

土 木 研 究 所 資 料

放流設備に使用するステンレス材料に 関する調査報告書

平成5年1月

建設省東北地方建設局道路部機械課
建設省土木研究所地質化学部化学研究室

「Copyright © (1993) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted,
nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、
複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。」

放流設備に使用するステンレス材料に 関する調査報告書

東北地方建設局

道路部機械課

課長 丹野光正

課長補佐 山崎晃

東北技術事務所

工作課長 池田八郎

土木研究所

地質官 市川慧

地質化学部

化学研究室

室長 片脇清

研究員 守屋進

要 旨

ステンレス材料をダム放流設備に適用する際に問題となるステンレスクラッド鋼の溶接法に関する試験、異種金属接触腐食、すき間腐食及びもらい錆に関する室内試験並びに七が宿ダム湖におけるこれらの試験片の暴露試験についてとりまとめたものである。

キーワード：ダム放流設備，ステンレス材料，溶接法，異種金属接触腐食，すき間腐食，もらい錆，暴露試験

まえがき

ダムは、洪水調節・灌漑用水や飲料水の確保・発電等、河川水を多目的に利用するための大規模な河川構造物である。なかでも、放流設備はこれらの目的で河川水を利用・制御するための重要な設備である。

放流設備は、複雑な構造をした多くの部材で構成されており、また、常時水に接する厳しい腐食環境にあるため、常にその機能を維持するためには、多大なメンテナンスが必要となる。

このため、放流設備のメンテナンスを軽減することを期待して、ステンレス材料が他の土木構造物に比べて早くから利用されている。

しかしながら、ステンレス材料といえども適切な設計・施工が行われないと、かえって構造物に悪影響を及ぼすこともある。このため、ダムにおけるステンレス鋼材の利用実態調査及び水門・放流設備の腐食事例のアンケート調査を行い、その問題点を明らかにした。

（土木研究所資料第2909号 ダムにおけるステンレス鋼材の利用実態調査報告書；平成2年9月）

この調査結果に基づき、ステンレスクラッド鋼の溶接法に関する試験、異種金属接触腐食に関する試験、すき間腐食及びもらい錆に関する試験を行うとともに、七が宿ダム湖にこれらの試験片の暴露試験を開始した。

本報告書は、これら室内試験結果及び暴露試験の内容についてとりまとめたものである。

なお、これらの試験は、「ステンレス材料のダムへの利用技術研究会（委員長：建設省土木研究所地質官 市川 慧）」において実施したものである。

ステンレス材料のダムへの利用技術研究会 名簿

委員長	市川 慧	建設省土木研究所地質官
副委員長	丹野 光正	建設省東北地方建設局道路部機械課長
幹事長	片脇 清	建設省土木研究所地質化学部化学研究室長
	山崎 晃	建設省東北地方建設局道路部機械課課長補佐
	池田 八郎	建設省東北地方建設局東北技術事務所工作課長
	守屋 進	建設省土木研究所地質化学部化学研究室研究員
	久我 昂	社団法人鋼材倶楽部土木専門委員会委員長代理
	田中 成人	新日本製鐵株式会社建材開発技術部 土木建材技術グループ部長代理
	梅野 正紀	新日本製鐵株式会社ステンレス鋼技術部 ステンレス鋼技術サービス室掛長
	田所 裕	新日本製鐵株式会社技術開発本部鉄鋼研究所 ステンレス・チタン研究部主任研究員
	松岡 和巳	新日本製鐵株式会社技術開発本部鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター主任研究員
	中村 厚	住友金属工業株式会社専門部長
	南 孝男	住友金属テクノロジー株式会社受託研究第2部 受託研究第2チーム副長
	寺辻 修	石川島播磨重工業株式会社鉄構事業部設計部課長補佐
	平井 陽一	石川島播磨重工業株式会社技術研究所構造材料研究部課長
	川嶋 巖	石川島播磨重工業株式会社技術研究所接合研究部課長
	森 芳徳	財団法人土木研究センター研究開発部長

中途交代委員

副委員長	吉田 正	前建設省東北地方建設局道路部機械課長
	深堀 哲男	建設省東北地方建設局道路部機械課課長補佐
	瀧口 洋一	前社団法人鋼材倶楽部土木専門委員会委員長代理
	高橋 良輔	前新日本製鐵株式会社ステンレス鋼技術部 ステンレス鋼技術サービス室掛長
	広沢 規行	前新日本製鐵株式会社設備技術本部土木建築技術部 土木建築開発室掛長
	本間 宏二	前新日本製鐵株式会社設備技術本部土木建築技術部 土木建築開発室
	伊藤 叡	前新日本製鐵株式会社技術開発本部鉄鋼研究所 ステンレス・チタン研究部主幹研究員
	原 修一	前住友金属工業株式会社厚板技術部東京厚板営業技術室 担当次長
	小林 徹也	石川島播磨重工業株式会社鉄構事業部設計部課長補佐
	田中柳之助	前財団法人土木研究センター常務参与

目 次

まえがき

1. ステンレスクラッド鋼の溶接に関する試験	1
1.1 試験片	1
1.1.1 供試材料	1
1.1.2 試験片の製作	1
1.2 溶接熱の金属組織への影響	2
1.2.1 溶接部のフェライト量	2
1.2.2 溶接部の鋭敏化度	7
1.2.3 溶接部の化学成分	7
1.3 溶接熱の機械的性質への影響	11
1.3.1 溶接部の引張試験	11
1.3.2 溶接部の側曲げ試験	11
1.3.3 溶接部の硬さ試験	11
1.3.4 溶接部の断面マクロ及び顕微鏡組織	11
1.4 溶接継手部の耐食性試験	22
1.4.1 淡水浸漬試験	22
1.4.2 塩水噴霧試験	27
1.5 不適切な条件で溶接した溶接部の耐食性	32
1.5.1 供試材料	32
1.5.2 試験片の製作	32
1.5.3 溶接部に関する試験	33
1.5.4 溶接部の耐食性試験	51
2. ステンレス鋼の異種金属接触腐食試験	62
2.1 分極特性の測定	62
2.1.1 供試材	62
2.1.2 試験方法	62
2.1.3 試験結果	63
2.2 カップル電流密度及びカップル電位の測定	65
2.2.1 供試材	65
2.2.2 試験方法	65
2.2.3 試験結果	65
2.3 異種金属接合部の腐食試験	73
2.3.1 供試材	73
2.3.2 試験方法	73
2.3.3 試験結果	73

2.4: 数値解析による腐食シミュレーション	85
2.4.1 解析方法	85
2.4.2 数値解析結果と実験結果の比較	85
3. すき間腐食試験	97
3.1 試験方法	97
3.1.1 供試材料	97
3.1.2 試験方法	97
3.2 試験結果	99
3.2.1 30℃におけるすき間腐食試験	99
3.2.2 50℃におけるすき間腐食試験	111
3.3 まとめ	125
4. もらい錆に関する試験	126
4.1 試験方法	126
4.1.1 供試材料	126
4.1.2 試験条件	126
4.2 試験結果	131
4.2.1 もらい錆再現試験	131
4.2.2 腐食電位測定試験	131
4.2.3 孔食発生試験	145
4.3 まとめ	149
4.3.1 もらい錆再現試験	149
4.3.2 もらい錆による腐食電位の経時変化と孔食発生	149
4.3.3 孔食試験	150
5. 不動態化処理に関する試験	151
5.1 試験方法	151
5.2 試験結果	155
6. 暴露試験	157
6.1 異種金属接触腐食に関する暴露試験	157
6.1.1 異種金属接合試験片	157
6.1.2 異種金属接合試験片（塗膜欠陥）	157
6.1.3 異種金属接合試験片（ステンレス鋼塗装）	157
6.1.4 普通鋼単独試験片（比較材）	157
6.2 すき間腐食に関する暴露試験	157
6.2.1 ASTM法	157
6.2.2 異種金属ボルト	164
6.2.3 試験片取付け	164

6.3	調査項目	164
6.3.1	異種金属接触腐食試験	164
6.3.2	すき間腐食試験	164
6.4	調査結果	169
6.4.1	水質調査結果	169
6.4.2	異種金属接触腐食試験	169
6.4.3	すき間腐食試験	181
6.5	まとめ	191
6.5.1	異種金属接触腐食試験	191
6.5.2	すき間腐食試験	191
7.	今後の課題	193

1. ステンレスクラッド鋼の溶接に関する試験

ステンレスクラッド鋼の各種溶接施工方法と溶接部の耐食性に関する試験を行った。

1.1 試験片

1.1.1 供試材料

試験片には、母材の普通鋼SM400B(11mm) に合せ材としてステンレス鋼SUS304(2.5mm)をはり合せたステンレスクラッド鋼を用いた。

供試材料の化学成分組成を表-1.1.1.2 に示す。

表-1.1 ステンレスクラッド鋼の化学成分組成

鋼 種	化 学 成 分 (%)						
	C	S i	M n	P	S	C r	N i
SUS304	0.04	0.46	0.83	0.03	0.007	18.50	8.71
SM400B	0.09	0.24	1.04	0.011	0.002	—	—

表-1.2 溶接材料の化学成分組成

溶 接 材 料		化 学 成 分 (%)						
種 類	棒 径	C	S i	M n	P	S	C r	N i
D 4 3 1 6	3.2mm	0.08	0.49	0.71	0.008	0.004	—	—
	4.0mm	0.08	0.52	0.72	0.012	0.005	—	—
	5.0mm	0.09	0.56	0.82	0.015	0.004	—	—
D 3 0 9	4.0mm	0.067	0.49	1.97	0.026	0.011	24.70	12.51
D 3 0 8	4.0mm	0.052	0.40	1.44	0.026	0.008	20.14	9.58
Y 3 0 8	2.4mm	0.04	0.40	1.85	0.021	0.005	19.75	9.77
中 間 材	2.4mm	0.01	0.18	0.24	0.013	0.002	—	—

1.1.2 試験片の製作

試験片の溶接条件は、以下の10条件とした。

①ステンレスクラッド鋼を溶接棒D4316とD308 を用いて標準電流値(150A) で一層盛りした場合 (1 S 8)

②ステンレスクラッド鋼を溶接棒D4316とD309 を用いて標準電流値(150A) で一層盛りした場合 (1 S)

③ステンレスクラッド鋼を溶接棒D4316とD309を用いて過大電流値(170A)で一層盛りした場合(1O)

④ステンレスクラッド鋼を溶接棒D309とD308を用いて標準電流値(150A)で二層盛りした場合(2S)

⑤ステンレスクラッド鋼を溶接棒D309とD308を用いて過大電流値(170A)で二層盛りした場合(2O)

⑥ステンレスクラッド鋼を溶接棒D309とD308を用いて標準電流値で二層盛りした後、溶接突合せ部の余盛りを1mm削除した場合(2C-1)

⑦ステンレスクラッド鋼を溶接棒D309とD308を用いて標準電流値で二層盛りした後、溶接突合せ部の余盛りを2mm削除した場合(2C-2)

⑧ステンレスクラッド鋼を溶接棒D309とD308を用いて標準電流値で二層盛りした後、溶接突合せ部の余盛りを3mm削除した場合(2C-3)

⑨ステンレスクラッド鋼を溶接棒Y308, 中間材, D4316を用いて片側溶接を行った場合(OT)

⑩ステンレスクラッド鋼の表面に普通鋼溶接棒を不注意で溶接(アークストライク)してしまったことを想定した場合(B)

溶接施工方法及び試験項目を表-1.3に、試験片の寸法・形状を図-1.1に、溶接条件を表-1.4に、ステンレスクラッド鋼の代表的溶接手順を写真-1.1に示す。

1.2 溶接熱の金属組織への影響

1.2.1 溶接部のフェライト量

ステンレス溶接金属について、各種のフェライト量をJIS G 0601に示す磁氣的装置(フェライトスコープ: Hemut Fischer GMBH+CO.)を用いて計測した。

オーステナイト系ステンレス鋼の溶接金属には、溶接割れ防止上から数パーセントのフェライト量が含まれるように成分設計されている。

フェライト組織の役割は、図-1.2に示すように溶接時に発生しやすい割れを防止するためである。図から判るようにD309で4%以上、D308で2%以上含有すれば割れの発生は防止される。しかし、クラッド鋼の溶接のように成分の異なる材料(SM400B)にステンレス鋼溶接金属が溶け込む場合には、その溶け込んだ量だけステンレス鋼溶接金属の成分が希釈されるため、溶接条件により大きくフェライト量に変化する。

フェライト量の計測方法としては、表-1.5に示す溶接金属の化学成分を状態図にプロットして求める方法及びフェライト組織が磁性を持っていることを利用して計測器フェライトスコ

表- 1.3 溶接施工方法及び試験項目

試験板記号		1 S 8	1 S	1 O	2 S	2 O	2 C-1	2 C-2	2 C-3	O T (One Side 溶接)	B (母材)
		D 308 (1層盛・標準)	D 309 (1層盛・標準)	(1層盛・過大)	(2層盛・標準)	(2層盛・過大)	ℓ = 1 mm	ℓ = 2 mm	ℓ = 3 mm		
開 先 形 状											
溶 接 順 序	1									—	—
	2	欠陥が無くなるまでシェーバーで掘る 					同左 				—
	3										—
ステンレス溶接 の電流値		140 A (4φ) (標準値)	140 A (4φ) (標準値)	160 A (4φ) (過大値)	140 A (4φ) (標準値)	160 A (4φ) (過大値)	140 A (4φ) (標準値)			GTAW : 120 A	—
引 張 試 験		○印(実施する) 2本	○	○	○	○	— (実施せず)			○	○
側 曲 げ 試 験		○ 2枚	○	○	○	○	—			○	○
成 分 分 析		○	○	○	○	○	—			○	—
マクロ・ミクロ ・硬さ		○	○	○	○	○	○マクロのみ			○	—
フェライト量測定		○	○	○	○	○	—			○	—
鋭 敏 化 度 測 定		○	○	○	○	○	—			○	—
腐食試験	A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	B	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
そ の 他		—	—	—	—	—				—	—

図-1.1 溶接試験板寸法

1. 試験板記号：1S8・1S・1O・2S・2O・OT (6板)

切捨て(予備)	引張 (1)	引張 (2)	側曲げ (1)	側曲げ (2)	マクロ	ミクロ	硬さ	成分分析	腐食試験片 (A)	腐食試験片 (B)	切捨て	150	150
60	60	60	20	20	20	20	20	200			50		

2. 試験板記号：2C (1板)

切捨て	腐食試験片 (2C-1A)	腐食試験片 (2C-1B)	腐食試験片 (2C-2A)	腐食試験片 (2C-2B)	腐食試験片 (2C-3A)	腐食試験片 (2C-3B)	マクロ	切捨て
(予備)								
50							50	50

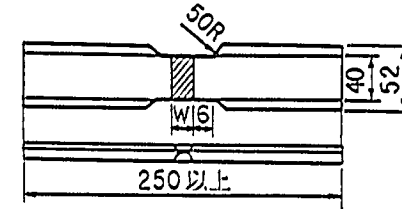
3. 試験板記号：B (母材) (1板)

引張 (1)	引張 (2)	側曲げ (1)	側曲げ (2)	腐食試験片 (A)	腐食試験片 (B)	
60	60	20	20			

〔試験片寸法及び測定位置〕

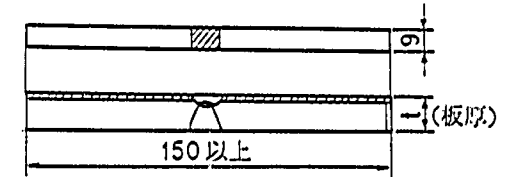
1. 引張試験片

・ JIS Z 3121・1号試験片



2. 側曲げ試験片

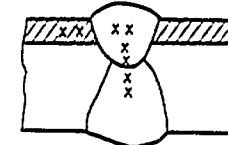
・ JIS Z 3122・3号試験片



3. マクロ組織

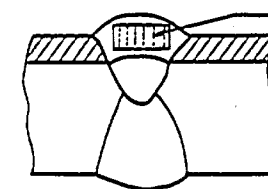


4. ミクロ組織と硬さ分布



×印 近傍を計測
・硬さ：ビッカース
・ミクロ：100倍

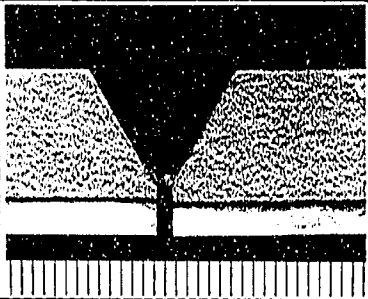
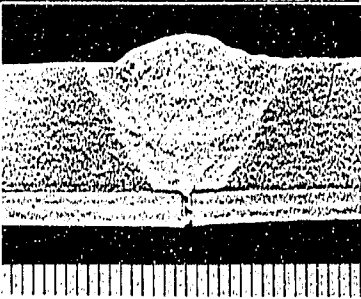
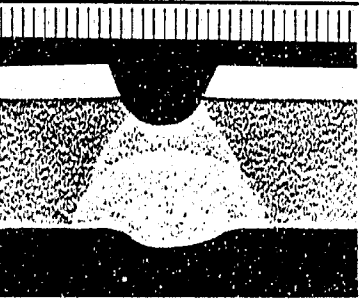
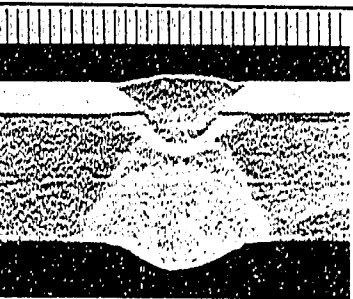
5. 溶接金属の化学成分分析



分析試料採取位置
↓
分析
C . Si . Mn
P . S . Cr
Ni (計7元素)

表-1.4 溶接条件

試験板記号	開先形状・積層順序	パスNo	溶接法	溶接材料	電流(A)	速度(mm/分)	パス間温度(℃)	備 考
1S8		1	SMAW	D 4316 (φ 3.2)	110	100 ~ 120	150 以下	・SMAW : 被覆アーク溶接法 ・GTAW : ティグ溶接法 ・D 4316 : JIS Z 3211 の軟鋼溶接棒 ・D 308 : JIS Z 3221 ステンレス溶接棒 ・D 309 : " ・Y 308 : JIS Z 3321 ステンレス鋼ワイヤ
1S		2		" (φ 4)	175	"		
		3		" (φ 5)	220	"		
		4		" (φ 3.2)	125	140 ~ 160		
		5		D 308 (φ 4)	150	100 ~ 120		
		1O	1	"	D 4316 (φ 3.2)	110		
2			" (φ 4)		175	"		
3			" (φ 5)		220	"		
4			" (φ 3.2)		125	140 ~ 160		
5			D 309 (φ 4)		170	100 ~ 120		
2S		1	"	D 4316 (φ 3.2)	110	"		
		2		" (φ 4)	175	"		
		3		" (φ 5)	220	"		
		4		D 309 (φ 4)	150	120 ~ 140		
		5		D 308 (φ 4)	"	110 ~ 130		
2C		1	"	D 4316 (φ 3.2)	110	100 ~ 120		
		2		" (φ 4)	175	"		
		3		" (φ 5)	220	"		
		4		D 309 (φ 4)	170	170 ~ 190		
		5		D 308 (φ 4)	"	130 ~ 150		
2O	1	"	D 4316 (φ 3.2)	110	100 ~ 120			
	2		" (φ 4)	175	"			
	3		" (φ 5)	220	"			
	4		D 309 (φ 4)	170	170 ~ 190			
	5		D 308 (φ 4)	"	130 ~ 150			
OT		1	GTAW	Y 308 (φ 2.4)	120	50 ~ 70	・GTAW : トーチ・アルゴンガス 10 ℓ/分 バック・アルゴンガス 3 ℓ/分	
		2		"	140	130 ~ 150		
		3		中間材 (φ 2.4)	150	80 ~ 100		
		4		"	160	70 ~ 90		
		5	SMAW	D 4316 (φ 4)	170	110 ~ 130		
		6		" (φ 4)	180	100 ~ 120		
		7		" (φ 5)	220	100 ~ 120		
B		1	"	D 4316 (φ 3.2)	110	—	・腐食試験のみ実施 軟鋼溶接棒を不注意でステンレス鋼に溶接（アークストライク等）した場合を想定したもの。	

順序 内容 施工方法	1	2	3	4
	開 先	普 通 鋼 の 溶 接 (D 4 3 1 6)	裏 掘 り (ガウジング+グラインダ)	ステンレス鋼の溶接 (D 3 0 9 + D 3 0 8)
両 側 溶 接				

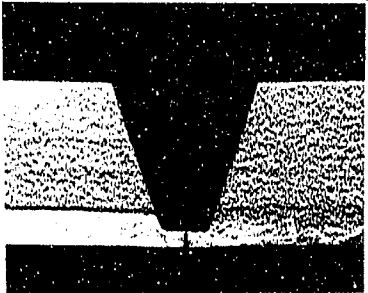
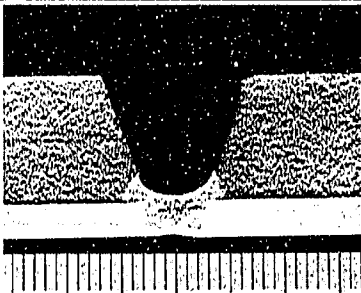
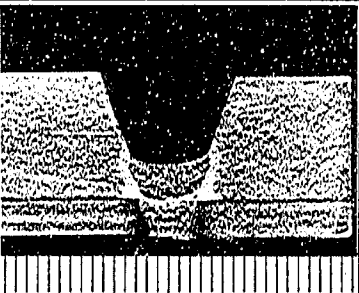
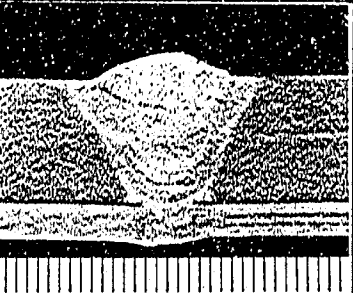
順序 内容 施工方法	1	2	3	4
	開 先	ステンレス鋼の溶接 (Y 3 0 8)	中 間 層 の 溶 接 (純鉄系)	普 通 鋼 の 溶 接 (D 4 3 1 6)
片 側 溶 接				

写真-1.1 ステンレスクラッド鋼の溶接施工方法の代表例

ープにて測定する方法及び、顕微鏡組織からその面積比により求める方法がある。

各層のフェライト量を計測することによりその品質を評価することができる。フェライト量の計測結果は表-1.6 に示すように5～14%の範囲であった。フェライト量に対する基準等はないが、通常4～15%が目安とされており、いずれの溶接方法も問題はなかった。

1.2.2 溶接部の鋭敏化度

ステンレス溶接金属について、JIS で規定されている粒界腐食試験方法と良い相関性を示すEPR法（JIS G 0580 ステンレス鋼の電気化学的再活性化率の測定方法）に準拠して鋭敏化度測定器(DOSテスター：石川島検査計測㈱)で鋭敏化度を測定した。

ステンレス鋼の溶接熱影響部は、クロム炭化物が析出して鋭敏化すると耐食性が劣るので溶接熱影響部の鋭敏化度を計測した。鋭敏化度の評価基準は確立されていないが、一般にSUS304の場合5%以上だと耐食性が劣ると言われている。計測の結果、鋭敏化度は表-1.6 に示すように最大値で0.5%であり、いずれの溶接方法においても鋭敏化はないと思われる。

1.2.3 溶接部の化学成分

合せ材側の最終層溶接金属から分析試料を採取し、ステンレス鋼溶接部の化学成分をJIS Z 3043に準拠して分析した結果を表-1.7 に示す。耐食性に必要なCr, Ni量は、いずれの溶接方法においてもSUS304母材の下限值（Cr=18%, Ni=8%）以上の値であり、異常値は認められなかった。

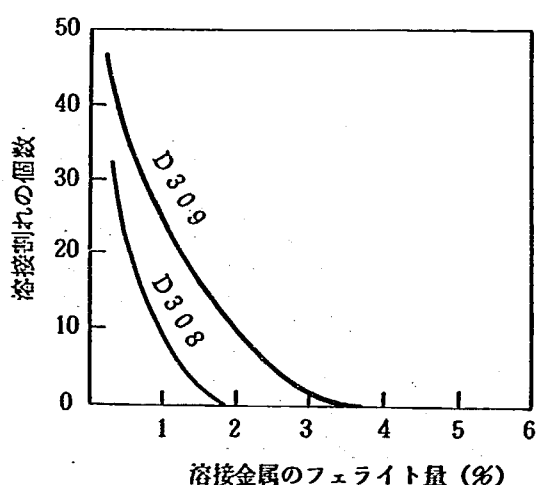
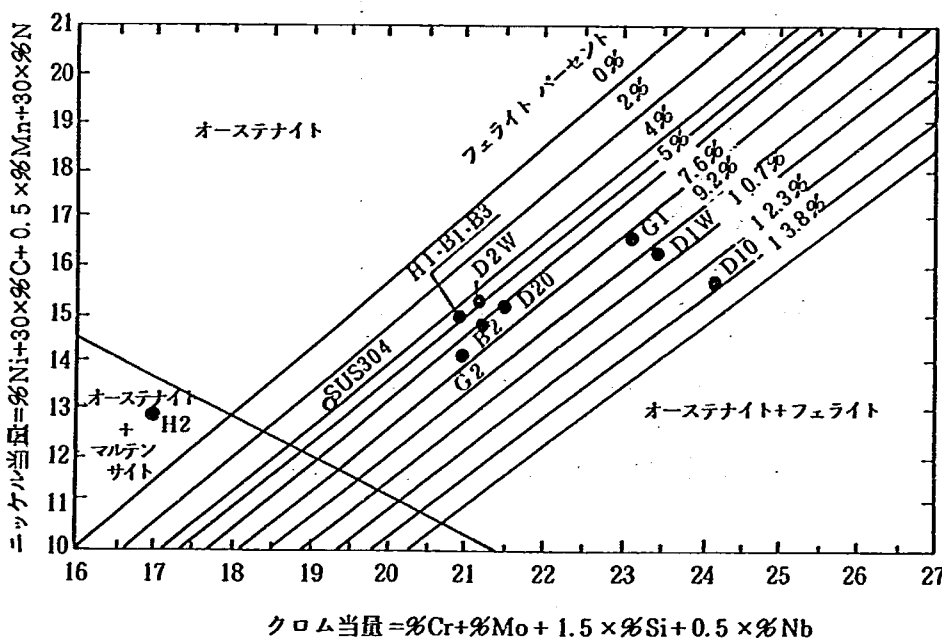


図-1.2 溶接金属のフェライト量と溶接割れの関係

表-1.5 溶接金属の化学成分及びフェライト量計測結果

記 号	化 学 成 分 (%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
G 1	0.063	0.35	1.58	0.026	0.015	11.31	22.54
G 2	0.069	0.41	1.34	0.031	0.017	9.91	20.22
D 1 W	0.057	0.37	0.90	0.025	0.004	11.73	22.90
D 2 W	0.061	0.40	1.24	0.028	0.014	10.29	20.49
D 1 O	0.062	0.40	1.01	0.026	0.006	11.35	23.53
D 2 O	0.065	0.44	1.27	0.028	0.014	10.06	20.64
H 1	0.059	0.37	1.58	0.024	0.014	10.02	20.31
H 2	0.049	0.41	1.53	0.025	0.006	8.14	16.04
B 1	0.066	0.40	1.33	0.029	0.017	9.84	20.27
B 2	0.069	0.40	1.43	0.027	0.017	9.57	20.57
B 3	0.069	0.40	1.45	0.029	0.017	9.91	20.64
規格値 D 3 0 8	≤0.08	≤0.90	≤2.5	≤0.04	≤0.03	9.0 ~ 11.0	18.00 ~ 21.0
規格 SUS304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.03	8.00 ~ 10.50	18.00 ~ 20.00



・分析試料採取位置
SUS304
SM400B
0.5

・フェライトスコープ
溶接金属の表面を接触式磁気
誘導型フェライトスコープに
より測定した。
(西独 Helmut Fischer
GMBH+CO. 製)

・化学成分より求めた各試験板のフェライト量 (日本溶接協会規格 WES.1001 より)

表-1.6 フェライト量及び鋭敏化度の計測結果

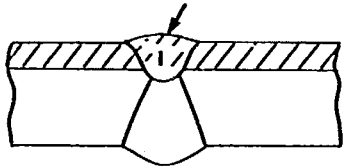
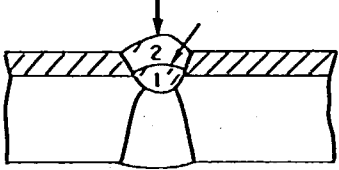
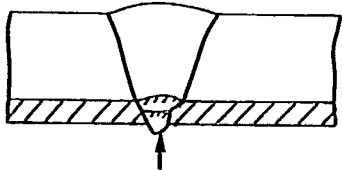
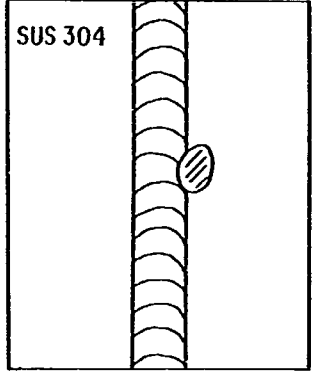
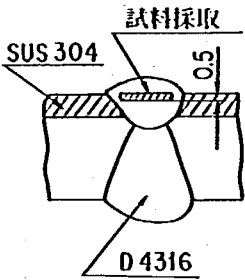
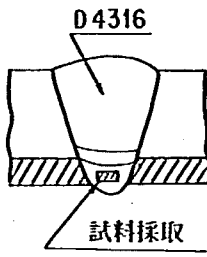
試験板 記号	溶接金属のフェライト量 (%)		溶接熱影響部の鋭敏化度 (%)
	1 層 目	2 層 目	
1 S 8	5	—	0. 1 6
1 S	1 3	—	0. 1 3
1 0	1 0	—	0. 4 0
2 S	1 4	8	0. 1 3
2 0	9	7	0. 2 0
2 C	1 2	8	0. 2 0
OT	5		0. 5 0
測 定 方 法	◎測定位置 (I) ・ 1 S 8 ・ 1 S ・ 1 0  ・ 2 S ・ 2 0 ・ 2 C  ・ O T  ◎計測方法 フェライトスコープにより計測した。 (西独-Henul Fischer GMBH + CO.)		◎測定位置 (II)  ◎計測方法 鋭敏化度測定器により測定した。 (石川島検査計測株式会社製 DOS テスター) ◎評 価 S U S 3 0 4 は 5 % 以上を鋭敏化と評価する。

表-1.7 ステンレスクラッド鋼溶接部の化学成分

試験板記号	化 学 成 分							分 析 位 置
	C	S i	Mn	P	S	C r	N i	
1 S 8	0.061	0.36	1.22	0.026	0.017	18.61	9.31	
1 S	0.061	0.44	1.72	0.024	0.015	21.32	11.19	
1 O	0.060	0.43	0.62	0.024	0.015	21.34	10.58	
2 S	0.061	0.42	1.34	0.025	0.017	20.12	10.14	
2 O	0.062	0.41	1.35	0.024	0.017	19.54	9.79	
O T	0.037	0.42	1.10	0.027	0.008	18.50	9.07	
規 格 SUS304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.03	18.00 ~ 20.00	8.0 ~ 10.5	

1.3 溶接熱の機械的性質への影響

1.3.1 溶接部の引張試験

溶接部は、JIS Z 3121の突合せ溶接継手の引張試験方法の1号試験片で引張試験を行い、JIS G 3601の判定基準に基づいて引張強さ(σ_B)が43kgf/mm²以上を合格とした。

引張試験結果を表-1.8 に示す。クラッド鋼強度の50kgf/mm² に対していずれの溶接方法も51~52kgf/mm² でありすべて合格であった。また、破断位置は写真-1.2 に示すように全て母材部で破断した。

1.3.2 溶接部の側曲げ試験

JIS Z 3122の3号試験片で側曲げ試験を行い、曲げた試験片に3mm以上の割れのないものを合格とした。

側曲げ試験結果を表-1.9 に示す。すべての試験片が判定基準を満足していた。

1.3.3 溶接部の硬さ試験

溶接部に異常な硬さを示す部分がないか、図-1.1 に示す測定位置についてビッカース硬さ計(JIS Z 2244)で硬さ試験を行った。

溶接部の硬さ分布の測定結果を図-1.3(1)~1.3(6)に示す。

全ての溶接部の硬さは、クラッド鋼の合せ材(SUS304)の硬さがHv240程度と最も高く、ステンレス及び普通鋼溶接部はHv180程度であり異常は認められなかった。片側溶接法(OT)の中間層部分がHv280程度と高い値を示しているが曲げ延性も十分あり問題はなかった。

1.3.4 溶接部の断面マクロ及び顕微鏡組織

溶接積層状況、溶接不具合の有無等を確認するために、溶接部の断面マクロ及び顕微鏡組織観察を行った。

ステンレスクラッド鋼溶接部のマクロ及び顕微鏡組織を写真-1.3(1)~1.3(6)に示す。いずれも溶接欠陥や異常組織も認められなかった。また、クラッド鋼のマクロ及び顕微鏡組織並びに硬さ分布を図-1.4 に示す。溶接ビード表面を1, 2, 3mm削除した試験片の断面マクロ組織を写真-1.4 に示す。

表-1.8 引 張 試 験 結 果

試験片の記号		試験片寸法(mm)		断面積 (mm ²)	荷 重 (kg)	引張強さ (kg・f/mm ²)	破断位置	判定 (注1) (合・否)
		板 厚	幅					
クラッド鋼	1	14.8	40.2	595	29.900	50.3	母材	合 格
	2	14.8	40.2	595	30.100	50.6	"	"
1 S 8	1	15.0	40.3	605	31.500	52.1	"	"
	2	15.1	40.3	609	31.700	52.1	"	"
1 S	1	15.3	40.2	615	31.600	51.4	"	"
	2	15.3	40.3	617	31.700	51.4	"	"
1 O	1	15.2	40.2	611	32.000	52.4	"	"
	2	15.3	40.3	617	32.000	51.9	"	"
2 S	1	15.3	40.2	615	31.700	51.5	"	"
	2	15.1	40.1	606	31.800	52.5	"	"
2 O	1	15.3	40.3	617	31.800	51.5	"	"
	2	15.2	40.3	613	31.700	51.7	"	"
O T	1	15.3	40.2	615	32.000	52.0	"	"
	2	15.2	40.2	611	32.000	52.4	"	"

(注1) 判定基準 (J I S G 3 6 0 1)

$$\sigma_B = \frac{t_1 \sigma_1 + t_2 \sigma_2}{t_1 + t_2} = \frac{11 \times 41 + 2.5 \times 52}{11 + 2.5} = 43.0 \text{ kg} \cdot \text{f/mm}^2$$

σ_B (引張強さ) = 43.0 kg・f/mm² 以上合格

・ t_1 : SM400B (11mm), σ_1 = 41 kg・f/mm²

・ t_2 : SUS304 (2.5mm), σ_2 = 52 kg・f/mm²

写真-1.2 引張試験片の破断状況

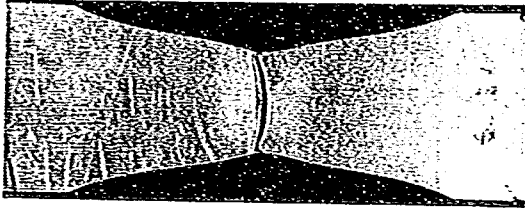
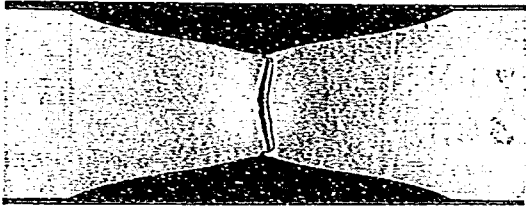
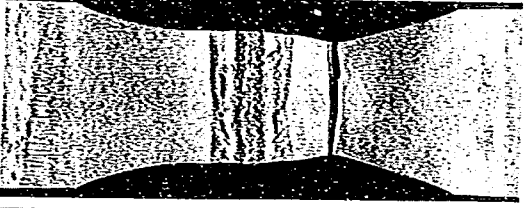
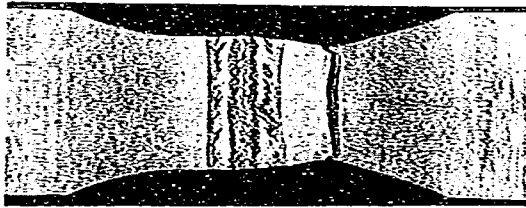
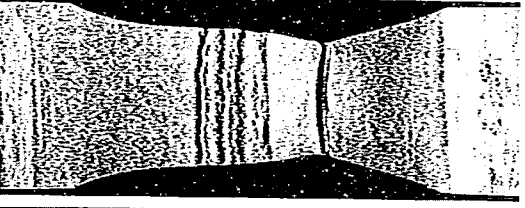
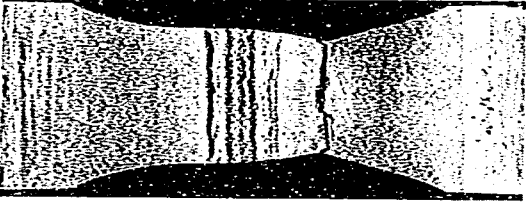
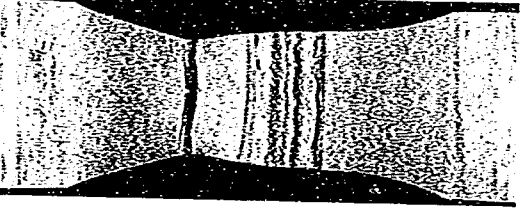
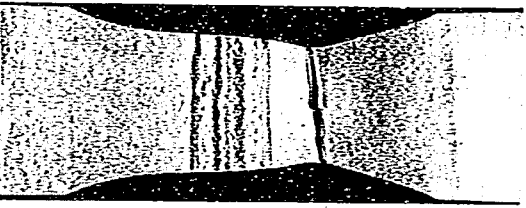
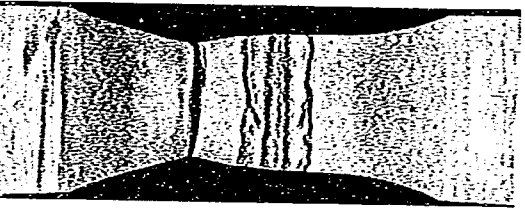
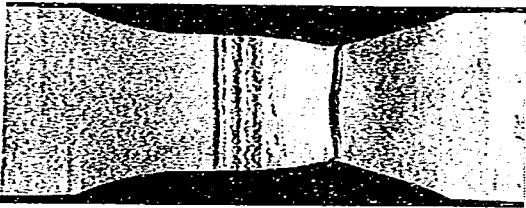
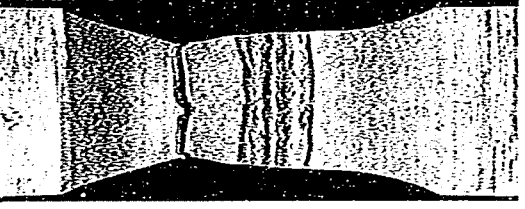
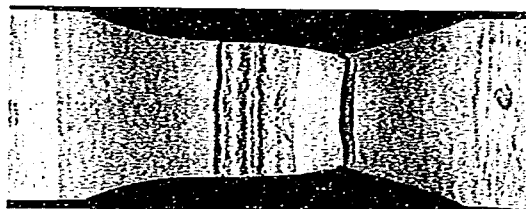
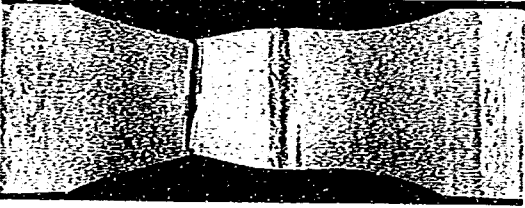
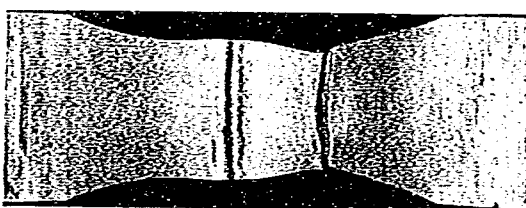
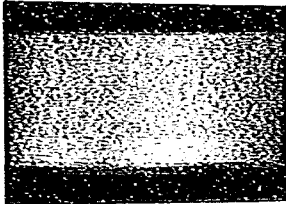
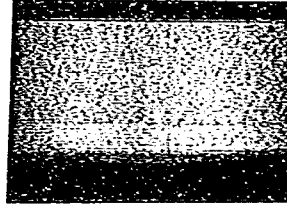
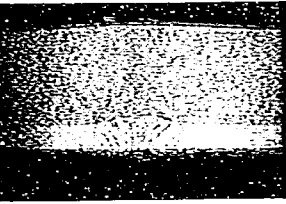
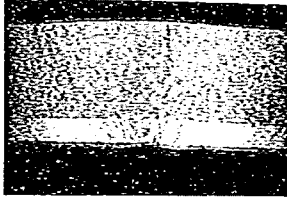
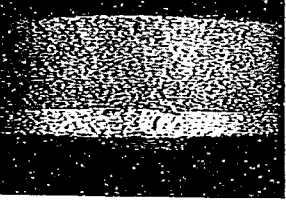
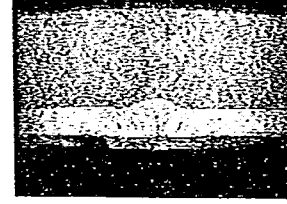
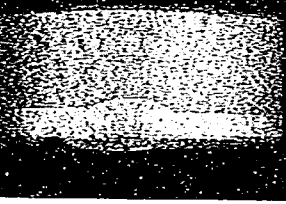
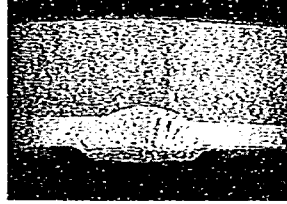
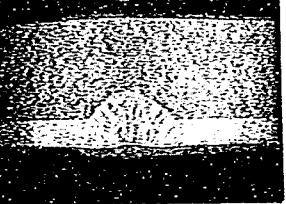
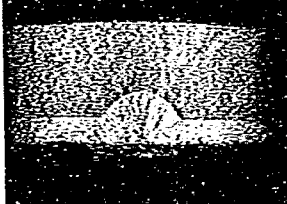
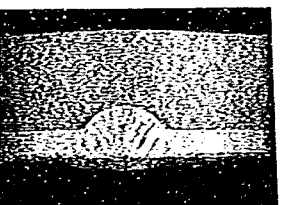
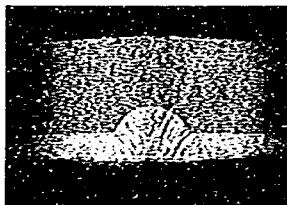
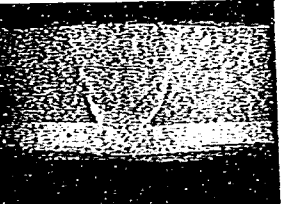
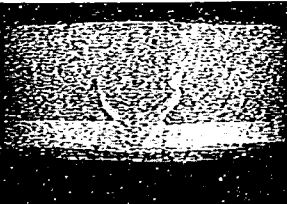
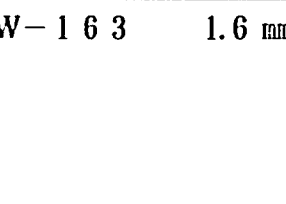
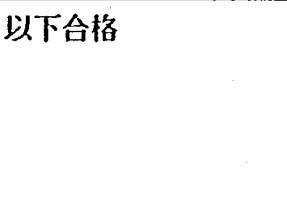
試験片	試験片の破断状況	
	1	2
BM (母材)		
1S8		
1S		
10		
2S		
20		
OT		

表-1.9 側曲げ試験結果

試・験 片		欠陥の数と大きさ	(注) 判 定	曲げ後の試験片外観	
				1	2
BM (母材)	1	0	合 格		
	2	0	合 格		
1 S 8	1	0	合 格		
	2	0	合 格		
1 S	1	0	合 格		
	2	0	合 格		
1 O	1	0	合 格		
	2	0	合 格		
2 S	1	0	合 格		
	2	0	合 格		
2 O	1	0.2 mm × 1個	合 格		
	2	0	合 格		
OT	1	0	合 格		
	2	0	合 格		

(注) 判定基準 : ASME Sec. IX QW-163 1.6 mm 以下合格

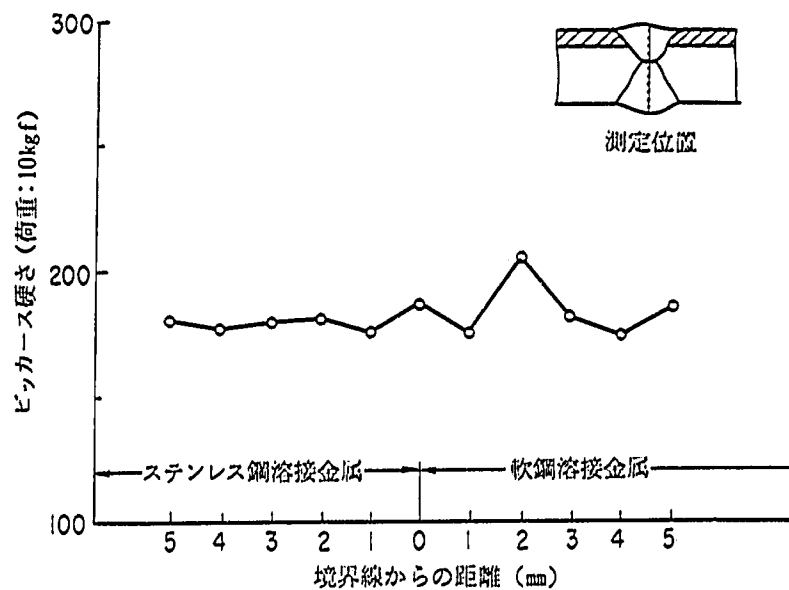
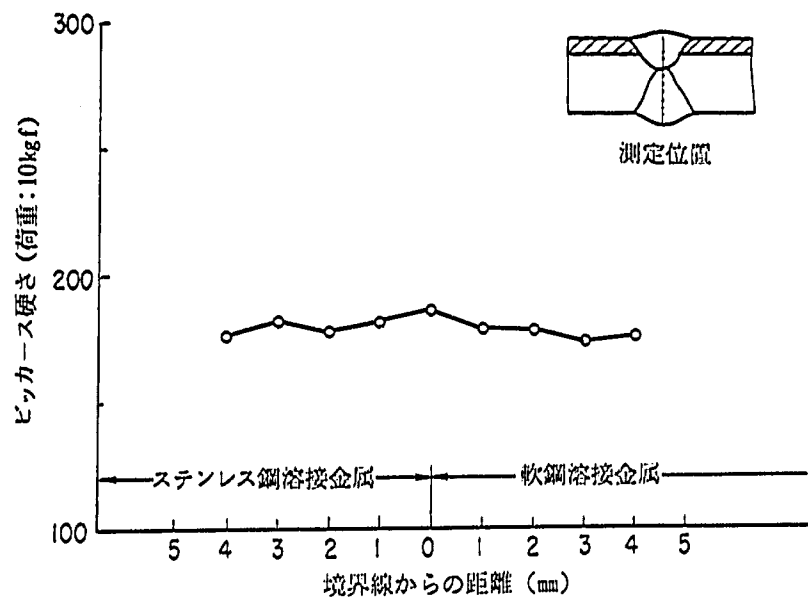
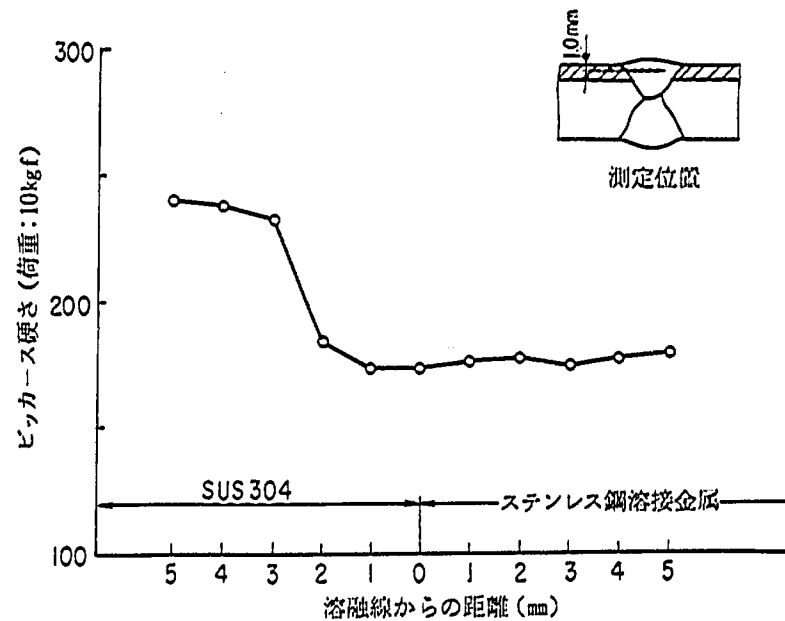
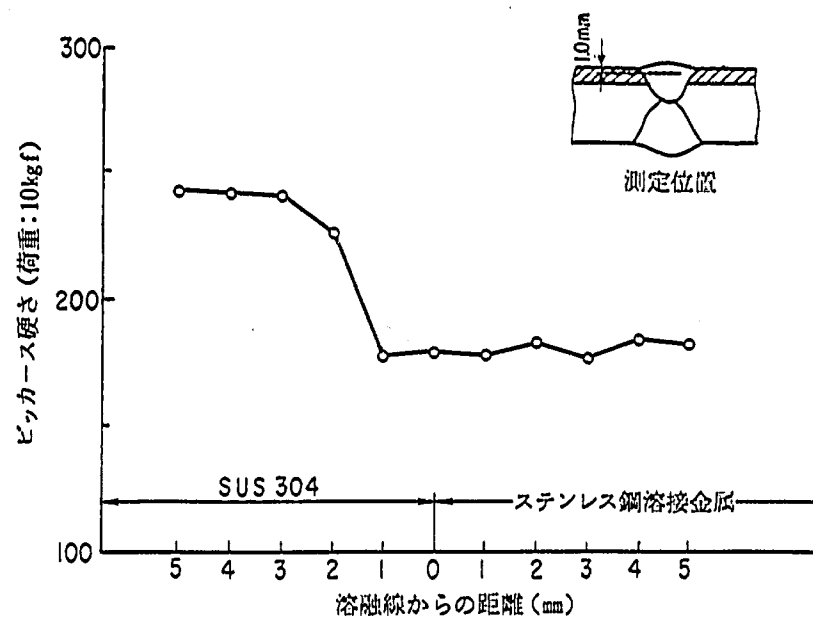


図-1.3 (1) 溶接継手部の硬さ分布 (1S8)

図-1.3 (2) 溶接継手部の硬さ分布 (1S)

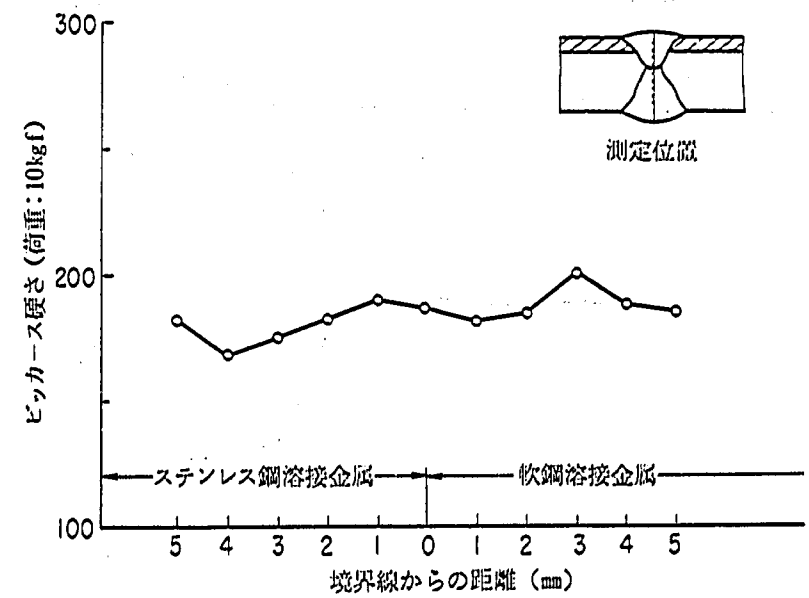
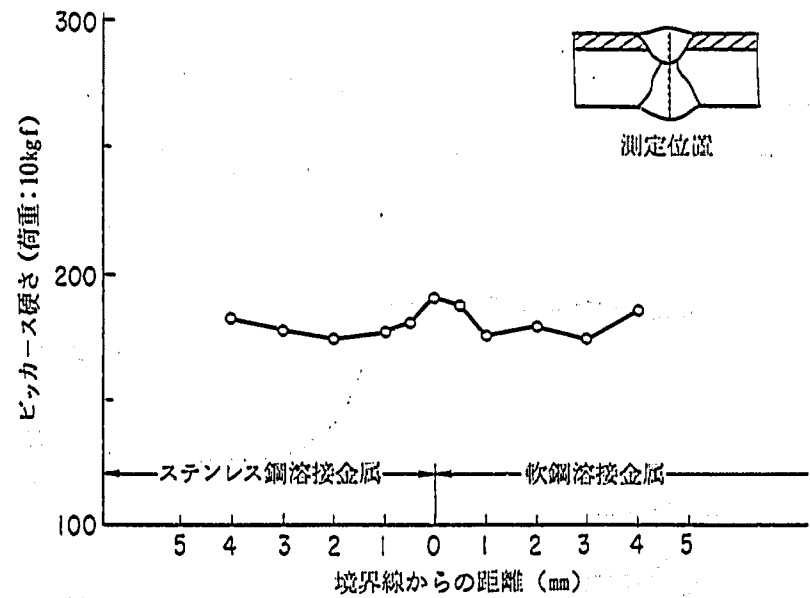
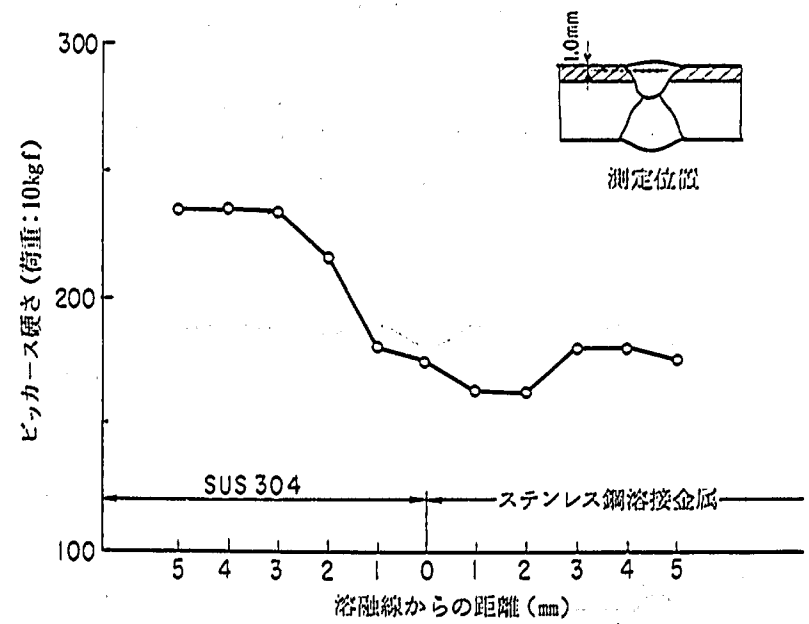
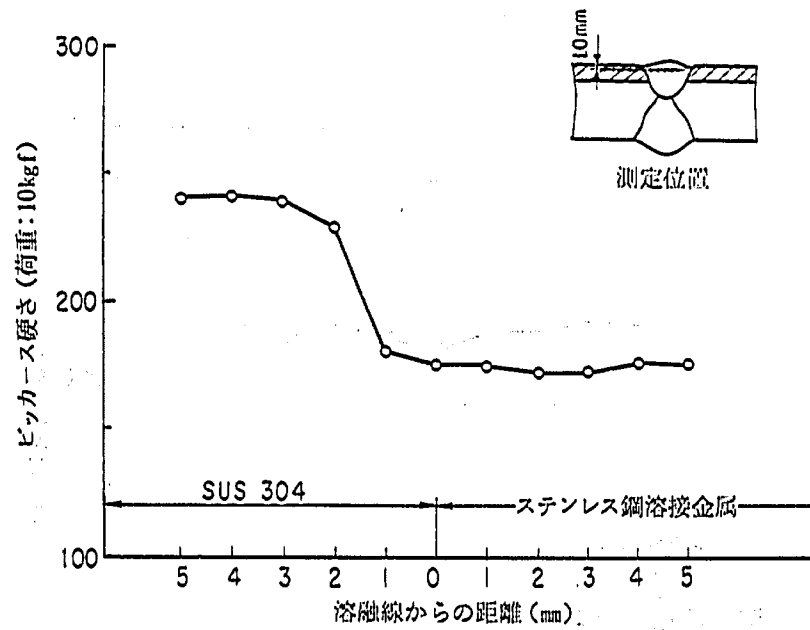


図-1.3 (3) 溶接継手部の硬さ分布 (10)

図-1.3 (4) 溶接継手部の硬さ分布 (2S)

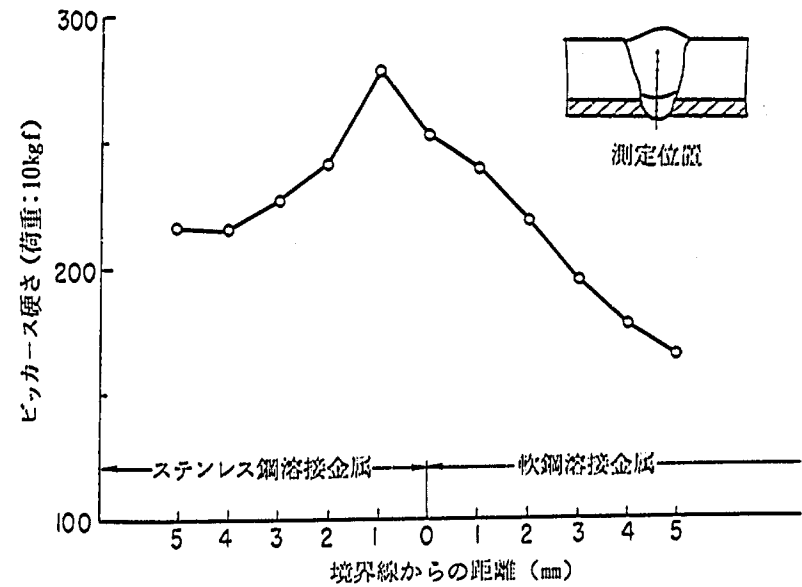
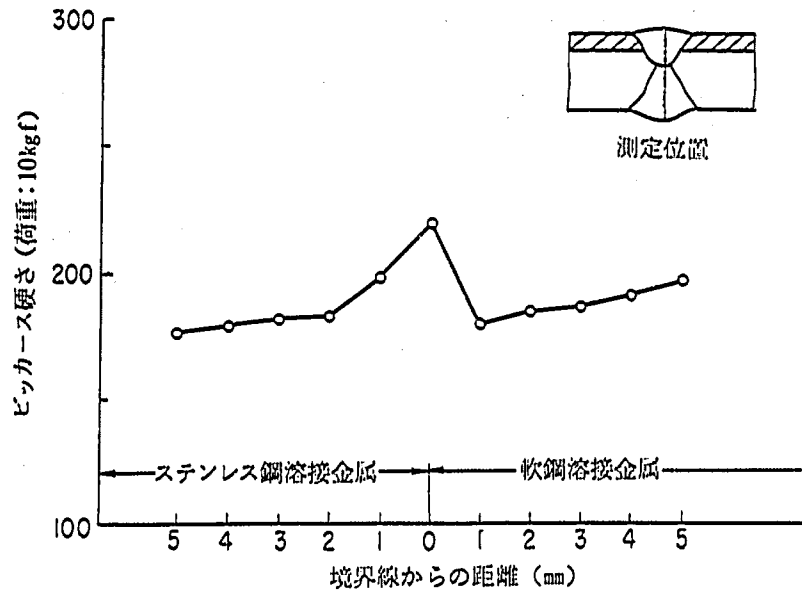
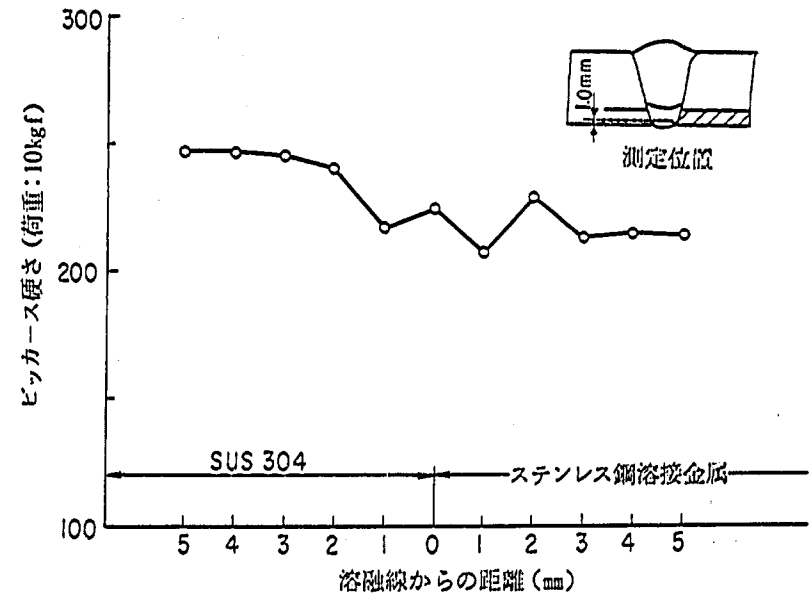
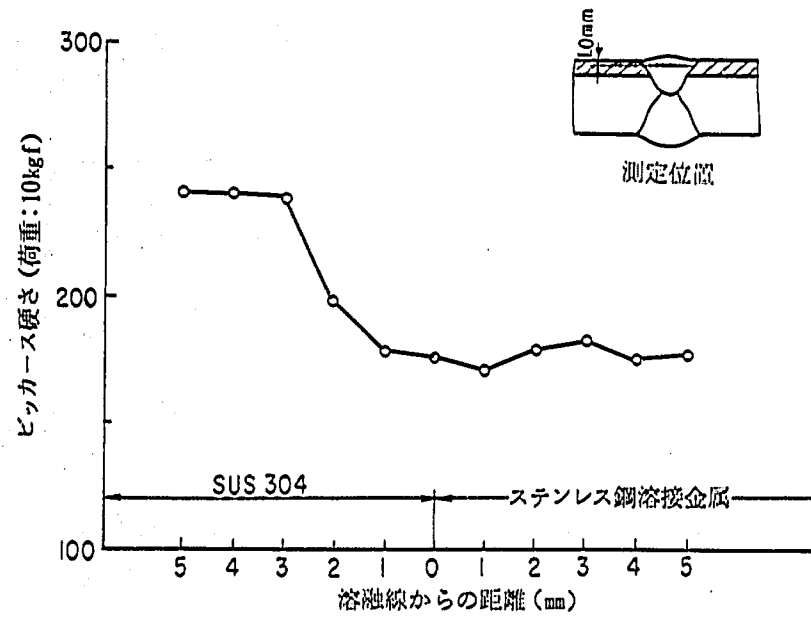
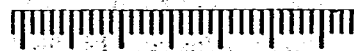
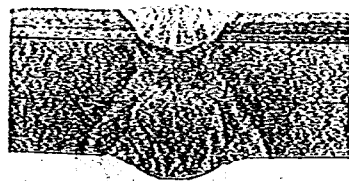
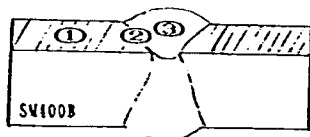


