

日本船舶振興会 昭和 46 年度 補助事業
“船舶の構造・性能に関する基礎的研究”

研究資料 No.150

第 115 研究部会
大口径荷油管の腐蝕対策に
関する研究
報 告 書

昭和 47 年 3 月

社 団 法 人
日 本 造 船 研 究 協 会

は し が き

本報告書は日本船舶振興会の昭和46年度補助事業「船舶の構造・性能に関する基礎的研究」の一部として日本造船研究協会が第115部会においてとりまとめたものである。

第115研究部会委員名簿

(敬称略 順不同)

部会長 瀬 尾 正 雄

幹 事 伊 藤 哲 司(三井造船)

大 友 克 己(三菱重工業)

柏 木 隆(日本鋼管)

下 川 寛 人(日立造船)

出 口 暢 昭(住友重機械工業)

野 本 喬(佐世保重工業)

藤 掛 勝 正(新和海運)

八 幡 勝 彦(石川島播磨重工業)

委 員 関 純 義(大阪造船所)

佐々田 善 正(大阪商船三井船舶)

林 森 男(函館ドック)

村 松 省 吾(三保造船所)

植 田 昭 二(三菱重工業)

大 野 章(新日本製鉄)

佐 武 二 郎(住友金属工業)

越 智 良 三(日本鋼管)

長 尾 敬 五(川崎重工業)

藤 井 政 夫(三井造船)

牧 園 正 孝(山下新日本汽船)

渡 辺 精 三(日立造船)

木 村 朝 夫(中川防蝕)

花 田 政 明(日本防蝕)

堀之北 克 朗(運輸省)

森 川 卓(日本船主協会)

目 次

1. 腐食試験	1
1.1 海水中における試験用鋼板と船体用鋼板の自然電位の変化状況	1
1.1.1 供試材	1
1.1.2 試験装置	1
1.1.3 試験方法	1
1.1.4 試験結果	1
1.2 1.1の試験に及ぼす乾湿交互の影響	3
1.2.1 供試材	3
1.2.2 試験装置	3
1.2.3 試験方法	3
1.2.4 試験結果	3
1.2.5 試験結果の考察	6
1.3 スラッジ塗布面の自然電極電位の測定	7
1.3.1 供試材	7
1.3.2 試験装置	7
1.3.3 試験方法	7
1.3.4 試験結果	10
1.4 分極測定	13
1.4.1 実験方法および結果	13
1.4.2 まとめ	15
1.5 各種鋼板の接続時の腐食試験	22
1.5.1 供試材	22
1.5.2 試験装置	22
1.5.3 試験方法	22
1.5.4 試験結果	22
1.5.5 試験結果の考察	23
1.6 接触およびすきま腐食に対する電気防食の効果	27
1.6.1 供試材料	27
1.6.2 試験方法	27
1.6.3 試験結果および考察	29
1.6.4 まとめ	30
1.7 46年度腐食試験のまとめ	39
2. 実船試験	39
2.1 試験管塔載状況	39
2.1.1 実船試験の内容	39
2.1.2 塔載船	39
2.1.3 塔載日付	39
2.2 実船試験結果	39

2.2.1	大規模試験	39
2.2.2	小規模試験	40
2.2.3	試験管および試験片の周囲状況	41
2.2.4	スラッジの諸性質	43
2.3	まとめ	43

1. 腐食試験

1.1 海水中における試験用鋼板と船体用鋼板の自然電位の変化状況

試験用鋼板と船体用鋼板の試験片を自然海水に連続して約3ヶ月浸漬した時の各々の自然電極電位の変化状況と測定する。

1.1.1 供試材

試験用鋼板は前年度の鋼種の中、0.2Cr系、1Cr系、0.5Cr系、各1鋼種と船体用鋼板としてSS41とし、これらの供試材を表・1.1.1に示す。

表・1.1.1 供試材

	成分系	記号	提供会社	形状
0.2Cr系	2Cr-0.3Mo-0.8Si	YC	新日鉄	70 ^{mm} ×90 ^{mm} ×3 ^{mm} 5枚
1Cr系	1.25Cr-1Mn-0.5Si	SB	住金	同上
0.5Cr系	0.1P-Cu-0.5Cr	NA	鋼管	同上
SS	SS41	SS	新日鉄	同上

これらの鋼種の選定及び形状は本会幹事会の決定による。

供試材の表面は初年度の処理方法と同一とし、

供試材の各々にリード線とハンダ付して金属体部分はエポキシ樹脂及びポリエステル樹脂で絶縁被覆とし、

1.1.2 試験装置

恒温水槽は初年度から同一のものを使用し、

浸漬液は三浦半島域ノ島海岸より採取した自然海水を使用し、

標準電極は飽和甘汞電極(SCE)とし、電位差計は東洋理化学製のものを、

1.1.3 試験方法

自然海水を35℃±1℃に一定にして、その中にポンプで約1500%の空気を常時吹込む。

この浸漬液の中にリード線をつけた供試材を浸漬し、時間の経過によりその自然電極電位を測定し、標準電極と供試材との距離は約50mmとし、

吹込んでいる空気の気泡が直接に供試材に接触しない様に注意し、

各供試材のある程度の傾向をつかむまで測定する。とし、約3ヶ月間測定し、

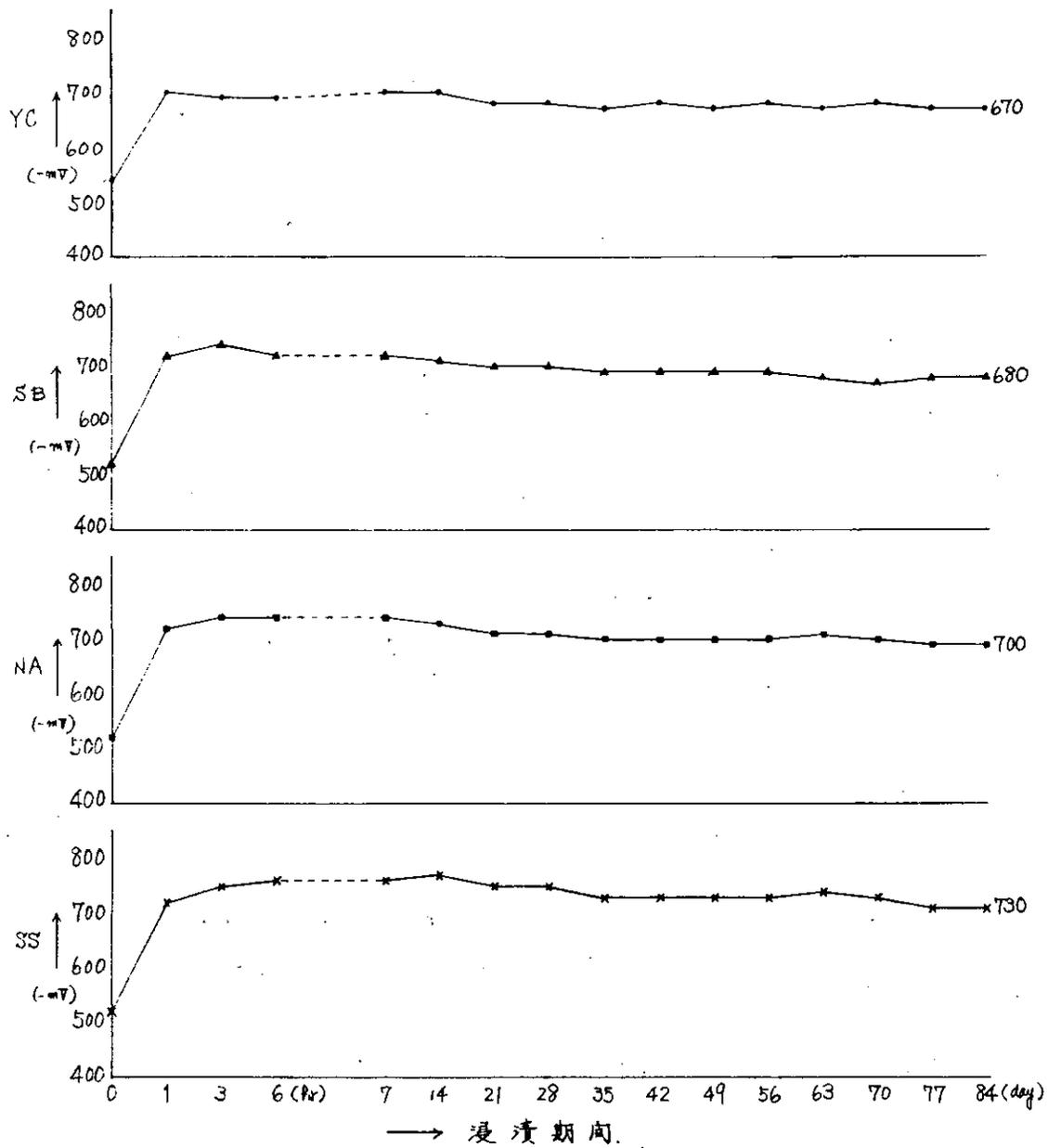
1.1.4 試験結果

浸漬液(自然海水)の分析結果を表・1.1.2に示す。(この浸漬液は1.2及び1.5の試験と同一である。)

表・1.1.2 自然海水の分析結果

測定時点	経過日数	PH	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
試験開始時	0 (日)	7.9	20,500	2,460
更新直前	84	7.3	-	-
更新した海水	0	8.4	-	-
試験完了直前	88	7.4	-	-

供試材の自然電極電位の測定結果は図・1.1.1に示す。



図・1.1.1 海水中における供試材の自然電極電位の変化状況

1.2 1.1の試験に及ぼす乾湿交互の影響。

1.1の試験と同一形状の供試材を用いて、自然海水の1週間ごとの乾湿交互のくり返しを与え、湿の状態(浸漬時)の自然電極電位を測定する。

1.2.1 供試材

1.1.1と全く同一形状で同一鋼種である。表・1.1.1を参照のこと。

1.2.2 試験装置

1.2.1と同一装置。

1.2.3 試験方法

乾湿のくり返しは湿(浸漬)の状態からスタートし、1週間後に浸漬液(自然海水)から引き上げて乾の状態は湿度100%程度の恒温水槽の中にガラスフックで吊り下げて1週間放置する。このサイクルを1サイクル(合計2週間)として6サイクルまで測定する。

この自然電極電位の測定完了後、供試材に発生したさびの分析を行なう。このさびの採取方法及び分析方法は次の通りである。供試材のさびの表面のsoftなさび層と洗浄瓶で濾紙に洗い落とし、これを105~110℃の乾燥器の中で2時間乾燥させ、乳鉢で粉末にし、これを試料とする。softなさび層を除去した供試材に付着しているHardなさび層はスクレパーを用いて剥離させ、そのあとの処理はsoftなさび層の試料調整と同じ方法で試料を作る。

さびの分析方法は定量化学分析とす。

1.2.4 試験結果

乾湿交互くり返しにおける湿の状態(浸漬)のサイクルごとの自然電極電位測定結果は図・1.2.1及び1.2.2を示す。

さらにさび層の分析結果を表・1.2.1を示す。

表・1.2.1 さびの分析結果。(重量%)

供試材	成分記号	Total Fe	Si	Mn	Cu	Cr	Mo	Na	Mg	Ca
Y C (2G-0.3Mo-0.8Sc)	H	55.29	0.36	0.45	0.04	0.55	0.09	—	—	—
	S	63.11	0.07	0.25	0.01	0.03	0.04	—	—	—
S B (125G-1M-0.5Sc)	H	56.97	0.11	0.50	0.07	0.35	—	—	—	—
	S	63.67	0.07	0.16	0.01	0.03	—	—	—	—
N A (0.1P-Cu-0.5Cr)	H	56.97	0.03	0.48	0.12	0.24	—	—	—	—
	S	64.23	tr.	0.08	0.01	0.20	—	—	—	—
S S (SS 41)	H	61.44	0.06	0.34	—	—	—	0.67	0.46	0.84
	S	64.23	0.02	0.20	—	—	—	0.04	0.24	0.41

H: Hardなさび層で分析試料は黒色を呈してゐる。

S: S of 大正の層で分析試料は赤褐色を呈してゐた。

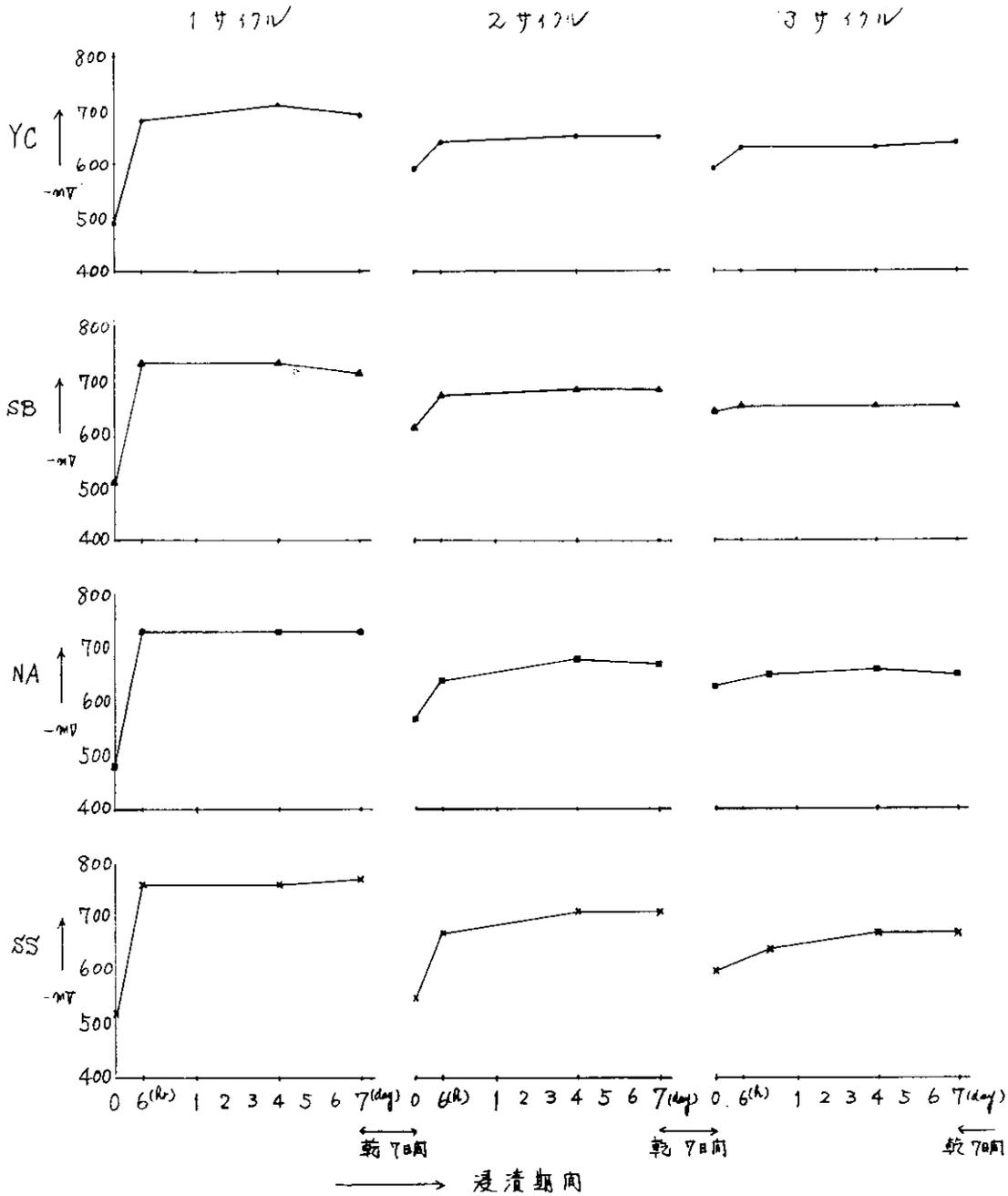
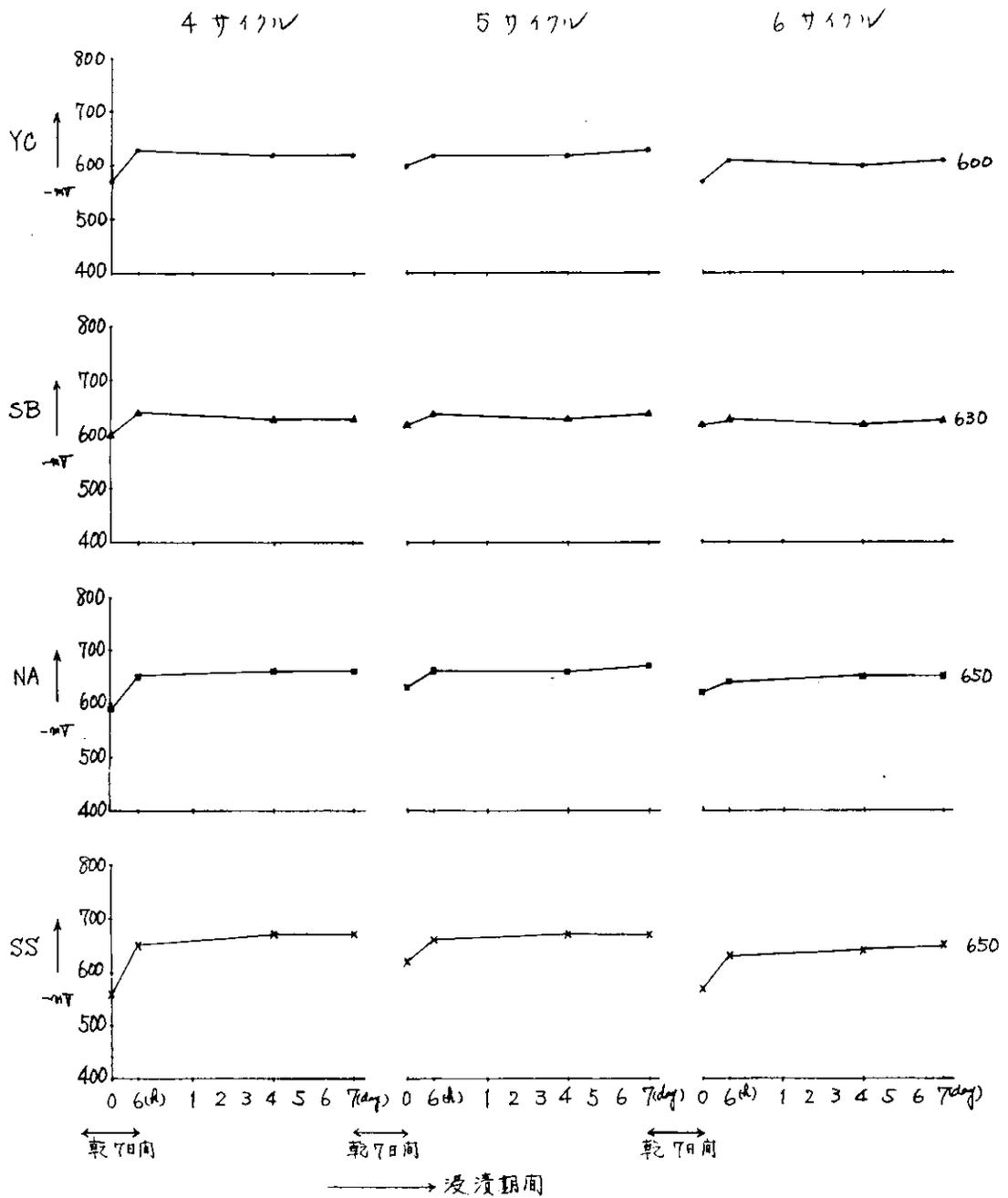


図 1.2.1 乾湿交互試験における運の状態の自然電極電位の変化。
(1 サイクル ~ 3 サイクル)



図・1.2.2 乾湿交互試験における湿の状態の自然電極電位の変化 (4サリル ~ 6サリル)

1.2.5 試験結果の考察.

