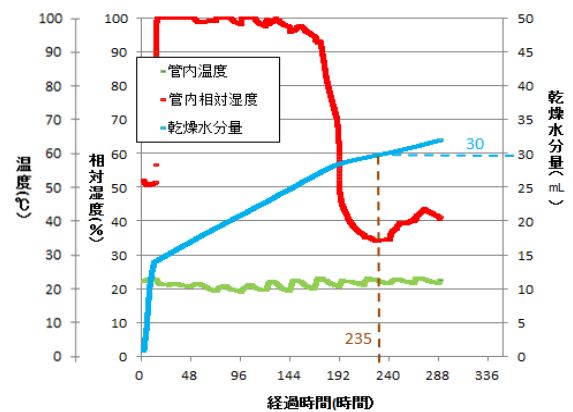


図6 加圧乾燥の実験結果(注水量 30mL の場合)

3.2 減圧乾燥

(1) 実験方法

減圧乾燥では、加圧乾燥のように温湿度計を用いて管内の乾燥状態を推定することはできない。そこで、減圧乾燥を一定時間実施した後、加圧乾燥に切替えて、温度、相対湿度、空気流量などを測定し、その値を前述の式 [1] に代入し、加圧乾燥による乾燥水分量を算出する。注水量が既知であるから、そこから加圧乾燥による乾燥水分量を除けば、減圧乾燥による乾燥水分量を求めることができる。

これを踏まえ、減圧乾燥においても、加圧乾燥と同様、長さ 30m の OPGW アルミ管の両端に、それぞれの長さが 145m および 135m のナイロンチューブを接続したアルミ管を模擬した実験設備を構築した (図 7)。

長さ 30m のアルミ管に水を入れた状態とし、片端を開放した状態で、反対側の端にスクロール型真空ポンプを接続してアルミ管内の空気を吸引・排気する構成とした。また、前述の加圧乾燥の設備も切替えにより測定できる構成とした。

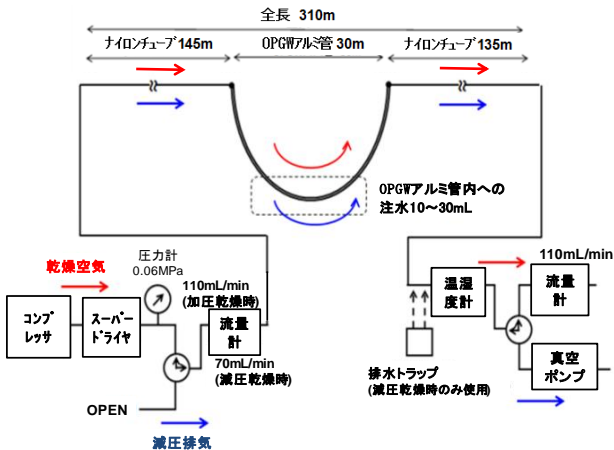


図 7 減圧乾燥の実験設備の構成

(2) 実験結果

長さ 30m のアルミ管への注水量を 10mL, 20mL, 30mL と変えて測定した結果は次のとおりである。

① 注水量 10mL の場合

水 10mL を注水して減圧乾燥を 48 時間実施した後に、加圧乾燥に切替えた時の温度や湿度の測定結果が図 8 である。

加圧乾燥開始後に全体的に湿度が下がった 188

時間経過時点を乾燥が完了した時点と判断した。この時点における加圧乾燥による乾燥水分量は式 [1] から 5.4mL と算定できることから、減圧乾燥による乾燥水分量は 4.6mL と推定した。

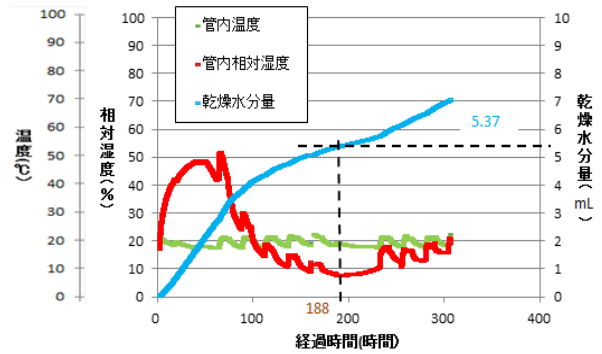


図 8 減圧乾燥後に加圧乾燥した実験結果 (注水量 10mL の場合)

