

海洋生物付着防止システム実用化の研究

九州支店 PC 事業部 藤田知高

概要: Green Antifouling(GAF)システムは、フィンランドにて開発された海洋生物付着防止技術である。このシステムは、海水中の構造物表面にコンピュータ制御された電流を供給することにより、その構造物への生物付着防止(防汚)と鋼材腐食防止(防食)を同時に行うことを特徴とした、電気化学的防汚技術である。本研究は、日本サブコール社の協力のもと、九州大学と共同で、長崎港にて実物大構造物を対象とした実証実験を行い、GAF システムの汎用性、および、より大規模な設備に適用した場合の効果(スケールエフェクト)を確認し、GAF システムの実用化に対する技術評価を行うことを目的としたものである。

Key Words: 防汚技術, GAF システム, 電位制御

1. はじめに

海水中に設置された土木建築構造物や、海水を冷却水として利用する臨海発電施設は、さまざまな海域に建設されており、重要な社会資本を形成している。海水中では、海洋微生物を含む様々な海生動植物が生息しているが、これらのうちの付着性生物または付着期の生物(以下、汚損生物)が付着すると、その構造物の有する機能が低下したり、施設の正常な運転に影響を与えるなど、維持管理上の大きな問題が生ずることになる。汚損生物の付着防止対策としては、(1)塩素または次亜塩素酸塩の投入、(2)防汚塗料の塗布、(3)防汚金属による被覆、(4)海水電解による塩素または次亜塩素酸塩の生成、(5)防汚金属のアノード溶解による生成、など様々な工法が提案・実用化されているが、無公害で耐久性の高い技術は、いまだ確立されていないのが現状である。

本研究は、耐久性および環境問題を同時に解決する新技术「海洋生物付着防止(Green Antifouling)技術システム(以下、GAF システム)」の我が国への導入について検討を行ったものである。

2. GAF システム

(1) 特徴

GAF システムは、フィンランドの SAVCOR 社で開発された電気化学的防汚技術であり、Green(環境に優しい) Anti(防止) Fouling(汚損)の頭文字で表現したものである。以下に特徴を示す。

i) 保護する基盤(鋼板)の防汚と防食を同時に行う。

保護基盤極近傍における海水 pH の頻繁な変化に伴い、汚損生物の付着・成長が抑制される。また、基盤の電極電位を鋼材の防食電位に保持させており、鋼材腐食は生じない。

ii) 環境に優しい工法である。

有害な塩素ガスや水素ガスを発生させないように電位制御しているため、環境に負荷を与えず、環境に優しい工法である。

iii) 防汚面となる基盤は鋼板で十分である。

GAF システムは防食も兼ねているために、基盤としては安価な炭素鋼板で十分である。

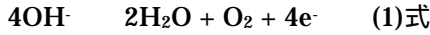


藤田知高

(2) 原理

GAFシステムは、図-1に示すように海水中に設置した陽極およびGAF電極から、基盤に「防汚パルス電流」を与え、基盤をAnode/Cathodeとすることにより以下の電気化学反応を生じさせる。

[陽極(Anode)反応]



[陰極(Cathode)反応]



陽極反応である(1)式が生じると、以下に示す(3)式の関係から、基盤表面極近傍の海水pHが低下する。一方、陰極反応である(2)式が生じると、同様に(3)式より、基盤表面極近傍の海水pHが増加する。

$$pH = -\log_{10}[H^+], \quad [H^+][OH^-] = 10^{-14} \quad (3)式$$

ここで、[OH⁻]：海水中の水酸化イオン濃度

[H⁺]：海水中の水素イオン濃度

この海水pHの変化は、汚損生物の付着および成長を抑制する¹⁾²⁾(忌避および成長抑制効果)。さらに、図-2に示すように、海水pHが増加した場合には、基盤表面には保護層(電解皮膜)が析出する。また海水pHが低下した場合には、溶解する。海水pHの変化に伴い、基盤表面上では、保護層の析出と溶解が繰り返される。たとえ基盤表面上に汚損生物が付着したとしても、保護層の析出と溶解作用により、付着生物は脱落する(剥落効果)。以下、これらの効果を総合して「GAF効果」と称する。

