

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16H03132

研究課題名（和文）光ファイバ用いたリアルタイム大気腐食評価システムの開発

研究課題名（英文）Development of Atmospheric Corrosion Sensor system based on Strain Measurement with Fiber Bragg Grating Sensors

研究代表者

笠井 尚哉（Kasai, Naoya）

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・准教授

研究者番号：20361868

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,300,000円

研究成果の概要（和文）：リアルタイム大気腐食評価システムの開発では、まず、大気腐食モニタリングセンサの状態を材料力学的にモデリングし、解析的表現式を導出し、測定理論を検証した。さらに、大気腐食モニタリングセンサの状態をモデリングし、有限要素解析で得られた結果を用いて理論的な考察を補強した。次に、FBG素子とひずみゲージを用いた大気腐食モニタリングセンサの構造の最適化を図り、長期に暴露が可能な大気腐食モニタリングセンサを設計・試作するとともに、測定システムを構築した。これらを用いて、測定性能を確認したところ、ラボ実験では精度良く測定できたが、実環境を模擬した実験では腐食生成物が生じ、これらが誤差要因となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国及び先進諸国において社会インフラが老朽化しており、これらの安全対策が世界的な喫緊の課題になっている。特に、腐食は社会インフラの主要な損傷モードであるが、腐食環境をリアルタイムに評価するための確立されている技術は存在しない。そのため、本研究課題の研究が必要となる。本研究結果が実用化されるとリアルタイムに腐食環境評価が可能となり、より詳細な腐食メカニズムの解明が可能になることに加え、社会インフラの維持管理の高度化に資することができる。

研究成果の概要（英文）：An in-situ atmospheric corrosion sensor system based on strain measurement was developed. Firstly, The theoretical consideration for measuring the reduction in thickness of low carbon steel with an atmospheric corrosion sensor was presented. Based on the theoretical considerations, a test piece and apparatus with FBG and strain gauge for an atmospheric corrosion sensor were designed. Furthermore, in a dry wet cyclic accelerated exposure experiment, the measured strain with FGB and strain gauge indicated thinning of the test piece, although the corrosion product generated on the surface of the test piece affected the results. From the measured signals, the effects of corrosion products on the signal were discussed.

研究分野：非破壊評価

キーワード：非破壊評価 大気腐食 腐食モニタリング 社会インフラ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国及び先進諸国において社会インフラが老朽化しており、これらの安全対策が世界的な喫緊の課題になっている。特に、腐食は社会インフラの主要な損傷モードであるが、リアルタイムで腐食環境を評価するための確立されている技術は存在しない。

腐食環境を測定する研究として、電気化学的手法を用いた研究では、Atmospheric Corrosion Monitor (ACM) センサ、及び交流インピーダンス法を用いたものがある。ACM センサは、Fe と Ag のような貴と卑な金属の 2 種類の金属を互いに絶縁して大気中に曝露し、降雨や結露により表面に薄い水膜が形成されることによって生ずる微少なガルバニック電流を測定するものである。交流インピーダンス法は、腐食環境中の電極に電流を流し、電荷移動抵抗を求め腐食速度を評価するものである。どちらもリアルタイムで腐食速度の評価が可能であるが、腐食生成物が存在すると精度が低下してしまう。ワッペン試験法は所定の期間曝露した後に試験片の重量減少を正確に測定し、板厚減少に換算するものでリアルタイムでの測定はできない。

そこで、新たなリアルタイム大気腐食評価方法が実用化されれば、温度、湿度、雨量、風速、風向をリアルタイムで計測することにより、台風、雨等の気象現象の腐食への影響が明らかになり、より詳細な腐食メカニズムの理解が促進され、防食対策の立案に貢献できる。また、社会インフラ全体に大気腐モニタリングセンサを設置すれば社会インフラの予防保全の優先順位付けを行うことが可能となり、我が国のみならず世界中の社会インフラの予防保全の立案方法、及びそれらの安全確保に貢献できる。

2. 研究の目的

本研究では、社会インフラの腐食環境を評価するために、ひずみ測定による大気腐食モニタリングシステムを開発・実用化することを目的とする。具体的には以下の項目に関する理論及び技術について研究する。なお、以下の検討では、ひずみ測定素子として光ファイバだけでなくひずみゲージも使用した。

