

論文・解説

13

車両腐食環境の定量化技術と解析手法の開発 Technology Development of the Vehicle Corrosion Environment Quantification and Analysis Method

福田 克弘*¹ 落岩 克哉*² 園田 賢司*³
Katsuhiko Fukuda Katsuya Ochiwa Kenji Sonoda
山根 貴和*⁴
Takakazu Yamane

要 約

近年の自動車開発においては、車体の軽量化と高剛性の両立のための新金属材料や、電子制御デバイスの増加により腐食評価が必要な部品点数は大幅に増加している。自動車は移動体であるため世界中のさまざまな環境で使用される。このような状況下で個々の部品に対し、確実にねらいの防錆性能を発揮できるようにするには、従来の特定市場を想定した実車促進腐食試験だけでなく、車両がさらされる腐食環境をコンピュータ上で再現できる「市場環境モデル」を柱とするモデルベース開発の適用が有効である。そこで腐食環境を定量化するため、腐食センサーの出力と環境因子を一括で記録可能な計測システムを構築した。市場の融雪塩散布地域や海塩地域で使用される車両に、このシステムを搭載して計測し、市場の腐食環境を正確にとらえるデータ解析方法を開発した。更に、開発した計測システムとデータ解析方法を車種開発に反映していく活動を行ったので、これらの取り組みについて紹介する。

Summary

In recent automobile development, the number of parts which require corrosion evaluation has been significantly increased due to an increase of new metal material or electronic control device to achieve both weight reduction and high rigidity of a vehicle body at the same time. Automobiles, moving objects, are used in different environments all over the world. Under the circumstances, not only accelerated corrosion test on-vehicle in the conventional particular market, but also adoption of model-based development focused on “market environment model” to reproduce corrosion environment to which vehicles are exposed on a computer are effective to certainly exhibit aimed anti-corrosion performance. We have built a measuring system which enables batch recording of corrosion sensor output and environmental factors to quantify corrosion environment. We have also developed a data analysis method to obtain corrosion environment in the market precisely by mounting that system to the vehicle used in area in which snow-melting salt is scattered or areas which are exposed to sea salt. Additionally, we have engaged in activities to reflect the measuring system and the data analysis method we developed to model development. In this paper, those activities are introduced.

1. はじめに

自動車は移動体であり、さまざまな天候や気温変化にさらされるため、車両周辺の腐食環境は時々刻々に変動する。しかも部品の構成や形状の複雑さから腐食条件が多岐にわたり、かつ複雑に絡み合うため、部位によって腐食環境は大きく異なる。海水がかかる島嶼地域や冬季の融雪塩の散布が多い豪雪地域など、世界中のどのシーンで使用されても全ての部品がねらいの防錆性能を発揮できるようにする

には、従来の特定市場を想定した実車促進腐食試験だけでなく、地域の特徴を網羅した「市場環境モデル」と、それを柱とする腐食モデルベースを適用した車種開発が有効と考えた。「市場環境モデル」を構築するためには、市場において移動中の自動車の必要な各部位の腐食環境を同時に測定できる計測システムの開発が必須である。

この課題の解決策として、橋梁や建造物の固定体の腐食環境を測定するツールとして幅広い分野で活用されているACMセンサー（Atmospheric Corrosion Monitor Sensor）

*1～4 車両開発本部
Vehicle Development Div.

と呼ばれる、鉄の化学反応によって生じる電流をとらえることができる腐食センサーを用いた計測システムを構築した。本報では、自動車用の計測システム構成と得られたデータの解析手法および「市場環境モデル」への適用について報告する。

2. 車載型腐食環境計測システムの構築

2.1 腐食環境計測に対する取り組みの考え方

これまでの防錆開発は、特定の市場を想定した車両腐食を短時間で再現させる促進腐食試験を実車でを行い、実際に発生した腐食に対して定性的な評価結果により良否判断を行っていた。また実車評価の場合、ボディー形状やパートレインのラインナップを全て網羅することが難しく代表的な機種で評価を代用することがある。今後は軽量化のための新規材料の採用が拡大する見込みであり、腐食挙動が異なる複数の材料や仕様に対し、正確な防錆性能評価を行うためのプロセス開発が不可欠である。図面段階で市場の腐食環境に耐える防錆仕様を決定するには、世界の各地域の腐食環境と車両の各部位が受ける腐食環境条件を数値でとらえることができる自動車用の腐食環境システムを構築し仕様決定のプロセスを開発の初期段階に前倒しするモデルベース開発の適用が有効である (Fig. 1)。