② 注水量 20mL の場合

水 20mL を注水して減圧乾燥を 96 時間実施した後に、加圧乾燥に切替えた時の温度や湿度の測定結果が図 9 である。

加圧乾燥開始後に全体的に湿度が下がった 138 時間経過時点を乾燥が完了した時点と判断した。この時点における加圧乾燥による乾燥水分量は式 [1] から 5.1mL と算定できることから、減圧乾燥による乾燥水分量は 14.9mL と推定した。

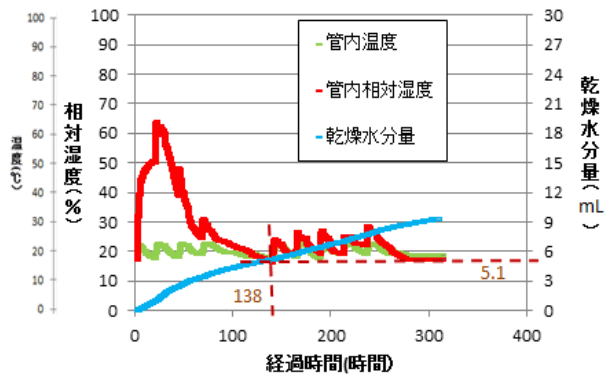


図 9 減圧乾燥後に加圧乾燥した実験結果 (注水量 20mL の場合)

③ 注水量 30mL の場合

水 30mL を注水して減圧乾燥を 144 時間実施した後に、加圧乾燥に切替えた時の温度や湿度の測定結果が図 10 である。

加圧乾燥開始後に全体的に湿度が下がった 92

時間経過時点が乾燥が完了した時点と判断した。この時点における加圧乾燥による乾燥水分量は式 [1] から 2.1mL と算定できることから、減圧乾燥による乾燥水分量は 27.9mL と推定した。

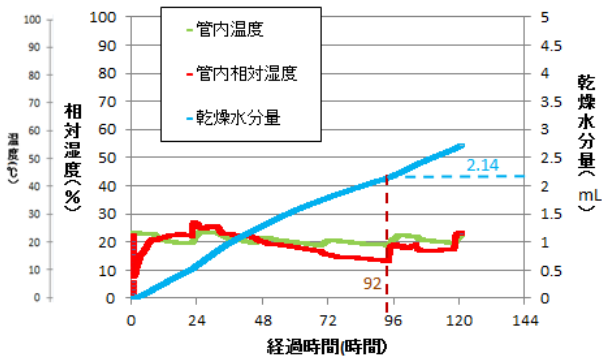


図 10 減圧乾燥後に加圧乾燥した実験結果 (注水量 30mL の場合)

3.3 乾燥効果の比較

加圧乾燥および減圧乾燥の実験結果から単位時間当たりの乾燥水分量を求めたものが表1である。また、横軸に注水量、縦軸に単位時間当たりの乾燥水分量をプロットしたものが図11である。

加圧乾燥・減圧乾燥ともに、注水量が多いほど単位時間当たりの乾燥水分量は多くなる一方、同じ注水量では、減圧乾燥の方が加圧乾燥よりも単位時間当たりの乾燥水分量が多くなった。これは、加圧乾燥・減圧乾燥いずれの場合もアルミ管内の水の位置はほぼ同じ位置としたことから、減圧乾燥による吸引で生じた空気の流れによる乾燥効果の方が、加圧乾燥による排気で生じた空気の流れによる乾燥効果よりも大きかったためと考えられる。

また、長さ一定のアルミ管中に存在する水の位置が違う場合の乾燥効果は次のようになる。

加圧乾燥の場合は、水の位置がアルミ管出口に近いほどアルミ管外に水を排出しやすく乾燥がより速く進む傾向がある。

一方、減圧乾燥の場合は、水の位置が真空ポンプ側に近いほどアルミ管内の圧力が低く気化しやすいため、乾燥がより速く進む。

表 1 単位時間当たりの乾燥水分量

	注水量 [mL]	乾燥水分量 [mL]	乾燥時間 [時間]	単位時間当たりの乾燥水分量 [mL/時間]
加圧乾燥	10	10	179	0.056
	20	20	213	0.094
	30	30	235	0.128
減圧乾燥	10	4.6	48	0.096
	20	14.9	96	0.155
	30	27.9	144	0.194