(3) システムのパラメータ

GAFシステムでは、有毒なガスの発生防止および鋼材腐食からの保護が可能となるよう、外部からの通電により保護基盤の電位を最適電気防食電位に保つと同時に、汚損生物の付着が最小となるように防汚パルス電流を制御することで、基盤電位の振幅、周波数を頻繁に変化させる。図-3にGAF原理概念図を示す。防汚パルス電流を構成するGAFシステムパラメータ(以下、パラメータ)の機能を以下に記す。

・電位変化の振幅

防汚パルス電流をかけることで、基盤の電位を急激に変化させるが、その際、電位の逸脱がどの程度の規模で起こっているかを示す。Anode方向あるいはCathode方向のパルスが大きすぎたり長すぎたりすると、鋼材が腐食あるいは水素脆性を起こす危険があるので、正確なコントロールが必要である。

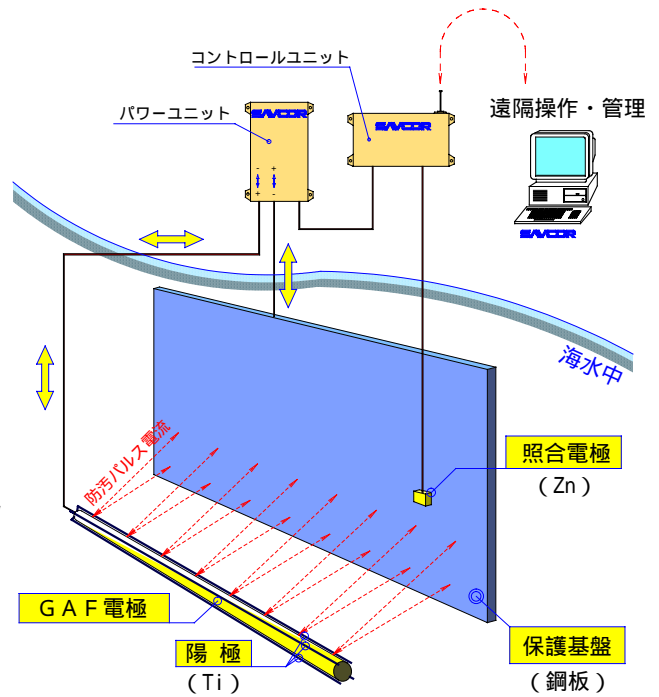


図-1 GAFシステム模式図

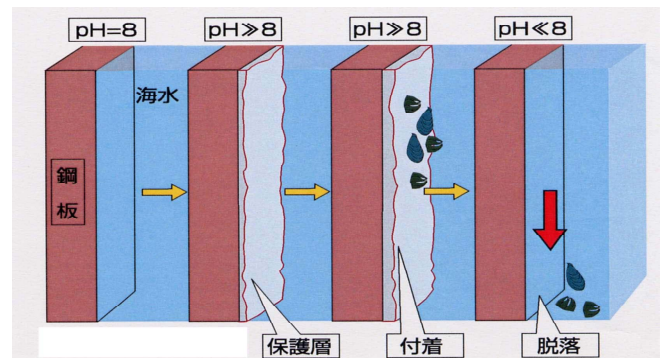


図-2 海水 pH 変化と保護層の析出と溶解作用(剥落効果)

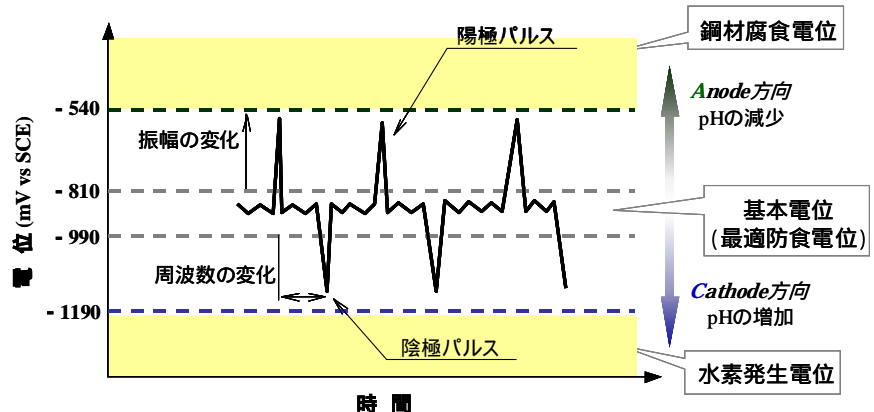


図-3 GAF 原理概念図

・電位変化の周波数

基盤電位が急激な変化を起こす頻度を示す。

・基本電位レベル

基盤電位がほとんどの時間留まっている範囲で、外部電源方式陰極防食における最適な防食電位範囲である。

・A/C率

今回の実証実験で新たに導入されたパラメータであり、陽極パルスおよび陰極パルス両方の、振幅と持続時間により算出される積算電位の比率である。これは、振幅、周波数、電位レベルという他のパラメータ変化に依存している。

