

新幹線ちょう架線用亜鉛めっき鋼より線の環境腐食劣化評価

佐藤 勇輔* 毛利 哲**

Evaluation of Environmental Corrosion Degradation of Zinc-coated Stranded Steel Wire Used as Messenger Wire in SHINKANSEN Lines

Yusuke SATOH Satoru MOHRI

Zinc-coated stranded steel wire used as messenger wire in SHINKANSEN lines is installed above the track under various corrosion environments. The main factor of the degradation of zinc-coated stranded steel wire is corrosion. In order to grasp a suitable replacement cycle of zinc-coated stranded steel wire, we measured the residual amount of steel and zinc under the different environment conditions with corrosion degradation evaluation equipment and analyzed the removed samples. Moreover, in order to evaluate relation between corrosion and the mechanical characteristics, tensile test and vibration test were performed for both the removed samples and the samples which was exposed to accelerated degradation. As the result, it was confirmed that zinc disappearance was the main criterion for replacement. Furthermore, we tried to estimate a period up to disappearance of zinc under several environments by atmosphere corrosion monitoring (ACM) sensor.

キーワード：亜鉛めっき鋼より線，腐食，ACM センサ

1. はじめに

亜鉛めっき鋼より線は、ちょう架線や支線等の電車線路設備に幅広く用いられている。これらの設備は主に経年を指標として取替えられ、新幹線のちょう架線では20～30年とされているが、腐食劣化の進行は環境条件に大きく左右されるため、適切な保全のためには、それぞれの架設環境に応じた腐食状況の把握が重要である。そこで、経年や環境の違いによる腐食状況を調査するために、架設中のちょう架線および撤去したちょう架線（以下、撤去品）について亜鉛めっきおよび鉄の残存量を測定した。撤去品については元素の定性分析や顕微鏡観察を行った。また、腐食劣化と機械的特性の関係を評価するために加速腐食劣化させた新品の亜鉛めっき鋼より線および撤去品について引張試験と振動試験を行った。その結果、亜鉛めっき消失が取替えの目安であることを提言した。さらに、大気腐食を評価できるとされる ACM (Atmosphere Corrosion Monitoring) センサを使って環境ごとの亜鉛めっき消失期間の推定を試みた。

2. 腐食劣化調査

2.1 架設現場における亜鉛めっき・鉄の残存量測定

実際に架設中の亜鉛めっき鋼より線について、亜鉛めっきおよび鉄の残存量を腐食劣化判定装置¹⁾で測定した。この装置は検出コイルに交流電流を流し亜鉛めっき鋼より線にうず電流を発生させ、劣化に伴ううず電流の発生変化を捉えて残存量を測定するものである。図1に1ドラム内での亜鉛めっきと鉄の残存量の測定結果例を示す。図の測定箇所は経年26年、山間部である。トンネル区間および明かり区間に関係なく鉄の残存量は100%であるのに対し、亜鉛めっきの残存量は明かり区間よりトンネル区間の方が多い。ただし、トンネル区間の漏水箇所

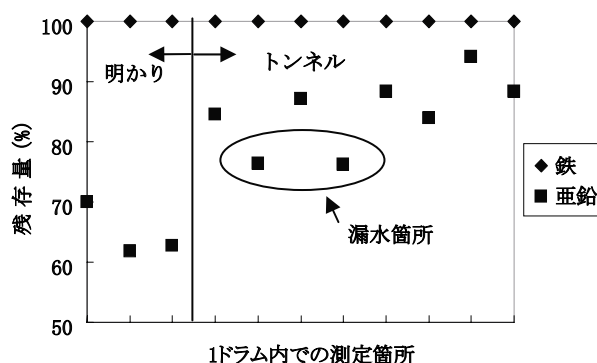


図1 亜鉛めっき・鉄の残存量測定結果例

* 電力技術研究部 (集電管理)

** 東日本旅客鉄道(株) (元 集電管理)

特集：電力技術

箇所では亜鉛めっきの残存量が少なくなっている。経年18年～30年で都市部、山間部、海岸部のそれぞれトンネル区間と明かり区間の全9箇所で現地測定を行った結果、上記と同じ傾向が認められた。