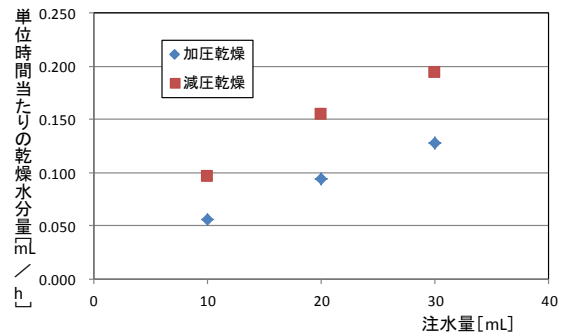


図 11 注水量の違いによる乾燥効果の比較

3.4 フィールド実験による検証

長径間の実フィールド設備に加圧乾燥や減圧乾燥を適用して、次のとおり効果を確認した。

(1) 実験対象設備

実験対象設備は図12のような区間長 1.8km の OPGW (スぺーサ型, SM8C) であり、3号鉄塔付近と6号鉄塔付近の2箇所所でアルミ管に亀裂があることを事前に確認している。

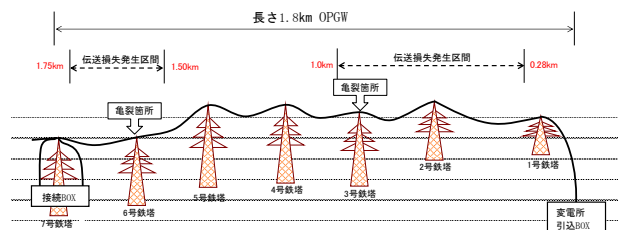


図 12 フィールド実験対象 OPGW の状況

また、波長 1.24 μm の OTDR を用いた測定により、変電所を起点に 0.28km~1.0km の間と、1.50km~1.75km の間に雨水の浸入に伴う水素反応によるものとみられる伝送損失が観測されていた (図13)。

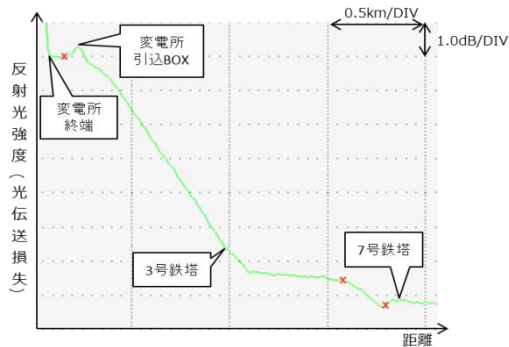


図 13 OTDR (波長 1.24 μm) による測定波形

(2) 実験方法

図 14 のように、変電所引込 BOX 側に主に加圧乾燥や減圧乾燥のためのコンプレッサや真空ポンプ等の主装置類を、また 7 号鉄塔接続 BOX 側に流量計や温度計などの測定器類を、それぞれ収容箱に入れ設置した。

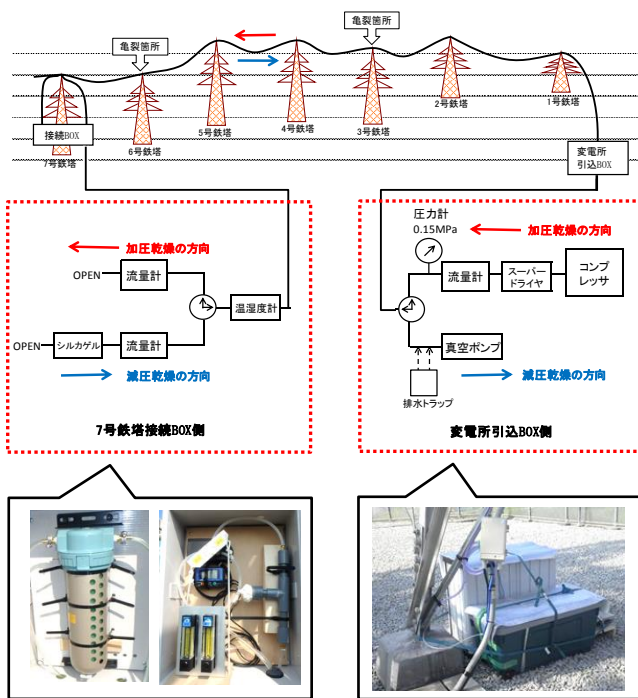


図 14 OPGW フィールド実験の構成

OTDR による伝送損失測定結果および OPGW の高低差の関係等から総合的に考えて、アルミ管に浸入した雨水は、3 号鉄塔の両側 (2~3 号鉄塔の区間、3~4 号鉄塔の区間) および 6 号鉄塔の大番側 (6~7 号鉄塔の区間) に存在するものと考えられた。