(1). 海水中における試験用鋼板と船体用鋼板の自然電極電位の変化状況は図 1.1.1 に示され、この試験によらば乾湿交互の影響は図・1.2.1, 図・1.2.2 に示されている。両試験により、同一鋼種のあや程度落着いた自然電極電位は次の通りであった。

	連続浸漬	乾湿交互	差
YC (2Cr系)	-670 mV	-600 mV	(70)
SB (1Cr系)	-680 mV	-630 mV	(50)
NA (0.5Cr系)	-700 mV	-650 mV	(50)
SS (SS)	-730 mV	-650 mV	(80)

(2). 最終的(試験期間約3ヶ月)には乾湿交互をくり返す場合の自然電極電位が連続浸漬の自然電極電位に比べて50~80 mV貴(noble)となつた。

(3). さらに乾湿交互の結果から1サイクルごとの浸漬直後と6時間経過時の電位の低下状況はサイクルが多くなるほど変化が少くなっている。

(4). サイクルごとの浸漬直後の自然電極電位はサイクルが多くなるほど卑(less noble)になる傾向を示し、一方1サイクル内の安定した電位はサイクルが多くなるほど貴(noble)になる傾向を示している。

(5). 乾湿交互の自然電極電位の変化は浸漬によって変化が生ずるが、乾の状態により安定した皮膜に変化し、又時間の経過と共に厚くなり、base-metalを保護する働きとしていたため(2)~(4)に述べた現象を呈していると考えられる。又サイクル毎の浸漬直後と6時間経過時の変化がサイクルが多くなるほど少くなるのは生成された皮膜が安定化してくるためであろう。

(6). 表・1.2.1及びその分析結果からCrに注目すれば、一般にHartは皮膜の層側の方がCrリッチとなっている。特にYC及びSBは顕著である。

1.3 スラッジ塗布面の自然電極電位の測定

本研究では、自然海水中におけるスラッジ塗布を施した試験鋼種10種類について自然電極電位の測定を行なった。

1.3.1 供試材

供試材は、昭和45年度に実験を行なった試験鋼種10種類とした。それを表1.3.1に示す。

表1.3.1 供試材の種類と成分系

符号	成分系
YA	2Cr-1Ni-0.8Si
YC	2Cr-0.3Mo-0.8Si
YD	2Cr-0.2Sb-0.5Ni
SA	Cu-0.5Cr-0.3Ni
SB	1.25Cr-1Mn-0.5Si
SD	2Cr-0.7Si-0.5Mo
NA	0.1P-Cu-0.5Cr
ND	2.25Cr-1Mo
SC	SC42
SS	SS41

1.3.2 試験装置

図1.3.1に試験装置の略図を示す。恒温槽の中に腐食試験槽 $183\phi \times 240 \times 3^{mm}$ の硬質ガラス製で、空気吹込みは、AQUARIUM AIR PUMPを使用しエアポンプよりビニール管で図に示す如くガラス沪過器の沪過細孔(30~20 μ)より通気した。

1.3.3 試験方法

試験片は、 $50 \times 20 \times 2.5^{mm}$ の形状寸法で、表面をエメリー紙#400番迄研磨しアルコールとエーテルで脱脂した。リード線と試験片の接合はハンダ付けとし、エポキシ樹脂で被覆した。試験片の全表面にはスラッジを塗布した。使用したスラッジは、昭和45年度に使用した原産地カフジ原油でその成分を表1.3.2に示す。

試験条件は35 $^{\circ}$ の温度で、海水に空気を吹込(約1000 $^{\circ}$ /min)みながら試験片を水面より-50 mm に浸漬し、165日間自然電極電位の測定を行なった。測定機器は日亜計番電位差計N-V型で照合電極は飽和甘汞電極を使用した。

海水は玉野造船所沖で採取したもので、その組成を表1.3.3に示す。浸漬試験中海水の更新を1回行なった。

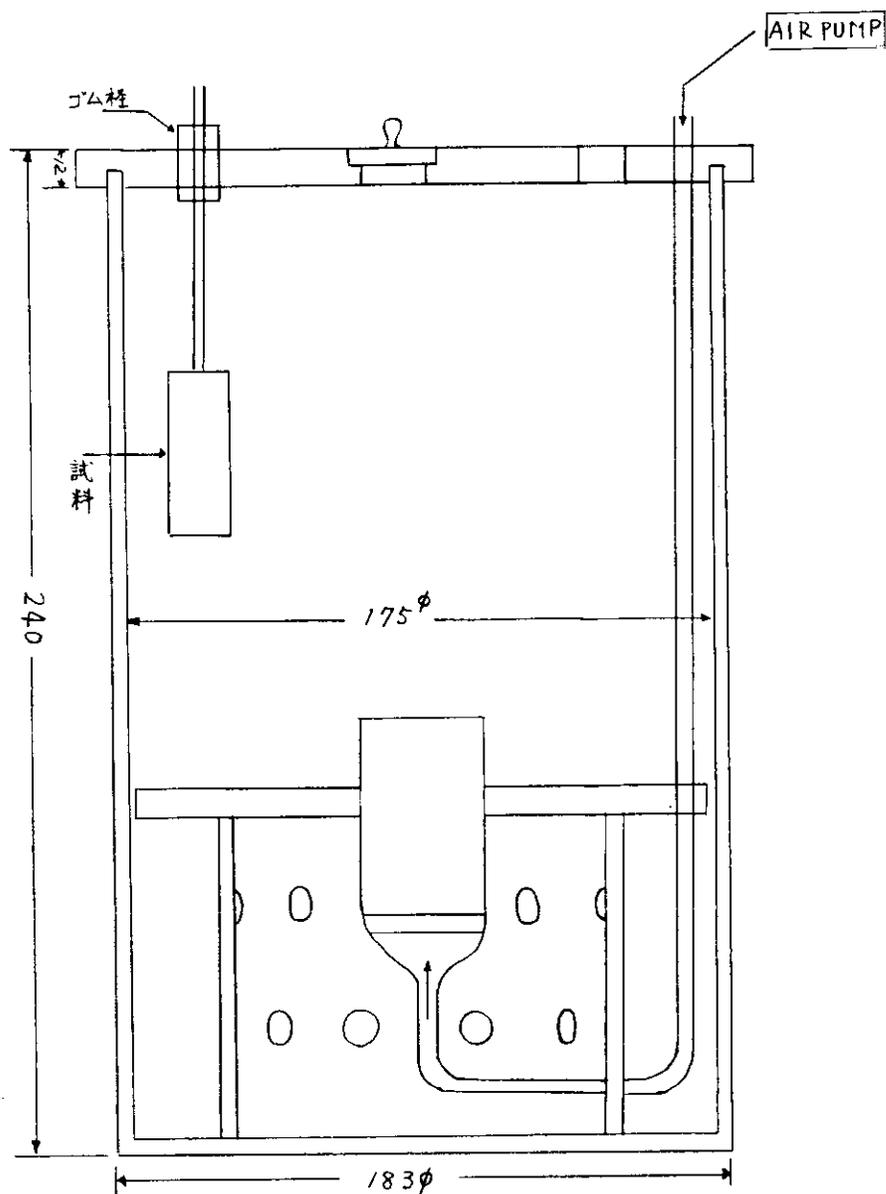


図1.3.1 試験装置

浸漬試験終了後のスラッジ処理は、パークロールエチレンとアルコールおよびアセトンで脱脂した。腐食生成物の除去には5% HCl + 0.5% イビット 1 L 酸洗い液で行なった。各試料の最大孔食深さを PEACOCK-DIAL DEPTH GAUGE (0.01mm) で測定した。

表 1.3.2 スラッジの成分

スラッジの性状	比重	(24/4°C) 1.554
	引火点	27°C 以下(常温)
	水分	13.8 %w/w
	硫黄分	2.66 %w/w
	石油エーテル抽出分	35.5 %w/w
石油エーテル抽出分の分光定性		
Fe ⁺⁺ Ca ⁺ Mg ⁺ Si ⁺ Mn [±] Cu [±] Al [±] Cr [±] Ni [±] Mo [±]		
石油エーテル抽出残分の定量分析		
lg Loss (800°C)		16.26 %w/w
Fe ₂ O ₃		51.14
FeO		27.30
CaO		0.72
MgO		0.60
SiO ₂		0.56
Cl ⁻		0.92

表 1.3.3 海水の組成 (PPM)

	PH	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	溶存酸素
試験開始の海水	8.0	18500	2510	2497	520	7.10
更新した海水	7.9	18110	2420	2375	502	7.05

1.3.4 試験結果

浸漬165日間の自然電極電位の経時変化を図1.3.2に腐食生成物除去後の表面状況を写真1.3.1に示す。
最大孔食深さ測定結果を表1.3.4に示す。

表1.3.4 孔食深さ (mm/gr)

試料	孔食深さ	試料	孔食深さ
SS	2.66	YC	1.57
NA	2.45	YD	1.06
SC	1.83	SB	0.99
SD	1.64	ND	0.99
SA	1.61	YA	0.99

図1.3.2で浸漬46日目に各試験片共に自然電極電位が卑な電位を示している。このことは、3日間停電のため空気を供給出来なかつたことに起因すると考えられる。浸漬144日より電位が落着いた。その自然電極電位を示せば表1.3.5のようになる。

表1.3.5 浸漬165日目の自然電極電位

試料	電位	試料	電位
SC	-650 ^{mv}	SB	-605 ^{mv}
SS	-640	YC	-605
SA	-635	SD	-600
ND	-620	YD	-595
NA	-615	YA	-595

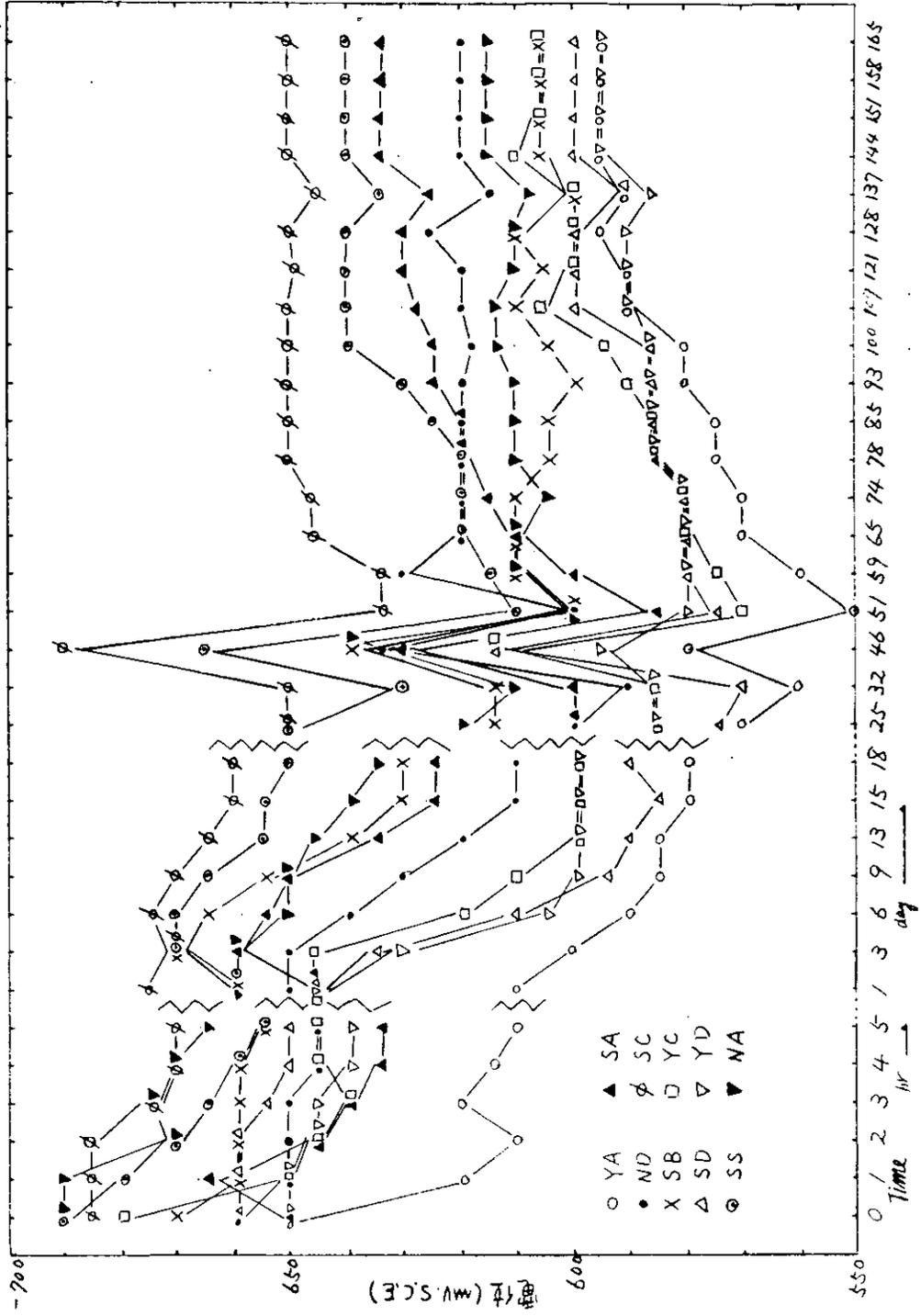


図1.3.2 自然電極電の経時変化

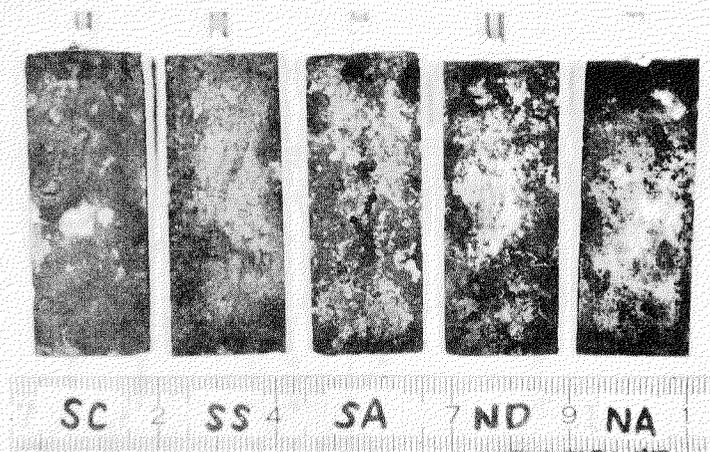


写真1.3.1 酸洗後の表面状態

1.4 分極測定

1.4.1 実験方法および結果

(1) 供試材

昭和45年度の試験鋼種10種で、その成分系を表1.4.1に示す。試験片は $14\text{ mmw} \times 26\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ の板状試験片で、測定端子はハンダによって接着した。測定面は $10\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ の一面で、他の面はタールエポキシ系塗料で覆った。

(2) スラッジ塗布面の自然電極電位の測定

スラッジが荷油管の腐食に大きな役割を演じていると考えられたので、スラッジ塗布面の自然電極電位(飽和甘汞電極基準)を測定した。

1.3項において使用したのと同じのスラッジを約 1 mm 厚さで全面に塗布し、約15時間自然乾燥後電位を測定したところ $-200 \sim -500\text{ mV}$ を非常にバラッキが大きかった。この原因は、スラッジが多孔質になり、表面積が一定してないためと推定された。

そこで、スラッジを塗布後約15時間自然乾燥し、その後カフジ原油に浸漬したSS材を、酸素飽和にした自然海水(35°C)に挿入して自然電極電位を測定した。その結果を図1.4.1に示す。この図から明らかのように、スラッジ面の自然電極電位は $-100 \sim -200\text{ mV}$ と非常に貴であった。

