

さび

154



日本防蝕工業株式会社

さ び 第 154 号

目 次

ご挨拶	1	
代表取締役社長	佐藤 元彦	
日防特許技術のご紹介	2	
エンジニアリング部	飯田 知宏	
逆解析による陽極発生電流推定技術	7	
技術開発部	技術研究所	斎藤 達哉
”	”	田代 賢吉
技術開発部	”	後藤 大
”	”	小泉 文人

ご挨拶



日本防蝕工業株式会社

代表取締役社長 佐藤 元彦

あけましておめでとうございます。

皆様方におかれましては、幸多き新春をお迎えになられたこととお慶び申し上げます。

この度、取締役社長を拝命し、昨年の12月1日に就任いたしました佐藤でございます。

当社は今年、創業70周年を迎えますが、そのような記念すべき年に大任を仰せつかり、一層身の引き締まる思いでございます。諸先輩方が築き上げてきた当社の歩みを今一度振り返り、伝統を受け継ぎながら、さらなる発展を遂げられるように、甚だ微力ではございますが自身の役割を全力で果たしていく所存でございます。今後とも一層のご指導ご鞭撻を賜りますよう心よりお願い申し上げます。

さて、昨年は世界的に新型コロナウイルスの感染拡大の影響を受け、人類はかつてない窮地に立たされました。日常生活は大きく変化し、常識だったことは常識でなくなり、経済は非常に厳しいものとなりました。しかしながら、誰もが経験したことのない未曾有の危機の後に生まれる、いわゆるニュー・ノーマルと呼ばれる新しい世界の到来に備え、実情を見据えていかなければなりません。新たな価値観を併せ持ち、経営理念に基づいて、社会に貢献していくことが肝要であると考えております。構造的に変化する情勢を見極め、今後もお客様にとって最良の製品をご提供し、ご満足いただける現場施工ができるよう技術的課題に真摯に向き合い、社員一丸となって邁進していく所存でございます。

毎年、当社の技術開発の成果を発表させていただく技術情報誌『さび』をご愛読いただきまして、誠に有難うございます。この度、第154号を発刊することができましたのも、ひとえに皆様方のお力添えのおかげと感謝申し上げます。

本年もより一層のご愛顧を賜りますようお願い申し上げます。

今回お届けする技術報告は「日防特許技術のご紹介」および「逆解析による陽極発生電流推定技術」の2件でございます。

・日防特許技術のご紹介

当社を代表する製品および手法である「電気防食用流電陽極」、「腐食速度測定法」および「数値解析」に関する特許技術をご紹介します。「数値解析」については「逆解析による陽極発生電流推定技術」のところで詳細に解説いたします。

・逆解析による陽極発生電流推定技術

犠牲陽極方式による電気防食が施された海洋鋼構造物を適切に維持管理していく重要性はご承知のことと存じます。当社は、維持管理に重要な情報の1つとして陽極の発生電流に着目いたしました。

そこで、東京工業大学 天谷教授のご指導を仰ぎ、構造物近傍の電位情報から数値解析を用いて陽極発生電流を推定する逆解析手法を開発・提案してまいりました。

本年はより実用性を高めた陽極発生電流推定法について、実現現場での検証結果と共にご紹介いたします。

日防特許技術のご紹介

エンジニアリング部 飯田 知宏

1. はじめに

明治 18 年、日本の特許第 1 号は船舶外板の腐食を防ぐための塗料とその塗装方法に関する「堀田鑛止塗料及び其塗法」で、くしくも当社は船舶を含む金属構造物を腐食から守ることを生業としており、大いに縁を感じる次第です。先の特許登録から 136 年が経過しようとしています。その間、多くの歴史的な発明家により、多くの偉大な発明がなされてきました。例えば、豊田佐吉氏による「木製人力織機」、御木本幸吉氏による「養殖真珠」などが挙げられます。特に前者については、特許庁によると、発明と改良の積み重ねにより、日本の紡織機工業および繊維産業は世界的レベルへと押し上げられ、それによって得られた資金を基に、今なお続く日本の自動車産業発展のスタートが切られたそうです¹⁾。まさに日本の産業の発達は発明無くして成し得なかったと言えます。

さて、発明を守ってくれるのが特許制度です。ご存じの通り、特許を取得すると独占排他権が付与され、特許権者のみが特許の内容を実施できますが、一方で、発明の内容は公に開示され、誰でもその内容を知ることができます。当該特許制度によって、発明の保護と利用のバランスが図られ、前記「木製人力織機」のエピソードのように、日本は発展を遂げてきました。今や知財戦略なくして事業活動が成立しないことは言うまでもありません。「特許制度は人類最大の発明である」とは言い得ていると思えます。

近年では大手企業を中心に IP ランドスケープ（例えば、知財情報の経営戦略的活用）を取り入れた経営を行っているところがあるようです。中小企業でも使いこなせるものと認識していますので、知財担当として、その準備を進めていく所存です。

当社の特許技術が属する分野は「電気防食用流電陽極」、「サンゴ」、「コンクリート」、「腐食速度測定法」、「数値解析」、「電解槽」、「被覆防食」、「腐食性評価」、「検査方法」および「外部電源方式用電極」等がありますが、本稿では「電気防食用流電陽極」、「腐食速度測定法」および「数値解析」について、当社の特許技術をその開発過程と共にご紹介します。