3. 実験方法

(1) 実験目的

GAFシステムを我が国に導入するにあたり、1998年から1年半程度の期間、横浜港にて予備実験が行われた。予備実験では、炭素鋼をはじめとする7種類の材質について、GAFシステムの適用性が比較され、その結果、炭素鋼への適用が最も効果的であるという結論が導かれている。また、その際の有効なパラメータがある程度明らかにされている。本研究では、横浜港における予備実験の結果を踏まえ、長崎港にて実物大構造物を対象とした実証実験を行うことで、GAFシステムの汎用性、および、より大規模な設備に適用した場合の効果(スケールエフェクト)を確認し、GAFシステムの実用化に対する技術評価を行うことを目的とした。

(2) 実験環境

長崎港に位置する長崎造船株式会社本社工場内にある、現在供用中の鋼製ポンツーンに実験装置を設置した。新設の鋼製構造物を想定し、実験対象基盤は無塗装鋼板とした。GAF効果を確認するため、GAFを適用した基盤(「GAF」と略記)と、比較参照用としてGAFを適用しない基盤(「control」と略記)を用意した。「control」は、鋼材腐食による付着抑制の影響を排除するために、基盤表面に流電陽極(Zn)方式による電気防食を施したことに注意を要する。鋼製ポンツーンを介して電流が流入しないよう、「control」はポンツーンと絶縁状態で設置した。表-1に実験基盤概要を、図-4に実験設備配置図を示す。

表-1 実験基盤概要

	略名	GAFシステム		面積 (m ²)	摘要
		適用	非適用		
実験基盤	GAF			10.0	
実験基盤	control			1.0	電気防食

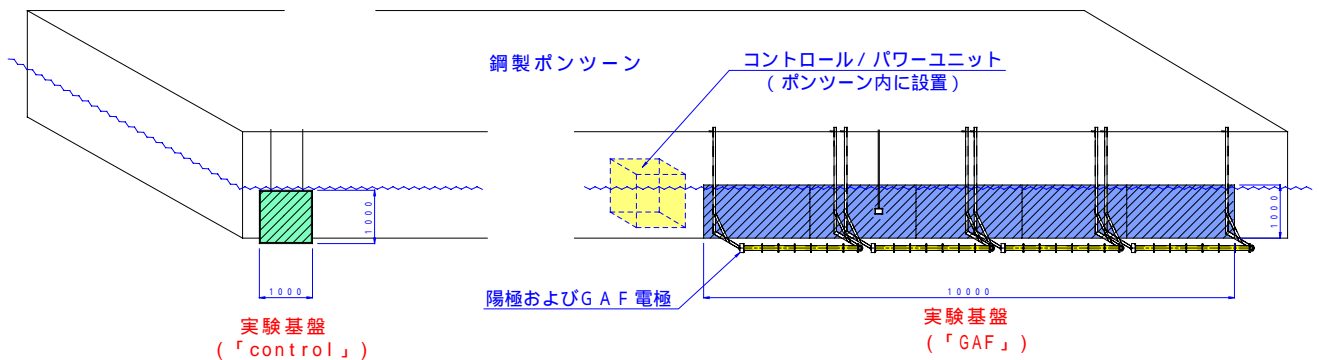


図-4 実験設備配置図

なお、実験設備を配置した鋼製ポンツーン周辺の水域は、流速はほとんど無く、また海洋生物が多岐に亘り生息している環境であり、防汚技術の効果を確認する水域としては望ましい水域であることが確認されている。

(1) 実験項目

生物付着状況を比較するうえでの評価は、以下の2通りの方法によることとした。

i) 目視観察

付着状況の定性的な評価方法として、日中太陽光の下で、水中写真撮影による目視観察を行った。

表-2 付着生物採取要領

採取エリア	採取面積	採取頻度
GAF	250×250mm	3ヶ月に1回
control	100×100mm	3ヶ月に1回

ii) 付着生物採取調査

付着状況の定量的な評価方法として、実験基盤表面の一定範囲から採取された付着生物の生存種のみについて、個体数および湿重量の比較を行うこととした。表-2 に、付着生物採取要領を示す。