2.2 撤去品の亜鉛めっき残存量測定

2.1節で鉄の腐食は進行していないという測定結果が得られたため、撤去品については亜鉛めっきの残存量を対象に測定した。表1に撤去品の一覧を示す。いずれも経年30年程度である。図2に測定結果を示す。トンネル区間と明かり区間ではトンネル区間の方が亜鉛めっきの残存量が多い傾向にあり、これは2.1節の現場測定結果と同様である。都市部や海岸部での明かり区間において支持点中間と支持点下では、亜鉛めっきの残存量は支持点中間の方が支持点下より少ない傾向にある。これは水分が、支持点中間に流れやすい傾向にあるためと考えられる。トンネル区間では支持点中間と支持点下との亜鉛めっき残存量の差異は認められない。

表1 撤去品の一覧

試料番号	架設環境	位置
1	都市部・明かり (橋りょう)	支持点中間
2	都市部・明かり (橋りょう)	支持点下
3	都市部・明かり (駅構内)	支持点中間
4	都市部・明かり (駅構内)	支持点下
5	海岸部・明かり	支持点中間
6	海岸部・明かり	支持点下
7	山間部・トンネル	支持点中間
8	山間部・トンネル	支持点下
9	都市部・トンネル	支持点中間
10	都市部・トンネル	支持点下
11	海岸部・トンネル	支持点中間
12	海岸部・トンネル	支持点下

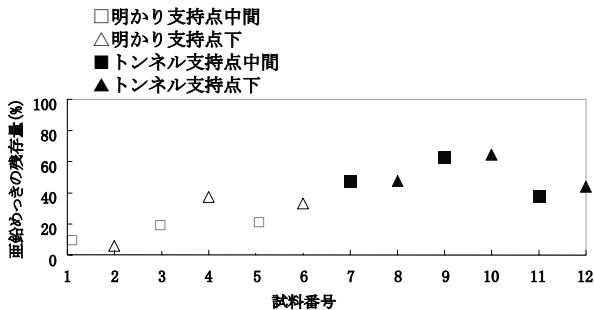


図2 架設環境位置での亜鉛めっき残存量の比較

2.3 経年・環境と亜鉛めっき消失量との関係

経年・環境ごとの架設中および撤去品の亜鉛めっきの消失量の測定結果について、1平方メートル当たりの亜鉛の消失量に換算してまとめたものを図3に示す。また、

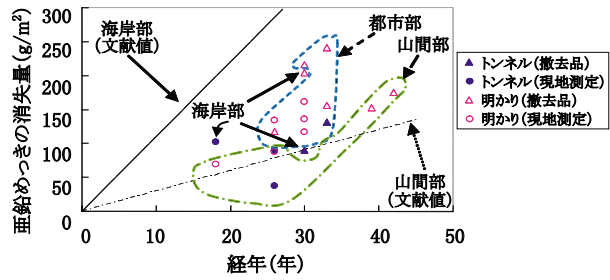


図3 経年、環境と亜鉛めっきの消失量

JIS H8641に記載されている、一般的な亜鉛めっき鋼板の亜鉛めっき消失量も、同時に「文献値」としてグラフ中に示した。図3から、山間部の消失量は都市部・海岸部よりも少ないことが確認できた。また、一般的な亜鉛めっき鋼板の亜鉛めっきの消失量（文献値）と比較すると、山間部ではほぼ一致することがわかった。また、海岸部では、文献の消失量よりも少ないことが明らかとなった。トンネル区間では明かり区間よりも腐食が遅い傾向にあることが確認できる。

2.4 撤去品の分析

表1に示す撤去品の中で、試料番号1,3,5,7,および11に付着している錆成分について、電子線マイクロアナライザー (EPMA) により構成元素を、X線回折法 (XRD) により構成相 (化合物) を定性分析した結果を表2に示す。なお、試料番号5および11は海塩の付着を予測し、塩素 (Cl) の分析を行ったが、ほとんど検出されなかった。また、最外層素線の表面付近の観察結果を図4に示す。分析結果を整理すると、次のとおりである。

