海洋鋼構造物の電気防食アルミニウム合金陽極の設計手法

眞 弓 勝 彌*

* 株式会社ナカボータック技術統括部 (元)

Design Procedure of Aluminum Alloy Anodes for Cathodic Protection of Steel Structure in Seawater

Katsuya Mayumi*

* Nakabohtec Corrosion Protecting Co., Ltd., General Tech Dept., formerly

The anode design technique used widely by the cathodic protection with the galvanic anode system such as the marine steel structures was explained. Firstly, it introduced the design technique with a present galvanic anode system, and the problem was arranged. Next, the ideal way of the design technique for based on the electrochemistry further the enumeration of an overseas design method, the difference, and the example was considered. Finally, it proposed the design technique that conformed to the realities and was able to be applied on the site by adding some corrections to a present design technique.

Key words : marine steel structures, cathodic protection method with galvanic anode system, rate determining step (RDS), dissolved oxygen diffusion limiting current density, protection current density of steady state

1. はじめに

海洋鋼構造物の防食は、適正な防食効果の維持とメンテナンスフリーが長年間にわたり要求されるため、電気防食がよく用いられる。電気防食は、不均一腐食に対する防食効果が高く、新設/既設と水中/土中を問わず適用できる、維持管理が容易である、経済的である、などの優れた特長を有する。国内では1960年代から海洋鋼構造物などに採用され、施設の延命に貢献している。

電気防食の設計は、(財)沿岸技術研究センター発行の「港湾鋼構造物防食・補修マニュアル(改訂版)」などの参考図書に準拠することが多い。一般に、抵抗率の高い淡水環境や河川水の混入で抵抗率が著しく変動する環境以外は図1の選択手順に従った流電陽極方式が用いられている¹⁾。

流電陽極方式による電気防食設計は、対象鋼構造物の面積計算、防食電流密度の設定と防食電流の算定、陽極設計(材質・設置法・電流分布の検討、設置個数計算、形状設計)および陽極配置図作成などから成っている。特に陽極形状設計は、電気防食のコストパフォーマンスに著しく影響するので重要である。流電陽極方式は、ガルバニ電池を応用した技術であるため、単なる電気回路として考えるのではなく、電気化学の科学と工学に基づいて考える必要がある。

本稿では、流電陽極方式における現行の陽極設計手法とその問題点を解説し、さらに実例を挙げて、電気化学に基づいた設計手法のあり方について考察する。最後に、現行手法に若干の修正を加えることで、実態に即応し、かつ現場で応用できる設計手法を提案する。

図1 防食方式の選択手順¹⁾

2. 現行の陽極設計手法

2.1 陽極の選択

海洋鋼構造物は、期待防食有効期間が長いいため、長寿命で大型の陽極(40~200 kg)を使用することが多い。陽極に用いる金属には、アルミニウム、亜鉛、マグネシウム

* 〒104-0033 東京都中央区新川 2 丁目 5 番 2 号 (2-5-2, Shinkawa, Chuo-ku, Tokyo, 104-0033 Japan)

ムなどの合金がある。中でもアルミニウム合金陽極は、単位質量当り有効電気量が他の二つより大きいため、特に経済的で、多く使用されている。以下本稿では、必要に応じてアルミニウム合金陽極を例に挙げて解説する。

2.2 陽極設計

アルミニウム合金陽極を用いて海水中の鋼を電気防食する場合の電極の反応式は以下となる。

- 1) 陽極(アノード)反応： アルミニウムが犠牲になって腐食消耗

- 2) 陰極(カソード)反応： 海水中の溶存酸素が消費

流電陽極方式による電気防食では、電氣的に閉回路を形成しているため、二つの反応の電気量は常に等しいと置いている。このことは陽極設計上の基本である。

実際に陽極設計に用いられている計算式の具体例を以下に示す。なお、本稿中の各式や文章で用いた記号と単位を一括整理して表1に示す。

(1) 陽極発生電流 I_a

陽極発生電流 I_a には、陽極初期発生電流 $I_{a(\text{初期})}$ と陽極平均発生電流 $I_{a(\text{平均})}$ がある。陽極初期発生電流 $I_{a(\text{初期})}$ は、防食対象物の電気防食状態達成に必要な陽極数量の計算に用いられ、陽極平均発生電流 $I_{a(\text{平均})}$ は、陽極寿命の計算に用いられる。

1) 陽極初期発生電流 $I_{a(\text{初期})}$

陽極初期発生電流 $I_{a(\text{初期})}$ は、オームの法則より陽極種類によって決められた一定の電位差（有効電位差： ΔE ）を陽極接水抵抗（ R_a ）で除した式(1)を用いて計算している。

$$I_{a(\text{初期})} = \frac{\Delta E}{R_a} = \frac{(E_c - E_a)}{R_a} = \frac{0.25}{R_a} \quad (1)^{2), 3)}$$