(3) 実験期間

本研究の実験期間は、2002年3月～2003年5月までとした。本実験の実施工程表を表-3 に示す。

表-3 実施工程表

		2002										2003						
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	
実験	実験計画準備	■																
	設備機器準備	■																
隊	設備設置工事		3/12															
	システムテスト		■															
	システム稼働		3/13	■														
	目視観察			4/12	5/20	6/19	7/17	8/20	9/17	10/23	11/19	12/17	1/15	2/21	3/17	4/25	5/19	
	付着生物採取調査						■			■			■			■		

4. 実験結果および考察

(1) 目視観察による定性的評価

定期的な目視観察結果を基に、GAF システム適用部への生物付着傾向を判断し、パラメータの設定を変更した。パラメータの設定内容は、最良の GAF 効果を引き出すことを目的として変更を行ったが、金属の分極程度の変化により GAF システムの出力が低下し、意図する効果が得られなくなった場合にも、設定変更を行う必要があった。

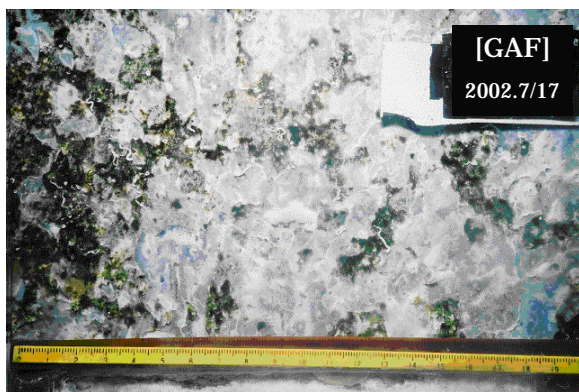


写真-1 「GAF」の基盤状況
(2002.7/17 撮影)



写真-2 「control」の基盤状況
(2002.7/17 撮影)

写真-1 および写真-2 は、実験開始約 3 ヶ月後の 2002.7/17 における「GAF」および「control」の表面状況写真である。「GAF」の保護基盤表面には、全面的に白色の電解皮膜の析出が観察された。部分的に、汚れに伴う変色が見られたものの、大部分は表面が剥がれ落ちたような真新しい白色面が見て取れた。これは電気化学的の反応に伴う剥落効果(電解皮膜の析出と溶解の繰り返し作用)であると判断でき、良好な GAF 効果が得られていたものと判断できる。一方、「control」には電気防食を施していたにも関わらず、部分的に予期せぬ腐食が確認された。腐食はその後 2 ヶ月程度で安定し、錆を覆うような形で多岐に亘る生物の付着が確認された。全体的に管棲多毛類の付着が目

立ち、水面付近には小型のフジツボ類の付着も若干確認されたが、腐食の発生により生物付着が抑制されたことが懸念され、実験結果への影響は否めない。通常の流電陽極方式による電気防食に見られる電解皮膜も確認できず、犠牲陽極の量が不足していた恐れがある。

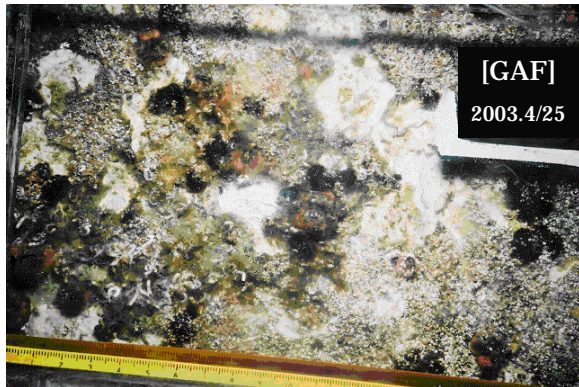


写真-3 「GAF」の基盤状況
(2003.4/25 撮影)

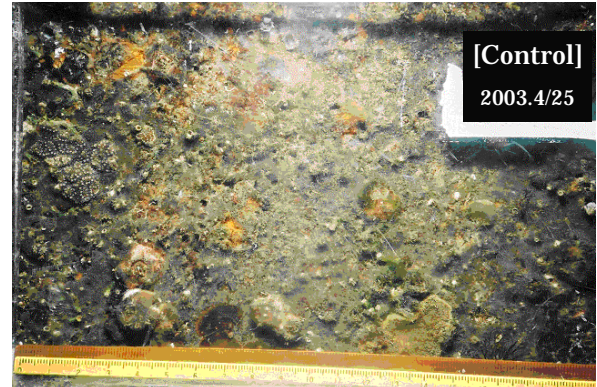


写真-4 「control」の基盤状況
(2003.4/25 撮影)