- ① トンネル内の試料 (番号7および11) からは酸化亜鉛 (ZnO) が多量に検出されたものの、明かり区間の試料 (番号1,3,5) からは微量の検出であった。
- ② トンネル内の試料の表面付着物には、亜鉛めっき鋼より線に含まれる鉄 (Fe)、亜鉛 (Zn) などの元素のほか、硫黄 (S)、珪素 (Si)、銅 (Cu)、およびマンガン (Mn) などの元素が検出された。

表2 定性分析結果

試料番号	元素分析		構成相分析 (化合物)
	強度検出	中程度検出	
	10wt%以上	1～10wt%	ZnO
1	Fe, Zn, O	S, Si	微量
3	Fe, Zn, O	S, Si	微量
5	Fe, Zn, O	S, Si	微量
7	Fe, Zn, O	Cu, Mn, S, Si	多量
11	Fe, Zn, O	Ca, Cu, Mn, S, Si	多量

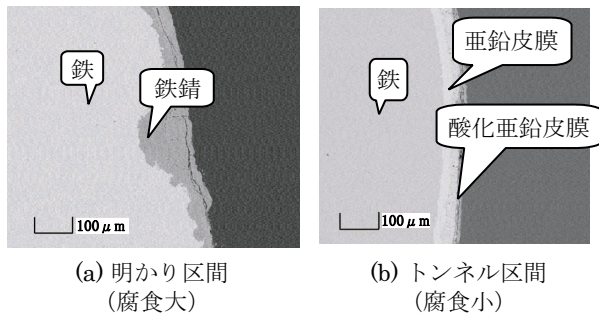


図4 素線表面の顕微鏡観察結果

③ 図4の顕微鏡観察結果から、腐食環境がきびしい明かり区間では鉄を腐食から保護する亜鉛めっき皮膜が喪失したため、鉄の腐食が認められた。一方、トンネル区間では酸化亜鉛皮膜および亜鉛めっき皮膜が認められ、鉄は腐食していなかった。

①項および③項の結果から、明かり区間よりトンネル区間の腐食の進行は遅いと言える。

3. 腐食と機械的特性の関係

3.1 加速腐食試験

3.1.1 試験方法

亜鉛めっき消失推移、亜鉛めっき消失後の鉄の腐食による断面積減少に伴う耐引張強度、および振動特性を評価するために、加速腐食試験を実施した。試験はJIS H8502の「めっきの耐食性試験方法」の中性塩水噴霧サイクル試験に準じた。試験条件を表3に示す。試料は亜鉛めっき鋼より線(St180mm² 3種)で、図5に示すよ

表3 加速腐食試験の条件(1サイクル)

	ステップ	環境条件	時間(h)
1 サイクル	1	NaCl 5%溶液噴霧 35°C RH20%	2
	2	乾燥 50°C	2
	3	湿潤 50°C RH98%	4

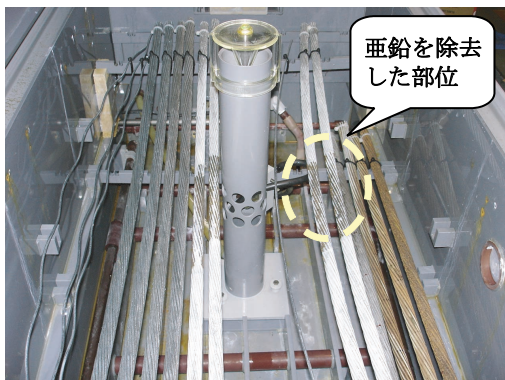


図5 試料の設置状態

うに試料の中央部の亜鉛を除去したものと除去していないものの2種類である。これは亜鉛めっきと鉄の消失速度の両方を調べるためである。

3.1.2 試験結果

図6に加速腐食試験サイクル数と亜鉛めっきの残存量の関係を示す。亜鉛めっきの残存量は試験サイクルに対して、ほぼ一定速度で減少することが分かる。これは鉄よりも亜鉛が先に腐食する犠牲防食作用によるものと考えられる。このままの速度で減少すると900サイクルで亜鉛めっきは消失すると推定される。図7に加速腐食試験サイクル数と鉄の残存量の関係を示す。サイクル数の増大とともに、鉄の残存量の低下は緩慢になっている。

