船体の電気防食について(第2報)

Mg 陽極を使用した実施成績

瀬 尾 正 雄*

Cathodic Protection of Ship Hulls (2) Results Obtained with Magnesium Anodes

Masao Seo

The experiments on cathodic protection with magnesium anodes have been carried out using Daiichi-Tetsuei-maru and Hiyama-maru.

In the magnesium anode system it was found to be

緒 言

米英諸国においては船体外板の防食用流電陽極として Mg 合金がかなり使用されているようである。Mg 陽極は鉄との電位差が大きいため発生電流が多く、比較的少数でも広範囲な防食が可能であるという長所はあるが、電流の調節を誤ると過大電流が流れ外板の塗装をいためたり予想外に早く消耗してしまう等の欠点もある。それゆえ実船に装備してその長所短所の影響程度と、適切な使用法を調査確認する必要があった。造船研究協会第20, 27 部会では実船に Mg 陽極を取付けて船体の防食を行い Zn 陽極との優劣、適当な使用法等について研究した。

1. 実験船の要目

Mg 陽極を取付けた船は第1鉄栄丸と檜山丸であって、その要目は第1表の通りである。第1鉄栄丸は Zn 陽極を付けた第2鉄栄丸の姉妹船であり、檜山丸は空知丸の姉妹船である。

2. 陽極の装備状況

第1鉄栄丸は Mg 陽極と船体の間を絶縁して陽極10個ずつを電線により接続して船室まで導き船体との間に電流計および可変抵抗 (0.9Ω) を入れて発生電流を調節し計測した。檜山丸は心金とナットの間に 1.6Ω の抵抗を並列に2個入れて取付けた。装備計画は第1表のとおりで第1鉄栄丸では全船を完全防食するに十分な Mg 陽極を取付けたが檜山丸では空知丸と同数の Mg 陽極を船尾に取付けた。

3. 試験期間

試験期間は第2表のとおりで入渠より次期入渠までを1期間とした。

実験成績

1. 船体の電位

第1鉄栄丸は可変抵抗により船体の電位を -850~

difficult to control the anode current, especially an over-current occurred frequently. Therefore, the paint coats were damaged and the consumption of the magnesium anode was accelerated.

第1表 実験船の要目

船 名	第1鉄栄丸	檜 山 丸
噸 数 (t)	143.6	3,428
長 さ (m)	26	113.2
幅 (m)	6.8	17.4
深 さ (m)	3.35	6.8
浸 水 面 積 (m ²)	240	2,000
プロペラ 数	2	2
プロペラ面積 (m ²)	4.9	6.2
船 装 の 状 態	古い塗装の上に A/C, A/F 各1	ウオッシュプライマ シルパックス A/C1, A/F 2
Mg 陽 極	個 数 大 き さ 個 数 重 量 (kg) 取 付 け 方 位 置	300×150×30 20 56 同 左 船尾のみ
計 算	1 個の発生電流(A) 防 食 電 流(A) 平均防食電流mA/m ² 使 用 年 限(年)	0.71 6.0 3.0 1.0

第2表 試験 期 間

船 名	第1鉄栄丸	檜 山 丸
試 験 回 次	第1次	第1次
試 開 始	30. 3.22	30. 8. 5
試 終 了	30. 9. 5	31. 7. 9

-1,000 mV (飽和硫酸銅電極基準以下同じ) に調節する予定であったが船尾の Mg が短絡し電流計は 0 のままで多量の電流が発生したため船尾の電位は著しく降下し最低 -1,200mV となった。その後両舷 Mg 陽極の

* 運輸技術研究所

抵抗を最大として電位の上昇を計ったが船尾は $-1,050 \sim -1,150 \text{ mV}$, ビルジキール付近は $-950 \sim -1,050 \text{ mV}$ で終始した。第1期試験終了後入渠し短絡箇所を調査したが発見できなかった。配線の一部を取換えて出渠した約2ヵ月後には再び船尾が短絡し電流計の示度は0となった。入渠時塗装を広い範囲に scrape したため就航後の電位の低下は遅く各抵抗器を0にしてもかなりの期間防食電位より高かった。第2次試験終了後船尾の Mg 陽極は著しく減少したので $300 \times 150 \times 30 \text{ mm}$ の大きいものの10個に取換え出渠した。第3次試験では短絡することなく電位を $-800 \sim -950 \text{ mV}$ に調節できた。第1図