図-1.3 (5) 溶接継手部の硬さ分布 (20)

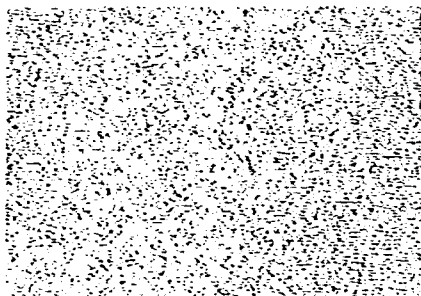
図-1.3 (6) 溶接継手部の硬さ分布 (OT)



溶接部断面マクロ組織 (×2)

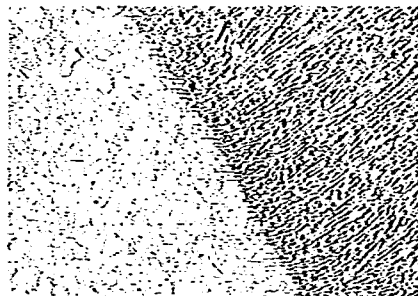


顕微鏡組織撮影位置



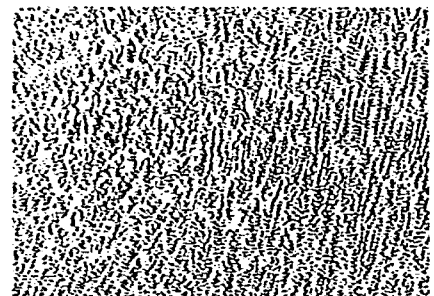
撮影位置 ①

×100



撮影位置 ②

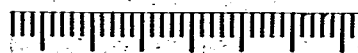
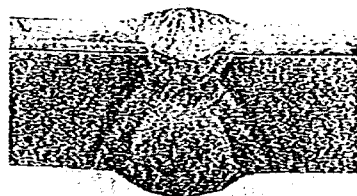
×100



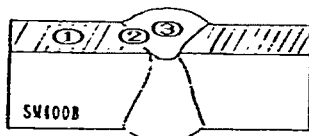
撮影位置 ③

×100

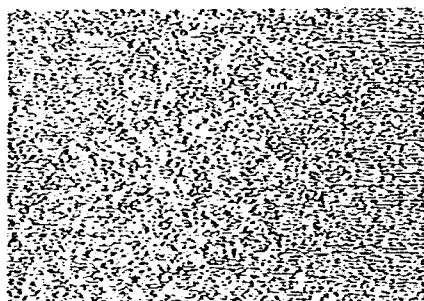
写真-1.3 (1) 溶接部断面マクロ及び顕微鏡組織 (1 S 8)



溶接部断面マクロ組織 (×2)



顕微鏡組織撮影位置



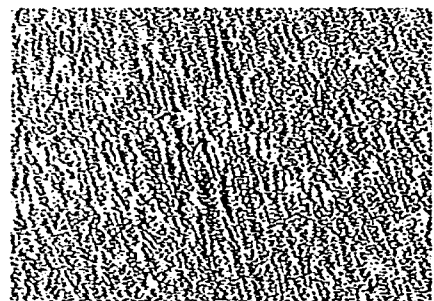
撮影位置 ①

×100



撮影位置 ②

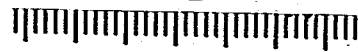
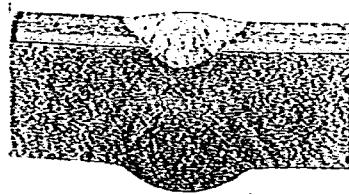
×100



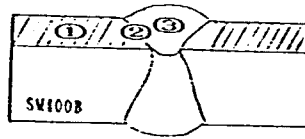
撮影位置 ③

×100

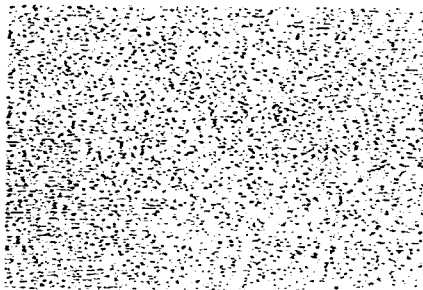
写真-1.3 (2) 溶接部断面マクロ及び顕微鏡組織 (1 S)



溶接部断面マクロ組織 (×2)

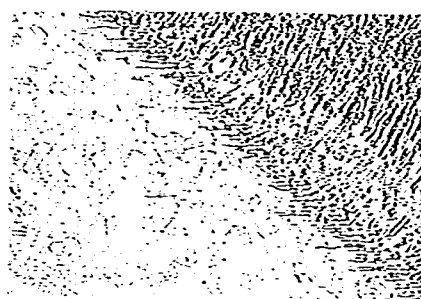


顕微鏡組織撮影位置



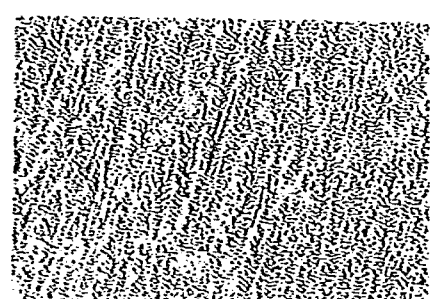
撮影位置 ①

×100



撮影位置 ②

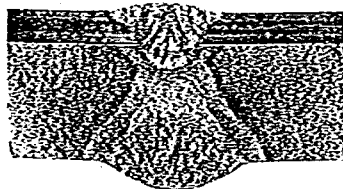
×100



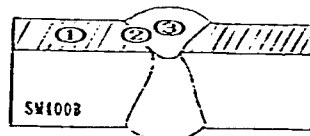
撮影位置 ③

×100

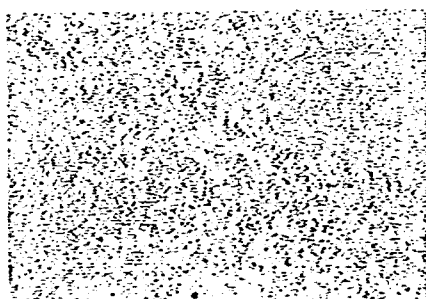
写真-1.3 (3) 溶接部断面マクロ及び顕微鏡組織 (10)



溶接部断面マクロ組織 (×2)

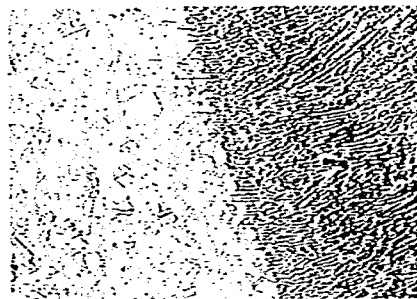


顕微鏡組織撮影位置



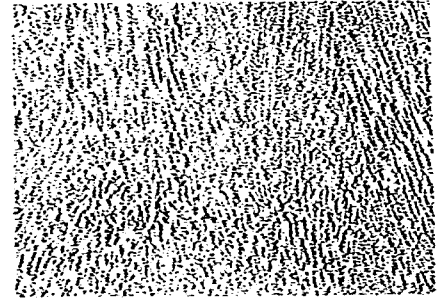
撮影位置 ①

×100



撮影位置 ②

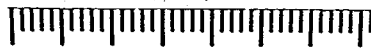
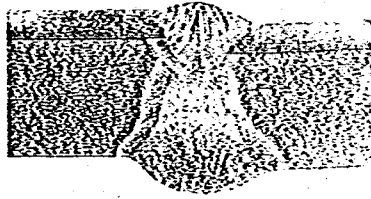
×100



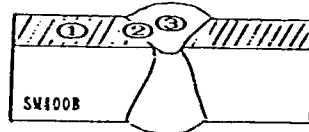
撮影位置 ③

×100

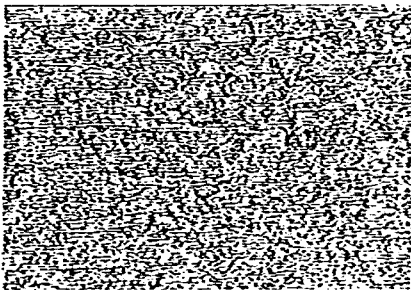
写真-1.3 (4) 溶接部断面マクロ及び顕微鏡組織 (2 S)



溶接部断面マクロ組織 (×2)

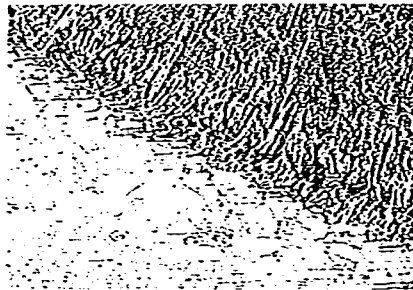


顕微鏡組織撮影位置



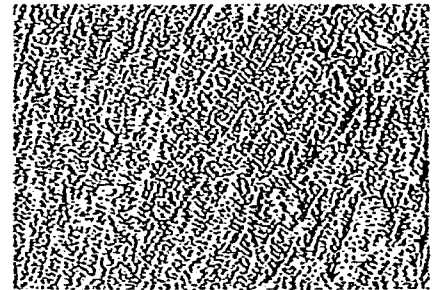
撮影位置 ①

×100



撮影位置 ②

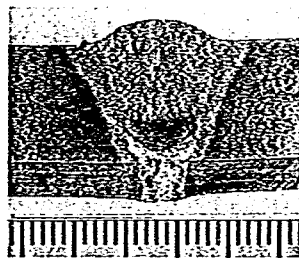
×100



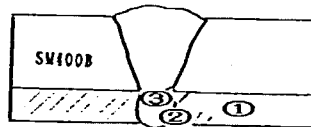
撮影位置 ③

×100

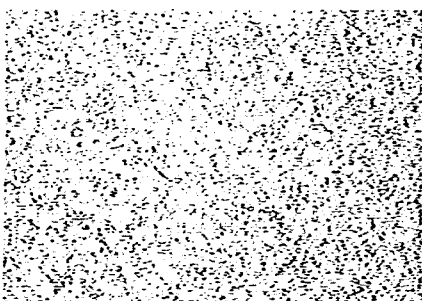
写真-1.3 (5) 溶接部断面マクロ及び顕微鏡組織 (20)



溶接部断面マクロ組織 (×2)

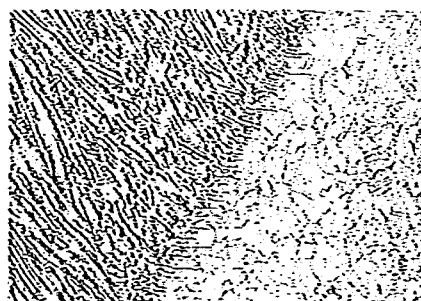


顕微鏡組織撮影位置



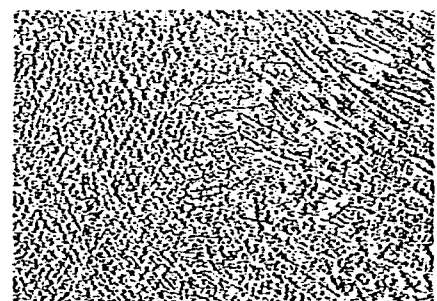
撮影位置 ①

×100



撮影位置 ②

×100



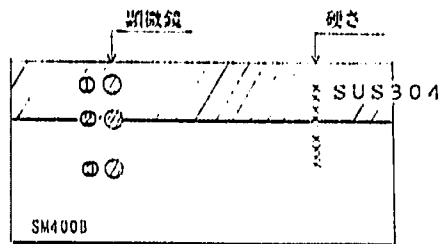
撮影位置 ③

×100

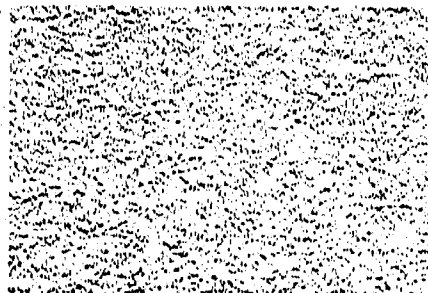
写真-1.3 (6) 溶接部断面マクロ及び顕微鏡組織 (OT)



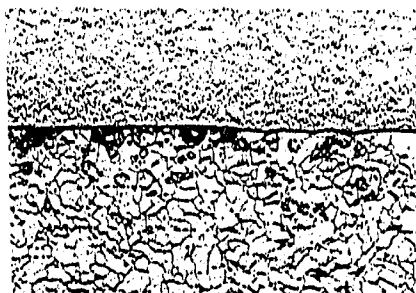
断面マクロ組織 (×2)



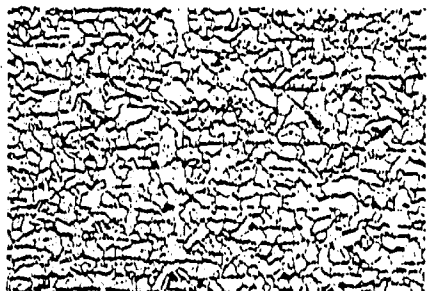
顕微鏡及び
硬さ測定位置



撮影位置 ①



撮影位置 ②



撮影位置 ③

顕微鏡金相組織 ×100

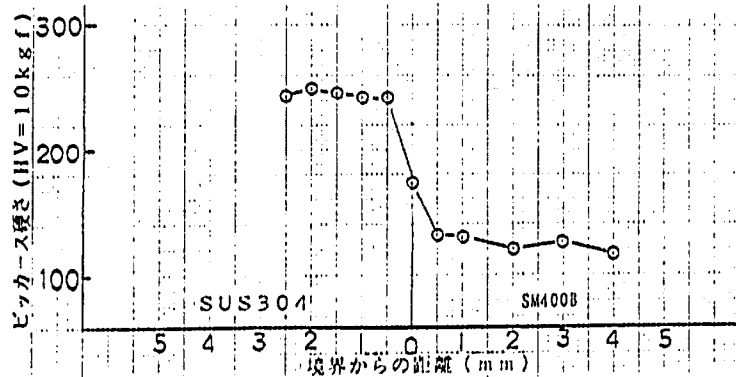
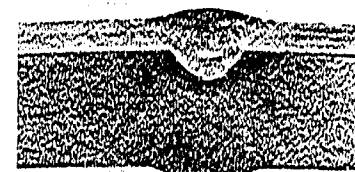
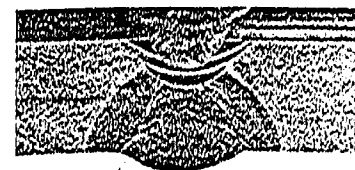


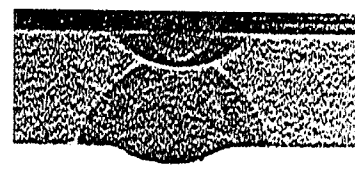
図-1.4 顕微鏡組織及び硬さ分布



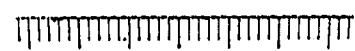
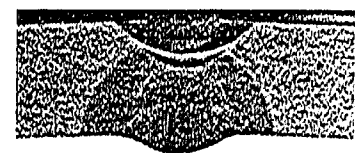
2C-0



2C-1



2C-2



2C-3

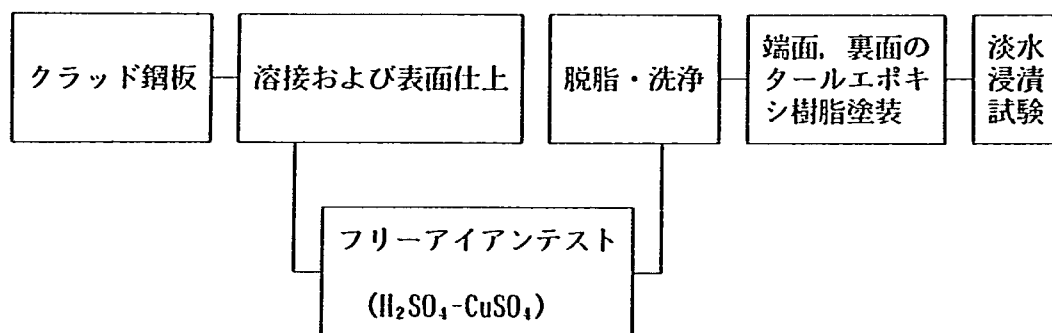
写真-1.4 溶接部断面マクロ組織

1.4 溶接継手部の耐食性試験

1.4.1 淡水浸漬試験

(1)試験方法

試験片は表-1.4に示す11種類の試験板について下記の要領で製作した。



試験片の形状は、図-1.1 に示す 13.5t×100w×200ℓとした。合せ材側表面仕上げは#120 研磨で行い溶接部の余盛は削除した。

(2)試験条件

試験条件を下表に示す。

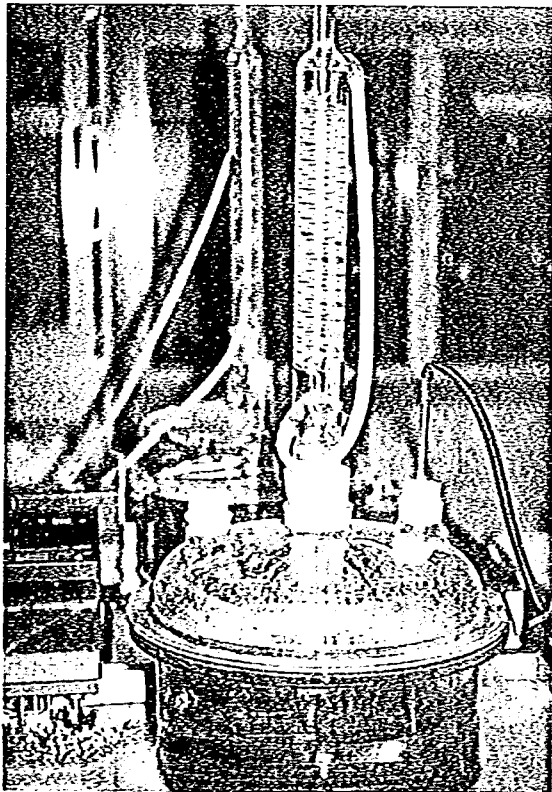
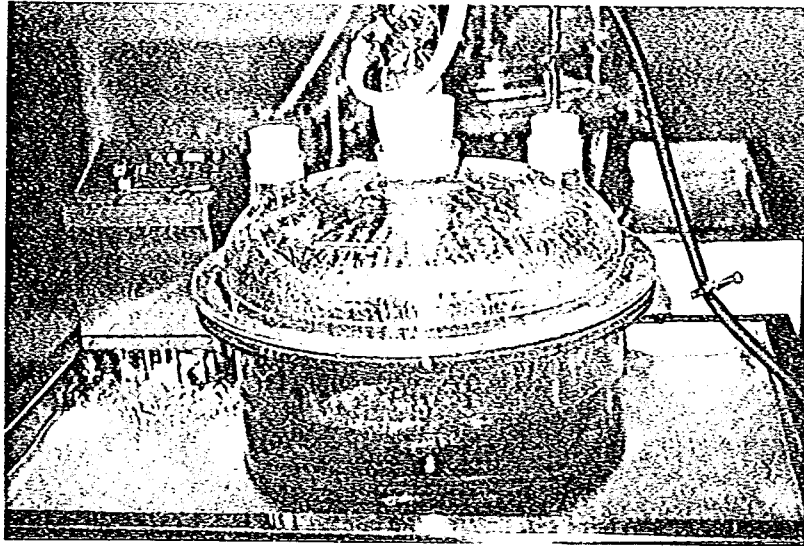
項 目	条 件
温度	50℃
塩素イオン濃度	20ppm (NaClとして)
溶存酸素	飽和 (空気バブリング)
流速	静止
試験期間	3ヵ月 (1ヵ月毎に観察)

腐食試験装置の外観を写真-1.5 に示す。試験は、A槽 (1S8, 2S, 10, 2S, 0T, BT計7枚) とB槽 (2C1, 2C2, 2C3, B2計4枚) の2槽に分けて行った。試験溶液は、1ヶ月毎に新しい溶液と交換した。

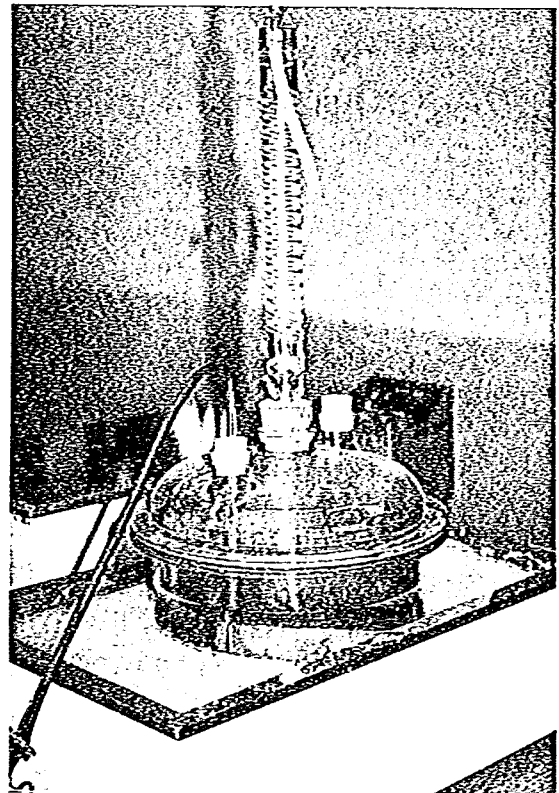
(3)試験結果

1) フリーアイアンテスト

淡水浸漬試験前に、JIS G 0575「ステンレス鋼の硫酸・硫酸銅腐食試験方法」の中の硫酸-硫酸銅溶液に準拠してフリーアイアン試験を行った。その結果、B2 (クラッド鋼に普通鋼溶接棒でアークストライク) にのみ赤茶色の変色が認められ、他は異常がなかった。したがって、希釈による鉄の析出は、他の溶接部では発生していないと考えられる。



A槽



B槽

写真-1.5 淡水浸漬試験の状況

2) 淡水浸漬試験

①1ヶ月後には、B2にのみ赤錆が発生した。他は赤さび、孔食などは認められなかった。

②2ヶ月後には、1S、1O1層盛溶接金属に孔食が認められた。

③3ヶ月後の試験片の外観を写真-1.6に示す。1S8、1S、1O、2C1、2C3、B2に孔食が発生していた。孔食の発生部位は2C1を除き全て溶接金属にあった。1S8、1S、1Oは溶接金属中央にあり、1Sは深い(0.64mm)、2C3は溶接金属と母材との境界(ボンド)部にある。アークストライク部の孔食は最大0.57mmで普通鋼溶接による熱影響及び希釈を受けて組織が変化した部分が腐食しており、もらい錆の影響は少ないように見える。孔食の数と深さの測定結果を表-1.10に示す。

以上の結果、淡水(20ppm Cl^-)試験では溶接金属に存在した極く微小な欠陥(ピンホール、ブローホール、溶込み不良)の悪影響が判明した。しかし、クラッド鋼特有の異材溶接に伴う腐食は発生しなかった。また、普通鋼アークストライクによる発錆と孔食は溶接部の組織と成分によるもので、いわゆる希釈と同様の悪影響が強いようであり、さび汁によるもらい錆の進行は顕著には見出されなかった。

表-1.10 孔食の数と深さ測定結果

	記号	溶接施工	孔食	
			数	深さ(mm)
溶接部	1S8	SMAW D308(1層盛標準)	1コ	<0.01
	1S	SMAW D309(1層盛標準)	1コ	0.64
	1O	SMAW D309(1層盛過大)	1コ	<0.01
	2S	SMAW D309/D308(2層盛標準)	なし	なし
	2O	SMAW D309/D308(2層盛過大)	なし	なし
	OT	GTAW Y308(One side溶接)	なし	なし
	2C1	SMAW D309/D308($\ell=1\text{mm}$)	5コ	<0.01~0.01
	2C2	SMAW D309/D308($\ell=2\text{mm}$)	なし	なし
	2C3	SMAW D309/D308($\ell=3\text{mm}$)	2コ	0.02, 0.21
クラッド鋼	B2	クラッド鋼+アークストライク	5	MAX 0.57
	BM	クラッド鋼	なし	なし

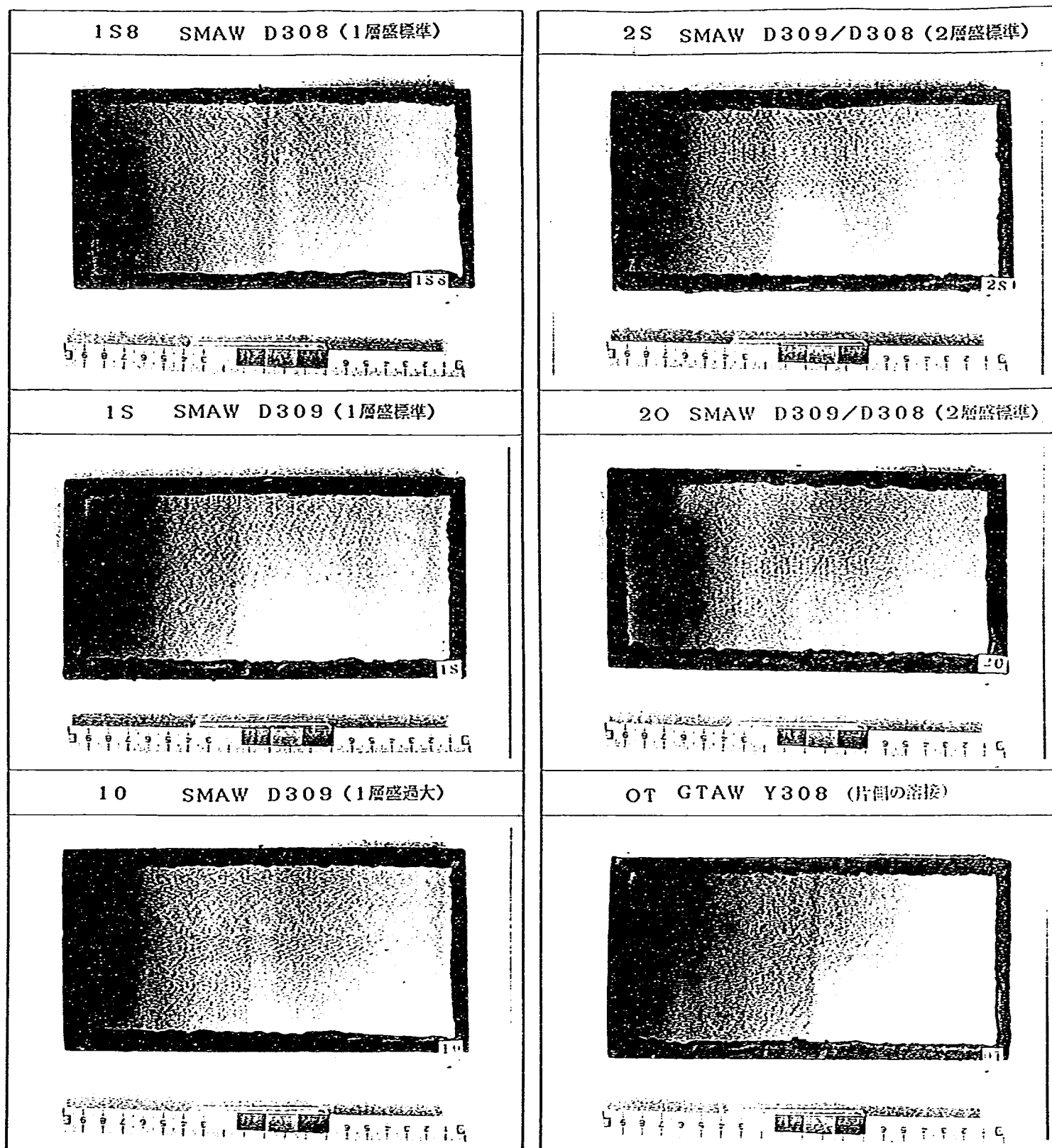


写真-1.6 (I) 淡水浸漬3ヶ月後の腐食状況

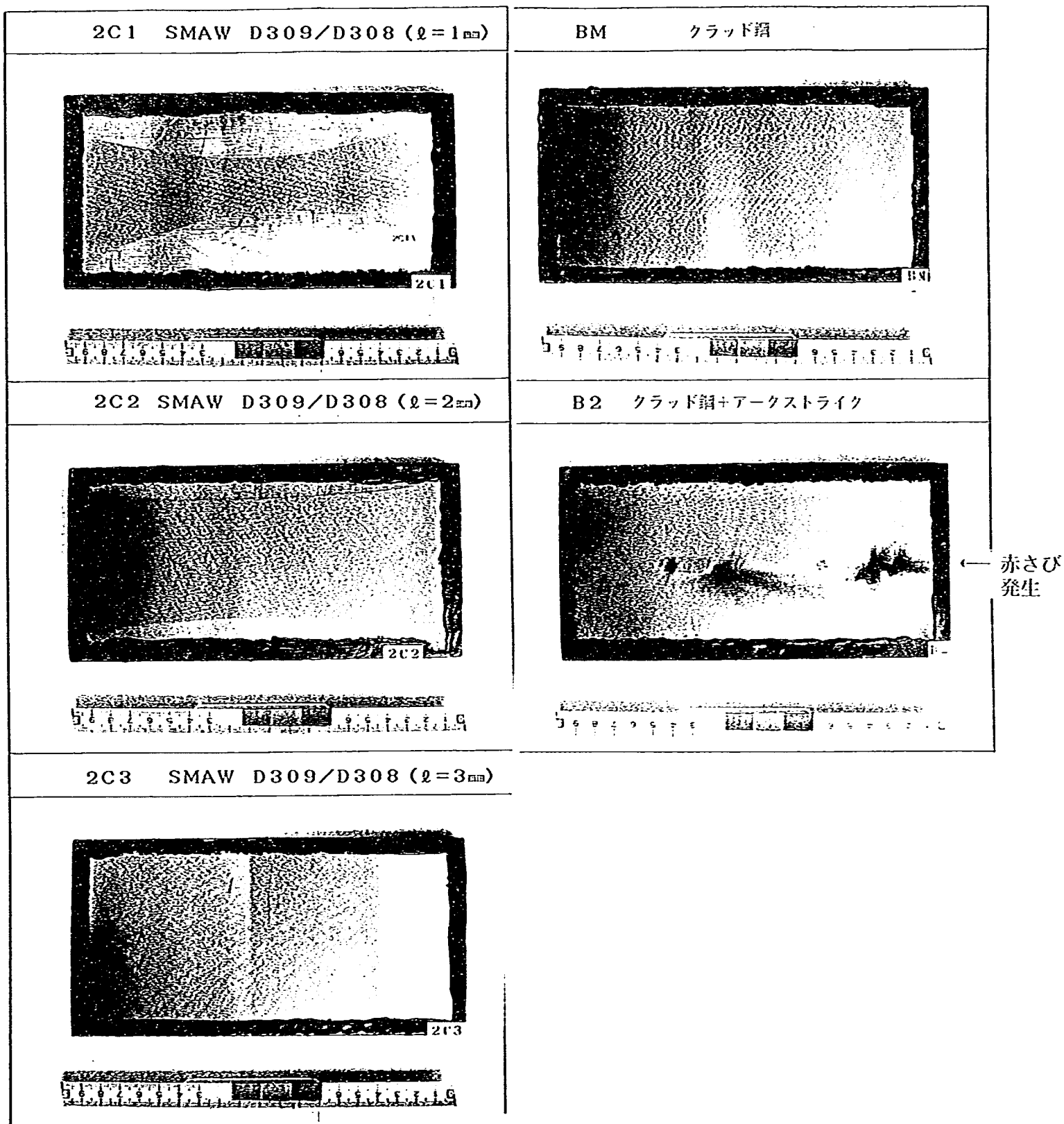


写真-1.6 (2) 淡水浸漬3ヶ月後の腐食状況

1.4.2 塩水噴霧試験

(1) 試験方法

試験片は、淡水浸漬試験と同様のものを用いた。各試験片の耐食性の差を明瞭にするため発錆を加速する試験方法として人工海水噴霧、熱風乾燥に湿潤状態を加え、これらを繰り返す複合腐食試験を行った。

(2) 試験条件

試験条件及び試験状況を図-1.5に示す。

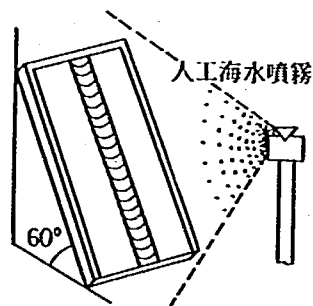
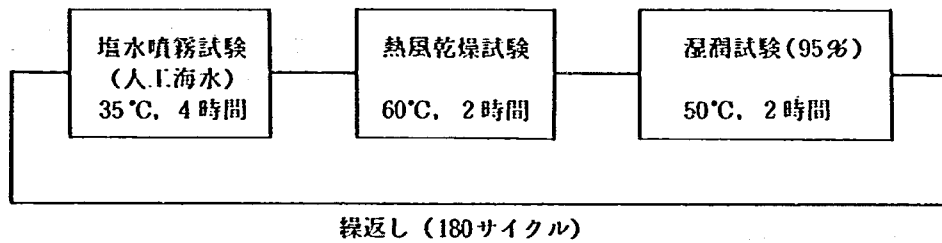


図-1.5 試験状況

(3) 試験結果

①腐食試験前の外観状況

2 C 1, 2 C 2 試験片に研磨前のクラッド鋼表面が残っている。2 C 1 試験片の溶接部に溶接欠陥とみられる小さな凹みが、また溶接部の両側に研磨前の酸化スケールがみられる。その他の試験片はきれいな研磨肌を示し、凹み等の異状はみられなかった。

②外観状況の経時変化

・3サイクル(1日経過)において、クラッド鋼試験片を除くすべての試験片の溶接部に発錆がみられた。普通鋼アークストライク試験片の普通鋼溶込部からは錆が流れていた。

・28サイクル(7日経過)において、すべての試験片のステンレス鋼表面にも発錆がみられた。普通鋼アークストライク試験片の普通鋼溶込部の腐食が激しかった。

・43サイクル(14日経過)において、クラッド鋼試験片、溶接試験片の発錆程度は28サイクルに比べてあまり大きな変化はみられなかった。普通鋼アークストライク試験片の普通鋼溶込部の腐食は、かなり進行しているようにみえた。また、OTについては上端面のタールエ

ポキシ塗装部から錆が流れ始めたので試験片を上下逆さにして置き直した。

・ 112サイクル（38日経過）において、クラッド鋼試験片，溶接試験片の発錆程度にあまり大きな変化はみられなかった。上端面のクールエポキシ塗装部から錆が流れ始めた試験片（1 S 8，2 O，2 C 2）については上下逆さにして置き直した。

・ 180サイクル（60日経過）において、母材試験片，溶接試験片の発錆が全体としてやや激しくなったがあまり大きな変化はみられなかった。

孔食発生状況の測定位置を図-1.6 に示す。表-1.11に43及び 180サイクルの腐食状況を，表-1.12に溶接部の孔食発生状況を，表-1.13にステンレス鋼表面の孔食発生状況を，表-1.14にステンレス鋼表面熱影響部の孔食発生状況を，表-1.15に溶接部に最大孔食深さと孔食数を示す。

(4) 錆除去後の表面状況

①普通鋼溶接棒をアークストライクした試験片は腐食深さがかなり大きく、腐食部の断面状況から腐食は普通鋼溶込み部より深い部分には進行していなかった。

②1 S 試験片には溶接欠陥と思われる深い孔が認められた。

③複合腐食試験でみられた比較的大きな発錆の起点に大きな孔食が認められた。

④それぞれの試験片の溶接部は、母材部と比較し孔食深さからみて特に激しい腐食は認められず、孔食発生状況の溶接条件による大きな差はみられないが、1 S，2 S，2 C-3 の最大孔食深さが小さく孔食の数も少なかった。一方、1 O，2 C-1，2 C-2 は最大孔食深さがやや大きく、2 C-1，O T，2 O は孔食の数がやや多かった。

⑤2 C-1，2 C-2 それぞれの酸化スケール部はそれぞれの母材部と比較して、特に深い孔食は認められなかった。

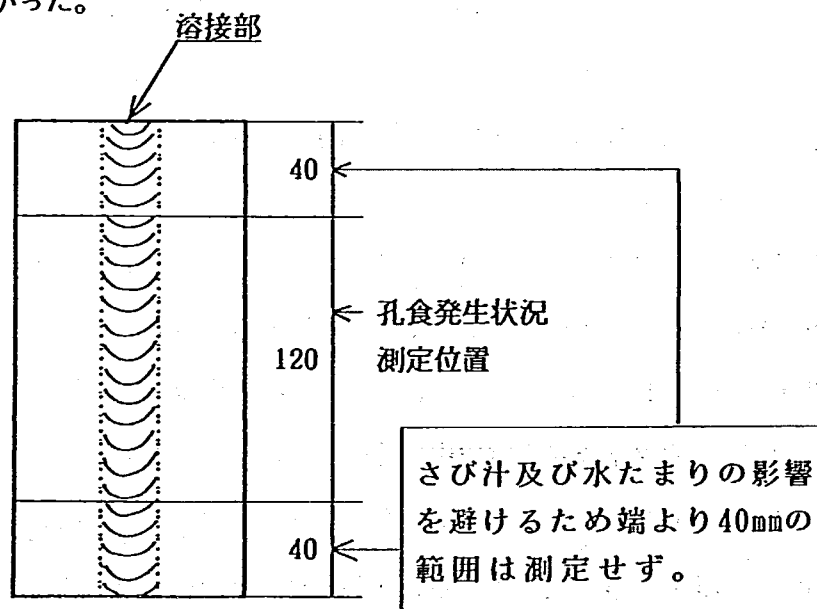


図-1.6 孔食発生状況測定位置

表-1.11 43サイクル及び180サイクル後の腐食状況

試験片 記 号	発錆の程度 (試験片BMと同程度:○ やや激しい:△ 激しい:×)				備 考
	43サイクル		180サイクル		
	ステン レス 鋼表面	溶接部の ステン レス 鋼表面	ステン レス 鋼表面	溶接部の ステン レス 鋼表面	
1S8	○	△	○	△	溶接部のステンレス鋼表面に比較的大きな発錆の起点がみられる。
1S	○	△	○	△	ステンレス鋼表面に比較的大きな発錆の起点がみられる。
10	○	△	○	△	——
2S	○	△	○	△	ステンレス鋼表面に比較的大きな発錆の起点がみられる。
20	○	△	○	△	ステンレス鋼表面に比較的大きな発錆の起点がみられる。
2C-1	○: ステンレス鋼表面 △: 溶接部 △: ステンレス鋼熱影響部				溶接欠陥とみられる凹みからは発錆がみられない。 熱影響部の発錆はやや激しい。
2C-2	○	△	○	△	——
2C-3	○	△	○	△	ステンレス鋼表面に比較的大きな発錆の起点がみられる。
OT	○	△	○	△	ステンレス鋼表面に比較的大きな発錆の起点がみられる。
BM	○	——	○	——	——
B	○: ステンレス鋼表面 ×: 普通鋼溶込部				——

表-1.12 溶接部の孔食発生状況

(μm)												
位 置	No.	1S8	1S	10	2S	20	2C1	2C2	2C3	OT	BM	B
クラッド鋼 溶接部 ステンレス 鋼表面	1	33	(1258)	45	19	29	50	53	21	32		506
	2	28	21	27	16	25	49	20	16	21		470
	3	18	18	19	16	20	29	16	14	19		440
	4	16	17	18	15	20	25	15	13	18		432
	5	16	16	14	14	15	23	15	13	17		402
	6		15	13	14	12	21	13	12	16		385
	7		13	13	13	12	20	11	10	16		274
	8		13	12	13	11	14	10		15		273
	9		12	12	12	10	14	10		15		273
	10		10	11	10	10	14			13		256
	11			11		10	12			12		
	12			11		10	11			11		
	13			11			11			10		
	14			11			11			10		
	15			10			10			10		
	16						10			10		
	17						10			10		

*深さ10μm以上の孔食について孔食深さを測定

表-1.13 クラッド鋼及びステンレス鋼表面の孔食発生状況

(μm)

位 置	No.	1S8	1S	10	2S	20	2C1	2C2	2C3	OT	BM	B
クラッド 鋼 ステン レス鋼 表面	1	31	39	32	19	24	55	46	28	44	33	—
	2	25	37	22	18	21	19	46	23	43	26	
	3	20	21	22	17	20	19	31	22	39	19	
	4	18	20	19	17	20	19	24	21	35	18	
	5	18	19	17	16	19	17	24	19	32	17	
	6	15	18	17	15	18	16	23	18	32	17	
	7	15	18	17	15	18	15	19	18	31	16	
	8	14	17	16	14	17	13	19	17	31	16	
	9	13	17	16	14	17	12	19	16	29	15	
	10	12	16	15	14	17	12	19	16	27	15	
	11	12	16	15	14	16	11	16	15	26	14	
	12	11	16	15	14	16	11	16	14	26	14	
	13	10	15	15	14	16	11	15	14	22	13	
	14	10	14	15	14	15	10	15	14	21	12	
	15	10	13	14	14	15	10	15	14	20	12	
	16		11	14	14	15	10	15	14	20	12	
	17		11	14	13	15		14	14	19	12	
	18		11	14	13	15		14	13	19	12	
	19		11	13	13	14		14	13	19	11	
	20		10	13	12	14		14	12	17	11	
	21		10	12	12	14		13	12	16	11	
	22		10	12	12	14		13	11	16	10	
	23			12	11	13		13	11	16	10	
	24			12	11	13		12	11	16		
	25			12	11	13		12	11	16		
	26			12	10	13		11		16		
	27			12	10	13		11		15		
	28			12	10	13		10		14		
	29			12	10	12				14		
	30			11	10	12				13		
	31			11		11				13		
	32			11		11				12		
	33			11		11				12		
	34			11		11				12		
	35			11		10				11		
	36			11		10				11		
	37			10		10				11		
	38			10		10				10		
	39			10		10				10		
	40			10		10				10		
	41			10		10						
	42			10		10						
	43			10		10						
	44					10						
	45											

表-1.14 ステンレス鋼熱影響部の孔食発生状況
(μm)

位 置	No	2C1	2C2
クラッド鋼熱影響部	1	42	21
	2	29	21
	3	29	20
	4	25	20
	5	23	18
	6	22	18
	7	21	17
	8	20	15
	9	19	14
	10	18	12
	11	17	12
	12	16	12
	13	16	12
	14	16	12
	15	15	11
	16	15	
	17	15	
	18	13	
	19	13	
	20	13	
	21	13	
	22	13	
	23	12	
	24	12	
	25	12	
	26	12	
	27	11	
	28	11	
	29	11	
	30	10	

表-1.15 溶接部の最大孔食深さ及び孔食の数（溶接部）

項 目	1S8	1S	10	2S	20	2C1	2C2	2C3	OT
最大孔食深さ (μm)	33	21	45	19	29	50	53	21	32
深さ10 μm 以上の 孔食の数	5	9	15	10	12	17	9	7	16
深さ20 μm 以上の 孔食の数	2	1	2	0	4	7	2	1	2

1.5 不適切な条件で溶接した溶接部の耐食性

ステンレスクラッド鋼を現場などで不適切な条件で溶接した場合の溶接部の耐食性に関する試験を行った。

1.5.1 供試材料

ステンレスクラッド鋼は、1.1.1 と同じものを使用した。溶接材料は、D4316 (JIS Z3211 軟鋼用被覆アーク溶接棒)、D309 (JIS Z 3221 ステンレス鋼被覆アーク溶接棒) 及び D308 (JIS Z 3221 ステンレス鋼被覆アーク溶接棒) を使用した。溶接材料の化学成分組成を表-1.16に示す。

表-1.16 溶接材料の種類及びの化学成分 (%)

溶接材料	棒 径	C	S i	M n	P	S	C r	N i
D 4 3 1 6	3.2 mm	0.08	0.49	0.71	0.008	0.004	—	—
	4.0 mm	0.08	0.52	0.72	0.012	0.005	—	—
	5.0 mm	0.09	0.56	0.82	0.015	0.004	—	—
D 3 0 9	3.2 mm	0.069	0.43	1.98	0.025	0.010	24.58	12.68
	4.0 mm	0.067	0.49	1.97	0.026	0.011	24.70	12.51
	5.0 mm	0.062	0.45	2.22	0.023	0.023	24.02	12.58
D 3 0 8	3.2 mm	0.068	0.42	1.40	0.027	0.013	19.82	9.72
	4.0 mm	0.052	0.40	1.44	0.026	0.008	20.14	9.58
	5.0 mm	0.059	0.44	1.38	0.032	0.010	19.40	9.78

1.5.2 試験片の製作

試験片の製作条件を以下に示す。

- ①ステンレス鋼側の裏掘りをアークエアガウジングで行い、酸化スケール等が開先面に付着している状態で溶接した場合 (G 1, G 2)
- ②吸湿した溶接棒で溶接した場合 (D 1 W, D 2 W)
- ③機械油が付着した溶接棒で溶接した場合 (D 1 O, D 2 O)
- ④過大電流で溶接した場合 (H 1, H 2)
- ⑤ステンレス側の溶接部を 1 mm 及び 2 mm 削除し、合せ材 (SUS304≒2.5mm) を減肉させた場合 (C 1, C 2)
- ⑥開先合せに 2 mm の目違いがある試験板を、溶接姿勢下向、立向及び上向で溶接した後、ビ

ード表面及び合せ材を削除して平滑に仕上げた場合（B 1， B 2， B 3）

平滑に仕上げた試験片は、写真－1.7 に示すように、左側の合せ材は0.5mm 程度しか残っていない。

試験片の種類と試験項目を表－1.17に示す。試験片の採取要領及び寸法を図－1.7 に、試験片の寸法と測定位置を図－1.8 に示す。試験片の溶接条件を表－1.18に示す。

1.5.3 溶接部に関する試験

(1) 溶接部のフェライト量

溶接金属のフェライト量は、1.2.1 溶接部のフェライト量と同様に計測した。表－1.19に化学成分より求めた値とフェライトスコープにより測定した値を示す。両方法とも値に大差はなかった。

①D309 の1層盛は、高クロム側にあり、フェライト量は10%程度で、問題のない値であった。（G 1・D 1W・D 1O）

②D309 +D308 の2層盛は、6%程度のフェライト量を示し問題のない値であった。（G 2・D 2W・D 2O・B 1～3）

③過大電流によるD309 の1層盛は、フェライト量が5%程度（標準≒10%）に減少するが問題はない値であった。（H 1）

④D308の1層盛では、フェライト量が0%程度であり耐食性に懸念がある。（H 2）

(2) 溶接部の化学成分

合せ材側のステンレス溶接金属から分析試料を採取し、化学成分分析を行った。

①溶接管理の不具合等により、炭素（ガウジングのカーボン電極）や硫黄（油や塗料）等の不純物が溶接金属へ混入する懸念があるが、平均的に分析試料を採取する今回の方法では異常な値は認められなかった。（G 1・G 2・D 1W・D 2W・D 1O・D 2O）

②溶接条件の不具合により、過大電流で1層盛を行った場合、鉄による希釈が多くなり、ステンレス鋼の主成分であるクロム、ニッケル量が低くなった。D308 の1層盛（H 2）では、クロム、ニッケル量が規格値以下であり、D308 の普通鋼への直接盛は問題がある。

(3) 溶接部の側曲げ試験

JIS Z 3122の3号試験片により、側曲げ試験を行い、曲げた試験片に3mm以上の割れのないものを合格とした。

JIS Z 3122の3号試験片（9 t）により側曲げ試験を行った。

試験結果を表－1.20に示す。試験片外観写真のG 2－1に開口欠陥が認められたが、全て

の試験片は判定基準を満足し合格であった。試験片は、放射線透過検査を行って溶接欠陥の少ない所から採取したものである。試験片の表面及びその近傍に欠陥が存在しなければ今回程度の条件での曲げ延性に問題はないことが明らかとなった。

(4) 溶接部の硬さ試験

図-1.8 に示す測定位置について、溶接部の硬さ試験をビッカース硬さ計 (JIS Z 2244) で荷重10kgを用いて測定した。

SUS304クラッド鋼溶接部の硬さ測定結果を図-1.9(1)~1.9(7)に示す。

硬さに及ぼす各種溶接施工法の影響は認められず、全試験片ともSUS304の合せ材がHV240程度と最も高く、次に普通鋼溶接金属でHV180程度、ステンレス鋼溶接金属が最も低くHV150程度であり異常な硬さは認められなかった。

ステンレスクラッド鋼の溶接施工において生じやすい不具合を防ぐための留意事項を以下に示す。

①アークエアガウジングのままで溶接すると、融合不良が発生しやすくなる。したがって、ガウジング面は金属光沢が出るまで、グラインダー等で研磨した後溶接することが望ましい。

②溶接棒が吸湿したままで溶接するとブローホールが多発する。したがって、溶接棒は所定の乾燥条件 (通常200~250℃ 1時間) で乾燥し、溶接するまで吸湿しないように保管したものを使用すべきである。

③溶接棒や開先部に油が付着すると、ブローホールが発生しやすくなるので、油が付着しないよう取扱いに注意するとともに、開先部等に油が付着した場合は有機溶剤で除去し清浄な状態にしてから溶接すべきである。

④ステンレス鋼側の溶接をD308 で1層盛した場合、溶け込み率が大きくなると普通鋼の希釈により、フェライト量が0%程度になることと、クロム、ニッケル量が規格値 (SUS304) 以下になる懸念があり、溶接割れの発生や耐食性の劣化も懸念されるので、普通鋼に溶け込む部分の溶接には、クロム、ニッケル量の多いD309 の使用が適当である。

⑤溶接姿勢の違いによる溶接欠陥の発生傾向は、溶接姿勢下向が最も低く、立向、上向の順に高くなる傾向にある。したがって、できるだけ下向で溶接できるように治工具を考案し実施することが望ましい。

⑥ステンレスクラッド鋼の合せ材 (SUS304) 及び溶接金属の減肉の影響としては、耐食性が要求される合せ材及び合せ材側の溶接金属を減肉すると、有効肉厚が減るだけでなく、耐食

性の劣る初層の溶接金属を露出させる危険性があり、できるだけ減肉処理は避けることが望ましい。

(5) 溶接部の断面マクロ及び顕微鏡組織

溶接部の微小欠陥、組織変化等を倍率100倍の顕微鏡で組織観察した。

SUS304クラッド鋼溶接部のマクロ及び顕微鏡組織を写真-1.8(1)~1.8(7)に示す。アークエアガウジングのままでD309により1層盛で仕上げた溶接部に非金属介在物と判断される黒くエッチされた部分が多く認められた。それ以外の試験片には異常組織は認められなかった。

(6) 溶接部の放射線透過検査

溶接部の放射線透過検査は、JIS Z 3106ステンレス鋼溶接部の放射線透過試験方法に準拠して行った。放射線透過検査は、東芝EX-260GHを用い、管電圧170kVP、管電流5mA、焦点の大きさを 2×2 mm、線源透過度計間距離を800mmで行った。

透過写真の等級分類は、表-1.21に基づいて欠陥点数がもっとも大きくなる 10×10 mmの視野で判定した。

溶接欠陥発生傾向をJIS Z 3106に基づいて調査した結果を表-1.22に示す。

①アークエアガウジング面の熱影響部の酸化スケール等を除去（グラインダー等）しないで溶接したものは、2種欠陥（細長い）が多発し3~4級であった。この原因は酸化スケール等が溶接金属の母材へのなじみを悪くし、融合不良状の欠陥が母材との境界部に発生したものと判断される。

②溶接棒が吸湿した場合と油が付着した場合には、ブローホールが多発し、吸湿の場合で2~3級、油の場合で3~4級であった。ブローホールの生成原因は、溶接金属中のガス成分と量でさまる。吸湿は水素を増し、油は炭素、酸素、水素を含む化合物であるため、溶接金属中の水素や酸素が増しブローホール発生の原因となる。

③過大溶接電流として推奨値(150~220A)より30A高い溶接電流(250A)で施工したが、平均して2級程度であった。

④試験板Bシリーズは、開先合せ不良の状態、溶接姿勢下向、立向及び上向で施工したものであり、下向では1種の1級と3級、立向では1種の2級と3級、上向では1種3級と2種4級であった。溶接欠陥の発生傾向は、溶接姿勢下向が最も低く、立向、上向の順に高くなる傾向を示している。

⑤試験板Cシリーズの溶接条件は、標準的な条件であり、1種2級程度が得られている。

表-1.17 試験板の種類と試験項目

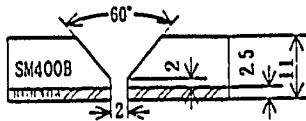
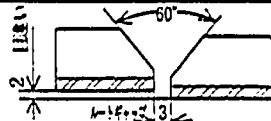
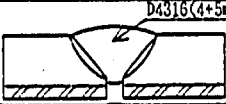
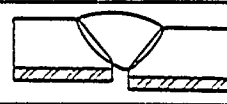
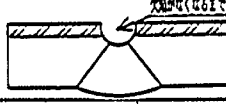
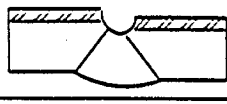
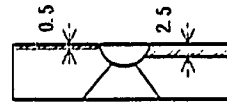
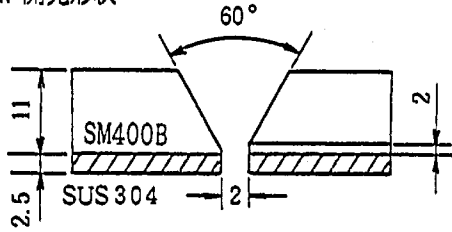
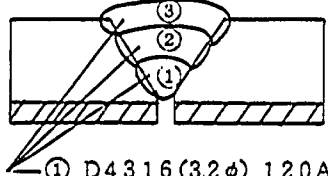
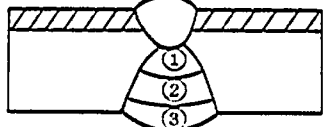
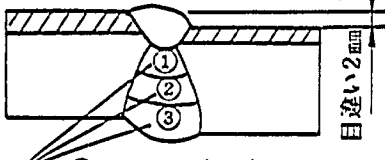
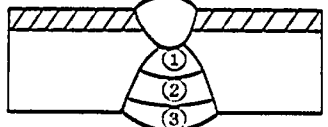
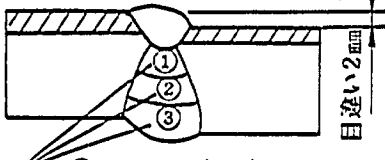
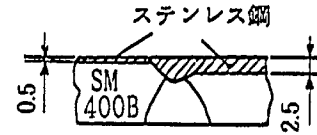
試験板		記号	G 1	G 2	D 1	D 2	H 1	H 2	C 1	C 2	B 1	B 2	B 3
		目的	アークエタリングの影響		溶接欠陥の影響		過大溶込みの影響		ビード削除の影響		開先合せ不良の影響		
溶接開先													
溶接順序	1												
	2												
	3	 D309-1層盛	 D309+D308 2層盛	 D309-1層盛	 D309+D308 2層盛	 D309-1層盛	 D308-1層盛	 D309-1層盛	 D309-1層盛	 D309+D309 2層盛			
溶接姿勢		下向	下向	下向	下向	下向	下向	下向	下向	下向	下向	立向	上向
試験項目	側曲げ試験	○	○	—	—	○	○	—	—	○	○	○	
	マクロ・ミクロ	○	○	—	—	○	○	—	—	○	○	○	
	硬さ	○	○	—	—	○	○	—	—	—	—	—	
	成分分析	○	○	—	—	○	○	—	—	—	—	—	
	フェライト量測定	○	○	—	—	○	○	—	—	—	—	—	
	腐食 A	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	腐食 B	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
備考		アークエタリングにより裏面を溶かす電極の位置を調整する。通常はグラインダーで研磨する。		吸湿棒を用いた溶接欠陥の調査。		通常溶込みの割合を50%とし、溶接条件を規定する。		1層盛で溶接した試験板を用いて、溶接欠陥の調査を行う。		開先合せ不良の状態として、合の厚さを2.5mmに設定し、これを腐食試験片に加工する。			
													

表-1.18 溶 接 条 件

試験板 記 号	開先形状・溶接順序 ・普通鋼側の溶接条件	ステンレス鋼側の溶接条件					裏掘り	狙 い 及 び 説 明	
		積 層	溶接棒 (mmφ)	電流 (A)	速 度 (mm/分)	バース間温度 (℃)			
G 1	1. 開先形状  2. 普通鋼側の溶接  ① D4316 (3.2φ) 120A ② " (4φ) 175 ③ " (5φ) 220 3. 裏掘り 4. ステンレス鋼側の溶接  ステンレス鋼の溶接条件は 右の通り ステンレス鋼の溶接条件は 右の通り  ① D4316 (4φ) 150A ② D4316 (4φ) 175 ③ D4316 (5φ) 220	1層盛 (下向)	D309 (5)	220	130~140	150 以下	アーケエ アガウ ジ ン グ の ま ま	裏掘りをアーケエアーガウジングにより 施工し、そのまま溶接した。 カーボン電極の炭素が開先面に付着する が、その影響を調べる。	
G 2		2層盛 (下向)	D309 (4) D308 (4)	160 160	180~200 190~210				
D 1 W		1層盛 (下向)	D309 (5)	230	130~140		アーケエ アガウ ジ ン グ 後 グ ラ イ ン ダ で 金 属 面 が 出 る ま で 研 磨	Dシリーズは溶接欠陥を発生させ、その 欠陥と耐食性の関係を調べる。Wは水に 溶接棒を浸し欠陥発生を狙った。	
D 2 W		2層盛 (下向)	D309 (4) D308 (4)	160 160	180~200 190~210				
D 1 O		1層盛 (下向)	D309 (5)	230	130~140			溶接棒を機械油に浸し、溶接欠陥の発生 を狙った。	
D 2 O		2層盛 (下向)	D309 (4) D308 (4)	160 160	180~200 190~210				
H 1		3. 裏掘り	1層盛 (下向)	D4316 (3.2) D309 (5)	120 250		210~230 170~190	Hシリーズは過大 溶込みを狙った。 軟鋼棒にて下盛し、 ステンレスは1層 盛。	 D4316下盛 — ステンレス棒 1層盛
H 2			1層盛 (下向)	D4316 (3.2) D308 (5)	120 250		210~230 170~190		
C 1			1層盛 (下向)	D4316 (3.2) D309 (5)	120 220		210~230 120~140	1mm	Cシリーズはステンレス 表面を1と2mm削除し、 耐食性を調べる。
C 2			2層盛 (立向)	D309 (3.2) D308 (3.2)	120 110		70~90 70~90	2mm	
B 1		ステンレス鋼の溶接条件は 右の通り  目違い2mm	2層盛 (下向)	D309 (4) D308 (4)	160 160		180~200 190~210	開先合せ不良の状態を想定し、2mmの目 違いを設けた。試験片は加工すると下図 のごとくなる。	
B 2			2層盛 (立向)	D309 (3.2) D308 (3.2)	120 110		70~90 70~90		
B 3			2層盛 (上向)	D309 (3.2) D308 (3.2)	120 120		70~90 70~90		
 ステンレス鋼 SM 400B									