腐食環境計測システムに使用するセンサーは、自動車の複数の箇所でも長期の計測が可能であることが条件となる。そのため下記の要件を満たしているACMセンサーを選定した。

- ・薄型／小型で車両への設置性が優れる
- ・車体への固定が容易である
- ・入手性が優れる
- ・ランニングコストに優れる

Battery

ACMセンサーを用いることで、腐食環境は電荷量での定量化が可能となる。更に、このデータと各地域における気象データ (温度/湿度など) との関係を明確にすることで、気象データから各地域の腐食レベル予測が可能になると考えた。これに走行エリアが分かるGPS、走行条件が分かるCAN信号 (Controller Area Network : 車載通信規格) を同時記録するためにTable 1に示す項目の計測を

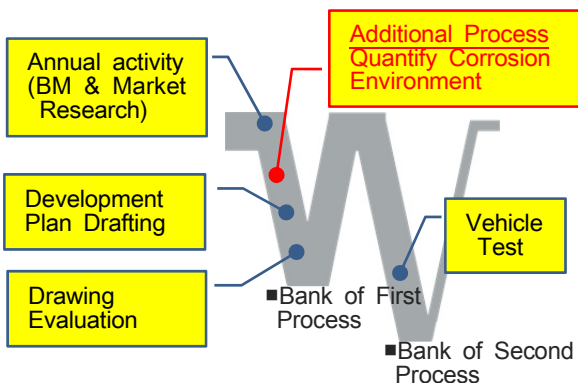


Fig. 1 V Process of the Rust Prevention Development

Table 1 Components of On-board System

Monitoring Items	Purpose
ACM Sensor	Corrosion Speed (Multi Channel)
GPS Signal	Environmental Condition
Onboard Camera	Weather / Road Condition
Temp/Hum Sensor	Condensation / Deliquescence
CAN Signal	Driving Cndition

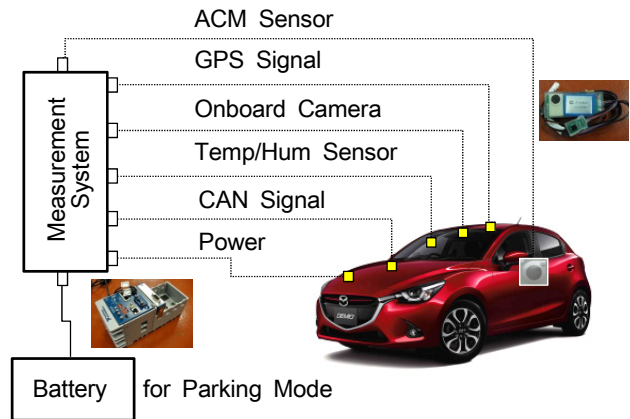


Fig. 2 Corrosion Environmental Measurement System

前提にシステムを構築した。また腐食は、走行中だけでなく、駐車中も進行するため、エンジン停止後も連続して計測することが必要である。それに対応できるようにバッテリーを搭載したシステムとした。Fig. 2に全体の腐食環境計測システムの概要を示す。

2.2 車載型腐食環境計測システムの構築

市場の腐食環境は天候による気温、湿度の変動や降雪時の融雪塩散布などの影響を強く受けることが分かっている。世界中で長期間のデータ収集を行うため、本システムは、下記の要件を満たす計測システムの構築を行った。また計測データは、Fig. 3に示すように複数の情報が一画面で比較表示可能とした。



Fig. 3 Data Analysis Windows

〈計測システムの開発要件〉

- ・腐食メカニズム解明のため、市場で発生する腐食に関

係する信号（腐食電流，温湿度，CAN 信号，走行動画等）の同期記録が可能であること

- ・自動車の部位ごとに異なる車両の腐食環境をとらえるため複数の ACM センサーが接続できること
- ・計測車両への計測器搭載が車両運行の妨げにならないようなシステムの小型化と操作が簡便であること
- ・ACM センサーにつながる配線が車外に露出させないためセンサーからロガー間は無線であること
- ・腐食は，走行中だけでなく，駐車時の腐食進行もとらえられるよう外部電源での連続計測が可能であること
- ・腐食環境条件を網羅するため，四季を通じて長期間モニタできること