つぎに測定面の $\frac{3}{4}$ の面積にスラッジを塗布したSS材酸素飽和海水中に浸漬して自然電極電位を測定した。その結果を同じく図1.4.1に示すが $-450 \sim -610\text{ mV}$ と非常に卑になっている。

実際の荷油管の状況は一部鉄鋼部分が露出しているものと考え、測定面の $\frac{3}{4}$ の面積にスラッジを塗布する方法で試験鋼種10種の自然電極電位を測定した。

測定諸条件はつぎのとおりである。すなわち

- 浸漬液：自然海水 pH 7.9 温度 35°C 1.5 l
- 脱気状況：酸素吹込み 3 l/min
酸素 { 純度 99.8%
不純物： N_2 0.2%, 水分 10 mg/m^3 以下
- 測定器：タケダ理研工業製積分型デジタル電圧計
TR-6515 (入カインピーダンス $1000\text{ M}\Omega$, 積分時間1秒)
- スラッジ：1.3項において使用したのと同じのスラッジを約 1 mm 厚さで測定面($20 \times 10\text{ mm}$)の $\frac{3}{4}$ の面積に塗布
- 基準電極：飽和甘汞電極

その測定結果を図1.4.2に示すこの測定結果から明らかのように2Cr系ほど貴になっている。

(3) 陽分極測定

(2)頂の試験の結果、スラッジ面が非常に貴なことがわかったので、陽分極曲線を測定することによって、耐食性の評価が可能かもしれないと考え、実験を行った。

実験条件はつぎのとおりである。すなわち

- 浸漬液：自然海水 pH 7.9 温度 35°C 1.5 l
- 脱気条件：酸素吹込み (3l/min) および窒素吹込み (3l/min)

酸素 { 純度 99.8
 不純物 N₂O₂ %
 水分 10mg/m³以下

窒素 { 純度 99.99 %
 不純物 O₂ 50ppm以下
 水分 20mg/m³以下

- ホテソシヨスタット：日亜計器製 HPE-500
- 試験片面積：10 × 20mm
- 対極：白金網
- 基準電極：飽和甘汞電極
- 試験片-対極間の距離：約 70mm
- 試験片-塩橋先端の距離：約 2mm

分極方法はつぎのとおりである。すなわち試験片を海水に浸漬してから3分以内、自然電極電位から -900mV に陰分極し、5分間保電後、手動によって貴の側へ階段状に 20mV 変化させては2分後に電流値を読む定電位電解法にて陽分極曲線を測定した。

測定結果を図 1.4.3 および図 1.4.4 に示す。図 1.4.4 から明らかなように、窒素で脱気した海水中で陽分極曲線を測定した場合に、非常に狭い不動態領域があらわれた。特級試験薬の食塩と蒸留水によって作った 3% 食塩水中でも同様な不動態領域があらわれた。図 1.4.4 の分極曲線において極大電流密度を比較すると 2Cr 系ほど極大電流密度は小さい。一方酸素吹込み中の陽分極曲線についてみれば鋼種間の差ははっきりとは認められない。

(3) 陽分極時の電流密度の経時変化

本法のような陽分極測定方法では、分極時に電流密度が変化する。したがってここでは、一定電位に分極した場合に、電流密度がどのように変化するかを調べた。

電位は自然電極電位から -550mV に直接保持した。その他の条件は(2)頂と同じであった。

測定結果を図 1.4.5 および図 1.4.6 に示す。窒素で脱気した場合は直ちに、陽分極になるが、酸素を吹込んだ場合は最初陰分極になり、時間の経過につれ

て陽分極になっていることがわかる。

1.4.2 まとめ

スラッジ面の電位が、 $-100 \sim -200 \text{ mV}$ である一方、ほぼ同一条件の1.1頃の海水中の鋼の電位が $-670 \sim -730 \text{ mV}$ であることを考慮に入れると、スラッジ面と鋼面の間の電位差は 500 mV にも達することになる。一般の電気防食に採用されている亜鉛と鉄との電位差が 400 mV 程度であるのでこのスラッジ面と鋼面との間の電位差は極めて大きいことがわかる。

また実際の荷油管の腐食状況をみると、スラッジで覆われた面積が大きく腐食は局部的に発生していることから陽極面積に対して陰極面積が非常に大きいことがわかる。つぎに分極抵抗が問題になる。スラッジ面の陰分極抵抗を測定しようとしたが、バラッキが大きく失敗した。したがってここでは正確な検討はできないが、スラッジ中には海水も含まれていることから、陰分極抵抗は余り大きくないと推察できる。

鋼面の陽分極抵抗は海水中の酸素含有量でかなり影響を受ける。鋼とスラッジが結合された場合、その電位が約 $-550 \text{ mV vs. S.C.E}$ よりも貴になれば鋼種間の差は小さいように考えられる。他方約 $-550 \text{ mV vs. S.C.E}$ よりも卑な場合海水中の酸素含有量が少なければ、2Cr系鋼の耐食性がすぐれていることが、推察される。

表1.4.1 試験鋼種

符号	成分系
YA	2Cr - 1Ni - 0.8Si
YC	2Cr - 0.3Mo - 0.8Si
YD	2Cr - 0.2Sb - 0.5Ni
SA	Cu - 0.5Cr - 0.3Ni
SB	1.25Cr - 1Mn - 0.5Si
SD	2Cr - 0.7Si - 0.5Mo
NA	0.1P - Cu - 0.5Cr
ND	2.25Cr - 1Mo
SC	SC 42
SS	SS 41

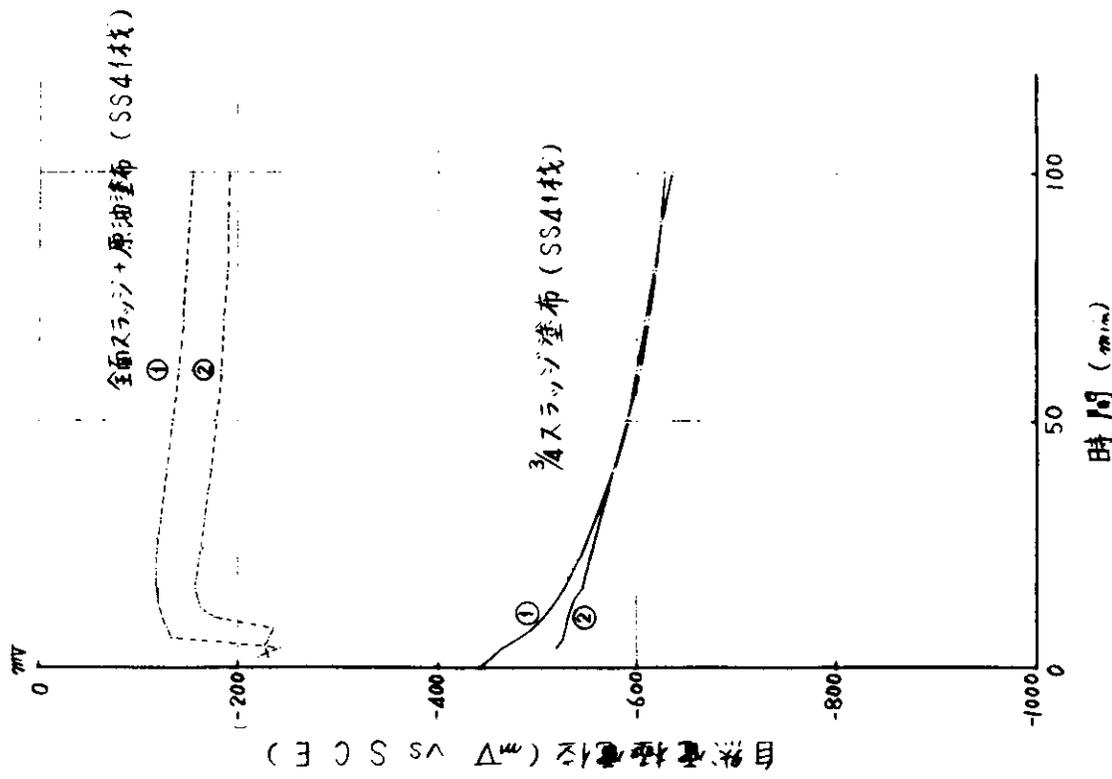


図1.4.1 自然電極電位の経時変化(酸素飽和自然海水)

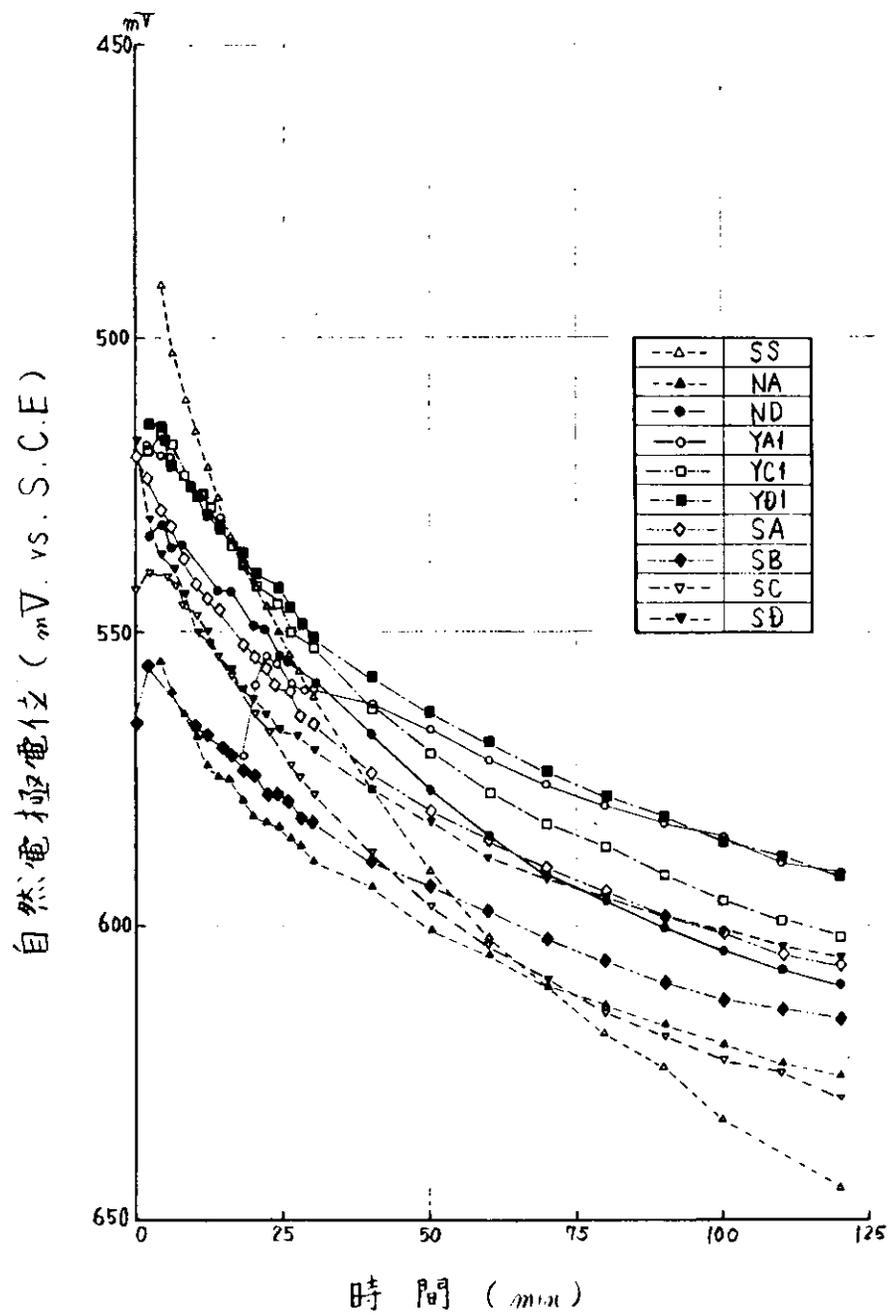


図1.4.2 自然電極電位の経時変化 (酸素飽和自然海水)
 3/4 スラッジ塗布

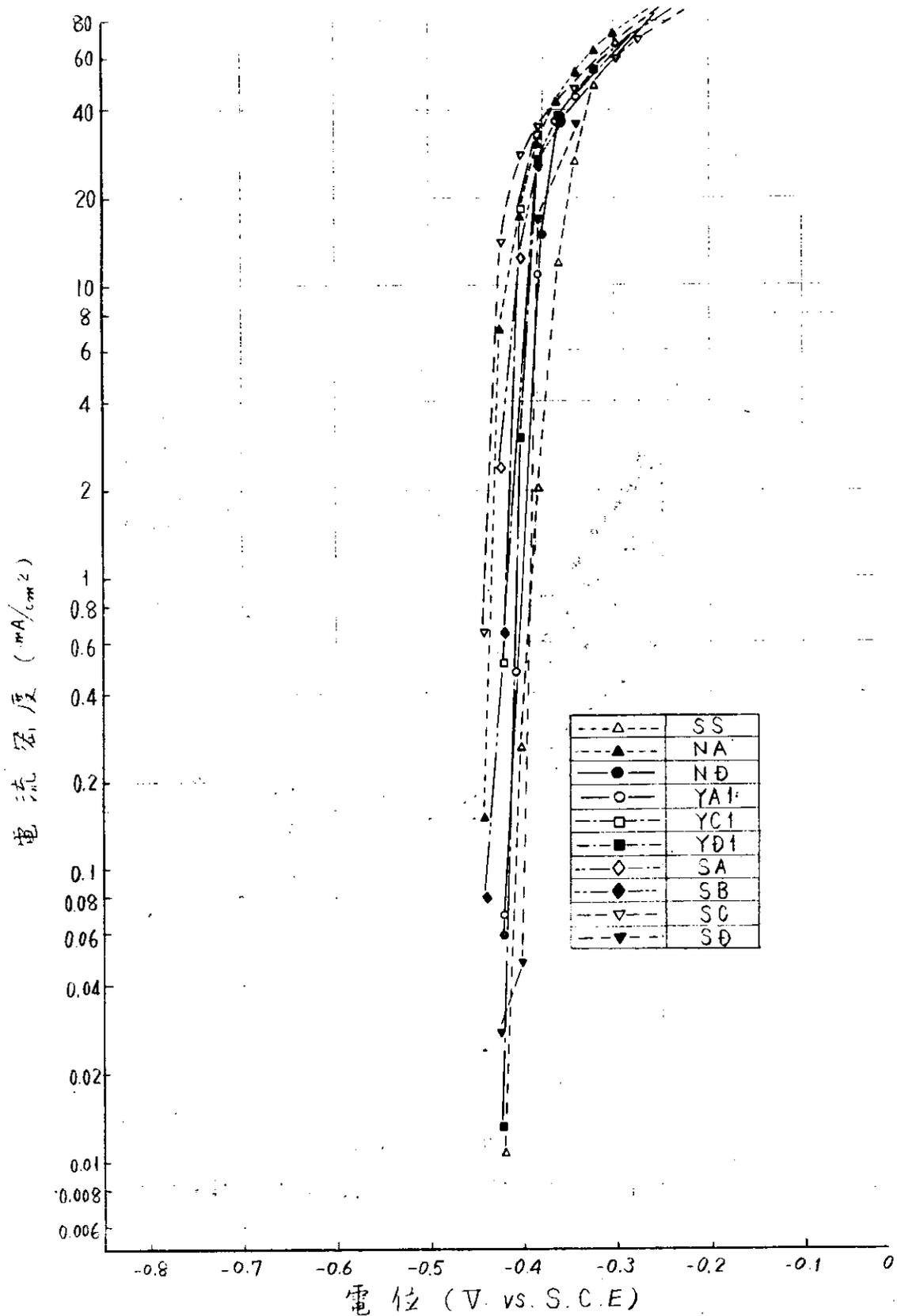


圖1.43 陽分極曲線 (酸素飽和自然海水)