式(1)の分母の抵抗は、本来電解質中の陽極と陰極の

表1 使用記号の説明

記号と単位		内 容
D	(cm)	陽極直径（台形の場合は等断面積の円の直径に換算）
d	(g/cm ³)	陽極密度（Al 陽極の場合は一般的に 2.6～2.8）
B_a	(V)	Al 陽極の閉路電位
E_c	(V)	防食対象構造物の電位
h	(h/y)	1年間の時間数（8760 h/y）
$I_{a(\text{初期})}$	(A/個)	陽極初期発生電流（ $=0.25/R_a$ ）
$I_{a(\text{平均})}$	(A/個)	陽極平均発生電流（初期発生電流×電流低減率 k ）
I'	(A/個)	1個の陽極が分担する防食電流（ $I_{c(\text{平均})}$ に対応） 〔分担防食面積 $S_c \times$ 平均（維持）防食電流密度〕
I_c	(A/個)	防食電流（初期/平均、 $I_c = S_c \times i_c$ ）
$I_{c(\text{初期})}$	(A/個)	初期防食電流（ $=S_c \times i_{c(\text{初期})}$ ）
$I_{c(\text{平均})}$	(A/個)	平均（維持）防食電流（ $=S_c \times i_{c(\text{平均})}$ ）
i_c	(A/m ²)	設計防食電流密度（初期/平均）
$i_{c(\text{初期})}$	(A/m ²)	設計初期防食電流密度
$i_{c(\text{平均})}$	(A/m ²)	設計平均（維持）防食電流密度（ $=i_{c(\text{初期})} \cdot k$ ）
k	(—)	電流低減率（定常値/初期値）* 陽極電流： $I_{a(\text{平均})}/I_{a(\text{初期})}$ ，陰極電流： $I_{c(\text{平均})}/I_{c(\text{初期})}$ * $k = \Delta E'/0.25$, [但し, $\Delta E' = (E_c - E_a)$]
L	(cm)	陽極長さ
q	(A・h/kg)	陽極の kg 当りの有効電気量（2600 A・h/kg）
Q	(A・y/個)	陽極1個当たりの有効電気量
R_a	(Ω)	陽極接水抵抗（陽極形状 D と L ，海水抵抗率 ρ の関数），文章中では R_m （金属抵抗）， R_e （電解質の抵抗）， R_c （陰極接水抵抗）なども使用している。
S_c	(m ² /個)	1個の陽極が分担する防食面積〔防食面積÷陽極設置個数〕
T	(y)	陽極寿命〔式(4)の計算結果〕
t	(y)	陽極設計寿命（所要陽極最低正味質量計算に使用） ⇒計画防食年数
u	(—)	陽極使用率（現行設計では考慮しないので 1.00 とする）* * 今後の検討課題（ここでは省略）
W_0, W	(kg/個)	陽極質量 W_0 ：分担防食電流と単位質量当り電気量からの計算した陽極質量 W ：陽極容積と密度から求めた陽極質量（内部心金容積の考慮必要）
ΔE	(V)	陽極の種類で定まる一定の電位差 通常，Al 陽極と鋼材の場合は 0.25 V [∵ $E_c - E_a = -0.80 \text{ V} - (-1.05 \text{ V})$]* * 防食対象構造物の電位 E_c が防食電位 -0.80 V (vs. Ag/AgCl/海水) に達した時，陽極閉路電位 E_a (Al 陽極の実用電流密度域の陽分極特性等を考慮して -1.05 V に設定) との間で保持されている電位差を意味する。
ρ	(Ω・cm)	海水抵抗率
添え字		a : anode (陽極), c : cathode (陰極)

接水抵抗 R_a と R_c および両極間を結ぶ金属抵抗 R_m の総和の $R_a + R_c + R_m$ であるが、実際には R_a に比べ R_c と R_m が十分小さいため、近似して R_a だけとしている^{4), 5)}。また、海水中のアルミニウム合金陽極の場合、陰極電位 $E_c = -0.80$ V, 陽極電位 $E_a = -1.05$ V とし $E_c - E_a = 0.25$ V を用いている^{2), 3)}。

2) 陽極平均発生電流 $I_{a(\text{平均})}$

陽極平均発生電流 $I_{a(\text{平均})}$ は式(1')に示すように陽極初期発生電流 $I_{a(\text{初期})}$ に電流低減率 k を乗じて求めている。

$$I_{a(\text{平均})} = I_{a(\text{初期})} \times k \quad (1')$$

k の値は防食期間が5年, 10年, 15年以上の3ケースに対し0.55, 0.52, 0.50と使い分けている²⁾。

(2) 陽極接水抵抗 R_a

陽極接水抵抗 R_a は陽極形状(等価直径 D と長さ L)と海水抵抗率 ρ の各パラメータを用いて計算されている。陽極形状が角柱または円筒の場合の計算例を式(2)に示す。