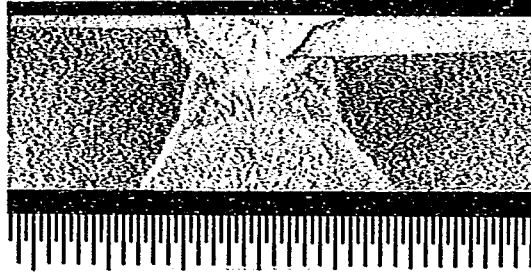


写真-1.7 Bシリーズ試験板の断面状態

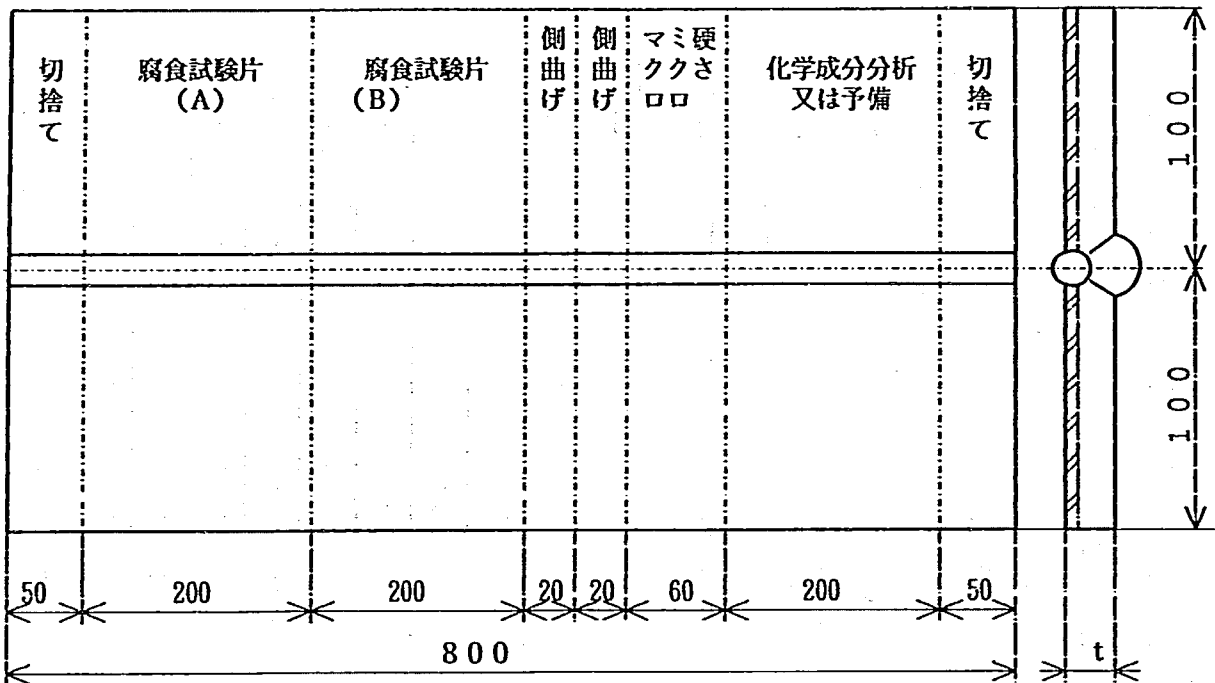
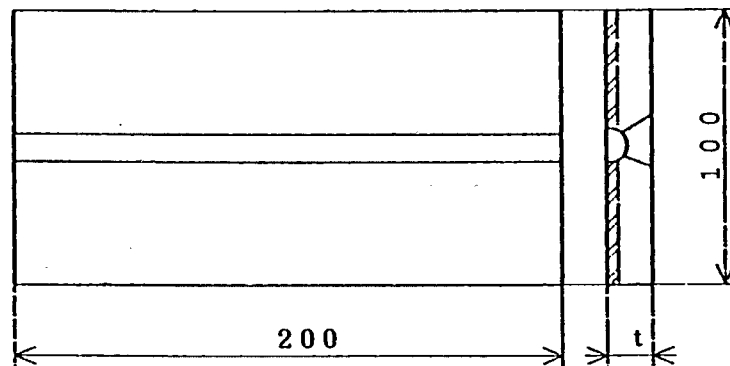
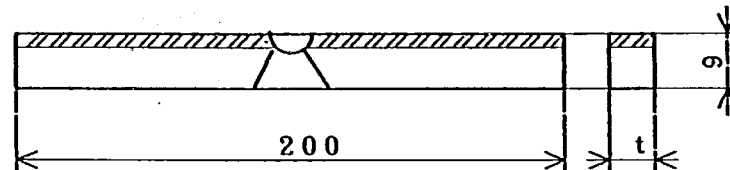


図-1.7 溶接試験板寸法及び試験片採取位置 (11組+予備2=14組)

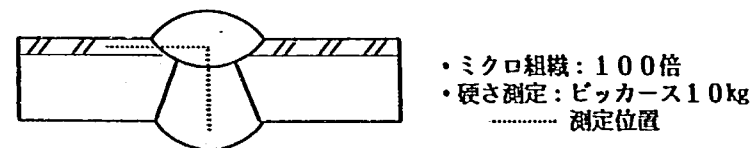
a) 腐食試験片



b) 側曲げ試験片



c) マクロ・ミクロ
硬さ試験片



d) 分析試料採取位置

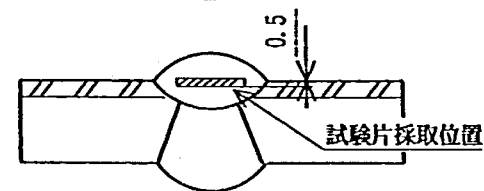
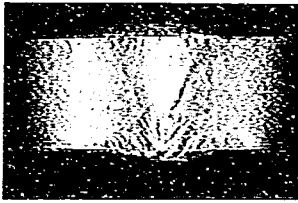
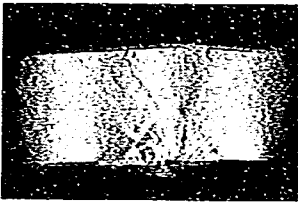
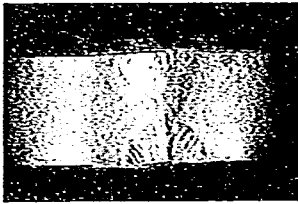
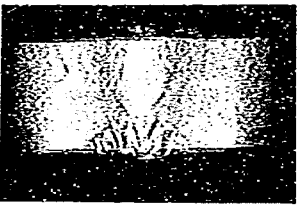
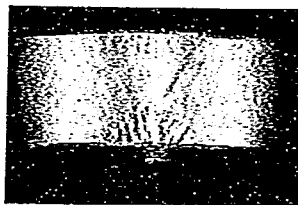
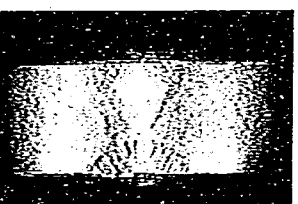
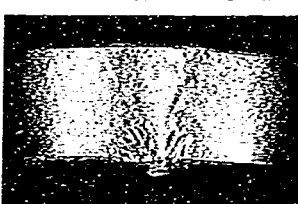
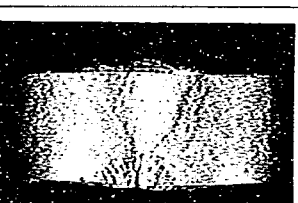
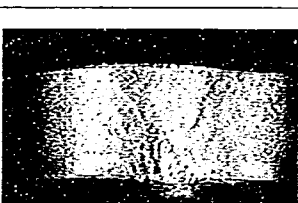
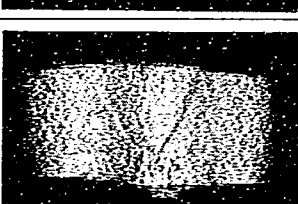
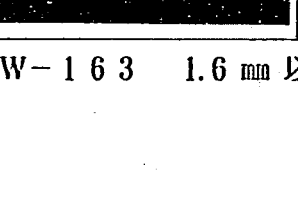
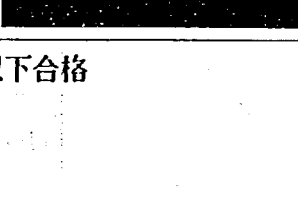


図-1.8 試験片寸法及び測定位置

表-1.19 フェライト量計測結果

試験板記号	フェライト量, (%)	
	化学成分より求めた値	フェライトスコープにより計測
G 1	8	10~13
G 2	7	8~10
D1W	10	10~13
D2W	5	8~10
D1O	13	10~13
D2O	6	8~10
H 1	5	6~9
H 2	0	1~2
B 1	5	6~9
B 2	6	6~9
B 3	5	8~10
規格値 D308	—	—
規格 SUS304	—	—

表-1.20 側曲げ試験結果

試 験 片		欠陥の数と大きさ	(注) 判 定	曲 げ 後 の 試 験 片 外 観	
				1	2
G 1	1	0	合 格		
	2	0	合 格		
G 2	1	1.4 mm × 1個 0.5 mm × 1個	合 格		
	2	0	合 格		
H 1	1	0	合 格		
	2	0	合 格		
H 2	1	0	合 格		
	2	0	合 格		
B 1	1	0	合 格		
	2	0	合 格		
B 2	1	0.2 mm × 1個	合 格		
	2	0	合 格		
B 3	1	0	合 格		
	2	0	合 格		

(注) 判定基準 : ASME Sec. IX QW-163 1.6 mm 以下合格

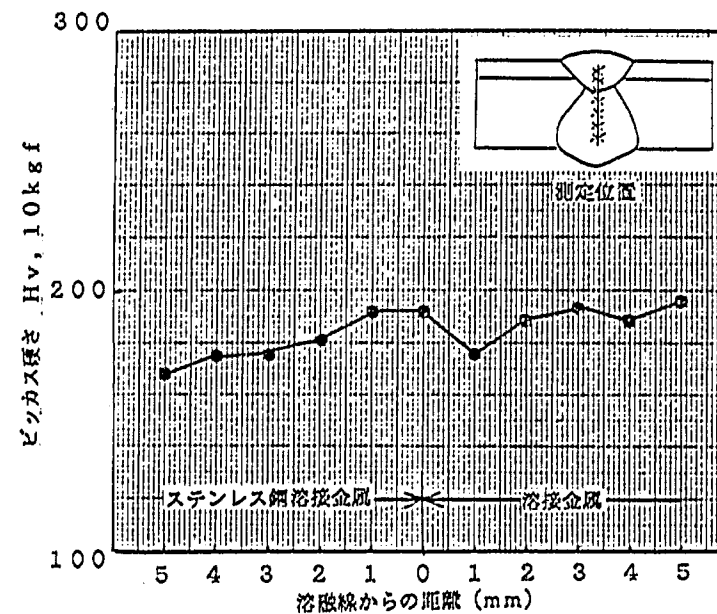
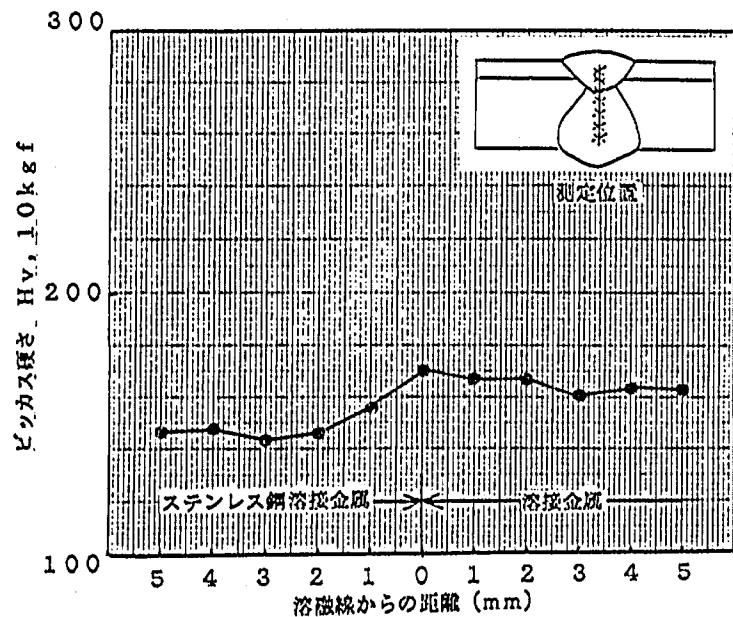
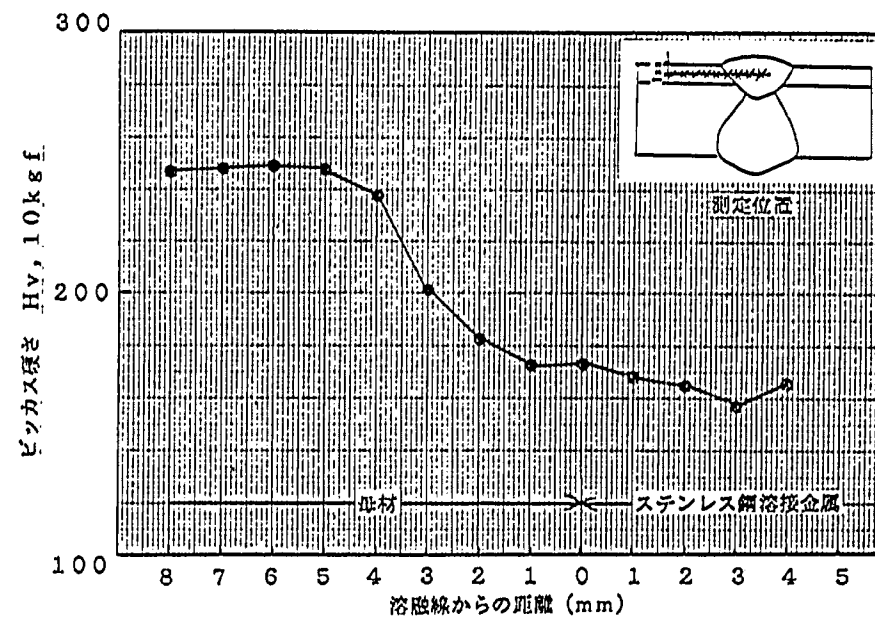
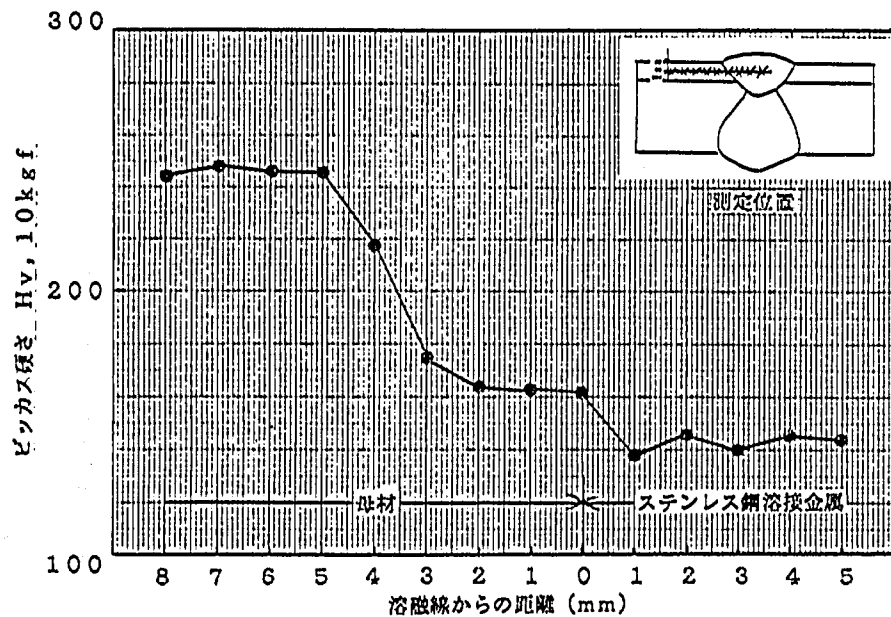


図-1.9 (1) 溶接部の硬さ分布 (G1)

図-1.9 (2) 溶接部の硬さ分布 (G2)

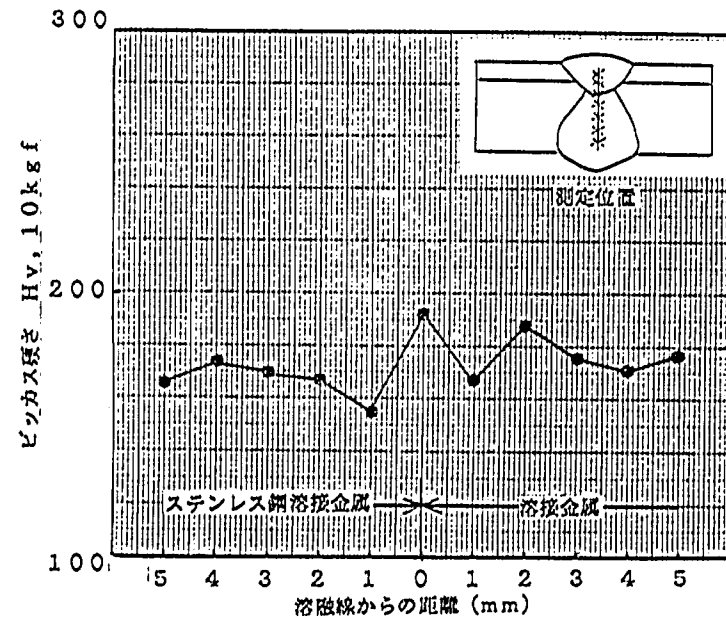
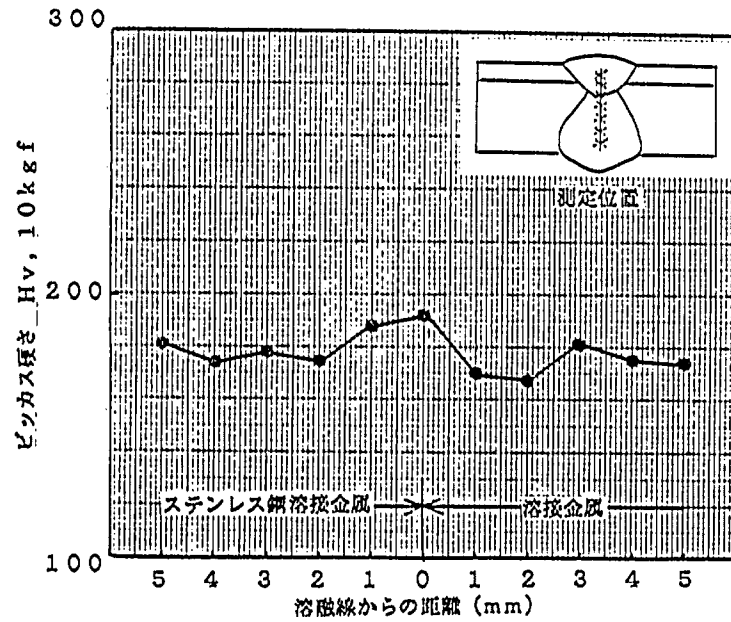
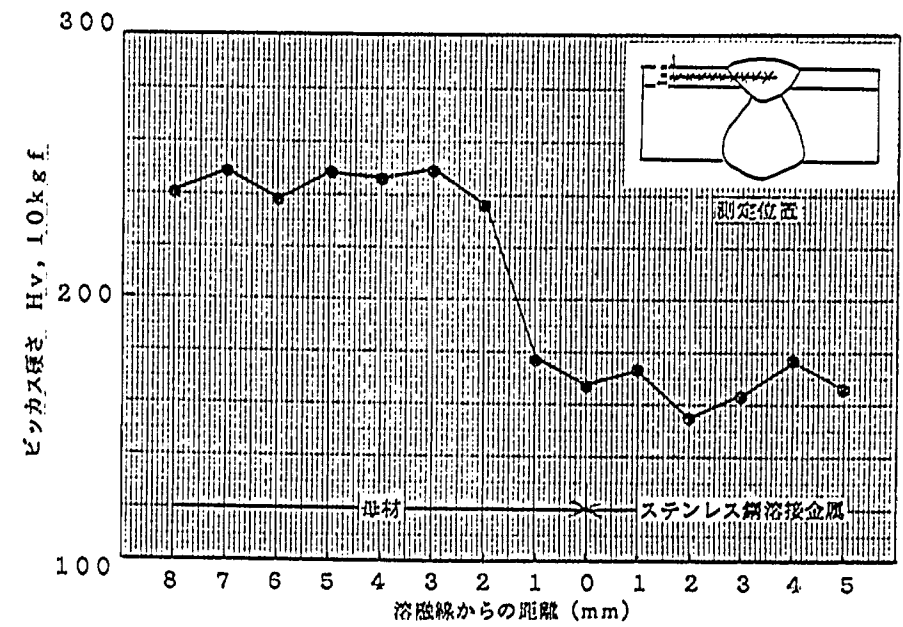
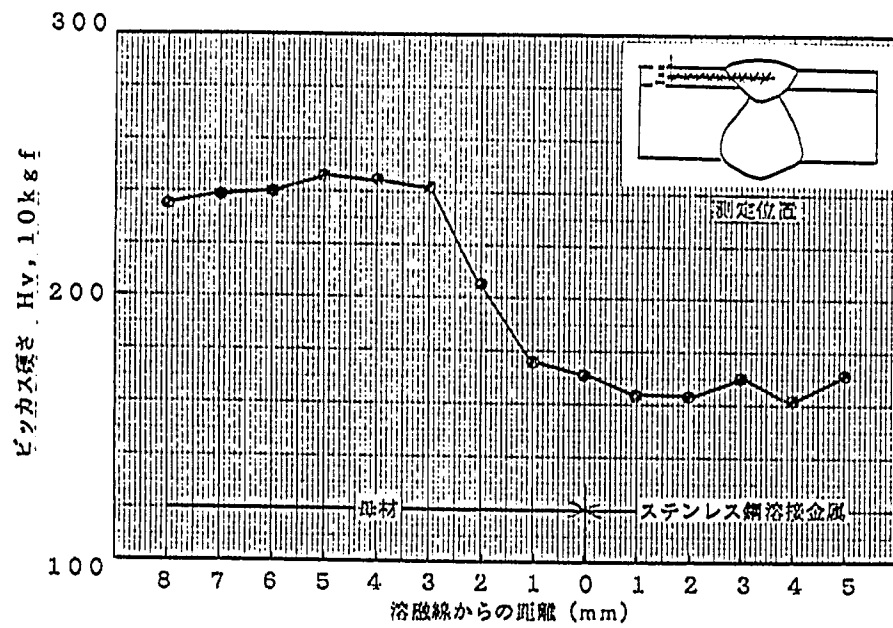


図-1.9 (3) 溶接部の硬さ分布 (H 1)

図-1.9 (4) 溶接部の硬さ分布 (H 2)

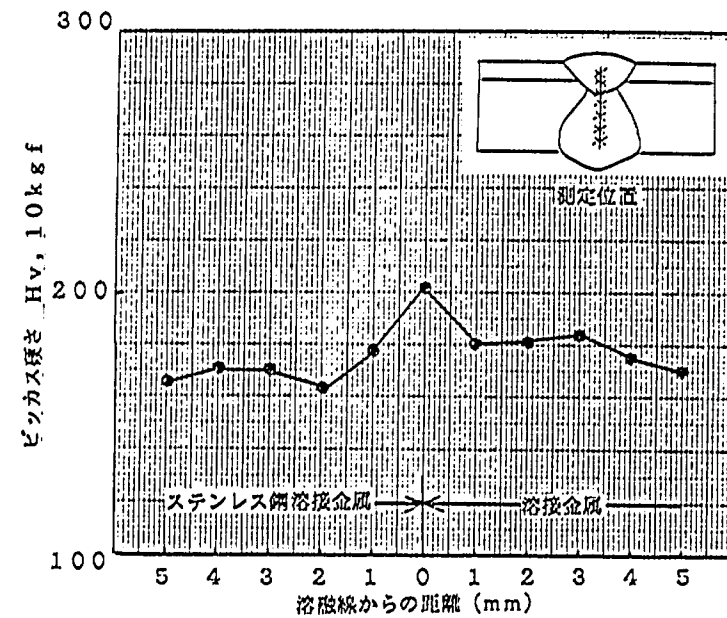
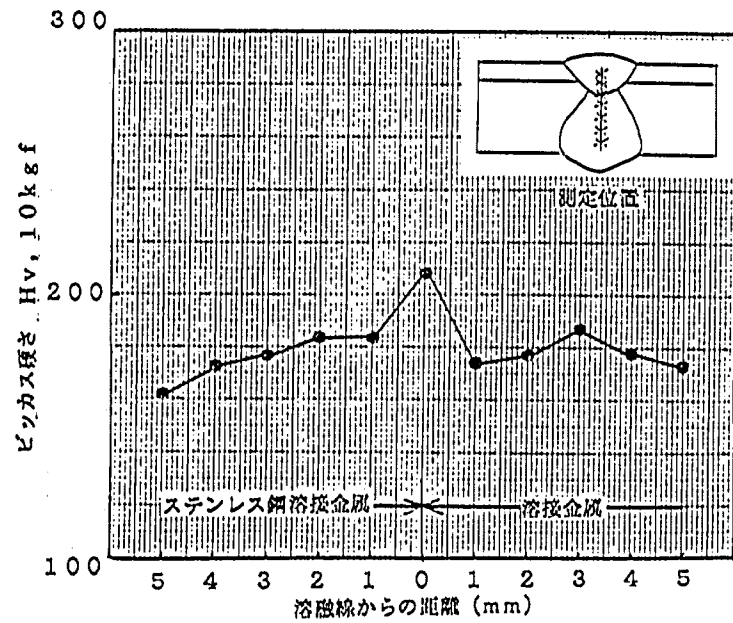
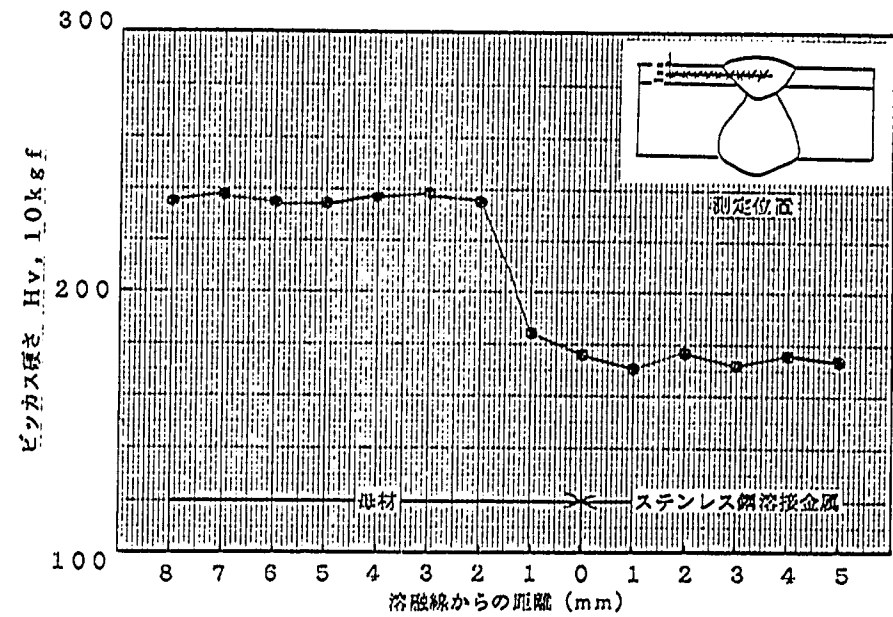
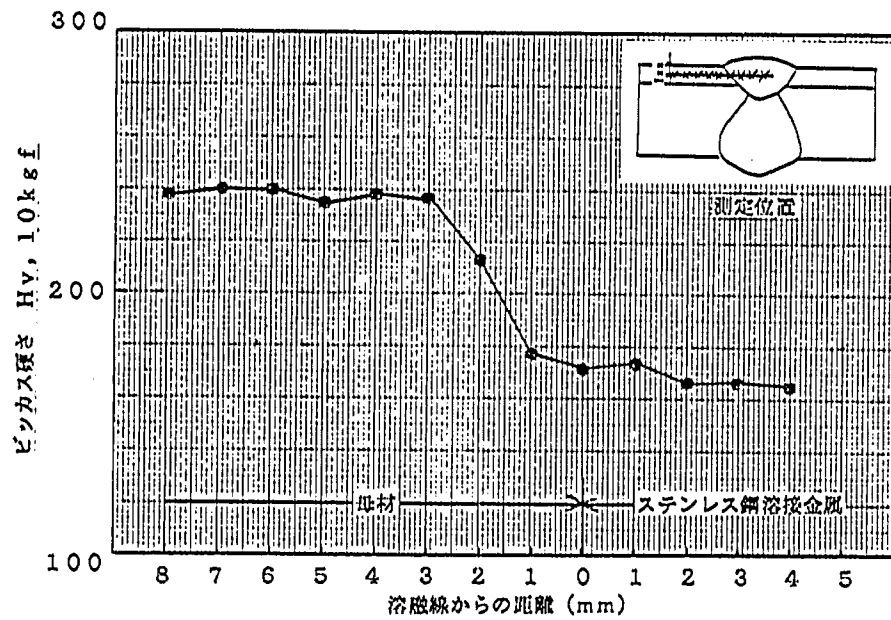


図-1.9 (5) 溶接部の硬さ分布 (B1)

図-1.9 (6) 溶接部の硬さ分布 (B2)

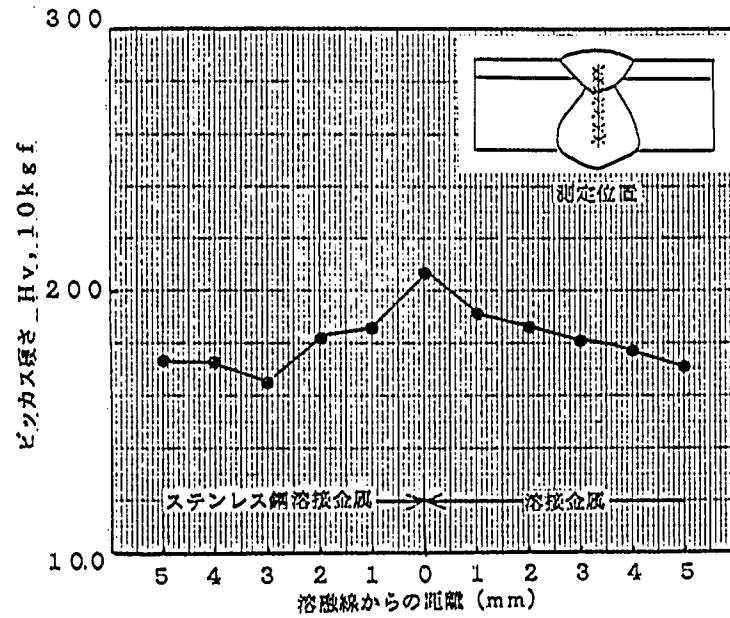
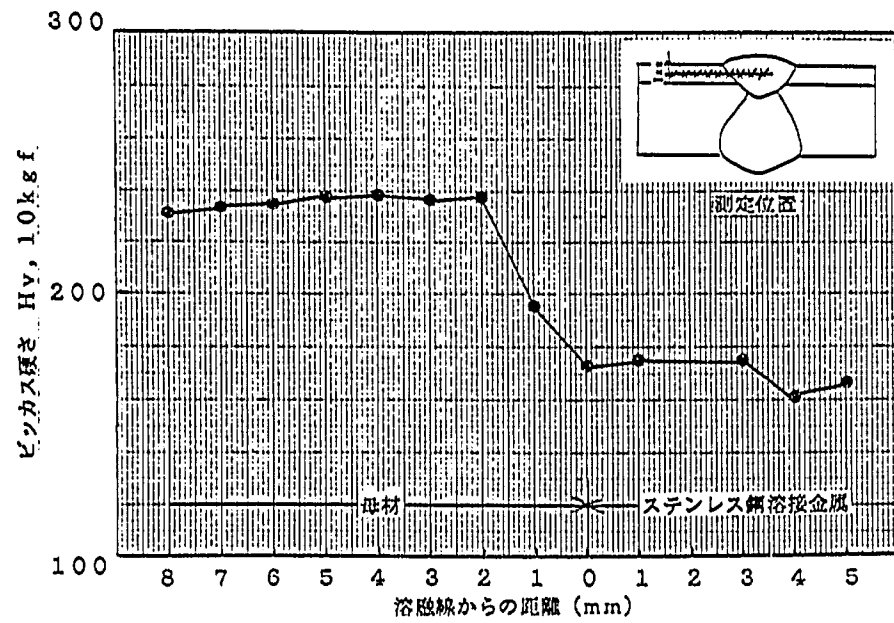
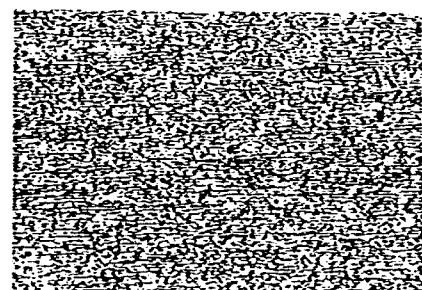
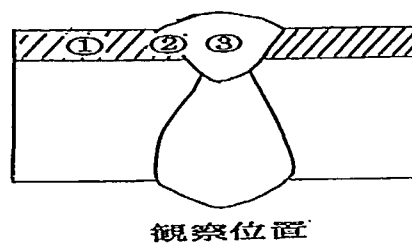
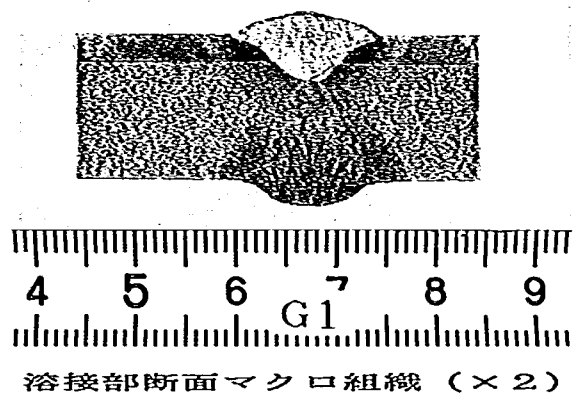
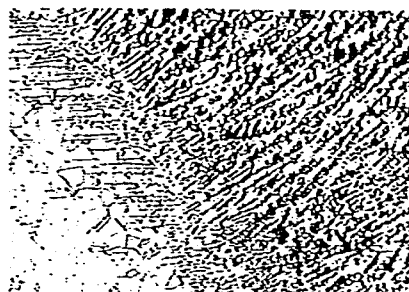


図-1.9 (7) 溶接部の硬さ分布 (B3)



×100

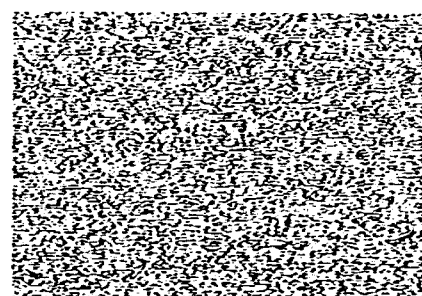
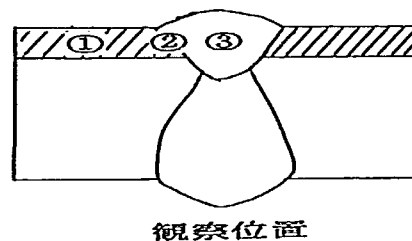
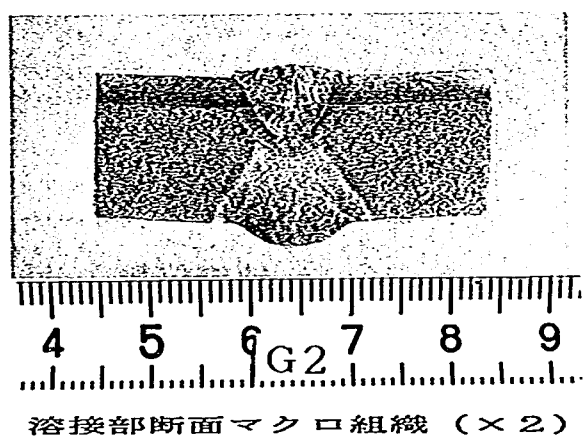


×100



×100

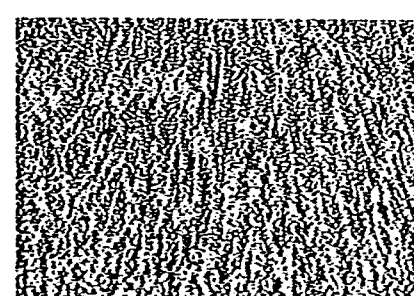
写真-1.8 (1) 溶接部断面マクロ及び顕微鏡組織観察 (G 1)



×100

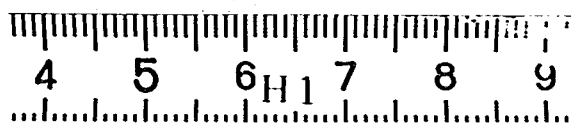
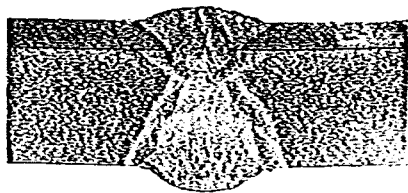


×100

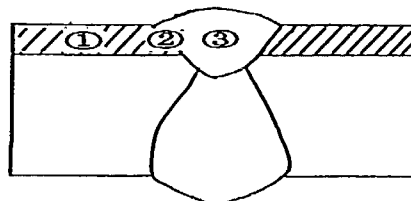


×100

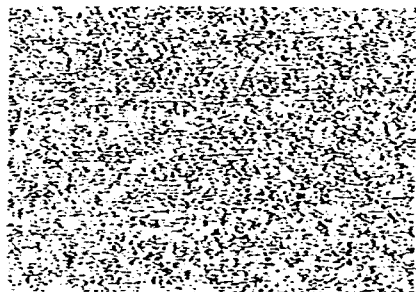
写真-1.8 (2) 溶接部断面マクロ及び顕微鏡組織観察 (G 2)



溶接部断面マクロ組織 (×2)



観察位置



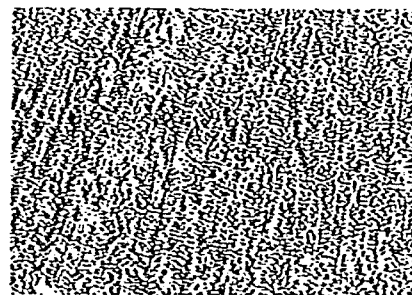
観察位置: ①

×100



観察位置: ②

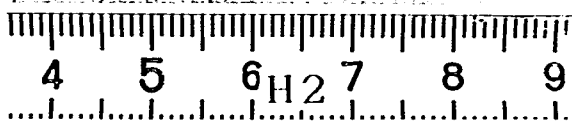
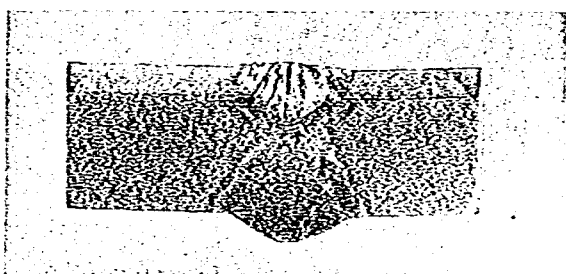
×100



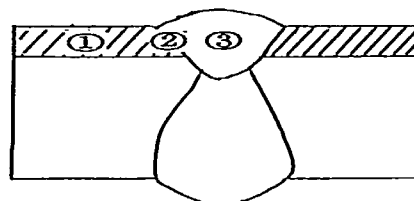
観察位置: ③

×100

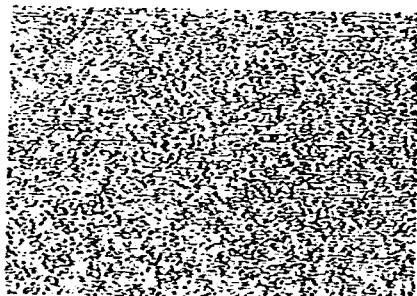
写真-1.8 (3) 溶接部断面マクロ及び顕微鏡組織観察 (H1)



溶接部断面マクロ組織 (×2)



観察位置



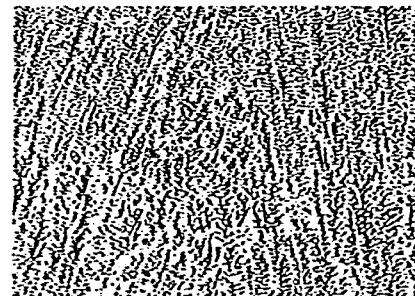
観察位置: ①

×100



観察位置: ②

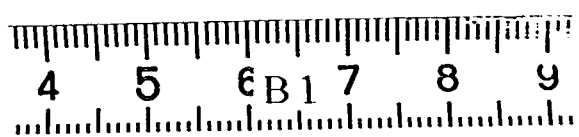
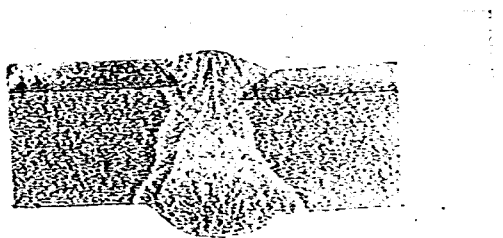
×100



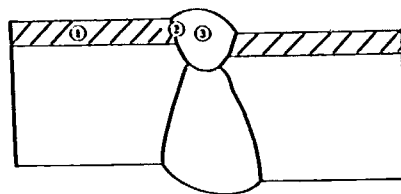
観察位置: ③

×100

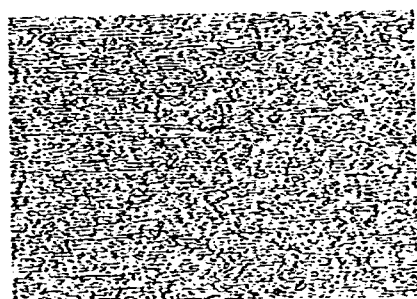
写真-1.8 (4) 溶接部断面マクロ及び顕微鏡組織観察 (H2)



溶接部断面マクロ組織 (×2)



観察位置



観察位置: ①

×100



観察位置: ②

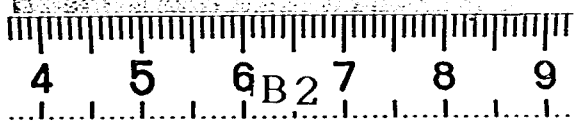
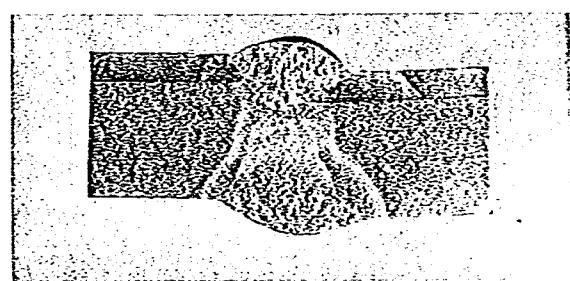
×100



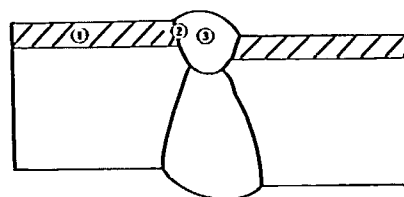
観察位置: ③

×100

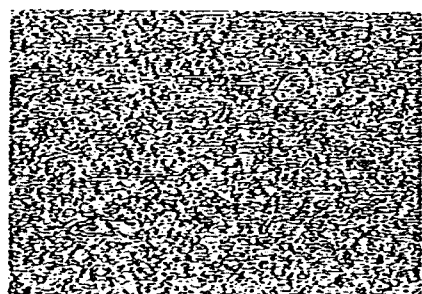
写真-1.8 (5) 溶接部断面マクロ及び顕微鏡組織観察 (B1)



溶接部断面マクロ組織 (×2)

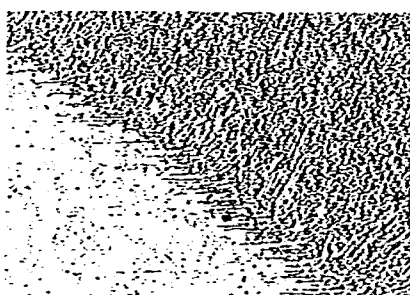


観察位置



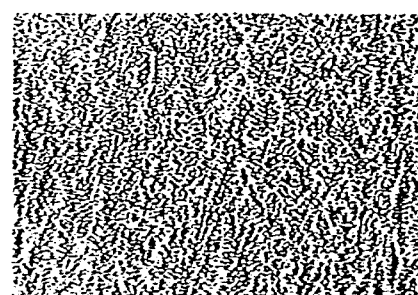
観察位置: ①

×100



観察位置: ②

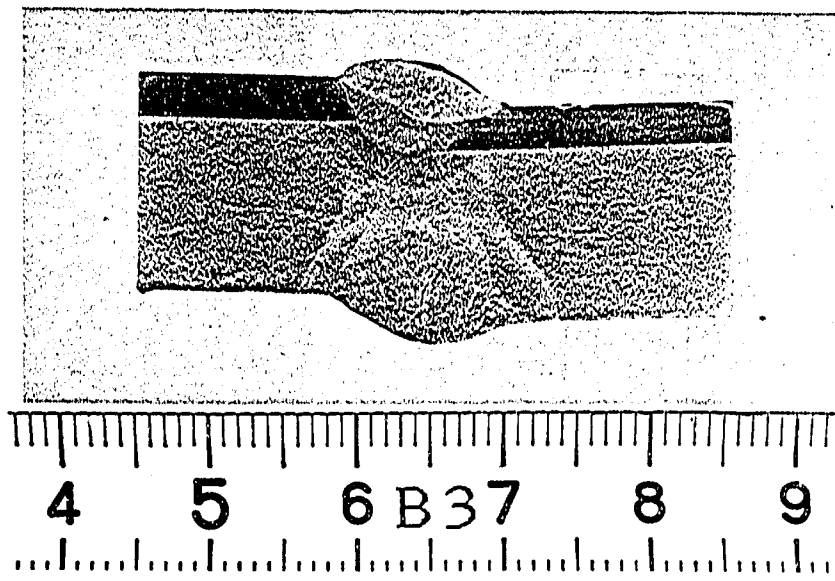
×100



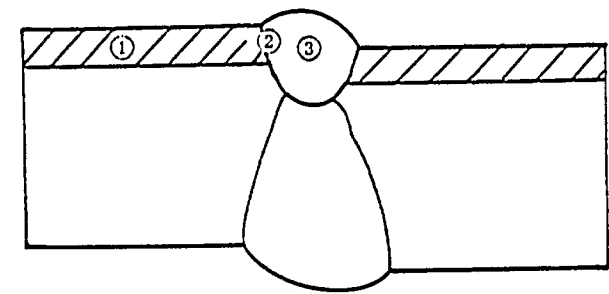
観察位置: ③

×100

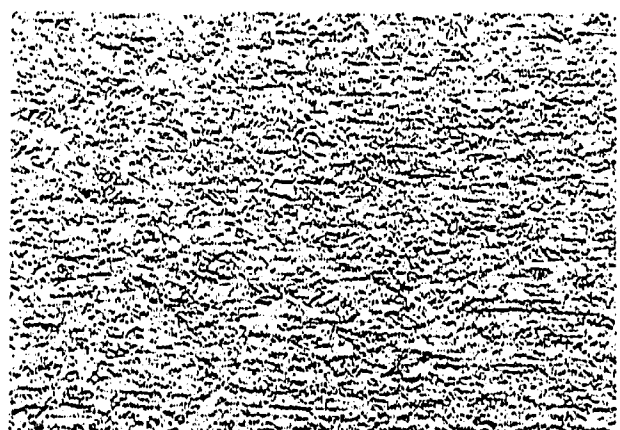
写真-1.8 (6) 溶接部断面マクロ及び顕微鏡組織観察 (B2)



溶接部断面マクロ組織 (×2)

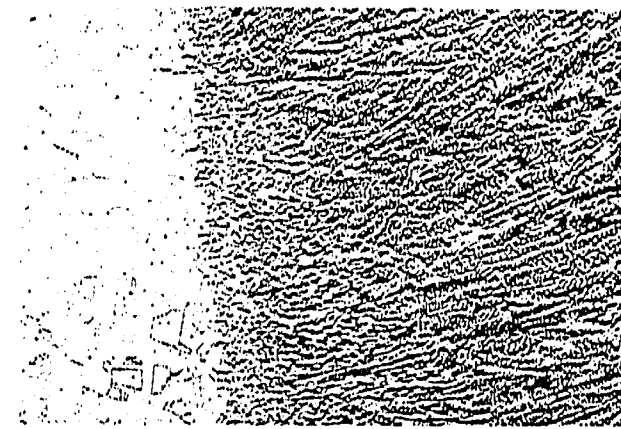


観察位置



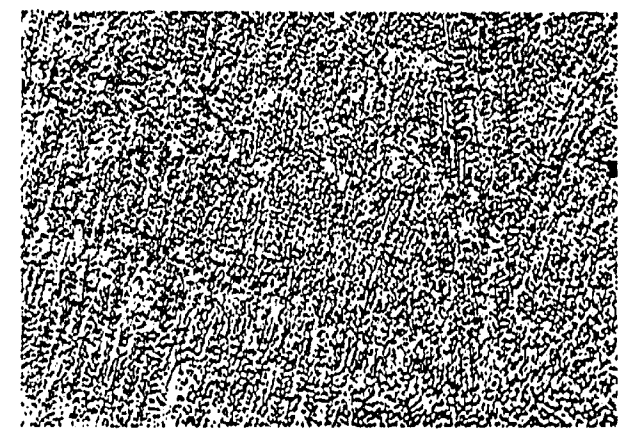
観察位置：①

×100



観察位置：②

×100



観察位置：③

×100

写真-1.8 (7) 溶接部断面マクロ及び顕微鏡組織観察 (B 3)

表-1.21 板厚12.5mmのSUS304クラッド鋼の等級分類

等級 \ 欠陥の種類	1種と4種	2種 (mm)	3種
1級	2点以下	板厚の1/4以下 (3以下)	欠陥の大きさに 関係なく全て 4級
2級	6	”の1/3以下 (4 ”)	
3級	12	”の1/2以下 (6 ”)	
4級	欠陥が3級より多いもの		

注1) 欠陥の種類 1種:ブローホール及びこれに類する丸みを帯びた欠陥

2種:細長いスラグ巻込み及びこれに類する欠陥

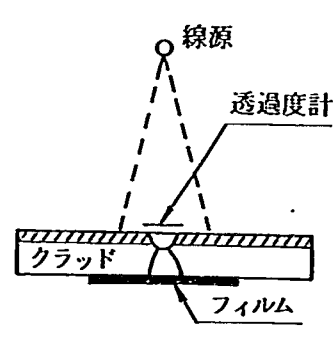
3種:割れ及びこれに類する欠陥

4種:タングステン巻込み

注2) 欠陥の長径と点数(1種欠陥)

欠陥の長径 (mm)	1.0以下	1.0をこえ 2.0以下	2.0をこえ 3.0以下	3.0をこえ 4.0以下	4.0をこえ 6.0以下	6.0をこえ 8.0以下
点数	1	2	3	6	10	15

表-1.22 腐食試験板溶接部の放射線透過検査結果

試験板記号		狙い	ステンレス側の溶接	検査結果	検査方法
G 1	A	ガウジングの影響	D 3 0 9	2種-4級	・ J I S Z 3 1 0 6 ステンレス鋼溶接部の放射線透過試験方法による。 ・ 検査条件 装置：東芝E×260GH 使用管電圧：170KVP 使用管電流：5mA 焦点の大きさ：2×2mm 線源透過度計間 距離：800mm 
	B		(1層盛)	1-3	
G 2	A		D 3 0 9 + D 3 0 8	2-4	
	B		(2層盛)	2-4	
D 1 W (吸 湿)	A	溶接棒の吸湿・吸油の影響	D 3 0 9	1-3	
	B		(1層盛)	1-3	
D 2 W (吸 湿)	A		D 3 0 9 + D 3 0 8	1-2	
	B		(2層盛)	1-3	
D 1 O (機械油が付着)	A		D 3 0 9	1-4	
	B		(1層盛)	1-4	
D 2 O (機械油が付着)	A		D 3 0 9 + D 3 0 8	1-3	
	B		(2層盛)	1-3	
H 1	A	過大電流	D 3 0 9	1-2	・ 欠陥の種類 1種：フローホール及び丸みを帯びた欠陥 2種：細長いスラグ巻込み及びこれに類する欠陥 3種：割れに及びこれに類する欠陥 4種：タングステン巻込み
	B		(1層盛)	1-2	
H 2	A		D 3 0 9	1-3	
	B		(1層盛)	1-1	
C 1 (1mm削除)	A	ビード減厚	D 3 0 9 (1層盛)	1-2	
	B			1-2	
C 2 (2mm削除)	A			1-3	
	B			1-1	
B 1 (下 向)	A	開先合せ不良	D 3 0 9 + D 3 0 8 (2層盛)	1-3	
	B			1-1	
B 2 (立 向)	A			1-3	
	B			1-2	
B 3 (上 向)	A			1-3	
	B			2-4	

1.5.4 溶接部の耐食性試験

(1) 淡水浸漬試験

1) 試験方法

試験片は、表-1.17に示す11種類の試験板について 1.5.2と同様に製作し、試験条件も同様とした。

D1AW, D2AW及びD1AO, D2AOに溶接欠陥が生じていた。

試験はA槽(1S8, 2S, 10, 2S, OT, BT計7枚)とB槽(2C1, 2C2, 2C3, B2計4枚)の2槽に分けて行った。試験溶液は1ヶ月毎に新しい溶液と交換した。

2) 試験結果

1ヶ月後のGA2, DA1, D1AO, C1A, C2A及びB3Aの溶接金属に、それぞれ赤さびが発生した。

特に、C2Aに赤さびの発生が著しかった。その他のクラッド鋼には、孔食及び赤さびの発生は認められなかった。

2ヶ月後は、1ヶ月後の結果とほぼ同様であった。

3ヶ月後の試験片の外観を写真-1.9に示す。また、3ヶ月後の腐食状況を表-1.23に示す。

3ヶ月後の結果は、2ヶ月後の結果とほぼ同じであった。しかし、C2Aに孔食が進行していた。この孔食の断面マクロ観察の結果を写真-1.10に示す。部位1の腐食状況は溶接金属のボンド部近傍を貫通してSM400Bまで腐食が進行していた。部位2の腐食状況は溶接金属のボンド部近傍表面に孔食が発生していた。孔食内のスケールをEPMAで分析した結果を写真-1.11に示す。このスケールの主成分は鉄(Fe)と酸素(O)であり、若干のクロム(Cr)を含んでいた。

この孔食の直下部と溶接金属及びSUS304のEPMAによるCr, Fe, Niの半定量分析の結果を写真-1.12と表-1.24に示す。孔食直下部の2, 3及び4の位置のCrは14.5~15.2%, Niは6.5~7.5%であった。なお、309溶接金属の成分は、Crは22.0%, Niは10.3%であり、SUS304の成分は、Crは19.7%, Niは8.1%であった。

以上より、孔食直下部のクロム量が309溶接金属及びSUS304のクロム量よりも少ないことがわかった。また、ニッケルも若干クロムと同じような挙動を示していた。このクロム量の低下は孔食の発生に起因していると考えられる。



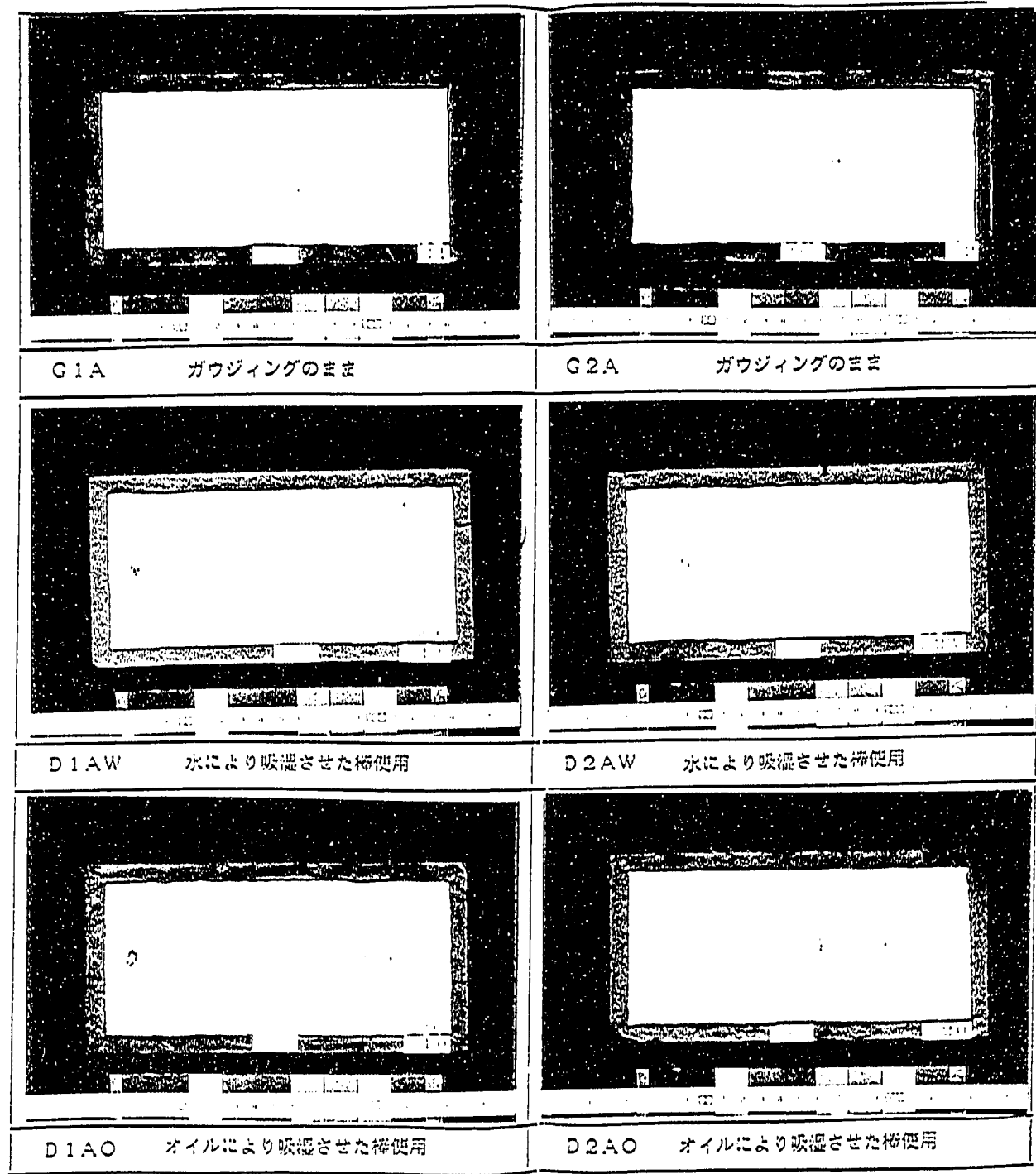


写真-1.9 (2) 淡水浸漬の3ヶ月後の腐食状況

表-1.23 淡水浸漬試験の腐食状況調査

記 号	施 工 条 件	溶 接 棒	試 験 期 間		
			1 ヶ月	2 ヶ月	3 ヶ月
G 1 A	ガウジングのまま	D309 1層	腐食なし	腐食なし	腐食なし
G 2 A	ガウジングのまま	D309+D308 2層	腐食あり	腐食あり	腐食あり
D 1 A W	吸湿した溶接棒	D309	腐食あり	腐食あり	腐食あり
D 2 A W	吸湿した溶接棒	D309+D308	腐食なし	腐食なし	腐食なし
D 1 A O	機械油が付着した溶接棒	D309	腐食あり	腐食あり	腐食あり
D 2 A O	機械油が付着した溶接棒	D309+D308	腐食なし	腐食なし	腐食なし
H 1 A	過大溶込み	D309	腐食なし	腐食なし	腐食なし
H 2 A	過大溶込み	D308	腐食あり	腐食あり	腐食あり
C 1 A	1 mm表面ビード削除	D309	腐食あり	腐食あり	腐食あり
C 2 A	2 mm表面ビード削除	D309	腐食あり	腐食あり	腐食あり
B 1 A	開先目違 2 mm 下向	D309+D309	腐食なし	腐食なし	腐食なし
B 2 A	開先目違 2 mm 立向	D309+D308	腐食なし	腐食なし	腐食なし
B 3 A	開先目違 2 mm 立向	D309+D308	腐食あり	腐食あり	腐食あり