写真-3 および写真-4 は、実験開始約1年後の2003.4/25における「GAF」および「control」の表面状況写真である。「GAF」の保護基盤表面には、引き続きGAF効果の1つである剥落効果が確認できるものの、微小な管棲多毛類および小型のアカフジツボの付着も確認された。一方、「control」には、全面的に苔虫類、管棲多毛類、タテジマフジツボの付着が目立ち、それらの付着生物を覆うような状態で、ホヤ網の繁茂が確認された。このように、GAFシステムを適用することで、付着する生物の種類や形態に相違が見られた。この原因として、基盤に既に付着している既存生物種の違いが次に付着する生物に何らかの影響を及ぼしたこと、および、GAF効果そのものにより付着生物が選択されたこと等が考えられるが、原因を明確にすることは出来なかった。

(2) 付着生物採取による定量的評価

実験基盤表面より採取した付着生物の生存種のみについて、種類を同定後、それぞれの個体数および湿重量を定量した。採取・分類された付着生物のうち、特に湿重量が多く、また汚損生物として問題となる3網に着目し、その網に含まれる目(甲殻網についてはフジツボ目のみ)について合計した総個体数、総湿重量の比較を行った。比較を行った3網を表-4に、総個体数および総湿重量の比較結果を、それぞれ図-5および図-6に示す。

表-4 着目した生物種(門・網・目)

着目種		(含まれる目)
軟体動物門	ニマイガイ網	イガイ目
		ウグイスガイ目
		オオノガイ目
環形動物門	ゴカイ網	スピオ目
		サシバゴカイ目
		ケヤリムシ目
節足動物門	甲殻網	フジツボ目