第1図 第1鉄栄丸の電位および電流

第2図 電位の比較

が発生電流は計画に比べかなり多くそのため電位は第2図のごとく著しく低下した。船尾の電位は最低 $-1,200 \text{ mV}$ 近くとなりそのときは船首でも -970 mV になった。しかしその後急速に電位は上昇し出渠後4ヵ月頃には船尾付近が -790 mV となり船首は -720 mV と

なった。調査したら Mg 陽極はほとんど消耗してしまっていたので、新しく6個新替えしたところ電位は船尾 -850 mV , 船首 -770 mV となった。その後1ヵ月目にはそれぞれ -920 および -830 mV になったが、6ヵ月目の入渠直前には全船 $-720 \sim -730 \text{ mV}$ となっていた。

2. 船体外板の状況

第1鉄栄丸では短絡のため過大電流が流れ短期間水素の発生が認められ塗装がかなり広い範囲に剝離した。剝離しなかった部分も塗装が劣化していた。塗装の剝離によって防汚効果がなくなったため生物類や海藻の付着ははなはだしかったが腐食は全然なかった。入渠後は船体を scrape して劣化した塗装の大部分を落して船底2号塗料を1回塗布しただけで就航した。第2次実験においては電位は最低 $-1,000 \text{ mV}$ 程度であったから塗装の剝離は比較的少なく腐食は全くなかった。汚れも第一次に比べると少なかった。第3次試験では船体の電位がかなり理想的に調節できたため塗装の剝離および劣化は少なく腐食も完全に防止された。檜山丸は出渠直後の電位が著しく低かったためその影響が心配されたが Mg 陽極周辺にやや剝離が多かった外は船尾に少数の A/F のみ、または A/C, A/F の剝離箇所が認められただけであった。そして特に塗装の劣化は認められなかった。海藻類は少量付着していたが生物の付着はなかった。

3. 試験塗装

油性塗料はアルカリ性に弱いため電気防食と併用した場合過大電流が流れると塗装の剝離やふくれを生じやすい。それゆえ塗装に及ぼす電気防食の影響を調査するため第1鉄栄丸の両舷ビルジキールの上に $1 \times 0.5 \text{ m}$ の大ききで数種の塗料を塗装して比較試験した。その成績は第3表のとおりでビニル塗料が最も良好で塗装1ヵ年後鉄面の処理がやや不十分で発生電流も多かった左舷側に少数のふくれが出た外は異常なく汚れも少なかった。表中の()した数字はビニルとアルミニウムプライマを使用した油性塗料とで同じ面積の表面付着物を比較したもので海藻等の付着量は油性の約50分の1であった。コールドプラスチック塗料は生物や海藻の付着は少なかった。半年後の入渠時には少数のふくれのみであったが1年後には左舷はかなり剝離があった。光明丹プライマおよびジクロプライマを下塗して船底1号および2号を塗布したものはともに剝離がはなはだしく多くの海藻類と少数の生物が付着していた。アルミニウムプライマを2および3回下塗りした後船底2号塗料を塗ったもの

第3表 試験塗装の状況

塗 料	回 数	状 況					期 間
		剥 離	ふ くれ	発 錆	海 藻	生 物	
ウオッシュプライマ ビニル 1号 ビニル 2号	1回	なし	なし	なし	僅少 (0.1g/400cm ²)	なし	(1)
	3号 2号	なし	右 15% 左 50% 80%	同上	同上	なし	(2)
光明丹プライマ 油 性	2回	多	少	"	多	少	(1)
	1号 2号	多	少	"	同上	同上	(2)
フクロプライマ 油 性	2回	多	少	"	多	少	(1)
	1号 2号	多 80%	少	"	同上	同上	(2)
コールドプラスチック 1号 2号	2回	なし	右 15% 左 40%	"	少	なし	(1)
	2号	右 15% 左 40%	右 10% 左 少	"	同上	同上	(2)
アルミニウムプライマ 油 性	2回	なし	右 15% 左 60%	"	多 (5.5g/ 400cm ²)	少	(1)
	1号 2号	右 15% 左 60%	右 15% 左 少	"	同上	同上	(2)
アルミニウムプライマ 油 性	3回	なし	右 15% 左 40%	"	多	少	(1)
	2号 1号	右 15% 左 40%	右 15% 左 少	"	同上	同上	(2)