2. 電気防食用流電陽極

当社は創業以来 70 年にわたり電気防食を主業務としているため、流電陽極方式による電気防食の施工に欠かすことのできない電気防食用流電陽極（以下、陽極と称す）に関する技術については、従来、複数の出願を行ってきました。前記陽極は犠牲陽極とも称しますが、防食対象物が鉄鋼材料で構成されている場合、鉄鋼よりもイオン化傾向の大きい金属であるアルミニウム（元素記号 Al）、マグネシウム（元素記号 Mg）、亜鉛（元素記号 Zn）等の各元素の合金が適しています。流電陽極方式による電気防食の原理は、鉄鋼を陰極とし、Al 合金等を陽極としてガルバニック電池を形成させ、陽極と陰極間の電位差を駆動力にして、鉄鋼が溶解する腐食電流と同等以上の防食電流を陽極から陰極に流すというものです。陽極には、例えば、高温環境用、低温環境用、汽水域用および防食対象物が水素脆化を起ささないように陽極電位が貴電位を示すもの、さらに、取り付け方法や設置方法を工夫したもの等もあります。そして、権利が存続している特許の中には、例えば、亜鉛合金流電陽極「ジンノード (ZINNODE) ®S」があります。

2.1 ジンノード S【特許第 4539199 号】

本発明は、60℃の海水環境に置かれた設備を防食することが可能な亜鉛合金流電陽極（以下、亜鉛陽極と称す）であるジンノード S に関するものです。ジンノード S の外観を写真 1 に、亜鉛陽極の公称組成と性能試験の結果を表 1 に示します。

一般に、常温海水環境下で流電陽極方式により電気防食する時に使用される亜鉛陽極には、世界標準の MIL (MIL-DTL-18001L) 規格品がありますが、優れた陽極性能を示す一方で、有害物質であるカドミウム(元素記号 Cd)が添加されているため、従前より、Cd を含まない亜鉛陽極が求められていました。また、Zn-Al 合金は、50℃以上の海水中において粒界腐食を起し、有効電気量が低下するという課題がありました。

前記課題に対し、当社は種々の研究を積み重ね、Cd を添加しない、スズ(元素記号 Sn) 添加合金であるジンノード S を開発しました。本開発合金について、50℃および 80℃の人工海水中で(公社) 腐食防食学会規格に準拠した流電陽極試験を行ったところ、Zn-Al 系合金でありながら MIL 規格品と同等の陽極性能を示しました。このようにジンノード S は、Cd を添加することなく、MIL 規格品と同等の陽極性能を有する“環境に優しい亜鉛陽極”として、現在も製造・販売を行っています。

本特許の発明者は、当時、私が所属していた研究開発を行う部署の上司、OB の田村祐一氏で、ご指導いただきながら陽極の開発に携わることができました。



写真 1 ジンノード S の外観

表 1 亜鉛陽極の公称組成と性能試験の結果

亜鉛陽極	主要成分(質量%)				50℃人工海水		80℃人工海水	
	Al	Sn	Cd	Zn	陽極電位 (mV vs. SCE)	有効電気量 (A・h/kg)	陽極電位 (mV vs. SCE)	有効電気量 (A・h/kg)
ジンノード S	0.03 ~0.5	0.0005 ~0.02	--	残	-1030	807	-1017	803
MIL 規格品	0.1 ~0.5	--	0.025 ~0.07	残	-1029	803	-1021	778

2.2 芯金形状に特長を有する陽極【特許第 6257110 号】

本発明は、陽極の芯金形状に関するものです。芯金形状を図 1 に示します。

従来、流電陽極方式の電気防食に使用する箱形の陽極は、陽極を防食対象物へ設置するための金具である芯金が、例えば、有孔平面部が円盤状で、円盤外周縁から外側方向に浅く折り曲げられた部分と、有孔平面部と平行に、外側方向に放射状の突起を有する形状をしていました。前記芯金は陽極の本体の防食対象物側の表層（以下、陽極裏面と称す）に埋設され、陽極本体と一体化されています。本陽極を防食対象物に設置すると、陽極裏面がゴムシートやエポキシ樹脂等で被覆されているため、防食対象物と対向する反対側の表層（以下、陽極表面と称す）から順次溶解し、熱交換器等の防食対象物の腐食抑制に大きな成果を上げてきました。また、陽極表面からの溶解に伴って芯金が露出し、防食電流が芯金に流入してロス電流となることを

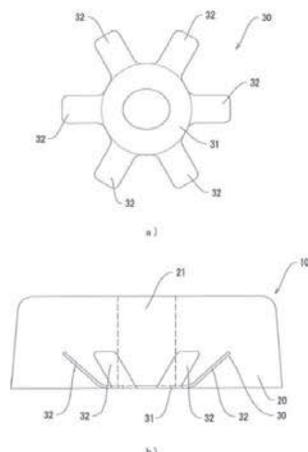


図 1 芯金形状
「上: 芯金平面図, 下: 陽極断面図」

回避するためにも、芯金は陽極裏面に埋設させることが好ましいとされてきました。

しかしながら、陽極の使用に伴って陽極の裏面のゴムシートの脱落やエポキシ樹脂の剥離等が起きることがあり、陽極裏面の素地金属も海水と接触し、陽極裏面からも溶解が進行することがありました。すなわち、陽極の本体の残量が十分であるにもかかわらず、芯金周囲の陽極の溶解が進行し、腐食生成物の生成に伴う膨張圧の作用等も影響して、芯金から陽極の本体が早期に脱落するという事例がありました。このような陽極本体の脱落は、熱交換器等の防食不良や緊急の開放点検等が必要となるため、非常に不経済でした。この原因は、従来の芯金形状では、陽極の本体と芯金との密着性の悪さから隙間が生じやすいため、芯金とその周囲の陽極とがガルバニック腐食を起こし、芯金周囲の陽極が優先して溶解しました。その結果、陽極の本体が芯金から切り離され、陽極の設置から短期間で陽極が脱落することとなりました。

