

論文・解説

32

お客様の走行環境に応じた車両腐食環境予測手法の開発 Development of Quantification Technique and Analysis Method According to Corrosive Environment of Customers' Vehicles

喜久山 良弼^{*1} 福田 克弘^{*2} 中本 尊元^{*3}
Ryosuke Kikuyama Katsuhiro Fukuda Takayoshi Nakamoto
山根 貴和^{*4}
Takakazu Yamane

要約

自動車の防錆性能を確保するためには、腐食環境を定量化し自動車の防錆処理の性能が環境に比べて高くなるようにする必要があります。自動車が曝される腐食環境を定量的に測定するために、無線化により簡易に装着可能な腐食環境計測システムを開発した。また測定データや気象データなどの大規模データを分析する技術確立し、腐食環境を予測することが可能となった。

Abstract

In order to ensure the anticorrosion performance of vehicles, it is necessary to quantify a corrosive environment and apply an anticorrosion treatment that surpasses what is required by the environment. To this end, we have developed a wireless device, which is easily detachable, for measuring the corrosive environment. We have also developed a methodology for analyzing big data such as measurement data, weather data, application amount of anti-freezing salt, etc. These enable us to infer the corrosive environment.

Key words : Materials, Iron and steel materials, Rust prevention, Anticorrosion, Measurement, Big data

1. はじめに

自動車は世界中で使用され、さまざまな環境に曝される。腐食に関しては、沿岸部の海塩粒子や冬期の凍結防止剤が自動車にとっては過酷な環境となる。どのような腐食環境でも世界中のお客様に満足していただける防錆性能を確保するためには、自動車の防錆処理の性能が腐食環境に比べて高くなるように設定する必要があります。自動車は、使用される地域や部位ごとに腐食環境は異なる。一方、防錆処理には、亜鉛めっき、リン酸亜鉛処理、電着塗装、防錆ワックス、等さまざまな方法があるが、亜鉛に代表されるように資源枯渇の懸念があり、過剰な使用は経済的リスクのみならず、人間社会や地球環境の持続性という問題もはらんでいる。したがって、防錆処理を適正に設定するには、自動車各部位の腐食環境を定量的に計測し、それを分析することで腐食環境の特定を行い、その腐食環境に見合った防錆処理を自動車各部位に施工することが必要である。そのために、定量計測技術及び測定データの分析技術の開発を行った。

まず、車載型の腐食環境計測装置を開発し、走行中の自動車各部位の腐食環境を定量的に測定できる腐食環境計測システムを構築した。このシステムを用いて、腐食に厳しい地域を実走行し環境データの収集を行えるようになった。実走行で得られた環境データと鋼板腐食量を紐づけるため、環境データから鋼板腐食量を予測する分析技術を開発した。更に、実走行では限られた地点のデータしか得られないため、走行している地域の気象データなどを因子として、環境データと気象データなどを関連付けて大規模データ分析する技術を開発した。本稿では、腐食環境計測システム及び計測データなどから腐食環境を予測し特定する分析技術について紹介する。

2. 腐食環境計測システムの開発

2.1 車両腐食環境計測の課題

自動車は移動体であり部位によって腐食環境が異なる。腐食環境計測のシステム要件として、定量的に計測ができること、複数の部位を同時に長期間測定ができることが求められる。この課題を、広く用いられている腐食セ

*1~4 車両実研部
Vehicle Testing & Research Dept.