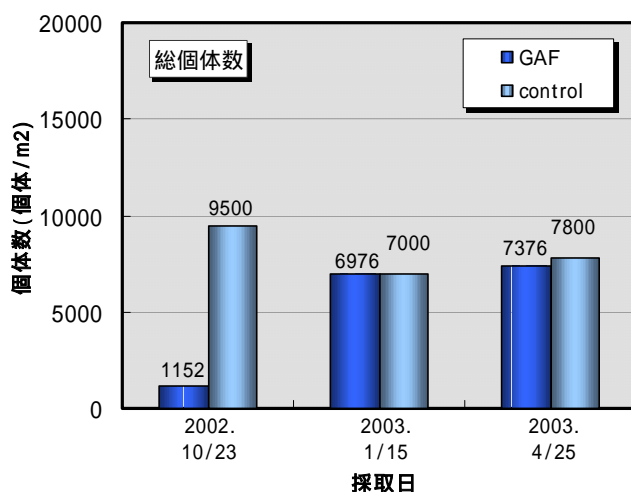


図-5 総個体数の比較

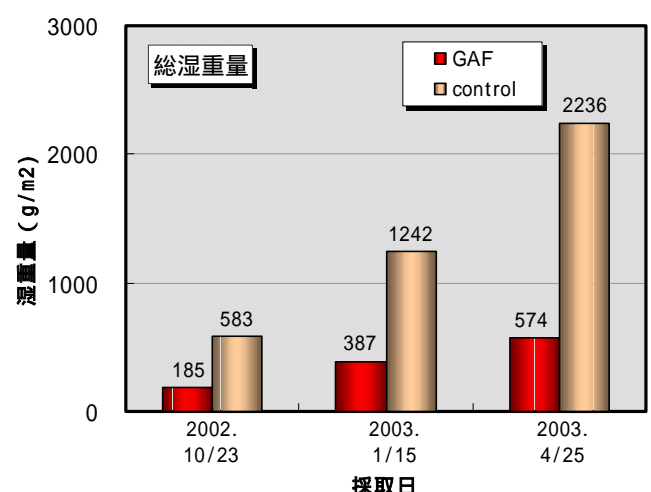


図-6 総湿重量の比較

図-5 に示す総個体数に着目した場合、実験開始から約 6 ヶ月後にあたる 2002.10/23 の採取では、「GAF」:1152 個体/m² に対し、「control」:9500 個体/m² と、GAF を適用したことにより、適用しなかった場合の 12.1%程度まで減少していたことが分かった。しかしながら実験開始から約 9 ヶ月後および約 12 ヶ月後にあたる 2003.1/15 および 2003.4/25 の採取では、「GAF」と「control」それぞれにおける付着生物の総個体数には、ほとんど差が見られなくなっていた。一方、図-6 に示す総湿重量に着目した場合、いずれの採取日においても、GAF を適用したことにより、適用しなかった場合の 25 ~ 30%程度まで抑制されていた結果を示した。このように 2003.1/15 および 2003.4/25 の採取において、総個体数が同程度であったにもかかわらず総湿重量に差が現れた理由の一端は、主にゴカイ網の付着によるところが大きかったようである。本実験水域において付着したゴカイ網は 1 個体あたりの湿重量が小さく、また付着生物としては非常に小型であったため、総湿重量にはそれ程影響を及ぼさなかったと考えられる。しかし、ゴカイ網の中には、群体で急激に増加・付着するケースもある³⁾ことから、実際にそのような環境に GAF システムを実施する際には、GAF システム原理の 1 つである剥落効果が、より頻繁に発生するよう、パラメータの設定を調整する必要があると思われる。

(3) パラメータの設定と GAF 効果

GAF システムの防汚メカニズムは、(1)保護基盤の電位を一定範囲内で頻繁に変化させることによる付着生物の忌避および成長抑制効果、(2)海水 pH の変化に伴う電解皮膜の析出と溶解の繰り返し作用による付着生物の剥落効果、が主なメカニズムである。これら GAF 効果とパラメータとの関係を明らかにし、防汚効果を検証する。