表-1.24 孔食発生部近傍のEPMAによるCr, Fe, Ni分析(半定量)

(wt%)

部 位	位置No.	Cr	Fe	Ni	備 考
孔食直下	2	14.5	77.9	6.5	2 mm表面ビード削除 (90°C, 20ppmCl ⁻ , 3ヶ月間浸漬)
	3	15.2	76.5	7.2	
	4	14.8	76.8	7.5	
溶接不良 直上	5	19.8	70.2	9.1	
	6	18.8	71.5	8.7	
	7	15.4	76.8	7.0	
309溶金部	8	22.0	66.8	10.3	
304L クラッド	9	19.7	71.2	8.1	

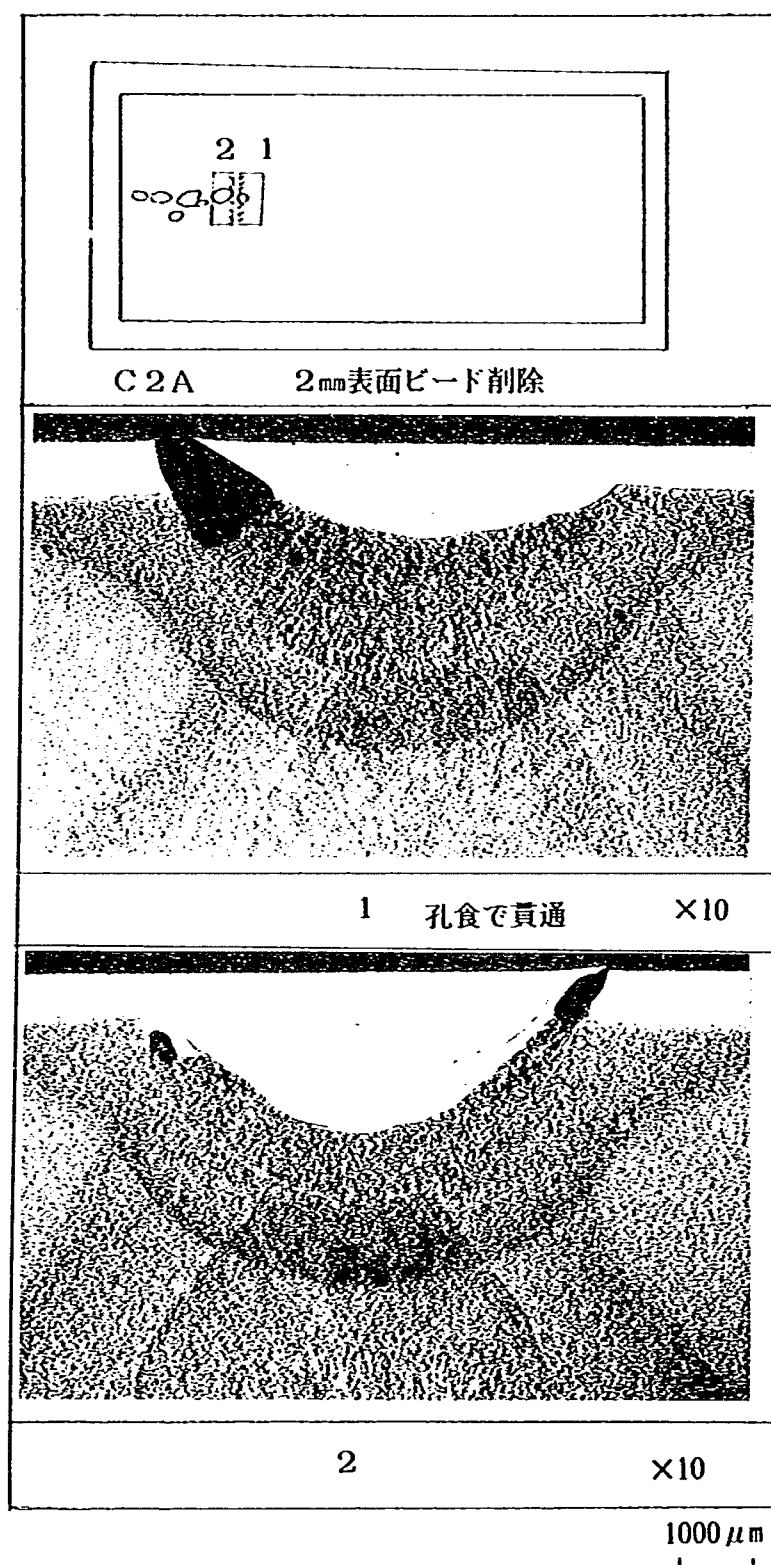


写真-1.10 孔食発生部の断面マクロ状況

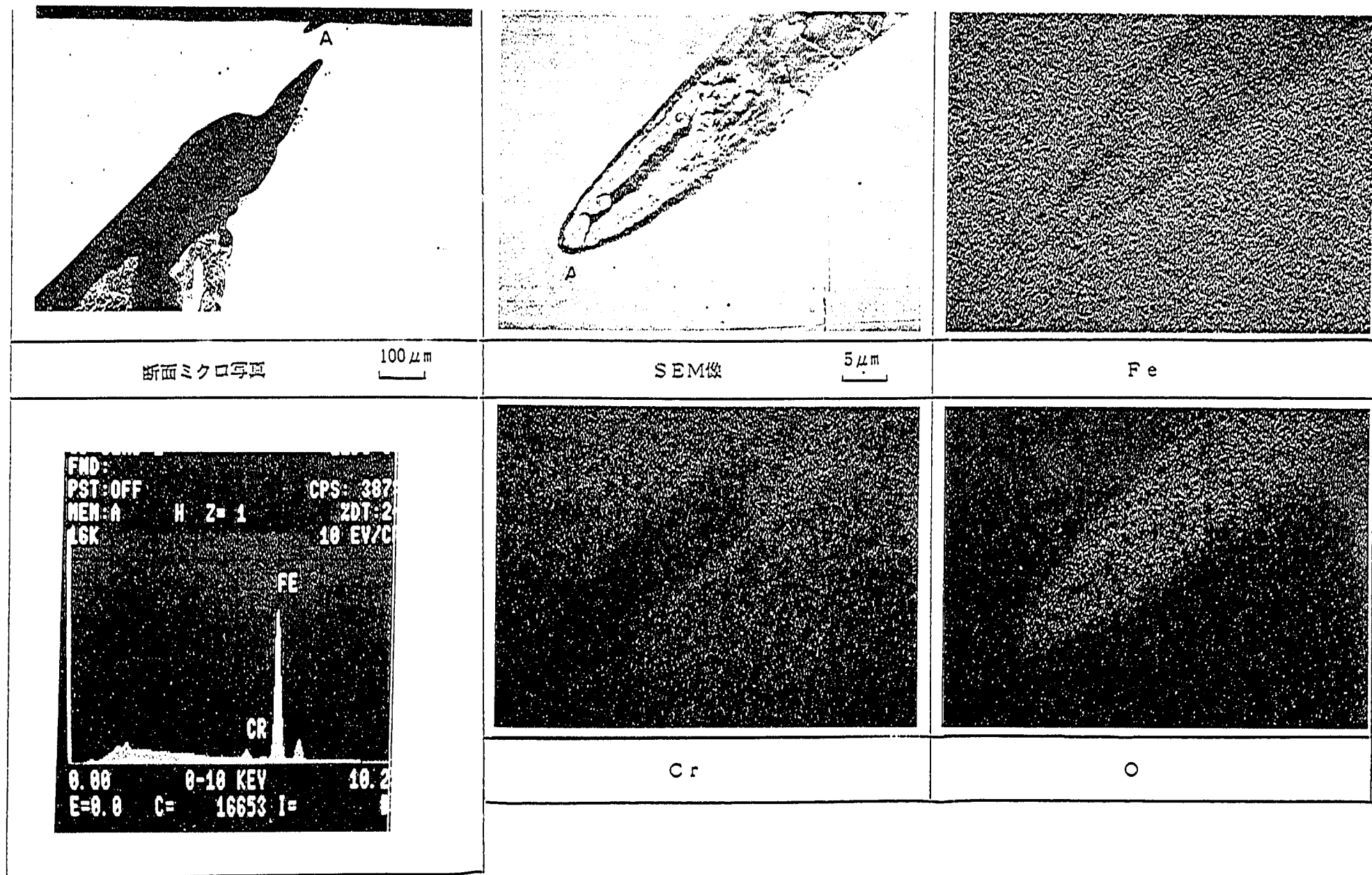
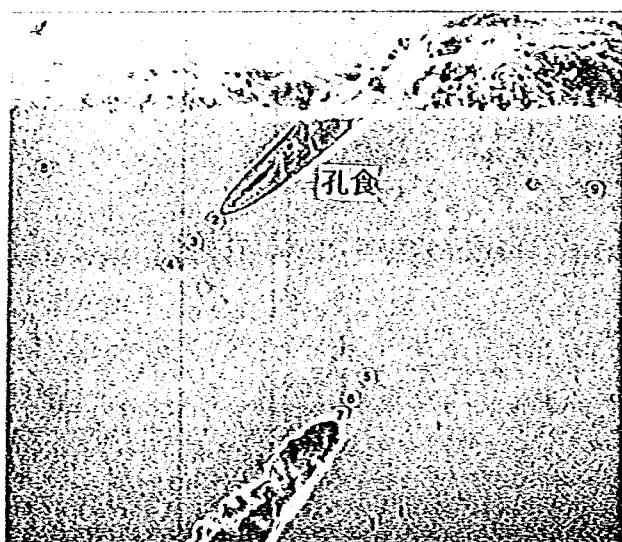
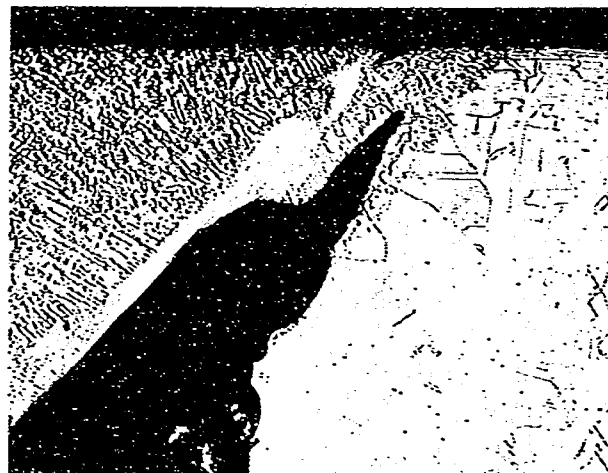


写真-1.11 孔食発生部のSEM像とFe, Cr, Oの分析及びEDX分析 (CA2)



20 μm



100 μm

写真-1.12 孔食発生部近傍のEPMAの測定位置 (C2A)

(2) 塩水噴霧試験

1) 試験方法

試験片は、淡水浸漬試験と同様のものを作成した。各試験片の耐食性の差を明瞭にするため発錆を加速する試験方法として人工海水噴霧、熱風乾燥に湿潤状態を加え、これらを繰り返す複合腐食試験を行った。

2) 試験条件

試験は、1.4.2に準じて行った。

3) 試験結果

①試験前の表面状況

全ての試験片がきれいな研磨肌を示していた。G2, D2W, D10, D20, H2, B3に溶接欠陥が認められた。

②試験後の表面状況

試験後 100サイクルまでの表面状況を表-1.25に示す。3サイクルにおいてG2, C1, C2, B2, B3に発錆がみられた。発錆の起点は表面欠陥の有無に関係なく、ボンド部に多く認められた。

28サイクルでは溶着金属あるいは表面欠陥近傍がやや激しく発錆している試験片もみられたが、ボンド部における発錆に比べると激しくなかった。

48サイクルから 100サイクルにかけては28サイクルにおける表面状況に比較してほとん

ど変化がみられなかった。最も激しい発錆が認められたのはC 1, C 2であった。

淡水中での腐食試験と比較すると、発錆状況が良く一致した。

③除錆後の表面状況

孔食発生状況の測定位置を図-1.10に、溶接部の孔食深さを表-1.26に、ステンレス鋼表面の孔食深さを表-1.27に示す。

母材部の孔食深さは、最大では $30\mu\text{m}$ 程度であり、溶接部にはこれより深い腐食がみられるものがあつた。すなわち、表面の発錆状況の激しかったG 2, C 1, C 2及び発錆状況のやや激しかったD 2 W, D 2 Oに $100\mu\text{m}$ 程度をこえる腐食が認められた。

これら発錆の激しい位置はボンド部に集中してみられ、ボンド部以外の溶接欠陥からは $100\mu\text{m}$ をこえる孔であっても発錆は認められなかった。

100サイクルまでの複合腐食試験を行った結果、表面にみられる溶接欠陥、発錆状況及び腐食深さについてまとめる表-1.28及び以下の3点のようになる。

(i) 表面にみられる溶接欠陥

ボンド部にみられる溶接欠陥からは激しく腐食する可能性がある(G 2)。

(ii) 溶接ビードの削除

表面に溶接欠陥がみられない場合でもボンド部が激しく腐食する可能性がある(C 1, C 2)。

(iii) ボンド部以外の発錆

腐食が深く進行して孔食になる可能性は小さいと思われる。

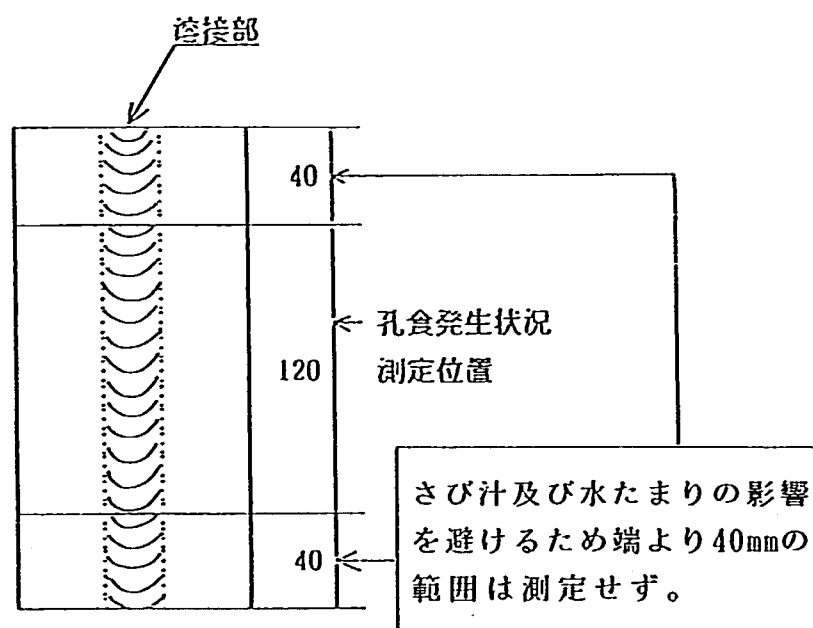


図-1.10 孔食発生状況測定位置

表-1.25 塩水噴霧試験における発錆状況

記 号	施 工 法	溶接材料	クランプ鋼とステンレス鋼溶接部の発錆程度 表面と同程度 : ○ やや激しい : △ 激しい : ×				発錆の起点	淡水中での 結果 (3ヶ月) 発 錆 有 × 無 ○
			3ヶ月	28ヶ月	48ヶ月	100ヶ月		
G 1	ガウジング まま	D 3 0 9	○	○	○	○	—	○
G 2	ガウジング まま	D 3 0 9 + D 3 0 8	×	×	×	×	ボンド部に 近い表面欠 陥	×
D 1 W	吸湿した溶 接棒	D 3 0 9	○	△	△	△	溶着金属	×
D 2 W	吸湿した溶 接棒	D 3 0 9 + D 3 0 8	○	△	△	△	表面欠陥 近傍	○
D 1 O	機械油が付 着した溶接 棒	D 3 0 9	○	△	△	△	表面欠陥 近傍	×
D 2 O	機械油が付 着した溶接 棒	D 3 0 9 + D 3 0 8	○	△	△	△	—	○
H 1	過大溶込み	D 3 0 9	○	△	△	△	—	○
H 2	過大溶込み	D 3 0 8	○	△	△	△	—	×
C 1	表面ビード 1mm削除	D 3 0 9	×	×	×	×	ボンド部 (表面欠陥 無し)	×
C 2	表面ビード 2mm削除	D 3 0 9	×	×	×	×	ボンド部 (表面欠陥 無し)	×
B 1	開先目違い 2mm 下向溶接	D 3 0 9 + D 3 0 8	○	○	○	○	—	○
B 2	開先目違い 2mm 立向溶接	D 3 0 9 + D 3 0 8	×	×	×	×	ボンド部 (表面欠陥 無し)	○
B 3	開先目違い 2mm 上向溶接	D 3 0 9 + D 3 0 8	×	×	×	×	ボンド部 (表面欠陥 有り)	×

表-1.26 溶接部の孔食深さ（深さ10 μ m以上の孔食について測定）

(μ m)

試験片	G 1	G 2	D1W	D2W	D10	D20	H 1	H 2	C 1	C 2	B 1	B 2	B 3
腐食 深さ	11	*732	18	1356	*2361	*1423	(5)	38	97	258	38	45	*934
		140	10	657	*1188	*1255		35	80	110	28	38	* 80
		15		262	*989	*517		32	43	87	17	19	(6)
		12		56	* 44	*264		24	33	85		18	
				39	37	203		17	29	81		16	
				13	10	38		13	17	64		12	
						31				54			
						23				48			
						19				44			
						13				44			
										39			
										39			
										34			
										32			
										29			
										27			
										23			
										23			
										22			
										21			
										20			
										13			
										13			
										14			
										10			
										10			

下線付：発錆の激しい孔。*：溶接欠陥

表-1.27 クラッド鋼ステンレス鋼表面の孔食深さ（深さ10 μ m以上の孔食について測定）

試験片	G 1	G 2	D1W	D2W	D10	D20	H 1	H 2	C 1	C 2	B 1	B 2	B 3
腐食 深さ	3 2	2 1	1 1	1 4	1 1	9	2 3	1 2	1 3	1 5	1 1	1 4	3 6
	2 3	1 2	1 0	1 3			1 4	1 0	1 1	1 4	1 0	1 3	1 1
	1 8	1 1					1 1			1 3			
	1 0	1 0								1 3			
	1 0	1 0								1 0			
	1 0									1 0			

表-1.28 塩水噴霧試験結果のまとめ

試 験 片	ガウジ ング		吸 湿 溶接棒		油付着 溶接棒		過 大 溶込み		ビード 削 除		開先目違い 溶接姿勢		
	G1	G2	D1 W	D2 W	D1 O	D2 O	H1	H2	C1	C2	B1	B2	B3
表面欠陥 ○:無し ×:有り	○	×	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○
発錆 ○:激しくない ×:激しい	○	×	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×
最大腐食深さ ○: 100 μ m未満 ×: 100 μ m程度以上 (××: 表面欠陥が腐食)	○	×	○	×	○	×	○	○	×	×	○	○	○

2. ステンレス鋼の異種金属接触腐食試験

異種金属接触腐食を予測するため、淡水から海水までの環境を塩素イオン濃度を変化させることにより模擬した溶液中において、ステンレス鋼及び普通鋼の分極特性の測定、ステンレス鋼と普通鋼のカップル電流密度及びカップル電位の測定、ステンレス鋼と普通鋼の異種金属接合部及びステンレスクラッド鋼端面の腐食性状に関する試験及び異種金属接合した試験片の人工欠陥を付けた塗装の腐食性状に関する試験を行った。

また、ステンレス鋼及び普通鋼の分極特性の測定結果から、数値解析によって異種金属接触腐食のシミュレーションを行った結果と、異種金属接合部及びステンレスクラッド鋼端面の腐食性状に関する浸漬試験及び異種金属接合した試験片の人工欠陥を付けた塗装の腐食性状に関する浸漬試験の結果とを比較検討した。

2.1 分極特性の測定

淡水から海水までの環境を塩素イオン濃度を変化させることにより模擬した環境におけるステンレス鋼及び普通鋼の分極曲線を測定した。

2.1.1 供試材

SUS304及びSM400Bを 400番エメリー研磨紙で研磨仕上げした。

2.1.2 試験方法

塩素イオン濃度 20, 200, 2000及び20000ppmの NaCl 水溶液に空気を吹き込みながら、20℃と30℃の恒温槽中に図-2.1 に示すような試験装置を設置して、電位を50mV/minで変化させて供試材の分極特性を測定した。

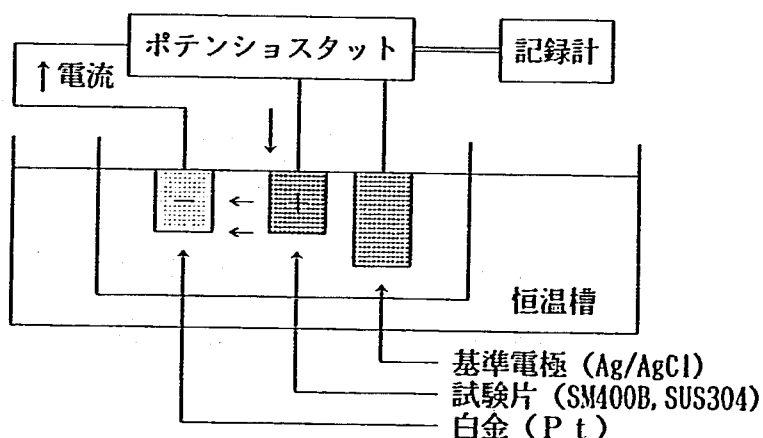


図-2.1 分極特性の測定

2.1.3 試験結果

20℃及び30℃における分極測定の結果を図-2.2 に示す。20℃において塩素イオン濃度が20 ppmから20000ppmまでの増加に対し、SUS304カソード分極曲線の変化が小さいのに比し、普通鋼のアノード分極曲線の変化が大きい。この傾向は30℃より顕著になっている。

この分極曲線から、カップルした場合の電位及び電流密度を予測すると、表-2.3~2.5 のようになる。

表-2.3 カップル電位 (V vs Ag/AgCl)

塩素イオン濃度 (ppm) 温 度 (℃)	20	200	2000	20000
20	-0.29	-0.33	-0.34	-0.45
30	-0.33	-0.35	-0.47	-0.54

表-2.4 カップル電流密度 ($\mu\text{A}/\text{m}^2$)

塩素イオン濃度 (ppm) 温 度 (℃)	20	200	2000	20000
20	2.2	13	11	15
30	7.0	10	45	130

表-2.5 カップル電流密度から求めた普通鋼の腐食速度 (mm/year)

塩素イオン濃度 (ppm) 温 度 (℃)	20	200	2000	20000
20	0.026	0.15	0.13	0.17
30	0.081	0.12	0.52	1.51

表-2.4, 2.5 より20℃では、塩素イオン濃度が高くなっても異種金属接触腐食は小さいが、30℃では塩素イオン濃度が高くなるにつれ異種金属接触腐食が著しくなると予測されることが明らかになった。

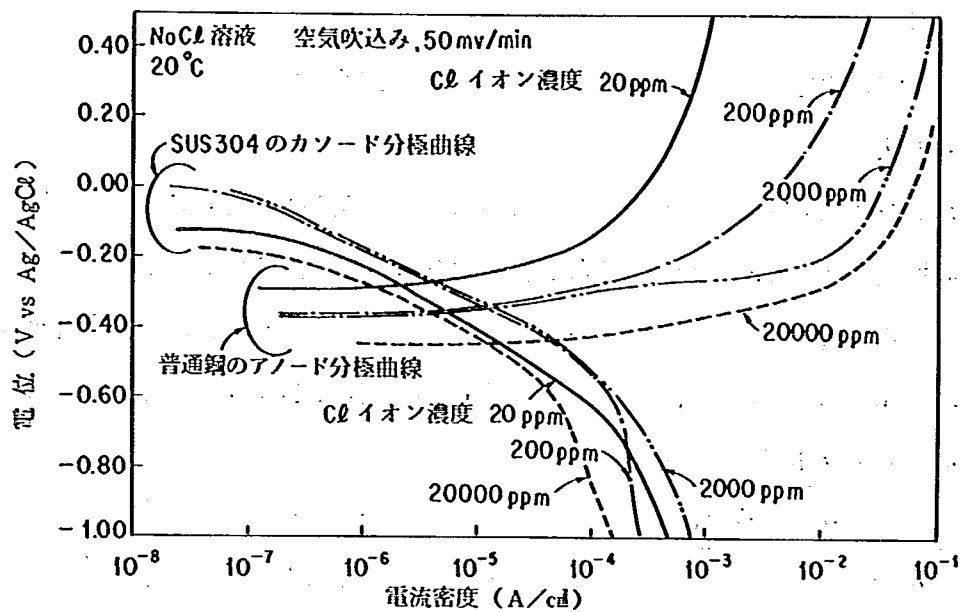


図-2.2 (1) 環境模擬液中におけるステンレス鋼, 普通鋼の分極曲線 (20°C)

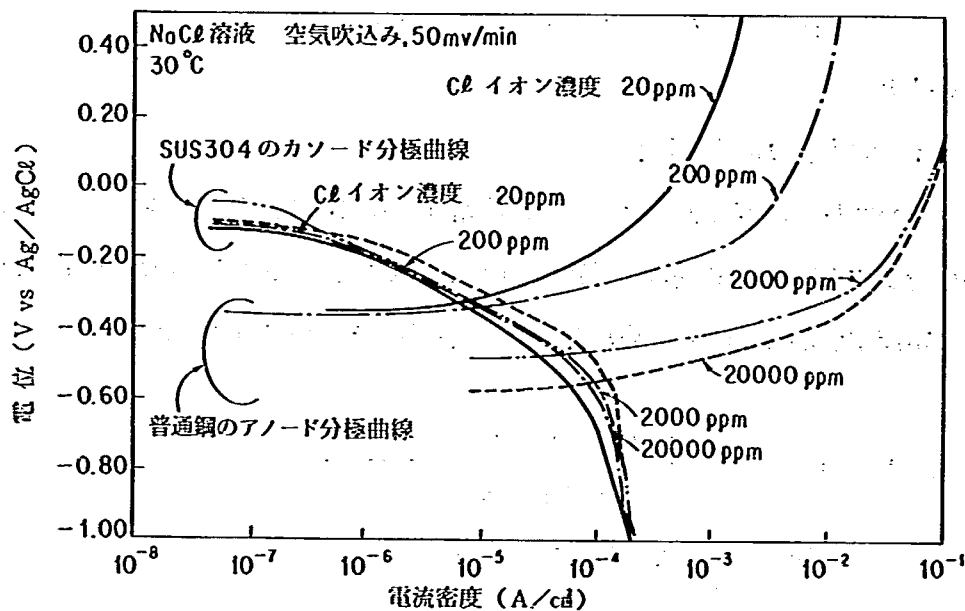


図-2.2 (2) 環境模擬液中におけるステンレス鋼, 普通鋼の分極曲線 (30°C)

2.2 カップル電流密度及びカップル電位の測定

2.2.1 供試材

SUS304及びSM400Bを 400番エメリー研磨紙で研磨仕上げした。

2.2.2 試験方法

塩素イオン濃度 20, 200, 2000及び20000ppmの NaCl水溶液に空気を吹き込みながら、20℃と30℃の恒温槽及び図-2.3 に示すような試験装置を用いて、10日間にわたりステンレス鋼と普通鋼のカップル電流密度とカップル電位を測定した。また、ステンレス鋼と普通鋼の面積比が 1, 10, 100, 1000 の場合及びステンレス鋼と普通鋼間の距離が5, 10, 50, 100mmの場合のカップル電流密度とカップル電位を測定した。

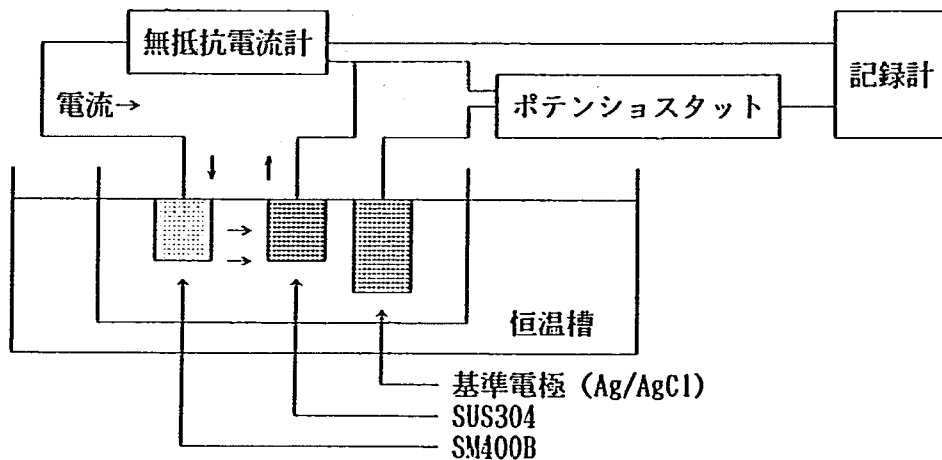


図-2.3 カップル電流密度、カップル電位の測定

2.2.3 試験結果

(1) 塩素イオン濃度及び温度の影響

塩素イオン濃度及び温度によるカップル電流密度の10日間の経時変化を図-2.4に、カップル電位の経時変化を図-2.5に示す。各塩素イオン濃度による浸漬2日後及び10日後に測定したカップル電流密度から式(1)で求めた普通鋼の腐食速度を図-2.6 に示す。

$$\text{腐食速度 (mm/year)} = \frac{315.36 \times I_g \times \alpha}{n \times F \times \gamma \times S} \quad \dots\dots\dots (1)$$

I_g : カップル電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
 α : 電子量
 n : 価数
 F : ファラデー定数 ($96485\text{C}/\text{mol}$)
 γ : 密度 (g/cm^3)
 S : 表面積 (cm^2)

カップル電流密度は、浸漬直後大きく増加するが、時間とともに徐々に減少する傾向がみられた。なお、腐食生成物が溶液中に堆積したため、6日目に新しい溶液に入れ替えた。

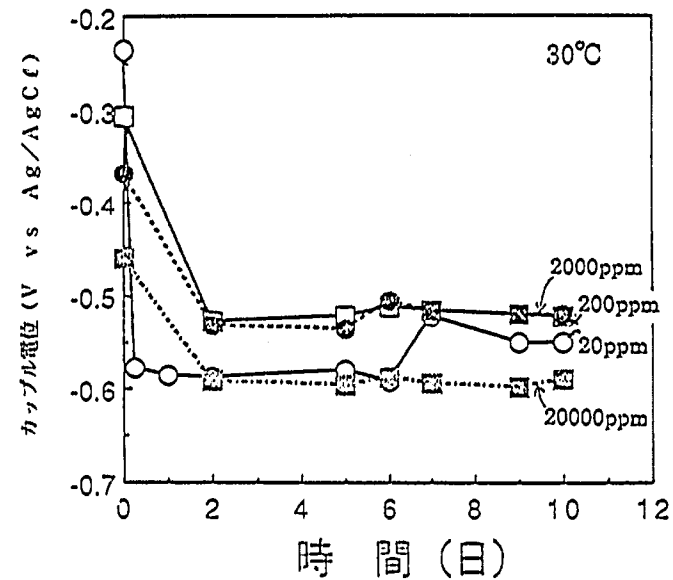
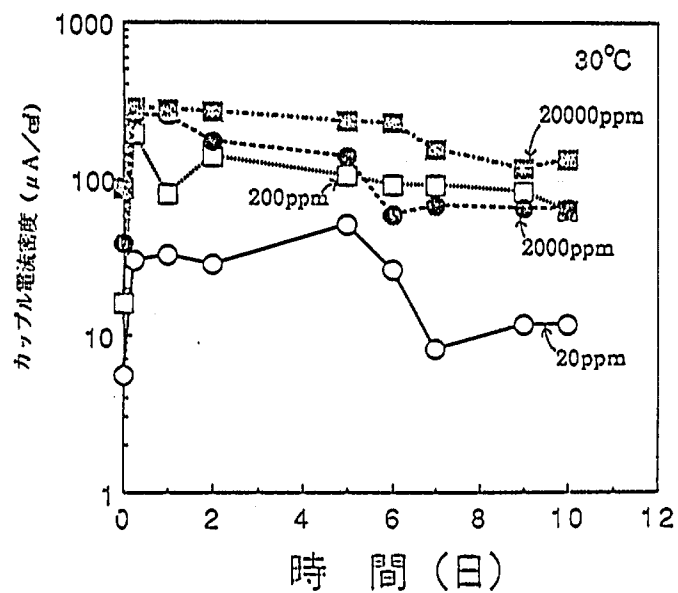
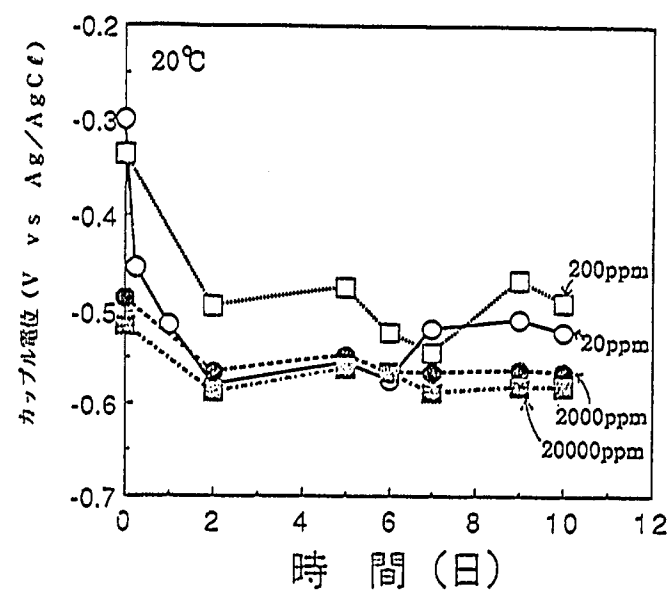
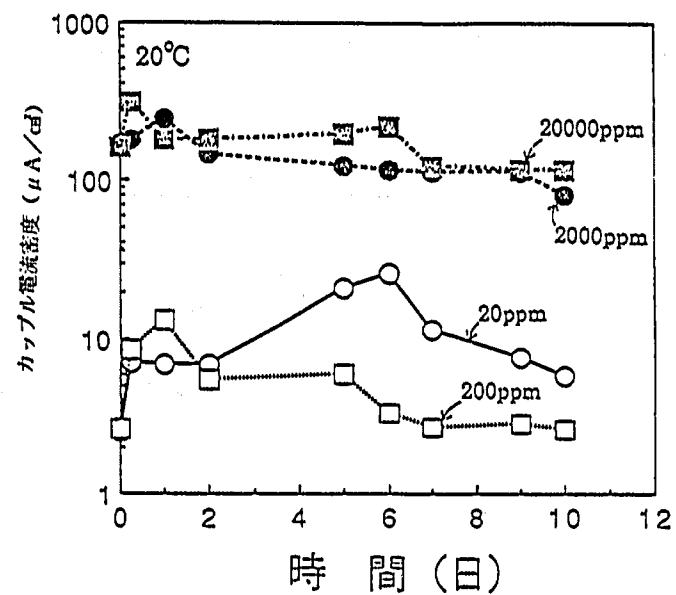


図-2.4 カップル電流密度の経時変化

図-2.5 カップル電位の経時変化

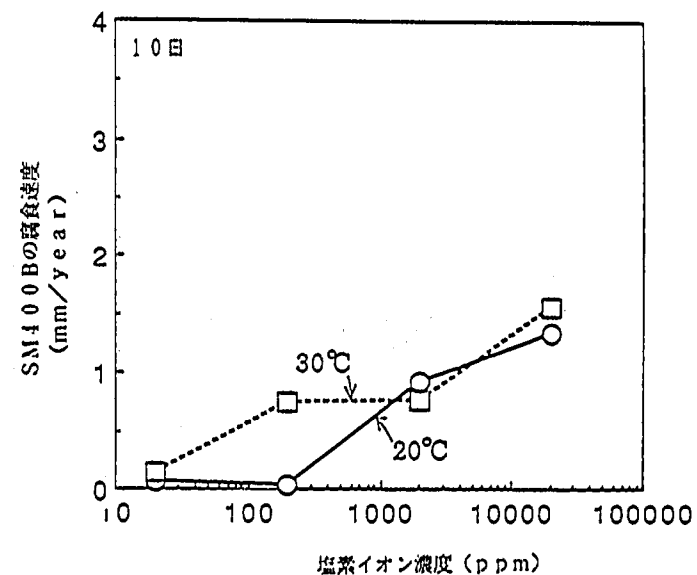
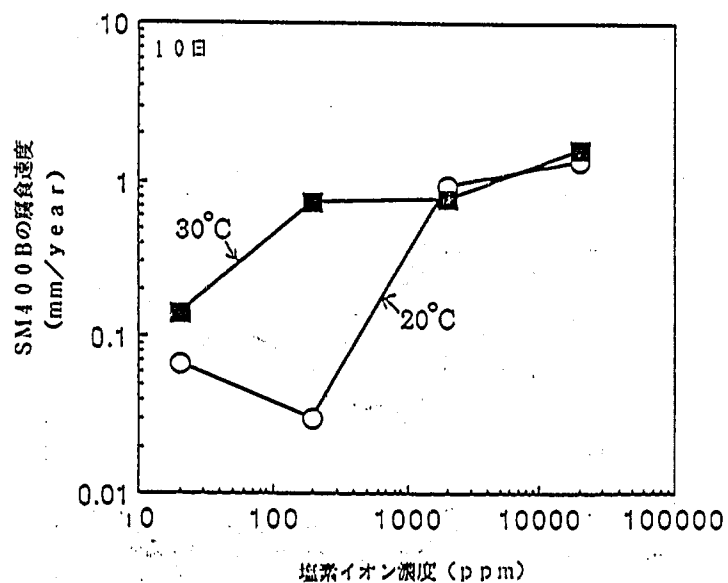
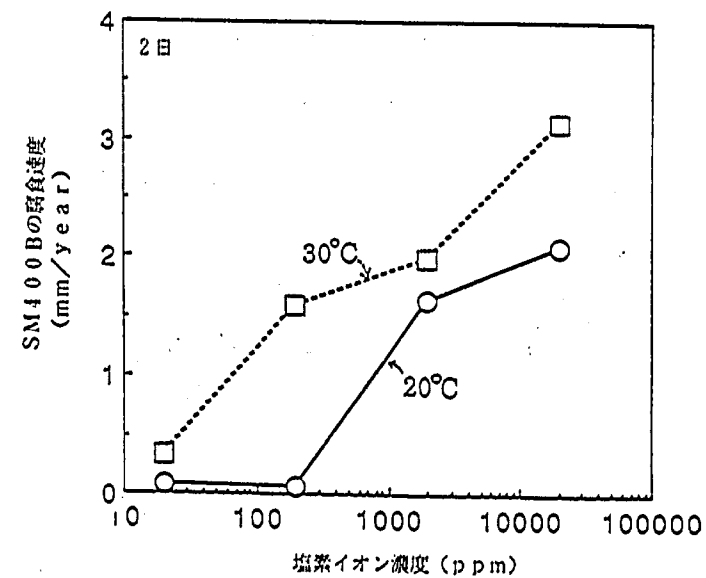
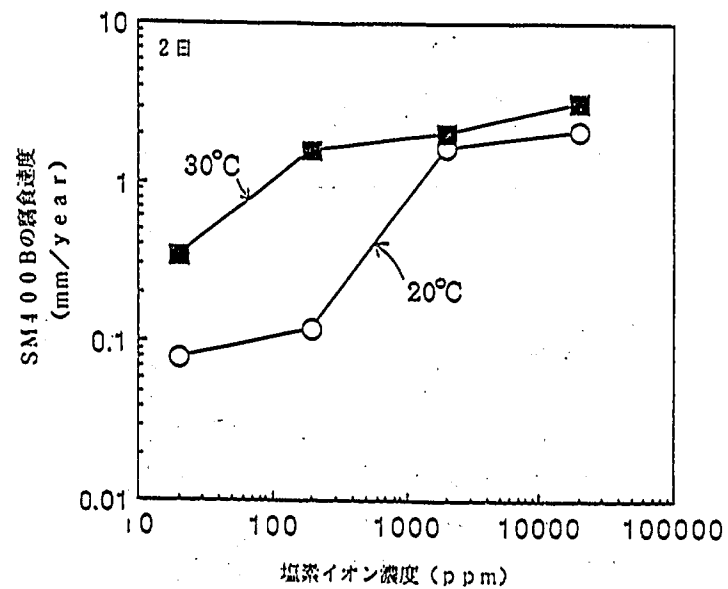


図-2.6 (1) カップル電流から求めた腐食速度

図-2.6 (2) カップル電流から求めた腐食速度

塩素イオン濃度200ppmは、20℃では20ppmと同程度の低い電流密度を示したが、30℃では2000ppmと同程度の電流密度を示した。カップル電位は、浸漬直後には高いがすぐに低下した。塩素イオン濃度と明瞭な関係は得られなかった。

カップル電流密度から計算した普通鋼の腐食速度は、塩素イオン濃度が高いほど、また温度が高いほど大きくなる傾向が見られた。

(2) 面積比の影響

ステンレス鋼／普通鋼の面積比を変えた場合のカップル電流密度の経時変化を図-2.7に、2日後と10日後のステンレス鋼／普通鋼の面積比と、普通鋼の腐食速度との関係を図-2.8に示す。

普通鋼の腐食にともなって試験液の電気伝導度が増加するため、カップル電流密度は増加するが、2日間経過するとほぼ定常値となった。また、面積比が大きいほどカップル電流密度も大きくなった。

2日後では面積比と普通鋼の腐食速度に良い相関がみられる。面積比が1の場合塩素イオン濃度によって腐食速度が異なるが、面積比が10より大きくなると腐食速度は塩素イオン濃度の変化してもほとんど変わらないように見える。10日後もほぼ同様の傾向を示した。

(3) 試験片間距離の影響

ステンレス鋼と普通鋼の試験片間距離を変えた場合のカップル電流密度の経時変化を図-2.9に、試験片間距離とカップル電流密度の関係を図-2.10に示す。

塩素イオン濃度20ppm溶液では浸漬直後は電気伝導度が小さいため、試験片間距離が小さいほどカップル電流密度が大きくなったが、時間経過とともに溶液の電気伝導度が増加するため明瞭な傾向がみられなくなった。塩素イオン濃度200ppm溶液では浸漬直後において試験片間距離100mmのカップル電流密度が最も小さく、その他の試験片間距離ではほぼ同じ値であり、塩素イオン濃度が大きくなると、試験片間距離の影響は小さくなることが明らかとなった。

分極曲線及びカップル電流から求めた腐食速度を比較した結果を図-2.11に示す。

腐食速度は、10日後（240時間後）の方が2日後（48時間後）に比べて小さくなっていた。ずれの温度においても塩素イオン濃度が高くなると腐食速度が大きくなる傾向がみられた。

20℃では浸漬直後、2日後、10日後のカップル電流密度から求めた腐食速度は、分極曲線から求めた腐食速度とずれていた。一方、30℃では浸漬直後のカップル電流から求めた腐食速度と分極曲線から求めた腐食速度は良い一致を示したが、2日後及び10日後には大きくずれた。

ステンレス鋼と普通鋼が接触した場合の普通鋼の腐食速度の推定方法としては、分極曲線か

らのみ求めるのではなく、カップル電流密度の測定結果も加味して推定するのが良いことが明らかとなった。また、測定値は多少ばらつくものの2日間以上浸漬した後の測定値は、長時間浸漬（10日間）した場合の値とあまり大きな相違はないことが明らかとなった。

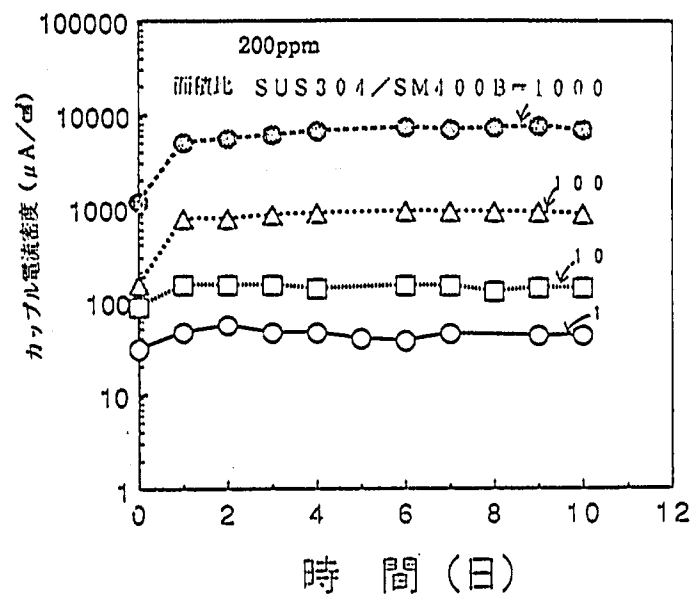
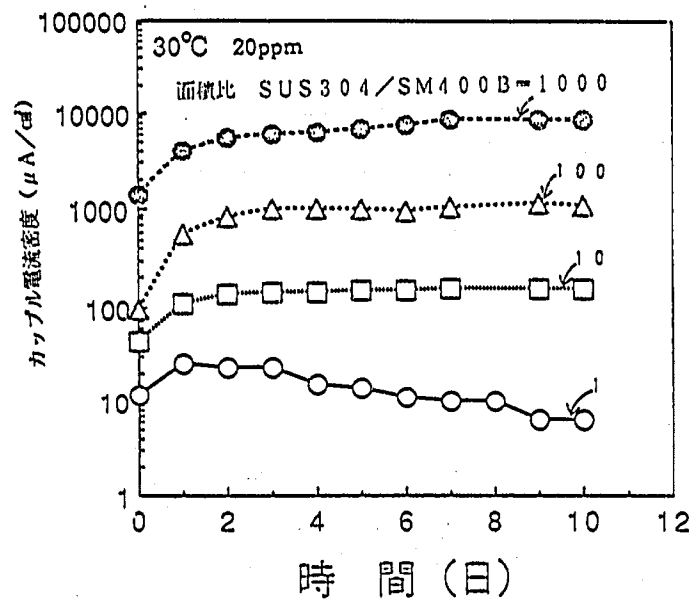


図-2.7 カップル電流密度の経時変化 (面積比)

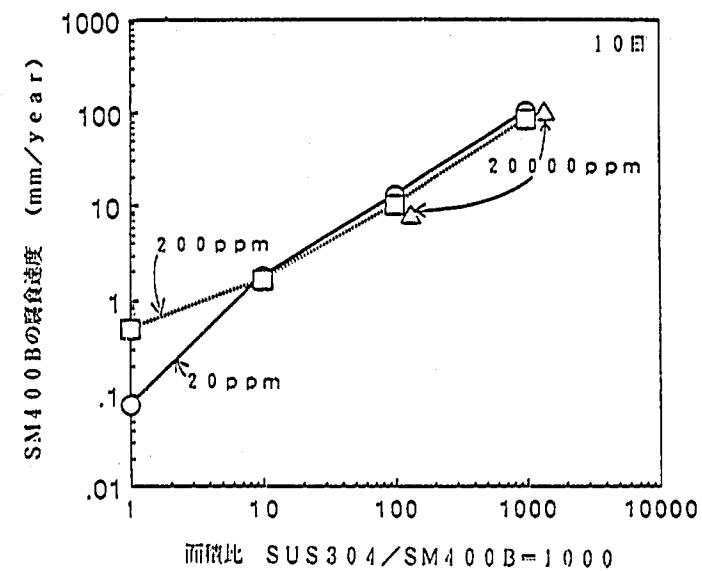
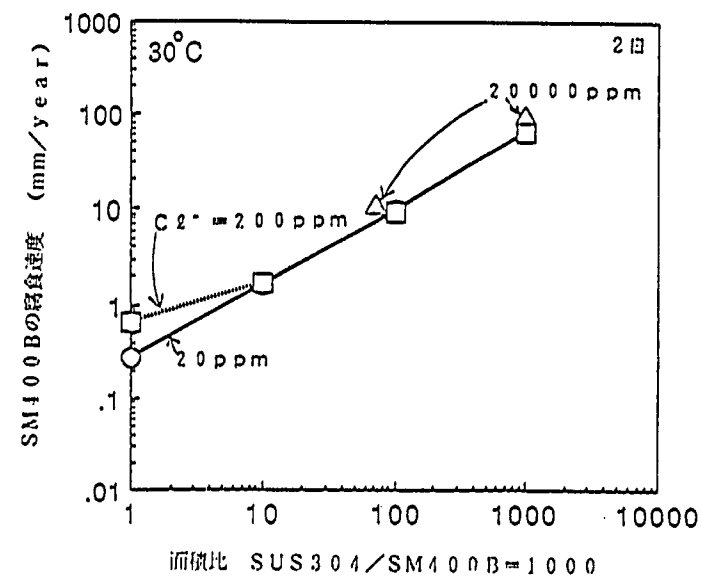


図-2.8 SUS304/SM400B面積比とSM400B腐食速度の関係

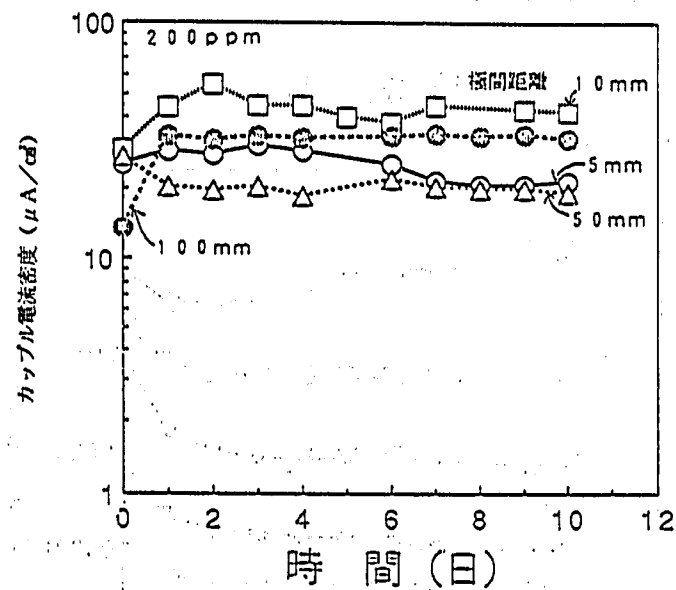
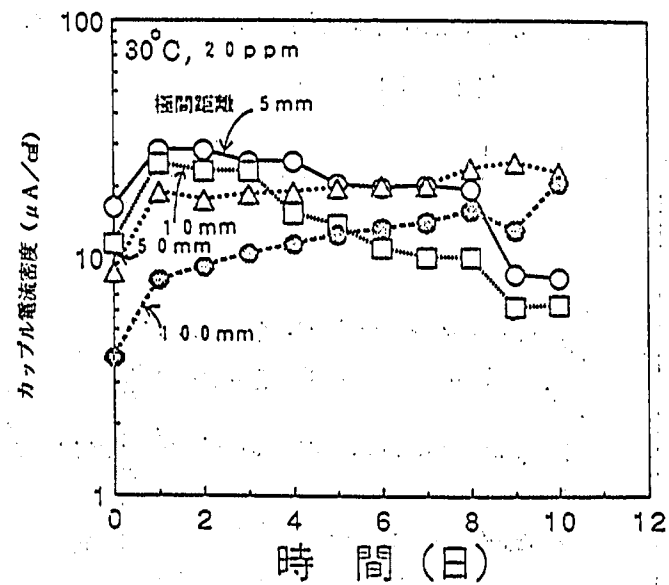


図-2.9 カップル電流密度の経時変化

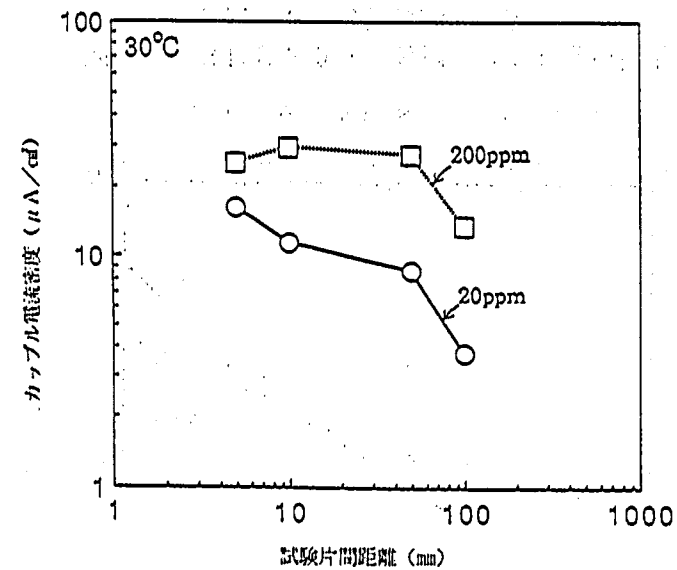


図-2.10 試験片間距離とカップル電流密度の関係

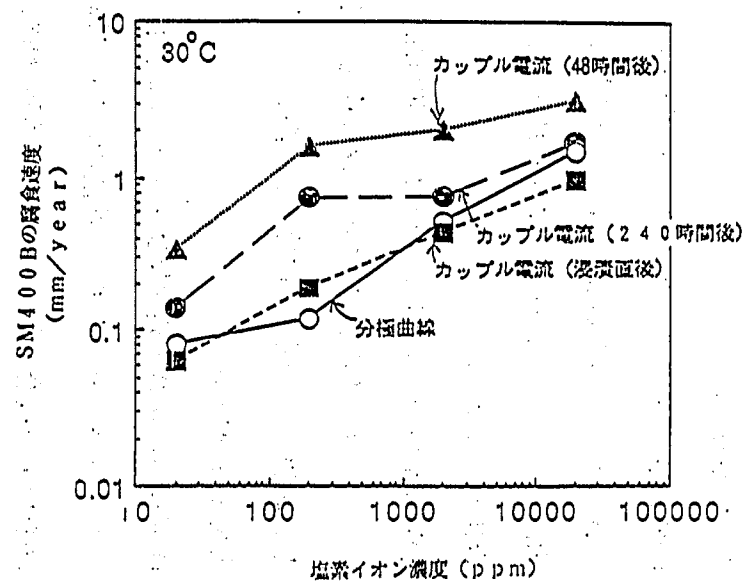
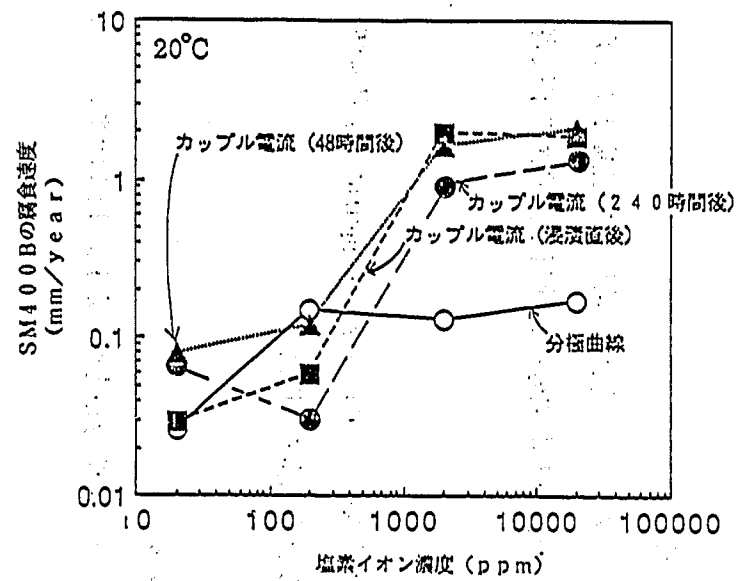


図-2.11 分極曲線及びカソード電流から求めた腐食速度

2.3 異種金属接合部の腐食試験

ステンレス鋼と普通鋼を溶接接合した際の普通鋼の腐食挙動及びステンレスクラッド鋼端面の腐食挙動、並びにステンレス鋼と溶接接合した普通鋼の腐食を防ぐために塗装した塗膜に欠陥が生じた際の腐食挙動を明らかにし、塗装の効果を解明するために異種金属接合試験片について実験を行った。

2.3.1 供試材

Aタイプ（異種金属接合片）試験片は、ステンレス鋼(SUS304)と普通鋼(SM400B)を溶接材料(D309)で接合した溶接試験片の余盛り研削後 400番エメリー紙で研磨した。

Bタイプ（クラッド試験片）試験片は、ステンレスクラッド鋼（SUS304とSM400B）

Cタイプ（塗膜欠陥試験片）試験片は、ステンレス鋼(SUS304)と普通鋼(SM400B)を溶接材料(D309)で接合した溶接試験片の余盛り研削後、塗装部はサンドブラスト仕上げ、露出部は 400番エメリー紙研磨仕上げし普通鋼表面をタールエポキシ樹脂塗料を $300\mu\text{m}$ 塗装し、塗装境界から20, 50, 100, 150, 300 mmに面積 30mm^2 の普通鋼が露出する塗膜欠陥部を一か所作った。

Aタイプ, Bタイプ, Cタイプ試験片の形状及び寸法を図-2.12に、電位分布の測定方法及びデータの分析評価の例を図-2.13に示す。

2.3.2 試験方法

(1)異種金属接合試験片及びクラッド鋼端面の浸漬試験

Aタイプ（異種金属接合片）試験片及びBタイプ（クラッド試験片）試験片を室温で NaCl 水溶液 ($\text{Cl}^- = 20, 200\text{ppm}$)に3ヶ月浸漬し、試験片の表面の電位分布を計測し、試験終了後腐食状況を観察した。

(2)異種金属接合試験片の塗装による防食試験

Cタイプ（塗膜欠陥試験片）試験片を室温の NaCl 水溶液 ($\text{Cl}^- = 20, 200\text{ppm}$)に3ヶ月浸漬し、試験片の表面の電位分布を計測し、試験終了後腐食状況を観察した。

2.3.3 試験結果

(1)異種金属接合試験片及びクラッド鋼端面の浸漬試験

3ヶ月浸漬後、NaCl 水溶液中における試験片表面の電位分布を図-2.14, 15に示す。

(2)異種金属接合試験片の塗装による防食試験

浸漬直後、浸漬67日後及び134日後の NaCl 水溶液中における塗装境界から塗膜欠陥までの距離によるステンレス鋼表面の電位分布及び塗膜欠陥部の電位を図-2.16に示す。また、塗装欠陥部の普通鋼腐食深さとステンレス鋼との距離の関係を図-2.17に、ステンレス鋼及び普通

鋼の分極曲線を図-2.18に示す。

塩素イオン濃度20ppm, 200ppmにおける異種金属接触腐食による普通鋼の最大腐食速度, 異種金属接触腐食の範囲及び塗膜欠陥部の腐食とステンレス鋼からの距離の関係について整理した結果を表-2.6に示す。