このような状況を踏まえ、フィールド実験では、最初は減圧乾燥を用いた水抜き・乾燥を実施する

こととした。これは、2~3 号鉄塔区間の雨水について、真空ポンプ等の機器からの距離が近いことから減圧乾燥の効果が見込めること、また加圧乾燥を先に適用した場合、空気の流れにより 3~4 号鉄塔の区間に雨水が移動する恐れがあったためである。そして減圧乾燥後は、加圧乾燥に切替え、乾燥を継続しつつ、7 号鉄塔接続 BOX 側にて温度や相対湿度などを測定した。

(3) 実験結果

フィールド実験開始後、減圧乾燥をのべ約 11 日間、加圧乾燥をのべ約 80 日間実施した。この加圧乾燥実施中、7 号鉄塔接続 BOX 側にて空気の出口流量を計測したが、有効な値は計測できなかった。これは、変電所引込 BOX から注入した空気が、既知の 2 箇所 (亀裂部) で漏れ出し、7 号鉄塔接続 BOX の管出口まで十分届かず、出口流量が計測不能となったためと考えられた。

このため、アルミ管内の水除去 (乾燥) の状況は、波長 1.24 μm の OTDR による伝送損失状態変化から推定することとした。

減圧乾燥 (のべ約 11 日間) と加圧乾燥① (のべ約 25 日間) 後に、OTDR 測定波形から水素反応による光伝送損失が一旦消えたものの、図 15 のとおり、加圧乾燥①を停止して 13 日後には 3~4 号鉄塔の区間で再び 0.5 dB 程度の光伝送損失が発生した。これは、フィールド実験開始前にも光伝送損失が観測された 3~4 号鉄塔の区間にあたり、当該区間の未乾燥分の浸入水が再反応したものと予想した。

そこで、さらに加圧乾燥② (のべ約 55 日間) を延長して実施した結果、水素反応による光伝送損失は消え、さらに 3 ヶ月経っても再反応は発生しなかった。

ただ、波長 1.24 μm の OTDR による測定結果だけでは、アルミ管内に水分が残った状態で水素の再反応が発生しなかったことも考えられる²⁾。このため、式 [1] を用い、フィールド実験による管入口から最初の亀裂がある 1~3 号鉄塔間における乾燥水分量を試算した。試算にあたっては、管出口の相対湿度等は測定不能であったため、管出口での空気の相対湿度を実験結果から 80% と仮定した。そして、管入口で測定した流量や温度、乾燥時間を用いて計算した結果、乾燥水分量は約

200mL と試算された。この値は、別途実施したアルミ管亀裂に対する降水実験の結果から想定できた年間浸入水分量（約25mL）よりも十分に大きな値であることから、試算上でも完全に乾燥したと推定できる。

以上より、OTDR による測定結果および試算した乾燥水分量などを考慮した結果、1～3号鉄塔の区間は十分に水除去ができたと判断した。

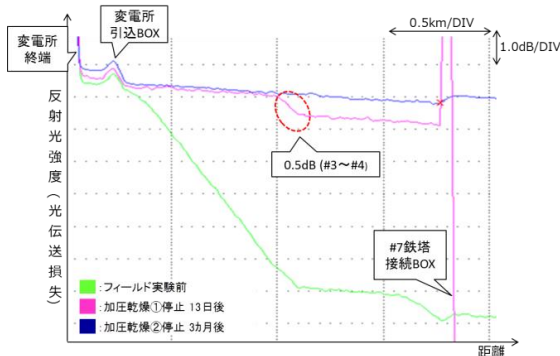


図 15 フィールド実験での OTDR 測定結果

3.5 光ファイバ無切断用アタッチメント

加圧乾燥や気密試験の際に、光ファイバを切断することなく、アルミ管の中に窒素ガスや乾燥空気を注入できるアタッチメントを開発した。

開発したアタッチメントは、OPGW 接続箱のアルミ管口に装着する「OPGW 接続箱用 (図16)」とアルミ管亀裂部に装着する「屋外ジャンパ部用 (図17)」の2種類である。