ンサーと無線接続技術によって解決した。

2.2 腐食環境計測システムの詳細

開発した腐食環境計測システムの全体構成を Fig. 1 に、計測画面を Fig. 2 に示す。

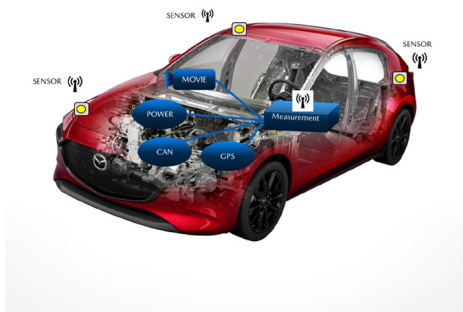


Fig. 1 Corrosive Environment Measuring System

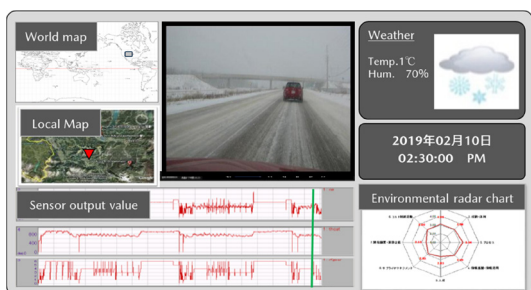


Fig. 2 Measurement Screen

(1) 腐食センサー

腐食センサーは、橋梁や建造物などの固定体の腐食環境を測定するツールとして広く活用されている ACM センサー (Atmospheric Corrosion Monitor Sensor) を用いた⁽¹⁾。ACM センサーは Fe 板の上に、絶縁ペーストと Ag ペーストが格子状に塗布され、Ag-Fe 間が結線されている (Fig. 3)。降雨や結露などの環境要因で格子部分に水分が付着すると、Ag-Fe が導通し電位差によって異種金属接触腐食 (ガルバニック腐食) が起こり、ガルバニック電流の挙動から腐食環境を定量的にとらえることができる。

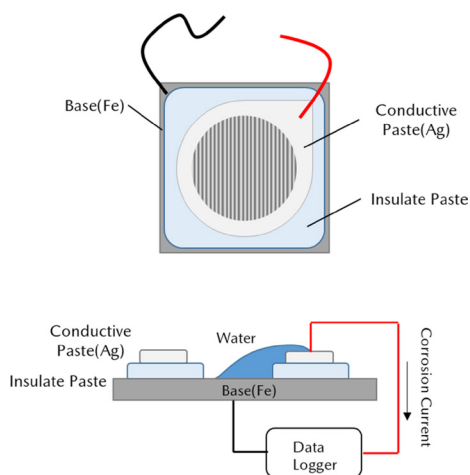


Fig. 3 Mechanism of ACM Sensor

(2) データロガー本体とセンサーの無線接続技術

ACM センサーを無線子機に接続し、無線親機に接続したデータロガーまでを無線で通信する技術を開発した。腐食は、走行中だけでなく夜間の駐車時間にも進行するため、エンジン停止後も連続して測定することが必要である。それに対応できるように子機にバッテリーを搭載した。

1) 無線化技術

無線化のための要件として、無線子機を自動車のどの部位に設置しても車内の親機まで無線でデータ送信が可能であることが挙げられる。

その対応技術として、送信周波数帯が 2.4GHz 周辺という障害物に強い、一般的には Wi-Fi と呼ばれる周波数帯で送信するようにした。Wi-Fi は消費電力が大きいため、次の消費電力低下対策を行った。

2) 消費電力低下技術

Wi-Fi を使用すること、及び駐車中を含め最長約 6 か月の長期に渡って無給電で子機を稼働させる必要があった。そのために、以下の消費電力低下技術を開発した。

- ①計測データはメモリーに保管し、一定時刻ごとにデータの一括送信を行うようにした。
- ②送信時には、親機とデータ照合を行い、未送信のみ送信するようにした。
- ③送信データがない場合は送信しないようにした。

3) 測定可能な情報

収集した測定データの詳細分析のため、ACM センサー出力以外に、温度/湿度、走行場所を把握するための GPS、走行条件が分かる CAN 信号 (Controller Area Network: 車載通信規格) 及び走行中の動画を同時記録できるようにした (Table 1)。このうち、温度/湿度センサーは、腐食分析に必須であるため無線子機各々に搭載した。

Table 1 Measurement Items and Purpose

Measurement Items	Measurement Purpose
ACM sensor	Corrosion current
Temperature/Humidity sensor	Dew, Deliquescent of salt
GPS signal	Vehicle position, Time
Dashoboard camera	Weather & Road condition
CAN signal (Controller Area Network)	Vehicle condition

4) データのリアルタイム収集

親機にはインターネットへ接続する機能を装備しており、データ分析を行う場所から遠隔で走行車両の各センサーのデータをリアルタイムで確認及び収集を可能とした。

5) 無線子機の耐久性

無線子機がタイヤや前方車両からの被水や走行中の振動においても稼働する堅牢性をもつために、以下の対応を行った。

- ①無線送信用のアンテナ及び電源を内蔵した。
- ②無線子機を堅牢な樹脂で密閉した。
- ③完全密閉すると送信力低下やバッテリー性能低下があるため、一部は通気性かつ水密性をもつ構造にした。