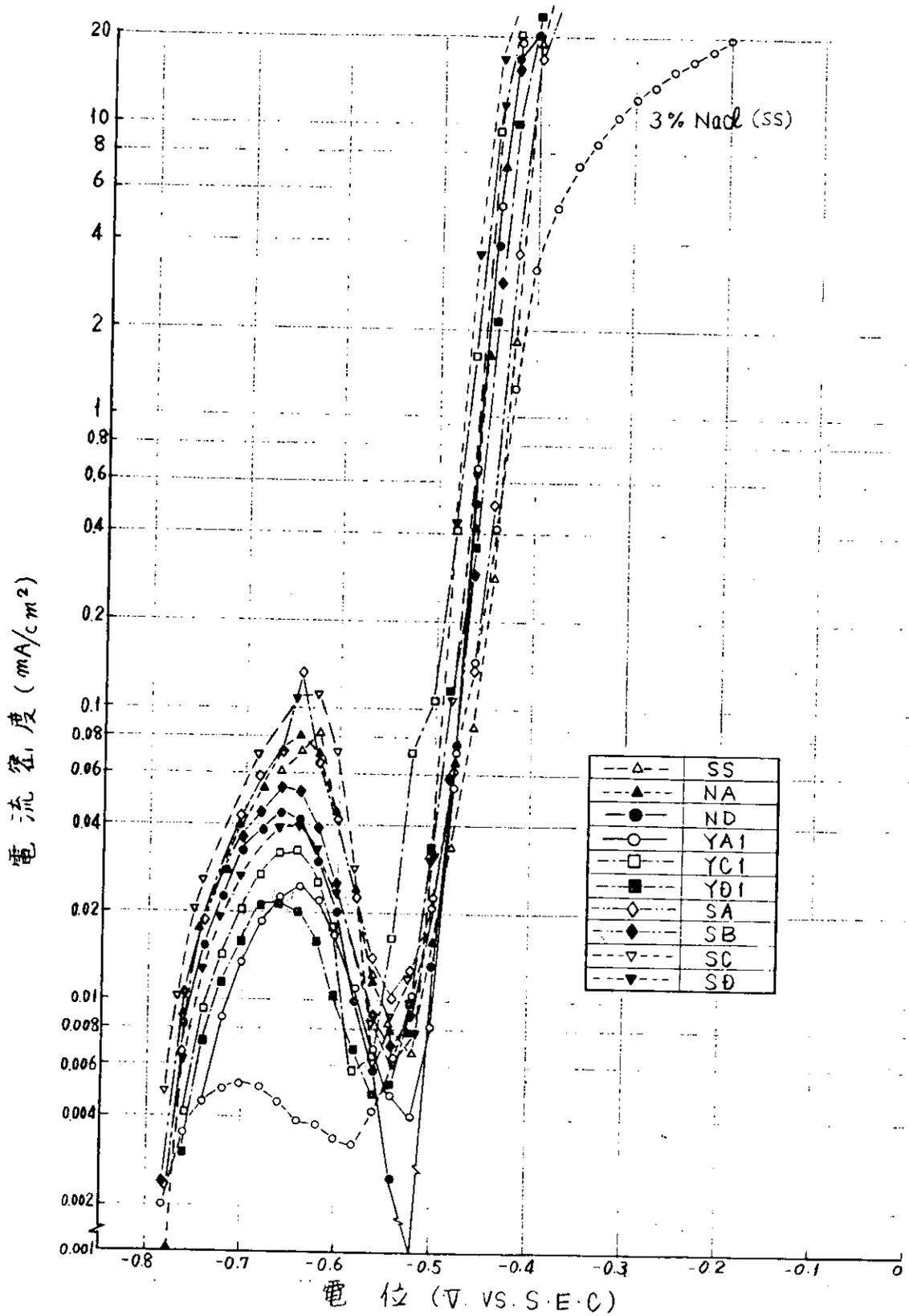


図1.44 陽分極曲線 (脱気自然海水)

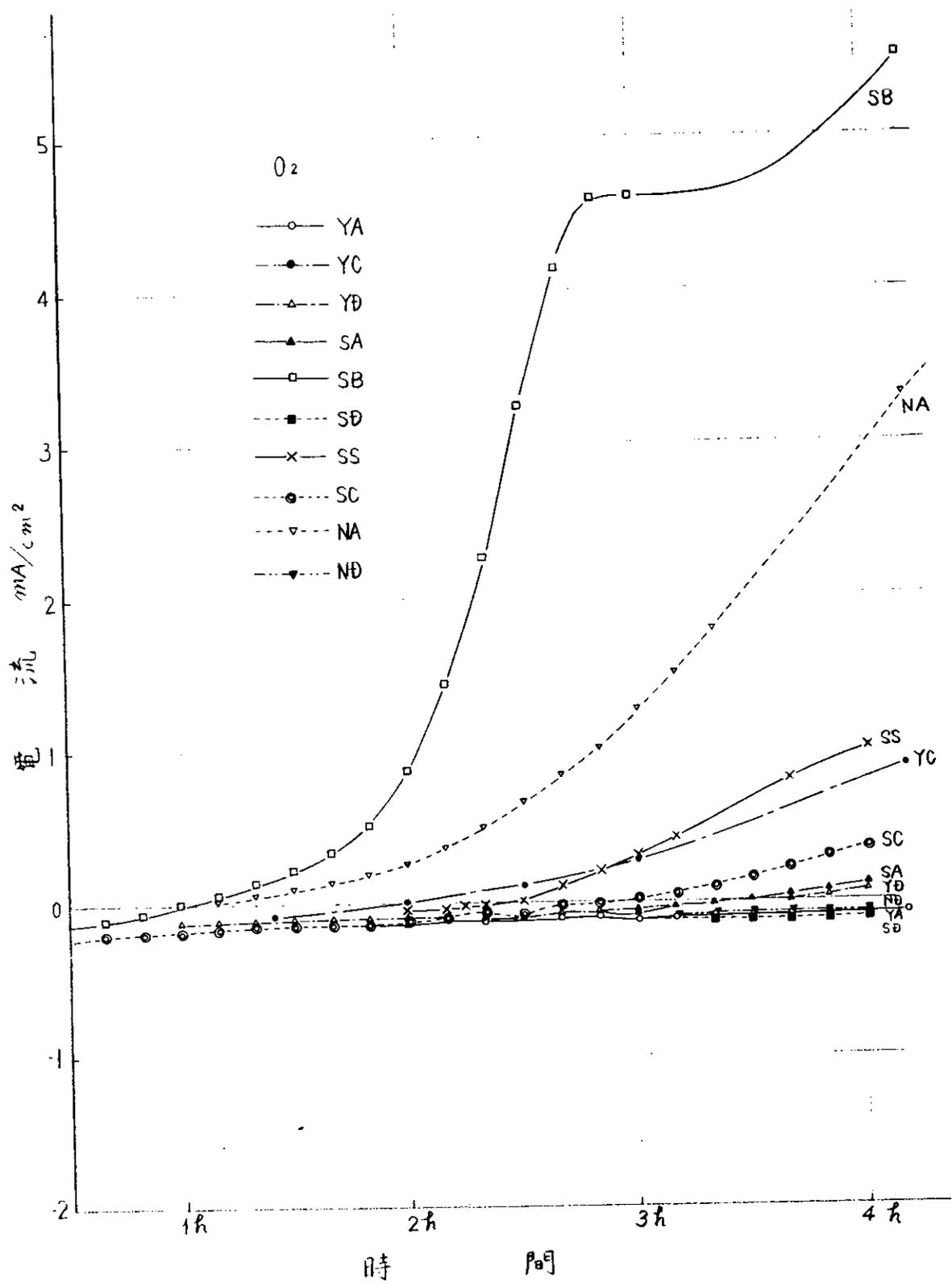


図1.4.5 陽分極時の電流密度の経時変化 (酸素吹込み)

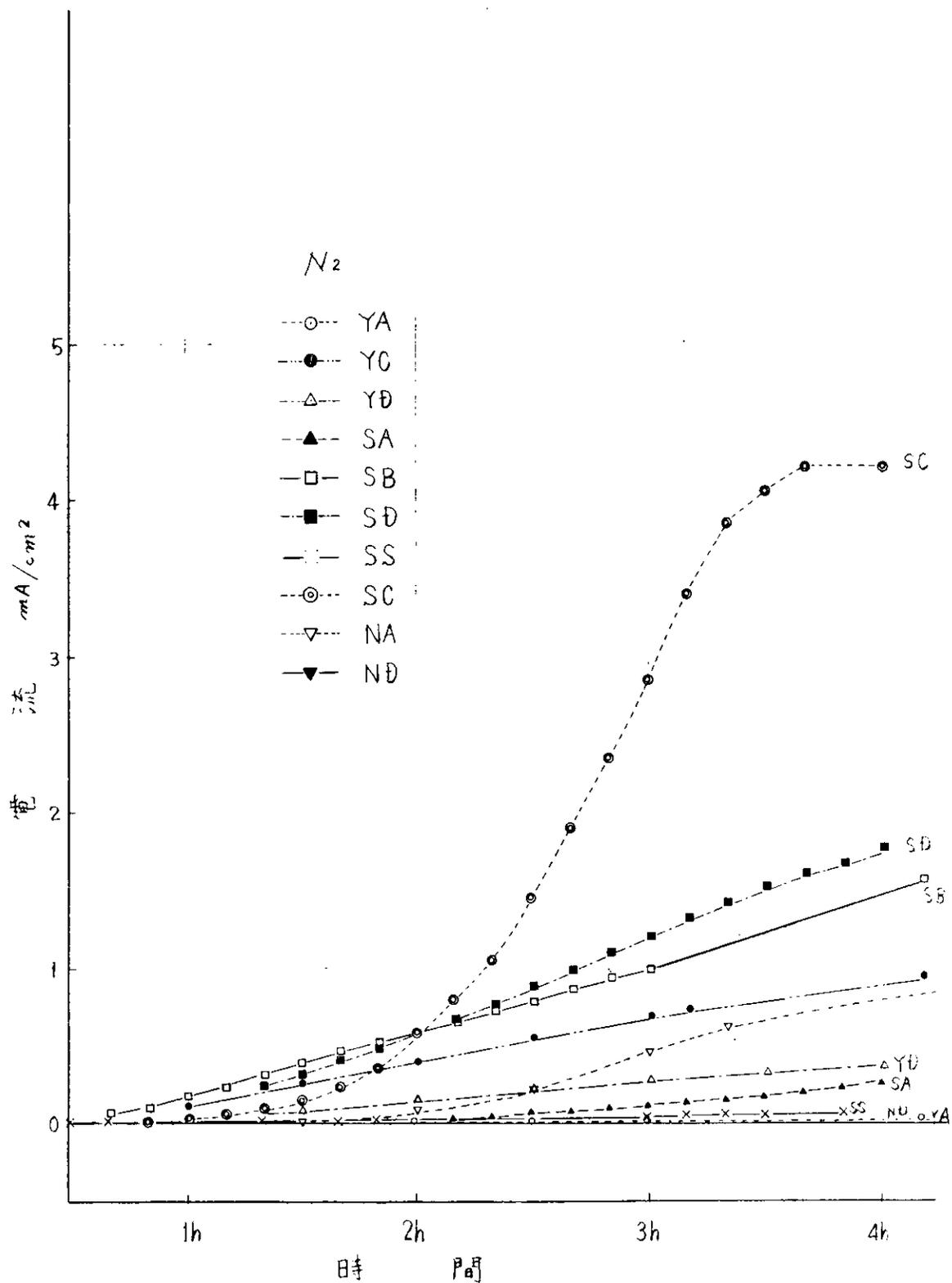


図1.4.6 陽分極時の電流密度の経時変化(窒素吹込み)

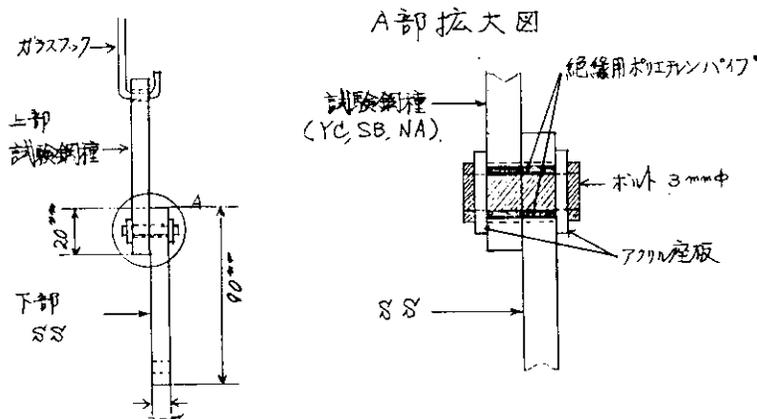
1.5 各種鋼板の接続時の腐食試験

試験用鋼板と船体用鋼板をボルトで面接触させて自然海水に浸漬し、その時の腐食試験を行う。

1.5.1. 供試材

1.1.1 と全く同一形状で同一鋼種である。表・1.1.1 を参照のこと。

この4鋼種をYC-SS, SB-SS及びNA-SSの3組合せとして、その面接触方法は図・1.5.1に示す。接触面は $20\text{mm} \times 70\text{mm}$ である。



図・1.5.1. 接合方法

1.5.2. 試験装置

1.2.1 と同一装置。

1.5.3. 試験方法

YC-SS, SB-SS及びNA-SSの3種類の組合せによって作られた試験片を試験用鋼種の上にしてガラスフックに吊り、恒温水槽の自然海水の中に浸漬させる。172日間連続浸漬させたのち引き上げて付着しているさびを完全に除去して重量測定し、浸漬前の重量との差から mm/yr で表現した腐食速度を求める。又孔食深さを測定して mm/yr に換算して表示する。

1.5.4. 試験結果

試験結果を表・1.5.1に示す。

本試験の試験片の浸漬後より引き上げた直後のさび付着状態と付着しているさびを完全に除去した状態を写真1.5.1～1.5.3に示す。

すべて3組合せ試験片とも面接触部分は腐食を生じていなかった。

YCは腐食が少なく、SBには一部溝状腐食を生じ、NAは全面腐食を生じ、NAと接合されたSSには異常なほどの孔食が生じていた。

SSの腐食速度はおおむね 0.22mm/yr である。

表・1.5.1 腐食測定結果

組合せ	試験片 記号	試験前の重量 (g)	試験後の重量 (g)	減量 (g/172day)	腐食速度 (mm/yr)	孔食深さ (mm/yr)
YC-SS	Y C	150.343	149.691	0.652	0.015	0
	S S	149.734	139.246	10.488	0.234	0.42 ⁴
SB-SS	S B	147.384	146.437	0.947	0.021	*1 0.14 ⁸
	S S	149.368	138.785	10.583	0.236	0.43 ⁵
NA-SS	N A	147.466	143.484	3.982	0.089	0.23 ³
	S S	150.070	140.680	9.390	0.209	0.73 ²

- 注 (1). 試験片表面積は接合部の面積を含まない。
 (2). 試験片の比重はすべて7.8で計算してある。
 (3). 孔食深さは試験片の表裏の最大値と平均の値から計算した。
 (4). *1 はSSとの接合境界部に生じた溝状の孔食から求めた。

1.5.5 試験結果の考察

(1). 本研究の初年度報告書(昭和45年3月)及び2年度報告書(昭和46年3月)から素材単独及び異材溶接材の静海水浸漬試験結果を今回の結果と併せて表・1.5.2に示す。

表・1.5.2 各種鋼種と静海水浸漬試験結果

年度 腐食 供試材	*1 (44年度) 素材単独		*3 (45年度) 素材単独		*4 (45年度) 異材溶接材		*4 (46年度) 接触接合材	
	腐食速度 (mm/yr)	孔食深さ (mm/yr)	腐食速度 (mm/yr)	孔食深さ (mm/yr)	腐食速度 (mm/yr)	孔食深さ (mm/yr)	腐食速度 (mm/yr)	孔食深さ (mm/yr)
Y C	0.062	0.126	0.058	0.153	*5	*5	0.015	0
S S	0.156	0.273	(YS) 0.113	(SS) 0.248	0.160	0.358	0.234	0.42 ⁴
S. B	0.086	0.188	0.075	0.131	*5	*5	0.021	0.14 ⁸
S S	*2	*2	(SS) 0.116	(SS) 0.219	0.167	0.372	0.236	0.43 ⁵
N A	0.102	0.274	0.087	0.219	*5	*5	0.089	0.23 ³
S S	*2	*2	(NS) 0.120	(VS) 0.175	0.172	0.321	0.209	0.73 ²

- 注 *1 造研発行 初年度報告書 page 67.
 *2 この項の数値は上のSSと同値。
 *3 造研発行 2年度報告書 page 49.
 *4 造研発行 2年度報告書 page 51
 *5 Y C, S B, N A側は腐食せず。

(2). 試験用鋼種(Y C, S B, N A)の腐食速度は溶接及び接触接合より低く、その方が素材単独よりも小さい。特に接合が溶接では試験用鋼種は腐食を生じなかったと報告されている。

一方SSは単独の場合の方が溶接、接触よりも腐食速度は小さい。SSの腐食速度の増大は単独で1.0とすると溶接では1.0~1.5, 接触では1.5~2.0となっている。

これは接触によるSSがアノードとなっているためと考えられる。溶接の場合とボルトによる面接触・接合と比較すると接合の方がSS及び試験用鋼種の両者とも腐食が大きいが、これは空気吹込みと試験片の調整(溶接部の有無)等の試験条件の差異によるものであろう。

また今回の試験ではNA-SSの腐食量が大きく、これは腐食環境のばらつきによる影響ではないかと考えられる。

(3) SSの孔食深さは腐食速度と同じような傾向を示している。KK-NAと接触接合よりKK-SSの孔食は著しく異常ではないかと考えられる。このSSの孔食は海水に浸漬するとすぐに発生し孔さびの部分に位置し、試験完了時のさび付着状況は写真・1.5.3に示されている。

SSの孔食係数はYC-SS; SB-SSが1.8, NA-SSは異常孔食?のためが3.5となっている。

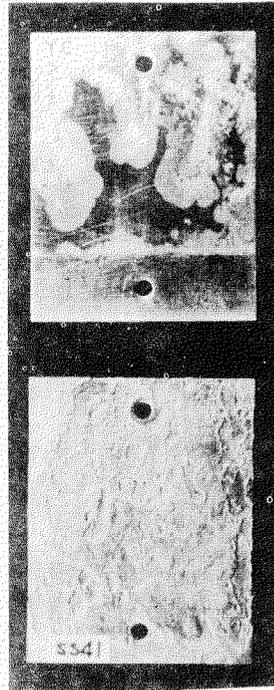
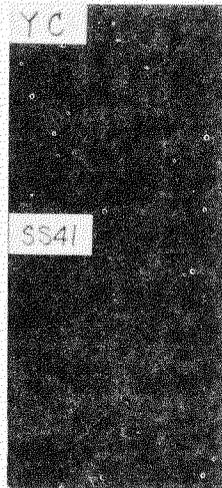