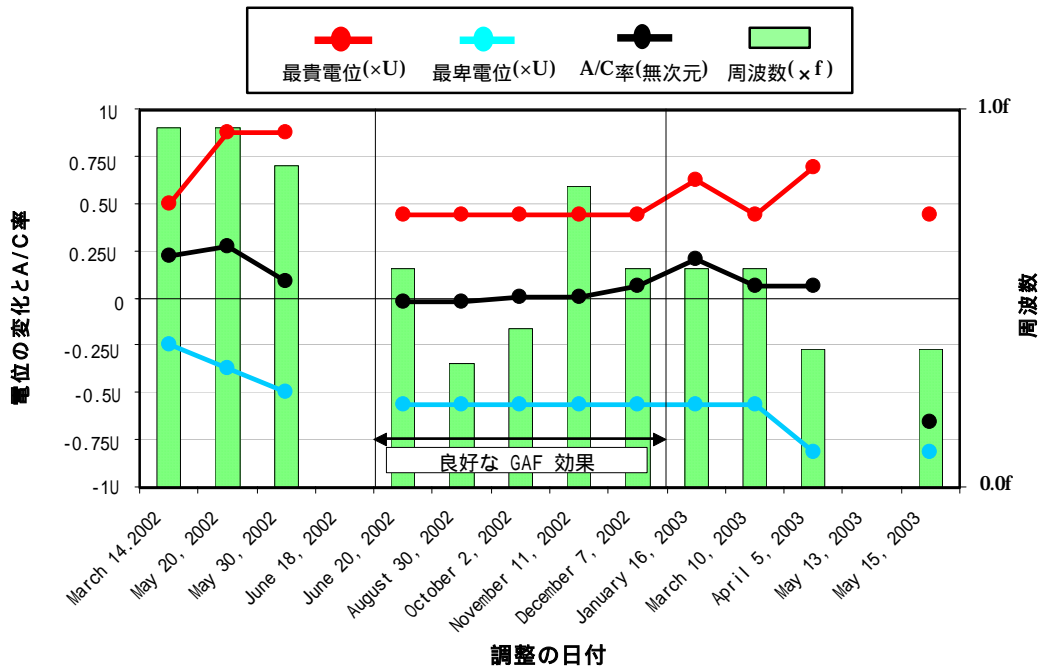


図-7 パラメータ調整履歴

本研究におけるパラメータ調整履歴を図-7 に示す。縦軸の電位および周波数の具体的な数値は、諸事情により明記することは出来ない。この図は、主要パラメータである電位変化の振幅、周波数および A/C 率の時系列変化を示しており、電位の振幅については最貴電位と最卑電位を示している。A/C 率の変化は、振幅、周波数、電位レベルという他のパラメータ変化に依存しており、例えば、全く等しい振幅と継続時間を持つ陽極パルスおよび陰極パルスは、お互いに打ち消し合うことで、A/C 率=0 という結果となる。図中に示した「良好な GAF 効果」と、後述の図-8 に示す「GAF 効果の評価(5 段階評価)」は、水中写真の目視観察結果に基づき、剥落効果、電解皮膜の析出量、生物付着程度および前回の観察結果からの相対的な変化等を考慮に入れた上で評価したものである。図-7 より、A/C 率が GAF 効果と密接に関連していることが見て取れる。つまり、A/C 率が明らかに Anode 寄りの場合は、周波数の大きさに関係なく、GAF 効果を確認することはできなかったが、A/C 率が neutral に近いか、または僅かに Cathode 寄りであり、特に周波数が小さい(周期が長い)場合には、望ましい GAF 効果を確認することができた。この図からさらに A/C 率に着目することで、次の図-8 を導くことができる。

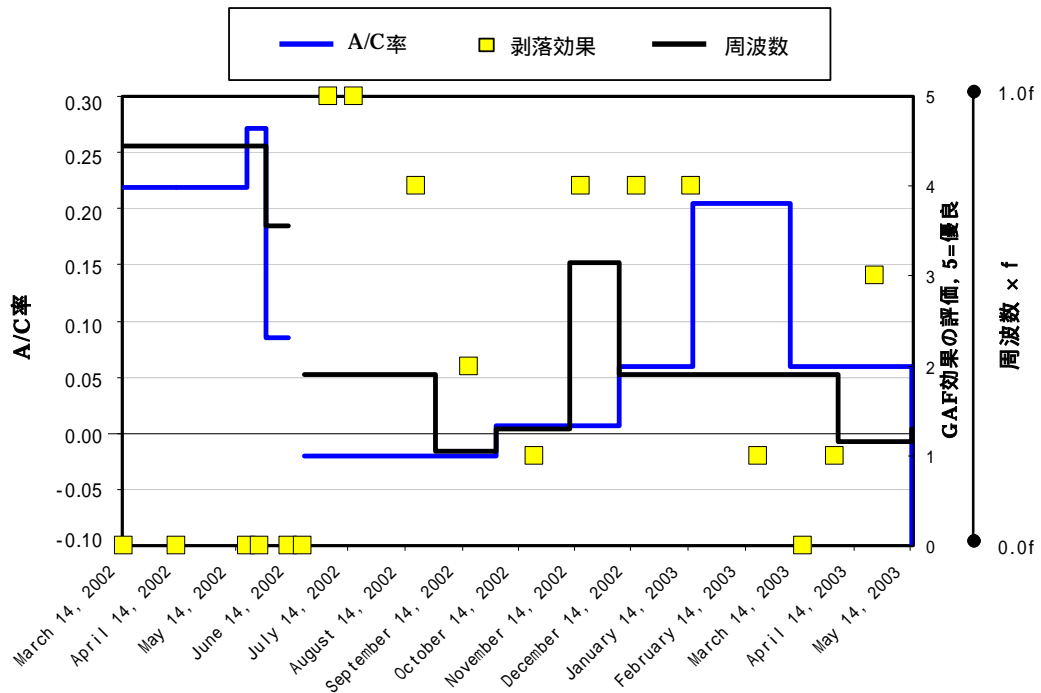


図-8 A/C 率と周波数の変化による剥落への影響

図-8 は、時系列で追った主要パラメータの変化および目視観察に基づく GAF 効果の評価を示している。2002 年 4 月～2002 年 6 月の実験初期段階では、A/C 率は Anode 寄りであり、剥落効果を得ることはできなかった。剥落効果が最も良く得られたのは、2002 年 6 月～2003 年 1 月までの間であった。なおこの間にも、剥落効果は 2002 年の秋季から徐々に減少していく傾向を示したが、これはおそらく分極の影響によるもの、つまり、分極程度の変化により GAF システムの出力が徐々に低下していき、実験基盤表面を流れる電流密度が減少したことが原因の 1 つと考えられた。この影響がパラメータの設定のみの調整では解決できないと判断された場合、新たな制御プログラムに設定しなおすことで解決された。また A/C 率が 2003 年 1 月中旬に増大されると、剥落効果は停止した。

より大規模な構造物を対象とした今回の実証実験は、GAF システムの制御において、横浜における予備実験とは明らかに異なっていた。小規模の場合とは異なり、利用できる電流容量が限られたため、パラメータの設定をより繊細に行う必要があった。更に 2002 年中は、分極の影響により出力が継続的に低下し続けていた。