3. 腐食環境定量化手法の開発

3.1 腐食環境定量化手法の技術課題

橋梁等の大気曝露による腐食環境の定量化に用いられている ACM センサーは，両金属間に水膜が形成される時に発生するガルバニック電流を直接データとして取り込む構造である (Fig. 4)。

そのため，降雨などによって電極間に水膜が形成された場合は，実際の腐食環境よりも過大に出力する特性があることが知られている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし，過大に出力する特性への補正方法などは確立されていない。

自動車への活用は，ACM センサーが出力した電流値を電荷量（クーロン (C)）に換算し腐食環境の指標にする手順としている (Fig. 5)。自動車は降雨などで濡れた路面を走行するため，大気曝露に比べ濡れ時間の割合，および濡れ量が圧倒的に大きいといえる。

そこで，自動車の使用環境を想定した ACM センサー出力の補正方法について検討を行った。

3.2 腐食環境データの解析手法

(1) 実験方法

鋼板腐食量と ACM センサー出力から得られる積算クーロン量（経過時間で変化する電荷量を積算したもの）の相関性を得るための補正方法として，ACM センサー出力の過大出力のしきい値 (A) を明らかにするため，ACM センサーと裸鋼板を同じ場所にセットし，積算クーロン量と鋼板腐食速度の比較を行った。腐食環境は，ACM センサーと裸鋼板の濡れ条件を一定にするため，塩水の散布と，高温恒湿の曝露を繰り返す実車の腐食試験にて実験を行った (Fig. 6)。

(2) 実験結果と考察

腐食試験車両を用いた一定期間の評価後，Fig. 7 に示す場所 6 点の ACM センサー出力から得られる積算クーロン量と鋼板の板厚減少量を比較したところ，濡れ量大と濡れ量小で二つのグループに分かれた (Fig. 8)。センサーの貼り付け部位を設定する際に，濡れ量の大小で比較ができ