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{D} - 1 \right) \quad (2)$$

その他にも多種多様の式が使われる^{3), 6)}。

(3) 陽極質量 W

陽極質量 W は、式(3)に示すようにカソード反応から求められる分担防食電流から計算される最少正味質量 W_0 以上として定義される。

1) 分担防食電流と電気化学等量から求めた陽極質量

$$W_0 = \frac{I_{c(\text{平均})} \times t}{(q/h)} = \frac{I_{c(\text{初期})} \times k \times t}{0.297} \quad (3'')$$

2) 陽極体積と密度から求めた陽極質量

$$W_0 = \pi D^2/4 \times L \times d \times 10^{-3} \geq W_0 \quad (3')$$

(4) 陽極寿命 T

陽極寿命 T は、式(4)に示すように式(1')に示した陽極平均発生電流 $I_{a(\text{平均})}$ と陽極質量 W から計算している。

$$T = \frac{Q}{I_{a(\text{平均})}} = \frac{(q/h) \times W}{I_{a(\text{平均})}} = \frac{0.297 W}{I_{a(\text{初期})} \times k} \quad (4'')$$

2.3 現行設計手法の課題

2.2に示した現行設計手法による陽極発生電流、陽極接水抵抗および寿命の計算には次のような課題がある。

(1) 酸素拡散限界電流による防食電流の上限の設定

陽極形状、すなわち D と L は目的性能である陽極初期発生電流 $I_{a(\text{初期})}$ ならびに寿命 T とから式(1)~(4)の関係式を用いて計算されている。

その結果得た陽極形状の適否判定は、次の3通りに区分される。

① 陽極形状が適当な場合

陽極初期発生電流 $I_{a(\text{初期})}$ と寿命 T が設計目標を満足するので、“適”。

② 陽極形状が小さい場合

陽極接水抵抗 R_a が大きくなるため、陽極初期発生電流 $I_{a(\text{初期})}$ が小さくなり、必要防食電流を満たさないで“否”。

③ 陽極形状が大きい場合

陽極接水抵抗 R_a が小さくなるため、陽極初期発生電流 $I_{a(\text{初期})}$ が過大となり、寿命 T が確保できないので“否”。

これらの判定結果の中で、①と②は設計条件通りであ

るから理解できる。しかし③の陽極初期発生電流 $I_{a(\text{初期})}$ が大きいことは単に必要防食電流を流すのに十分な大きさの陽極形状であることを表しているに過ぎず、必ずしも寿命が確保できないわけではない。

一般に、海水中の溶存酸素濃度は10 ppm程度以下であるのでカソードにおける酸素の供給速度が律速段階になる。このため流電陽極方式では陽極発生電流 I_a は酸素拡散限界電流密度が上限となる⁷⁾⁻¹⁴⁾。現行の設計手法ではこの陽極発生電流 I_a に上限が存在するという概念が欠落している。したがって、③の判定については修正が必要であるが、これは実際の作動事例や海外の設計例を紹介した上で、第4章で提案することとする。

(2) 経時変化の影響

一般に電気化学反応は“反応速度=活性化エネルギー/反応抵抗”なる関係で進行するが、速度式の各項が互いに非線形の動的関係で変化するため単純な Ohm の法則では計算できないことがよく知られている^{7), 10)}。

特に、海水中の鋼材にアルミニウム合金陽極を用いて電気防食した場合、鋼材表面の pH 上昇に伴い Ca^{2+} や Mg^{2+} などが析出沈殿して皮膜を形成するエレクトロコーティングと呼ばれる現象が生じる。このような皮膜は溶存酸素の拡散障壁として働くため、防食電流密度は時間の経過と共に初期の酸素拡散限界電流密度よりさらに低下し、一定の期間経過後に定常化する傾向にある¹⁵⁾⁻¹⁹⁾。現行設計手法で用いられる電流低減率 $k = 0.50 \sim 0.55$ は、このようなエレクトロコーティングの影響を考慮しているものであるが、一律定数として取り扱われている。

一方、有効電位差 $\Delta E = 0.25$ V を用いて計算する式(1)は、陽極の大きさが防食開始直後に分担防食範囲に対して必要な電流が流せるか否か、すなわち防食基準電位をクリアする際の必要防食電流が得られるか否かを確認しているに過ぎない。しかし、実際に式(1)の線形の関係が成り立つのは防食期間全体から見ればごく一時期に過ぎず、本来電流低減率 k や有効電位差 ΔE は、時間の関数として取り扱うべきである。時間の関数として厳密に取り扱うことは、事実上困難であることはわかるが、防食効果の確実性のために少なくとも陽極消耗に伴う形状の経時変化を考慮して使用限界時においても性能確認がなされるべきであろう。