3. 腐食環境の定量化及び予測技術の開発

腐食環境計測システムの開発により、実走行することで各地の腐食環境を計測することができるようになった。一方で、世界中を計測するには莫大な時間や費用がかかるという問題がある。

この問題を克服するため、市場の気象データなどの環境データから腐食環境を予測できるモデルを開発し、世界の腐食環境を予測し特定することとした。

車載した各センサーの出力及び同時に装着した鋼板試験片の腐食量を実測することにより、腐食量予測モデル開発を次のアプローチで取り組んだ。

- ① ACM センサーの出力と鋼板腐食量の関係を明らかにし、関係式を構築する。
- ② ACM センサーの出力と腐食環境データの関係を明らかにし、関係式を構築する。

この2つの関係式を繋げることで、腐食環境データから鋼板腐食量を予測することができるようにする。

3.1 ACM センサー出力と鋼板腐食量の関係

ACM センサーは Ag-Fe の電位差によるガルバニック腐食であるが、鋼板の腐食は鋼板の表面に微小な電位差が生じ、鉄単体で錆が発生する。このように ACM センサーと鋼板の腐食メカニズムは異なるが、大気腐食環境下では、ACM センサーからの電流値の時間積分である電気量と鉄の腐食速度の間に相関があることが知られている⁽¹⁾。

しかし、降雨や路面の水のタイヤの巻き上げによる濡れ量が多い時は鉄の腐食に対して過大な電流が発生する⁽²⁾。したがって、濡れ量が多い自動車の腐食環境では、ACM センサーからの電気量と鋼板腐食量の相関性が低くなる。この問題を解決する手段の1つとして、過大出力を補正するためのしきい値を設け、しきい値以上の出力を一定の値に補正する方法が知られている⁽³⁾。

しきい値は補正後の電気量が鋼板腐食量と相関性をもつように決められるものであるが、モデル化のためにはしきい値がどのような腐食因子に影響を受けるかを明確にする必要がある。

腐食因子としては主に水、塩、酸素があるが、車両にとって過酷な腐食環境は塩の由来によって2つに別けられる。海塩粒子が大気中に多く含まれる沿岸部、冬季に

凍結防止剤を多量に散布する豪雪地域である。日本国内において、海塩環境は沖縄、凍結防止剤環境は北海道が代表的な地域であるため、これら2地点においてしきい値を分析することで、国内の腐食環境と鋼板腐食量を予測できるようにする。

しきい値の分析にあたり、海塩環境としては沖縄県浦添市において1年間実走行し計測したデータを、また凍結防止剤の環境としては北海道札幌市において1年間実走行し計測したデータを使用した。

ACM センサーと鋼板試験片を、ホイールハウス内、ドア、ルーフ、トランクリッドなど Fig. 4 に示す計11か所に取り付け、データを測定した。



Fig. 4 Environment Measuring Point

(1) しきい値設定の課題

電流のしきい値の設定方法として、しきい値の水準としきい値以上の出力の補正方法をあらかじめ用意し、全てのパターンで電気量を計算して相関性が最も高いものを採用する方法が考えられるが、測定したデータは電流値約20000点×11部位×2地点と大規模であり計算コストが高い。そこで、電気量をしきい値ごとに区分し、区分した電気量と補正係数の線形和を腐食量に線形回帰することによって、相関性の高いしきい値及び補正手法を同時算出する手法を構築した。

(2) しきい値設定の手順

詳細を以下の3つのステップで示す。

- ①電気量は電流の時間積分であり、すなわち Fig. 5(a) に示す面積(斜線部分)になる。
- ②しきい値を電流値によって区分する。具体的には、Fig. 5(b)のように斜線部分の面積を電流方向に区分けた長方形で近似する。
- ③区分けた長方形の面積の和と鋼板腐食量に相関関係があると考え、Fig. 5(c)のように区分けた長方形の面積の線形結合が鋼板腐食量となるような回帰式を作り、LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator)⁽⁴⁾で回帰モデルを推定する。