備 考 期間(1)は 30 年 9 月 5 日より 31 年 3 月 10 日まで、(2)は 30 年 9 月 5 日より 31 年 8 月 20 日まで

は半年では剥離はなく少数のふくれのみであったが1年後にはかなり剥離があった。そして多量の海藻類が付着していた。

4. Mg 陽極の付着物

第1鉄栄丸の第1次試験後 Mg 陽極を調査したところビルジキールに取付けた Mg 陽極の表面には生物や海藻類が多量付着していたが船尾の陽極には少しも付着して

いなかった。第2次試験の場合は発生電流の少なかった右舷ビルジキールの Mg 陽極には生物や海藻が付着していたが発生電流の多かった左舷ビルジキールや船尾の Mg 陽極には何も付着していなかった。すなわち発生電流の多少によって Mg 陽極表面に付着物がついたり、つかなかったりすると思われたので試験時の Mg 陽極の単位面積当りの発生電流を計算したところ第4表のとおり

第4表 Mg 陽極の発生電流と表面付着物

船 名	第1鉄栄丸(1次)		同 左(2次)			同 左(3次)			檜山丸
	両 舷	船 尾	右 舷	左 舷	船 尾	右 舷	左 舷	船 尾	
1 個の発生電流量(Ah)	1,000	6,215	2,530	3,520	5,300	2,717	2,937	814	2,640
" 電流(A)	0.3	1.68	0.56	0.78	1.18	0.71	0.77	0.21	1.1
陽極電流密度(mA/cm ²)	0.15	0.82	0.28	0.39	0.59	0.36	0.39	0.36	1.9
付 着 物 の 有 無	有	無	有	無	無	無	無	無	無

となった。陽極電流密度が 0.28 mA/cm² 以下では付着物があり 0.39 mA/cm² では付着物はなかった。

5. 防食電流

第1鉄栄丸では Mg 陽極の発生電流を計測したが第1, 2次試験共船尾 Mg 陽極が短絡したため正確に計測することができなかったが第3次試験では短絡はなくほぼ正確に測定しえた。第1図はその間の電流の変化状況であってそのときの船体の代表的数個所で計測した船体の電位をも示してある。第3次試験期間中の電流は平均右舷ビルジキールは 1.79 A, 左舷が 2.45 A, 船尾が 1.83 A で計 6.07 A であった。なお Mg 陽極の重量減

より電流効率を 50% として計算すると第5表のとおりとなり計測値とかなり差がある。第6表は Mg 陽極の減量と計測電流から電流効率を計算したものであって第1鉄栄丸第3次試験に船尾に使用した CPM 5 型以外はきわめて電流効率は低くなっている。これは発生電流を非常に低くとったため自己腐食が増大したためであろう。

6. Mg 陽極の発生電流

檜山丸の Mg 陽極は約年1ヵ使用しうる予定であったが約5ヵ月でほとんど消耗してしまった。すなわち計画と実際でかなり大きい違いがあったので Mg 陽極の発生電流を検討してみた。Mg 陽極を半球形と仮定すれ

第5表 Mg 陽極の減量

船 名	第1鉄栄丸 (1次)			第1鉄栄丸 (2次)				第1鉄栄丸 (3次)				楢山丸	
	装 備 位 置	両 舷	船 尾	計	右 舷	左 舷	船 尾	計	右 舷	左 舷	船 尾	計	船 尾
原 重 量 (kg)		240	120	360	120	120	63.5	283.5	87.0	78.0	27.7	192.7	56
入 渠 時 重 量 (kg)		220	63.5	283.5	87	78	15.3	180.3	62.3	51.3	20.3	133.9	8
減 量 (kg)		20	56.5	76.5	23	32	48.2	103.2	24.7	26.7	7.4	58.8	48
発 生 電 気 量 (Ah)		2,200	62,150	84,150	25,300	35,200	53,020	113,520	21,170	29,370	8,140	58,680	52,800
発 生 電 流 (A)		5.9	16.8	22.7	5.6	7.8	11.8	25.2	7.12	7.72	2.13	16.97	22.0
同 上 (電 流 計) (A)		1.78	—	—	2.3	2.7	—	—	1.79	2.45	1.83	6.07	—