3. 電気防食の実際の作動事例

3.1 電位と電流密度および陽極形状変化の関係

図2と3は、アルミニウム合金陽極を用いて実際の鋼構造物に電気防食を施した場合の構造物の電位と防食電流密度の経時変化の例である^{20), 21)}。

図2は標準防食電流密度で設計した泉南沖の事例、図3は防食電流密度を50%増して設計した神戸港の事例である。前者は防食開始直後から6カ月目まで自動記録計で連続測定した結果であり、後者は11年間断続的に測定した結果である。泉南沖については構造物の電位、陽極との電位差、電流密度およびそれらの変化率などを時系列に整理し表2にまとめる。

泉南沖の場合、構造物の電位は防食開始時には、自然電位の -0.60 V であったが、4日目までに防食基準電位の -0.80 V を超え、6カ月後には -0.95 V に到達した。

図2 実構造物の電位と防食電流密度の推移(泉南沖/6カ月間)²¹⁾ 図3 実構造物の電位と防食電流密度の推移(神戸港/11年間)²¹⁾

一方、電流密度は6カ月後には初期の半分以下まで低減した。6カ月間全体で見れば、陰分極が進行して電位が卑化するにつれて電流密度は少しずつ減衰する傾向にあったが、グラフの傾きなどから判断して6カ月経過時の電位と電流密度はほぼ定常値に近い値であると考えられる。

一方神戸港の場合は、図3より、調査した11年間で電位は $-0.83 \sim -0.93$ V (平均 -0.89 V)、電流密度は $0.070 \sim 0.036$ A/m² (平均 0.052 A/m²) で推移した。電位および電流密度が減衰傾向にあったのは精々1年目までで、比較的安定して減衰した泉南沖と異なり、調査の度にかなり大きく変動した。

図4は、陽極消耗に伴う形状変化によって陽極形状と各パラメータが防食開始時に比べどのように変化するかを試算した結果である。図から、残存質量が20%となる時点 ($L=80\%$, $D=50\% \rightarrow 0.8 \times 0.5^2 = 0.20$) では、陽極接水抵抗は140%に増大し、陽極発生電流は初期の約70%に減少することがわかる。

図5は、前出の神戸港の調査において行った形状測定

表2 電位/電流密度/低減率の関係 (泉南沖/6カ月間)²¹⁾

経過時間	<4日	4日後	3ヵ月後	6ヵ月後
構造物の電位 (V)	-0.80	-0.82	-0.90	-0.95
ΔE (V)	0.25	0.23	0.15	0.10
$k (\Delta E' / 0.25)$	1.00	0.92	0.60	0.40
防食電流密度 (A/m ²) *	0.122**	0.112	0.066	0.056
$k' (i / 0.122)$ ***	1.00	0.92	0.54	0.46

* 陽極発生電流(実測値)を海水中換算防食面積で割算した値

** 4日後の電流値から逆算した ($0.112 / 0.92 = 0.122$)

*** -0.80 V到達時における各時点での電流密度低減割合

図4 陽極消耗に伴う各パラメータの経年変化 (試算値)²¹⁾ 図5 陽極消耗調査例 (神戸港/11年間)²¹⁾

結果であるが、質量はほぼ設計ラインに沿って順当に消耗したことがわかる。したがって、前述試算の通りならば、陽極が消耗して形状が小さくなるほど陽極発生電流は減少して行かなければならないが、実際には図3に示したように陽極の消耗末期でさえ初期より大きな電流密度を示すこともあった。これは現場が入り組んだ内湾のため、河川水の混入、海水汚染、季節変化、海象変化等の環境変化の影響によって、構造物の電位が貴化して陽極との電位差が拡大したためと考えられる。このことは、陽極発生電流は実際の有効電位差に支配されており、防食期間中、必ずしも陽極形状や陽極接水抵抗だけに拘束されるのではないことを意味する。

3.2 構造物の電位と陽極発生電流の関係

実構造物の電位と電流の追跡調査結果より、陽極発生電流は、構造物の電位に大きく影響を受けると考えられる。防食期間中の陽極と構造物の間の平均電位差に対し、陽極寿命および陽極発生電流の増減割合を試算した結果を図6に示す。この試算によれば、有効電位差に対し陽極発生電流は正比例し、寿命は反比例することがわかる。

3.3 被防食面積の変化の影響

電気防食された海洋鋼構造物の干満帯部に有機ライニングやペトロラタムライニングを併用すると、干満帯の所要防食電流が著しく低減し陽極寿命が延びる傾向にあるとの報告例がある^{22), 23)}。これは、塗覆装によって陰極側の面積が実質的に小さくなり、所要防食電流が減るためである。殊に、干満帯部分では防食電流

図6 電位差 ΔE と陽極寿命/発生電流の関係の試算値 ($E_a = -1.05\text{ V}$ と仮定)