前記課題に対し、芯金を、有孔平面部の外周縁から陽極の本体内部を表面方向に傾斜して直線的に深く入り込むように構成しました。特に、陽極埋設部を複数の縦長突起として放射状に配置し、芯金と陽極の本体の接触面積の増大を図ることで、芯金周囲に欠陥が生じた場合にも、陽極の早期脱落を防止することができました。

3. 腐食速度測定法【特許第 6026055 号】

本発明は、電解質中における金属体の腐食速度を非破壊に測定するための腐食速度測定法に関するものです。腐食速度測定装置の模式図を図 2 に示します。

電解質中における金属体の腐食状況を正確に診断することは、構造物の寿命予測や劣化対策を講じる上で非常に重要です。従来、鋼材等の腐食状況の調査の多くは、目視観察や自然電位法などによって実施されてきましたが、目視観察や自然電位法では、定量的に精度良く腐食速度を求めることはできませんでした。また、電気化学的な手法を用いて金属の腐食速度を求める方法として「ターフェル外挿法」および「分極抵抗法」がありますが、各々欠点があり、腐食速度を正確に求めることは困難でした。そこで、当社は、主にコンクリート中鉄筋の腐食速度を定量的に知るための測定手法として「サイプ (CIPE)®法」を開発しました。

ここに、CIPE とは Current Interrupted Polarizing Extrapolation method の略称です。

サイプ法は「分極曲線の測定方法」と「その読み取り方」に特徴があり、定電流通電とインスタントオフ電位を測定することで分極曲線を取得し、ターフェル外挿法を用いた、恣意的な要素を排除した分極曲線の読み取り方による、個人差の出ない腐食速度の算出法です。

サイプ法の精度を検証するために、コンクリートの供試体を用いて、その質量減から求めた腐食速度と、サイプ法による腐食速度とを比較したところ、近い値を示し、サイプ法の有効性を確認できました。また、サイプ法は、中性水溶液中鋼材の腐食速度も非破壊に測定することができました。

本測定手法は、当社製の非破壊式鉄筋腐食診断計「コロージョンハンター® II」の一機能として製品化され、コンクリート構造物の点検診断業務等に活用されています。

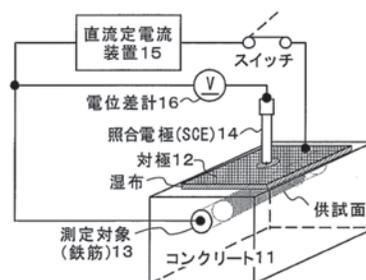


図 2 腐食速度測定装置の模式図

4. 電気防食と数値解析（逆解析）

4.1 逆解析による陽極の発生電流推定方法【特許第 6120307 号、特許第 6365862 号】

本発明は、栈橋、護岸、消波堤等の港湾構造物、石油掘削関連施設、シーバース、洋上備蓄基地等の海洋関連施設、あるいはオイルタンク等の貯蔵施設などに代表されるような海洋鋼構造物の電位および陽極個々の発生電流を、逆解析を用いて推定することに関するものです。ジャケット構造物のモデルを図 3 に示します。

鋼材を使用した金属製構造物の一種であるジャケット式栈橋では、骨組みとなる鋼材に対して、

通常2種類の防食が行われています。大気と海水両方に触れる飛沫帯および干満帯には被覆防食が施され、また、海水中の鋼材に対しては流電陽極方式による電気防食が行われています。流電陽極方式による電気防食で使用される陽極は、その性質上、時間経過と共に消耗し、発生電流（防食電流）は減少します。そのため、陽極の発生電流の測定による陽極の寿命評価が必要となります。

電気防食された金属製構造物の防食状態を診断する方法として、金属製構造物近傍の電位測定による簡易検査と、金属製構造物に取り付けられた陽極の消耗量をダイバーが調査する詳細検査が行われています。これら既存の診断方法では、簡易検査の場合、その診断結果の信頼性や安全性が問題となることがあり、また、大型金属製構造物を詳細検査する場合、時間やコストが問題となります。

前記課題に対し、当社は、東京工業大学教授で数値解析の権威、天谷先生のご指導を仰ぎ、海上から金属製構造物近傍の電位を水深方向に複数点計測し、逆解析を用いて金属製構造物に取り付けられた複数の陽極の発生電流を同定する手法を開発しました。すなわち、逆解析を用いることで、簡易検査程度の電位測定により、陽極の発生電流を同定し、陽極の寿命を推定することができました。

本手法の精度を検証するために、大井ふ頭および羽田空港D滑走路のジャケットに対して検証試験を行いました。その結果、羽田空港D滑走路のジャケット全体の電位分布と、深度ごとの陽極の発生電流を同定することができました。また、大井ふ頭には陽極の発生電流を計測するための電流計測装置（シャント抵抗）が取り付けられており、逆解析によって同定した陽極の発生電流が前記シャント抵抗により計測された測定値とほぼ一致しました。これにより本手法の有効性を確認することができました。