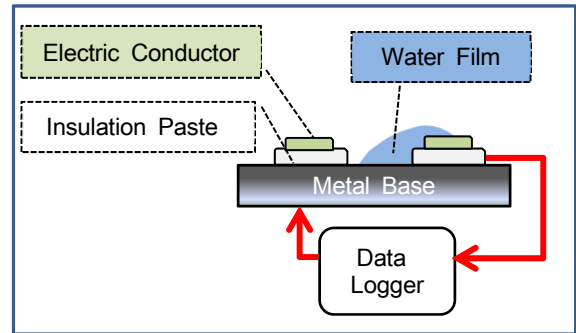


Fig. 4 Operating Principle of the ACM Sensor

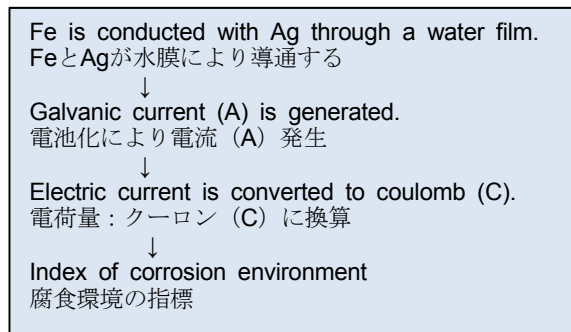


Fig. 5 Flow of the Environmental Index

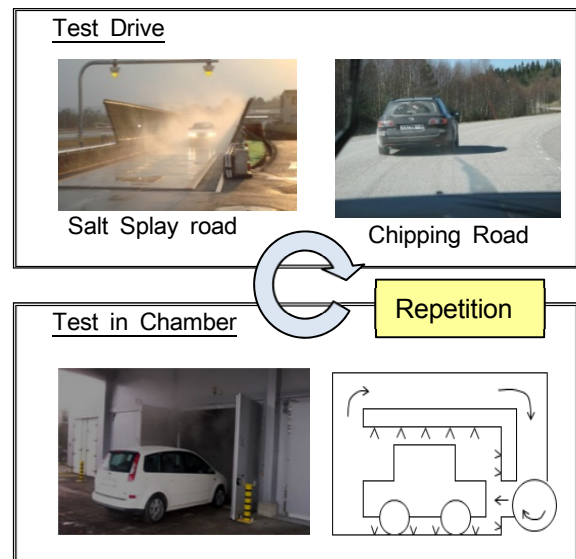


Fig. 6 Total Vehicle Accelerated Corrosion Cycle

る場所を選んでおり，この場所と二つのグループが一致したことから，濡れ量の大小が積算クーロン量に影響を与えたことは明らかである。そこで，実際の鋼板腐食速度に対し積算クーロン量が過大になったと考えられる濡れ量大のグループ B が，濡れ量小のグループ A と同レベルの積算クーロン量になる ACM センサー出力値の補正方法を検討した。ACM センサーの出力 (A) に対する水膜厚さの影響を確認するため，実験的に，ACM センサーの出力 (A) とセンサー表面に形成する水膜厚さの関係を検証した。なお水膜厚さは ACM センサー表面積に対しての水重量で換算している。

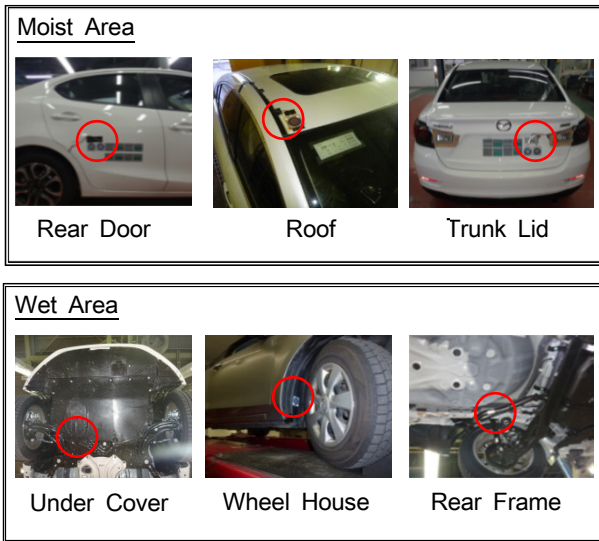


Fig. 7 Location of ACM Sensors and Exposed

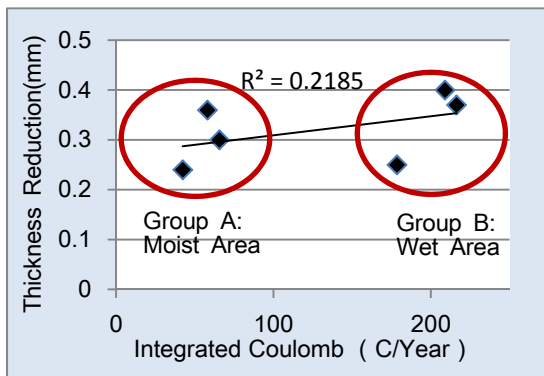


Fig. 8 Relation of Coulomb and the Reduction of Steel Thickness

その結果、水膜の厚さと、ACM センサーの出力は比例の関係にあることが確認できた。一般的に、水膜が厚くなる雨天時（濡れ環境）よりも霧などの細かい水の粒子で薄い水膜形成する条件（湿り環境）で腐食は進行するといわれている⁽³⁾。次に Tomashov モデルで湿り腐食と濡れ腐食の境界とされる水膜約 50 μm ⁽⁴⁾ との関係を見ることにした。n=3 のサンプルデータ平均値から得られた近似線と ACM センサー出力をみたところ濡れ量過大の境界は 0.1mA にあることが分かり、これをしきい値とした (Fig. 9)。そこで ACM センサーの出力に対し「しきい値=0.1mA」とすることの妥当性について検証するため、しきい値を 0.05mA、0.15mA および 0.20mA とした場合の計算も合わせて行った。その時に、しきい値を超えた部分の出力値のみを取り除いたケース A としきい値を超えた時間帯の出力値を全て取り除いたケース B について分析した (Fig. 10)。その結果、しきい値は 0.1mA でケース B の場合が最も良い相関が得られたことから、ACM センサー出力値における濡れと湿りの境界値 0.1mA は妥当と判断した (Table 2)。このしきい値：0.1mA でケース B とした場