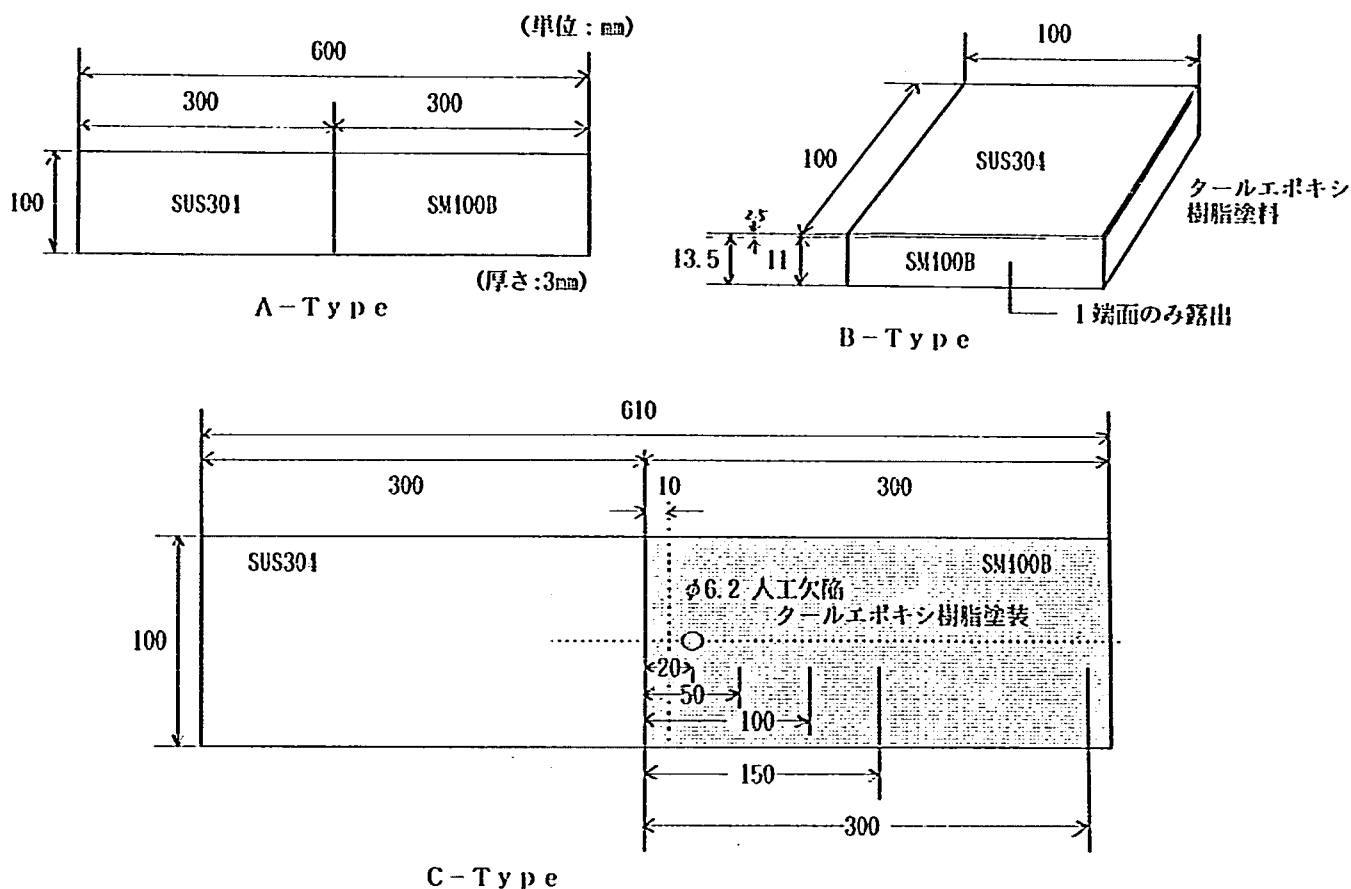


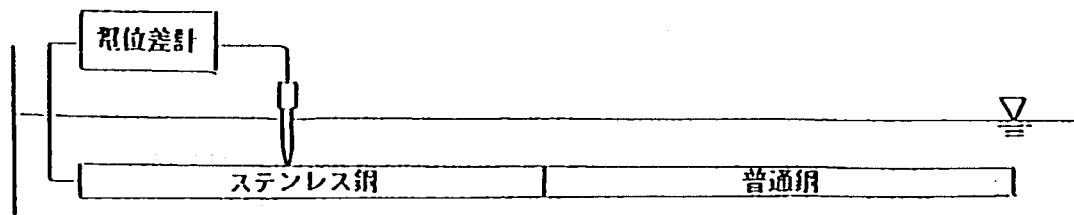
図-2.12 試験片の形状

表-2.6 異種金属接触腐食試験結果

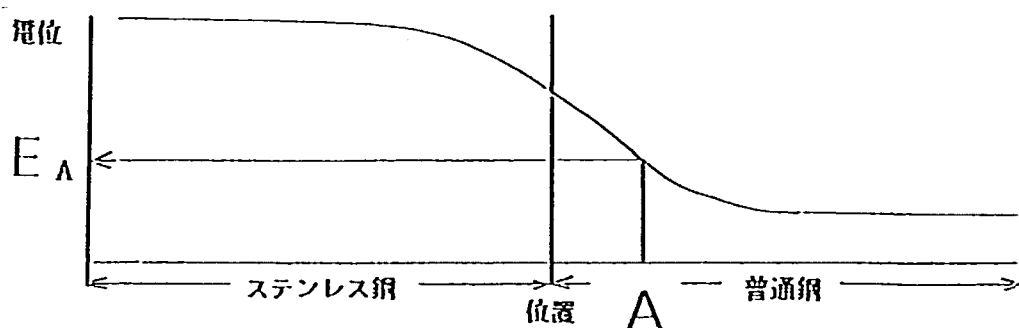
試験片	20 ppm	200 ppm
Aタイプ (異種金属接合片)	最大腐食速度 0.35mm/y 異種金属接触腐食範囲: 60mm 面積比 SUS:SM400B=1:1	最大腐食速度 0.38mm/y 異種金属接触腐食範囲: 90mm 面積比 SUS:SM400B=1:1
Bタイプ (クラッド試験片)	最大腐食速度 0.59mm/y 面積比 SUS:SM400B=10:1	最大腐食速度 0.75mm/y 面積比 SUS:SM400B=10:1
Cタイプ (塗膜欠陥試験片)	欠陥部の腐食速度は、ステンレス鋼からの距離に応じてなだらかに減少する。 面積比SUS:SM400B=1000:1	欠陥部の腐食速度は、Cl ⁻ 20ppmの場合より大きく、ステンレス鋼からの距離に応じてなだらかに減少する。 面積比SUS:SM400B=1000:1

① 電位測定方法

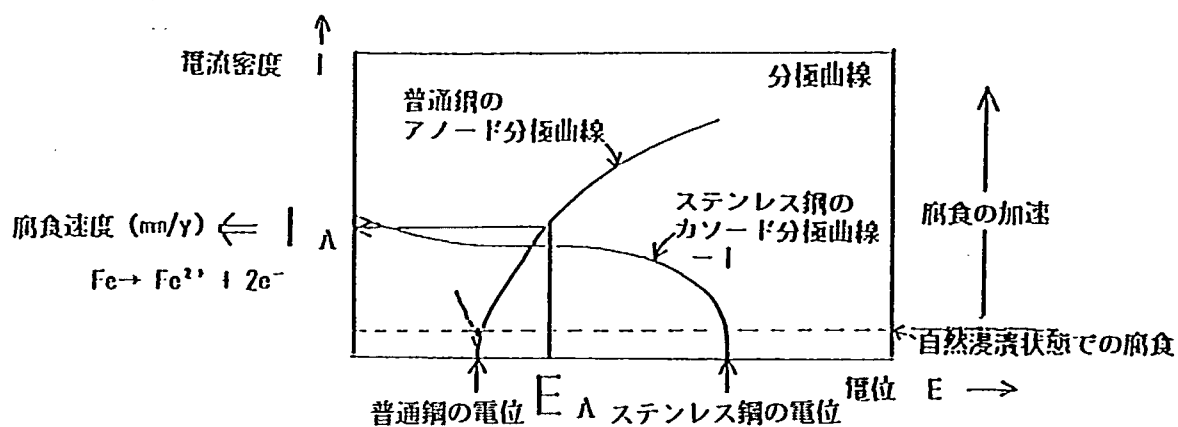
① 電位測定方法



② 電位測定結果例



③ 電位から電流密度の推定



④ 電流密度分布予測

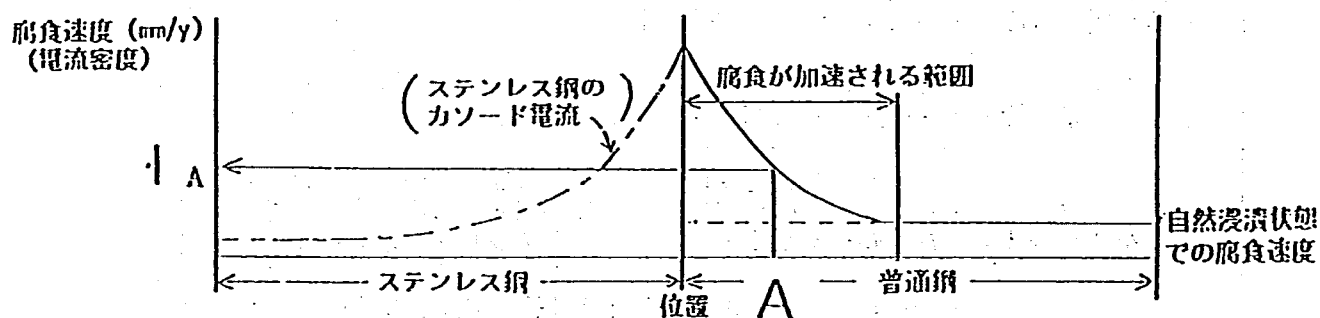


図-2.13 電位測定方法及びそのデータの分布解析

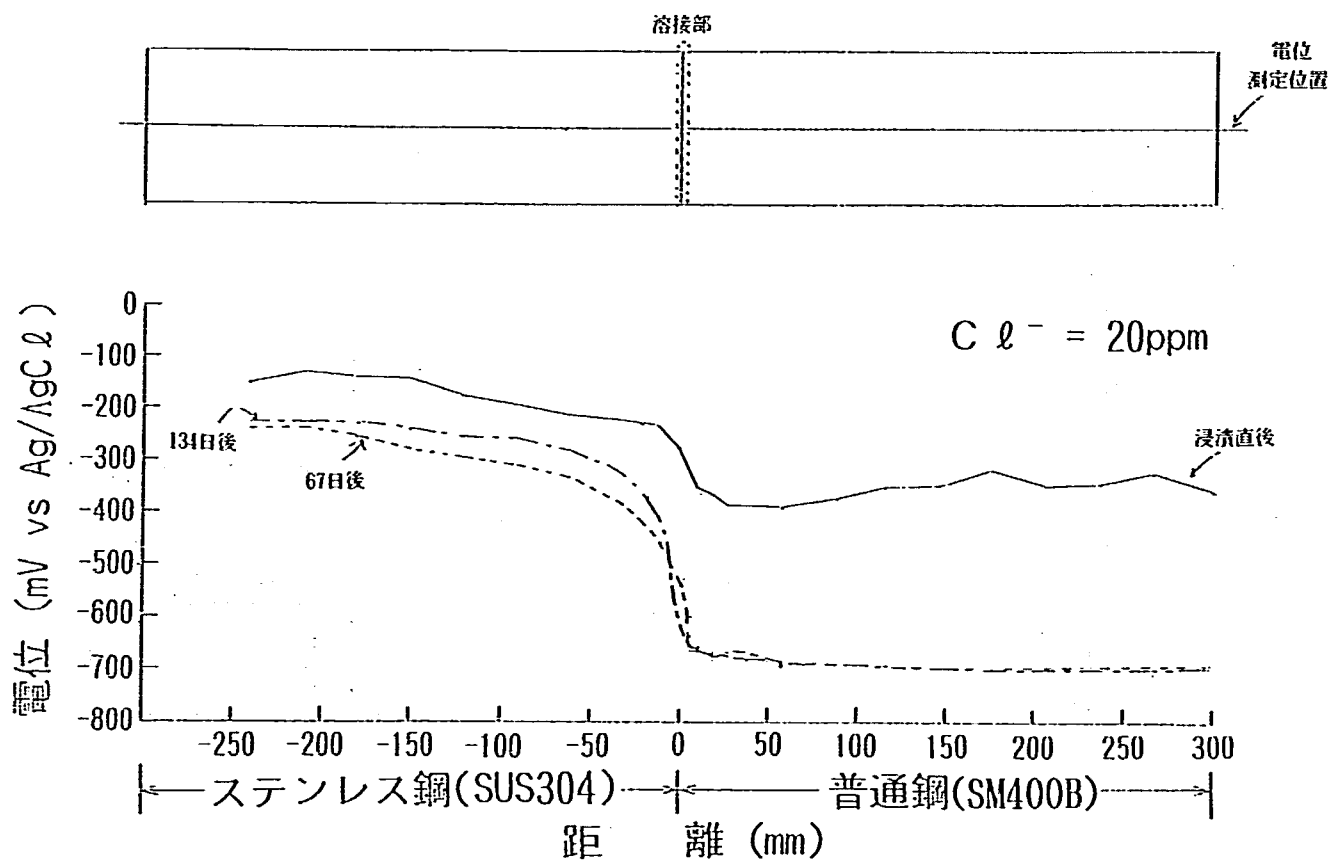


図-2.14(1) 異種金属接合片の電位分布

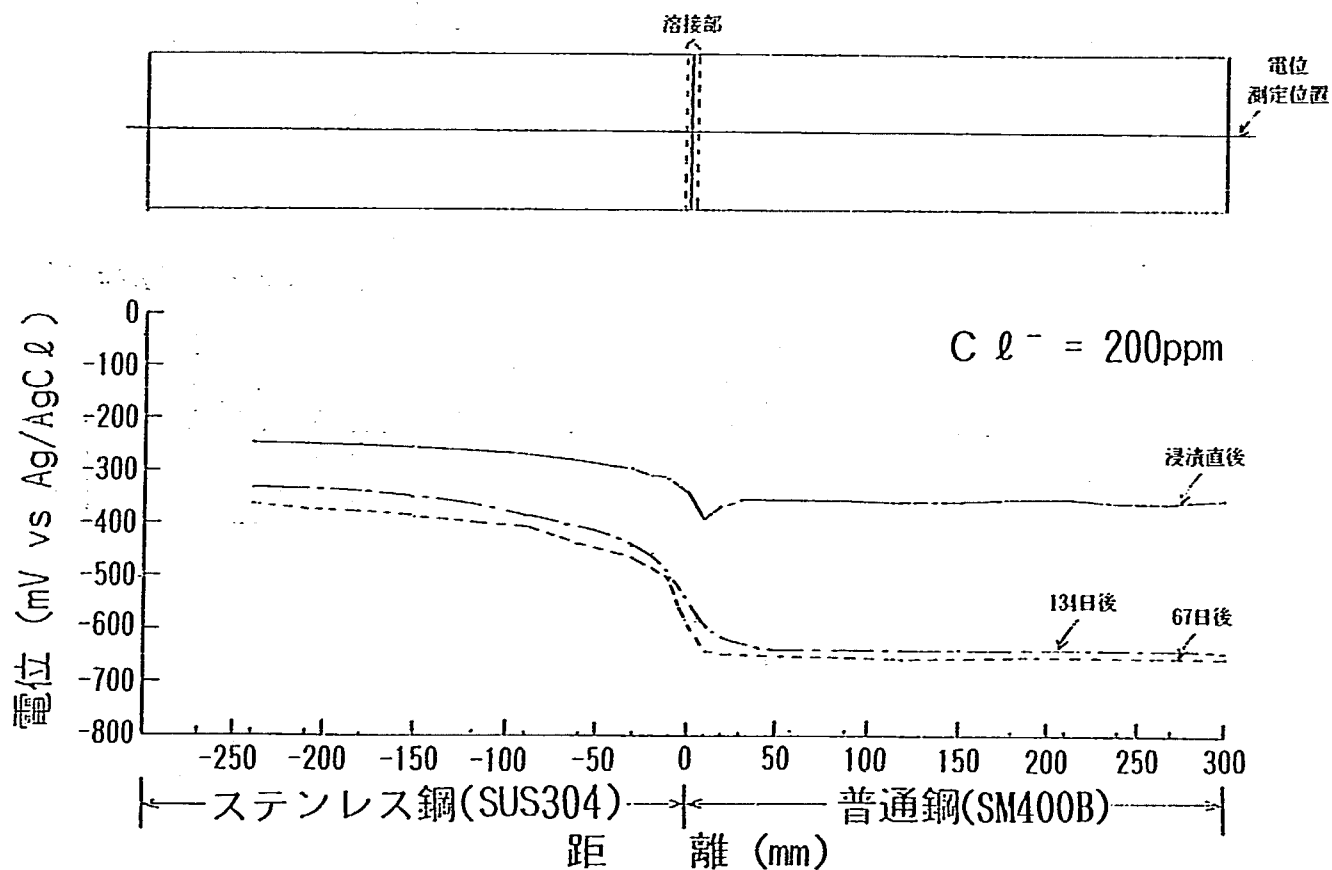


図-2.14(2) 異種金属接合片の電位分布

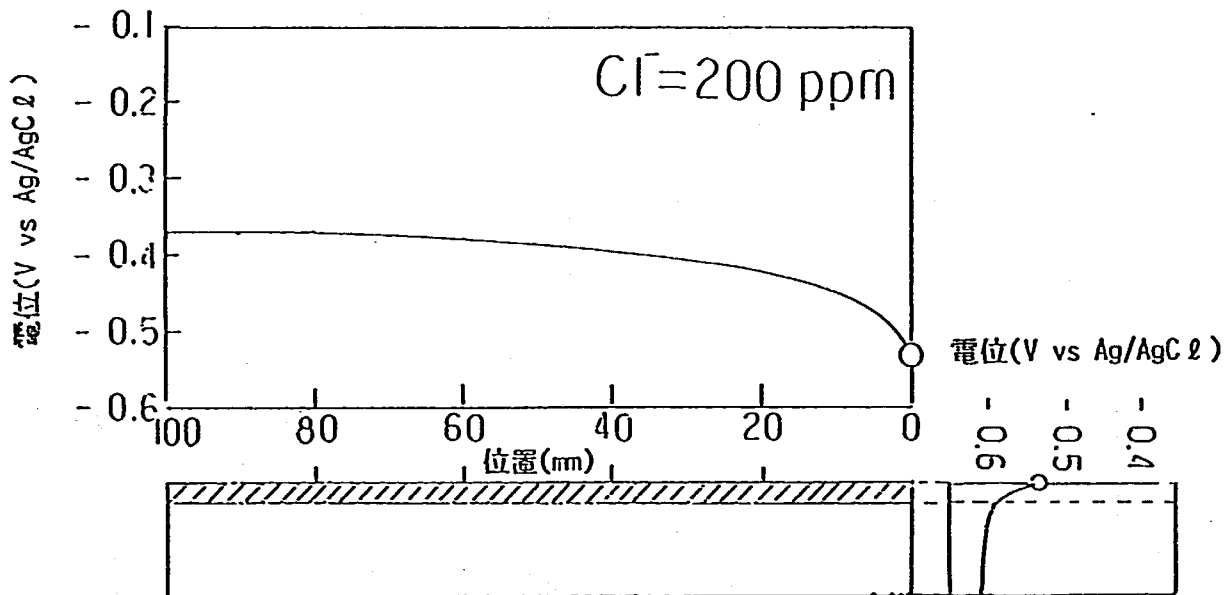
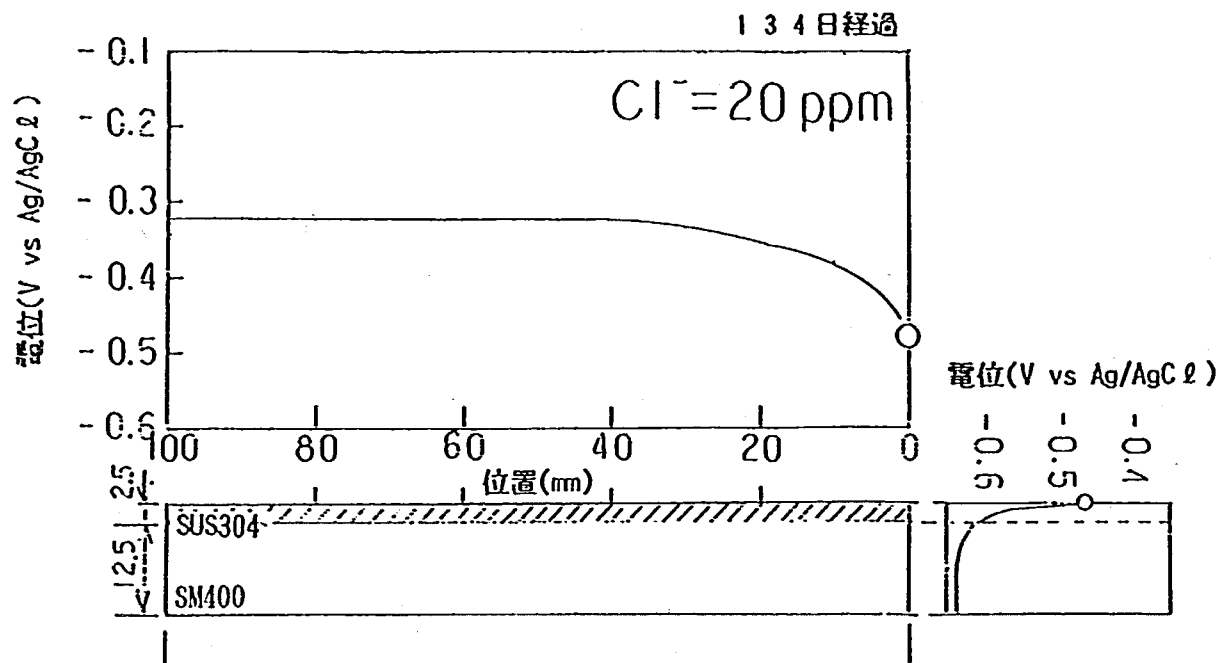


図-2.15 クラッド試験片の電位分布

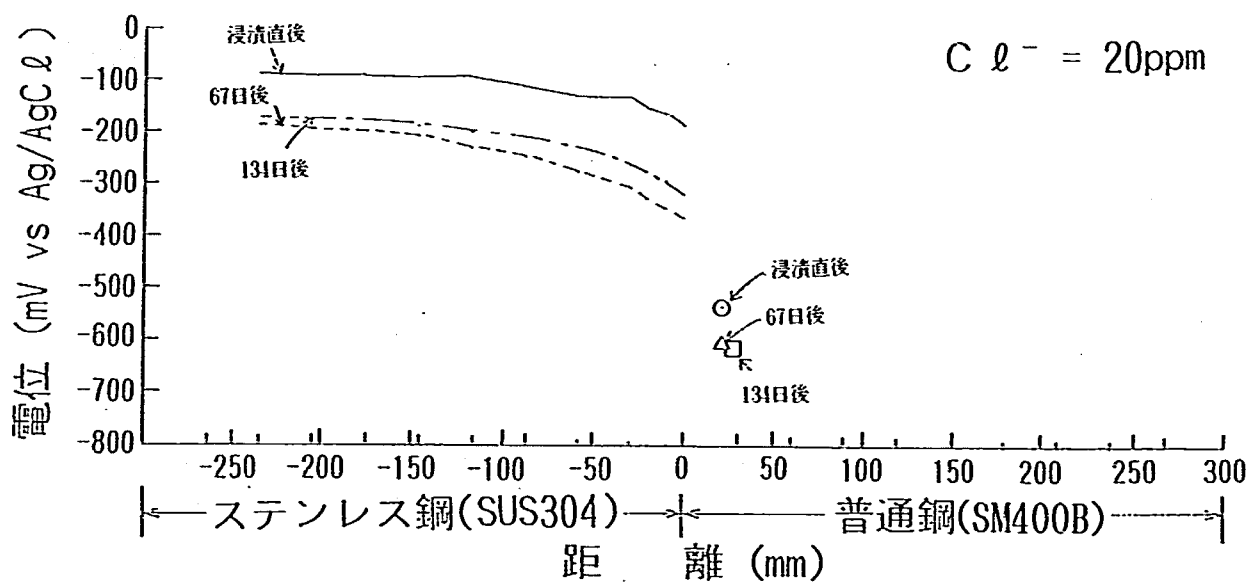
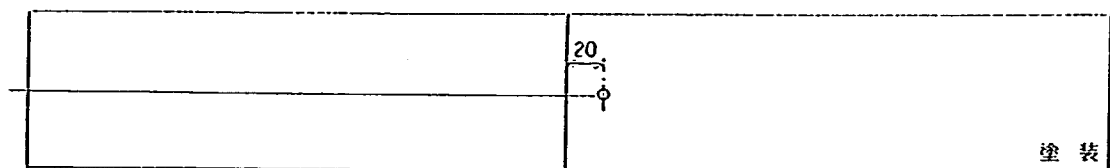


図-2.16(1) 異種金属接合片の電位分布

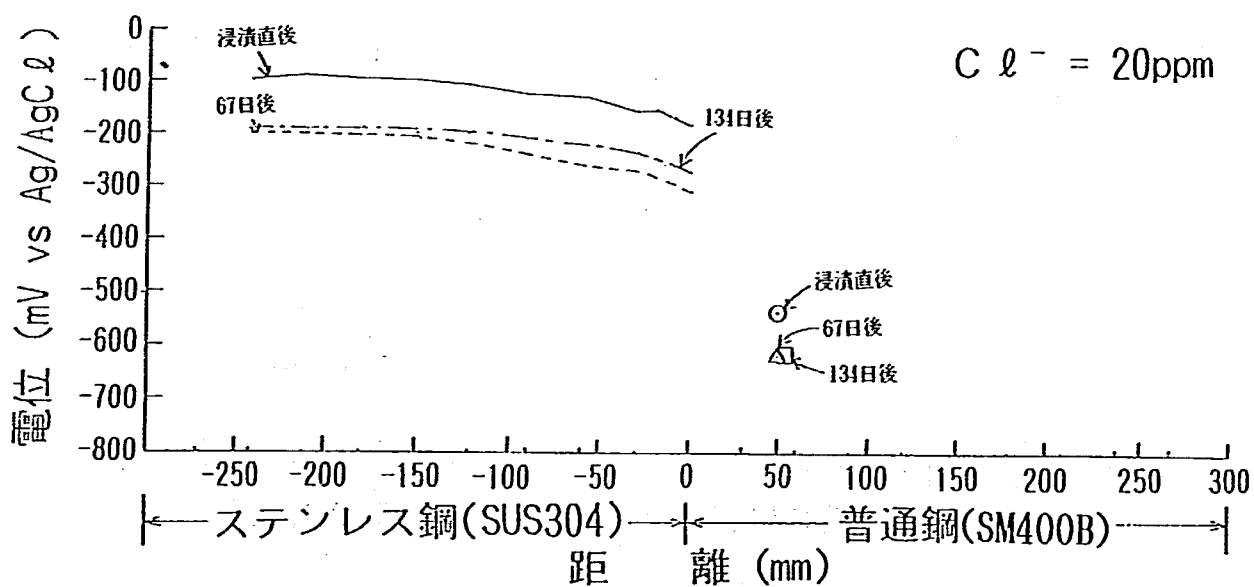
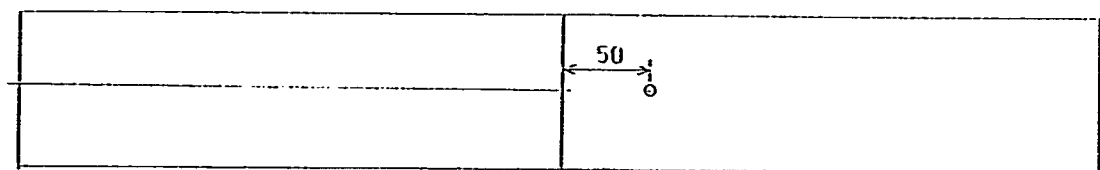


図-2.16(2) 異種金属接合片の電位分布

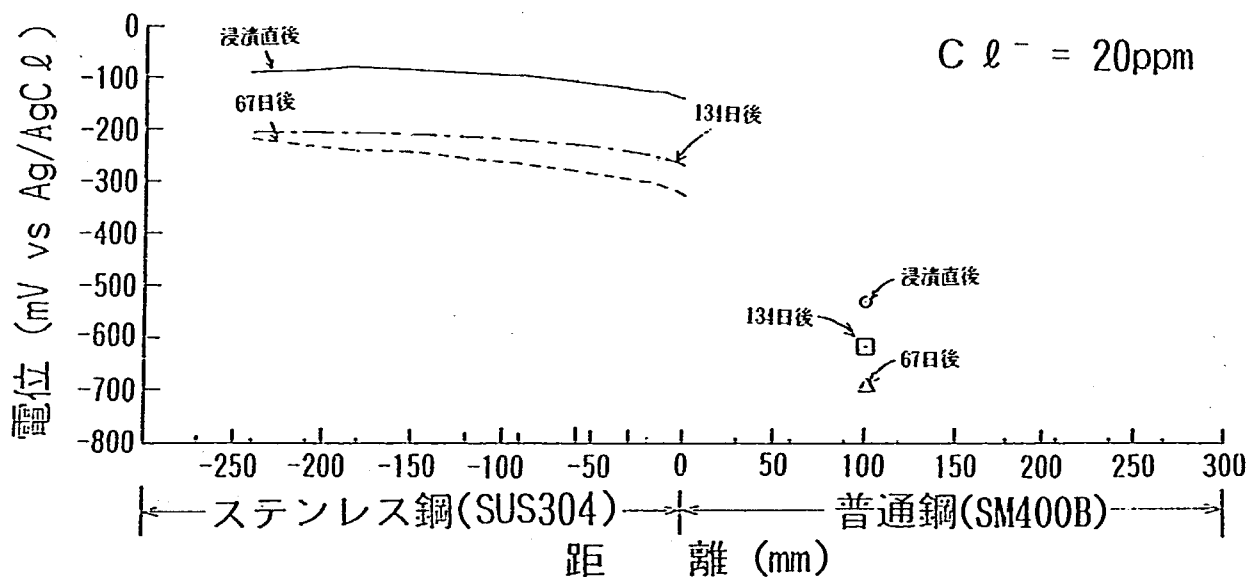
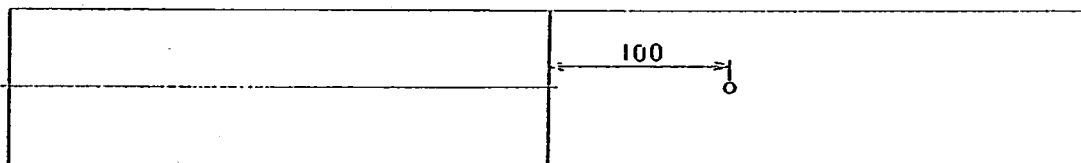


図-2.16(3) 異種金属接合片の電位分布

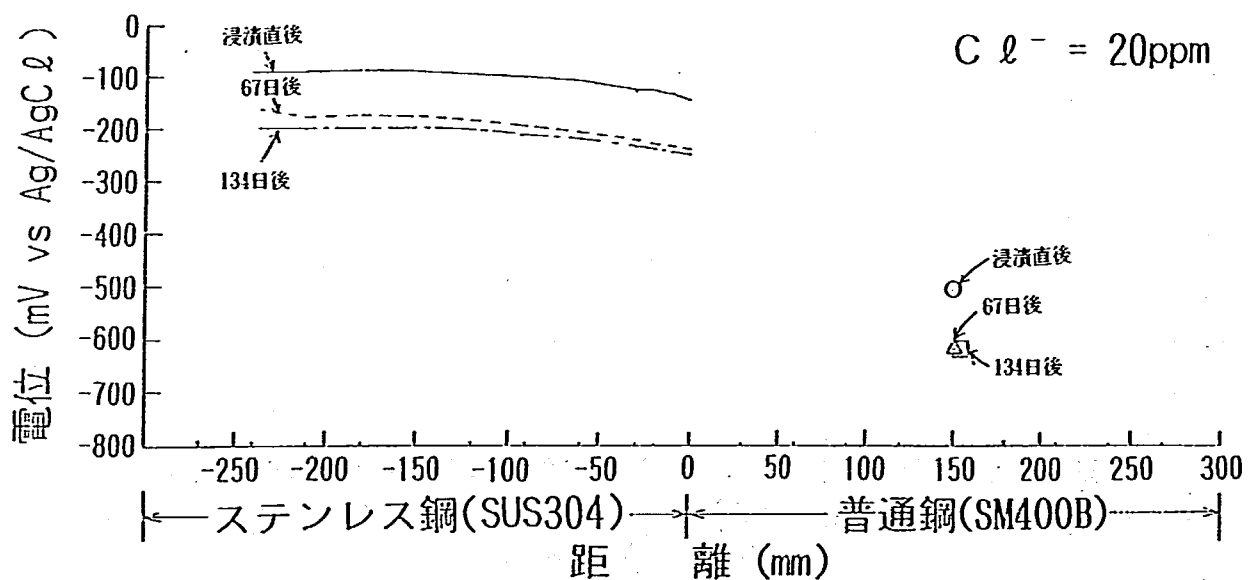
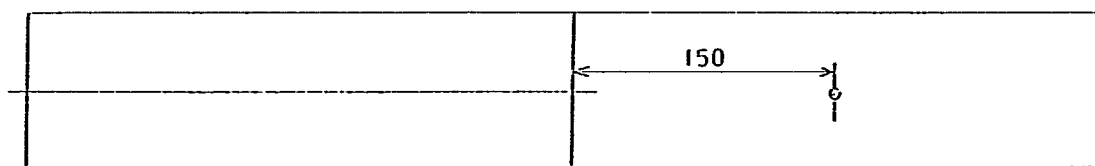


図-2.16(4) 異種金属接合片の電位分布

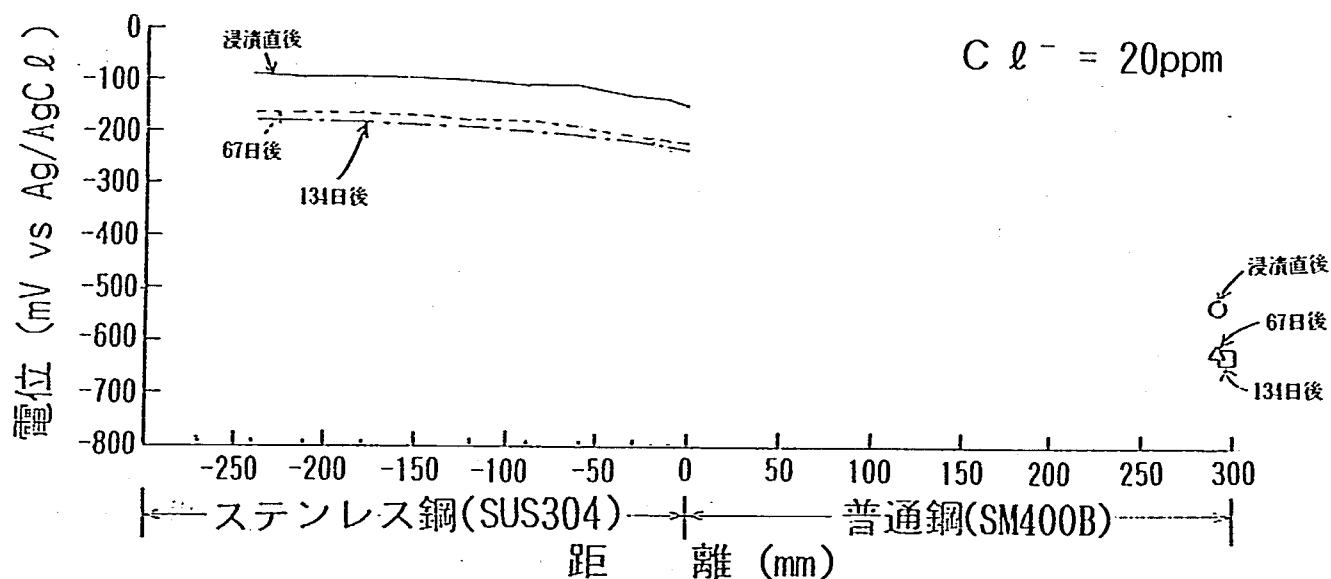
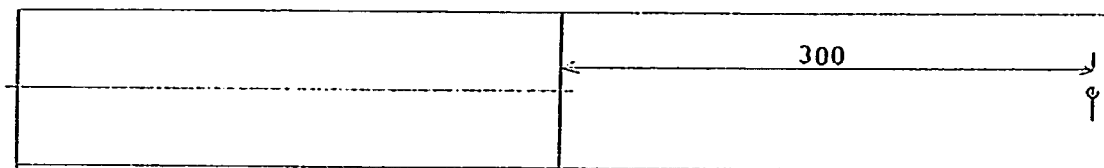


図-2.16(5) 異種金属接合片の電位分布

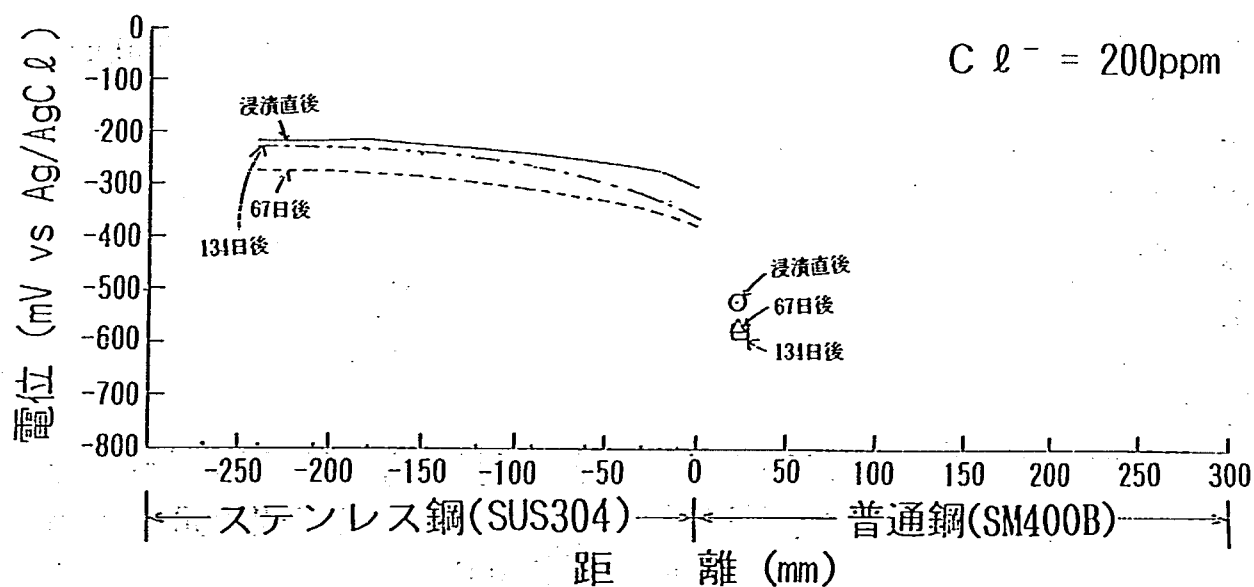
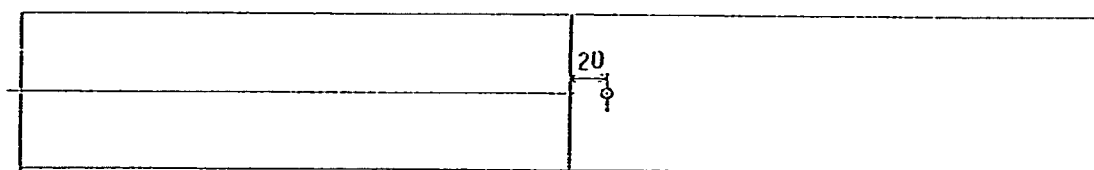


図-2.16(6) 異種金属接合片の電位分布

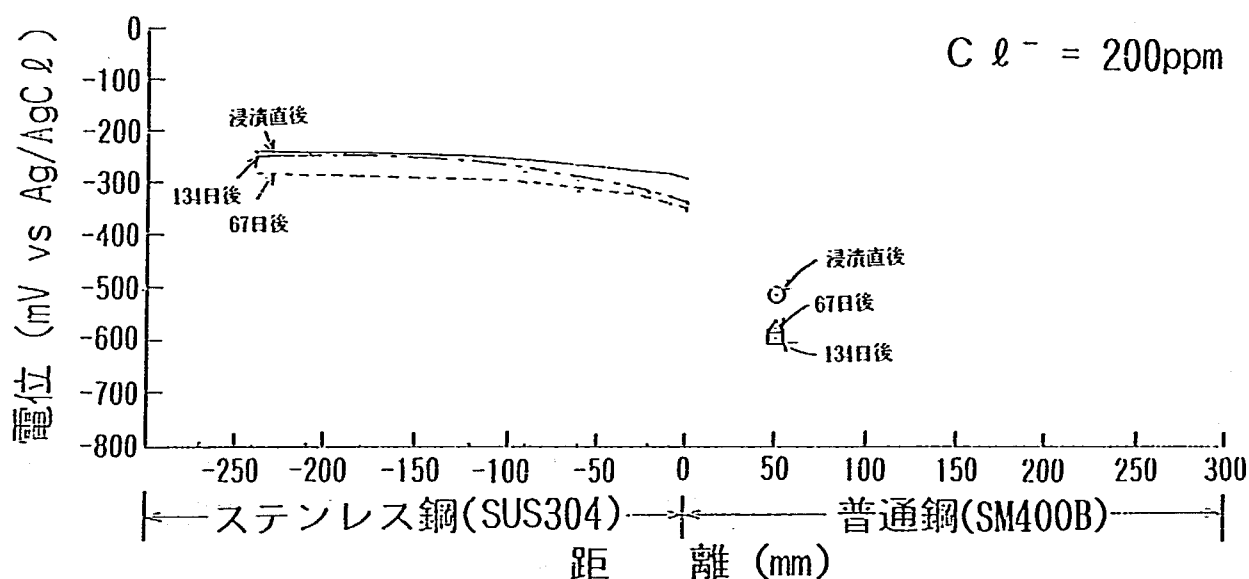
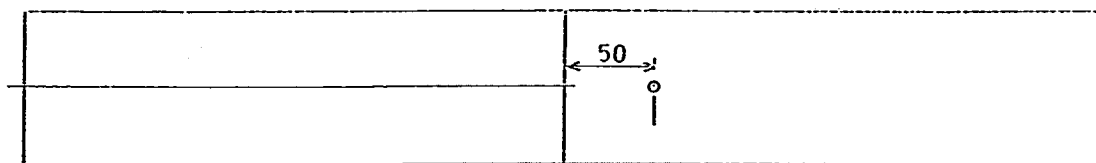


図-2.16(7) 異種金属接合片の電位分布

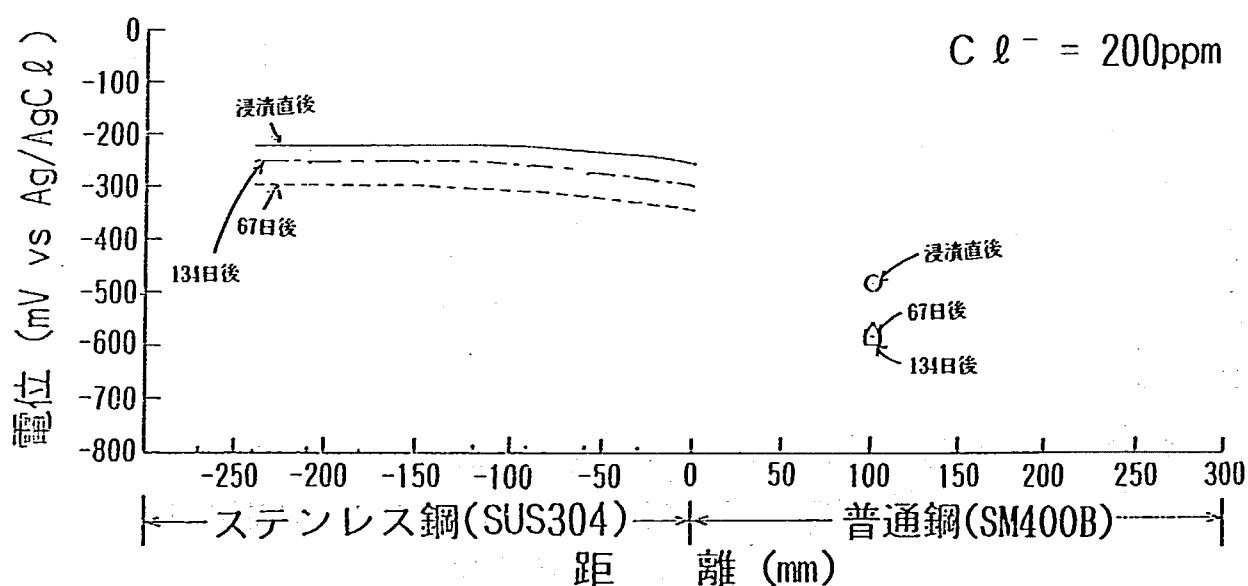
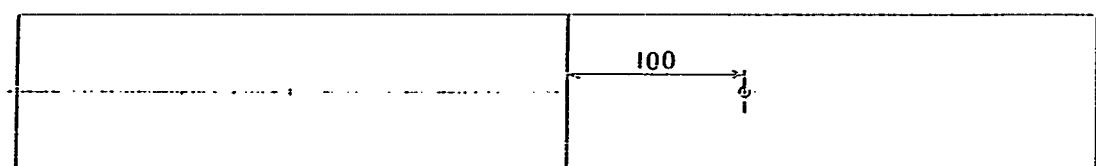


図-2.16(8) 異種金属接合片の電位分布

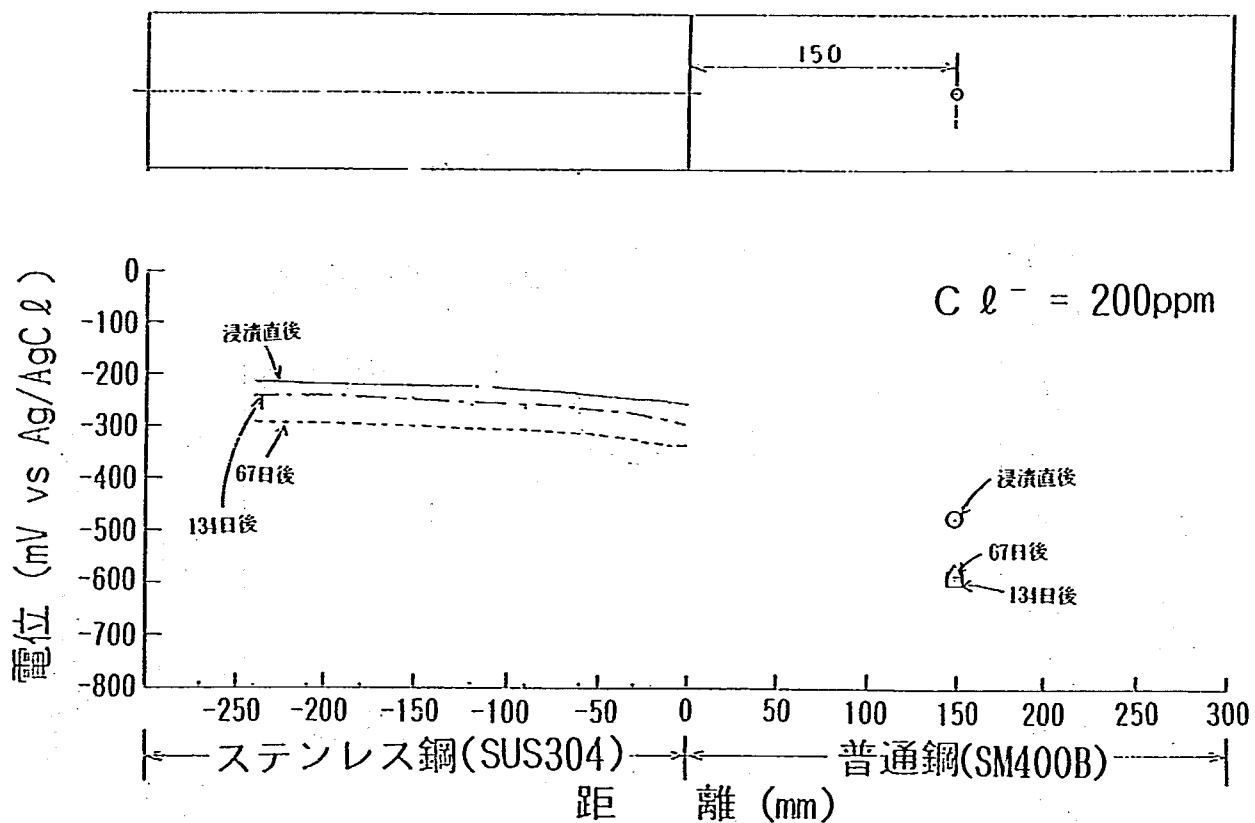


図-2.16(9) 異種金属接合片の電位分布

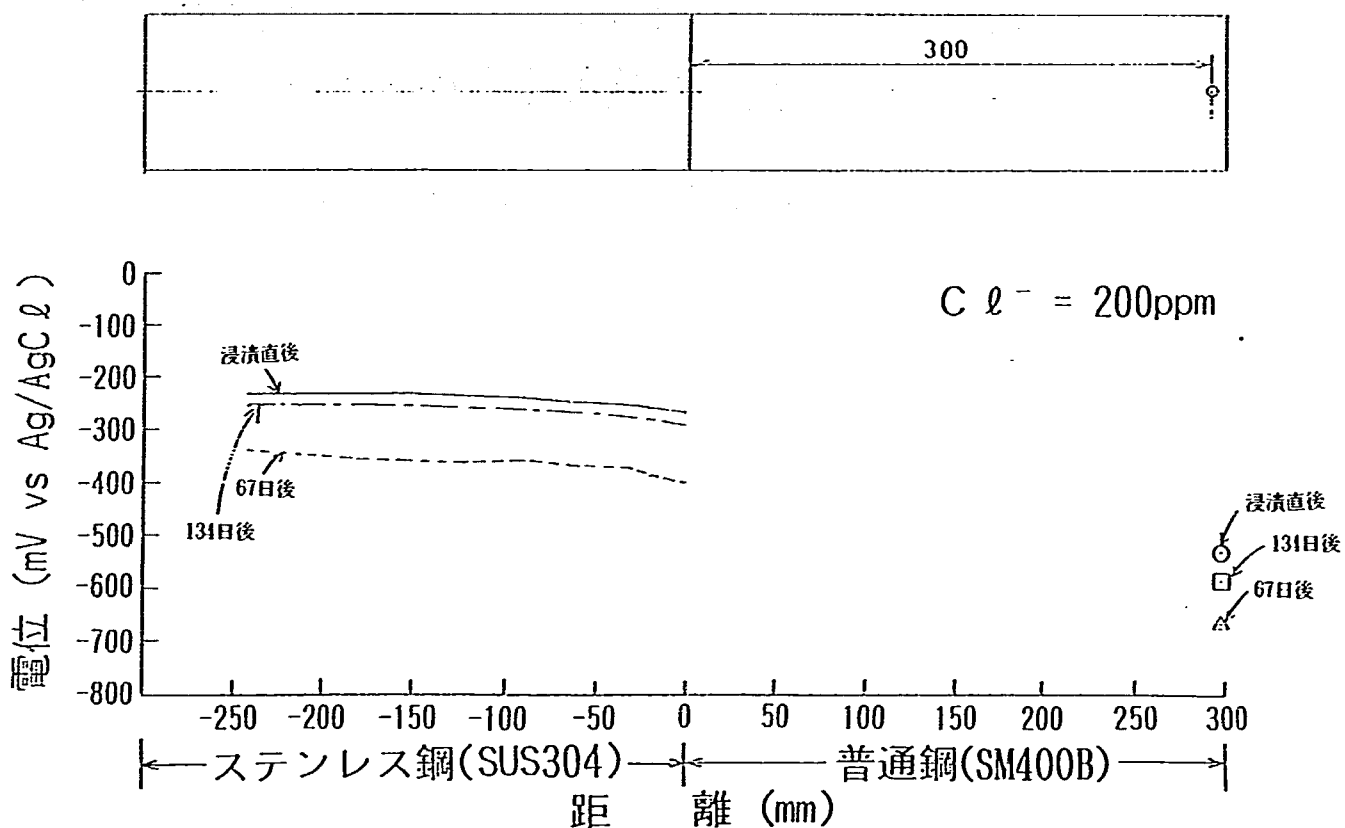


図-2.16(10) 異種金属接合片の電位分布

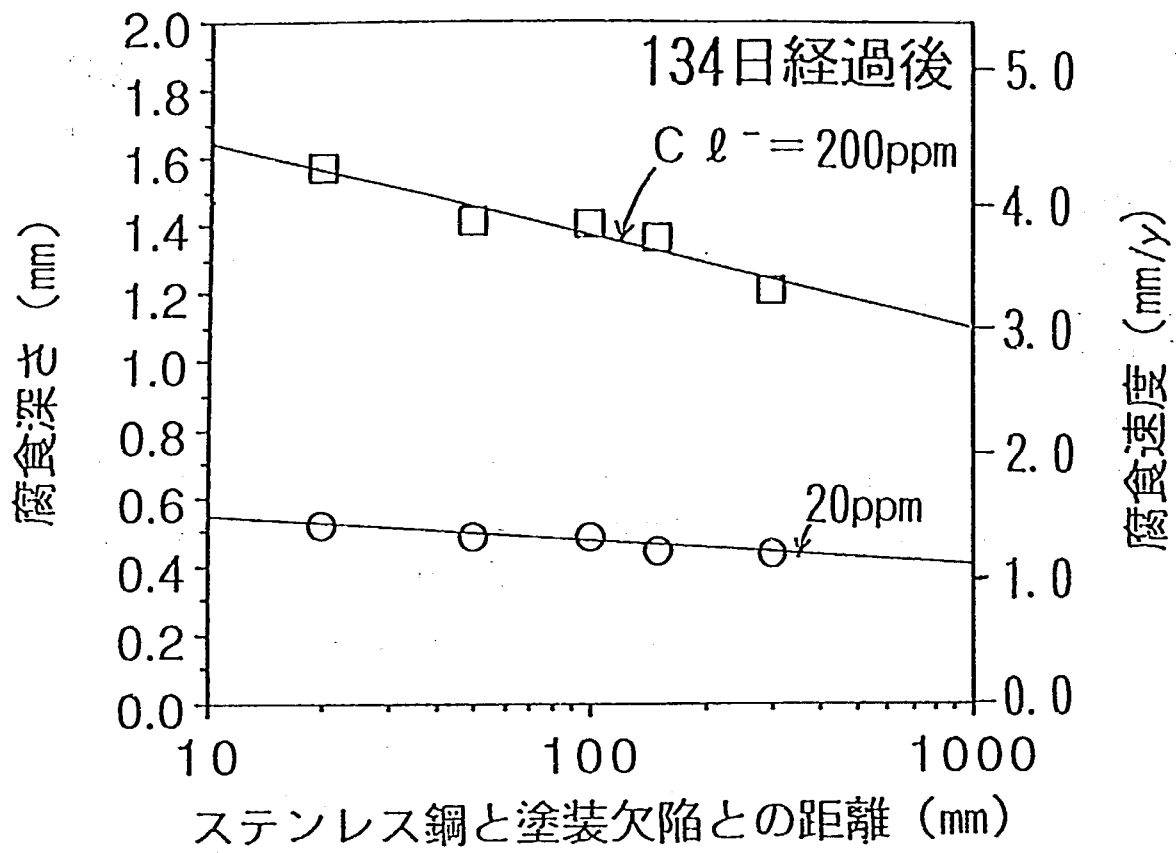


図-2.17 塗装欠陥部の普通鋼腐食深さとステンレス鋼との距離の関係

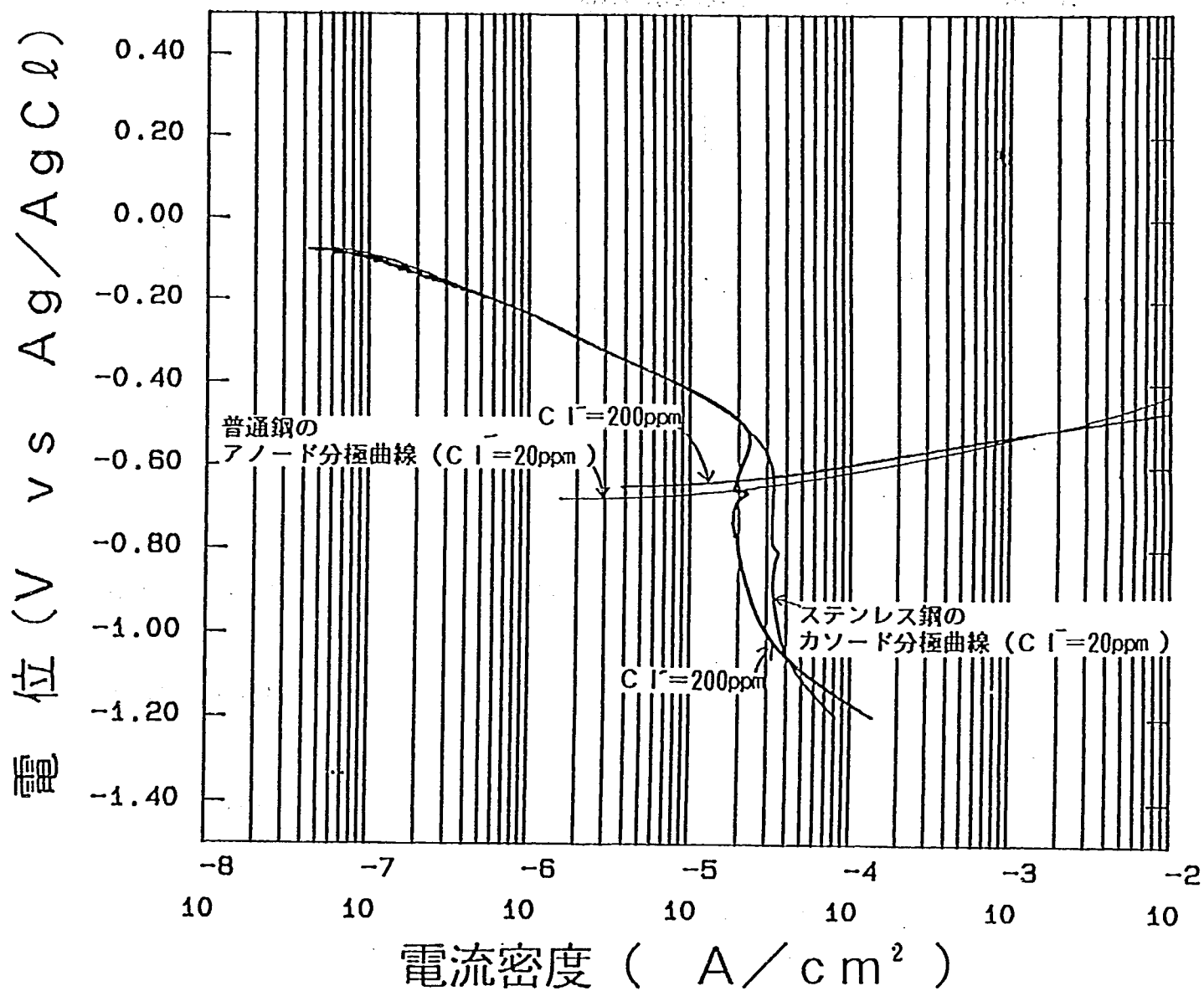


図-2.18 ステンレス鋼および普通鋼の分極曲線

2.4 数値解析による腐食シミュレーション

2.4.1 解析方法

異種金属接触腐食の数値シミュレーションは、材料の非線形な分極特性を境界条件として式(1)に示す2次元ラプラス方程式の解を求めればよい。

$$k \left[\frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y^2} \right] = 0 \quad (1)$$

k : 電気伝導率

ここで、 $\Phi = \Phi(X, Y)$ は、電位であり、座標X, Yによって規定される関数である。解析領域内での電流密度 i (腐食電流密度、腐食速度に比例する) は、式(2)で与えられる。

$$i = -k \frac{\partial \Phi}{\partial n} \quad (2)$$

ここで、nは任意面上での外向法線である。

式(1)を解くための境界条件は(3)式で表される。

$$i = f(\Phi) \quad (3)$$

ここで、 $f(\Phi)$ は、電位によって規定される関数で電気化学的実験によって i と Φ の関係を図示した曲線(分極曲線)が得られる。

式(1)をある領域内で解く際に、離散化された有限要素式を組みあげると最終的に次のように表現できる。

$$[k] \{\Phi\} = \{I\} \quad (4)$$

[k] : 電気伝導マトリックス

{ Φ } : 節点電位ベクトル

{I} : 電流ベクトル

式(4)で表される連立方程式を解き、領域内及び試料表面での電位分布及び電流を求めた。なお、式(3)で示す分極曲線は図-2.18で示すものを使用した。

2.4.2 数値解析結果と実験結果の比較

A, B, Cタイプについて、数値解析に用いたメッシュ分割図と解析結果の電流線図を塩素イオン濃度 20ppmの場合の例を図-2.19に示す。解析より得られたAタイプ供試体の電位及び電流密度分布と距離の関係を図-2.20に、Bタイプ供試体の結果を図-2.21に、Cタイプ供試体の結果を図-2.22に示す。また、解析より得られたCタイプ供試体の欠陥位置による電流密度と距離の関係を図-2.23, 24 に示す。さらに、Aタイプ供試体の解析値と浸漬 134日後の実

験値との電位分布の比較結果を図-2.25に、Bタイプ供試体を図-2.26に示す。Cタイプ供試体の同様の電位分布の比較結果並びに腐食速度分布の比較結果を図-2.27～28に示す。

数値解析より求めた電流から算出した最大腐食速度と実験で得られた最大腐食速度との比較を表-2.7に示す。

表-2.7 数値解析値と実験値の比較

腐食速度(mm/年)				(数値解析値(max)/実験値(max))	
塩素イオン濃度				20ppm	200ppm
試験条件	Aタイプ			1.97 / 0.35	2.13 / 0.38
	Bタイプ			1.57 / 0.59	3.01 / 0.75
	Cタイプ	試験片間距離	20mm	1.27 / 1.42	4.94 / 4.28
			50mm	0.894 / 1.34	3.61 / 3.84
			100mm	0.570 / 1.34	2.68 / 3.81
			150mm	0.380 / 1.23	2.15 / 3.72
			300mm	0.220 / 1.20	1.30 / 3.30