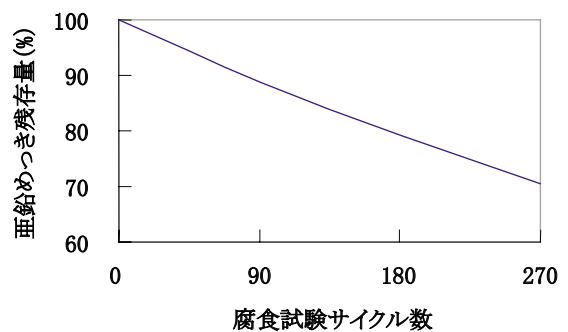


図6 加速腐食試験サイクルと亜鉛めっき残存量の関係

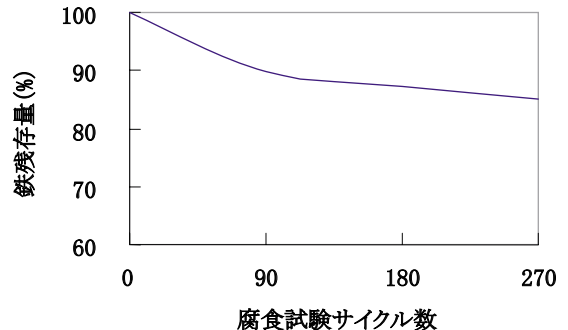


図7 加速腐食試験サイクルと鉄残存量の関係

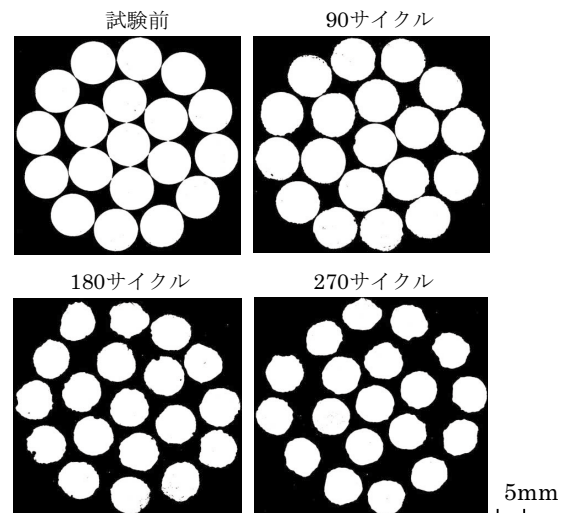


図8 より線の断面観察結果

特集：電力技術

これは表面の錆が腐食を抑制しているためと考えられる。図8により線の断面観察結果を示す。サイクル数の増大とともに最外層素線の断面積の減少が認められ、腐食は外層から進行することおよび一様に減耗しないことが分かる。

3.2 機械的特性評価

加速腐食試験を行った試料について機械的特性を把握するため、引張試験と振動試験を実施した。

3.2.1 引張試験

加速腐食試験サイクルと破断荷重の関係を図9に示す。試験が進行するにつれ破断荷重の減少速度が低下している。これは図7の鉄の減少量の傾向と類似しており、腐食の進行により鉄の残存量が減少し、それに伴い鉄の破断荷重も減少することを類推できる。そこで、鉄の使用限度について検討を行う。JIS G3537に定められている亜鉛めっき鋼より線 (St180mm² 3種) の最大引張荷重の規格値 113kN を新品の破断荷重残存率 1 とした場合、試験サイクルに伴う破断荷重の残存率 y は図9の結果から、式(1)で近似できる。

$$y = e^{-0.00049x} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、y：破断荷重残存率、x：加速腐食試験サイクル数である。