第6表 第1鉄栄丸 Mg 陽極の発生電流効率

項 目	第 1 次		第 2 次		第 3 次		
	右 舷	左 舷	右 舷	左 舷	右 舷	左 舷	船 尾
Mg 減 量 (kg)	10	10	23	32	24.7	26.7	7.4
理論発生電気量 (Ah)	22,100	22,100	50,800	70,700	54,600	59,000	16,300
計 測 電 流 (A)	0.82	0.968	2.3	2.72	1.79	2.43	1.83
" 電 気 量 (Ah)	2,950	3,440	10,300	12,200	6,630	9,280	6,990
Mg の 効 率 (%)	14.0	15.6	20.3	17.2	12.5	15.7	42.8

ば発生電流は理論的に次の二つの式によって計算できる。

$$i = 2\pi p E x / (1 + 2\pi p r x) \dots \dots \dots (1)$$

$$t = K / [2pE \{ (a^2 - x^2) 4\pi p r / 3 \} (a^3 - x^3)] \dots \dots \dots (2)$$

式中 i = t 日後の電流, x = t 日後の Mg 陽極の半径,
 a = Mg 陽極の最初の半径, p = 海水の電気伝導度, r = 陽極導線の抵抗, E = 有効電圧, K = Mg 陽極 1 m^3 当りの発生電気量

楢山丸に使用した Mg 陽極を半球形と仮定して (1)
 (2) 式より $r = 0.8\Omega$ で船体の電位が -600mV , -800mV , $-1,000\text{mV}$ の場合を計算すれば第3図のとおりとなる。

第3図 Mg 陽極の発生電流
 楢山丸 (CPM 5型)

の電位が高い場合は発生電流は初期 0.8A となり使用期間は4ヵ月程度となる。本船の場合は船体の電位は初期 $-1,200\text{mV}$ となったがその後高くなり -700mV 程度になったから発生電流はこれらの曲線を組合せたような方向をたどったのであろう。なお第2鉄栄丸でこの型の Mg 陽極発生電流を実測しているが計算値の約0.45Aに対し実測値は約0.4Aであった。

結 言

試験の結果を要約すると次のとおりであった。

(1) 第1鉄栄丸では過大電流が流れ船体の電位は著しく低下したため塗装が剝離したことがあったが、発錆は全然なかった。楢山丸では初期電位の低下ははなはだしかったがその期間が短かったことと新造船で塗装が良好であったため剝離は僅少であった。(2) 楢山丸では発生電流が計画に比べ多かったため短時間に陽極が消耗してしまった。発生電流を理論式により計算したところ計算値に比べやや大きく実船の状況に合致していた。

(3) 第1鉄栄丸を Mg 陽極の CPM 5型によって約7ヵ月防食するとすれば所要防食電流は約6Aであり、陽極の発生電流は固定抵抗を 1.5Ω とすれば8ヵ月目に約0.25Aとなるから所要数は24個となる。(4) 船体の汚れ状況は電気防食を実施してない場合と大差なかった。

要するに Mg 陽極は船体に対する有効電位差が大きいため発生電流も大きく、しかも発生電流は回路に抵抗を入れることによって調節しうるからきわめて優秀である。しかし電流の調節を誤ったり短絡等の事故があった場合は過大電流が流れるばかりでなく塗装にふくれや剝離を生じ、また意外に早く陽極が消耗する等の欠点があるため取付けや取扱いに正確な知識と細心の注意を必要とするから特殊な場合、すなわち海水濃度が比較的淡い海面とかまた終始正確に防食電位に保つ必要があるという場合を除いては Zn 陽極の方が取扱いが簡単で間違いが少ないため無難である。(昭和32年1月10日受理)