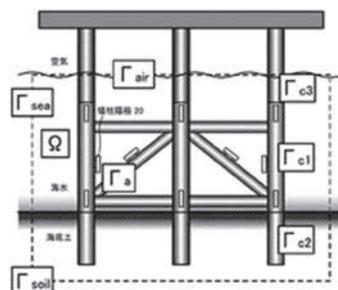


図3 ジャケット構造物のモデル

4.2 電位測定用治具および電位測定方法ならびに発生電流の検証方法【特開2019-2073】

本発明は、4.1項の手法を行うための電位測定治具およびこれを用いた電位測定方法ならびに発生電流の検証方法に関するものです。電位測定治具の概略図を図4に示します。

4.1項の手法では、潮流等の影響を受けると照合電極を垂直に沈降させ、かつ、引き上げることが困難になるという問題がありました。特に、水面下においてケーブルに捻じれが発生すると、照合電極が回転して正確な電位を取得できないおそれがありました。また、数値解析手法においては、測定される電位に含まれる誤差が大きくなると、推定される発生電流の精度が低下しやすく、ノイズなどの外乱の影響を受け難くする必要があります。さらに、大井ふ頭のように一部の陽極に電流計測装置が取り付けられている場合は殆どなく、取り付けられている場合も波の影響を受けて壊れやすいという欠点があり、その設置および補修には労力やコストがかかりました。このように、数値解析結果を簡易に検証する有用な手法はありませんでした。

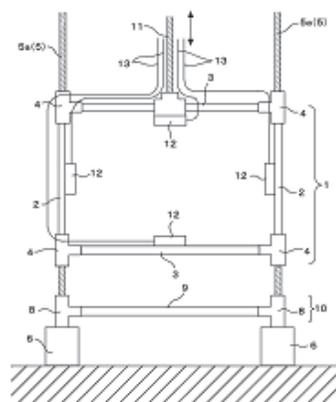


図4 電位測定治具の概略図

前記課題に対し、本発明は照合電極を搭載した移動体を水底方向に移動させる際にガイドを設けることで、沈降時または引き上げ時におけるケーブルの捻じれを防止して、移動体に回転が生じることを抑制することが可能となりました。また、複数の照合電極を平面的または立体的に配置し、各照合電極で計測した電位の差分にて数値解析を行うことにより、その精度を高めることができました。さらに、当該施設にシャント抵抗付きの仮設陽極を導入し、その発生電流について、逆解析による推定値とシャント抵抗による測定値とを比較することで、当該手法の精度を検証することが

できました。

4.3 クラスタリングを用いた陽極の発生電流推定方法【特開 2020-60487】

本発明は、図面が無いために陽極の取り付け位置やその個数が不明な場合でも、陽極から出力される電流を精度よく推定することができる発生電流推定方法に関するものです。群点湧き出しモデルの概念図を図5に示します。

4.1 項および4.2 項に記載された方法では、陽極の取り付け位置や形状等の事前情報が必要でした。しかしながら、実際の現場では解析対象とする海洋鋼構造物の図面と異なる位置に陽極が設置されている場合があります。そのような状況では前記の数値解析は困難でした。

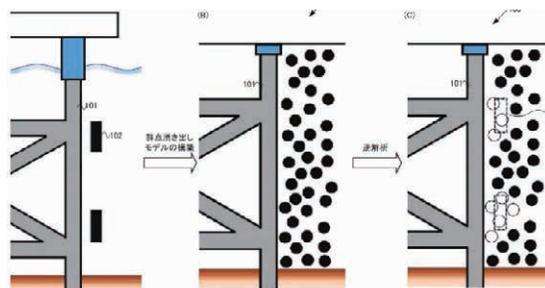


図5 群点湧き出しモデルの概念図

これに対して、陽極からの電流流出を多数の電流の湧き出し点（以下、群点と称す）で表現し、陽極が取り付けられている可能性がある領域を広くカバーするように群点を散布して（群点を散布した領域を群点領域と称す）モデル化し、各点の湧き出し電流を逆解析により推定するという手法が提案されていますが、当該手法では、1つの群点領域内の湧き出し電流の総和を、1つの陽極の発生電流として評価していました。そのため、陽極の取り付け位置や形状の曖昧さには対応できても、1つの群点領域内に複数の陽極が存在する場合、数値解析は困難でした。

前記課題に対し、クラスタリングを用いた陽極の発生電流推定方法によって、図面の無い施設における発生電流が精度よく推定できると共に、経年的に消耗した陽極に対しても発生電流が精度よく推定できました。また、陽極の取り付け位置や個数の制限を受けることなく、正確な陽極の寿命予測ができました。

ここに、クラスタリングとはデータ解析手法の1つで、データの集合をある共通の特徴を持つ部分集合に振り分ける手法です。

4.4 状態量推定による陽極の発生電流推定方法【特許出願中】

本発明は、照合電極を搭載した移動体の位置や姿勢が不明な状態でも、陽極から出力される電流を精度良く推定することができる発生電流推定方法に関するものです。陽極近傍の電位測定状況を図6に示します。

4.2 項で紹介しました手法では、海水中における電位測定治具（移動体）自身の位置は既知であり、ガイド部に沿って鉛直に移動すると仮定していました。しかしながら、海洋環境においてはうねりや波浪といった様々な自然条件の影響により、陽極から出力される電流を推定する上で前提となる照合電極が、必ずしも所定の位置には無く、推定結果が不正確となる場合があります。

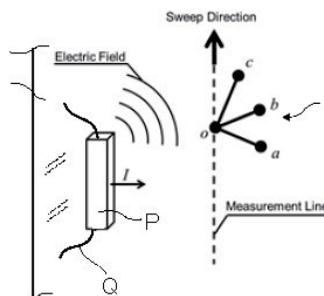


図6 陽極近傍の電位測定状況

前記課題に対し、移動体の位置における電位の推定値が真値に近付くように電位を確率的に求める状態量推定を行うことで、陽極から出力される電流を最も確からしく推定することができました。

ここに、当社が行う状態量推定とは、測定した位置情報が曖昧な複数の電位から、正確な測定位置や陽極の発生電流を推定する手法です。

参考文献 1) 経済産業省 特許庁、日本の十大発明家、p.2~3.