Fig. 5(c)の例では LASSO による推定で係数 β_5, β_6 は 0 となっている。これは $4\mu\text{A}$ 以上の出力が降雨や路面の水のタイヤの巻き上げによって過敏に出力しており、腐食量に寄与しないと推定している。よって、しきい値は $4\mu\text{A}$ で設定し、 $4\mu\text{A}$ 以上の出力は全て $4\mu\text{A}$ に均す補正方法が腐食量と相関性が最も高いという結果が得られている (Fig. 5(d))。

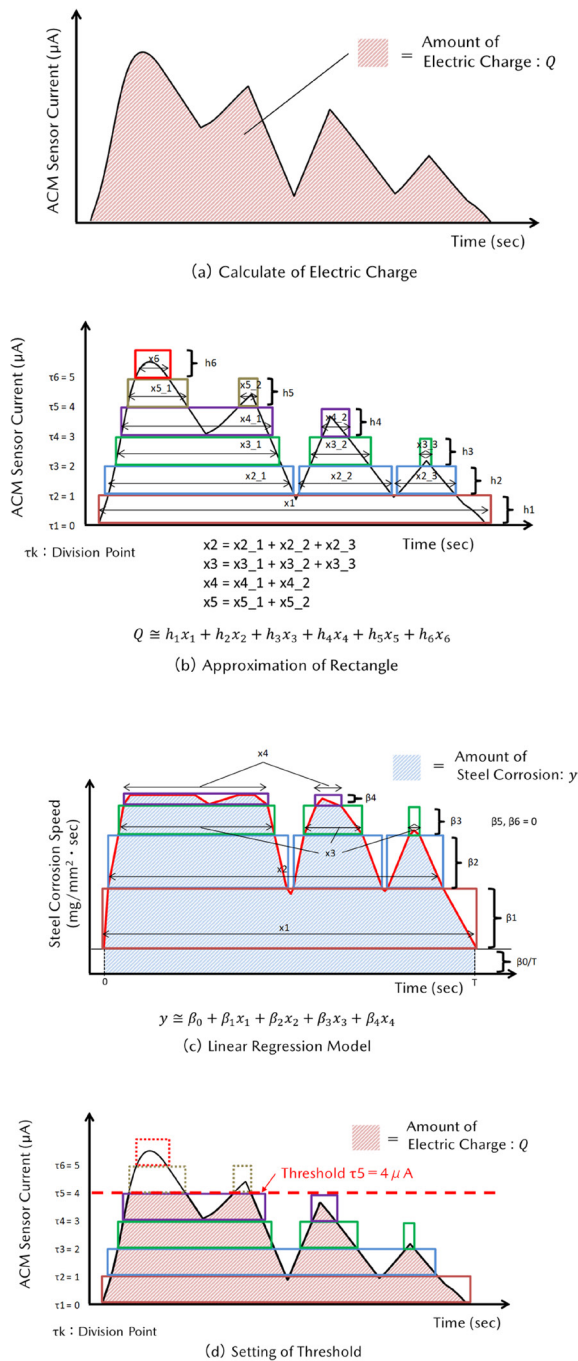


Fig. 5 Revising ACM Current with Regression Model

(3) しきい値による推定結果と検証

本分析手法により得られたしきい値を Table 2 に示す。海塩環境の沖縄のデータでは、しきい値として 0.1mA 以上を 0mA とする結果となった。また凍結防止剤散布環境の北海道では、散布量の多い冬期は $20\mu\text{A}$ 以上を $20\mu\text{A}$ に、それ以外の期間は 80nA 以上を 80nA とする結果となった。

また、しきい値で補正した電流量と鋼板腐食量の相関係数は、海塩環境で約 0.8、凍結防止剤環境では 0.9 以上であった。

以上より、ACM センサーのしきい値は腐食環境で大きく変わり、しきい値を推定する方法として本手法は有効であることが分かった。

Table 2 Threshold and Correlation

Region/Period	Threshold	Revised current over threshold	Correlation of revised electric charge and steel corrosion
Okinawa (All year)	0.1mA	0mA	0.78
Hokkaido (Winter)	$20\mu\text{A}$	$20\mu\text{A}$	0.96
Hokkaido (Other)	80nA	80nA	0.90