合における積算クーロン量と鋼鉄の板厚減少量の関係を Fig. 11 に示す。Fig. 8 で見られたグループ化の傾向が改善しているのが分かる。

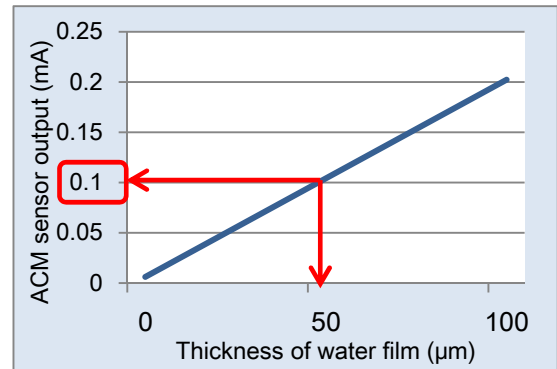


Fig. 9 Relation of the ACM Output and Thickness of Water

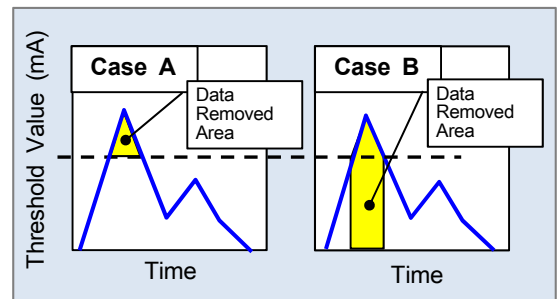


Fig. 10 Verification Image of the Threshold

Table 2 Relation of Verification Condition and Substitution Value

Threshold Value	Case	Substitution Value (R ²)
0.05mA	A	0.5451
	B	0.5948
0.1mA	A	0.5045
	B	0.701
0.15mA	A	0.4895
	B	0.4254
0.2mA	A	0.4779
	B	0.4328

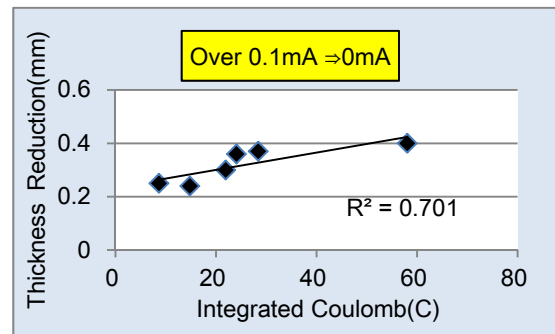


Fig. 11 Relation of Coulomb and the Reduction of Steel Thickness (with Data Revision)

この結果の要因について考察する。水膜厚さと腐食速度の関係が水膜中の溶存酸素量によって左右されるのであれば、厚い水膜でも腐食は進行するため 0.1mA を超えた場合の ACM センサー出力値はケース A のように一定値で残すのが妥当と考えられるが、実際には異なった結果が得られた。これは実験室の静的環境で作り出される水膜と、自動車走行環境下の動的な水膜に異なる条件があること、つまり自動車走行環境下の水膜中では腐食速度が停滞し腐食が進行しにくいことが考えられる。この原因として、走行中の激しいスプラッシュによって水膜の厚さが厚くなることと、表面の腐食因子が洗い流されるため、酸化還元が発生するポイントが常に変動し定着しないためと判断した⁽⁴⁾。

(3) 検証結果

これまで市場を模擬した促進腐食試験による実験を行ってきた。実際に自動車が使われる市場条件においても 0.1 mA がしきい値で問題がないことを明らかにするため、国内市場で最も腐食環境が厳しい沖縄を実走した時のデータを分析する。

2014 年の沖縄における温湿度のデータを、2014 年の札幌と山形のデータと比較して示す (Fig. 12)。沖縄の気温は年間を通して 15°C 以下にならないために化学反応が起こりやすく、相対湿度が低い真冬を除き、ほぼ一年中、海塩粒子が潮解する湿度条件にあり、過酷な腐食環境であるといえる⁽⁵⁾。