密度が海水中深部より著しく大きいので一層の効果をもたらすものと考えられる。したがって干満帯部分に塗覆装を併用する手段は防食の信頼性向上だけでなく経済的でもあるので、今後より積極的に活用すべきであろう。

4. 国内陽極設計手法に対する提案

4.1 電気化学の概念導入の必要性

流電陽極方式による電気防食は、防食対象の鋼材より卑な金属を短絡して人為的に電池を形成させた際に生じる電流を利用して鋼材を腐食しない電位域に移行させる防食方法であり、異種金属接触腐食の原理を応用した技術である。

Uhlig's Corrosion Handbook では、異種金属接触腐食に関係する因子は表3の左列(a)～(g)に示す各項目であると記している²⁴⁾。流電陽極方式による電気防食法は表3の各項目のバランスを考慮して陽極設計全体の組み立て方を見直す必要がある。

現行設計手法と表の各項目を対比した時、(a)電極電位 (d)表面状況、(e)電解質特性、(g)幾何学的要素等については考慮されている点もある。しかし、金属の腐食や陰極防食の原理および反応機構、防食電流と環境因子、電位測定と照合電極等についての電気化学の考え方が不十分なところも散見される。例えば、最近整備された欧州のCEN規格EN12473「海水中の陰極防食の原理」²⁵⁾等では上記の各項目についてもかなり詳細に記述しているので、これらを参考にして電気化学の基本に忠実な骨組作りが必要と思われる。特に、2.3節で述べた現行設計手法の陽極発生電流から寿命を計算する際に陽極電流と陰極電流がバランスしない点は、早急に改めねばならない重要課題と考える。

4.2 海外の陽極設計手法の例

欧米における電気防食の歴史は古く、DNV(Det Norske Veritas)、NACE(National Association of Corrosion Engineers)、BSI(British Standards Institution) および

CEN [European Committee for Standardization (Comite Europeen de Normalisation)] 規格等が整備・活用されている。

特にノルウェー船級協会のDNV規格(RP-B401, Cathodic Protection Design)²⁶⁾は、電気化学の考え方を取り入れ、基準の各所で活用しているので紹介する。DNV規格の陽極設計の要点を整理し表4に示す。

DNV規格では所要防食電流 I_c を求めるための初期設計電流密度 $i_{c(初期)}$ と終期設計電流密度 $i_{c(終期)}$ [両方併せて $i_{c(初期/終期)}$ と表示] および平均設計電流密度 $i_{c(平均)}$ を想定して、前二者は陽極の設置数量と形状決定のために、後者は陽極必要最低質量計算のために用いると定義している。DNV規格の陽極設計で用いられる各計算式を整理して表4の最後に記載した。

また、陽極1個の有効電気量が q_a で、出力電流(初期/終期)が $I_{a(初期/終期)}$ の陽極を n 個設置する場合、総陽極有効電気量が総所要防食有効電気量以上でなければならないこと、および総陽極出力電流(DNVの陽極出力電流と日本の陽極発生電流は同義)が総所要防食電流以上でなければならないことをそれぞれ式(5)、(6)で規定している。

$$Q_a = n \cdot q_a \geq I_{c(平均)} \cdot t \cdot 8760 \quad (5)$$

$$n \cdot I_{a(初期/終期)} \geq I_{c(初期/終期)} \quad (6)$$

このようにDNV規格では、被防食構造物の所要防食電流 I_c と陽極から供給される出力電流 I_a が明確に使い分けられており、また所要平均防食電流 $I_{c(平均)}$ という言葉の定義はあるが、陽極平均出力電流 $I_{a(平均)}$ は定義されていない。また、陽極平均発生電流 $I_{a(平均)}$ がないために日本の設計手法の2.2項式(4)に相当する寿命計算式はない。これは時間変化を考慮して陽極平均発生電流 $I_{a(平均)}$ を計算することが困難であるため、ならびに寿命は所要防食電流 $I_{c(平均)}$ を用いて計算できると判断しているためと考えられる。ただし、所要防食電流 $I_{c(平均)}$ は式(7)より計算される。

$$I_{c(平均)} = S_c \times i_{c(平均)} \quad (7)$$

表3 異種金属接触腐食要因と陽極設計考慮点

異種金属接触腐食の要因 ²⁴⁾	陽極設計における考慮点
(a) 電極電位	陽極設定電位, 防食基準電位, 有効電位差
(b) 反応 溶存酸素還元, 水素発生	過防食による水素脆化, 塗膜損傷(淡水中でのMg陽極使用時)
(c) 冶金的要因 合金, 熱処理, 機械作用	※
(d) 表面状況 表面処理, 不動態皮膜, 腐食生成物	塗覆装の種類, 塗膜欠陥率, 防食電流密度低減率
(e) 電解質特性 組成, pH, 導電率, 温度, 媒体容積, 流速	海水抵抗率(ρ), 流速, 温度, 海水汚染
(f) 環境効果 湿気の形態, 乾湿周期, 日光輻射, 気候, 季節変化	所要防食電流密度 定常化に達する時間
(g) 幾何学的要素 面積, 距離, 位置, 形状, 向き	陽極接水抵抗(R_a), 陽極の形状(面積)と海水抵抗率の関数