3.2 ACM センサー出力と腐食環境データの関係

2つのステップで関係式を構築する。まず、腐食環境データは因子数が多いため ACM 出力である電流値に寄与する腐食環境データを抽出する。次に、抽出した腐食環境データから回帰モデルを作り、関係式を構築する。

(1) ACM 出力に寄与する腐食環境因子の抽出

ACM センサーの出力挙動から自動車の腐食は走行時だけでなく駐車時の凍結防止剤の潮解などによって腐食が進行している。したがって腐食には気象条件の影響が高いため気象データを、更に凍結防止剤散布地域においては塩の散布量を車両計測データと関連付けて分析した。分析に用いるデータを Table 3 に示す。

分析データは、100 因子×100 万サンプル/年と大規模データとなった。これらの中から、腐食との寄与度の高い気象条件や凍結防止剤散布条件、その時の ACM センサー値などの複合関係を分析する必要がある。従来の重回帰分析手法などによる感度分析手法では、1つの因子に対する相関関係や感度を評価するのみなので、説明変数間の複合的な相関関係を評価するために、因子分析機能付き無教師型クラスタリング分析手法を適用した。この手法は、Fig. 6 に示すように、大規模データの 1 行を 1 本のベクトルと見なし、ベクトル間のユークリッド

Table 3 Analyzing Data

Data type	Parameters
ACM sensor data	Current [A]
	Humidity [%]
	Teperature [degC]
GPS data	Location [DMS]
	Time [YYY/MM/DD/hh/mm/ss]
Weather data	Air temprature [degC]
	Downfall [cm]
	Accumulated snow [cm]
	Humidity [%]
	Solar radiation [%]
	Air pressure [hPa]
	Sea pressure [hPa]
	Vapor pressure [Pa]
	Dew point [degC]
	Weather type [-]
	Cloud cover [%]
	Distance viewing [km]
	Precipitation [mm]
	Day length [hr]
	Wind speed [m/s]
Wind direction [-]	
Road data	Anti-freezing salt [t/km]

距離を全ベクトルの組合せに対して行う。次に、この距離の近い／遠いに従って二次元平面に射影する (Fig. 7)。射影した点が塊になる状態 (クラス) において、100 以上の全ての因子に対して、ある一定の値になる割合が高い因子から順にリスト化する。この方法によって、大規模データに多数ある説明変数間の複合的な相関関係が評価できるようになる。

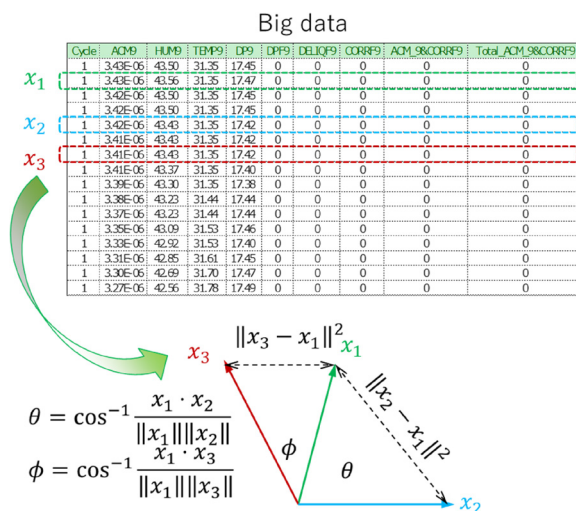


Fig. 6 Approach of Clustering with Factor Analysis

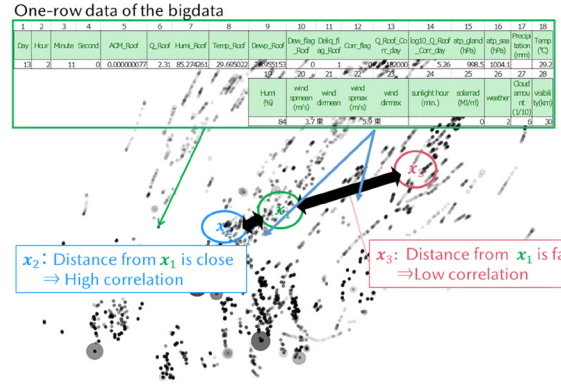


Fig. 7 Example of Clustering with Factor Analysis

分析結果より、ACM センサーの出力と相関関係が高い腐食環境因子は、凍結防止剤の散布量、降雨の時間、塩が潮解する時間 (塩が NaCl の場合、湿度 75% 以上の時間)、平均風速の 4 つであった。