試験条件に合わせてステンレス鋼と普通鋼の異種金属接触腐食を二次元有限要素法で数値解析した結果、アノード部の電位分布については良好な相関が得られた。

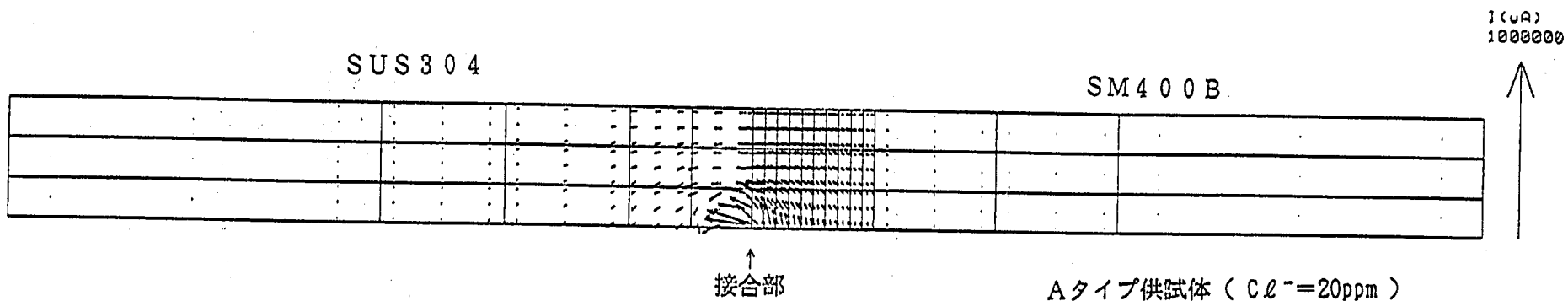
腐食速度に関して、Aタイプ試験片では実験値に比べ数値解析値が6倍程度大きくなっている。これは、数値解析では溶接部を考慮しておらず、ステンレス鋼と普通鋼が直接接触しているモデルとして解析したため、接合部直近で過大な腐食速度となったものと思われる。

Bタイプ試験片でも、実験値に比べて数値解析値が3～4倍程度大きくなっているのは、解析においてクラッド面に存在する合金層を考慮しておらず、ステンレス鋼と普通鋼が直接接合されているモデルで行ったため、接合部直近で過大な腐食速度となったものと思われる。

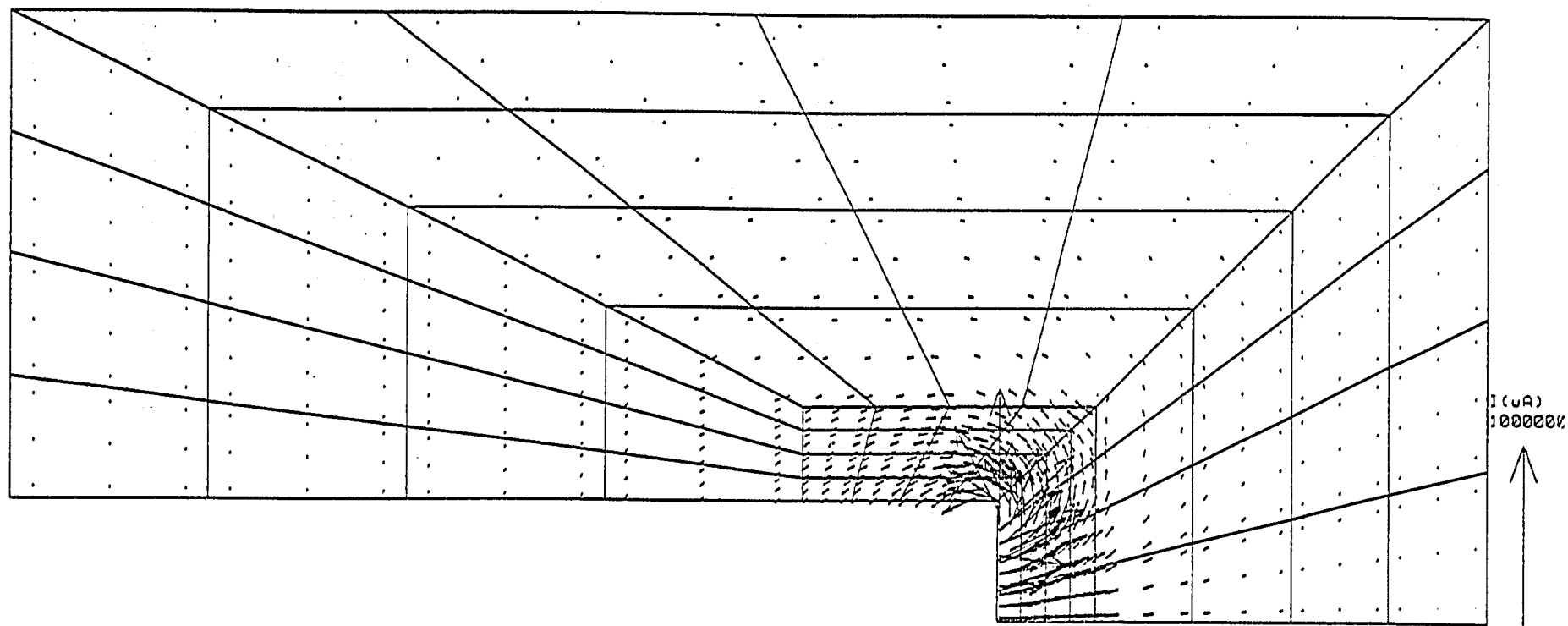
Cタイプ試験片の塗膜欠陥部の普通鋼の腐食速度は、淡水、海水中における鋼の平均腐食速度0.2mm/年程度に比べて非常に大きくなっている。これは、ステンレス鋼と普通鋼の面積比が1000と非常に大きいため、小面積の普通鋼アノード部にガルバニック電流が集中したためと考えられる。一般的には、塗膜欠陥部の腐食速度は、塩素イオン濃度の影響を強く受けるため、淡水環境では腐食速度は小さくなると考えられる。

また、数値解析では、2次元解析手法によっているため、実際には3次元的に広がって流れ

るガルバニック電流を一定幅内に押さえ込んだために、見かけの淡水中の抵抗が大きくなったものと思われる。したがって、塗膜欠陥が20mm位置にある場合の腐食速度は良く一致しているものの距離とともに解析値の方が下回ってしまったものと考えられる。また、実験では普通鋼表面に堆積したさびの影響などにより腐食速度が一層加速されたことも考えられる。



Aタイプ供試体 (Cl⁻=20ppm)



Bタイプ供試体 (Cl⁻=20ppm)

図-2.19(1) メッシュ分割図と電流線図

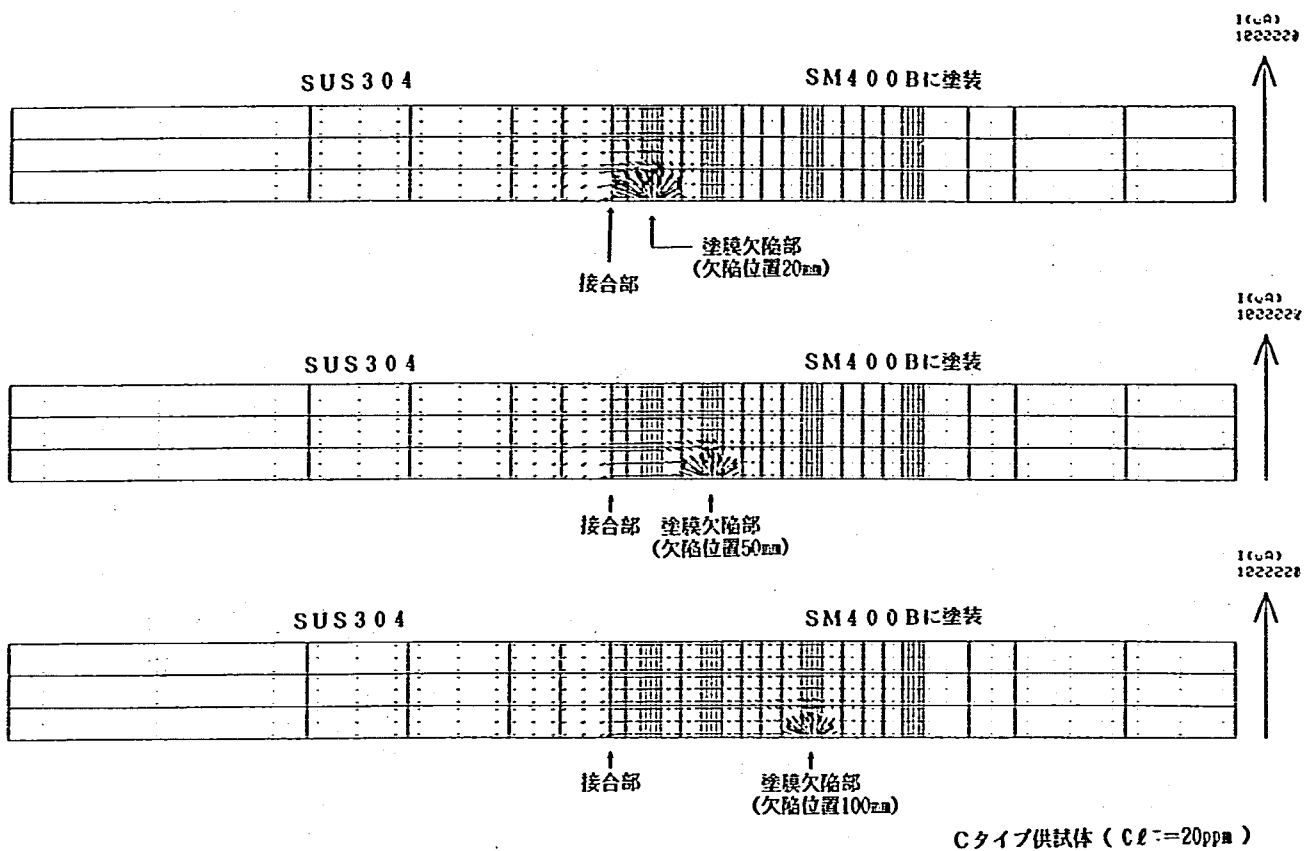


図-2.19(2) メッシュ分割図と電流線図

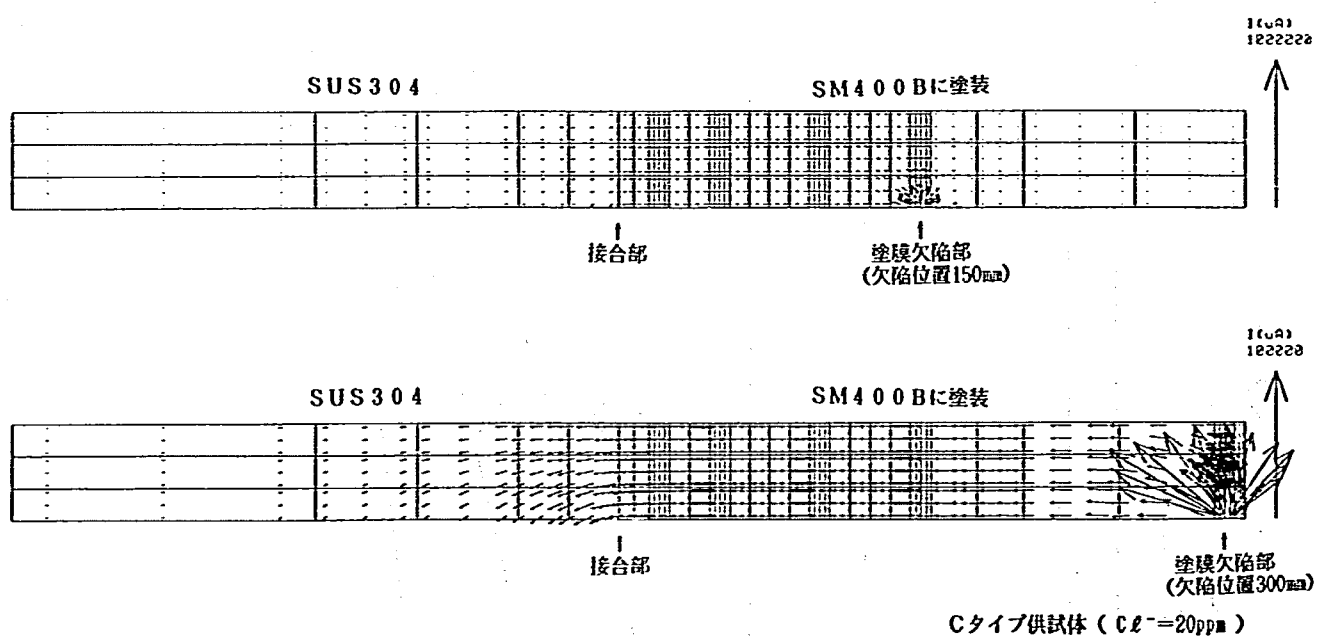


図-2.19(3) メッシュ分割図と電流線図

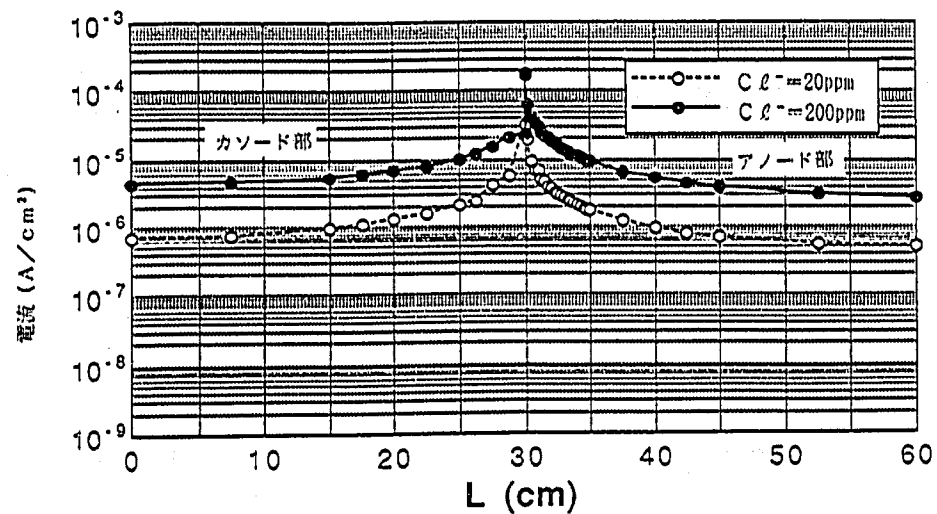
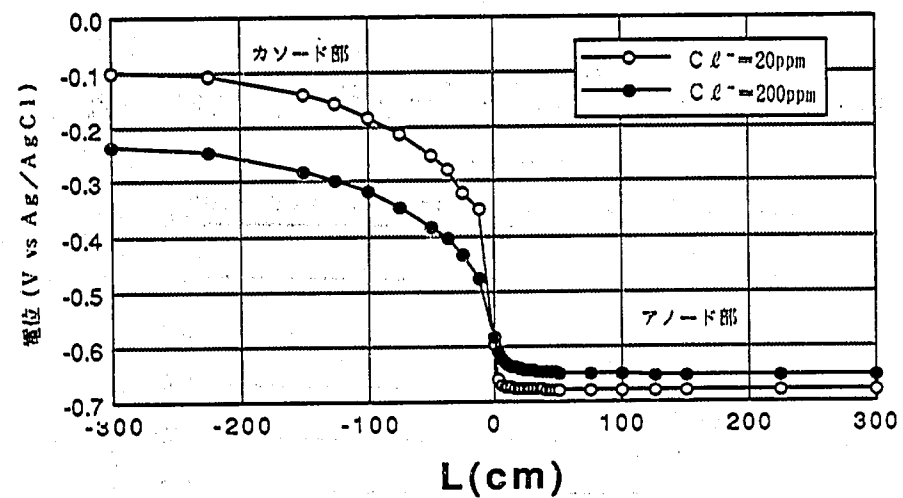


図-2.20 電位及び電流密度分布と距離の関係
(Aタイプ供試体 水深50mm)

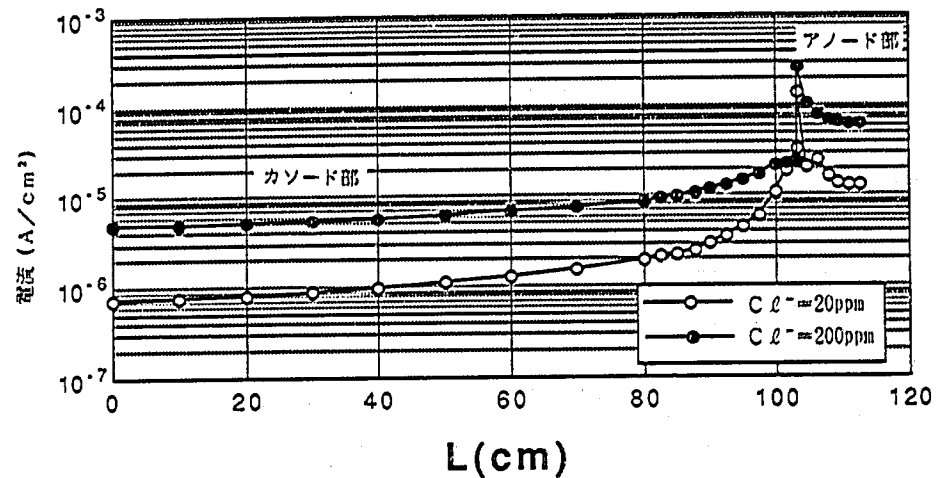
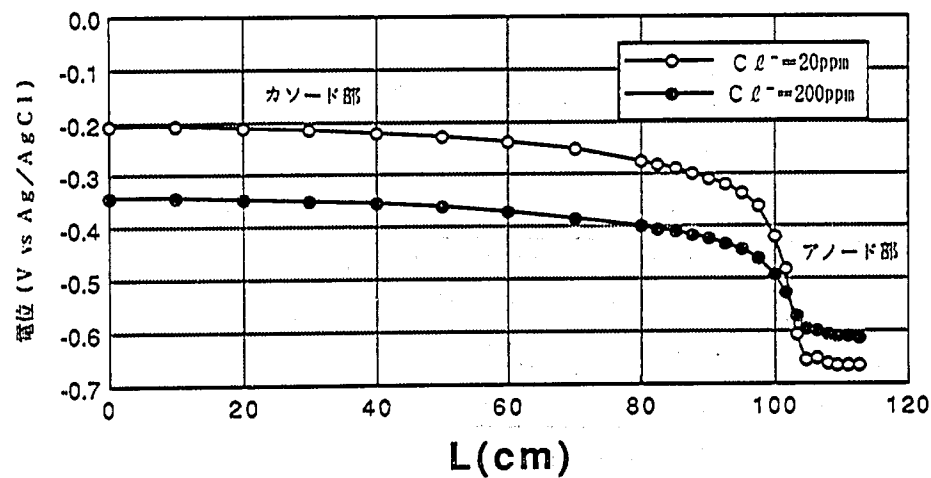


図-2.21 電位及び電流密度分布と距離の関係
(Bタイプ供試体 水深50mm)

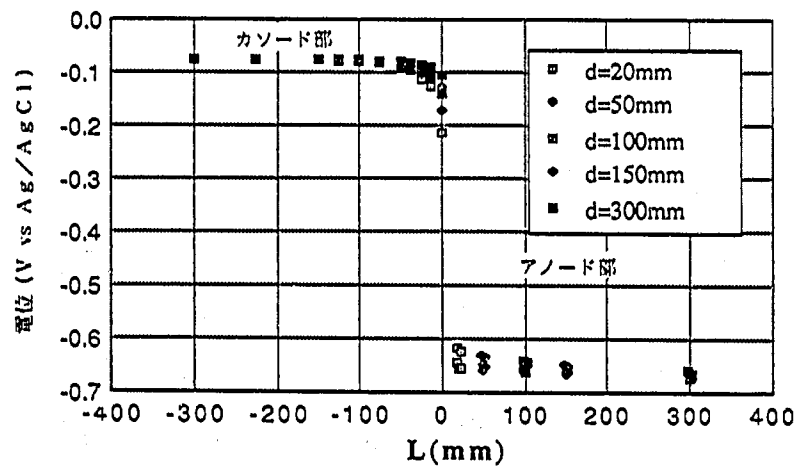


図-2.22(1) Cタイプ供試体の電位分布と塗膜欠陥位置の関係
(水深50mm, $C\ell^- = 20\text{ppm}$)

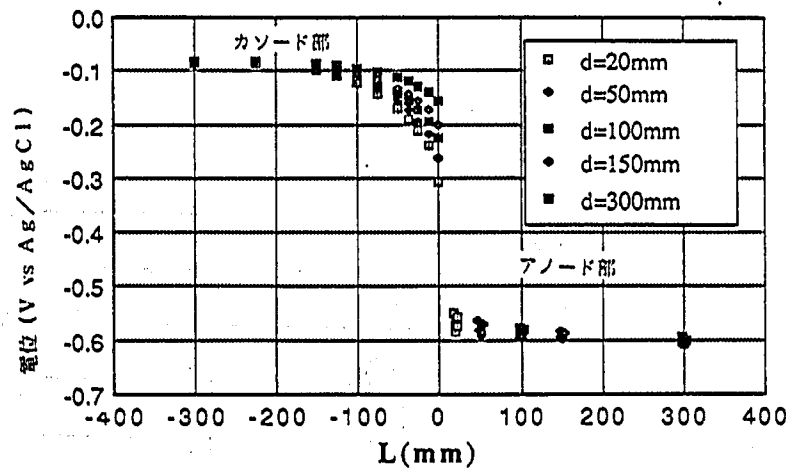


図-2.22(2) Cタイプ供試体の電位分布と塗膜欠陥位置の関係
(水深50mm, $C\ell^- = 200\text{ppm}$)

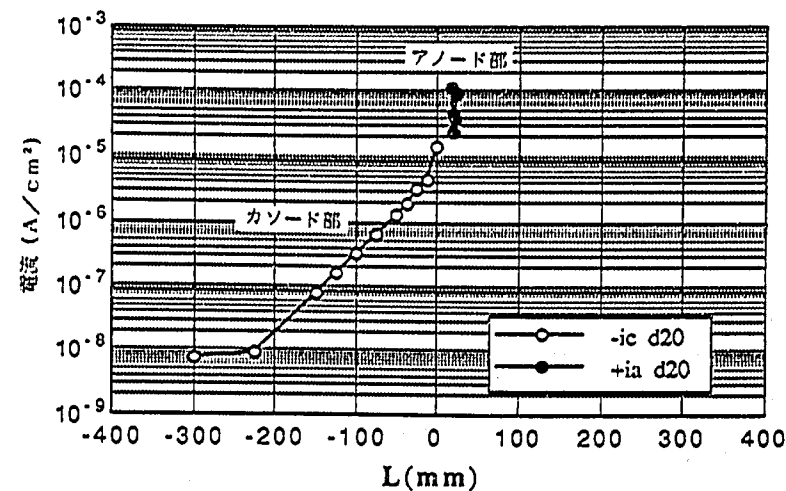


図-2.23(1) Cタイプ供試体の電流密度と塗膜欠陥位置の関係
(塗膜欠陥位置20mm, $C\ell^- = 20\text{ppm}$)

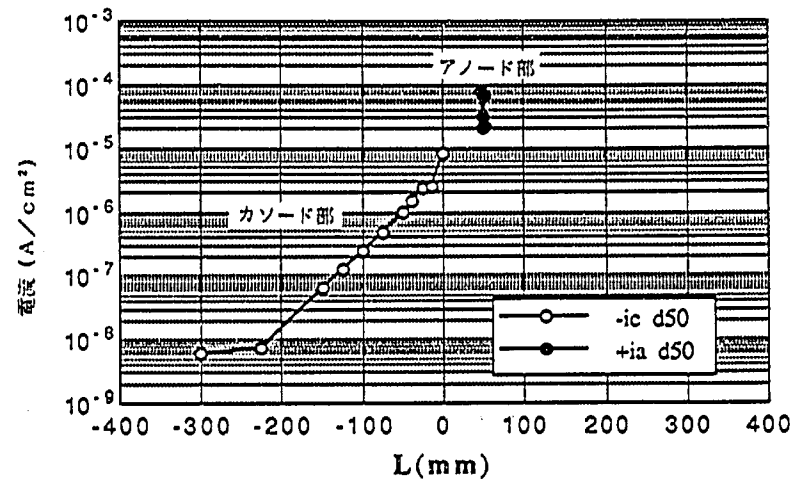


図-2.23(2) Cタイプ供試体の電流密度と塗膜欠陥位置の関係
(塗膜欠陥位置50mm, $C\ell^- = 20\text{ppm}$)

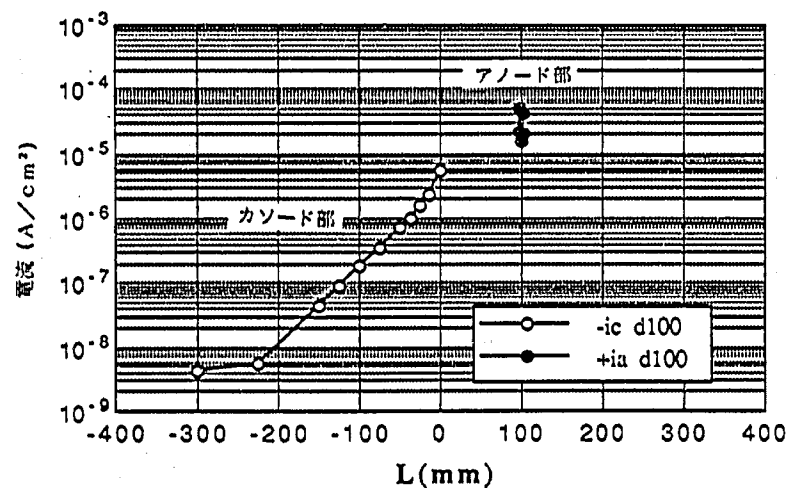


図-2.23(3) Cタイプ供試体の電流密度と塗膜欠陥位置の関係
(塗膜欠陥位置100mm, $C\ell^- = 20\text{ppm}$)

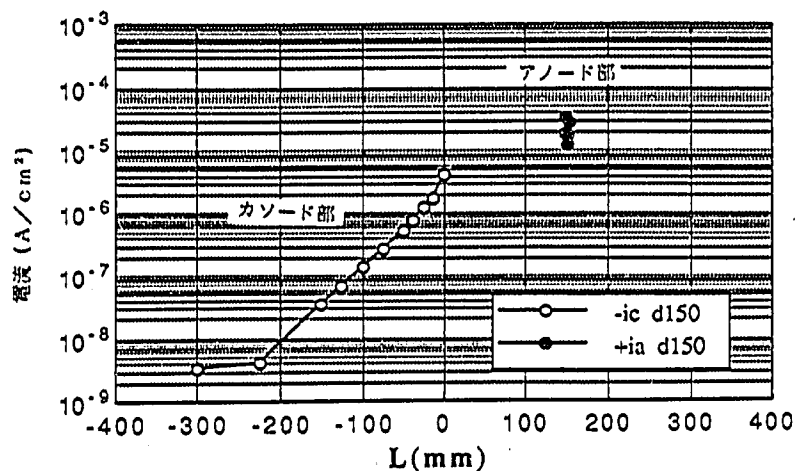


図-2.23(4) Cタイプ供試体の電流密度と塗膜欠陥位置の関係
(塗膜欠陥位置150mm, $C\ell^- = 20\text{ppm}$)

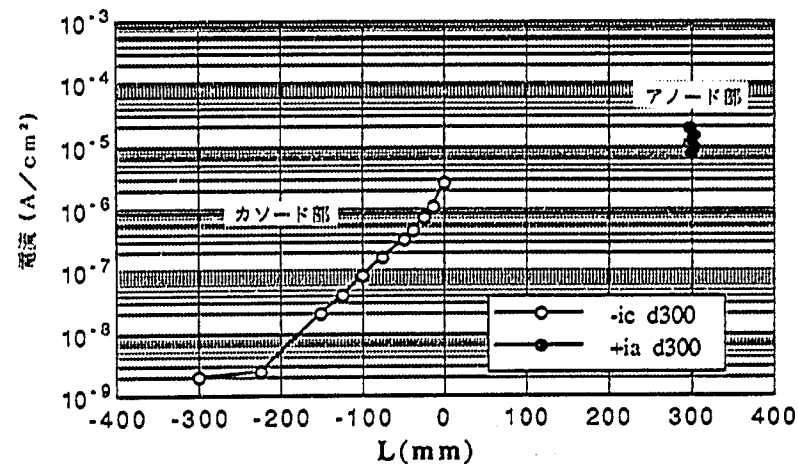


図-2.23(5) Cタイプ供試体の電流密度と塗膜欠陥位置の関係
(塗膜欠陥位置300mm, $C\ell^- = 20\text{ppm}$)

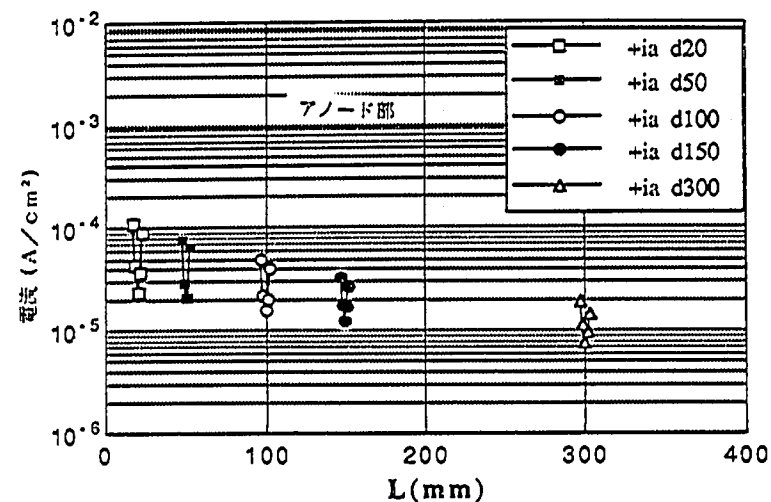


図-2.23(6) Cタイプ供試体の電流密度と塗膜欠陥位置の関係
(塗膜欠陥位置20mm~300mm, $C\ell^- = 20\text{ppm}$)

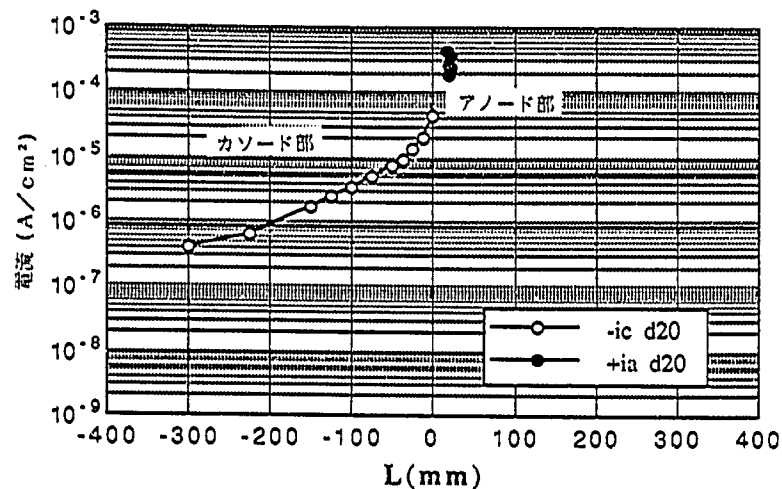


図-2.24(1) Cタイプ供試体の電流密度と塗膜欠陥位置の関係
(塗膜欠陥位置20mm, $C\ell^- = 200\text{ppm}$)

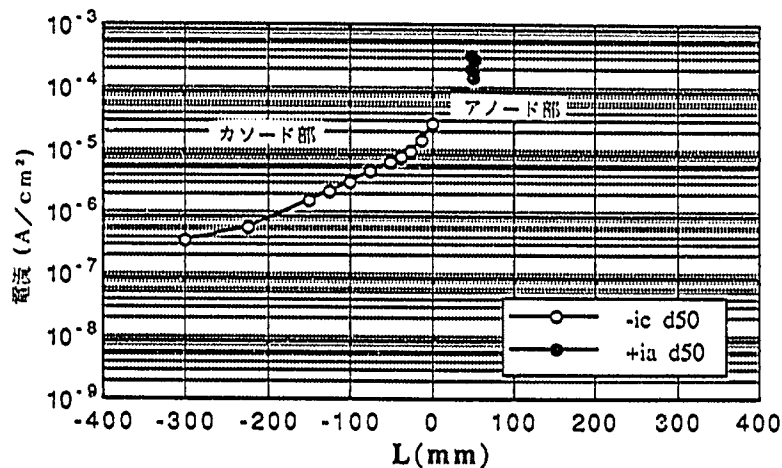


図-2.24(2) Cタイプ供試体の電流密度と塗膜欠陥位置の関係
(塗膜欠陥位置50mm, $C\ell^- = 200\text{ppm}$)

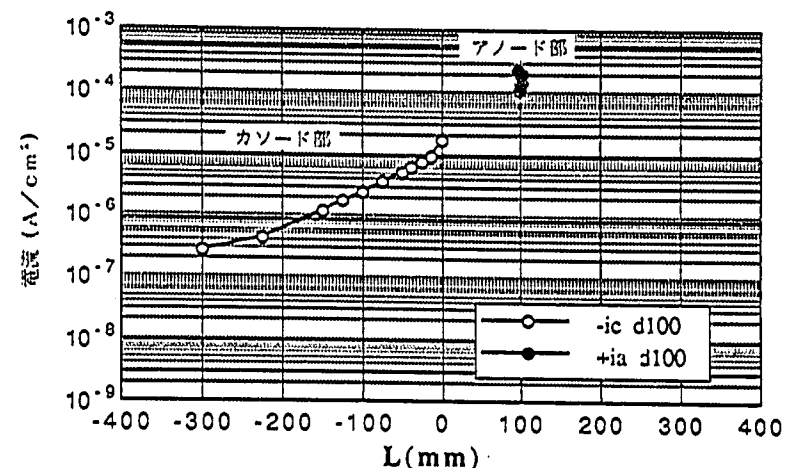


図-2.24(3) Cタイプ供試体の電流密度と塗膜欠陥位置の関係
(塗膜欠陥位置100mm, $C\ell^- = 200\text{ppm}$)

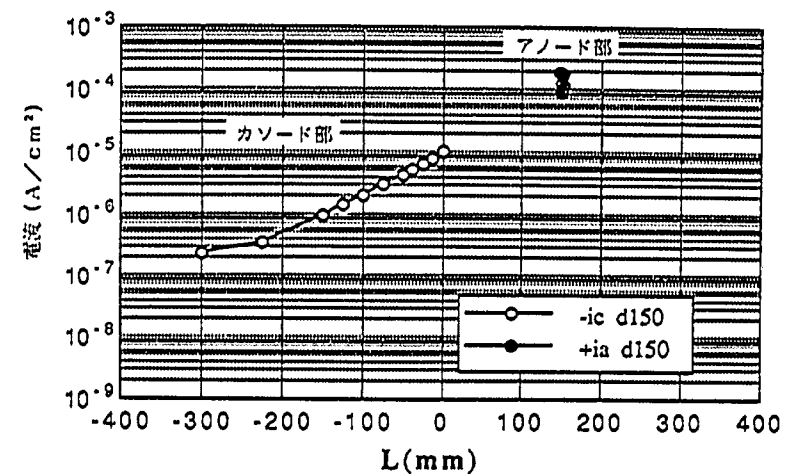


図-2.24(4) Cタイプ供試体の電流密度と塗膜欠陥位置の関係
(塗膜欠陥位置150mm, $C\ell^- = 200\text{ppm}$)

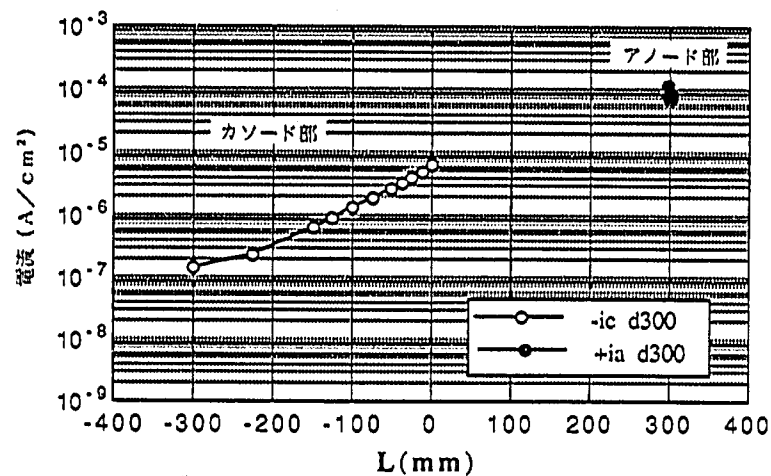


図-2.24(5) Cタイプ供試体の電流密度と塗膜欠陥位置の関係
(塗膜欠陥位置300mm, $C\ell^- = 200\text{ppm}$)

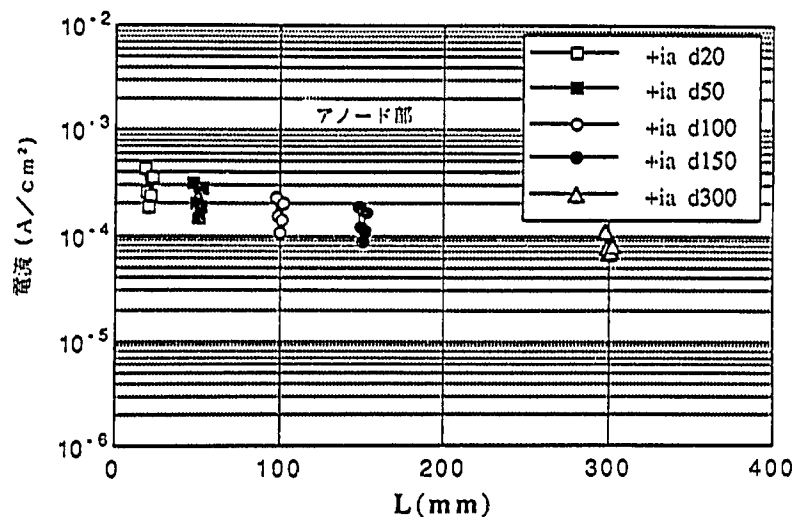


図-2.24(6) Cタイプ供試体の電流密度と塗膜欠陥位置の関係
(塗膜欠陥位置20mm~300mm, $C\ell^- = 200\text{ppm}$)

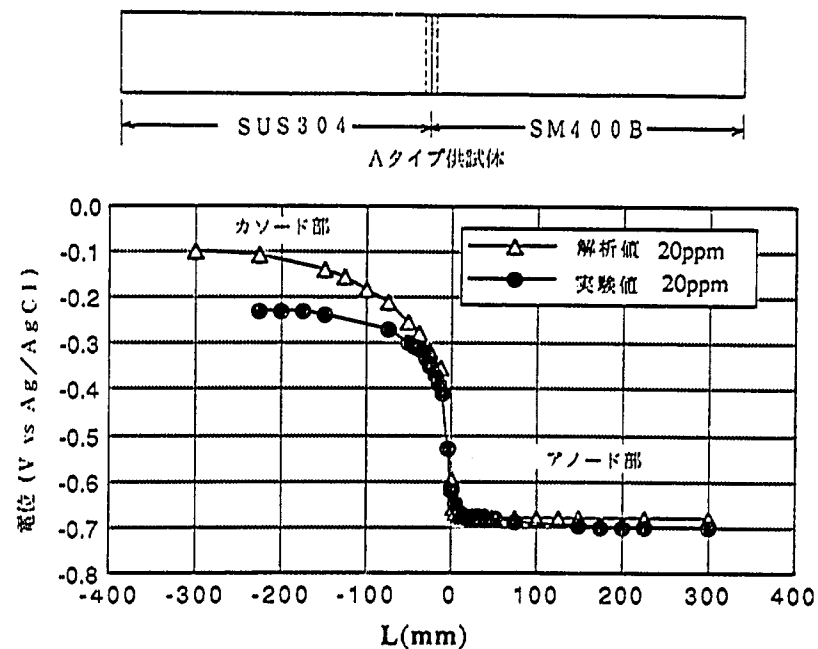


図-2.25(1) Aタイプ供試体の解析値と実験値の電位分布の比較
($C\ell^- = 20\text{ppm}$)

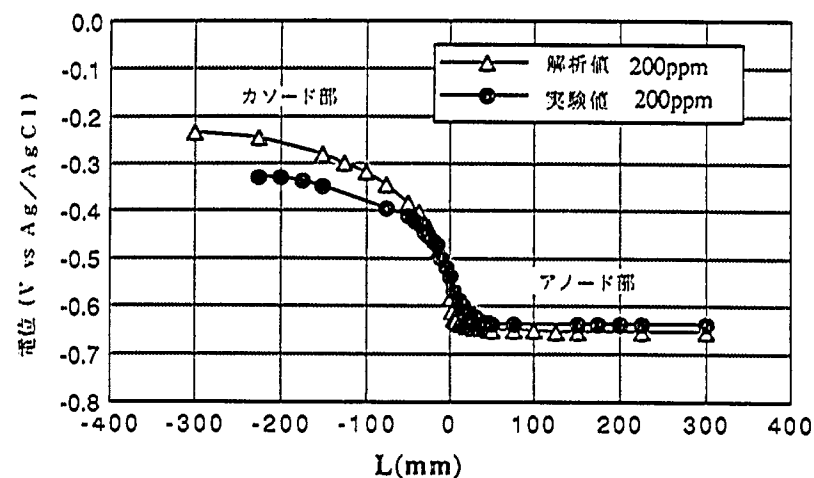


図-2.25(2) Aタイプ供試体の解析値と実験値の電位分布の比較
($C\ell^- = 200\text{ppm}$)

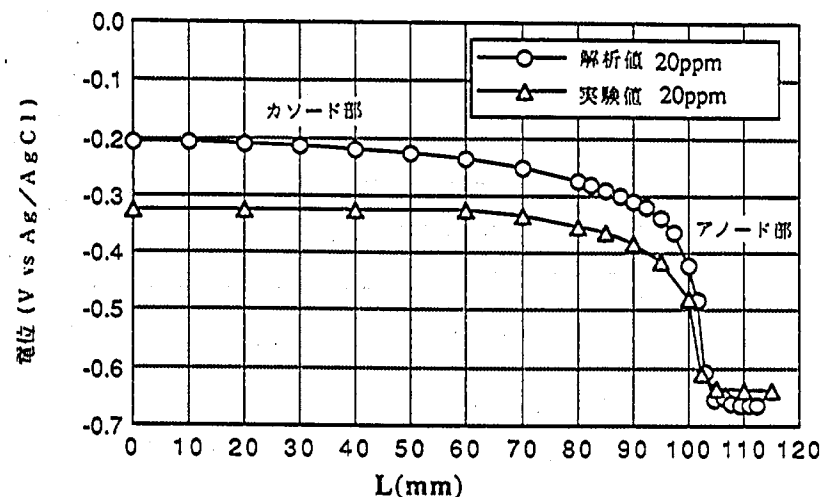
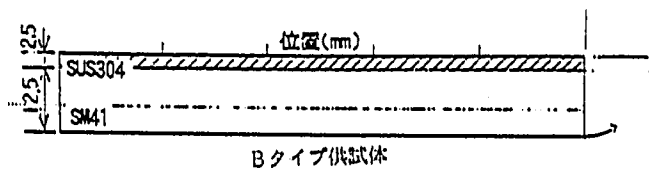


図-2.26(1) Bタイプ供試体の解析値と実験値の電位分布の比較
($Cl^- = 20ppm$)

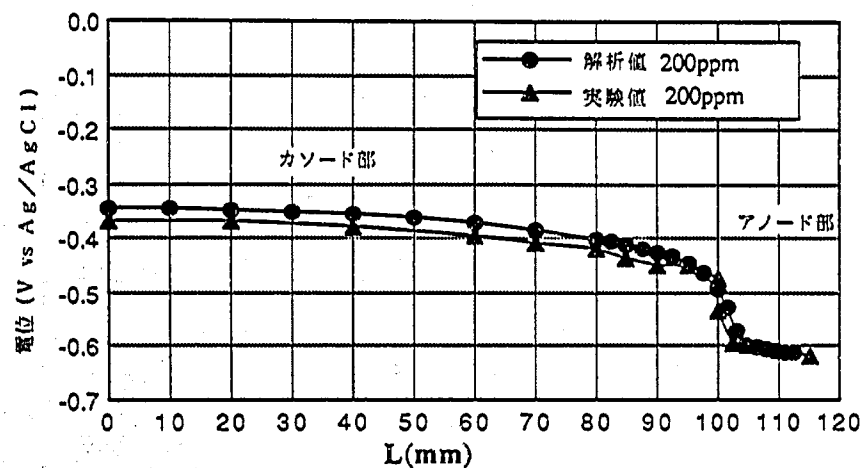


図-2.26(2) Bタイプ供試体の解析値と実験値の電位分布の比較
($Cl^- = 200ppm$)

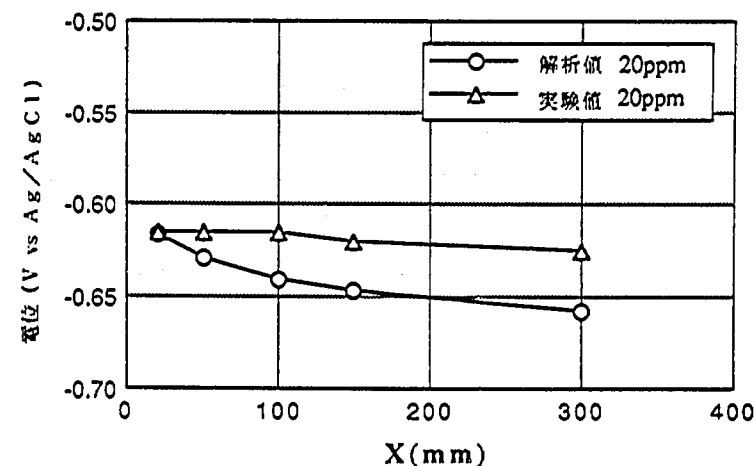
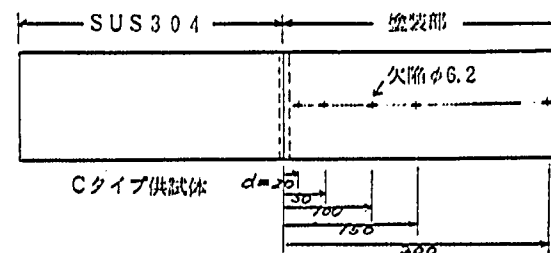


図-2.27(1) Cタイプ供試体の解析値と実験値の電位分布の比較
($Cl^- = 20ppm$)

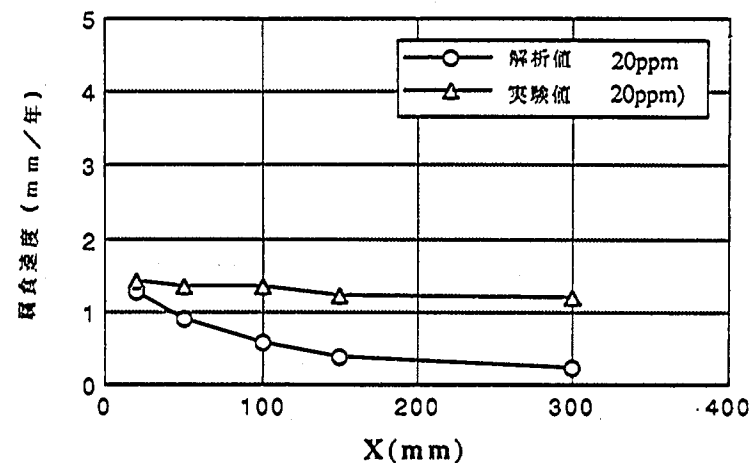


図-2.27(2) Cタイプ供試体の解析値と実験値の腐食速度分布の比較
($Cl^- = 20ppm$)

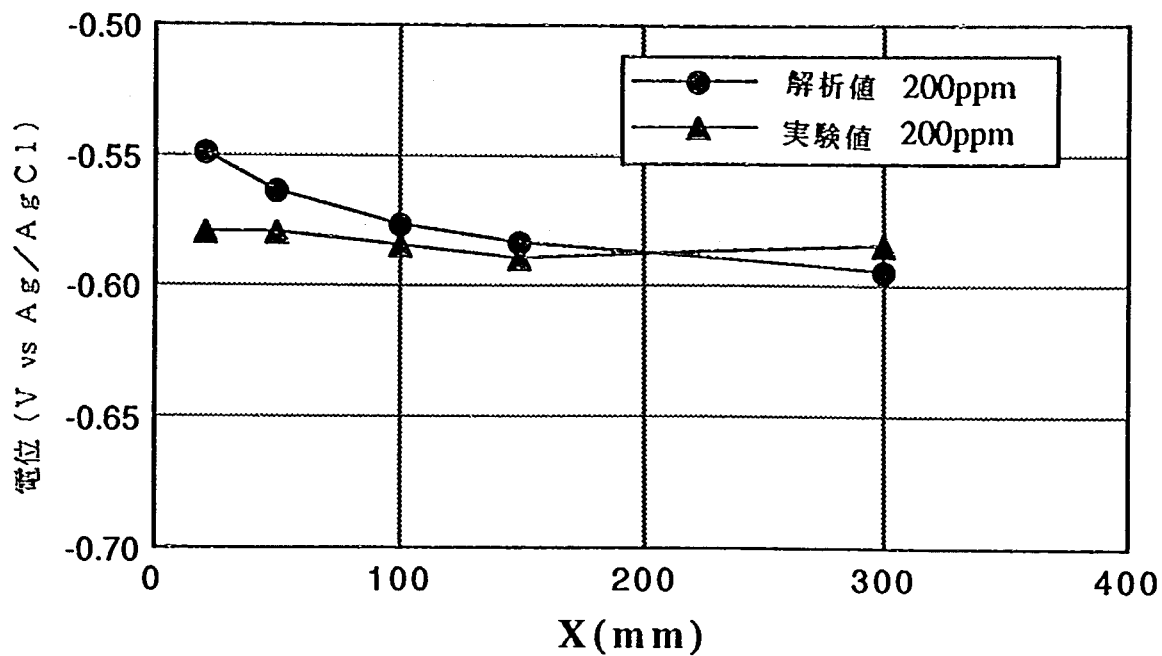


図-2.28(1) Cタイプ供試体の解析値と実験値の電位分布の比較
($\text{Cl}^- = 200\text{ppm}$)

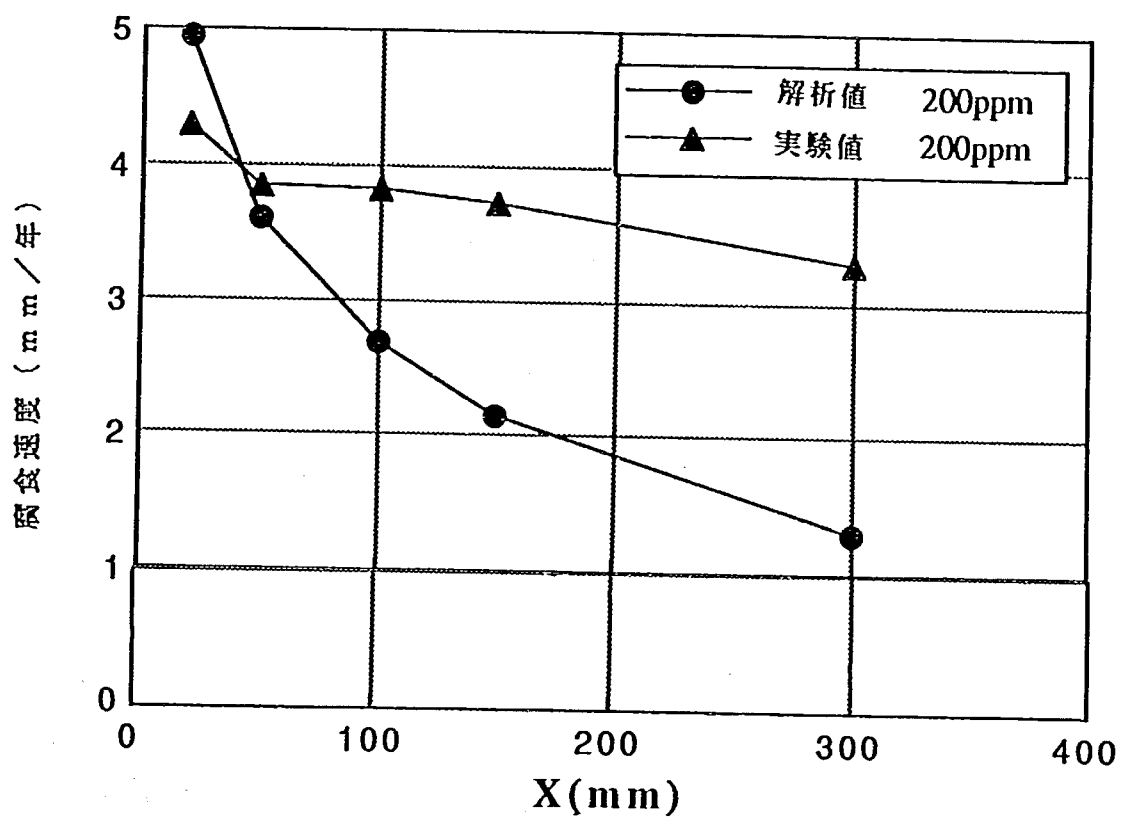


図-2.28(2) Cタイプ供試体の解析値と実験値の腐食速度分布の比較
($\text{Cl}^- = 200\text{ppm}$)

3. すき間腐食試験

淡水環境中におけるステンレスSUS410、SUS430及びSUS304の耐すき間腐食性に及ぼす塩素イオン濃度と温度の影響を明らかにするため、ASTM G78-89(Standard Guide for Crevice Corrosion Testing of Iron-Base and Nickel-Base Stainless Alloys in Seawater and Other Chloride-Containing Aqueous Environments)に準拠してすき間腐食試験を行った。

3.1 試験方法

3.1.1 供試材料

SUS304、SUS410及びSUS430の化学成分を表-3.1に機械的性質を表-3.2に示す。

表-3.1 供試材料の化学成分

(wt%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	板厚(mm)
SUS304	0.04	0.53	1.10	0.034	0.006	8.49	18.35	5
SUS410	0.06	0.42	0.31	0.022	0.007	0.11	12.21	5
SUS430	0.07	0.56	0.37	0.026	0.004	0.11	16.46	5

表-3.2 供試材料の機械的性質

鋼種	引 張 試 験			硬さ試験 (HRB)	曲げ試験 (180°)	溶 体 化 温 度
	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)			
SUS304	33	64	52	86	—	1100℃×25min WC
SUS410	34	49	30	87	良好	850℃×7hr
SUS430	30	46	34	82	良好	—

3.1.2 試験方法

ASTM G78-89に準拠した $t4.7 \times w100 \times l100$ で中央部に $\phi 72\text{mm}$ の穴の開いた試験片表面を湿式研磨600番仕上げを行い、1ℓのトルビーカーにアセトン(980ml)を入れて、その中に試験片1枚ずつ入れて超音波洗浄器で約10分間脱脂洗浄を行った試験片を図-3.1に示す。すき間形成材に図-3.2に示すように装着し、表-3.3に示す試験条件で図-3.3に示すような試験装置で試験を行った。

表-3.3 すき間腐食試験条件

項 目	試 験 条 件
溶 液	塩素イオン濃度 ; 20, 200, 2000, 20000ppm 4 水準
温 度	30℃, 50℃ 2 水準
試験期間	6 ヶ月間
溶存酸素	空気飽和 (バブリング)
すき間治具	ポリサルホン樹脂
締付けトルク	0.9kgf・m
溶液交換	20ppm Cl^- 溶液は、3 ヶ月ごとに溶液更新 (3 ℓ) 200ppm Cl^- 溶液は、更新なし (3 ℓ) 2,000ppm Cl^- 溶液は、1 ヶ月, 3 ヶ月ごとに溶液更新 (3 ℓ) 20,000ppm Cl^- 溶液は、1 ヶ月, 3 ヶ月ごとに溶液更新 (3 ℓ)
試験装置	すき間形成材及びすき間腐食試験片装置状況を図-3.1 に示す。

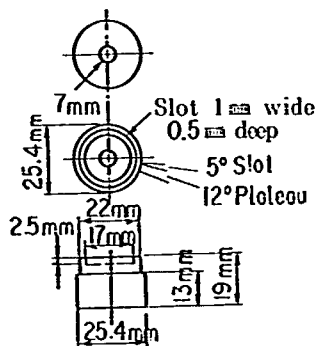


図-3.1 すき間形成材

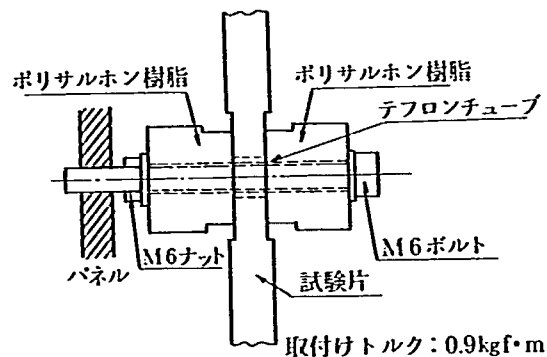


図-3.2 すき間腐食試験片装着状況

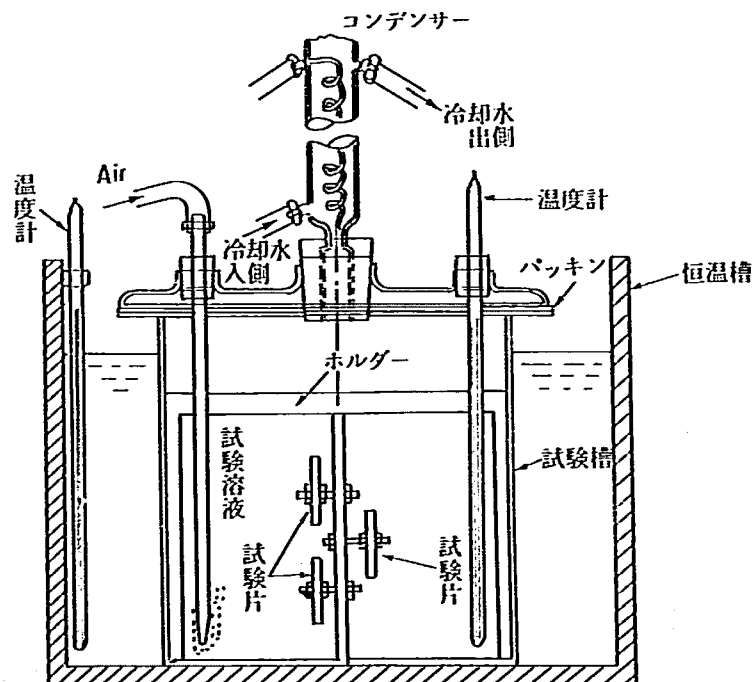


図-3.3 すき間腐食試験装置の概略図

3.2 試験結果

3.2.1 30℃におけるすき間腐食試験

30℃の20~20,000ppm 塩素イオン溶液中におけるSUS410, SUS430及びSUS304のすき間腐食試験結果を表-3.4, 図-3.4, 3.5 及び写真-3.1 に示す。

(1) SUS 4 1 0

20ppm塩素イオン溶液中で6ヶ月すき間腐食試験を行った結果、試験片の表側（マーク側）のみに深さが0.24mmのすき間腐食が1点生じた。すき間腐食発生率は2.5%であった。

塩素イオン2,000ppm及び20,000ppm 溶液中で6ヶ月間のすき間腐食試験を実施する予定であったが、SUS410及びSUS430の腐食が激しい為、赤さびの発生が多くなり、表-3.5 に示すように溶液の劣化（pH5.08→6.52）が生じた。このため、他の材料への悪影響が危惧されたため3ヶ月間で試験を中止した。

塩素イオン2,000ppm溶液中では試験片の表側及び裏側に、最大深さが0.71mmのすき間腐食が2点と最大深さが1.19mmのすき間腐食が9点生じた。すき間腐食発生率は27.5%であった。

塩素イオン20,000ppm 溶液中では、試験片の表側及び裏側に、最大深さが0.44mmのすき間腐食が12点と最大深さが2.32mmのすき間腐食が20点生じた。すき間腐食発生率は80%で非常に高かった。

塩素イオン20ppm 溶液中ではSUS410に1点のすき間腐食が発生した。すき間腐食発生部位に赤さびが付着していた。塩素イオン2,000ppm溶液中では、すき間部全体にすき間腐食を生じ、赤さびの発生が多かった。さらに、塩素イオン20,000ppm 溶液では、赤さびの発生（付着）が多くなり、ポリサルホン樹脂とのすき間部全体に激しいすき間腐食を生じた。これは、赤さびがポリサルホン樹脂内にたまり、この赤さびの下ですき間腐食が生じたものと考えられる。

(2) SUS 4 3 0

塩素イオン 20ppm及び2,000ppm溶液中で6ヶ月間すき間腐食試験を行った結果、塩素イオン20ppm溶液中ではすき間腐食の発生が認められなかった。

塩素イオン2,000ppm溶液中では、試験片の表側及び裏側に、最大深さが0.98mmのすき間腐食が3点と最大深さが0.02mmのすき間腐食が1点生じた。すき間腐食発生率は10%であった。

塩素イオン20,000ppm 溶液中で3ヶ月間すき間腐食試験を行った結果、試験片の表側及び裏側に、最大深さが0.51mmのすき間腐食が3点と、深さが0.23mmのすき間腐食が1点生じた。すき間腐食発生率は10%であった。

SUS430は、塩素イオン 20ppm溶液中ではすき間腐食の発生は認められなかった。

しかし、塩素イオン濃度が 2000ppmに増加すると、すき間腐食が発生し試験片全体に赤さびの発生（付着）が多くなった。特に、塩素イオン濃度が 20,000ppmになるとすき間腐食が著しくなった。