1. 腐食センサに関する要素技術の確立
2. 光ファイバを用いた計測システムの開発
3. 環境条件(温度、湿度、腐食生成物)の影響の除去可能な評価技術の開発

3. 研究の方法

(1) 試験片と大気腐食モニタリングセンサ用の治具

腐食による減肉を生じさせる試験片として、幅 45 mm、長さ 95 mm、厚さ 0.5 mm の SPCC 試験片を用いた。この試験片には残留応力除去のため、窒素環境下で 450°C、1 時間の焼きなましを行った。この試験片の中央に腐食を生じさせる幅 30 mm、長さ 35 mm の範囲の腐食部を設置し、裏面にひずみ測定用の光ファイバの Fiber Bragg Grating (FBG) センサ、又はひずみゲージを貼り付けた。その後、シリコンスプレーにより腐食部以外を防食処理した。これを申請者が設計した樹脂製の治具で挟むことで、試験片に曲率半径 430 mm の一定の曲げを負荷した。この曲率半径は試験片に曲げを与えた際に変形が弾性領域内となるように導き出した値である。また試験片に異種金属が接触すると腐食挙動に影響することから治具の材質として樹脂を用いた。

(2) 大気腐食モニタリングセンサの挙動に対する有限要素解析

試験片と大気腐食モニタリングセンサ用の治具の状態をモデリングし、有限要素解析を行った。解析モデルは実際の大気腐食モニタリングセンサで利用する幅 45 mm、長さ 95 mm、厚さ 0.5 mm の試験片と同様なサイズである。材料特性は試験片として利用している SPCC 鋼板を想定し、ヤング率 210 GPa、ポアソン比 0.3 の弾性等方性材料とした。異なった腐食部形状と減肉深さを持つモデルについて解析を行い、曲げを与えたうえで減肉が生じた際の試験片表面のひずみ分布を考察することで、適切な大気腐食モニタリングセンサの治具の形状、試験片の腐食部形状及びひずみ測定素子の配置を決定した。

(3) 大気腐食モニタリングセンサを用いた大気腐食評価実験

FBG を用いた実験では、上記(1)で準備した試験片に上記(2)で見出したいいくつかの配置構成でひずみ測定用 FBG を貼り付けた。さらに、FBG 用の治具を作製して大気腐食モニタリングセンサを組み立てた。FBG をインテロゲータに接続し、測定した反射波長変化をひずみに変換し、データロガーに取り込んだ。

ひずみゲージを用いた実験では、上記(1)で準備した試験片に、上記(2)で見出したいいくつかの配置構成でひずみゲージを貼り付けた。さらに、ひずみゲージ用の治具を作製して大気腐食モニタリングセンサを組み立てた。ひずみゲージの電圧信号をひずみアンプ又は自作のひずみアンプを通して、データロガーに取り込んだ。

まず、大気腐食モニタリングセンサの基本特性を確認するため、試験片の腐食部を電解して減肉させ、ひずみ挙動を測定した。さらに、腐食生成物の影響を考察するために、5% NaCl 水溶液を試験片の腐食に噴霧し試験片の腐食部に腐食生成物の発生を促しながら、ひずみの挙動を測定した。

(4) 腐食生成物の影響の観察

試験片表面に生じる腐食生成物が試験片に与える機械的な影響を明らかにするために、電磁軟鉄 JIS C2504 SUY-1 種を試験片材質として、幅 15mm、長さ 100mm、厚さ 0.05mm の試験片を作製した。この試験片に窒素環境下 450°C で 1 時間の焼きなまし処理を施し、残留応力を除去した。その後、1 mol/l の塩酸により表面処理を行うことで、試験片表面の酸化被膜、残留応力層を完全に除去した。この試験片の上端をぶら下げるような状態で固定し、試験片の片面に防錆剤を塗布し防食面とし、もう一方の面を腐食面とした。この腐食面に 3% NaCl 水溶液を 1 日 1 回程度噴霧することにより腐食させ、試験片の挙動を観察、撮影した。

4. 研究成果

(1) 材料力学と有限要素解析を用いた測定理論の検証

大気腐食モニタリングセンサの状態を材料力学的にモデリングし、解析的表現式を導出した。これを用い計算することで測定理論を検証した。次に、有限要素法で腐食モニタリングセンサの状態をモデリング、有限要素解析を行った。材料力学に基づいた解析的表現式で得られたひずみの値と有限要素解析で得られたひずみの値は、腐食部及び防食部において概ね一致するとともに、試験片の板厚減少によるひずみの値が測定理論に基づいていることを確認した。

(2) 試験片、ひずみ測定素子の配置と腐食モニタリング治具

上記(1)で得られた解析結果を使用して大気腐食モニタリングセンサの治具の幾何学的形状などの構造の最適化を図り、長期に暴露が可能な FBG 用、ひずみゲージ用腐食モニタリングセンサを設計・試作した。これらを用いて試験片に曲げを負荷したところ、(1)で得られた値と同様なひずみ信号が得られることが分かった。さらに、試験片を模擬した 3 次元の有限要素解析モデルを用いて解析を行い、腐食生成物の影響を取り除くことができる可能性のあるひずみ素子構成を見出した。FBG を用いた方法ではアクティブ FBG とダミー-FBG を直交させた配置構成とし、ひずみゲージでは、高精度なひずみ測定が期できる 2 アクティブ、2 ダミー法を採用した。