(2) ACM センサー出力の回帰モデルの推定

選定した環境データを説明変数、ACM センサーの電気を目的変数とにおいて重回帰モデルを推定した。

$$\begin{aligned} \log_{10} (\text{ACM センサーの電気量 (C/day)}) = & +0.5 \times (1 \text{ 日の凍結防止剤の散布量 (t/km)}) \\ & \times (\text{走行距離 (km)}) \\ & +0.1 \times (1 \text{ 日の降雨時間 (Hr)}) \\ & +0.02 (1 \text{ 日の潮解時間 (Hr)}) \\ & +0.002 \times (\text{日平均風速 (m/s)}) \\ & -1.6 \end{aligned}$$

(3) 気象データ及び凍結防止剤散布量による鋼板腐食量の推定

得られた 2 つの変換式を使い、気象データ及び凍結防止剤散布量から腐食量を予測し、実腐食量と比較した。最も相関の高かった部位はルーフであり、変換式から予測した鋼板腐食量と実際の腐食量はほぼ同じレベルとなった (Fig. 8)。以上より、この手法で鋼板腐食量を予測できる見通しが立った。また車両各部位においては、ルーフにおいて補正した電気を基準に置き、実車走行時での各部位で補正した電気量との比率で腐食環境を予測することが可能である⁽⁵⁾。

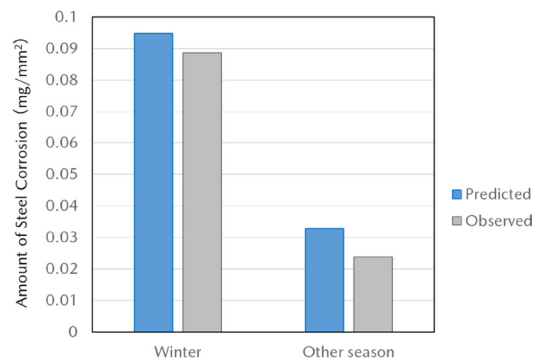


Fig. 8 Verification of Prediction Accuracy (Hokkaido)

4. まとめ

(1) 腐食環境計測システムの開発

腐食センサーとして ACM センサーを用い、データロガー本体とセンサー間の無線化により簡易に装着可能な腐食環境計測システムを開発した。

(2) 腐食環境の定量化及び予測技術の開発

海塩環境及び凍結防止剤散布環境において、

①ACM センサーの出力を鋼板腐食量に合わせて補正するしきい値を推定できる方法を構築した。

②市場腐食環境の大規模データから ACM センサーの出力に寄与する因子を選定し回帰モデルを構築できた。

以上より、市場を実走行して計測し、そのデータ及び気象データなどから腐食環境を予測し特定できるようになった。

今後は、国内だけでなく海外の腐食環境にも適用し、グローバル腐食マップを構築していく。また、コネクティッドサービスで得られた環境データの活用、市場の塩散布量の継続的な調査を行い回帰モデルの精度向上を図っていく。

参考文献

- (1) JFE スチール (株)：移動体の腐食環境計測方法および設計方法ならびに移動体材料の腐食試験方法および選定方法，特許第 4258352 号 (2009)
- (2) 元田慎一ほか：ACM 型腐食センサーで測定した海洋性大気腐食環境条件の年変化，材料と環境，第 44 巻，4 号，pp.218-225 (1995)
- (3) 福田克弘ほか：車両の腐食環境計測システムの開発，自動車技術会 2015 年春季大会学術講演会講演予稿集，1197 (2015)
- (4) Tibshirani, Robert: Regression shrinkage and selection via the lasso, Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 58.1, pp.267-288 (1996)
- (5) 山根貴和ほか：車両腐食環境の定量化技術と分析手法の開発，自動車技術，Vol.74, No.7, pp.104-109 (2020)

■著者■



喜久山 良弼



福田 克弘



中本 尊元



山根 貴和