逆解析による陽極発生電流推定技術

技術開発部 技術研究所 斎藤達哉, 田代賢吉
技術開発部 後藤 大, 小泉文人

1. 緒言

海洋・港湾鋼構造物の下部工を健全に維持するための防食技術として、流電陽極方式による電気防食工法が広く普及している。電気防食された鋼構造物の維持管理の手法としては、防食対象の電位および陽極の残寿命を把握することが標準となっている。使用される陽極は時間の経過と共に消耗するため、電位や残寿命を経時的に把握することが、スムーズで効率的な維持管理につながる。

この内、実用化されている陽極残寿命の予測技術としては、①残存寸法測定による消耗量調査、②電圧降下法による発生電流測定（水中シャントによる）¹⁾があるが、水中での作業を伴うため、安全面やコスト面における課題がある。

当社ではこれらの課題を解決するため、従来手法より高度な方法である「逆解析」による数値シミュレーションを検討してきた²⁾³⁾。逆解析のシミュレーション結果は既報⁴⁾にて紹介しているため、本稿では、実用化に向けた検証例を紹介する。

2. 逆解析手法

2.1 概要

本件ではデータ同化という手法を採用している。これは、数値シミュレーションと、測定した電位データを表す「観測量」をベイズ統計学に基づいて融合する計算技術であり、気象・海洋学において広く用いられている⁵⁾。この手法は、観測量と後述の状態空間モデルから推定したい状態量を求める一般化状態推定問題を定義し、この問題をデータ同化手法のひとつであるパーティクルフィルタにより解くものである。

2.2 状態空間モデル

定義した状態空間モデルの概略を Fig. 1 に示す。これは、単一の陽極の近傍を測定器が移動する様子を示している。ここで、陽極を取り巻く媒体は電気伝導率が均一な海水等である。測定器には4つの照合電極 $oabc$ が備わっており、測定器は媒体中を移動しながら一定のサンプリングタイム毎に観測量（各照合電極の電位差）を取得する。

本件における推定すべきパラメータを \mathbf{X} とすると、式(1)で表される。

$$\mathbf{X}_t = (x^t \ y^t \ z^t \ \alpha^t \ \beta^t \ \gamma^t \ I)^T \quad (1)$$

ここに、

$(x \ y \ z)$: データ取得位置の3次元座標

$(\alpha \ \beta \ \gamma)$: 測定器の回転状態を表すパラメータ

I : 発生電流（測定中変化しないものとする）

T : 行列の転置

t : 時刻

一方、取得した観測量をまとめて観測量ベクトル \mathbf{Y} とすると、式(2)で表される。

$$\mathbf{Y}_t = (\phi_{oa}^t \ \phi_{ob}^t \ \phi_{oc}^t \ \phi_{ab}^t \ \phi_{ac}^t \ \phi_{bc}^t) \quad (2)$$

ここに,

$o a b c$: 各照合電極

であり, ϕ_{oa} であれば, 照合電極 o — a 間の電位差を意味する.

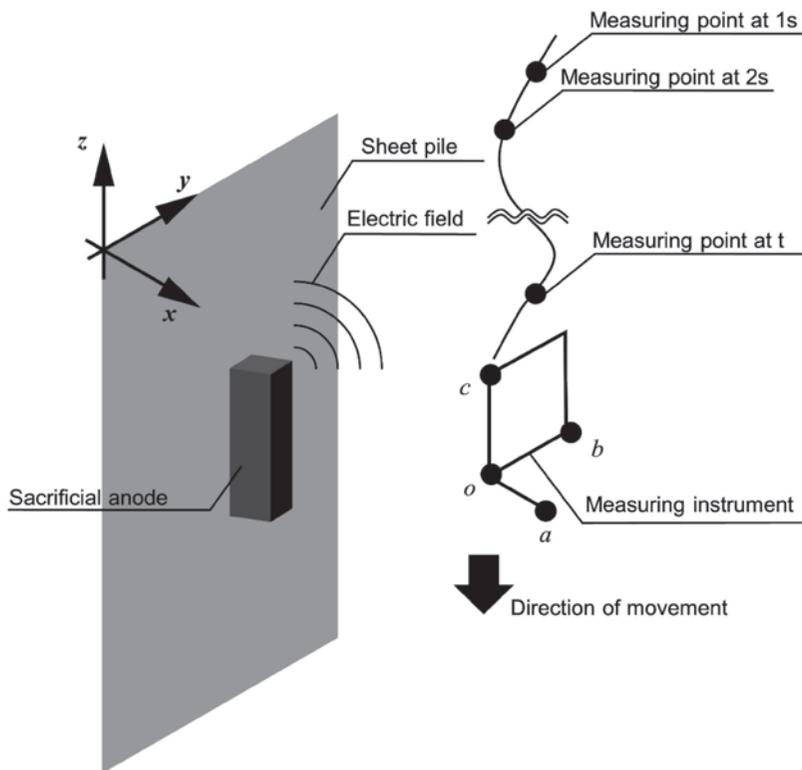


Fig. 1 定義した状態空間モデルの概略図

2.3 状態方程式のモデル化

測定器の経時的な移動挙動は数式として表現できる. この数式を状態方程式と呼び, この方程式のモデル化について述べる. 時刻 t における状態量ベクトル X_t が一時刻前の状態量ベクトル X_{t-1} に依存して確率的に決定される場合, 状態方程式は式(3)で表される.