※ 現在のところ言及例が少ない。

表4 DNV 規格の陽極設計に関する要点²⁶⁾

用 語	定 義	備 考
初期設計電流密度 $i_{a(初期)}$	大気中で生じたさび、またはミルスケールの付いた裸金属の暴露面が、電気防食状態に達するのに必要とする陰極電流密度である。石灰性スケールの成長が実際の所要電流を減少させるため、平均終期電流密度より高い。適切な初期設計電流密度は、防食性の石灰性スケールの急速な形成で効果的な分極を可能にする。	初期の分極達成に十分か否かから確定するための所要電流計算に用いる。陽極の初期寸法から求めた陽極所期出力電流の照合に資する。
後期設計電流密度 $i_{e(終期)}$	成長した海洋生物および石灰層を持つ金属表面に用いられる。台風による衝撃や洗浄作用等で、そのような層が部分的または定期的に損傷した場合でも、再分極によって回復するのに備えて設計される電流密度で、初期設計電流密度より小さい。初期および終期設計電流密度は共に、より貴な電位(すなわち“非防食”)から防食範囲への動的な分極期間中の電位が -0.80 V (Ag/AgCl/海水)の構造物の防食電流密度に適用する。	構造物が再分極するのに十分であるか確定するための所要電流計算に用いる。陽極の使用率まで消耗した時点の寸法で計算した終期出力電流との照合に資する。
平均(維持)設計電流密度 $i_{c(平均)}$	電気防食システムが定常状態に一旦達した後に予測される防食電流密度である。陰分極の進行に伴って電位差が十分縮小した後の平均(維持)設計電流密度は、初期および終期の設計値より小さい。“定常状態”の前の初期の分極は一般に時間が大変短いから、時間で荷重している電流密度は定常状態の電流密度に非常に近くなる。	設計寿命を通して防食状態を維持するために必要な陽極材の最低質量を算出するための必要電気量計算に用いる。
所要電流 I_c	電気防食システムの初期と終期および平均(維持)の3つの設計電流密度を用いてそれぞれ別々に計算しなければならない。それぞれの所要電流 I_c は、被防食構造物の防食面積 S_c に各設計電流密度 $i_{c(初期)}$ 、 $i_{e(終期)}$ 、 $i_{c(平均)}$ または $i_{c(維持)}$ をそれぞれ乗じて求める。コーティング損傷率(0~1.0)や他施設に漏洩する電流等を考慮することがある。	陽極のタイプは、棒状スタンドオフ型、板状裏面密着型、プレスレット型等がある。
陽極質量の計算	電気防食を維持するために必要とする陽極の総正味質量 $M(\text{kg})$ は、防食対象物の所要電流 $I_{c(平均)}$ と設計寿命 $t(\text{y})$ から式(a)を用いて計算できる。ここで、 u は陽極利用率(Anode Utilization Factor)、 ε は1kg当りの陽極の有効電気量である。	海洋沈殿物を含む不通気性環境(成長した海洋生物および石灰層を持つ金属表面)では、もっと卑な電位 -0.90 V が十分な防食達成条件なのでモニター基準に使われるが、陽極出力電流計算には関係しない。
陽極数量の計算	選定される各種タイプ陽極に対し、陽極数量、陽極寸法および陽極正味質量が、防食対象物の所要防食電流に関係する初期/終期出力電流(A)および電流要領(A·h)に対する所要条件に適合するよう選定しなければならない。 陽極出力電流 I_a は、式(b)を用いてオームの法則 $[I_a = (E^o_c + E^o_a)/R_a]$ から計算する。ここで、 $E^o_a(\text{V})$ は陽極の閉路電位、 $E^o_c(\text{V})$ は通気性の海水中での炭素鋼および低合金鋼に対する設計防食電位で -0.80 V (Ag/AgCl/海水)、 $\Delta E^o = E^o_c - E^o_a$ は設計駆動電圧、 R_a は陽極抵抗である。 陽極電流要領が q_a の陽極 n 個を設置した時の総陽極電流要領 Q_a (すなわち $n \cdot q_a$)が計画防食期間中の所要防食電流容量以上でなければならないこと、および陽極 n 個の総陽極出力電流 $I_{a(初期/終期)}$ が電気防食の所要防食電流 $I_{c(初期/終期)}$ 以上であることを式(c)、(d)によって確認すること。	出力電流計算に使う陽極接水抵抗 R_a を計算する際に代入する陽極寸法は、初期出力電流に対しては陽極の初期寸法、終期出力電流に対しては陽極使用率 u まで消耗した時点の終期寸法を代入する。 ただし、添え字aとbは陽極(アノード)と被防食体(カソード)の意味
<p>【計算式のまとめ】</p> $M = \frac{I_{c(平均)} \cdot t \cdot 8760}{u \cdot \varepsilon} \dots\dots\dots (a) \quad Q_a = n \cdot q_a \geq I_{c(平均)} \cdot t \cdot 8760 \dots\dots (c)$ $I_a = \frac{\Delta E^o}{R_a} = \frac{E^o_c - E^o_a}{R_a} \dots\dots\dots (b) \quad n \cdot I_{a(初期/終期)} \geq I_{c(初期/終期)} \dots\dots\dots (d)$ <p>ただし M: 総陽極正味質量(kg) t: 設計寿命(y) I_c: 所要防食電流(A) U: 陽極の利用率(—) I_a: 陽極発生電流(A/個) m: 1個の陽極正味質量(kg/個) n: 陽極設置数量 [= T_c/T_a] (個) ε: 陽極の1kg当りの有効電気量(A·h/kg) Q_a: 陽極総有効電気量 [$M \cdot u \cdot \varepsilon$] (A·h) q_a: 陽極1個当りの有効電気量 [= $m \cdot u \cdot \varepsilon$] (A·h/個) ※初期(initial)/終期(final)</p>		