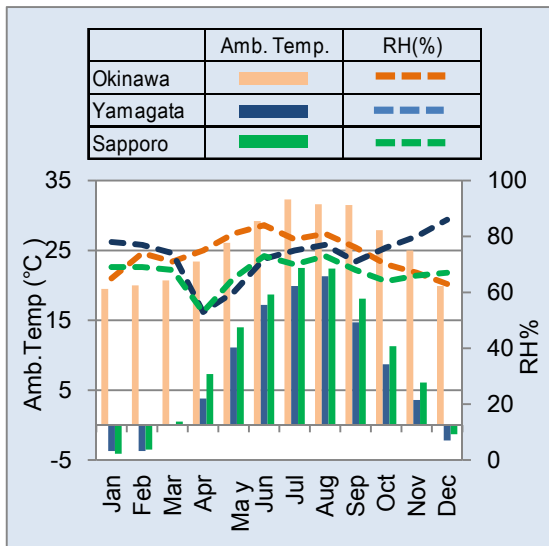


Fig. 12 Temperature-Humidity Data of Okinawa

1) 市場腐食環境データとしきい値 0.1mA の関係

沖縄で収集した腐食環境データと腐食試験車両と同じ部位に貼り付けた裸鋼板の板厚減少量のデータを使い、しきい値 0.1mA の妥当性を検証した。なお裸鋼板の板厚減少量は一様条件の腐食試験から算出したクーロン (C) に置き換え、目標値とした。0.1mA をしきい値とする補正前と補正後と目標クーロン (C) の関係を Fig. 13 に示す。補

正を行うことで目標クーロン (C) に近づいており、しきい値 0.1mA は妥当である。

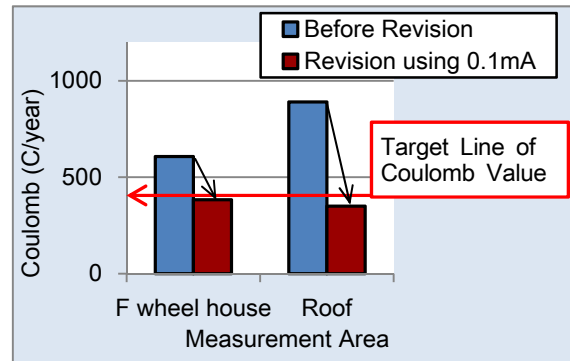


Fig. 13 Validity of the Revision by Threshold 0.1mA

2) ACM センサーの出力値と走行の関係

次に ACM センサーの出力値がどのような環境条件で 0.1mA を超えているのかを検証するため CAN 信号から得た車速との関係を調べた。Fig. 14 に沖縄県名護市のある 1 日 (24h) の ACM センサー出力を示す。走行中に出力する条件は、ほとんどが雨天や水たまりへの侵入時である。一方で、停車中の出力は、雨天を除き 0.1mA 以下であることが分かった。

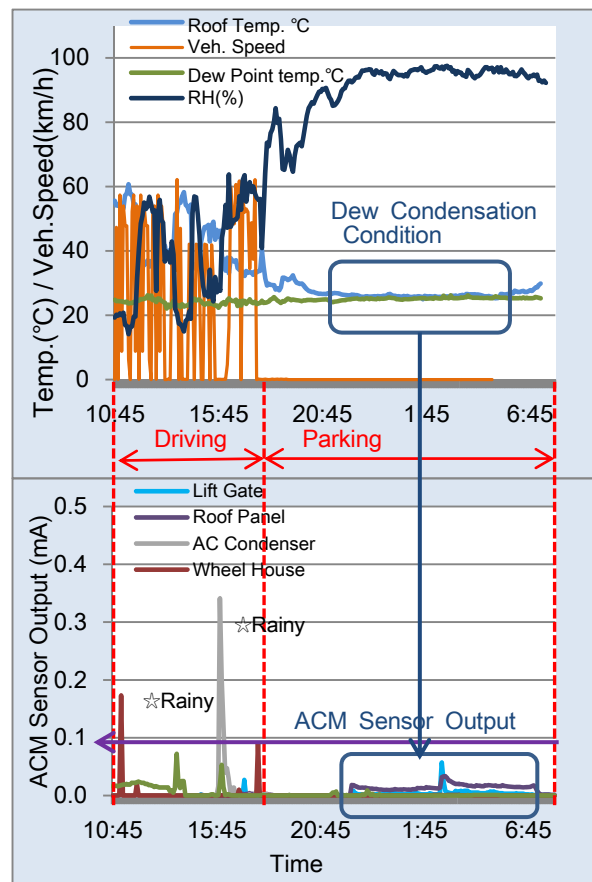


Fig. 14 ACM Output Data of Okinawa (24h)