$$X_t = X_{t-1} + m + w_t \quad (3)$$

ここに,

m : 入力ベクトル (状態量ベクトルの一時刻先の移動量)

w_t : システムノイズ

2.4 観測方程式のモデル化

観測方程式の構築について以下に述べる. 状態量ベクトル X_t から観測量ベクトル Y_t への変換が非線形関数 H に従うとすると, 観測方程式は式(4)で表される.

$$Y_t = H(X_t) + v_t \quad (4)$$

ここに,

v_t : 観測ノイズ

ここで, 非線形関数 H を以下のようにモデル化する.

いま、電解質で満たされた領域を想定し、イオンの蓄積や損失が生じないと仮定すると、領域内の電位 ϕ は式(5)のラプラス方程式を満たす。

$$\nabla^2\phi = 0 \quad (5)$$

ここに、

∇ ：微分演算子

式(5)は微分方程式であるが、このままでは解を得られない。そこで、式(5)を定電流密度・定電位の条件の下、境界要素法の定式化に従い解くことで、次式が与えられる⁶⁾。

$$\kappa\phi(p) = \frac{I}{s} \int_{\Gamma} \frac{1}{4\pi r} d\Gamma(q) \quad (6)$$

ここに、

κ ：電気伝導率

s ：陽極の表面積

Γ ：境界

r ：境界上の点 q から境界内の点 p までの距離

この式(6)を解くことで、領域内の任意の点における電位を計算することができる。

2.5 パーティクルフィルタの導入

パーティクルフィルタでは、式(1)に示す情報を含む「粒子」と呼ばれる推定値の候補を用いて解析を行う^{7,8)}。以下に解析の手順を示す。

- ① 式(3)を用いて、各粒子の一時刻先の状態を予測する。
- ② 式(6)を用いて、予測した各粒子の状態を観測量へと変換する。
- ③ これらの観測量と実測値を比較し、重みを算出する。
ここで言う重みとは、各粒子と実測値との近さを数値化したものである。
- ④ 重みに基づいた加重平均を行い、各時刻における推定値を求める。

3. 理論と現場の比較検証

既報⁴⁾では、理論の検証として数値シミュレーションを行った。本報告では現場で行った検証結果を述べる。

3.1 方法

国内のA岸壁に大型試験体(2×3m)を設置する試験を行った。試験体は、理論構築に用いた数値シミュレーションモデルを模擬したものであり、被防食体と陽極が構造上一体となっている。ただし、陽極は被防食体と絶縁し、外部電源により電流制御を可能とした。

供試体は、風や波浪による外乱の影響が少ないタイミングを選び、クレーンで海水中に浸漬させた。その後、測定器(照合電極)を、種々の条件で移動させる試験を行った。

3.2 結果

試験結果をTable 1に示す。判定は「実測値に対する推定値の許容差±0.1A」を暫定的な目安にしている。推定値と実測値を比較すると全ての条件で推定値が許容差内に収まっており、ほぼ正確な推定ができていると判断した。

Table 1 試験体による試験結果

結果 番号	実測値 ^{※1} [A]	推定値 ^{※1} [A]	推定値－実測値=X [A]	判定 (X : ±0.1A 以内)
No. 1	0.5	0.49	-0.01	合格
No. 2	1.0	0.94	-0.06	合格
No. 3	3.5	3.44	-0.06	合格

※1 実測値：電圧降下法による 推定値：逆解析手法による

4. 実用化に関する検証

前節の検証試験の結果、実用化に向け、作業者の作業効率、測定器の機能・性能、適正な測定データの採取方法に関し改善すべき課題があったため、これらを解決するための現場検証試験を行った。

4.1 方法

B岸壁にて、改良した機材を用いて測定を行った。B岸壁の概略図を Fig. 2 に示す。当該施設には 3.5A-50 年耐用のアルミニウム合金陽極 56 個が設置されており、内 3 個（図中の測定箇所 A1, A2, A3）に水中シャントおよび測定ボックスが設置されているため、電圧降下法による発生電流測定ができる（測定対象の陽極から発生する電流の正解値が分かる）。

測定状況を Fig. 3 に示す。測定器は、照合電極への影響を抑えるため、塩ビ管製 (Fig.3(a)) とし、内部に浮力調整のための錘を封入した。2.2 項で示したように測定器には 4 個の照合電極を取り付けた。また、測定器を上下移動および横移動させる際の効率化を図るため、滑車と車輪を備えた測定架台を準備した。なお、測定従事者は 2 名である。