4.3 設計手法の改訂提案

ここでは、これまで述べてきた流電陽極方式における現行の陽極設計手法ならびにその課題をふまえ、修正案を提案する。

現行の陽極設計手法では、陽極寿命計算に使う陽極平均発生電流 $I_{a(平均)}$ は、 $I_{a(初期)}$ に電流低減率 k を乗じて求めた数値を用いている。この $I_{a(平均)}$ は被防食鋼構造物に流入する分担防食面積 S_c に対応する所要防食電流 $I_{c(平均)}$ と一致しなければならない。ところが、2.3(1)項で示した判定③のケースでは、流電陽極方式による電気防食であるにもかかわらず溶存酸素拡散限界電流密度を超える電

流が生じることになる。これについては根本的に改める必要がある。

$I_{c(平均)}$ は元々溶存酸素拡散限界電流密度を超えないものと考えて設定されるため、陽極形状は、まず式(3)により $I_{c(平均)}$ から陽極質量を計算し、次に式(3')を用いてこれを上回る形状を求めれば問題は生じない。むしろ溶存酸素拡散限界電流密度の制限なく計算される $I_{a(平均)}$ を用いて、式(4)から寿命を計算することに混乱の原因がある。したがって、寿命 T は式(4)を用いるのではなく、式(7)より1個の陽極が分担している所要防食電流 $I_{c(平均)}$ を計算し、

$$T = \frac{Q}{I_{c(\text{平均})}} = \frac{(q/h) \times W}{I_{c(\text{平均})}} = \frac{0.297 W}{I_{c(\text{初期})} \times k} \quad (8)$$

によって求める考え方に改めるよう提案する。

以上の改訂により、アノードとカソードの電気量の不整合が回避できると共に、陽極平均発生電流 $I_{a(\text{平均})}$ から求められる陽極寿命 T が陽極設計寿命 t (防食計画年数) を超えることはなくなる。その結果、③の計算による判定が“否”から“適”に変わり陽極形状の選択範囲が拡大するので、これまでのように不要な苦勞をしないで陽極の形状設計ができるようになる。これは経済的にも優れた設計といえる。

5. ま と め

省資源化社会の到来、最近の経済予測などを考慮すると、社会資本構造物の長寿命化が不可欠な趨勢²⁷⁾ にあり、港湾鋼構造物などもその流れに逆らえない状況にある。電気防食技術の将来の国際化と ISO 規格化問題²⁸⁾ や、海外の電気防食技術との整合性なども見直さねばならない時期にきている。現行設計手法の検討課題は数多あるが、本稿で述べた陽極設計の要点だけに絞ればおよそ次の見直しが必要と考える。

電気防食の陽極設計手法を種々検討したところ、陽極発生電流は防食対象構造物の電位によって自動的に制御される特性があり、現行設計手法のように陽極の形状や表面積の調整だけでは陽極発生電流が制御できないことが明らかになった。

DNV 規格の考え方などを参考にすると、式(4)による陽極寿命計算は行わない手法に改めるのが最も合理的であると判断する。このように改めれば、現行設計手法は必要最小限の修正だけで済むし、しかもこれまで喉元につかえていた設計上の苦勞はすべて解消できると考える。

最後に、電気防食の実用設計、現場調査、試験研究を行うに当っては、電気化学の科学と工学の基本知識をより積極的に活用する必要があることを付記しておく。本稿が海洋鋼構造物電気防食用アルミニウム合金陽極の設計手法などの改善にいささかでも役立つことを願って筆を置く。