ここで、新幹線のヘビーコンパウンド架線用ちよう架線の張力を 24.5kN と想定すると、張力に「電気工作物施設基準規程」に定められている安全率 2.5 を乗じた値は 61kN となる。この値を規格値 113kN で除した値 0.54 が使用限度における破断荷重残存率であるので、この値を式(1)に代入すると使用限度に達する試験サイクル数 1250 サイクルが求まる。つまり、亜鉛めっき消失後、鉄の腐食が進行するため亜鉛めっき消失期間 900 サイクルと合わせて 2150 サイクルで使用限度に達することになる。

3.2.2 振動試験

ちよう架線はパンタグラフ通風時や風により振動する。そこで、振動による繰返し負荷の影響を評価する試験を実施した。試験条件は高速走行区間でちよう架線に

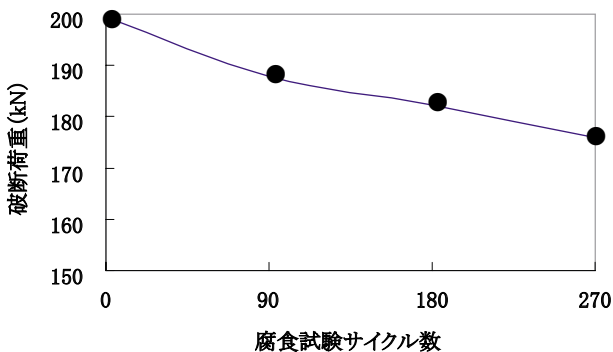


図9 加速腐食試験サイクルと破断荷重の関係

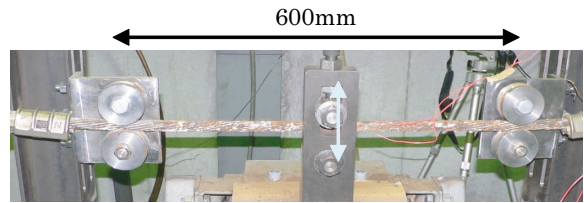


図10 振動試験機内試料の設置状態

表4 振動試験の条件

項目	設定値
振幅 (中央部加振)	± 10mm
周波数	5Hz
張力	4.9kN

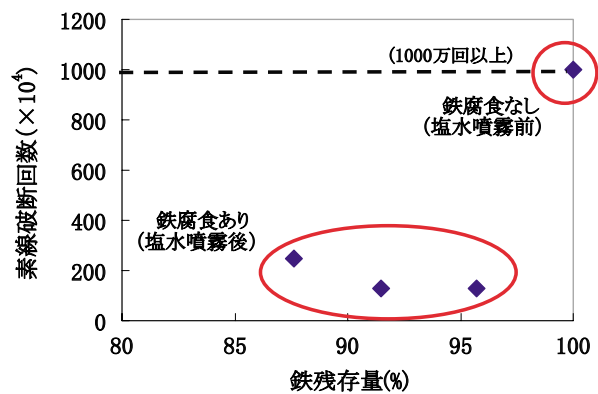


図11 振動試験結果

生じるひずみを測定した結果を考慮して設定した。図10に試料の設置状態、表4に試験条件を示す。試験結果を図11に示す。素線が1本以上破断した回数を素線破断回数とした。図より、腐食がない状態では1000万回以上振動しても素線が破断しないのに対し、鉄に腐食が及ぶと130万回程度で素線が破断することが分かる。これより、3.2.1項の引張試験結果に基づく考察にかかわらず、亜鉛めっき鋼より線の取替えは亜鉛めっき消失の時点を目安にすることが望ましいと言える。

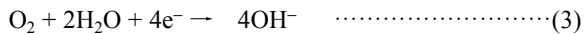
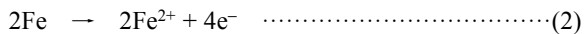
4. ACM センサによる亜鉛消失期間の推定