写真 1.5.1 YC-SS

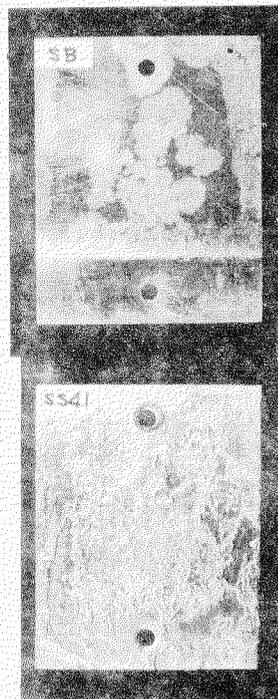
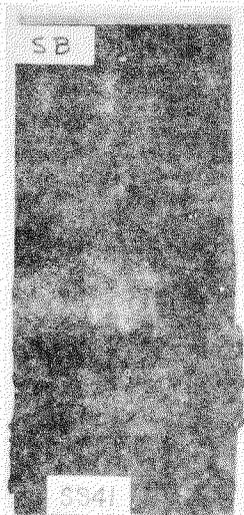


写真 1.5.2 SB-SS

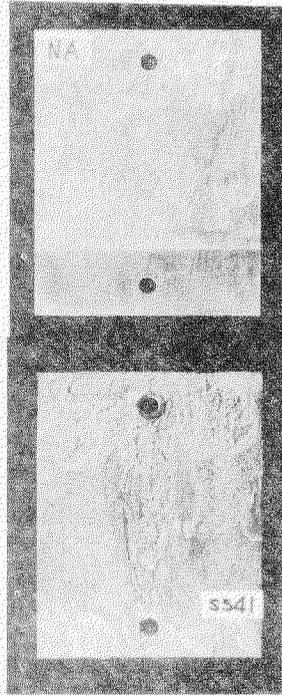


写真 1.5.3 NA-SS

1.6 接触およびすきま腐食に対する電気防食の効果

前年度の腐食試験による研究で、2.1節の静海水浸漬試験においてSS41と低合金鋼を溶接した試験片はSS41が接触腐食によって腐食速度を増大する傾向が認められた。したがって、荷油管に低合金鋼を使用する場合にフランジ継手部などで普通鋼との接続に対して接触腐食およびすきま腐食が問題になると予想される。そこで、本試験は、静海中におけるSS41と3種類の低合金鋼との接触およびすきま腐食の程度を調べるとともに電気防食を使用したときの効果を検討するために実施した。

1.6.1 供試材料

試験に用いた材料は、SS41と3種類の低合金鋼で、その成分系を表1.6.1に示す。試験片は、すべて90×70×3mmの寸法で、その表面はエンドレス研磨ベルト#400で研磨し、アセトンで脱脂した。

表 1.6.1 供試材料の成分系

記号	成分系
SS	SS41
NA	0.5Cr-Cu-0.1P
SB	1.25Cr-1Mn-0.3Si
YC	2Cr-0.3Mo-0.8Si

1.6.2 試験方法

(1) 試験装置

腐食試験タンクは、縦500mm・横1000mm・深さ950mmの恒温水槽を用いた。

(2) 試験液

腐食試験液は、舞鶴地正で採取した海水を用いた。その海水の性状は表1.6.2に示すとおりである。試験液中の溶存酸素は3.4Wエアポンプを用いて試験中常に空気を吹き込み、飽和状態になるようにした。試験温度は、35±1°Cに調節した。

表 1.6.2 海水の性状

PH	比重	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁺
7.80	1.027	16.256 ^{ppm}	450 ^{ppm}	1.180 ^{ppm}	2.290 ^{ppm}

(3) 試験条件および試験方法

試験片は、組合せ条件にしたがって図1.6.1に示すように2枚合わせ、試験片間のすきまを塩化ビニール製ワッシャー(外径10mmφ)で所定の寸法に保持し

鋼製ボルト、ナットで固定した。(以下2枚接続した試験片を接触試験片と呼ぶ) 接触試験片は、鋼製ボルトを通じて電気的に導通されている。表1.6.3に試験条件の組合せを示す。電気防食法は、外部電源方式で北斗電工製のポテンシオガルバノスタット(PGS-1型)を用い、接触試験片の防食電位を -850mV (飽和甘汞電極基準)に設定した。陽極には、 10mm 角の白金板を用いた。試験片の配置は、陽極の周りに9組の接触試験片を図1.6.2のごとく並べた。電気防食をしない接触試験片の海水中における自然電極電位の測定には、日亜計器製のHP-E型ポテンシオメーターを使用した。

腐食試験の評価は、約3ヵ月間の連続浸漬試験後の表面状況および重量減から求めた。試験後の試験片重量は、5% HCl + 0.5% イソット / L 酸洗液で腐食生成物を除去し、洗浄、脱脂、乾燥後測定した。

表 1.6.3 試験条件と組合せ試験片番号

防食法		なし	電気防食		
すきま (mm)		1.0	1.0	2.0	4.0
組合せ	SS41-SS41	SS1-SS2	—	—	—
	NA-SS41	NA4-SS3	NA5-SS4	NA6-SS5	NA7-SS6
	SB-SS41	SB1-SS7	SB2-SS8	SB3-SS9	SB4-SS10
	YC-SS41	YC1-SS11	YC2-SS12	YC3-SS13	YC4-SS14

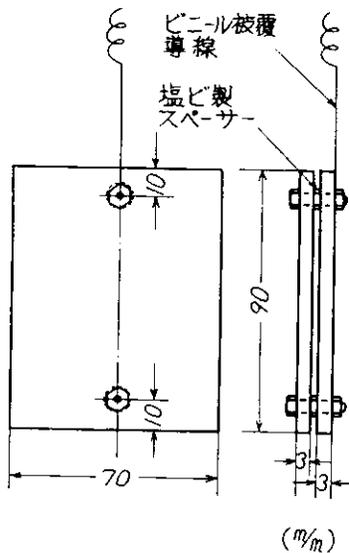


図1.6.1 試験片の接触要領

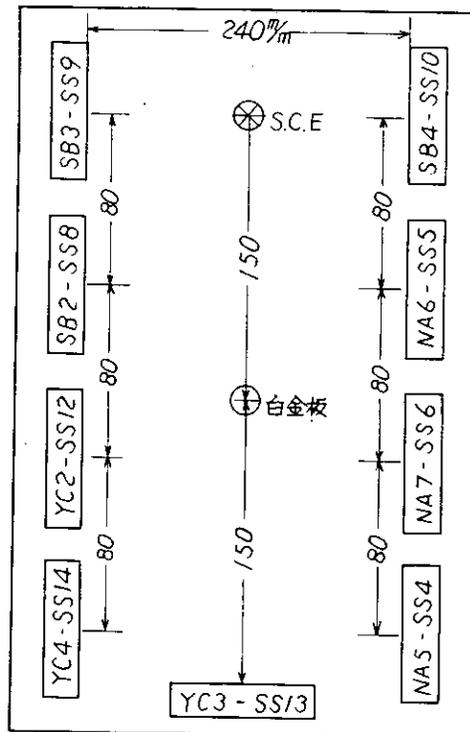


図1.6.2 試験片の配置図

1.6.3 試験結果および考察

(1) 接触試験片の自然電極電位の経時変化

SS41と低合金鋼を接触させたときの海水中における自然電極電位の経時変化を87日間測定した。その結果を図1.6.3に示す。自然電極電位と浸漬時間との関係をみるといずれも急激な変化は認められないが、SS41と接触させた低合金鋼の種類によって、若干の差異が認められる。すなわち1800時間経過後の自然電極電位をみるとSS-SSおよびNA-SSの接触腐食片は -720mV 、SB-SSでは -715mV 、YC-SSでは -695mV となる。このことは、SS41と接触する鋼種のCr含有量と関連がみられ、Cr含有量が多い鋼種と接触するほどSS41はアノード分極を起し、腐食電流を増大する傾向を示すものと考えられる。

(2) 接触およびすきま腐食試験結果

上述の87日間連続浸漬中自然電極電位を測定した接触腐食片を試験後引き上げ、腐食状況の観察および試験前後の重量減を測定した。試験後引き上げ直後の外表面の腐食状況は、写真1.6.1に示すようにSS41-SS41の接触試験片は両方とも赤サビが発生しているが、SS41と低合金鋼の接触試験片ではいずれもSS41だけに赤サビが発生し、低合金鋼には赤サビの発生がほとんど見られなかった。しかし、ボルト、ナットの頭のサビが流出した部分はYC試験片にみられるように若干サビが発生する傾向を示した。すきま面の腐食状態は、写真1.6.2に示すようにいずれも黒色の腐食生成物が全面均一に薄く付着している程度で、外表面に比べて少ない。酸洗い後の表面状態の一例を写真1.6.3に示す。重量減測定結果を表1.6.4に示す。

この結果を、44年度および45年度に実施した単独の試験片の腐食速度と比較して図示すると図1.6.4に示すようになる。SS41同志ですきまを与えた試験片は、平均腐食速度、 0.053mm/year 、SS41単独の場合の腐食速度、 $0.156\sim 0.116\text{mm/year}$ の1/2以下であり、上述したすきま面での腐食状況からみてもすきま腐食の対策をとくに考慮する必要はないと思われる。

次にSS41と低合金鋼との接触腐食試験の腐食速度についてみると、SS41の腐食速度は、SS41同志の接触試験片の平均腐食速度の約1.5倍となり、低合金鋼の腐食速度は単独試験片の場合の腐食速度に比べて著しく少なく、かつ、3種類の鋼種間にはほとんど差異が認められない。このことは、明らかに、SS41の犠牲によって低合金鋼が防食されたことを示す。

(3) 接触およびすきま腐食に対する電気防食効果

すきまを1mm、2mmおよび4mmの3水準に変化させた接触腐食試験片を海水中で -850mV (Vs, SCE)に設定して電気防食を行なったときの重量減を測定した。この結果を表1.6.5に示す。

電気防食を行なった接触試験片は、いずれの鋼種も外表面およびすきま面とくに写真1.6.3に示すように赤錆の発生は見られず、むしろ炭酸カルシウムと思われるスケールが固着し、腐食速度から明らかなように、ほとんど腐食されない。しかし、電気防食を行なった接触試験片においてもSS41と低合金鋼の腐食速度を比較してみると、図1.6.5に示すようにSS41の腐食速度は低合金鋼よりも大である。電気防食による防食率は、防食しない接触試験片の腐食速度と電気防食を行なった接触試験片の腐食速度から求めると約97%になり、電気防食の効果は十分認められる。すきまの影響については、ほとんど認められなかった。

-850mV (Vs. S.C.E) の防食電位に設定したときの電流密度の経時変化は、図1.6.6に示すように、電流密度 0.42 A/m^2 をピークにして約670時間経過後、 0.013 A/m^2 になりほぼ安定する。

1.6.4 まとめ

以上の結果を要約すると次のようになる。

- (1) 同面積のSS41と低合金鋼を接続した場合、SS41の腐食速度は、単独の腐食速度の約1.5倍となる。
- (2) その対策の一つとして、電気防食は非常に有効であることが確認された。
- (3) すきま面における腐食は少なく、とくにその対策を考慮する必要がない。したがって、荷油管に低合金鋼を適用した場合、普通鋼管の接触腐食の防止策として、電気防食は非常に有効であるが、管内面側に電気防食を使用することに難点があり、この点を考慮する必要がある。

表 1.6.4 接触試験片の腐食試験結果

組合せ	すき間 (mm)	試料番号	87日間の重量減量 (g/dm ²)	孔食深さ (mm/year)	腐食速度 (mm/year)
SS41 - SS41	1.0	SS - 1	0.828	0.132	0.0445
		SS - 2	1.157	0.138	0.0622
NA - SS41	1.0	NA - 4	0.050	—	0.0027
		SS - 3	1.502	0.260	0.0808
SB - SS41	1.0	SB - 1	0.040	—	0.0021
		SS - 7	1.591	0.292	0.0856
YC - SS41	1.0	YC - 1	0.046	—	0.0025
		SS - 11	1.503	0.212	0.0808

表 1.6.5 電気防食を行なった接触試験片の腐食試験結果

組合せ	すき間 (mm)	試料番号	87日間の重量減量 (g/dm ²)	腐食速度 (mm/year)
NA - SS41	1.0	NA - 5	0.007	0.0004
		SS - 4	0.045	0.0024
NA - SS41	2.0	NA - 6	0.009	0.0005
		SS - 5	0.061	0.0033
NA - SS41	4.0	NA - 7	0.005	0.0003
		SS - 6	0.067	0.0036
SB - SS41	1.0	SB - 2	0.007	0.0004
		SS - 8	0.044	0.0024
SB - SS41	2.0	SB - 3	0.010	0.0006
		SS - 9	0.053	0.0028
SB - SS41	4.0	SB - 4	0.004	0.0002
		SS - 10	0.064	0.0034
YC - SS41	1.0	YC - 2	0.005	0.0003
		SS - 12	0.047	0.0025
YC - SS41	2.0	YC - 3	0.007	0.0004
		SS - 13	0.034	0.0018
YC - SS41	4.0	YC - 4	0.003	0.0002
		SS - 14	0.071	0.0038

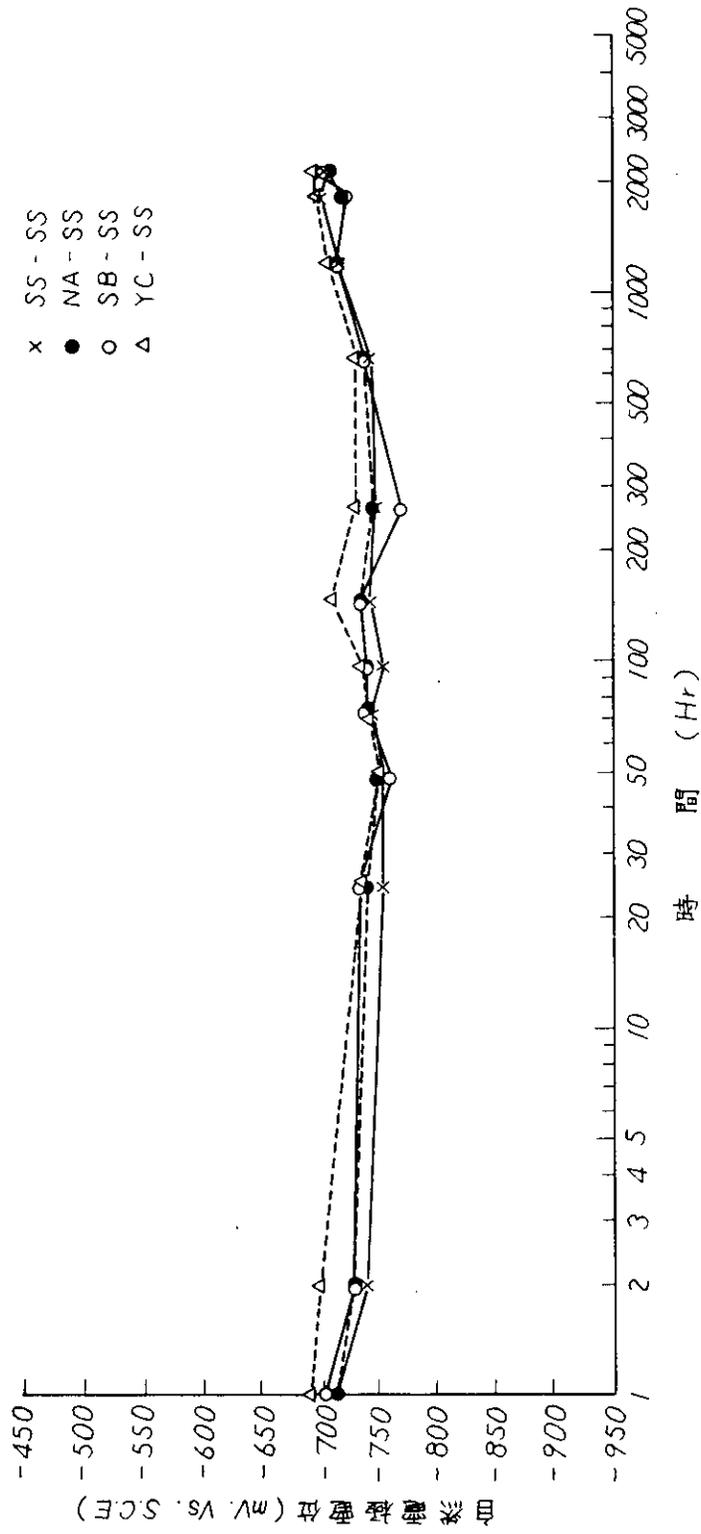


図 1.6.3 無防食試験片の自然電極電位 (Vs. S.C.E) の経時変化 (静海水 35°C)