(3) ひずみゲージを用いた大気腐食モニタリングセンサ用のひずみアンプの検討

ひずみゲージを用いた方法では腐食環境中でひずみを長い時間、高精度で計測する必要があり、環境ノイズを相殺するダミー回路を兼ね備えたひずみ増幅システムを自作し、これを用いて腐食モニタリングシステムを構築した。この腐食モニタリングシステムを用いて片持ちばりを模した実験でひずみ測定精度の検証を行った結果、ひずみ測定が高精度であることを確認した。

(4) 大気腐食モニタリングセンサの大気腐食評価の確認

FBG を用いた方法ではアクティブ FBG とダミー-FBG を直交させた配置構成を利用し、大気腐食モニタリングセンサの試験片の腐食部の板厚を電解により減少させたところ、試験片の腐食部の板厚減少を精度良く測定できることが分かった。

ひずみゲージを用いた方法では、ひずみゲージを 2 アクティブ、2 ダミー法で大気腐食モニタリングセンサの試験片に設置するとともに、自作した環境ノイズを相殺するダミー回路を兼ね備えたひずみ増幅システムを用いたモニタリングシステムを使用した。この測定システムで大気腐食モニタリングセンサの試験片の腐食部の板厚を電解により減少させたところ試験片の腐食部の板厚減少を精度良く測定できることが分かった。

(5) 大気腐食モニタリングセンサの大気腐食評価における腐食生成物の影響

FBG センサとひずみゲージを用いた大気腐食モニタリングセンサの試験片に塩水を定期的に噴霧し、大気腐食モニタリングセンサの試験片の腐食部に腐食生成物を発生させながら測定を行った。ひずみゲージを用いた場合の結果を図 1 に示す。アクティブゲージとダミーゲージで測定された信号は温度変化に対応して変化しており、これらの差を取ることで、温度変化によって生じる誤差を精度良く除去できることがわかった。これは FBG を用いた結果も同様であった。次に、試験片の減肉量を評価するために、アクティブゲージとダミーゲージの信号の差に移動平均処理を施した。この信号と温度の関係を図 2 に示す。図 2 では、40 日目まで大気腐食モニタリングセンサの試験片の板厚増加を示す信号が得られる等精度に課題が残ったが、実験後の大気腐食モニタリングセンサの試験片の板厚減少量はクーポン試験片で得られた値と同様であった。さらに、ベトナムダナン市の橋梁及び横浜国立大学に大気腐食モニタリングセンサ、塩化物イオン収集用の測定装置を設置して得られた結果、腐食生成物による力学的影響を観察する実験で得られた結果を考察し、モニタリング精度の向上手法を検討した。