様々な環境下における腐食進行を予測するため、塩水噴霧試験やサイクル試験などの材料腐食試験が一般的に行われている。これらの腐食加速試験における経年との対応づけとして、多くの場合、腐食加速試験を行った試料と現場に暴露した試料について重量や残存厚さなどの評価指標により、推定経年を算出している。しかし、この方法では暴露架台の設置が必要となり、ある程度の設置場所の確保が必要である。そこで、大気中の腐食進行を評価するひとつの手法として ACM センサが提案されている。これは大気環境下に異種金属を接触腐食させ腐食する際に流れる電流を連続的に記録し、その電流の積

分値で環境の腐食性を数量的に評価するものである。このセンサは小型・軽量であるため支持物に装着し、30cm四方のデータロガーの設置場所を確保できれば測定が可能である。前章で亜鉛めっき消失が張替えの目安と考えられたので、ACMセンサを適用してその期間の推定を試みた。

4.1 ACMセンサの構造

ACMセンサの構造を図12に示す。電位列が卑な金属として、厚さ0.8mmの炭素鋼板64mm×64mmを基板としている。炭素鋼に組み合わせる貴な金属にはAg（銀）を用い、両金属を絶縁するため、BN（窒化ホウ素）を添加したエポキシ樹脂製の絶縁ペーストを炭素鋼前面に塗布し、その上に銀入り導電ペーストを積層してある。これらのペーストには、図12下段に示すとおり、スリット状に塗布しない箇所を設けている。こうしたスリット部は炭素鋼表面が露出している。この露出した炭素鋼に海塩粒子（NaClやMgCl₂など）や大気含有成分（SO₂など）が直接、あるいは水溶液の状態で付着することで、炭素鋼の腐食が促進される。スリットに雨水や結露などによって薄い水膜ができると、腐食に伴い炭素鋼のFeから電子が水膜中に溶出する。このとき、炭素鋼上では式(2)の反応が、また、Ag上で式(3)の反応が生じる。



この反応によって授受される電子が炭素鋼とAgとを短絡したリード線に流れる電流として測定される。この電流がACMセンサの出力で、その累積値が炭素鋼基板の腐食量に対応している。したがって、この電流を計測することで、暴露環境下の腐食の進行状況を把握することが可能となる。

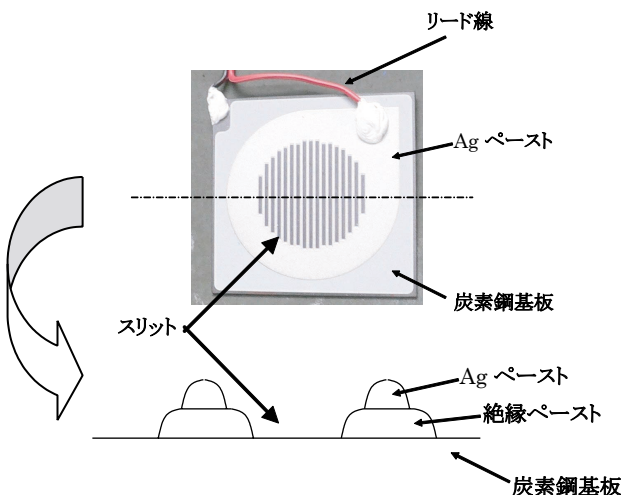


図12 ACMセンサの構造

4.2 ACMセンサ出力と腐食速度

これまでにACMセンサを利用して炭素鋼の腐食速度

を推定する試験が行われている。これらの試験では炭素鋼の腐食速度を x (mm/年)、センサ出力を累積した電気量を Q (C) とすると、

$$\ln(x) = 0.378\ln(Q) - 0.636 \dots\dots\dots(4)$$

となり、 Q と x はそれぞれの対数が直線関係にあることが実験的に示されている²⁾。ACMセンサを用いれば腐食の原因物質は特定できないが、原因物質、温度、湿度などの環境条件に関わらず、電気量のみをパラメータとして腐食速度を推定できる。