(3) SUS304

塩素イオン 20ppm溶液中では、SUS430と同様にすき間腐食の発生は認められず、耐すき間腐食性に優れていた。

塩素イオン2,000ppm溶液中では、試験片の裏側に深さが0.03mmの極微小のすき間腐食が1点生じた。すき間腐食発生率は小さく2.5%であった。

塩素イオン20,000ppm 溶液中では試験片の表側に深さが0.16mmのすき間腐食が2点生じた。すき間腐食発生率は5%であった。

表-3.4 30℃におけるすき間腐食試験結果

鋼 種	記号	塩素イオン濃度 (ppm)	試験時間 (月)	すき間腐食深さ (mm)		すき間腐食発生率 (%)
				表側 (マーク側)	裏側 (マーク反対側)	
SUS410	A1	20	6	0.24 (1点)	0	2.5
	A2	2,000	3	0.70, 0.71, (2点)	0.45, 1.24, 0.43, 0.97, 0.19, 0.82, 0.47, 0.26, 0.76(9点)	27.5
	A3	20,000	3	0.37, 0.22, 0.15, 0.21, 0.24, 0.29, 0.21, 0.44, 0.29, 0.21(12点)	0.81, 0.47, 0.55, 0.67, 0.87, 0.49, 0.86, 0.53, 0.96, 2.32, (20点)	80
SUS430	A1	20	6	0	0	0
	A2	2,000	6	0.15, 0.12, 0.98(3点)	0.02(1点)	10
	A3	20,000	3	0.51, 0.25, 0.31(3点)	0.23(1点)	10
SUS304	A1	20	6	0	0	0
	A2	2,000	6	0	0.03(1点)	2.5
	A3	20,000	6	0.14, 0.16(3点)	0	5

表-3.5 試験溶液のpH変化

試験温度 (℃)	塩素イオン濃度 (ppm)	試験前の pH	1ヶ月後の pH	2ヶ月後の pH	3ヶ月後の pH	6ヶ月後の pH
30	20	6.24	—	—	6.38(6.18)	6.33
	2,000	5.17	6.03(5.23)	—	6.66(5.22)	6.27
	20,000	5.08	6.52(5.02)	—	6.68(5.06)	6.08
50	20	6.24	—	—	6.45(6.18)	6.42
	200	5.33	—	6.02	—	—
	2,000	5.17	5.90(5.23)	—	6.35(5.22)	6.30
	20,000	5.08	6.53(0.52)	—	6.72(5.06)	6.56

() : 新しい溶液

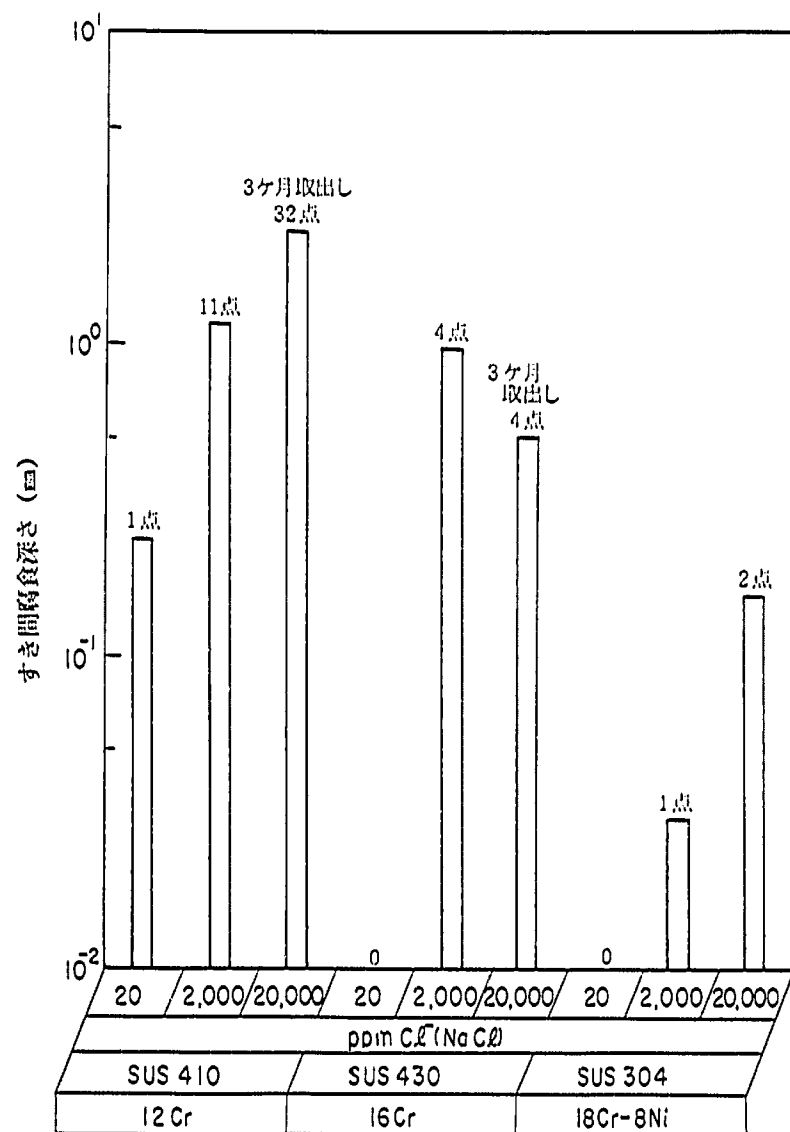


図-3.4 30℃におけるすき間腐食深さ

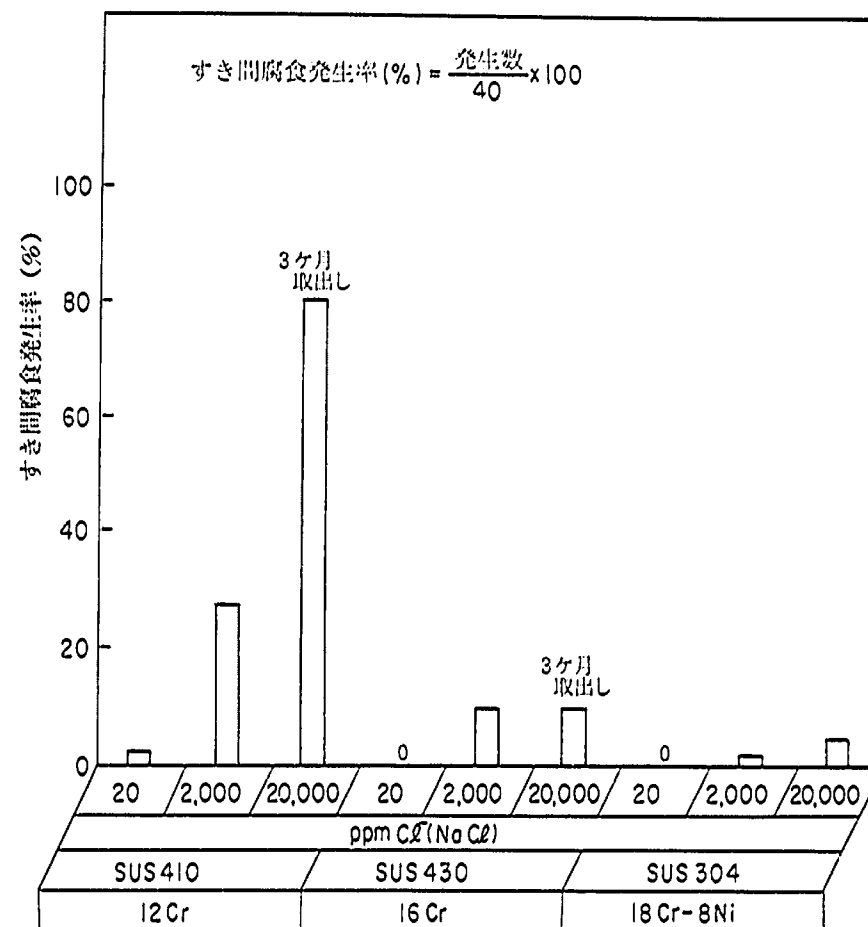


図-3.5 30℃におけるすき間腐食発生率

写真-3.1(1) SUS410鋼のすき間腐食発生状況
(30℃, 20ppmCl⁻ 溶液中6ヶ月浸漬, マルチナルタイナ)

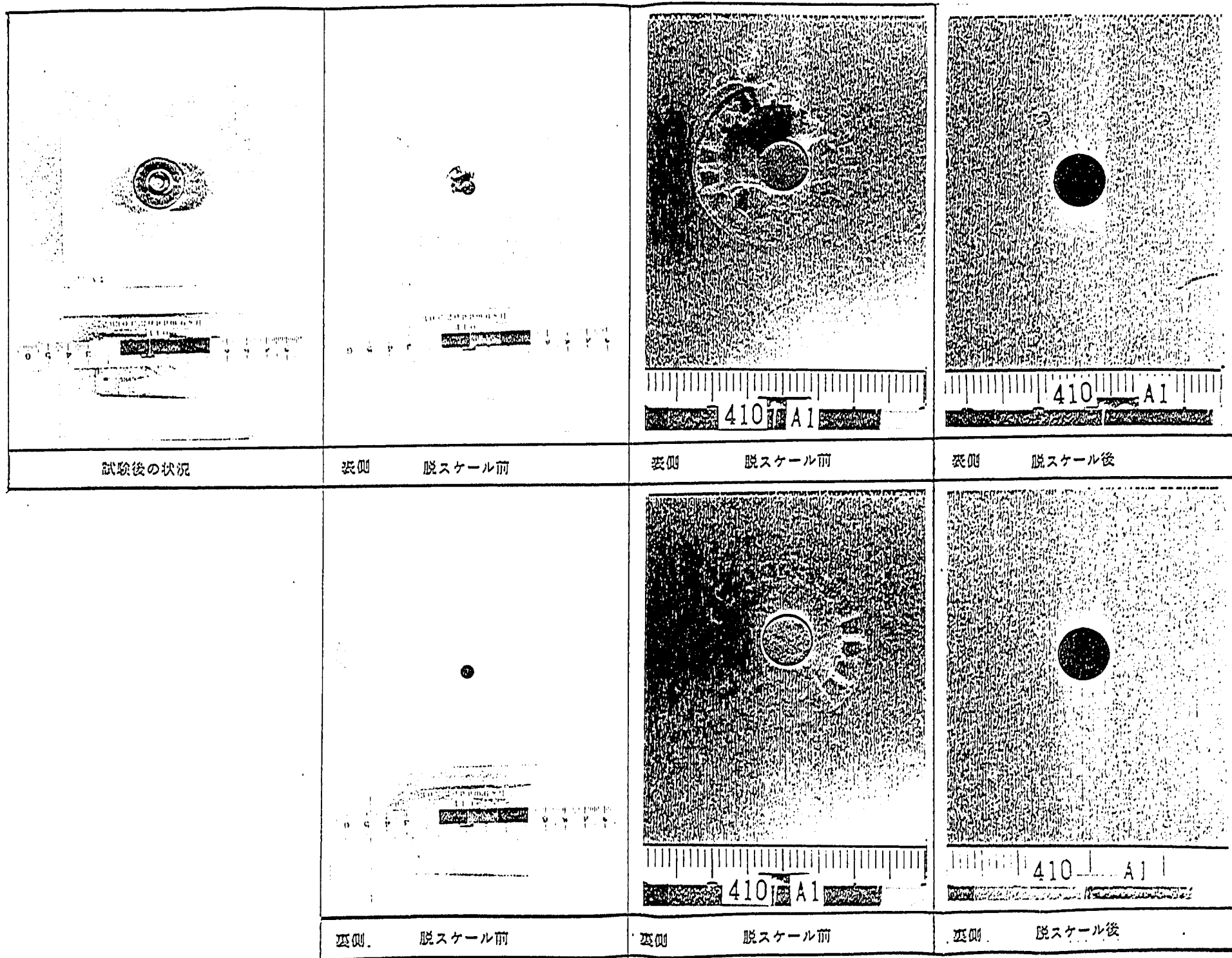


写真-3.1(2) SUS410鋼のすき間腐食発生状況
(30℃, 2,000ppmC_ℓ-溶液中3ヶ月浸漬, マルチフルタイプ)

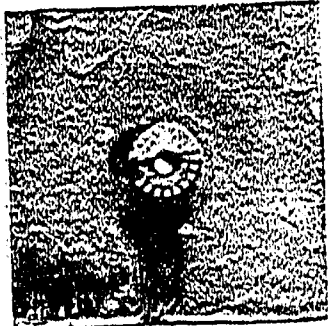
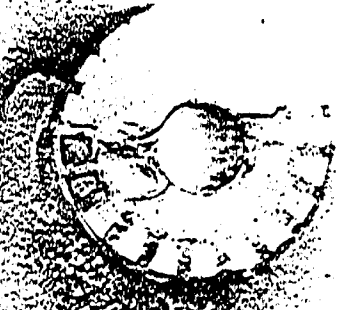
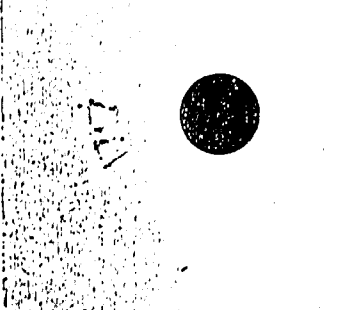
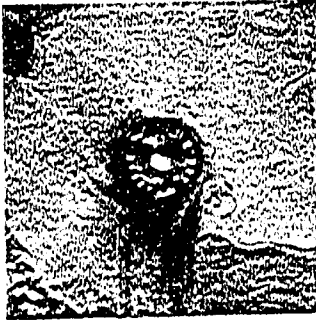
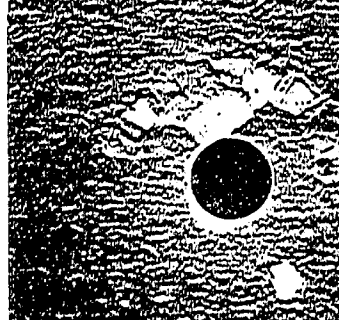
	 410 A2 30°C 2000ppm 3ヶ月	 410 A2	 410 A2
試験後の状況	表側 脱スケール前	表側 脱スケール前	表側 脱スケール後
 410 A2 30°C 2000ppm 3ヶ月	 410 A2	 410 A2	裏側 脱スケール前
裏側 脱スケール前	裏側 脱スケール後		

写真-3.1(3) SUS410鋼のすき間腐食発生状況
(30℃, 20,000ppmCl⁻ 溶液中3ヶ月浸漬, マルチナルタイン)

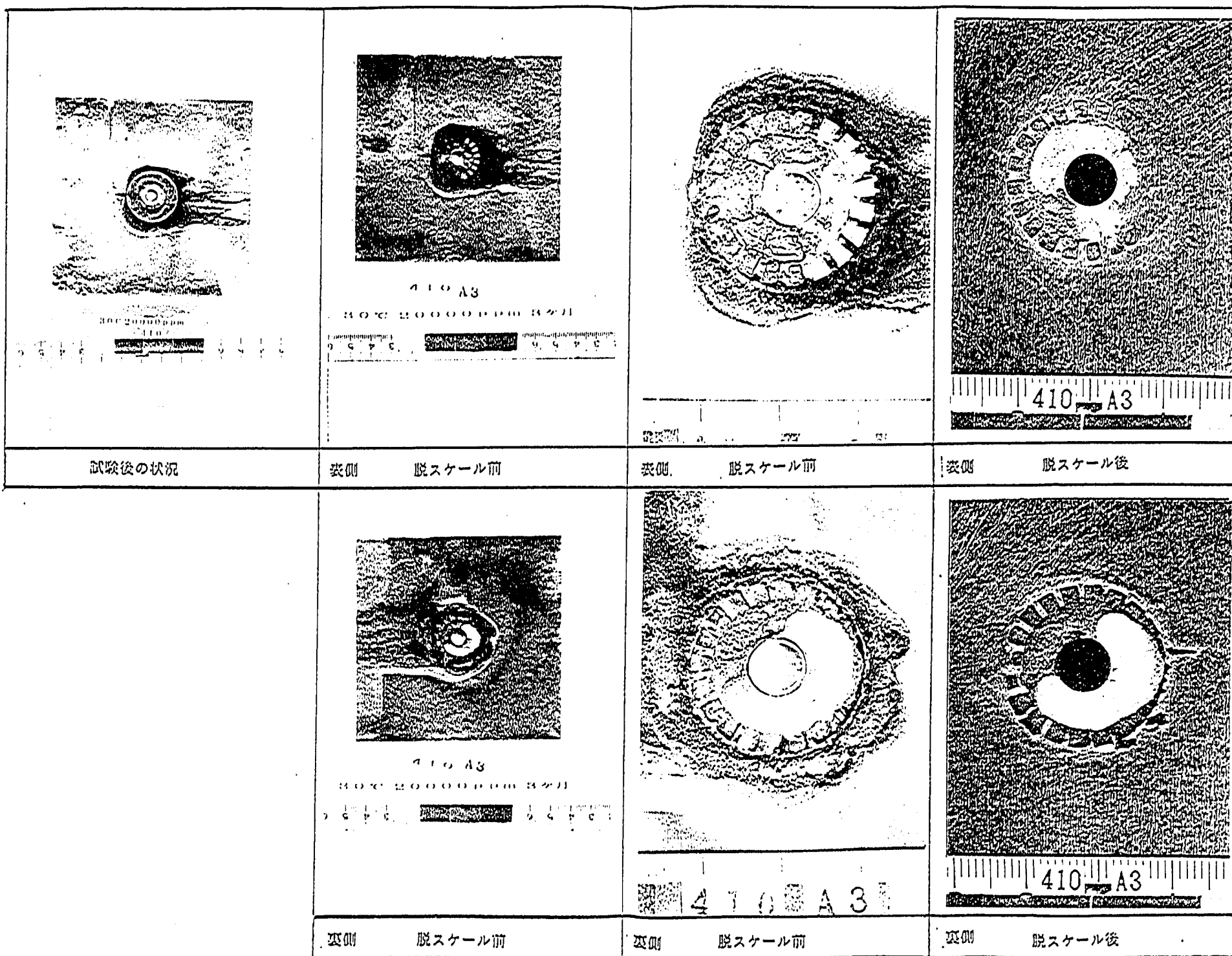
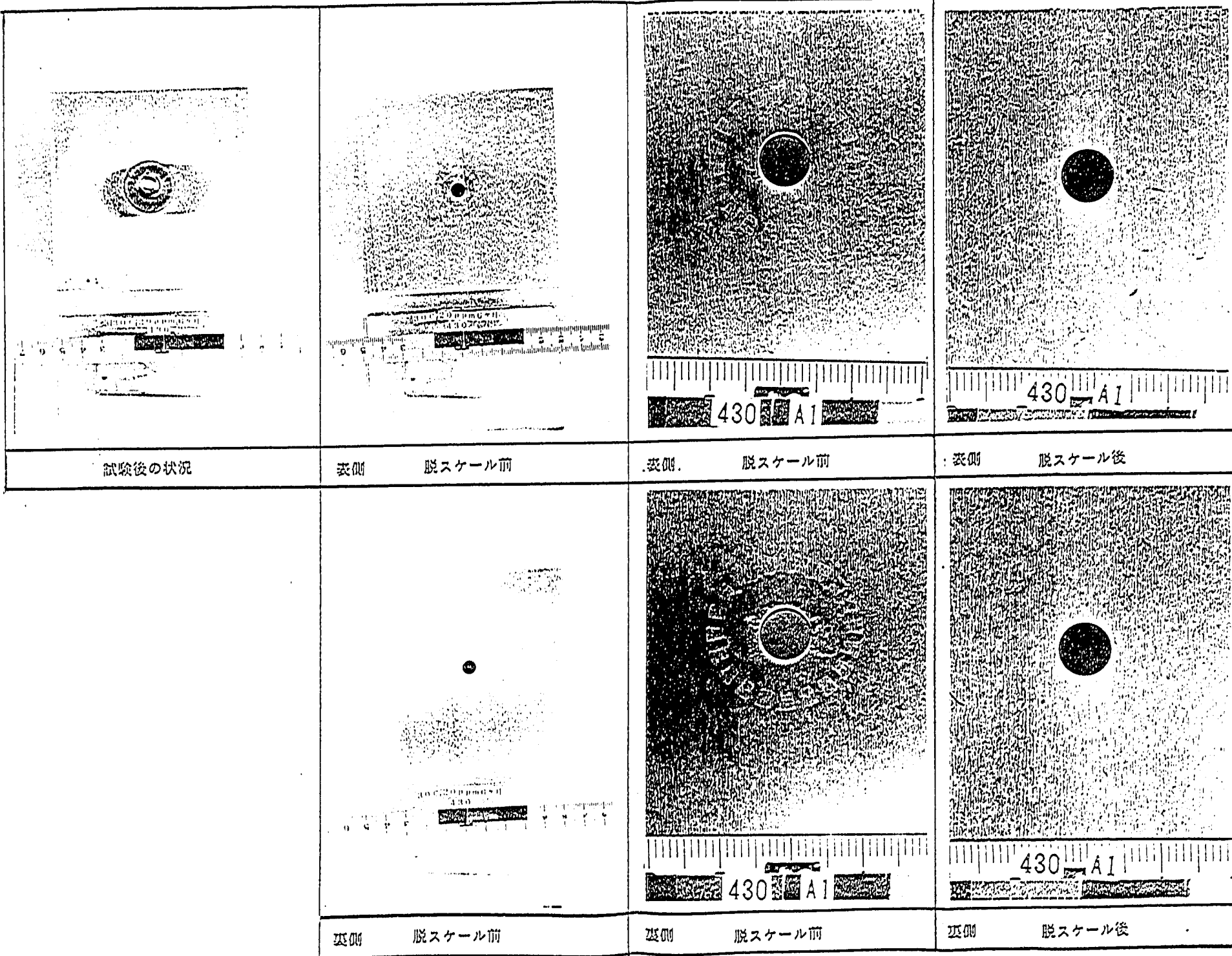


写真-3.1(4) SUS430鋼のすき間腐食発生状況
(30℃, 20ppmCl⁻ 溶液中6ヶ月浸漬, マルチアルタイナ)



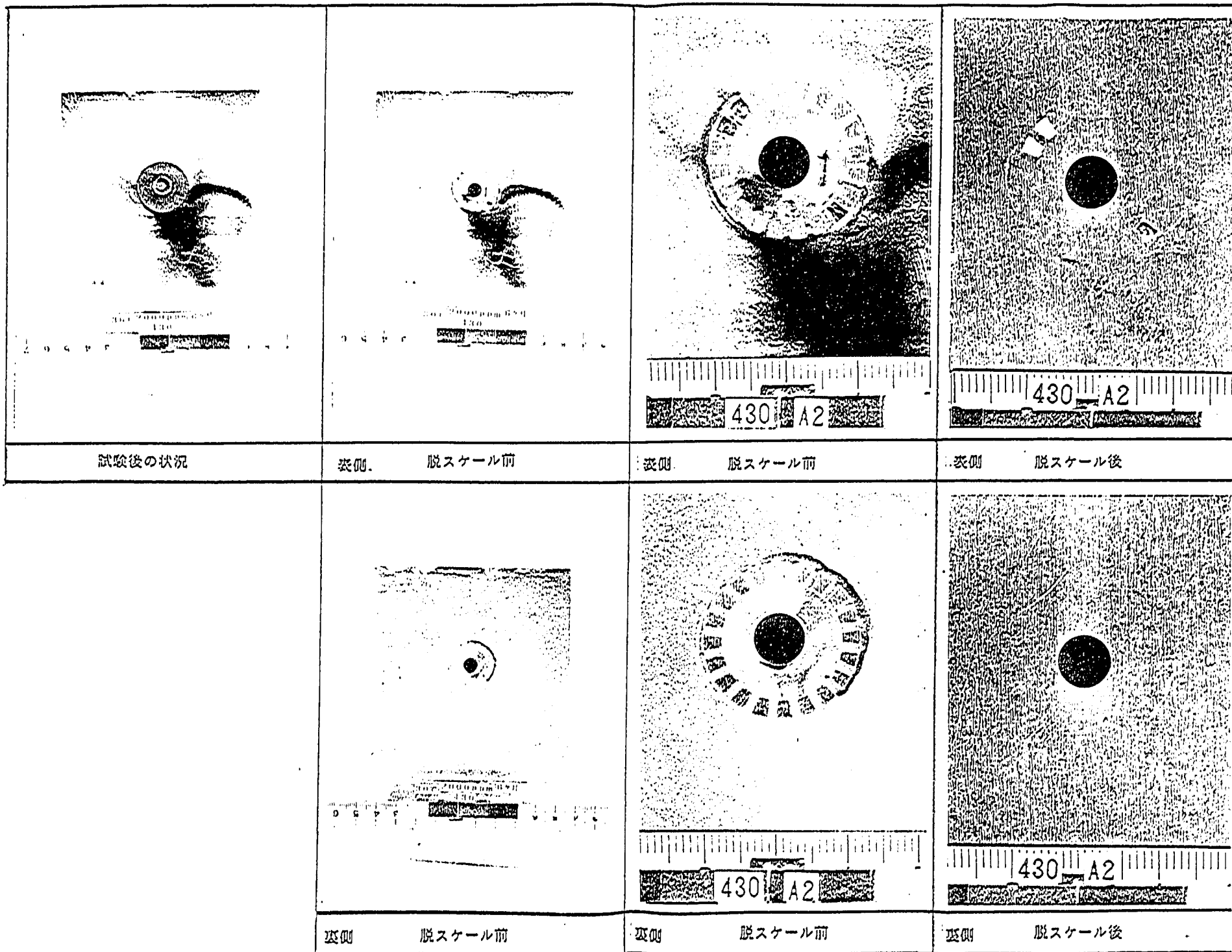


写真-3.1(6) SUS430鋼のすき間腐食発生状況
(30℃, 20,000ppmCl⁻ 溶液中3ヶ月浸漬, マルチアルタイン)

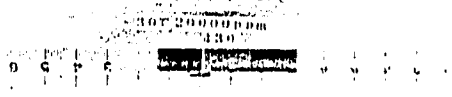
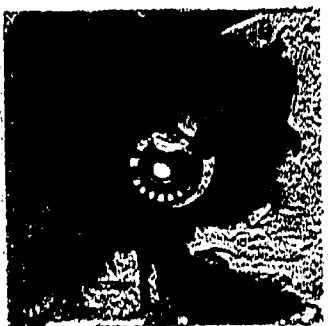
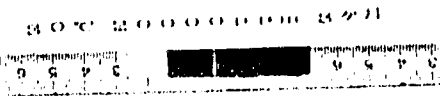
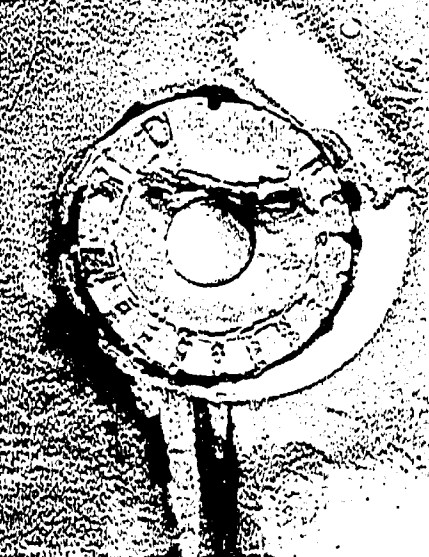
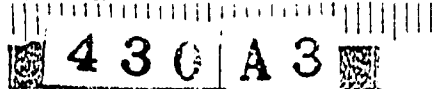
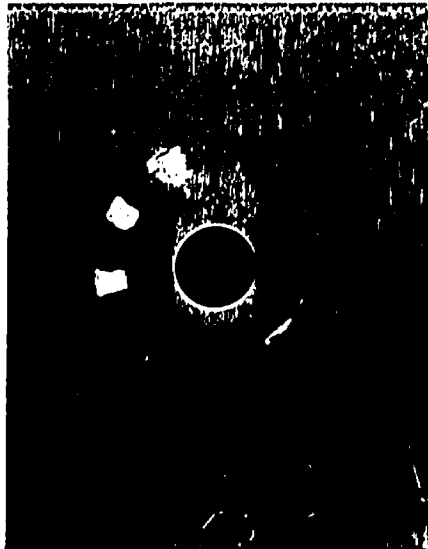
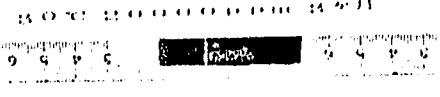
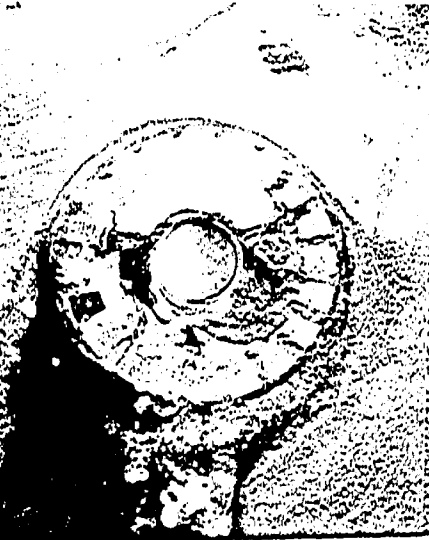
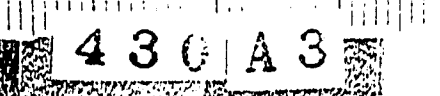
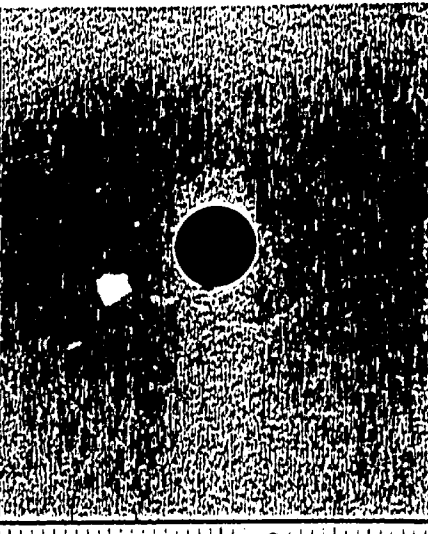
 	 430 A3 	 	 
試験後の状況	表側. 脱スケール前	表側 脱スケール前	表側. 脱スケール後
 430 A3 	 	 	
裏側 脱スケール前	裏側 脱スケール前	裏側 脱スケール後	

写真-3.1(7) SUS304鋼のすき間腐食発生状況
 (30℃, 20ppmCl⁻ 溶液中6ヶ月浸漬, マルチアルタイブ)

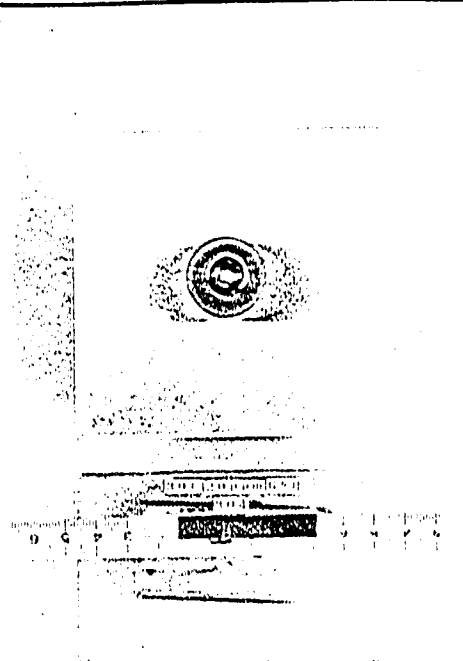
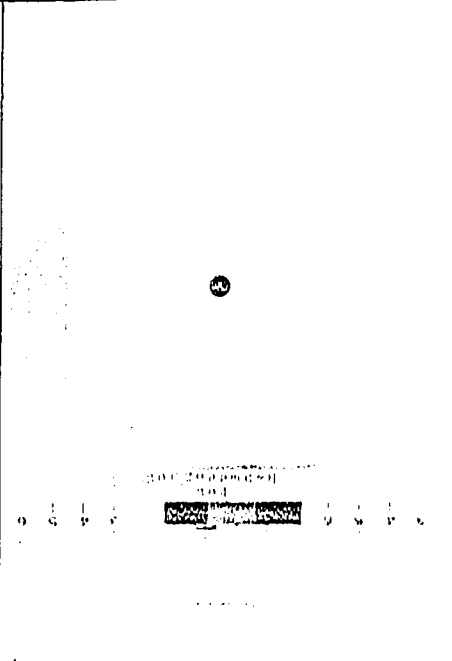
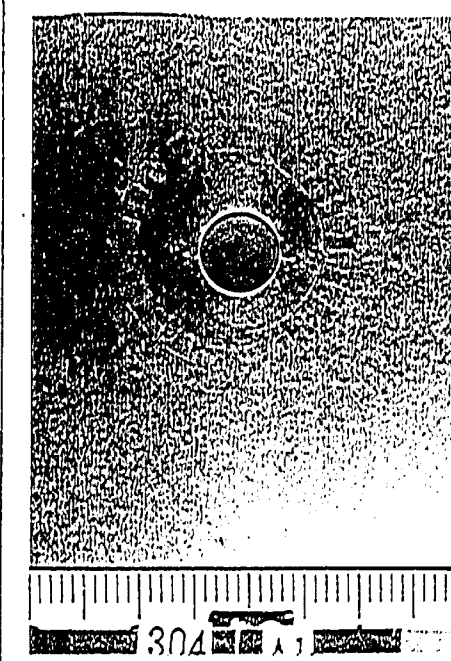
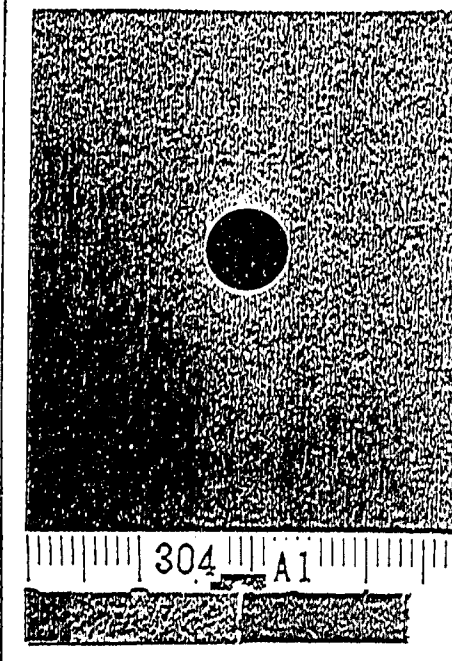
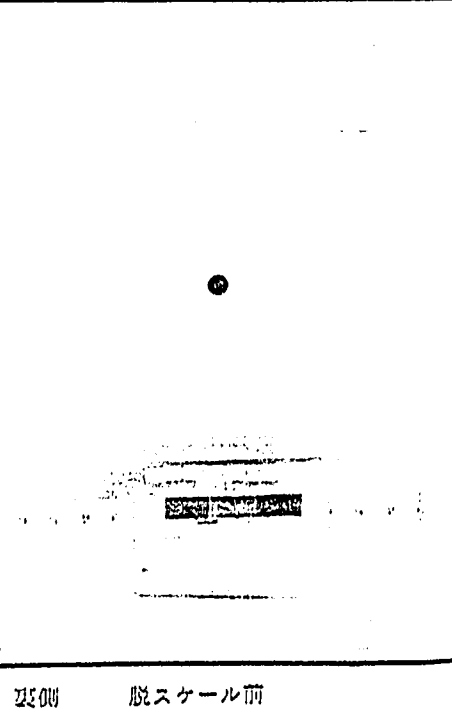
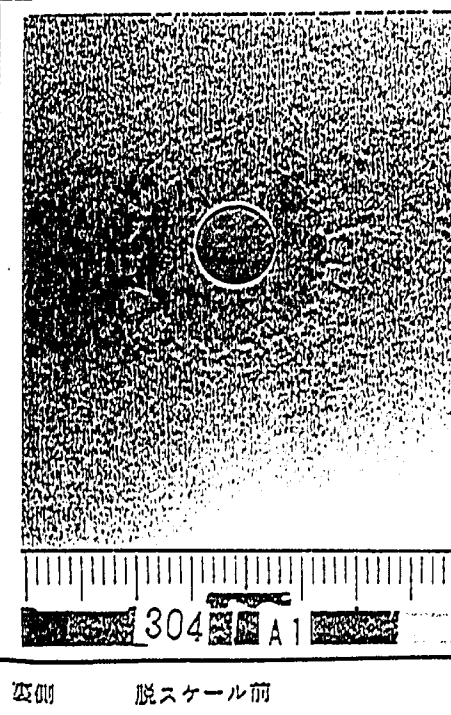
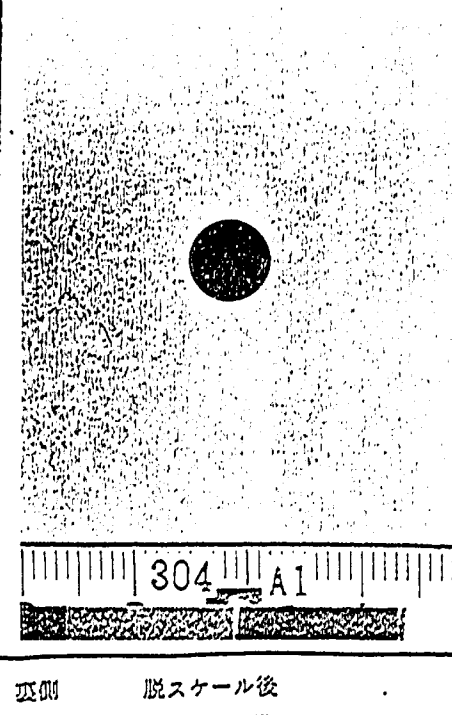
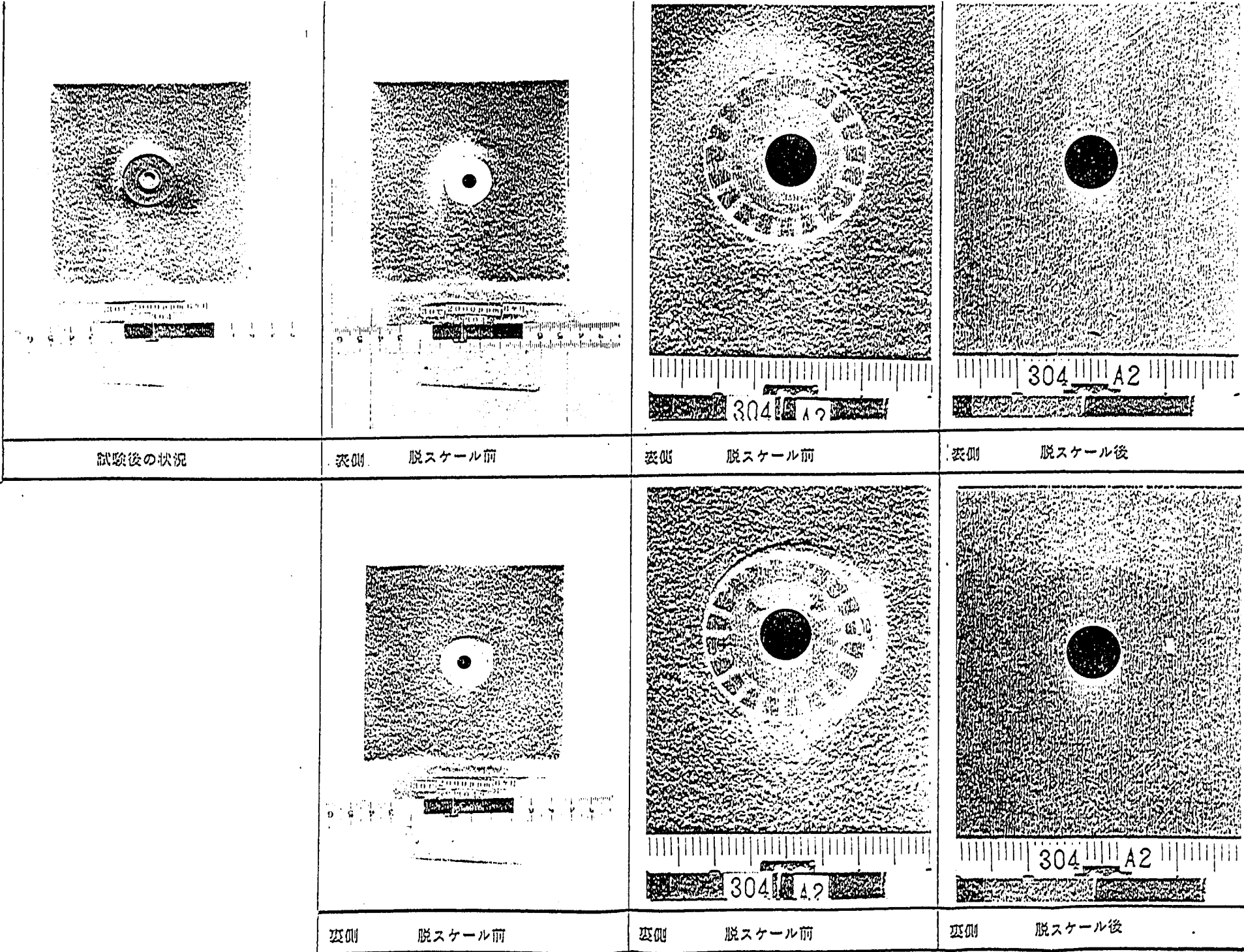
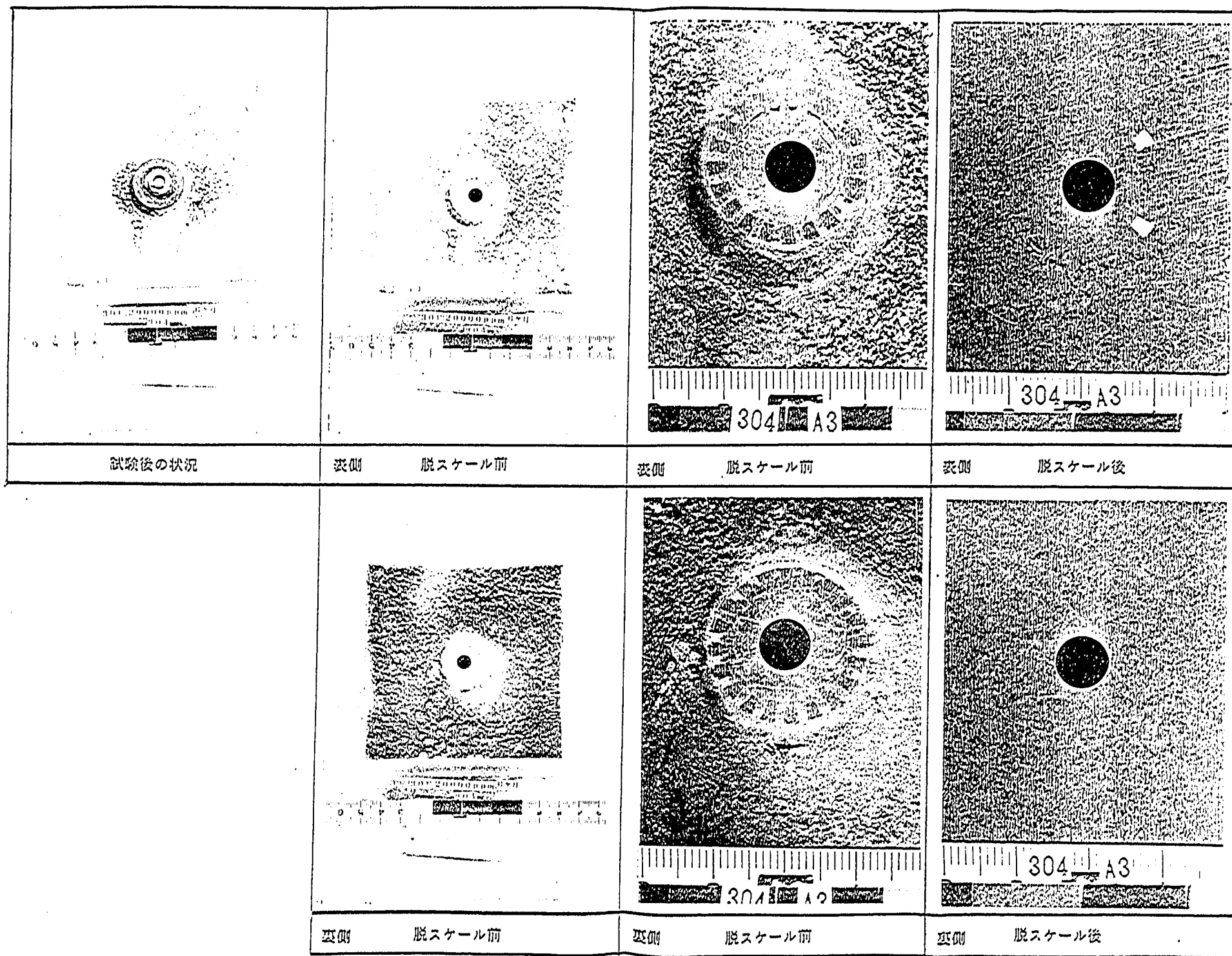
			
試験後の状況	表側 脱スケール前	表側 脱スケール前	表側 脱スケール後
			
裏側 脱スケール前	裏側 脱スケール前	裏側 脱スケール後	

写真-3.1(8) SUS304鋼のすき間腐食発生状況
 (30℃, 2,000ppmCl⁻ 溶液中6ヶ月浸漬, マルチアルタイン)





3.2.2 50℃におけるすき間腐食試験

50℃の塩素イオン20~20,000ppm溶液中におけるSUS410、SUS430及びSUS304のすき間腐食試験結果を表-3.6、図-3.6.3.7 及び写真-3.2 に示す。

(1) SUS410

塩素イオン20ppm 溶液中で6ヶ月間すき間腐食試験を行った結果、試験片の表側のみに深さが0.34mmのすき間腐食が1点生じた。すき間腐食発生率は2.5%であった。

塩素イオン200ppm溶液中で2ヶ月間すき間腐食を行った結果、最大深さが1.36mmのすき間腐食が生じた。すき間腐食発生率は10%であった。

塩素イオン2,000ppm及び20,000ppm 溶液中では、30℃試験と同様な理由で1ヶ月間で試験を中止した。

塩素イオン2,000ppm溶液中では試験片の表側及び裏側に、それぞれ最大深さが1.46mmと1.48mmのすき間腐食を生じた。すき間腐食発生率は12.5%であった。

塩素イオン20,000ppm 溶液中では試験片の表側及び裏側に、それぞれ最大深さが2.50mmのすき間腐食が20点と最大深さが0.93mmのすき間腐食が3点生じた。すき間腐食発生率は57.5%と非常に高い値であった。

SUS410は、微量の塩素イオンを含む環境下でも、すき間があると短時間ですき間腐食を生じる。

塩素イオン濃度が上昇するにつれてすき間腐食発生率が急激に増大した。

(2) SUS430

塩素イオン 20ppm溶液中ではすき間腐食の発生が認められず良好であった。

塩素イオン200ppm溶液中で2ヶ月間すき間腐食を行った結果、深さが0.01mmのすき間腐食を生じた。すき間腐食発生率は2.5%と非常に小さかった。

塩素イオン2,000ppm溶液中では、試験片の表側及び裏側に、それぞれ最大深さが0.73mmのすき間腐食が5点と深さが0.22mmのすき間腐食が1点生じた。すき間腐食発生率は15%であった。

塩素イオン 20,000ppm溶液中では試験片の裏側のみに深さが0.66mmのすき間腐食が3点生じた。すき間腐食発生率は10%であった。

SUS430は、塩素イオン 20ppm溶液中ではほとんど腐食されず、200ppmでは極くわずかなすき間腐食を生じたが、2,000ppmでは腐食深さが深くなり、すき間腐食発生率も増大した。

(3) SUS304

塩素イオン 20ppm溶液中では、すき間腐食の発生が認められず良好であった。

塩素イオン2,000ppm溶液中では試験片の裏側のみに深さが0.05mmのすき間腐食が3点生じた。
すき間腐食発生率は2.5%であった。

塩素イオン 20,000ppm溶液中では、試験片の表側及び裏側にそれぞれ最大深さが0.07mmと0.10mmのすき間腐食が1点ずつ生じた。すき間腐食発生率は5%であった。

SUS304は、塩素イオン 20ppm溶液中においてSUS304は、ほとんど腐食されず、すき間腐食の発生も認められなかった。塩素イオン濃度が2,000ppmに増加すると、極くわずかなすき間腐食を生じる。さらに、塩素イオン濃度が 20,000ppmに増加しても著しいすき間腐食の発生は認められなかった。

表-3.6 50℃におけるすき間腐食試験結果

鋼 種	記号	塩素イオン濃度 (ppm)	試験時間 (月)	すき間腐食深さ (mm)		すき間腐食発生率 (%)
				表側 (マーク側)	裏側 (マーク反対側)	
SUS410	B1	20	6	0.34 (1点)	0	2.5
	E	200	2	0.44 (1点)	1.36, 0.86, 0.52(3点)	10
	B2	2,000	1	0.56, 1.35, 1.46(3点)	1.48, 1.81(2点)	12.5
	B3	20,000	1	0.39~2.50(20点)	0.01, 0.92, 0.83(3点)	57.5
SUS430	B1	20	6	0	0	0
	E	200	2	0	0.01(1点)	2.5
	B2	2,000	6	0.33, 0.34, 0.73, 0.72, 0.42(5点)	0.22(1点)	15
	B3	20,000	6	0	0.66, 0.45, 0.29(3点)	10
SUS304	B1	20	6	0	0	0
	B2	2,000	6	0	0.04, 0.04, 0.05(3点)	7.5
	B3	20,000	6	0.07(1点)	0.10(1点)	5

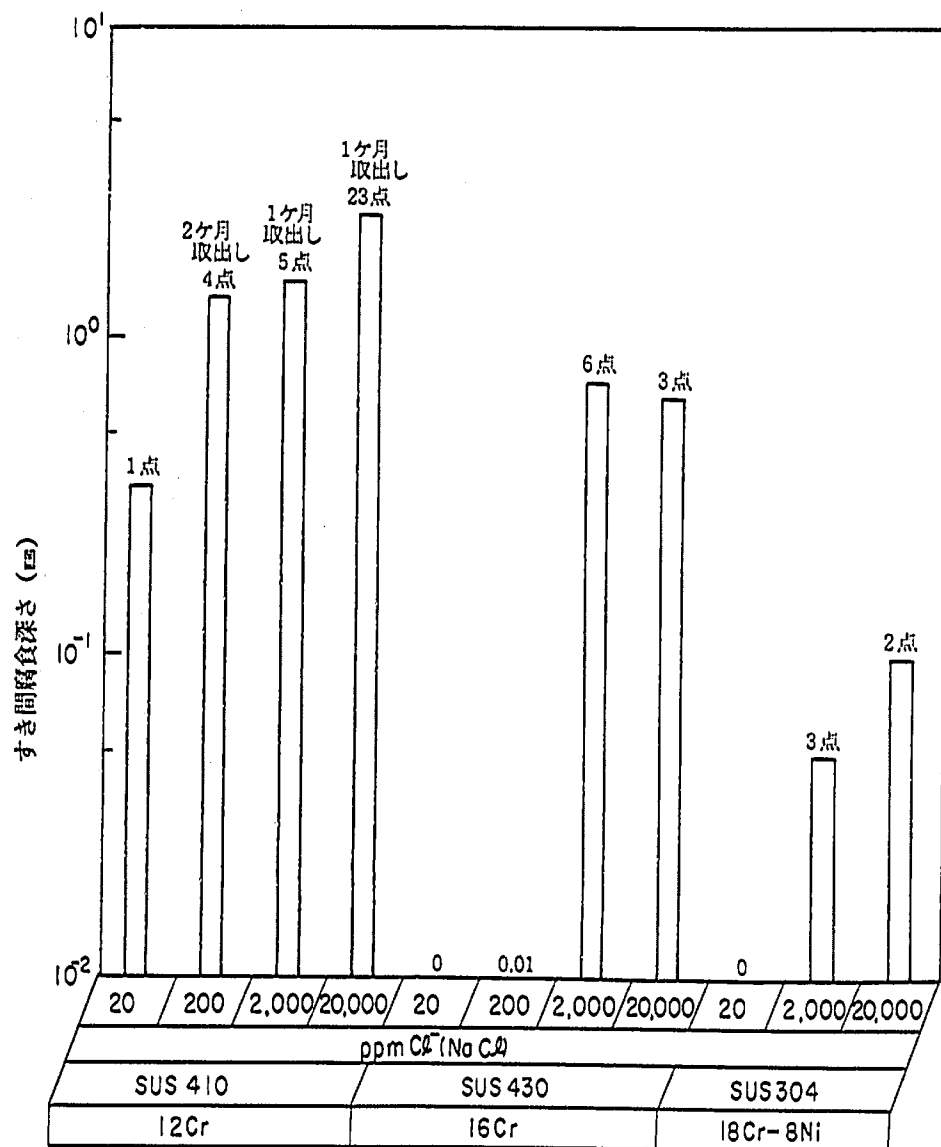


図-3.6 50℃におけるすき間腐食深さ

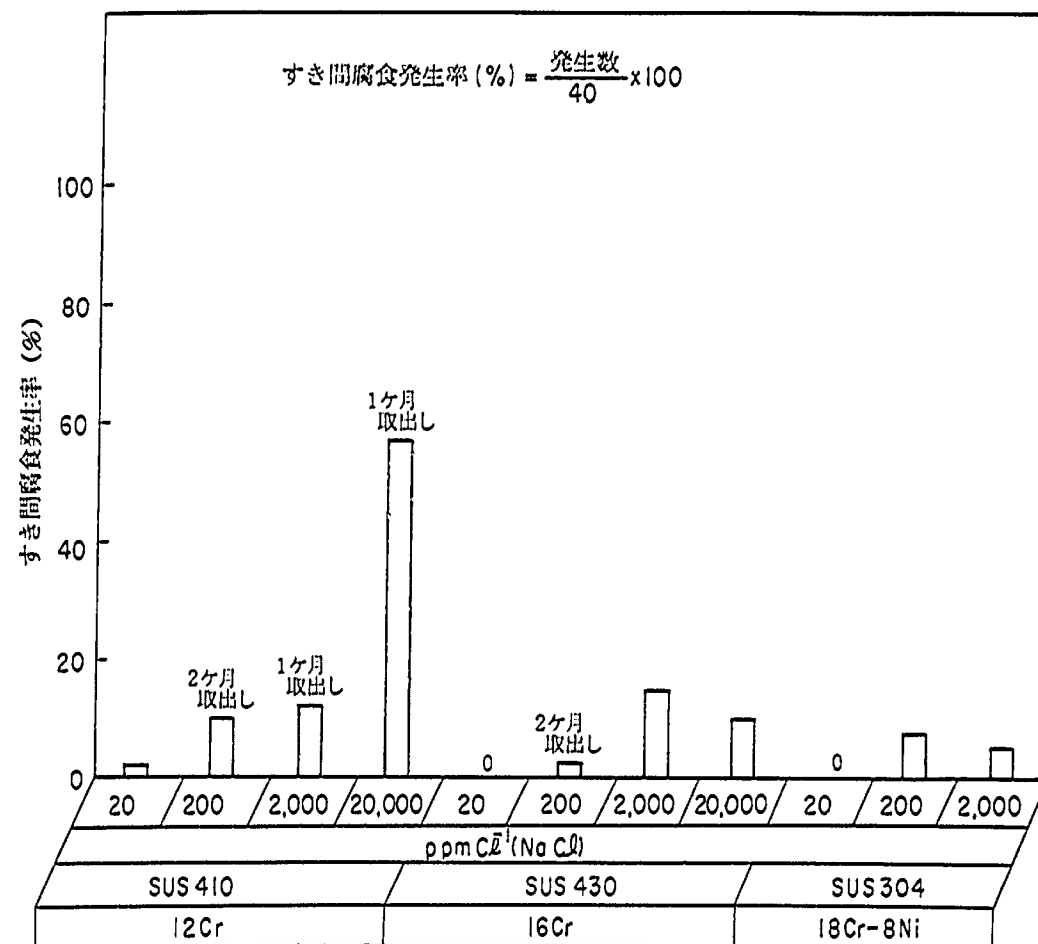


図-3.7 50℃におけるすき間腐食発生率

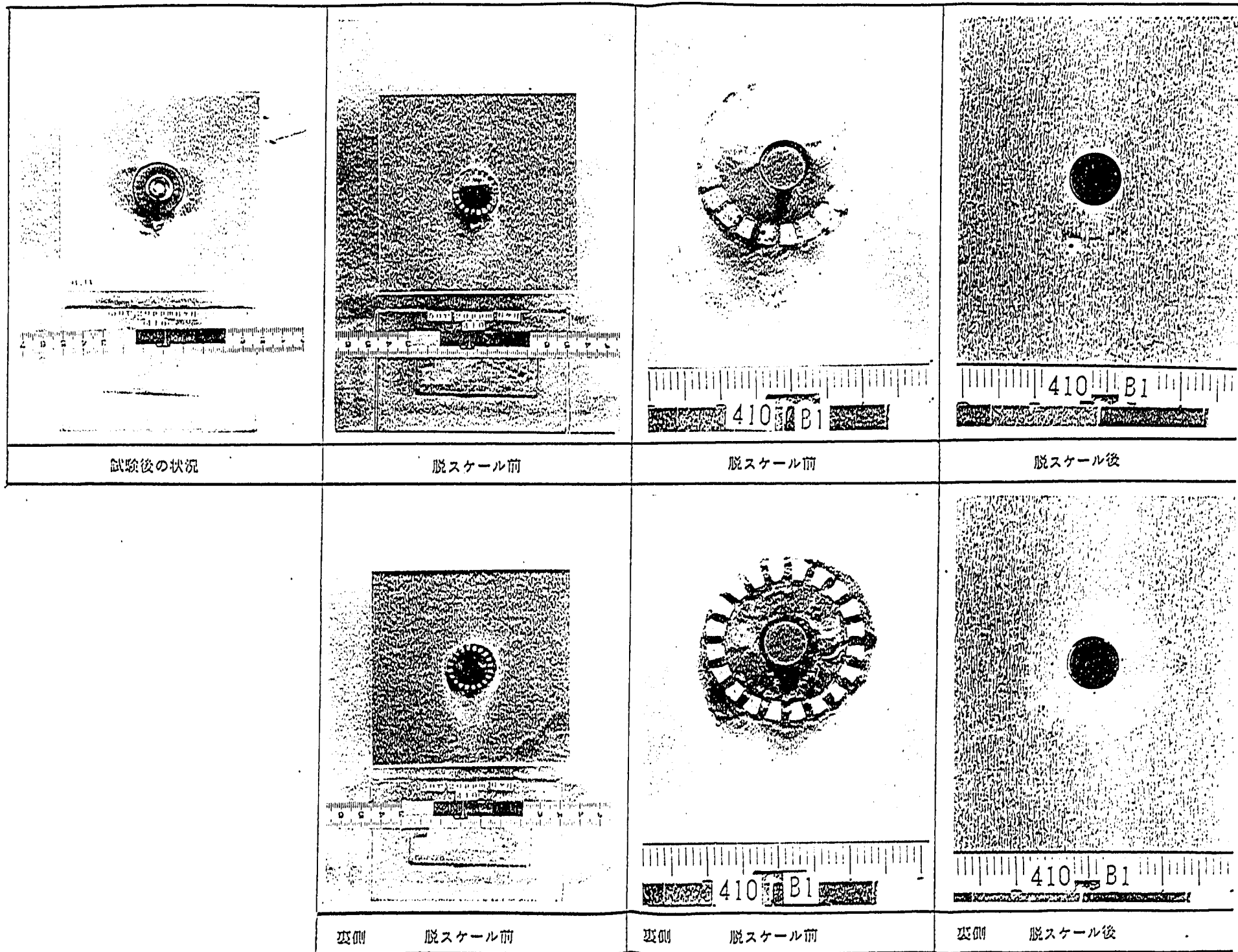


写真-3.2(2) SUS410鋼のすき間腐食発生状況
(50℃, 200ppmCl⁻ 溶液中2ヶ月浸漬, マルチアルタイブ)