また東北地方のデータに関して同じ傾向が見られることを確認できている。このことから、融雪塩、海塩粒子環境を問わず、0.1mA を境界に走行と停車を大別できるため、0.1mA のしきい値は妥当性がある。つまり走行中の ACM センサー出力値は実際の腐食環境より過大であり、停車中のデータのみが有効であるといえる。

3) ACM センサーの出力値と温湿度の関係

次に停車中に ACM センサーから信号が出力される理由について温湿度との関係を調べた。一般的に気象学では気温上昇⇒湿度低下、気温低下⇒湿度上昇の関係にあるといわれており、夜間は湿度が上昇している。車体に付着した塩分が、夜間の結露／潮解により水分を吸着し腐食を進行させていると考えた。その結果、外気温は露点より低くなった際の結露条件で ACM センサーが出力しており、潮解により腐食が発生していることがデータで確認できた (Fig. 14)。

4. 市場腐食環境データの今後の展開

腐食環境計測システムで得られたデータは今後、ユニットごとのバーチャル評価につなげていく。腐食のバーチャル評価は、市場モデルとして腐食環境条件を正確に把握し、それをベースに腐食モデルベースを構築する (Fig. 15)。今回、定量化に成功した腐食環境データをデータベースに集約することで各市場の特徴を容易に分析することが可能となった。一例として沖縄と東北地方のデータを比較分析した結果を紹介する。それぞれ腐食環境が異なる部位に ACM センサーを設置し検証した結果、アッパーボディは沖縄、アンダーボディは東北の腐食環境がより過酷であることが実証できた。

これは海塩粒子が飛来する沖縄の環境と融雪塩を含んだ水をタイヤで跳ね上げる東北の地域の特徴を正確にとらえることができおり、腐食モデルベースのインプット情報となる市場モデルとして十分に活用できるレベルのデータとなっている。

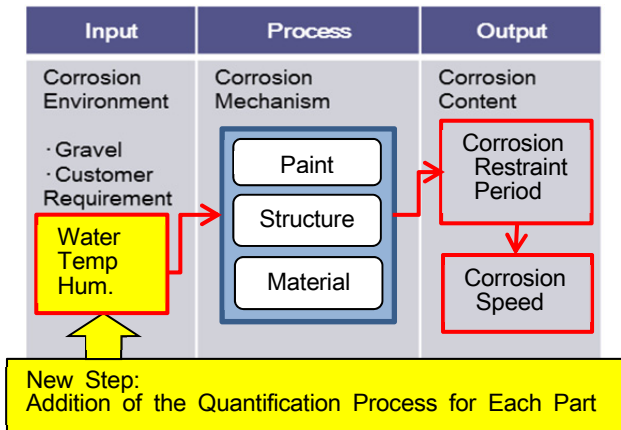


Fig. 15 IPO Chart of the Corrosion CAE

5. おわりに

(1) 車載型腐食環境計測システムの構築

ACM センサーを用いた自動車用の車載型腐食環境計測システムを構築した。

(2) 腐食環境データ解析手法の開発

ACM センサーは、降雨等によってセンサー上に水膜が形成される場合、実際の腐食環境よりも過大に出力する特性があるため、以下の補正方法が有効であることが分かった。

・濡れ量が多い (水膜 50µm 以上) 環境においては、0.1mA を超える場合の ACM センサー出力値を 0 にすることで試験データの腐食速度と積算クーロン量の相関性が得られる

(3) 実際に自動車の腐食が進行するのは走行中ではなく、夜間の結露／潮解現象により発生している

(4) 車載型腐食環境計測システムで得たデータは、市場の腐食環境を正確にとらえており、腐食モデルベース開発のインプット情報として十分に活用できる。

参考文献

- (1) 押川：沖縄における金属の腐食と環境評価、ウェザリング技術研究成果発表会, pp76-77 (2013)
- (2) 篠原：大気腐食評価技術に関わる最近の進歩と今後の展望, 材料と環境, 63, pp116-120 (2014)
- (3) 増子：さびのおはなし, pp74-75 (2014)
- (4) 細矢ほか：炭素鋼の腐食速度と海塩を含む水膜の厚さの関係, 材料と環境, 54, pp391-395 (2005)
- (5) 過去の気象データ検索, 国土交通省 気象庁 HP <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> 調査日：2015/10/20

■ 著 者 ■



福田 克弘



落岩 克哉



園田 賢司



山根 貴和