今回の実証試験の成果として、制御プログラムの設定についての多くの情報を得ることができた。その結果、ソフトウェアの新バージョンが考案・開発され、新しい主要パラメータ要因である A/C 率が導入された。なお A/C 率は、別の幾つかのパラメータを総合して計算し直すことで得られるもので、独立したパラメータではないものの、GAF 効果において最も重要な防汚効果要因であるようである。実際、目視により確認された GAF 効果は、算出された A/C 率と密接に連動しているようであり、A/C 率がほぼ neutral か、僅かに Cathode 寄りの時に、GAF 効果に対し重要な意味を持つ剥落効果が最も効果的に得られていた。これまで GAF 効果は、付着生物の忌避および成長抑制効果に注目されており、剥落効果に関しては特に注目されてはいなかったが、今回の実証実験では、剥落効果

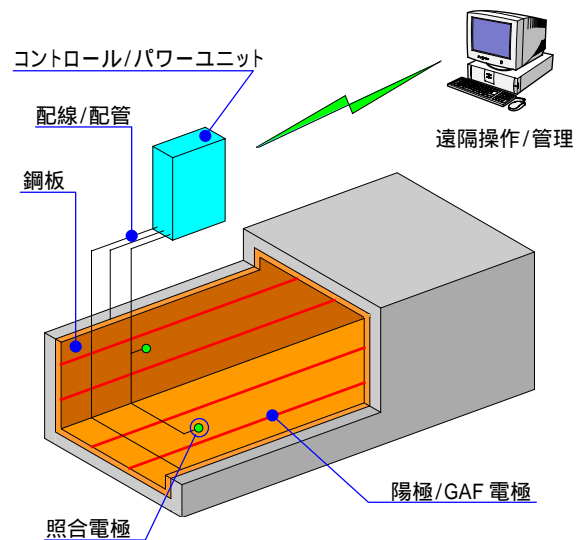


図-9 GAF システムの適用概念図 (ボックスカルパートへの適用例)

が卓越する結果を示しており、これも本実証実験における大きな特徴の一つであったと言える。

今回の実証実験中に各主要パラメータの稼働限界がすべて確認されたわけではないが、効果的なパラメータの範囲を明らかにすることができた。また、2002年夏季後期の過酷な汚損生物付着の時期において、GAFシステムの有効な防汚効果を実証することができたことは、特筆すべきことである。

GAFシステムを一般構造物に適用する場合の一例として、ボックスカルバートへの適用概念図を、図-9に示す。

5. まとめ

2002年3月～2003年5月において、長崎港に位置する鋼製ポンツ-ンを利用してGAFシステムの汎用性、および、より大規模な設備に適用した場合の効果の確認を目的とした実証実験を実施した。本研究の範囲内で以下の事が明確となった。

i) GAFシステムの防汚効果を確認するために、定期的な目視観察および付着生物採取調査を行った。防汚塗装を施していない炭素鋼板(無塗装鋼板)にGAFシステムを適用した場合、本システムの防汚原理の1つである剥落効果(基盤表面上の電解皮膜の析出と溶解の繰り返し作用)が、定期的な目視観察から確認された。付着した汚損生物の付着量を、GAFを適用しなかった基盤(control)と比較した結果、付着生物の総湿重量は后者の25～30%程度にまで減少しており、防汚効果が明確となった。

ii) GAF効果を左右するパラメータの設定について、制御プログラムの設定に関する多くの情報を得ることができた。特に、新しく導入された主要パラメータ要因であるA/C率が、GAF効果において最も重要な防汚効果要因であり、A/C率がほぼneutralか僅かにCathode寄りの時に、GAF効果が最も効果的に得られていた。また、各主要パラメータの稼働限界が全て確認された訳ではないものの、効果的なパラメータの範囲を明らかにすることができた。

参考文献

- 1) 尾形英二:アサクサリの生理と病理,植物生理,vol.4,pp.171-182,1964
- 2) P.H.Benson,R.W.Moncreiff: The Effect of Zn and pH on Larval Attachment of the Common Fouling Organism, Bugula Nerritina, Proc.4th Int. Cong. Marine Corrosion and Fouling, pp.75-77, 1975
- 3) 付着生物研究会:付着生物研究法,恒星社厚生閣,p.58,1986