材質には、弾力性のあるウレタンゴム（硬度 50°）を用いた。

このアタッチメントを使用する際は、アルミ管および光ファイバの接触部にリチウムグリスを十分に塗布して両側から挟み込み、気密性向上を図る。



図 16 OPGW 接続箱用アタッチメント



図 17 屋外ジャンパ部用アタッチメント

今回開発したアタッチメントが、加圧乾燥や気密試験に必要な気密性を有することを、次のような試験を実施して確認した。

図 18～19 に示すようにアタッチメントを装着して、コンプレッサでアルミ管内へ注入する空気圧力を 0.3MPa まで徐々に上げていき、空気漏れがないことを確認するとともに、コンプレッサからの空気注入口を閉じた状態にして 24 時間気密が保てることを確認した。

また、同様に空気圧力を 0.3MPa まで徐々に上げ、OTDR を用いて確認した結果、アタッチメント周辺に光ファイバを圧迫したような光伝送損失は観測されることなく、光ファイバに影響がないことを確認した。

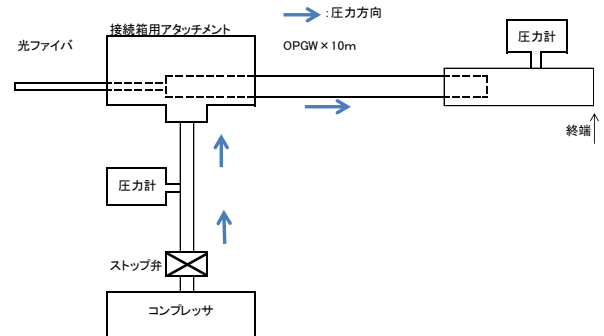


図 18 OPGW 接続箱用アタッチメントの気密試験

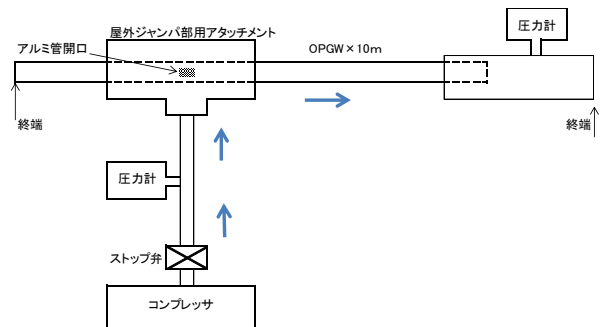


図 19 屋外ジャンパ部用アタッチメントの気密試験

4. アルミ管亀裂部の補修

水除去の完了後、アルミ管内に再び水が浸入しないようにする亀裂部の補修工法の手順と、その効果を評価した結果は次のとおりである。

4.1 補修手順

図20のように、アルミ管亀裂部の補修は次の手順で実施する。

- ①アルミ管亀裂部の養生・清掃
アルミ管亀裂開口部からゴミや不純物が混入しないように養生して清掃する。
- ②亀裂開口部の閉塞・保護
養生テープを剥がし、気密保持材・防水材により亀裂開口部を閉塞・保護する。
- ③閉塞・保護処置の補強
気密保持材・防水材を覆うように、半割れアルミ管を張り合わせ、接着剤、ケブラー繊維を使い貼り合せて補強する。
- ④AC線のより戻し
ほどいたAC線をより戻す。
- ⑤アーマーロッドの巻き付け
AC線切断部を中心にアーマーロッドを巻き付け、より戻したAC線を補強する。



図20 アルミ管亀裂部の補修手順

4.2 補修部位の評価

アルミ管亀裂部に補修を施し、加振試験や耐候性試験を行って、補修部位で補修効果が保持でき

ることを確認した。

なお、この加振試験条件、および、耐候性試験の一つとして実施した温度変化試験条件はそれぞれ表2、表3のとおりである。

表2 加振試験条件

項目	条件
振幅	±1.5mm
振動回数	10 ⁷ 回
振動周波数	41Hz
加振位置	アーマーロッド端部

表3 温度変化試験条件

試験項目	温度(°C)	時間(h)
低温維持	-40	3
温度上昇	-40→80	3
高温維持	80	3
温度下降	80→-40	3

5. 現場事情を踏まえた補修工法の選定・適用

実環境において、OPGW 障害位置やその設備場所、周辺環境等は多種多様であり、現場毎の事情を勘案しながら補修工法を選定・適用する必要がある。そこで、前述した実験結果等から、水抜き・乾燥工法の選定の考え方を整理したものが図21である。