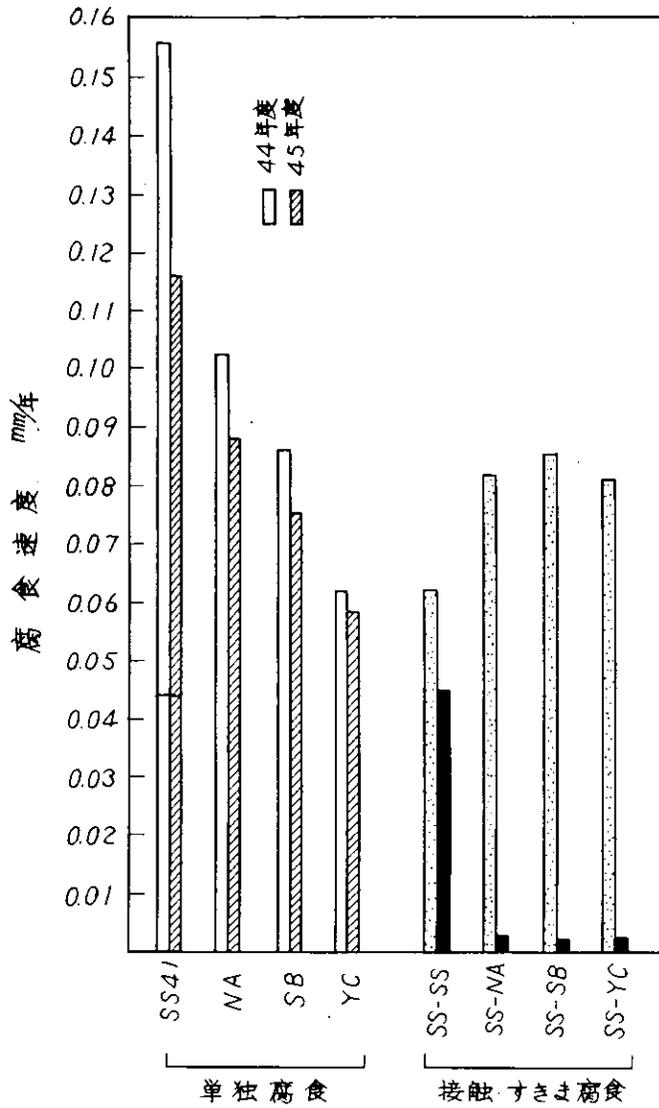


図1.6.4 静海水中における 単独試験片と接触すきま腐食試験片との腐食速度の比較

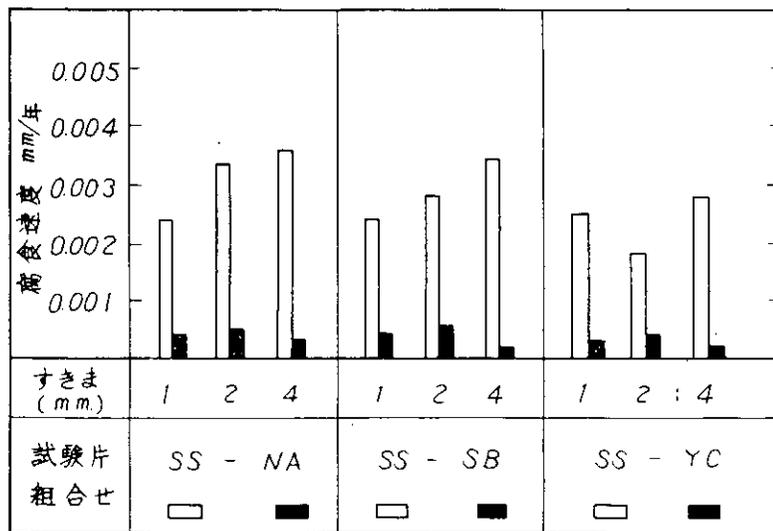


図1.6.5 接触腐食に対する電気防食効果とすきまの関係 (静海水 35°C 防食電位-0.85 V (Vs. S.C.E))

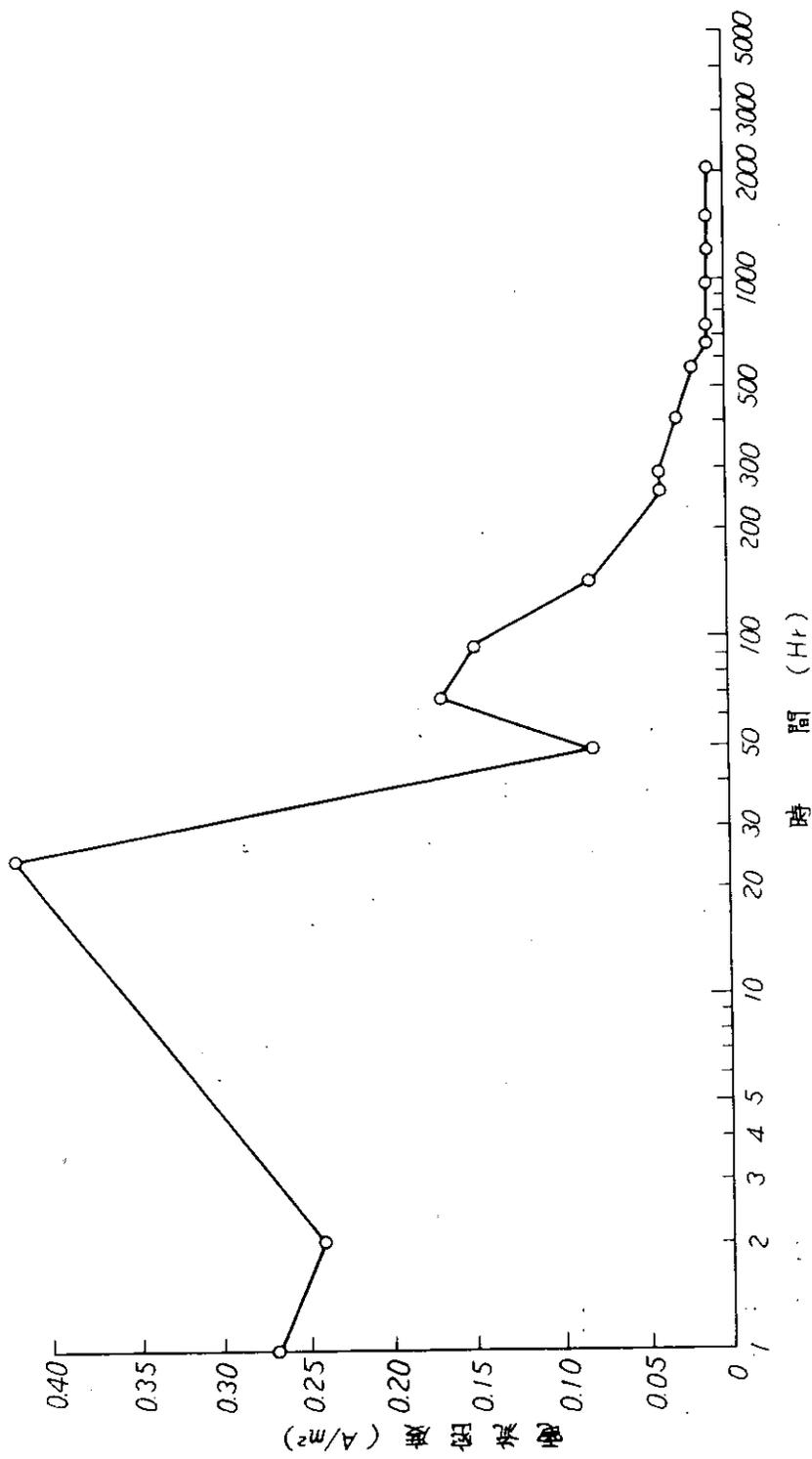


図1.6.6 -850 mV (Vs. SCE) に設定した9種類組合せ試験片の電流密度の経時変化(静海水 35°C)

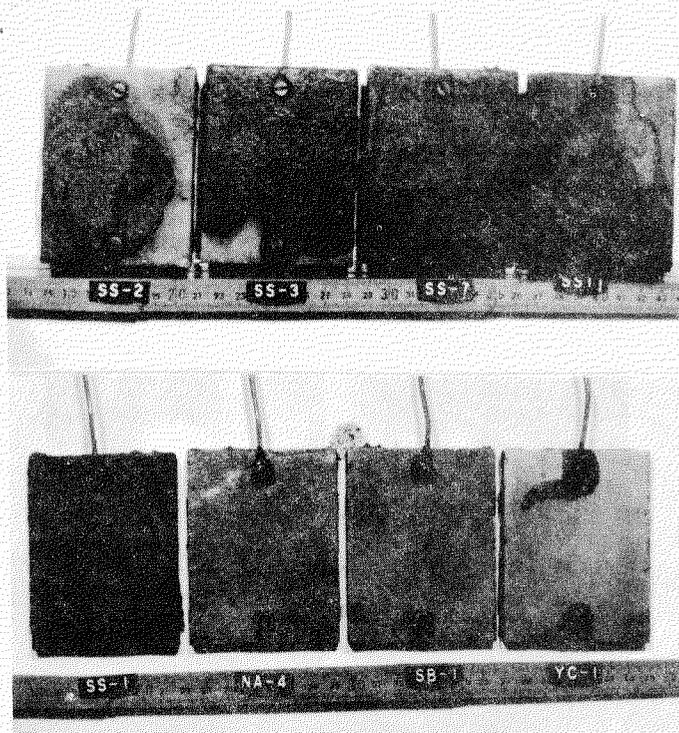


写真1.6.1 引上げ直後の外表面の状態
(無防食の接触腐食試験片)

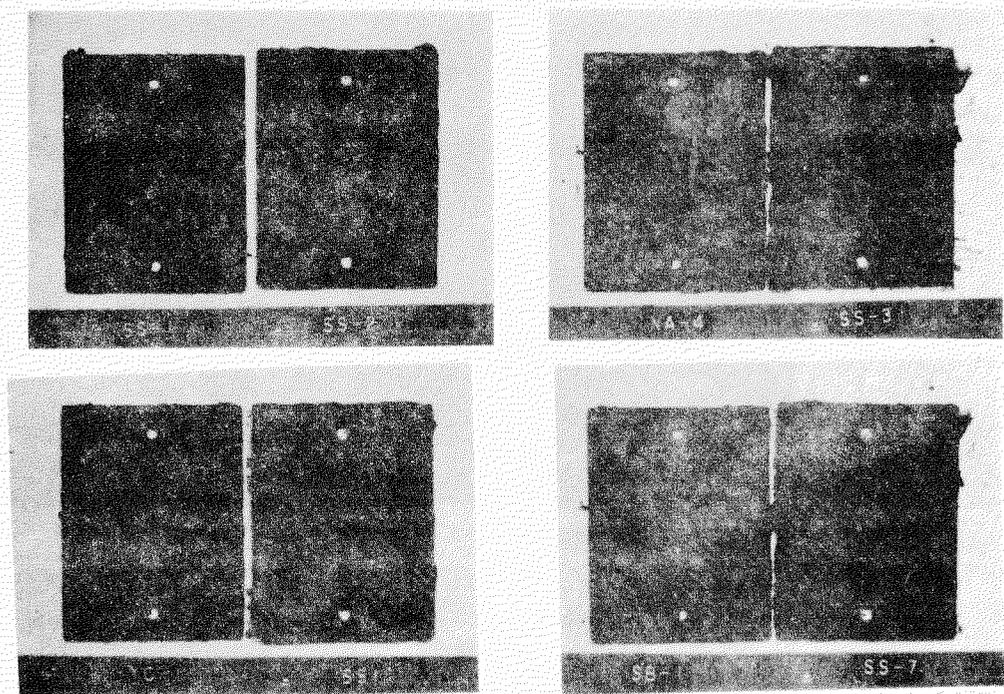
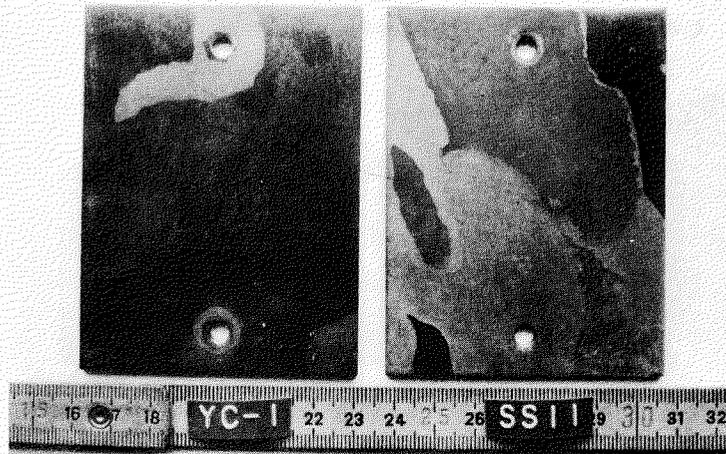


写真1.6.2 写真1.6.1と同じ試験片のすきま面の状態

外表面



すきま面

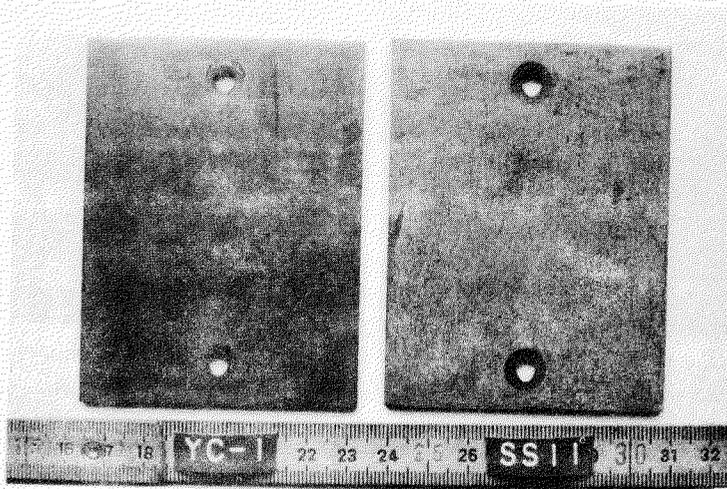
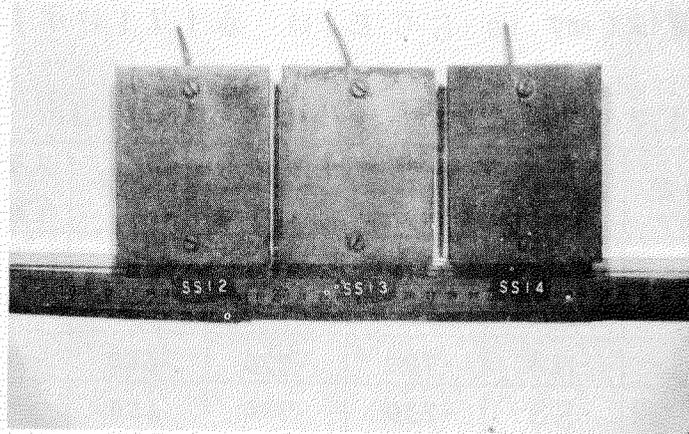
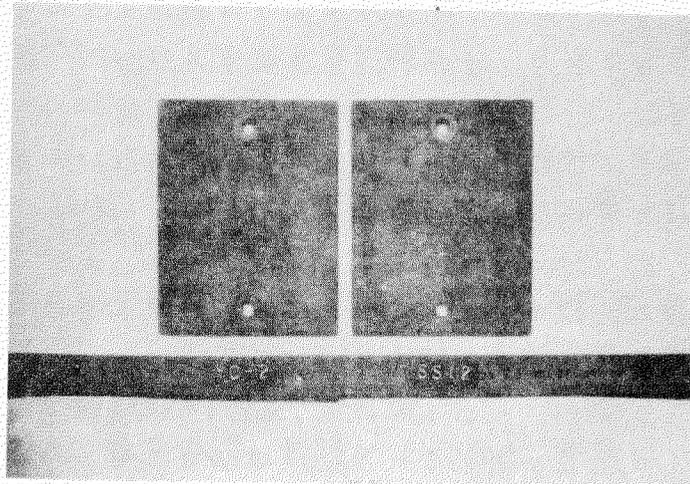


写真 1.6.3 写真 1.6.1と同じ試験片の酸洗い後の表面状態の一例

SS側 外表面



YC側 外表面



すきま面

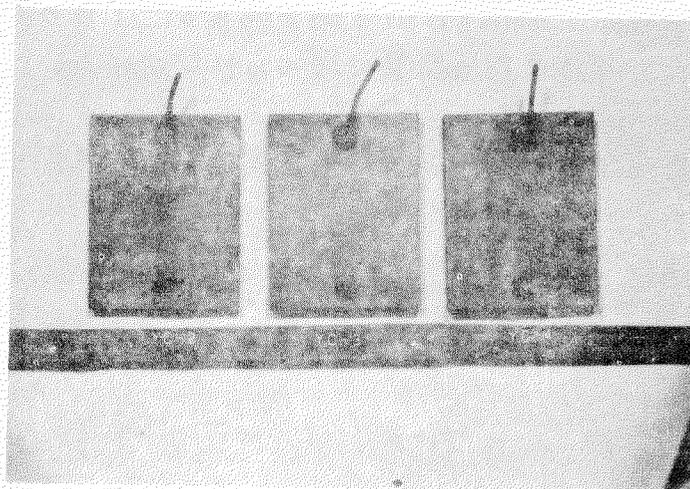


写真 1.6.4 引上げ直後の表面状態の一例
(電気防食を行なった接触試験片)

1.7 46年度腐食試験のまとめ

(1) 自然電極電位 (mV Vs S.C.E) は、表 1.7.1 に示す通りである。

表 1.7.1 自然電極電位 (mV Vs S.C.E)

成分系	鋼種符号	海水連続浸漬		乾湿交互	スラッジ 全面塗布
		単独浸漬	SSとの組合せ		
2Cr	YC	-670	-695	-600	-590
1Cr	SB	-680	-715	-630	-600
0.5Cr	NA	-700	-720	-650	-610
普通鋼	SS	-730	-720	-650	-630