4.3 ACMセンサの出力

表3の加速腐食試験でACMセンサの出力特性を把握しておく、実際の環境下におけるACMセンサの出力が加速腐食試験の何サイクルに相当するか推定できる。表3の加速腐食試験で亜鉛めっきは900サイクルで消失すると推定できているので、これを基準にすれば、様々な環境下での亜鉛の消失期間が推定できる。図13に加速腐食試験でのACMセンサの出力特性を示す。電流は湿潤時には常に流れ、噴霧時にピークを示し、減少後0になり、乾燥時は0の状態が続く。図14に試験サイクルと電流積分値の測定結果を示す。試験サイクル N と電流積分値 Q' (Ah) の関係は式(5)で近似できる。

$$Q' = 0.0246\ln(N) + 0.0063 \dots\dots\dots(5)$$

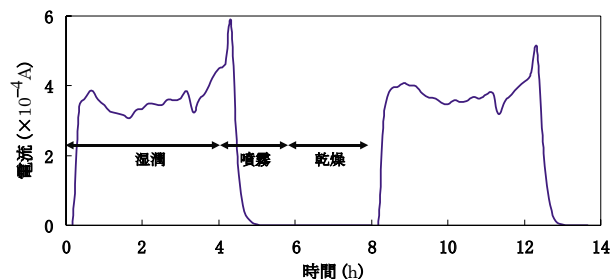


図13 加速腐食試験におけるACMセンサの出力特性

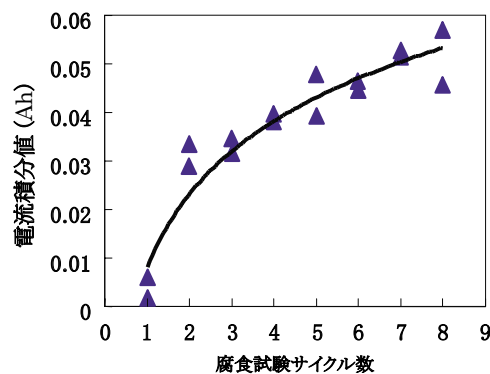


図14 試験サイクルと電流積分値の関係

4.4 ACMセンサによる亜鉛めっき消失期間推定

ACMセンサを使用して亜鉛めっき消失期間を推定し

表5 ACM センサによる亜鉛めっき消失期間推定結果

環境	電流積分値 Q' (Ah)	ACM 設置日数 (日)	加速腐食試験 1 サイクルに相当 する日数 (日)	亜鉛めっき 消失期間 (年)
福岡県 海岸地域	0.0447	31	6.49	16
神奈川県 工業地域	0.038	93	16.3	40
栃木県 都市部	0.036	60	17.7	44
東京都 住宅地	0.0276	60	25.2	62

た結果例を表5に示す。設置環境で測定した電流積分値 Q' を式(5)に代入すると、当該環境での設置日数に対応する加速腐食試験サイクル数が求められ、設置日数をこの値で割れば腐食試験1サイクルに相当する日数を算出できる。この値に900サイクル（腐食試験における亜鉛消失までのサイクル数）を乗じて365日で割って、亜鉛めっき消失期間（年）を推定した。表より環境ごとの消失期間と図3の消失量の傾向は類似していることが分かる。

5. まとめ

亜鉛めっき鋼より線の適切な保全のために、様々な架設環境下での腐食状況を調査した結果、環境により腐食速度が異なることを確認した。また、腐食させた亜鉛めっき鋼より線や撤去品について引張試験および振動試験を行った結果、亜鉛めっき鋼より線の取替えは亜鉛めっき消失の時点を目安にすることが望ましいことが判

明した。さらに、ACM センサによる亜鉛めっきの消失期間の推定法を提案した。同手法の精度を向上させるためにはさらなるデータの積み重ねが必要と考える。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご協力いただいた東日本旅客鉄道株式会社、西日本旅客鉄道株式会社、および九州旅客鉄道株式会社の関係各位に深く感謝します。

文献

- 1) 島田健夫 他：亜鉛めっき鋼より線の腐食劣化判定法，平成6年電気学会産業応用部門大会，No.160，1994
- 2) 元田慎一：ACM センサによる大気腐食評価法，第144回腐食防食シンポジウム資料，腐食防食協会，2004.4