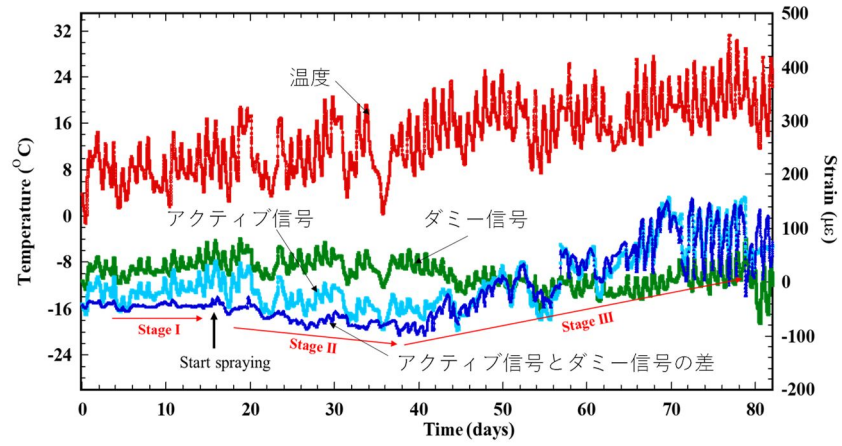


図1 アクティブゲージとダミゲージで得られたひずみ信号と温度の関係

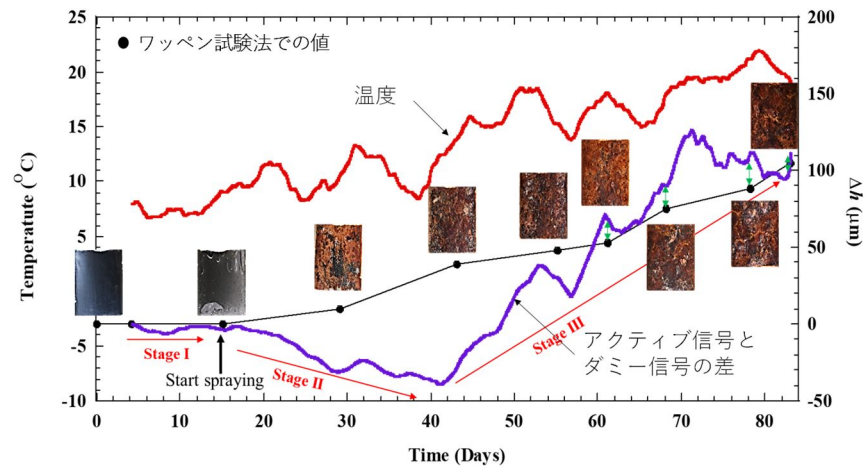


図2 アクティブゲージとダミゲージで得られたひずみ信号の差と温度の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ngoc DucPham, Yukihisa Kuriyama, Naoya Kasai, Shinji Okazaki, Katsuyuki Suzuki, Duy Thao Nguyen	4. 巻 198
2. 論文標題 A new analysis of wind on chloride deposition for long-term aerosol chloride deposition monitoring with weekly sampling frequency	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Atmospheric Environment	6. 最初と最後の頁 46-54
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Nining Purwasih, Naoya Kasai, Shinji Okazaki, Hiroshi Kihira	4. 巻 8
2. 論文標題 Development of Amplifier Circuit by Active-Dummy Method for Atmospheric Corrosion Monitoring in Steel Based on Strain Measurement	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 14 pages
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/met8010005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Naoya Kasai, Masatoshi Hiroki, Toshiro Yamada, Hiroshi Kihira, Kazumi Matsuoka, Yukihisa Kuriyama, Shinji Okazaki	4. 巻 28
2. 論文標題 Atmospheric corrosion sensor based on strain measurement	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 015106 (7ページ)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa4f20	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nining Purwasih, Naoya Kasai, Shinji Okazaki, Hiroshi Kihira, Yukihisa Kuriyama	4. 巻 9
2. 論文標題 Atmospheric Corrosion Sensor Based on Strain Measurement with an Active Dummy Circuit Method in Experiment with Corrosion Products	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 11 pages
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.3390/met9050579	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ngoc Duc Pham, Shinji Okazaki, Yukihiisa Kuriyama, Naoya Kasai, Katsuyuki Suzuki,	4. 巻 213
2. 論文標題 Real-time aerosol chloride deposition measuring device using a conductivity sensor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Atmospheric Environment	6. 最初と最後の頁 757-766
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.06.018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 篠崎 大輝、笠井尚哉、岡崎慎司、紀平寛
2. 発表標題 腐食モニタリングセンサーにおける腐食生成物の影響
3. 学会等名 (一社)日本非破壊検査協会保守検査シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊聖羅、Nining Purwasih、笠井尚哉、岡崎慎司、紀平寛
2. 発表標題 光ファイバを用いた腐食モニタリングシステムに関する研究
3. 学会等名 (一社)日本機械学会産業・化学機械と安全部門 研究発表会2017夏
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nining Purwasih, Pham Ngoc Duc, Naoya Kasai, Shinji Okazaki, Yukihiisa Kuriyama, Hiroshi Kihira, Nguyen Duy Thao, Nguyen Lan
2. 発表標題 Application of Atmospheric Corrosion Sensor Based on Strain Measurement Case study in Da Nang City Vietnam and Yokohama Japan
3. 学会等名 Asia Pacific Symposium on Safety 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nining Purwasih, Naoya Kasai, Shinji Okazaki, Hiroshi Kihira,
2. 発表標題 Atmospheric corrosion sensor based on strain measurement
3. 学会等名 (一社)日本非破壊検査協会平成28年度保守検査部門・新素材に関する非破壊試験部門合同シンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 渡邊聖羅、Nining Purwasih、笠井尚哉、岡崎慎司、紀平寛
2. 発表標題 ひずみ法による腐食モニタリングシステムに関する研究
3. 学会等名 神奈川県非破壊試験技術交流会第21回技術発表会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 信号生成装置及び方法、並びに歪測定ユニット	発明者 笠井尚哉、岡崎慎司、紀平寛、ニニンブルワシ	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-100295	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岡崎 慎司 (Okazaki Shinji) (50293171)	横浜国立大学・大学院工学研究院・教授 (12701)	
研究協力者	紀平 寛 (KIHIRA HIROSHI)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	栗山 幸久 (Kuriyama Yukihisa)		
研究協力者	プルワシ ニニン (Purwasih Nining)		
研究協力者	ファム ンゴ ドク (Pham Ngoc Duc)		
研究協力者	グエン ドイ タオ (Nguyen Duy Thao)		