測定期日 浸漬後 85 日目

この表から明らかに、単独浸漬よりは乾湿交互の方が自然電極電位は、貴になっており、また乾湿交互よりスラッジ全面塗布の方が貴になっている。

一方成分系で比較すれば、いずれの環境においてもクロム含有量の大きい鋼ほど貴になっている。

(2) 同一面積のSS材と低合金鋼とを接合させたときのSS材の腐食速度は、SS単独の腐食速度の約1.5倍になる。

一方低合金鋼側についてみれば、SS材の犠牲によって腐食が抑制される。その腐食が抑制される程度はCr含有量の多い鋼種ほど大きい。

(3) 海水中においてSS材と低合金鋼を結合し、それらのすきまを1mmとしたとき、すきま内の腐食は認められなかった。

(4) SS材の低合金鋼の接触腐食は電気防食によって防止出来ることが、確認された。

2 実船試験

2.1 試験管搭載状況

大型タンカーの荷油管の腐蝕対策に関する研究の一環として、耐蝕鋼管の実船試験を行なうため試験管および試験片を、実船に搭載した。

本報告書は、その試験管および試験片の実船搭載中の使用状況と、陸揚げ後、腐蝕量等の測定結果をまとめたものである。

試験管および試験片の搭載状況詳細は、研究資料 No 132 (昭和45年度報告書) を参照願うこととするが、要旨は下記のとおりである。

2.1.1 実船試験の内容

(1) 大規模試験

メーカー各社より提供された1m長さの試験管を4本併ぎにして、タンク内の CARGO OIL STRIPP. LINE の一部に装備。

(2) 小規模試験

メーカー各社より提供された試験片10個を1本の管内に取付け、これをタンク内の CARGO OIL STRIPP. LINE の一部に装備。

2.1.2 搭載船

ジャパンライン社のジャパンヒヤシンス(昭和42年8月竣工)に搭載。

2.1.3 搭載日付

1970年9月22日～10月15日 三菱重工長崎造船所に入渠時取付けた。

2.2 実船試験結果

実船試験用試験管および試験片は、2号 CARGO OIL STRIPP. LINE と3号 CARGO OIL STRIPP. LINE に各々1組ずつ装備しているが、昨年8月6日～8月12日に三菱重工長崎造船所に入渠の本船から、2号 CARGO OIL STRIPP. LINE に装備したものを陸揚げし測定を行なった。残りの3号 CARGO OIL STRIPP. LINE に装備したものについては、47年度中に陸揚げを行ない測定する予定である。

2.2.1 大規模試験

呼径250 ϕ 、長さ1mの試験管を船首よりNA, SB, YX, SCの順序で取付けている。

(1) 外観の状況

管外面のスラッジ付着は全く見られず、搭載時に試験管に手書きしたペイン

トの文字が残っていた。また、管内のスラッジ付着量は上下面にはほとんど見られなかったのに比べ、左右面が極端に多かった。管の内面と外面のスラッジ付着量に大差が見られたが、これはタンククリーニングによって管外面のスラッジが洗い落とされた後の観察結果である。酸洗後の観察では腐蝕はほとんど見られなかった。一例を写真 2.2.1 ~ 4 に示すが他の試験管も写真と大差ない。

(2) 肉厚測定結果

メーカー各社より提供された試験管を夫々長さ方向に4分割、円周方向に2分割した後、酸洗いをを行った。肉厚測定位置は、図 2.2.1 に示すように管の長さ方向に6ヶ所、その各々の位置で円周方向に8ヶ所とし、ポイントマイクロメーターによる測定を行なった。

各試験管の測定結果は、表 2.2.3 ~ 6 および図 2.2.3 のとおりである。また、参考として実船試験前の肉厚測定結果を表 2.2.2 に示す。

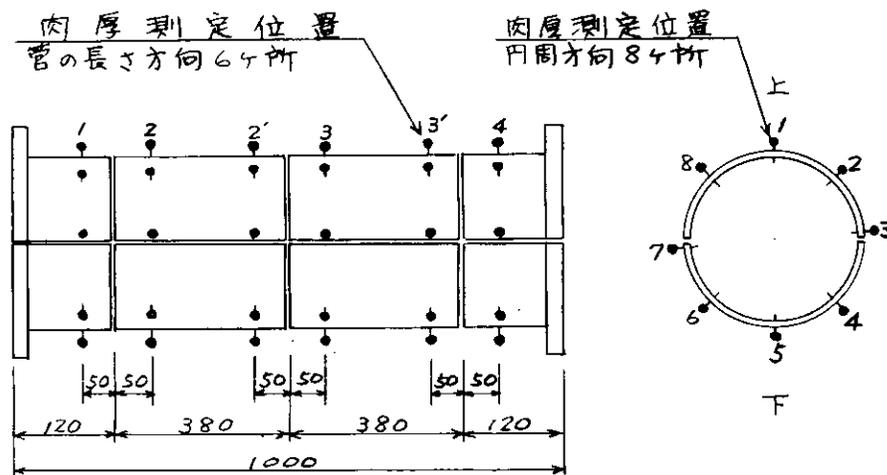


図 2.2.1 大規模試験用試験管の肉厚測定位置

2.2.2 小規模試験

大規模試験用試験管の船首側に直結した管内に、メーカー各社より提供された試験片 10 個を船尾より NA1, SA1, YA1, SB1, YC1, SS1, SC1, SD1, YD1, ND1 の順序で取付けている。

(1) 外観の状況

管内面に取付けられた試験片の上には、大量のスラッジ浸漬は見られなかったが、大規模試験用試験管の内面よりも多くのスラッジが観察された。試験片の表面には相当量の錆の発生が見られ、酸洗後の観察では各試験片とも全面に大小の腐蝕が見られた。(写真 2.2.5 ~ 14 参照)

(2) 肉厚測定

酸洗後の重量減と肉厚減少量について測定した。重量測定は mg のオーダー

表 2.2.1 積荷状況

建造時より搭載直前までの積荷状況			搭載時より調査時までの積荷状況		
積荷の種類	航海数	浸漬期間	積荷の種類	航海数	浸漬期間
イラニアンヘビー イラニアンライト	18	約 360 日	イラニアンヘビー	2	約 40 日
			カフジ クロード	1	約 20 日
オーマン クロード	9	約 180 日	マーバン クロード	1	約 20 日
空 槽	27	約 600 日	イラニアンライト	1	約 20 日
			ベリ クロード	1	約 20 日
			ゲーティ バラスト	3	15 日
			空 槽	6	約 165 日

(3) 試験管の浸漬状況

本船は主にペルシャ湾-日本間を航路とし、ペルシャ湾にむかう時は空槽で、復路は下記に示す原油を搭載している。

ただし、往路でも荒天に逢ってバラストを増積したことが1度(6日間)あり、また入渠前のタンククリーニングのためにスロツァタンクとして使用したことが2回、通算8~9日あった。

(a) 原油

積荷原油別浸漬時間は次のとおりである。

- イラニアンヘビー ----- 約 960 Hr
- カフジ クロード ----- 約 480 Hr
- マーバン クロード ----- 約 480 Hr
- イラニアンライト ----- 約 480 Hr
- ベリ クロード ----- 約 480 Hr

(b) ゲーティバラスト ----- 約 360 Hr

(c) 空槽 ----- 約 3960 Hr

(4) タンククリーニング状況

試験管および試験片を装備したタンクのクリーニングは毎航海は行なっていない。すなわち、試験管および試験片搭載後4ヶ月目と10ヶ月目の2回の入渠前に行なっただけである。

- (a) 洗滌水温度 ----- 82℃
- (b) 洗滌圧力 ----- 9 kg/cm²
- (c) 1回の洗滌時間 ---- 3時間40分
- (d) 使用洗剤 ----- なし
- (e) 試験期間中の回数 --- 2回

2.2.4 スラッジの諸性質

実船試験タンク内のスラッジを採取して、種々の性質を調べた。採取場所は大規模試験用試験管の内面と、装備した試験管周辺の船体部材の2ヶ所である。スラッジの諸性質を表2.2.8に示す。

2.3 まとめ

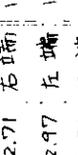
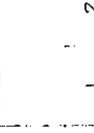
試験管を本船の荷油管の一部に挿入した大規模試験においては、目視観察の結果では内外面共顕著な腐蝕進行は見られず、また製作時における試験管の偏肉の影響もあって信頼性のある腐蝕量がつかめなかった。昭和47年10月頃に予定される残り1組の試験管の陸揚げを待って全体的判断を試みたい。

10種の板状小試験片を荷油管底面と絶縁して設置した小規模試験では、前記表2.2.7のとおり結果が得られた。

この結果から、普通鋼や鋳鋼と比し2%Cr系鋼の耐蝕性のよいことが解る。ただし、今回の結果は鋳鋼については他の開発鋼種と同一条件とするために錆肌を除去研磨しており実際とは異なっていること、サンプル数が1個でありバラつきがあるであろうこと、および荷油管内における各試験片のドレン浸漬の影響等が均一であるか否か不明であることなどについては留意しておく必要がある。

いずれにしても試験期間が約300日間という短期間ではあり、今後の実船試験結果を見て修正する必要がある。

表 2.2.2 大規模試験用試験管の試験前の肉厚

大規模試験用 試験管 "A" "B" 符号	肉厚 (mm)	肉厚 (mm)								平均 (mm)	備考
		1	2	3	4	5	6	7	8		
新日鉄	栗管 1	13.04	12.96	12.99	13.38	13.36	13.35	13.35	13.04	左端	測定表 
		12.76	12.76	13.08	13.09	13.08	13.05	13.02	12.71	右端	
	12.98	13.05	13.04	13.08	13.05	13.03	13.00	12.97	左端		
	13.20	13.26	13.23	13.35	13.35	13.32	13.34	13.31	右端		
住金	S B 1	12.42	12.41	12.43	12.44	12.45	12.42	12.42	12.40	A	測定表 
		12.65	12.64	12.62	12.66	12.65	12.64	12.67	12.66	B	
	12.41	12.41	12.39	12.39	12.43	12.40	12.39	12.39	A		
	12.56	12.58	12.65	12.62	12.65	12.63	12.63	12.60	B		
日本鋼管	N A 1	13.1	13.4	13.3	12.5	13.4	13.6	13.5	13.1		
	N A 2	13.1	13.1	13.4	13.0	13.1	13.2	13.2	12.6		
新日本工機 (比較用)	S C 1 (A)	16.0	16.5	16.5	16.0	16.0	16.5	16.5	16.5	左端	測定表 
		16.5	16.5	16.0	16.5	16.0	16.0	16.5	16.0	右端	
	15.0	14.5	15.0	15.0	15.0	15.0	14.5	14.5	左端		
	15.0	14.5	14.5	15.0	15.0	14.5	14.5	14.5	右端		

・肉厚計測は機械加工前に両管端よりそれぞれ 50 mm の位置で円周 8ヶ所を測り、た。

表 2.2.3 大規模試験肉厚測定結果 (NA)

		円 周 方 向 測 定 位 置								
		1	2	3	4	5	6	7	8	平均値
管 の 長 さ 方 向 測 定 位 置	1	12.93	13.04	12.79	12.84	12.64	12.84	12.82	12.89	12.84
		12.95	12.98	12.84	12.85	12.75	12.64	12.88	12.82	
		12.96	12.96	12.88	12.88	12.73	12.62	12.89	12.81	
	2	12.87	12.83	12.89	12.60	12.63	12.85	12.87	12.75	12.76
		12.86	12.87	12.90	12.53	12.65	12.80	12.84	12.76	
		12.84	12.72	12.78	12.56	12.50	12.86	12.83	12.70	
	2'	12.94	12.86	12.77	12.75	12.77	12.72	12.83	12.84	12.81
		12.95	12.81	12.81	12.78	12.80	12.74	12.85	12.83	
		12.93	12.84	12.76	12.72	12.76	12.73	12.86	12.81	
	3	12.58	12.67	12.83	12.59	12.52	12.50	12.52	12.53	12.60
		12.63	12.68	12.78	12.58	12.55	12.47	12.61	12.60	
		12.60	12.70	12.80	12.53	12.54	12.52	12.59	12.55	
3'	12.78	12.82	12.76	12.73	12.24	12.43	12.85	12.76	12.67	
	12.77	12.87	12.78	12.70	12.27	12.39	12.81	12.82		
	12.75	12.79	12.75	12.69	12.25	12.44	12.80	12.78		
4	12.67	12.47	12.61	12.52	12.51	12.68	12.75	12.69	12.62	
	12.72	12.52	12.59	12.54	12.54	12.69	12.72	12.71		
	12.70	12.49	12.61	12.53	12.53	12.73	12.73	12.70		
平均値		12.80	12.73	12.77	12.66	12.57	12.65	12.78	12.74	

表 2.2.4 大規模試験肉厚測定結果 (SB)

		円 周 方 向 測 定 位 置								
		1	2	3	4	5	6	7	8	平均値
管 の 長 さ 方 向 測 定 位 置	1	12.27	12.14	12.24	11.99	12.32	12.11	12.12	12.21	12.18
		12.25	12.00	12.26	12.04	12.31	12.04	12.17	12.25	
		12.26	12.11	12.25	12.07	12.34	12.16	12.15	12.24	
	2	12.27	12.29	12.34	11.88	12.32	12.27	12.14	12.17	12.20
		12.31	12.31	12.33	11.70	12.27	12.34	12.16	12.19	
		12.29	12.33	12.35	11.59	12.29	12.30	12.15	12.09	
	2'	12.16	12.15	12.27	12.28	12.01	12.37	12.06	12.12	12.17
		12.12	12.16	12.24	12.29	12.06	12.31	12.07	12.16	
		12.15	12.19	12.26	12.31	12.04	12.33	12.09	11.98	
	3	11.94	12.29	12.19	11.90	12.19	11.90	12.18	12.09	12.07
		11.86	12.28	12.18	11.81	12.26	11.80	12.19	12.12	
		11.92	12.27	12.17	11.85	12.20	11.85	12.11	12.13	
3'	12.07	12.21	12.26	12.00	12.17	12.20	12.28	12.14	12.16	
	12.12	12.15	12.10	11.95	12.22	12.25	12.25	12.20		
	12.10	12.23	12.11	11.98	12.18	12.22	12.30	12.16		
4	12.03	12.15	12.18	12.14	12.11	12.14	12.31	12.30	12.19	
	12.13	12.19	12.22	12.20	12.16	12.20	12.17	12.31		
	12.09	12.21	12.17	12.17	12.20	12.19	12.25	12.29		
平均値		12.13	12.19	12.23	12.01	12.20	12.15	12.17	12.18	

表 2.2.5 大規模試験肉厚測定結果 (YX)

		円 筒 方 向 測 定 位 置								
		1	2	3	4	5	6	7	8	平均値
管 の 長	1	12.85	12.91	13.36	13.35	13.03	12.89	12.92	12.96	13.03
		12.87	12.94	13.45	13.38	13.04	12.73	12.94	12.93	
		12.89	12.95	13.40	13.37	12.94	12.74	12.95	12.94	
さ	2	12.93	12.97	13.27	13.24	13.18	12.93	13.24	12.96	13.09
		12.94	12.92	13.30	13.26	13.26	12.87	13.26	12.93	
		12.90	12.96	13.26	13.28	13.24	12.94	13.27	12.90	
方 向	2'	12.96	12.97	12.96	13.30	13.24	13.37	13.25	12.94	13.11
		12.92	12.98	12.92	13.31	13.22	13.27	13.26	12.97	
		12.93	12.96	12.91	13.32	13.24	13.28	13.27	12.98	
測 定 位 置	3	12.81	12.84	13.18	12.91	13.13	13.22	13.03	12.90	13.00
		12.76	12.79	13.22	12.93	13.15	13.21	13.07	12.88	
		12.75	12.78	13.21	12.90	13.14	13.23	13.09	12.89	
3'	12.90	12.90	13.04	12.72	13.04	13.03	13.23	13.15	13.00	
	12.91	12.86	13.08	12.76	13.09	13.01	13.21	13.16		
	12.88	12.83	13.07	12.75	13.10	13.02	13.19	13.18		
4	12.74	13.06	13.07	13.03	13.05	12.70	12.75	12.72	12.89	
	12.73	13.02	13.10	13.06	13.06	12.71	12.74	12.75		
	12.65	13.05	13.09	13.05	13.04	12.68	12.76	12.74		
平均値	12.85	12.92	13.16	13.11	13.12	12.99	13.08	12.94		

表 2.2.6 大規模試験肉厚測定結果 (SC)

		円 筒 方 向 測 定 位 置								
		1	2	3	4	5	6	7	8	平均値
管 の 長	1	15.24	14.80	15.24	15.14	14.65	15.35	15.18	14.86	15.03
		15.26	14.68	15.32	15.19	14.70	15.37	15.12	14.56	
		15.21	14.48	15.12	15.22	14.75	15.36	15.21	14.78	
さ	2	15.11	15.01	15.25	14.93	14.80	15.05	15.22	14.83	15.01
		15.02	14.96	15.21	14.80	14.83	15.07	15.27	14.88	
		15.10	14.94	15.07	14.90	14.87	15.11	15.24	14.84	
方 向	2'	14.93	15.20	14.81	14.77	15.02	15.08	14.97	15.05	14.96
		14.95	15.14	14.85	14.82	14.98	14.92	14.98	15.06	
		14.97	15.16	14.75	14.83	14.97	14.88	14.96	15.07	
測 定 位 置	3	14.85	15.03	14.48	14.74	15.01	14.90	14.38	14.99	14.80
		14.88	15.05	14.55	14.88	15.09	14.85	14.30	14.86	
		14.87	15.04	14.43	14.80	15.04	14.87	14.36	14.98	
3'	15.04	14.85	15.03	14.71	14.78	14.82	14.78	15.04	14.88	
	15.08	14.75	15.00	14.74	14.70	14.93	14.94	14.92		
	14.94	14.98	15.02	14.72	14.72	14.95	14.80	14.94		
4	14.47	15.02	15.04	15.19	15.04	15.10	15.10	14.71	14.95	
	14.57	15.01	15.10	15.21	14.97	15.07	14.94	14.74		
	14.46	15.15	15.05	15.17	14.99	14.96	15.04	14.75		
平均値	14.94	14.96	14.96	14.93	14.88	15.04	14.88	14.88		