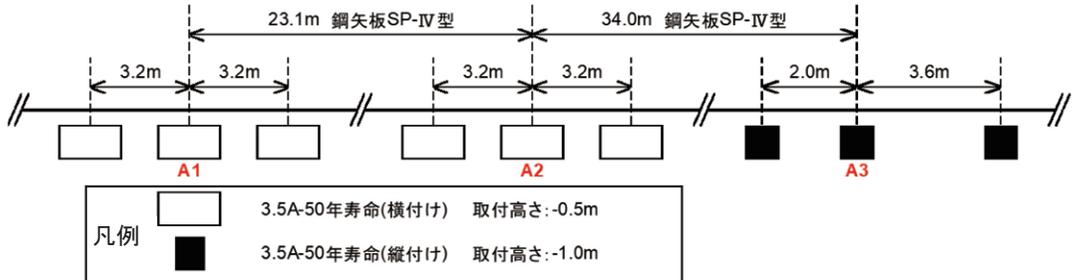


Fig. 2 B岸壁の概略図



(a)測定器(照合電極)

Fig. 3 測定状況

(b)測定状況

4.2 結果

A1～A3における陽極設置後2週間経過時の陽極発生電流の実測値と推定値をTable 2に示す。実測値は3.60～4.03Aであり、設計値の3.5Aよりも大きな値を示した。これは、B岸壁は無防食期間が長かったため、鋼矢板に生じていた錆層の還元に時間を要し、被防食体である鋼矢板と陽極間の電位差が大きく、電流の低減が遅れていることが原因と考えられる。一方推定値を見ると、いずれの条件においても実測値 $\pm 0.1A$ の許容差範囲内に収まっており、正確な推定が行えた。

以上の結果から、陸上からの簡易な計測により、逆解析手法による陽極発生電流の正確な推定が行えることが分かった。

また、さらなる実用化に向け、適正な人員配置、測定器の課題に対する要素も抽出できた。

Table 2 陽極発生電流の実測値と推定値の比較 (陽極設置後2週間経過)

測定箇所	実測値 ^{*2} [A]	推定値 ^{*2} [A]	推定値－実測値＝X [A]	判定 (X： $\pm 0.1A$ 以内)
A1	3.60	3.64	+0.04	合格
A2	4.03	4.06	+0.03	合格
A3	3.95	4.01	+0.06	合格

※2 実測値：電圧降下法による 推定値：逆解析手法による

5. まとめ

本報告では、より実用性の高い逆解析手法の開発を目指すため、新たにデータ同化手法を導入したことを説明した。これによって得られた知見を以下に示す。

- (1) 測定した電位データから発生電流などの状態量を推定する一般化状態推定問題を定義し、これをデータ同化手法のひとつであるパーティクルフィルタにより解く手法を提案した。
- (2) 実測値に対し、推定値は $\pm 0.1A$ の範囲内に収まっており、正確な推定が行えた。

<参考文献>

- 1) 国土交通省港湾局監修，“港湾の施設の維持管理技術マニュアル(改訂版)”，pp.206～207(2018) 一般財団法人 沿岸技術研究センター。
- 2) 米谷 直樹，天谷 賢治，審良 善和，田代 賢吉，飯田 知宏，山路 徹，“ベイズ推定を用いた海洋鋼構造物の犠牲陽極発生電流量同定手法の開発”，材料と環境，Vol. 62，No. 9，pp.326-333(2013)。
- 3) 平岡 泰明，大西 有希，天谷 賢治，斎藤 達哉，“逆解析による犠牲陽極の位置及び電流モニタリング手法”，第64回材料と環境討論会講演予稿集，pp.393-396(2017) 腐食学会。
- 4) T. Saito, K. Tashiro, K. Amaya, “Estimation of Self-position of Measurement Point Underwater and Output Current from Sacrificial Anode using Particle Filter”，NACE EAST ASIA & PACIFIC AERA CONFERENCE (2019) NACE.
- 5) 長尾 大道，伊藤 伸一，加納 将行，“スパースモデリングとの融合によるデータ同化研究の新展開”，システム/制御/情報，Vol. 61，No. 4，pp.132-137(2017) システム制御情報学会。
- 6) 青木 繁，天谷 賢治，宮坂 松甫，“境界要素法による腐食問題の解析”，pp.24-25(1998) 裳華房。
- 7) 矢野 浩一，“粒子フィルタの基礎と応用：フィルタ・平滑化・パラメータ推定”，日本統計学会誌，Vol. 44，No. 1，pp.189-216(2014) 日本統計学会。
- 8) 生駒 哲一，“パーティクルフィルタ～汎用的な非ガウスフィルタ～”，計測と制御，Vol. 56，No. 9，pp.644-649(2017) 計測自動制御学会。

製品紹介

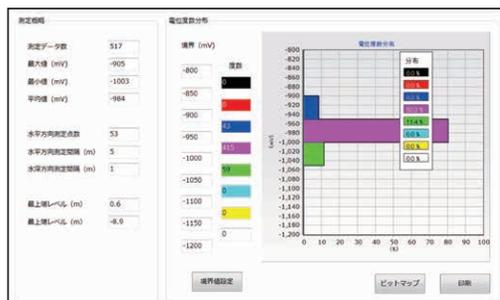
港湾鋼構造物電位計測器 マリンチェッカー

◆ 機能

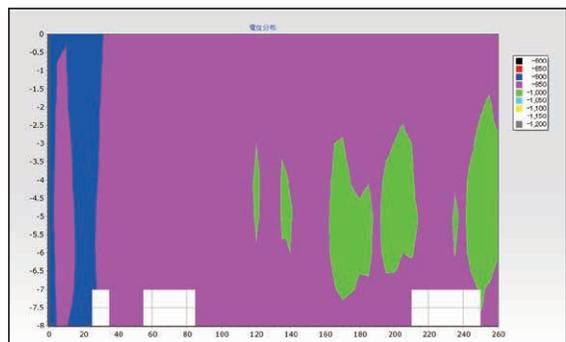
- ① データの自動記録 : 電位と水深を同時自動記録
- ② 統計処理 : 電位の最貴値と最卑値や度数分布を表示
- ③ 電位コンタ図 : 電位の分布状況をわかりやすく表示