参 考 文 献

- 1) (財)沿岸技術研究センター，港湾鋼構造物防食・補修マニュアル (改訂版)，p.60，(1997)。

- 2) (財)沿岸技術研究センター，港湾鋼構造物防食・補修マニュアル (改訂版)，pp.64-66，(1997)。
- 3) T.Uchibori, *Boushoku Gijutsu* (Presently *Zairyou-to-Kankyo*), **37**, 685 (1988)。
- 4) X. G. Zhang, Galvanic Corrosion, in Uhlig's Corrosion Handbook, R. W. Revie, editor, p.153, John Wiley & Sons, New York, (2000)。
- 5) R. Strommen, Evaluation of anode resistance formulas by computer analysis, *Material Performance*, Vol. **24**, No. 3, p.9 (1985)。
- 6) 防食技術便覧，p.708，日刊工業新聞社，(1986)。
- 7) 日本材料学会腐食防食部門委員会研究集会資料，主題『電気防食技術 (陰極防食) の科学と工学』，Number 54, p.21, June 24, (2005)。
- 8) 日本材料学会腐食防食部門委員会資料，第 54 回研究集会『電気防食技術の科学と工学』に関する討議 (記録)，Number 247, Volume **44**, Part 6, pp.41-61, November 10, (2005)。
- 9) (社)日本材料学会腐食防食部門委員会編，実験で学ぶ腐食防食の理論と応用，p.42，晃洋書房，(1999)。
- 10) 日根文男，金属腐食の化学と電気化学，pp.9-97, pp.151-226，さんえい出版(株)，(2006)。
- 11) 柴田俊夫，日本材料学会腐食防食部門委員会資料，Number 257, Volume 46, Part 4, pp.3-7, July 24, (2007)。
- 12) C. Wagner & W. Traud, "Classic paper in corrosion science and engineering", *Corrosion*, **62**, pp.844-855, (2006)。
- 13) 松島巖，腐食防食の実務知識，p.28，オーム社 (2002)。
- 14) M. Abe, M. Toyoshima and N. Mochizuki, Proceedings of the 47th Japan Conference on Materials and Environments, 437 (2000)。
- 15) 前田正雄，電極の化学，p.197，技報堂，(1969)。
- 16) 中川雅夫，海中施設の電気防蝕，pp.88-96，日本港湾協会，(1960)。
- 17) T. Wakabayashi, N. Mochizuki, G. Miyata and H. Hamada, Proceedings of the 52nd Japan Conference on Materials and Environments, 477 (2005)。
- 18) 日根文男，金属腐食の化学と電気化学，p.173，さんえい出版(株)，(2006)。
- 19) (財)沿岸技術研究センター，港湾鋼構造物防食・補修マニュアル (改訂版)，pp.54-59，(1997)。
- 20) 眞弓勝彌，高城信彦，日本材料学会腐食防食部門委員会資料，Number 234, Volume 42, Part 5, p.38, September 16, (2003)。
- 21) K. Mayumi and N. Takagi, J. SOC. Mater. Sci. Jpn., **53**, 1198 (2004)。
- 22) M. Abe and H. Hamada, Bosei Kanri (Rust Prev. Control), **50**, 447 (2006)。
- 23) K. Matsuoka, M. Yamamoto and K. Goto, *Zairyou-to-Kankyo*, **56**, 99 (2007)。
- 24) X. G. Zhang, Galvanic Corrosion, in Uhlig's Corrosion Handbook, R. W. Revie, editor, p.140, John Wiley & Sons, New York, (2000)。
- 25) EUROPEAN STANDARD EN 12473, "General principles of cathodic protection in sea water", p.12, (2000), CEN。
- 26) Det Norske Veritas Industry AS RP B401, "Cathodic Protection Design", pp.13-31, DNV, Norway, (1993)。
- 27) I. Matsushima, *Zairyo-to-Kankyo*, **55**, 332 (2006)。
- 28) 梶山文夫，日本材料学会腐食防食部門委員会例会資料，Number 249, Volume 45, Part 2, p.29, March 16, (2006)。

(2008 年 6 月 19 日受理)

要 旨

海洋鋼構造物などの流電陽極方式による電気防食で汎用される陽極設計手法を解説した。最初に、現行の流電陽極方式における設計手法を紹介し、問題点を整理した。次に海外の設計法とその違い、および実例を挙げてさらに電気化学に基づいた設計手法のあり方について考察した。最後に、現行の設計手法に若干の修正を加えることで、実態に即応し、かつ現場で応用できる設計手法を提案した。

キーワード 海洋鋼構造物，流電陽極方式による電気防食法，律速段階 (RDS)，溶存酸素拡散限界電流密度，定常防食電流密度