表 2.2.7 小規模試驗用試驗片肉厚および重量測定結果

試験片 符号	成分系	搭載前重量 (g)	重量減 (g)	肉厚減少量 (mm)				平均値	最大肉厚 減少量 (mm)	腐蝕量 mm/year
				1	2	3	4			
NA1	0.1P-Cu-0.5Cr	498.586	18.154	0.034	0.023	0.049	0.131	0.0593	0.706	0.046
SA1	Cu-0.5Cr-0.3Ni	524.042	14.463	0.028	0.017	0.036	0.032	0.0283	0.624	0.035
YA1	2Cr-1Ni-0.8Si	511.885	7.036	0.008	0.007	0.009	0.033	0.0143	0.632	0.017
SB1	1.25Cr-1Mn-0.5Si	521.852	11.760	0.017	0.022	0.042	0.029	0.0275	0.679	0.029
YC1	2Cr-0.3Mo-0.8Si	509.153	5.376	0.010	0.005	0.015	0.033	0.0158	0.688	0.013
SS1	KAS Ⅱ	520.893	14.381	0.030	0.017	0.050	0.062	0.0398	1.784	0.035
SC1	JIS G 5101 SC42	480.488	8.303	0.090	0.033	0.235	0.022	0.0950	1.306	0.020
SD1	2Cr-0.7Si-0.5Mo	523.373	5.706	0.008	0.009	0.016	0.012	0.0113	0.356	0.014
YD1	2Cr-0.25Mo-0.5Ni	506.472	4.320	0.022	0.005	0.023	0.011	0.0153	0.403	0.010
ND1	2.25Cr-1Mo	499.272	10.932	0.018	0.002	0.026	0.090	0.0340	0.728	0.028

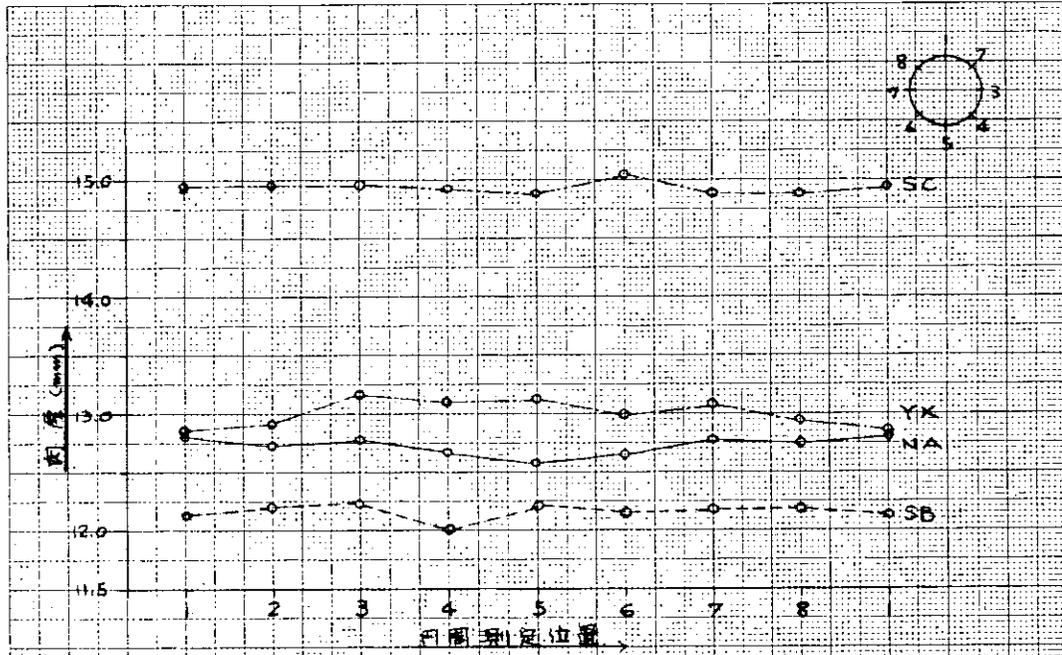


图 2.2.3 大規模試験用試験管肉厚測定結果

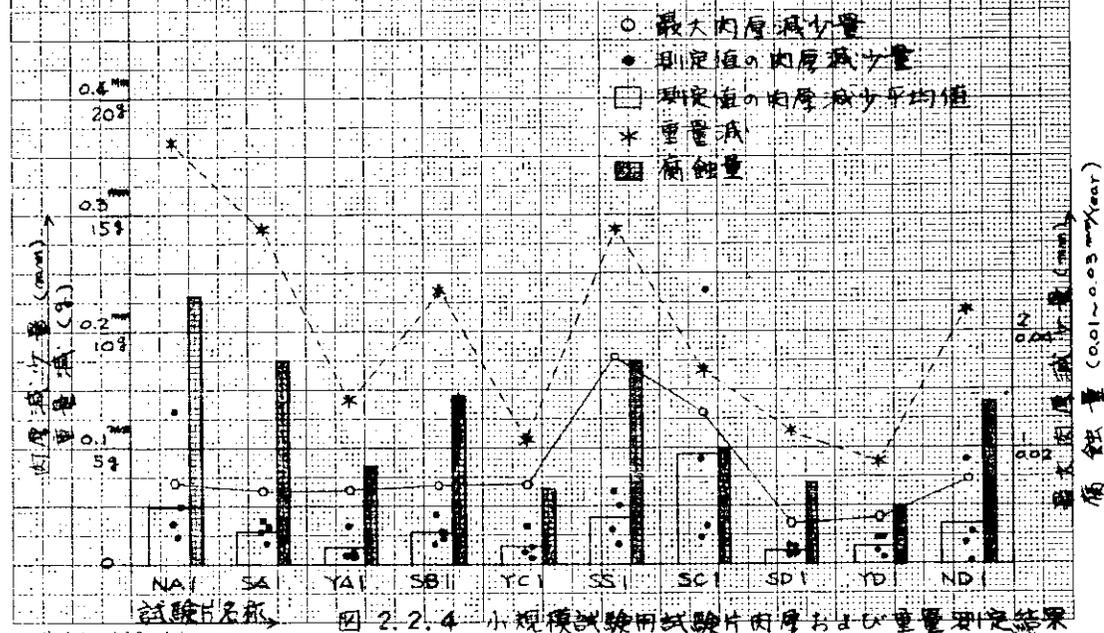


图 2.2.4 小規模試験用試験片肉厚および重量測定結果

表 2.2.8 スラッジの諸性質

		大規模試験用 試験管内面	試験管周辺の 砥体部残
比 重	23°C	1.486	0.990
水分	%	22.9	25.5
硫黄	%	1.4	1.6
石油エーラル	抽出分%	27.1	63.4
分光分析 (%)	Ca	<0.1	<0.1
	Mg	<0.1	<1.0
	Mn	<1.0	<1.0
	Cu	<1.0	<1.0
	Al	trace	<1.0
	Cr	trace	<0.1
	Ni	trace	<1.0
	Mo	trace	trace
	Si	trace	trace
	Zn	—	<1.0
石油エーラル抽出後の化学分析 (%)	Ig loss (loss on ignition)	12.5	13.6
	Cl	0.04	0.10
	SiO ₂	0.2	0.2
	Fe ₂ O ₃	71.2	68.9
	FeO	12.7	11.9
	CaO	0.3	1.2
	MgO	0.3	0.5

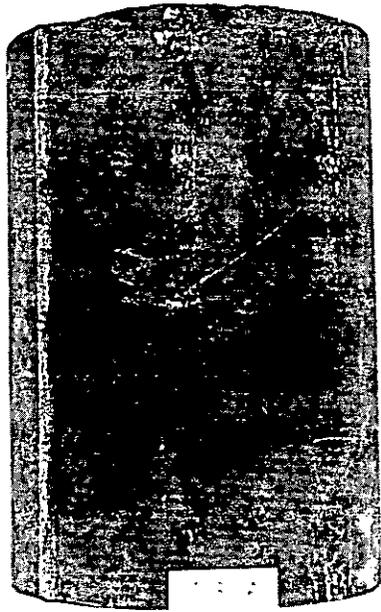


写真 2.2.1 大規模試験管外面



写真 2.2.2 大規模試験管外面

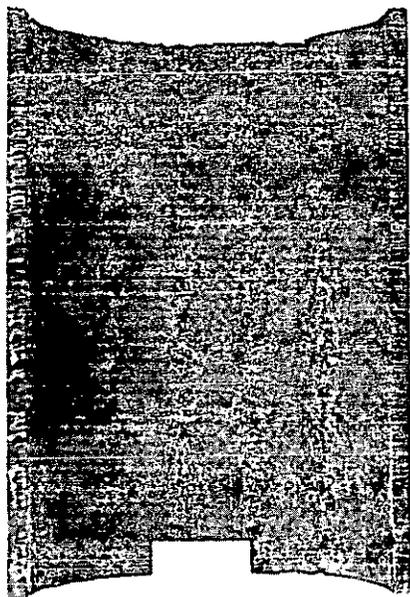


写真 2.2.3 大規模試験管内面

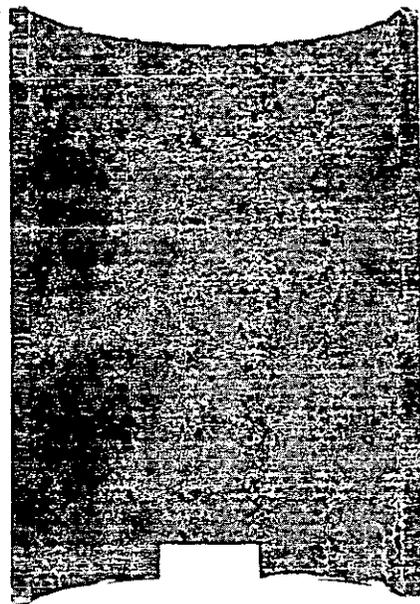


写真 2.2.4 大規模試験管内面

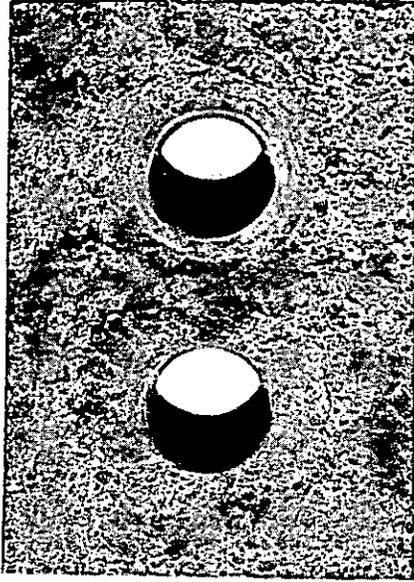


写真 2.2.5 NA1

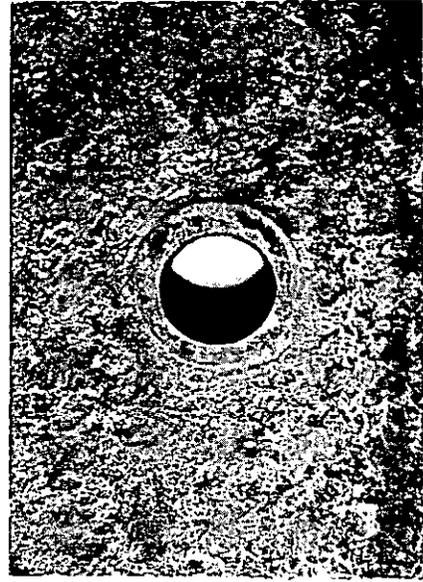


写真 2.2.6 SA1

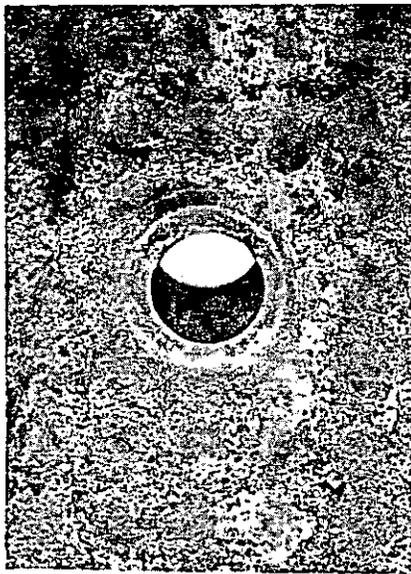


写真 2.2.7 YA1

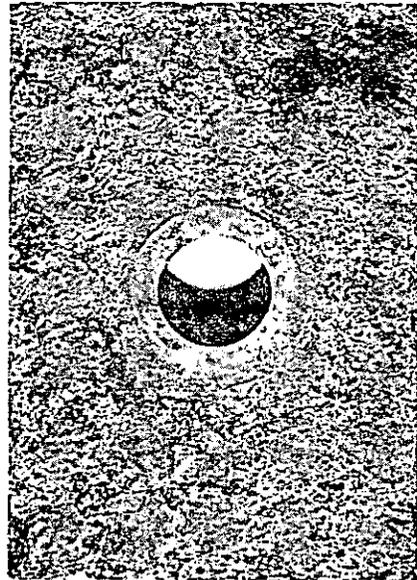


写真 2.2.8 SB1

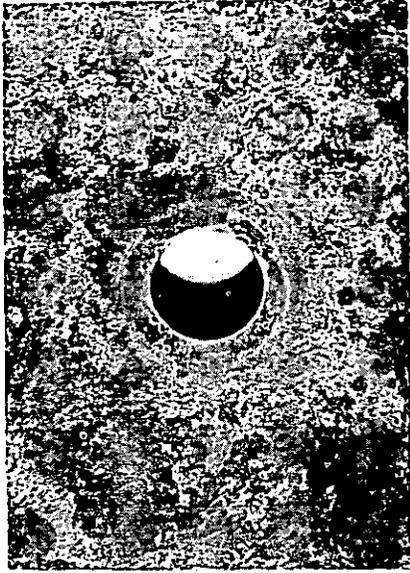


写真 2.2.9 YC 1

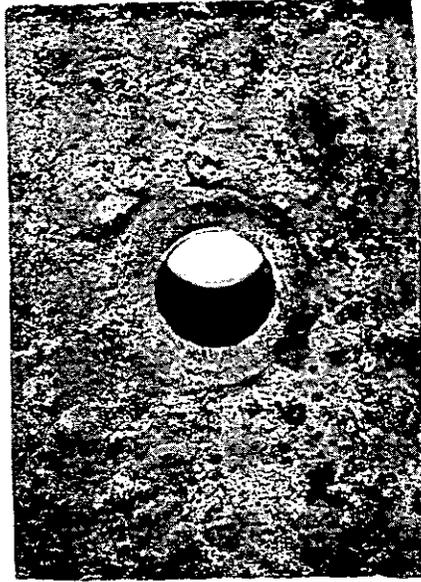


写真 2.2.10 SS 1

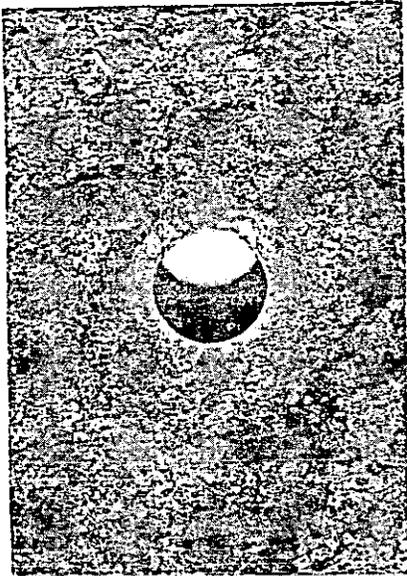


写真 2.2.11 SC 1

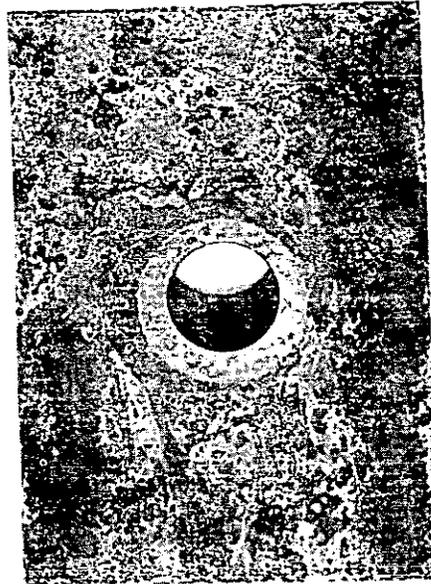


写真 2.2.12 SD 1

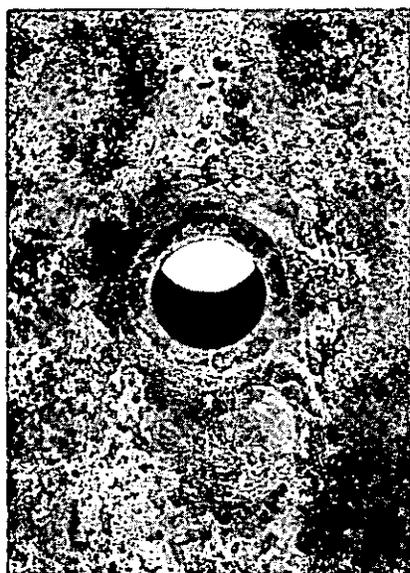


写真 2.2.13 YD 1

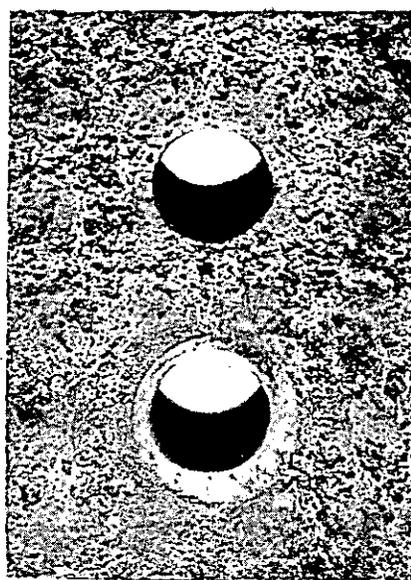


写真 2.2.14 ND 1