マリンチェッカー



統計処理



電位コンタ図

◆ 特徴

本計測器は、岸壁上から複合センサを海中に投入することで、鋼構造物の電位とその水深を同時に記録することができます。記録情報は度数分布で表示され、電位コンタ図から鋼構造物の電位分布を視覚的に確認できます。

製品紹介

臨海プラント海水ライン防汚装置

省エネ海水電解防汚装置：SP型

臨海プラント工場等の海水ライン防汚を目的とした海水電解装置は**大電流**で電解するため設備投資費用が**高く**電力消費量も**大きい**等の問題がありました。

日本防蝕工業(株)は、およそ半世紀に渡り海水電解方式の海洋生物付着防止装置を3,000基以上製造、販売してきた実績のもと、初期費用を抑え低ランニングコストを実現した**省エネ**海水電解防汚装置をご提供します。



SP06-KF 型 「塩素発生量：9.4kg/h」

電解槽

SP06-KA (塩素発生量：1.57kg/h) × 6 槽

設置寸法：

120W × 90D × 1,900H (cm)

SP06KA 重量：

20kg/樹脂製槽，33kg/金属製槽

電源装置

電力消費量：40kW

設置寸法：95W × 90D × 165H (cm)

重量：700kg

省エネ海水電解防汚装置：SP型の特徴(従来品との比較)

初期設置費用

電源装置、電解槽の小型化により搬入、設置場所が従来に比べ大幅に改善されております。

また、電解電流がおよそ従来品の1/20になるため電力配線系統の設置費用も安価です。

ランニングコスト

「陽極更新」

重機不要、電解槽(SP06-KA)の重量が20kg(樹脂製)、33kg(金属製)と軽量ですので、作業員1~2人、所要時間半日程度と経済性に優れています。

「電力費用」

電源装置の変換効率が高く、従来品比較で電力費用の約**48%低減**を実現しています。

例：塩素発生量9.4kg/hの電力使用量は従来77kWでしたが、本装置は40kWで年間電力費用換算すると約**500万円**低減できます。(16円/kWh換算；当社比)

全国を網羅するサービスネットワーク

- 北海道地区**
- 北海道支店
〒060-0807 札幌市北区北七条西 1-1-2 (SE札幌ビル 6階)
TEL (011) 736-6591 FAX (011) 736-6593
- 東北地区**
- 東北支店
〒980-0804 仙台市青葉区大町 2-15-28 (藤崎大町ビルディング 1階)
TEL (022) 264-5511 FAX (022) 265-6506
- 関東甲信越地区**
- ◎本社
〒144-8555 東京都大田区南蒲田一丁目 21 番 12 号 (昭和ビル)
TEL (03) 3737-8400 FAX (03) 3737-8479
 - 広域営業部 (本社内)
TEL (03) 3737-8441 FAX (03) 3737-8459
 - 東京支店 (本社内)
TEL (03) 3737-8450 FAX (03) 3737-8458
 - 千葉営業所
〒260-0834 千葉市中央区今井 1-20-1 (Y's21 ビル 2階)
TEL (043) 263-2118 FAX (043) 263-2558
 - 新潟営業所
〒950-0086 新潟市中央区花園 2-1-16 (三和ビル 3階)
TEL (025) 244-0911 FAX (025) 247-6030
- 中部地区**
- 名古屋支店
〒464-0075 名古屋市千種区内山 1-10-10
TEL (052) 735-3481 FAX (052) 735-3480
 - 四日市営業所
〒510-0093 四日市市本町 1-1 (服部ビル 3階)
TEL (059) 351-7163 FAX (059) 353-8599
- 関西地区**
- 大阪支店
〒530-6004 大阪市北区天満橋 1-8-30 (OAPタワー 4階)
TEL (06) 6356-9800 FAX (06) 6356-9820
 - 神戸営業所
〒651-0085 神戸市中央区八幡通 4-1-38 (東洋ビル 7階)
TEL (078) 242-2535 FAX (078) 242-5426
 - 本四営業所
〒700-0962 岡山市北区北長瀬表町 3-1-12 (北長瀬駅前IIビル 1階)
TEL (086) 805-0287 FAX (086) 244-1077
- 中国地区**
- 中国支店
〒730-0051 広島市中区大手町 5-1-1 (大手町ファーストビル 3階)
TEL (082) 243-2720 FAX (082) 248-2364
 - 徳山営業所
〒745-0073 周南市代々木通り 1-30 (山陽ビル 4階)
TEL (0834) 31-3762 FAX (0834) 31-3791
- 九州地区**
- 九州支店
〒810-0013 福岡市中央区大宮 1-4-34 (五常物産ビル 2階)
TEL (092) 523-8001 FAX (092) 523-8002
 - 沖縄営業所
〒900-0006 那覇市おもろまち 4-10-18 (タカダ新都心マンション 2階)
TEL (098) 862-0226 FAX (098) 864-2383