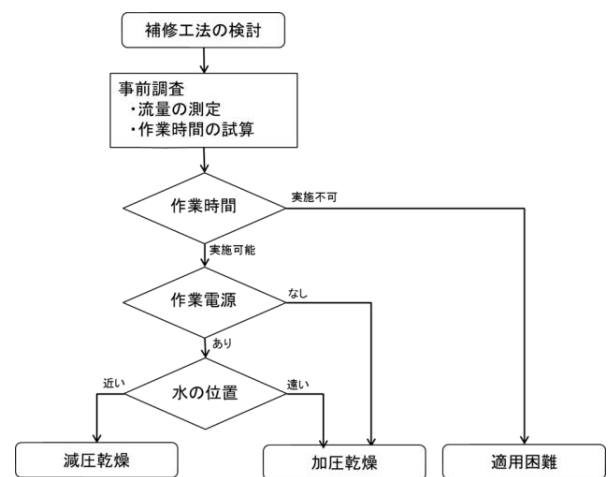


図21 水抜き・乾燥工法の選定の考え方

作業時間については、年1回の点検でOPGWへの雨水浸入を発見した場合、対象OPGWの乾燥空気流量を事前調査することや、式[1]の浸水量を年間水浸入量(25mL)と同じとおくことにより

$$\text{乾燥時間} = \frac{\text{浸水量 (25mL)}}{\text{飽和水蒸気量} \times \text{相対湿度} \times \text{乾燥空気流量}}$$

の関係式から試算することができる。

また、作業電源確保の観点から考えると、加圧乾燥では図22のとおり、減圧乾燥では図23のとおりコンプレッサ、真空ポンプ等の主装置類を設置する側には電源が不可欠であることから、作業電源が準備できるかどうか判断基準となる。ただ、OPGWの多くは山間僻地にあつて電源確保が容易ではないことから、そのような場合は、加圧乾燥のコンプレッサの代替手段として、窒素ガスポンプを利用する。

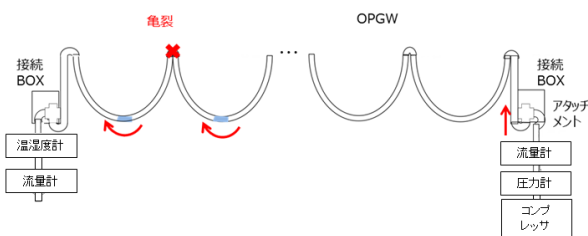


図22 加圧乾燥の適用イメージ

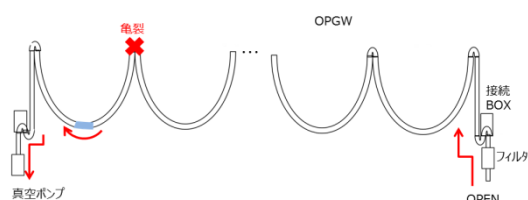


図23 減圧乾燥の適用イメージ

アルミ管亀裂位置や浸水区間の位置関係などから、浸入した雨水の存在が予想される区間から離れた地点に機器をおいて水抜き・乾燥する場合は加圧乾燥を、逆に近い地点に機器をおいて水抜き・乾燥する場合は減圧乾燥の適用を検討することが、より速く乾燥を進める上で必要である。

また、アルミ管内に存在する雨水を遠近どちら側に誘導するかについても、工法の選定・適用の重要な判断ポイントとなる。

6. まとめ

アルミ管亀裂部からの水浸入障害について、復旧にかかる期間短縮とコスト削減をねらいに、水除去や亀裂部補修を行い、運用上支障のないレベ

ルまで機能回復を図る補修工法の研究を行った。

そして、補修の大半を占める水除去の期間を短縮する方法や、水除去を効果的に実施する手法等を明らかにした。

また、条件に合った方法を適切に選定・適用することで、長径間の実フィールド設備でも適用可能なケースがあることを確認した。

さらに、加圧乾燥や気密試験の際に、光ファイバを切断することなく OPGW アルミ管の中に窒素ガスや乾燥空気を注入できるアタッチメントを開発した。

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)送配電カンパニー通信システム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。

【参考文献】

- 1) 高田諭, “アルミ管破損箇所特定方法に関する研究”, 電気学会通信研究会, CMN-07-4, pp. 17-20.
- 2) 森村俊, “1.24/1.625 μm 光伝送損失測定による OPGW 浸水凍結障害検出”, 電気学会通信研究会, CMN-17-022, pp. 101-106.

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109号 (無断転載を禁ず)

編集兼発行人 中 川 勇
株式会社四国総合研究所

発 行 株式会社四国総合研究所
〒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