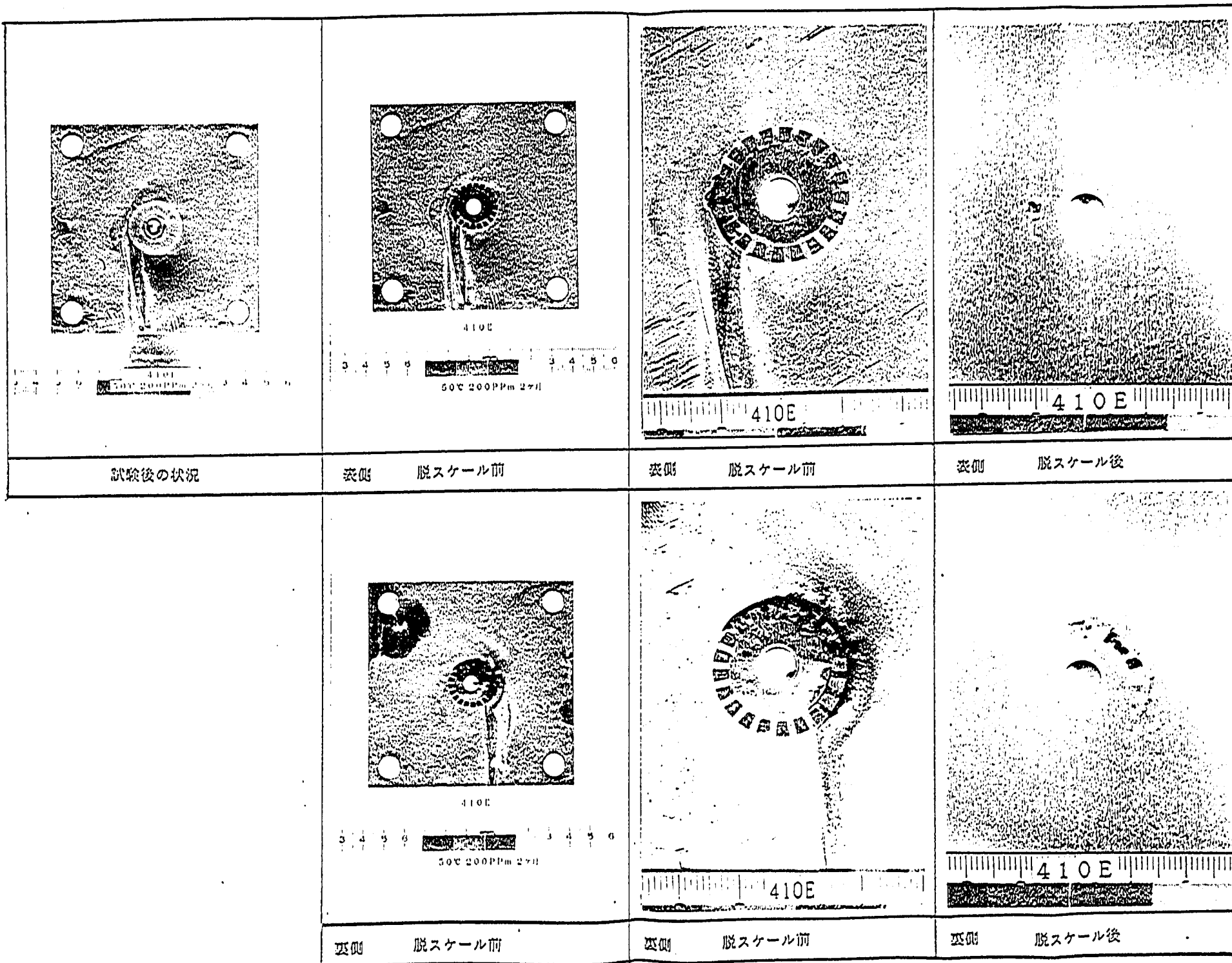
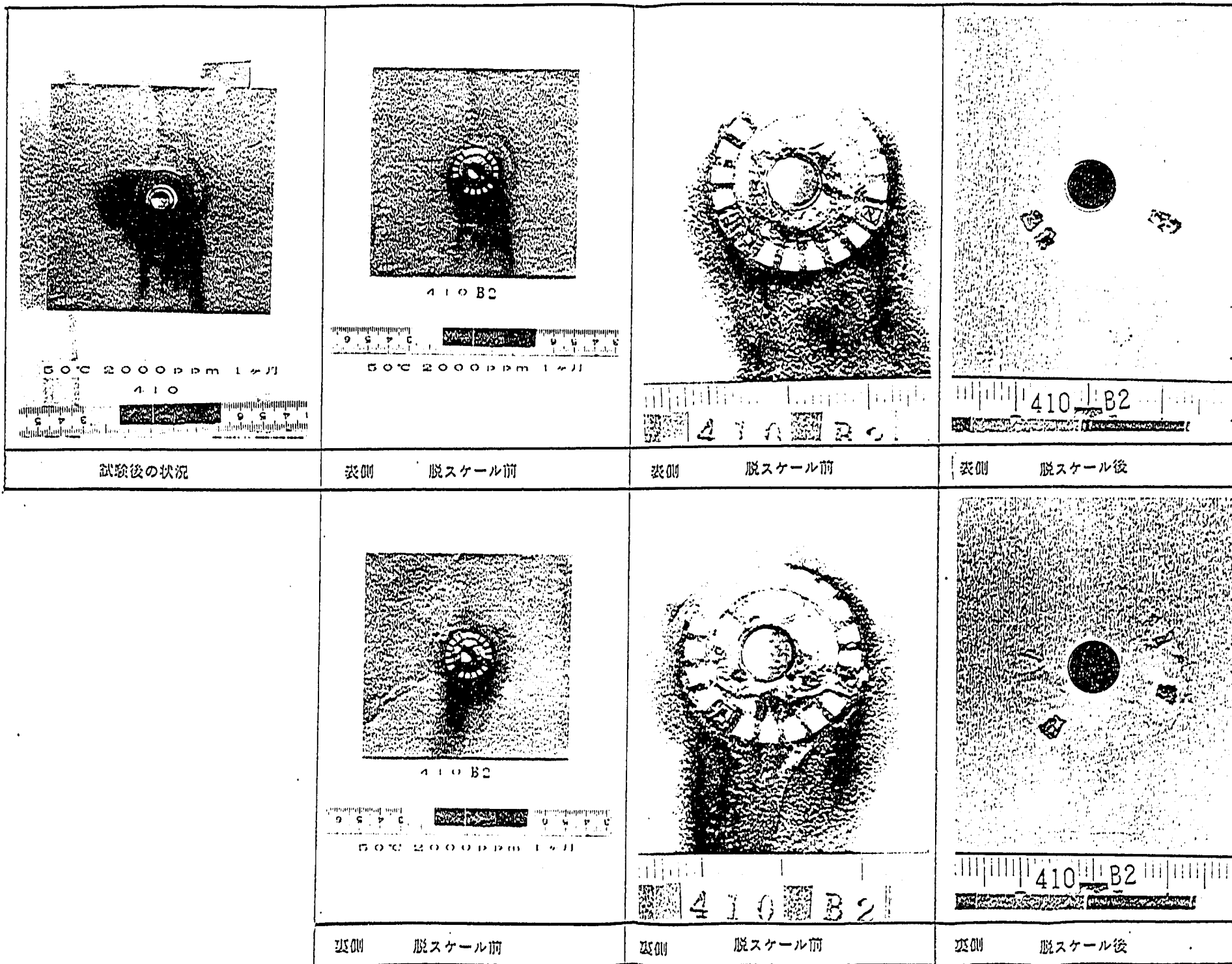


写真-3.2(3) SUS410鋼のすき間腐食発生状況
(50℃, 2,000ppmCl⁻ 溶液中1ヶ月浸漬, マルチナルタイン)



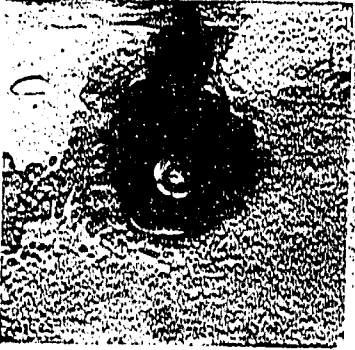
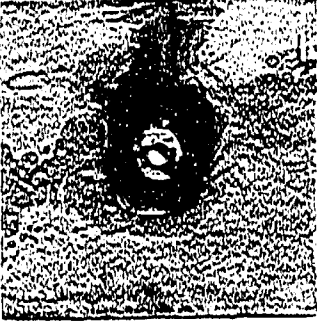
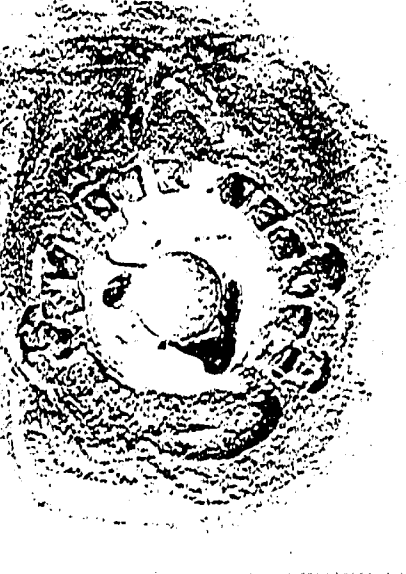
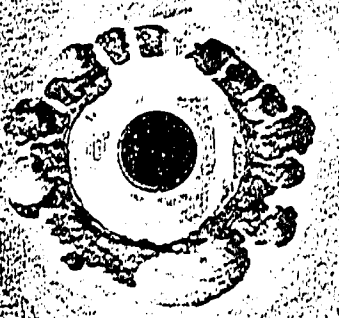
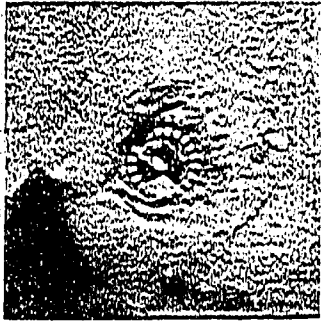
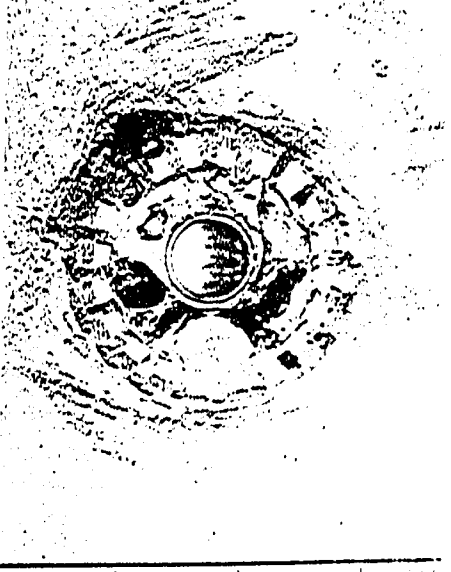
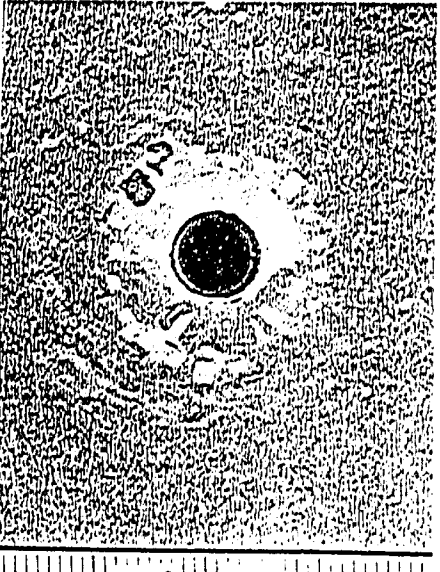
 50°C 20000ppm 1ヶ月 410	 410 B3 50°C 20000ppm 1ヶ月	 410 B3	 410 B3
試験後の状況	表側 脱スケール前	表側 脱スケール前	表側 脱スケール後
 410 B3 50°C 20000ppm 1ヶ月	 410 B3	 410 B3	裏側 脱スケール前
裏側 脱スケール前	裏側 脱スケール後		

写真-3.2(4) SUS410鋼のすき間腐食発生状況
(50°C, 20,000ppmCl⁻溶液中1ヶ月浸漬, マルチアルタイブ)

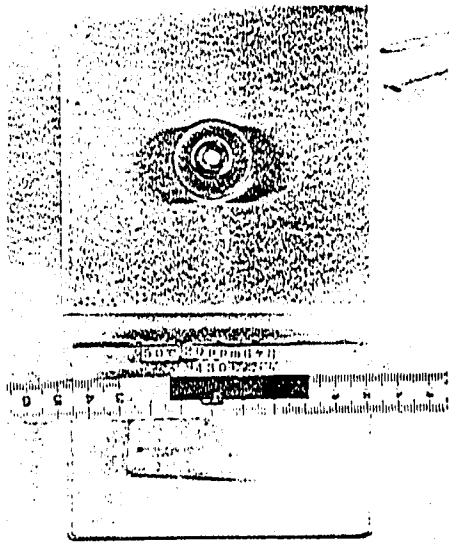
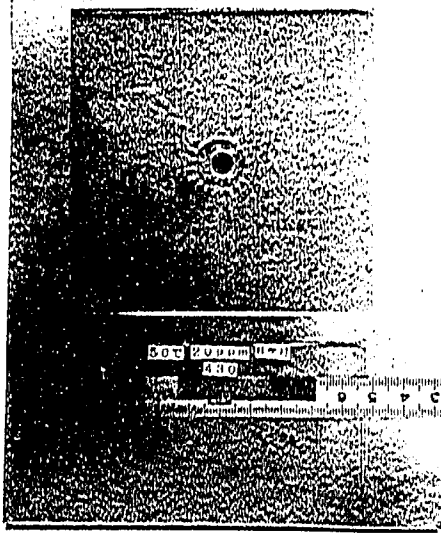
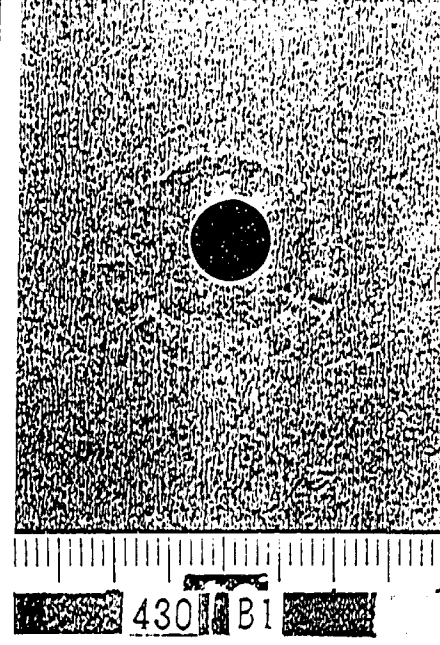
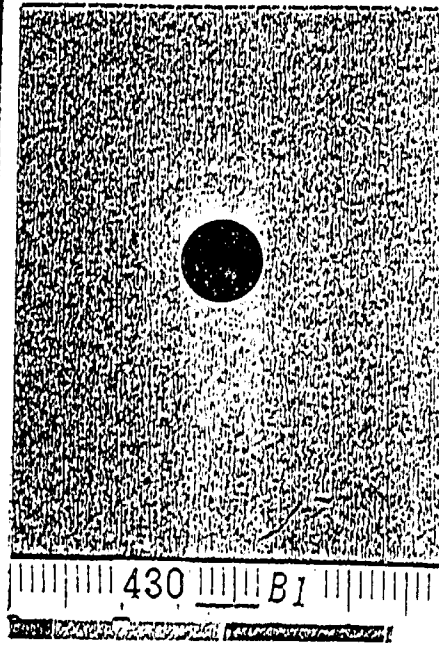
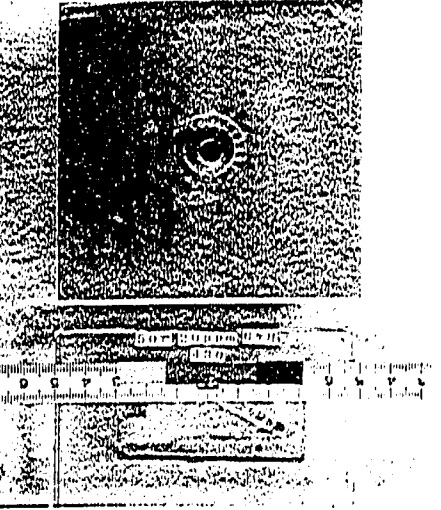
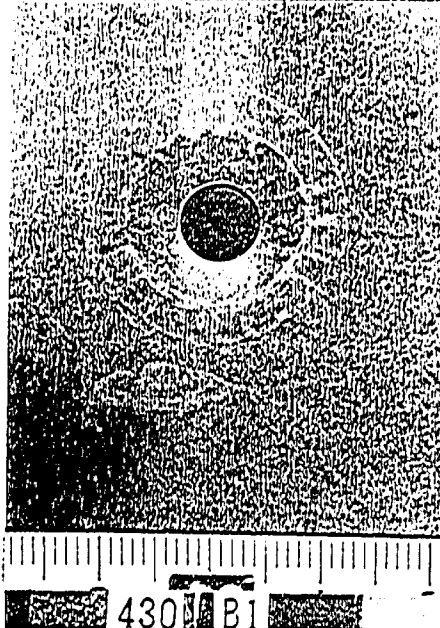
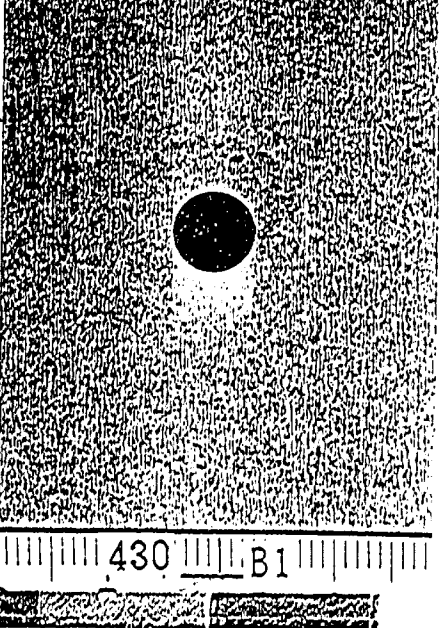
			
試験後の状況	表側 脱スケール前	表側 脱スケール前	表側 脱スケール後
			
裏側 脱スケール前	裏側 脱スケール前	裏側 脱スケール後	

写真-3.2(5) SUS 430鋼のすき間腐食発生状況
(50℃, 20ppmCl⁻ 浴液中6ヶ月浸漬, マルチナルタイプ)

写真-3.2(6) SUS430鋼のすき間腐食発生状況
(50℃, 200ppmCl⁻ 溶液中2ヶ月浸漬, マルチナルタイフ)

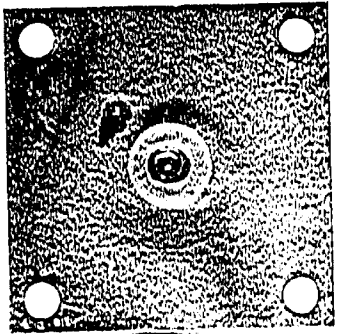
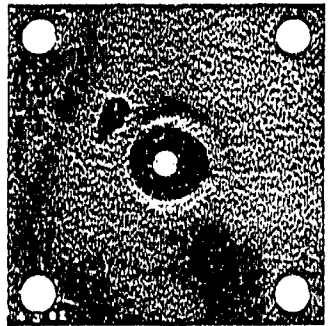
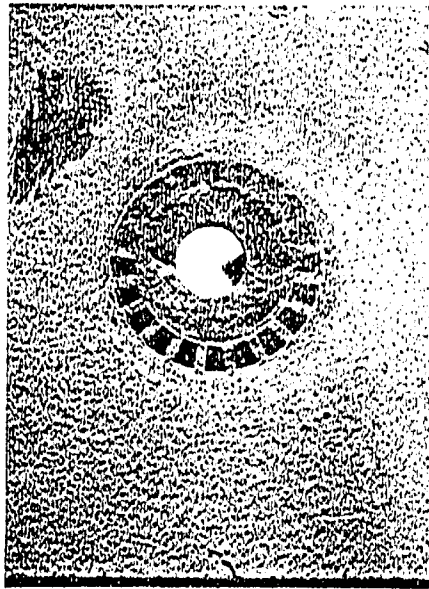
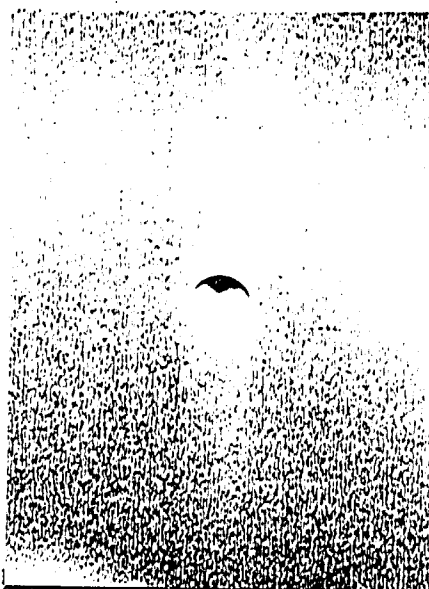
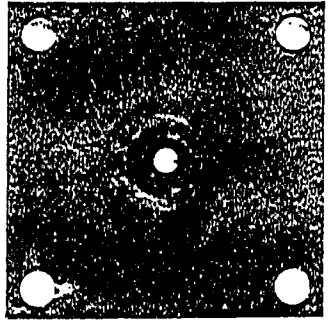
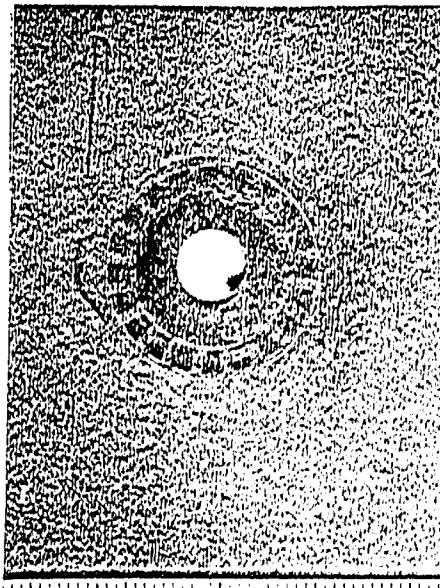
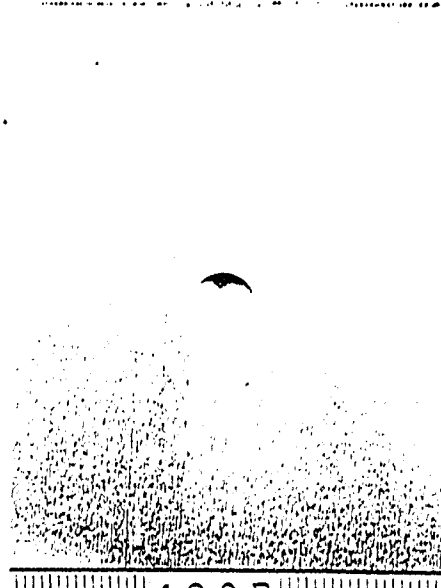
			
試験後の状況	表側 脱スケール前	表側 脱スケール前	表側 脱スケール後
			
表側 脱スケール前	表側 脱スケール前	表側 脱スケール後	

写真-3.2(7) SUS430鋼のすき間腐食発生状況
 (50℃, 2,000ppmCl⁻ 溶液中6ヶ月浸漬, マルチナルタイナ)

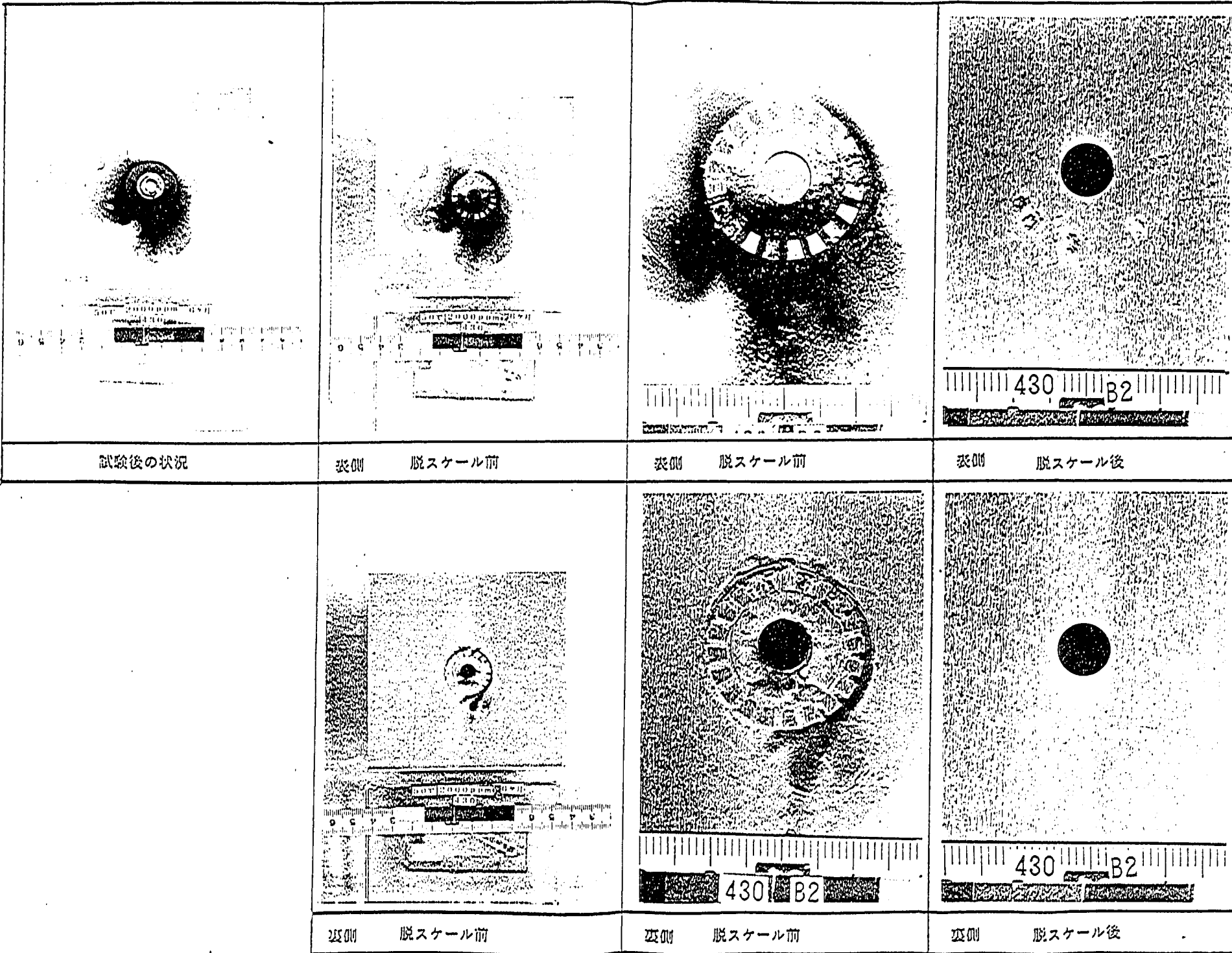


写真-3.2(8) SUS430鋼のすき間腐食発生状況
 (50℃, 20,000ppmCl⁻ 溶液中6ヶ月浸漬, マルチアルタイフ)

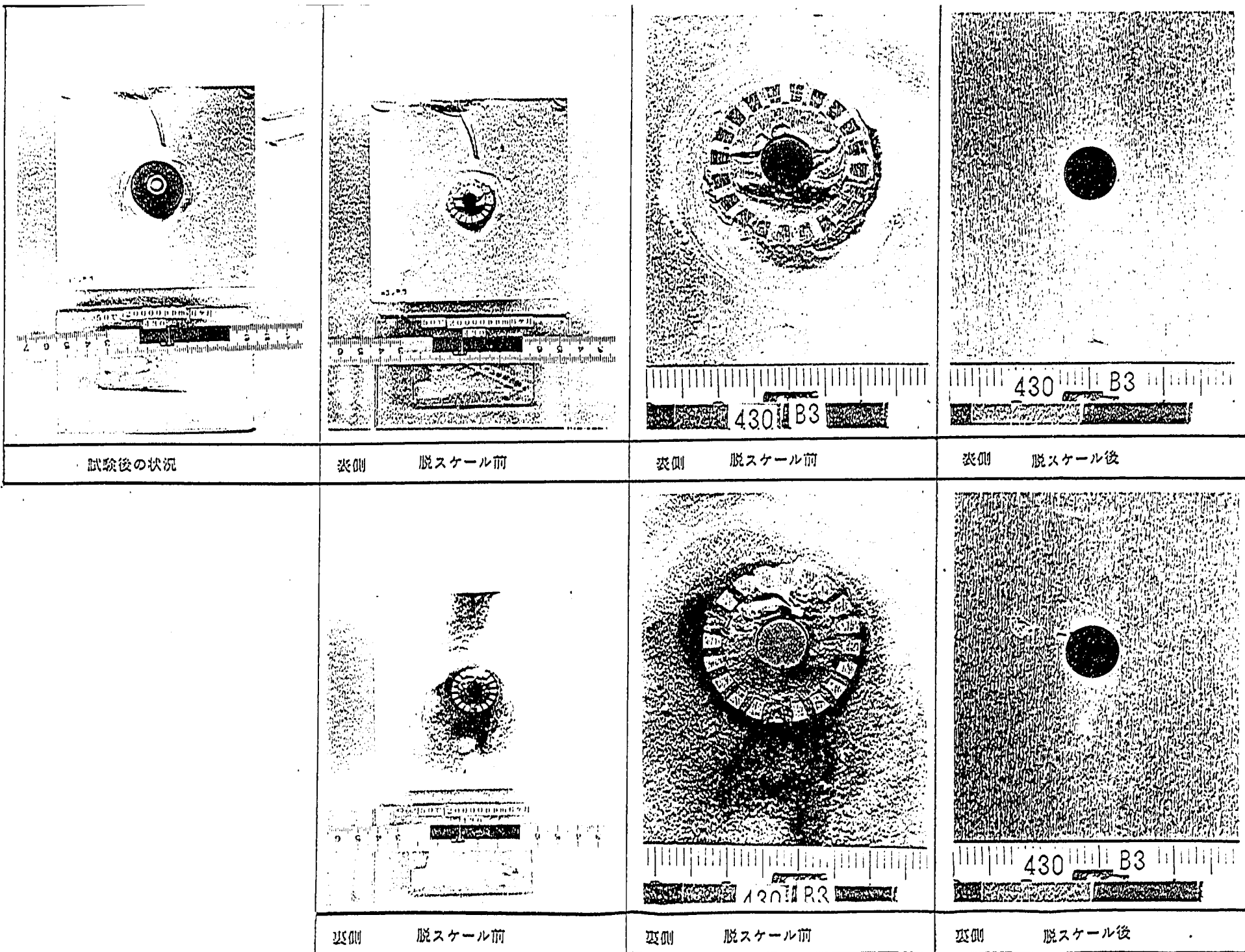
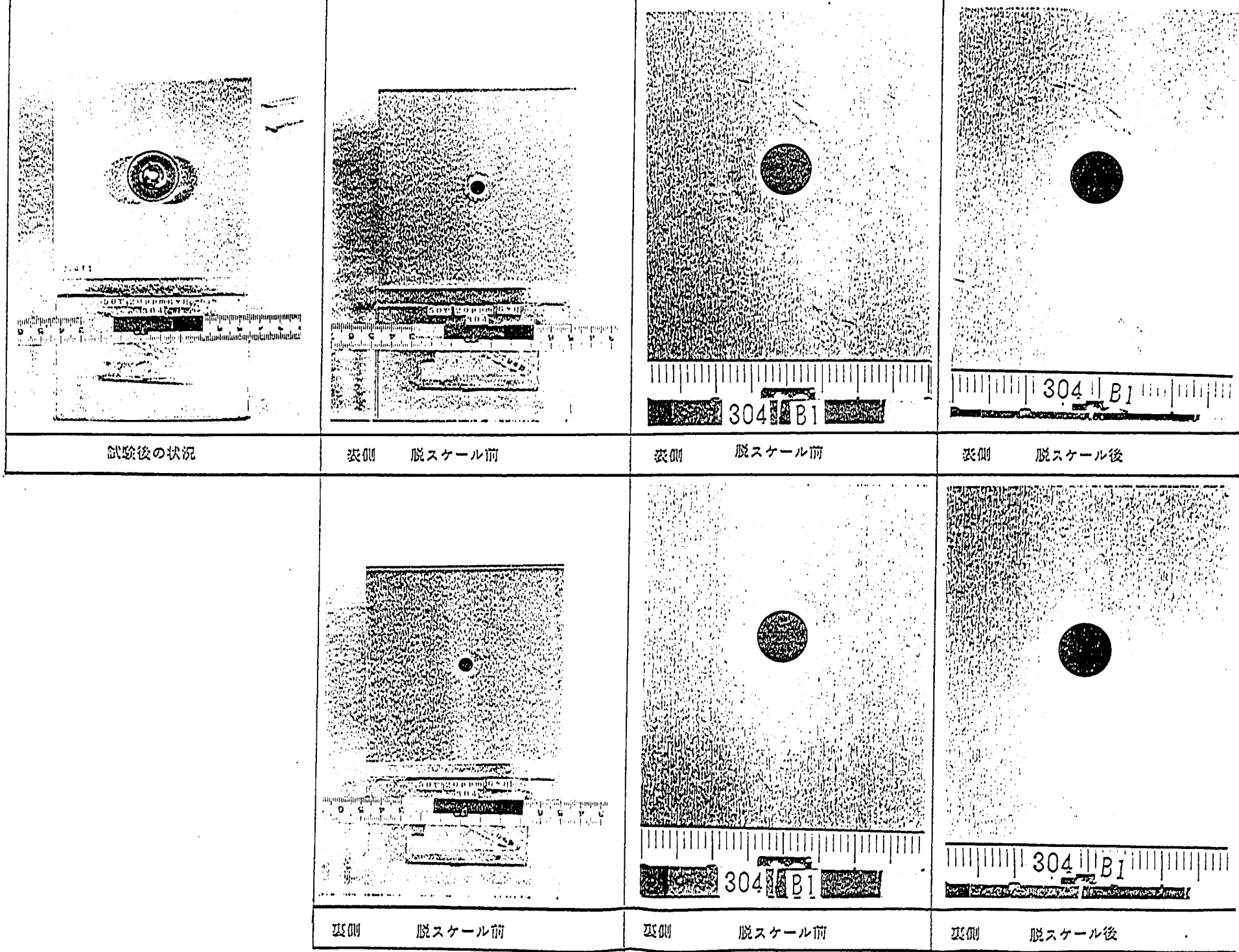


写真-3.2(9) SUS304鋼のすき間腐食発生状況
 (50℃, 20ppmCl⁻ 浴液中6ヶ月浸漬, マルチナルタイナ)



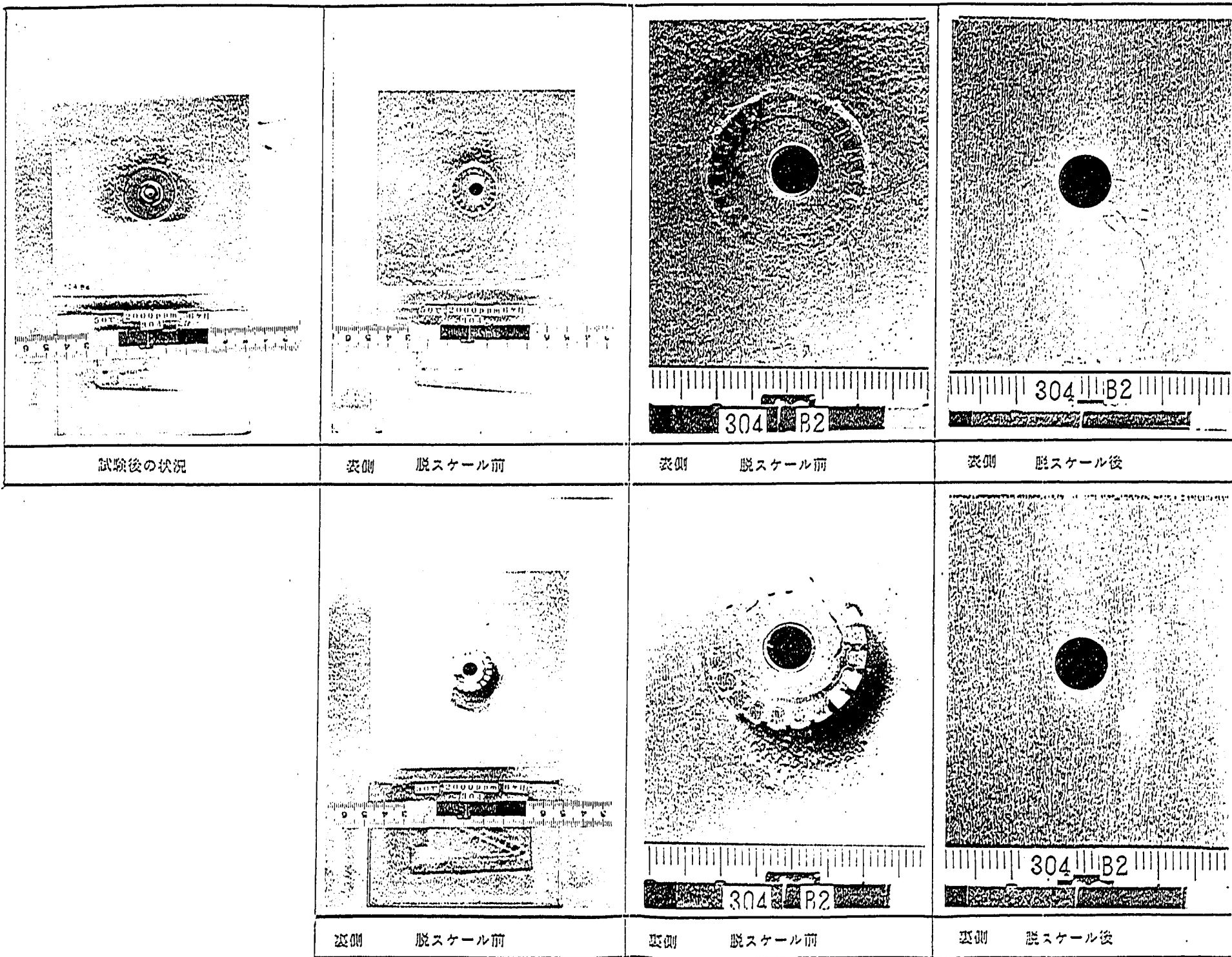
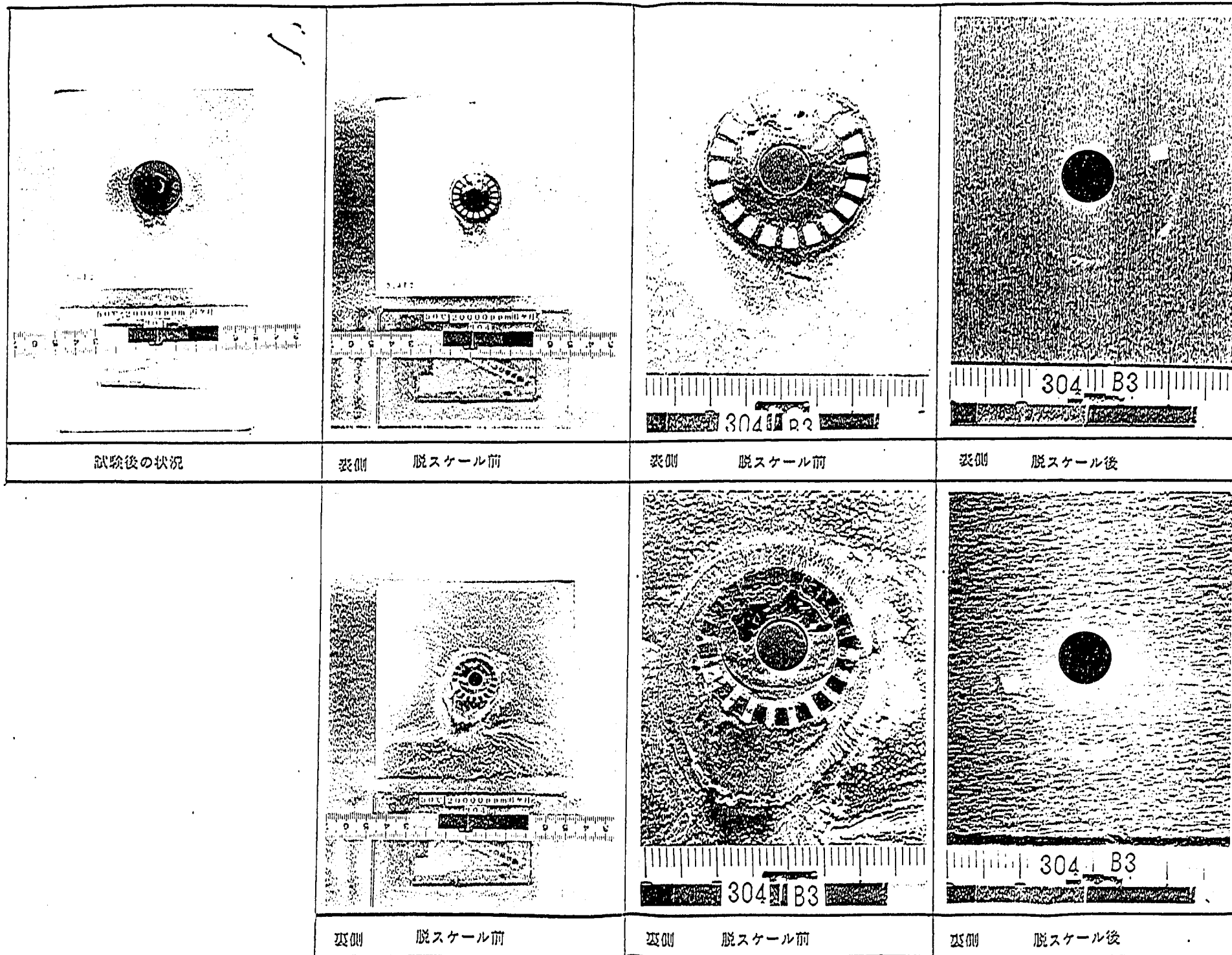


写真-3.20D SUS304鋼のすき間腐食発生状況
(50°C, 20,000ppmCl⁻ 溶液中6ヶ月浸漬, マルチアルケイナ)



3.3 まとめ

SUS410, SUS430及びSUS304のすき間腐食深さに及ぼす塩素イオン濃度と温度の影響を図-3.8に示す。

(1)SUS410は、塩素イオン濃度が増加するにつれて、すき間腐食発生率が増大するので、耐すき間腐食性が劣る。

(2)SUS430は、50℃において塩素イオン200ppm溶液中でわずかなすき間腐食を生じた。これは、合金中にニッケルが添加されていないため、SUS430はすき間内でpHの低下が起こるとクロムと鉄の溶解速度が、ニッケルを添加しているSUS304よりも大きくなるためと考えられる。

(3)SUS304は、50℃において塩素イオン2,000ppm溶液中でも、すき間腐食発生率は小さく7.5%であった。

以上のことから、塩素イオンを含む溶液中における耐すき間腐食性は、SUS304>SUS430>SUS410の順で優れていることが明らかとなった。すなわち、耐すき間腐食性はクロム量が多いほど、耐すき間腐食性に優れていることが明らかとなった。

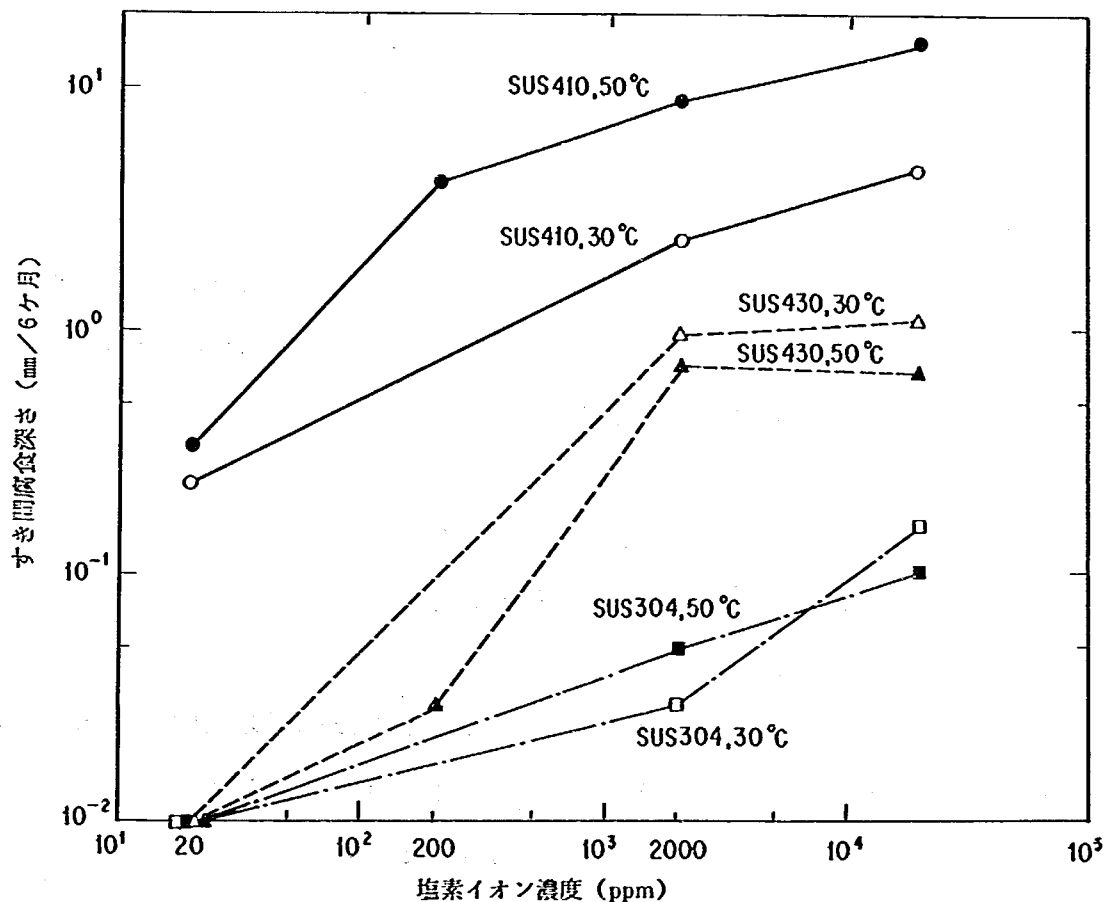


図-3.8 すき間腐食深さに及ぼす塩素濃度の影響

4. もらい錆に関する試験

ステンレス鋼表面への普通鋼あるいは、さび生成物の（赤さび）付着（いわゆるもらい錆）によるステンレス鋼の腐食を再現するとともに、もらい錆が付着したステンレス鋼の腐食モデルとして Fe_2O_3 及び赤さび（ $\gamma\text{-FeOOH}$ ）中でのステンレス鋼の腐食電位の経時変化と孔食発生の有無について試験を行った。

4.1 試験方法

4.1.1 供試材料

試験に用いたSUS304及び普通鋼の化学成分を表-4.1に示す。

表-4.1 供試材料の化学成分（wt%）

鋼 種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	溶体化熱処理条件
SUS304	0.04	0.53	1.10	0.034	0.006	8.49	18.35	1100℃×2.5min WC
SM400B	0.12	0.23	0.62	0.014	0.002	—	—	—

4.1.2 試験条件

もらい錆再現試験及び腐食電位測定の実験条件を表-4.2 に示す。

(1) もらい錆再現試験

1（ステップⅠ）：SUS304にもらい錆を付着させる方法

SUS304と普通鋼を図-4.1 に示すようにカップリングさせて、50℃の塩素イオン濃度2000ppm溶液中(500ml) に浸漬して1日、4日、10日経過後、SUS304表面の腐食状況を調べた。

2（ステップⅡ）：SUS304に孔食を発生させる方法

SUS304の上に普通鋼を図-4.2 のように設置して、50℃の塩素イオン濃度 2000ppm溶液中(3000ml) に21日間浸漬し、SUS304表面の孔食の発生の有無を調べた。

(2) もらい錆が付着したステンレス鋼の腐食電位測定試験

① Fe_2O_3 に埋没したSUS304腐食試験

図-4.3 に示すように50℃で塩素イオン濃度200ppmと2000ppmの溶液中(200ml)に Fe_2O_3 を20g入れ、その中にSUS304を埋没させて21日間の腐食電位を測定した。

② Fe_2O_3 または $\gamma\text{-FeOOH}$ をバックした腐食試験

図-4.4に示す装置を用いて、50℃の塩素イオン濃度が 200, 2000, 20000ppmの溶液(200ml) 中において、 Fe_2O_3 2gまたは $\gamma\text{-FeOOH}$ 1.7g (20000ppm Cl^- のみ)をSUS304の受け台に入れて、 Fe_2O_3 及び $\gamma\text{-FeOOH}$ が流出しないようにSUS304のふたをして、21

日間浸漬して腐食電位を測定した。

③アニオン交換膜付腐食試験

上記②の試験方法において、50℃の塩素イオン濃度が200, 2000ppmの溶液(200ml)中において、 Fe_2O_3 の代わりにアニオン交換膜をSUS304の受け台に置き、SUS304のふたをして、21日間浸漬して腐食電位を測定した。

④塩素イオン単味溶液中での腐食電位測定

上記②の試験方法において、50℃の塩素イオン濃度が200, 2000, 20000ppmの溶液(200ml)中において、 Fe_2O_3 及び $\gamma\text{-FeOOH}$ をSUS304の受け台に入れずにSUS304のふたをして、21日間浸漬して腐食電位を測定した。

(3) 孔食発生試験

①塩素イオン濃度及び温度の影響

温度が室温、50℃及び60℃で塩素イオン濃度が200及び2000ppmの溶液中に図-4.5 (3)の試験片を浸漬し、アルゴンガスで脱気しながらスweep速度20mV/minでステンレス鋼表面の腐食電位を測定した。

②塩素イオン濃度、 Fe_2O_3 及び $\gamma\text{-FeOOH}$ の影響

温度が室温と50℃で塩素イオン濃度が40, 200, 2000ppmの溶液に Fe_2O_3 を16g加えて図-4.6のようにステンレス鋼を設置して、500時間と3768時間後の孔食の発生を観察した。

また、50℃で塩素イオン濃度が200ppmの溶液に $\gamma\text{-FeOOH}$ 16g加えてSUS304を $\gamma\text{-FeOOH}$ に埋没させて同様に孔食の発生を観察した。

試験片の形状を図-4.5 (1), (2), (3)及び(4)に示す。

表-4.2 試験条件

試 験	条 件
I. もらい錆再現試験	1. ステップⅠ : SUS304にもらい錆を付着させる方法 (SUS304と普通鋼のカップリング試験) 溶液 ; 2000ppm Cl^- (500ml), 50°C 浸漬時間 ; 1日, 4日, 10日 試験装置 ; 図-4.1 参照 2. ステップⅡ : SUS304に孔食を発生させる方法 (SUS304単体試験) 溶液 ; 2000ppm Cl^- (3000ml), 50°C 浸漬時間 ; 21日 試験装置 ; 図-4.2参照
II. 腐食電位測定試験	1. Fe_2O_3 に埋没した腐食試験 溶液 ; 200, 2000ppm Cl^- (200ml), 50°C Fe_2O_3 ; 20g 浸漬時間 ; 21日 試験装置 ; 図-4.3 参照 2. Fe_2O_3 または $\gamma\text{-FeOOH}$ をパックした腐食試験 溶液 ; 200, 2000, 20000ppm Cl^- (200ml), 50°C Fe_2O_3 ; 2g $\gamma\text{-FeOOH}$; 1.7g (20000ppm Cl^- のみ) 浸漬時間 ; 21日 試験装置 ; 図-4.4 参照 3. アニオン交換膜付腐食試験 溶液 ; 200, 2000ppm Cl^- (200ml), 50°C 浸漬時間 ; 21日 試験装置 ; 図-4.4 参照 4. 塩素イオン単味溶液中での電位測定 溶液 ; 200, 2000, 20000ppm Cl^- (200ml), 50°C 浸漬時間 ; 21日 試験装置 ; 図-4.4 参照
III. 孔食発生試験	1. 塩素イオン濃度及び温度の影響 溶液 ; 200, 2000ppm Cl^-, アルゴン脱気 温度 ; 室温, 50°C, 60°C スweep速度 ; 20mV/min 試験装置 ; 図-4.5 (3)参照 2. 塩素イオン濃度, Fe_2O_3 及び $\gamma\text{-FeOOH}$ の影響 溶液 ; 40, 200, 2000ppm Cl^- Fe_2O_3 及び $\gamma\text{-FeOOH}$; 16g 温度 ; 室温, 50°C 浸漬時間 ; 500時間, 3768時間(157日) 試験装置 ; 図-4.5(4), 図-4.6 参照

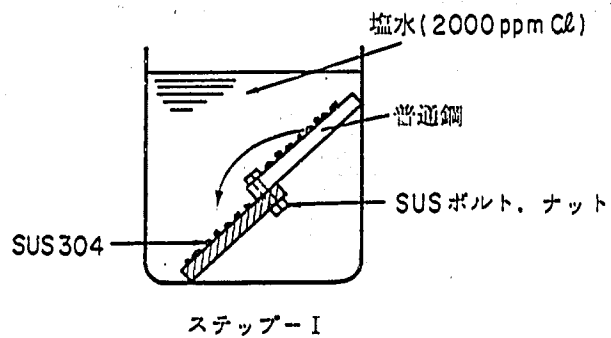


図-4.1 SUS304にもらい鋅を付着させる方法

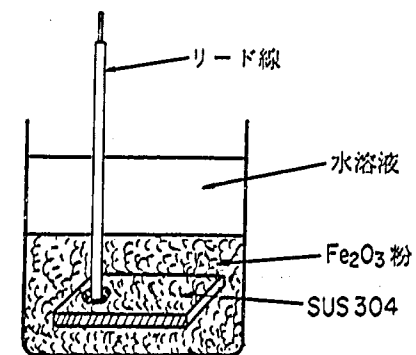


図-4.3 Fe_2O_3 中にSUS304を埋没させて腐食電位測定

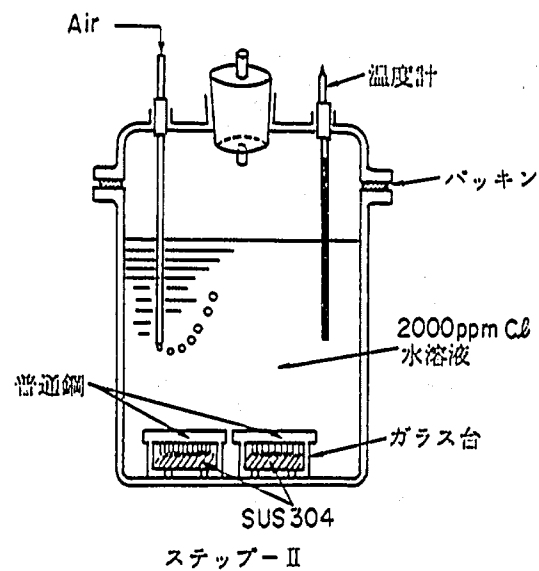


図-4.2 孔食の発生と成長させる方法

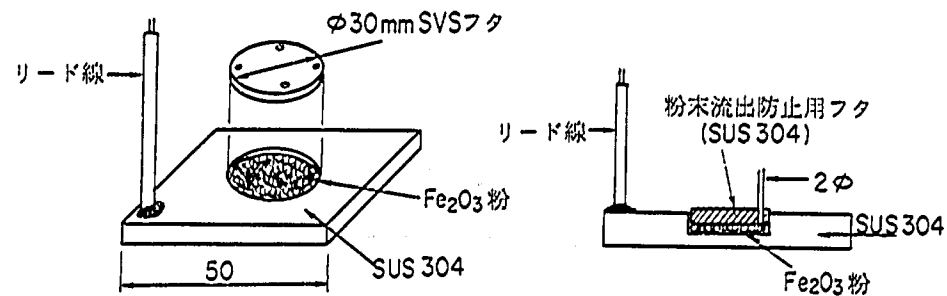


図-4.4 Fe_2O_3 をSUS304にパックして腐食電位測定

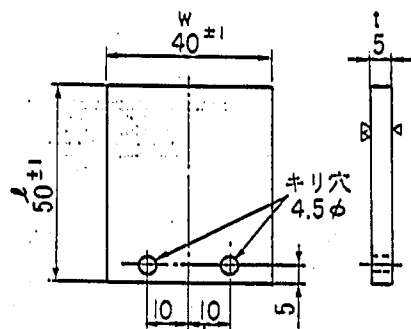


図-4.5 (1) もらい鋳再現試験片

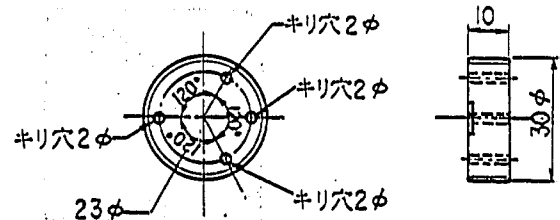
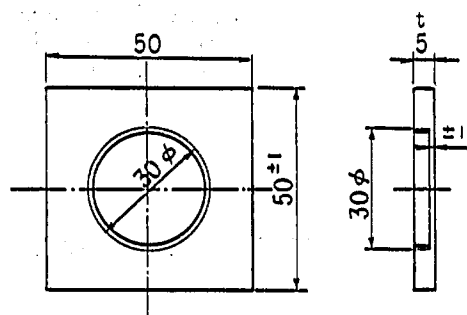


図-4.5 (2) パック用腐食電位測定試験片

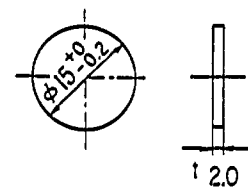


図-4.5 (3) 孔食電位測定試験片

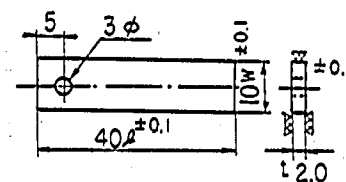


図-4.5 (4) 短冊型腐食試験片

図-4.5 腐食試験片の形状

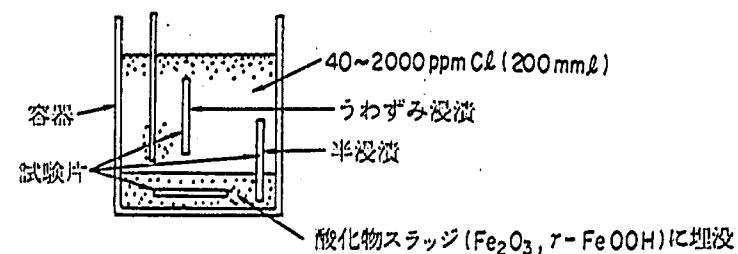


図-4.6 酸化物スラッジ中での孔食試験

4.2 試験結果

4.2.1 もらい錆再現試験

(1)ステップⅠのSUS304への赤さびの付着状況を写真-4.1 に、そのときの普通鋼の腐食状況を写真-4.2 に示す。

SUS304への赤さびの付着量は、浸漬時間の経過と共に増大した。

(2)ステップⅡのもらい錆再現試験（塩素イオン2000ppm, 50℃, 21日間浸漬）の結果、ステップⅠの浸漬時間が4日以上になるとステップⅡにおいてSUS304に孔食が発生した。しかし、ステップⅠの浸漬時間が1日ではステップⅡで孔食は発生しなかった。孔食の発生状況を写真-4.3に、孔食部の拡大を写真-4.4 に示す。

4.2.2 腐食電位測定試験

(1) Fe_2O_3 に埋没した腐食試験

試験装置の外観を写真-4.5 に示す。

①塩素イオン200ppm中のSUS304の腐食電位は図-4.7 に示すように試験スタート時約-80mV (vsSCE)であったが、浸漬時間と共に電位が振動しながら(-160mV~100mV)貴側へ移行し最高200mV まで上昇した。この電位の変化は、 Fe_2O_3 の添加により電位が貴側へ移行し、不働態皮膜の破壊と修復が繰返し生じているためであると考えられる。

しかし、浸漬時間が約 465時間以上になると電位が約40mVまで下がっており、SUS304に小さな孔食が発生していた。

②塩素イオン濃度2000ppm で行った腐食試験結果を図-4.8に示す。初期の電位は約-280mV であるが、浸漬時間と共に約-200~-100mVの範囲で振動ながら上昇した。しかし、浸漬時間が255時間以上になると約-160mVに急激に下がって、ほぼ一定の電位で推移した。このことは、孔食が発生し成長していたためと考えられる。孔食の発生状況を写真-4.6 に、孔食部分を拡大したものを写真-4.7 に示す。

(2) Fe_2O_3 をパックした腐食試験

Fe_2O_3 をパックした腐食電位測定試験前の外観状況を写真-4.8 に示す。

①塩素イオン200ppm溶液中での腐食電位は、図-4.9 に示すように初期約-130mV であるが浸漬時間と共に一担卑側へ-240mV まで下がり、その後60時間以降再び約-130mV まで回復して、ほぼ一定で推移した。しかし、孔食の発生は認められなかった。

②塩素イオン濃度 2000ppmでは、図-4.10に示すように腐食電位の経時変化は小さく約-160mVで推移し、孔食が発生していた。

③塩素イオン濃度20000ppmでは、図-4.11に示すように腐食電位は極短時間で-320 mVまで下がって、240時間試験まで同じ電位で推移した。しかし、試験時間が240時間以上になると腐食電位は急激に上昇し約-80mVではぼ一定の電位を示したが無数の孔食が発生していた。孔食の発生状況を写真-4.9に示す。

一方、2000ppm 塩素イオン溶液中で γ -FeOOH (1.7g) をパックしたSUS304の腐食電位は図-4.12に示すように極短時間で約-210mV になり、504時間まで安定した腐食電位を示したが多数の孔食が発生していた。

したがって、 γ -FeOOHはアニオン交換膜として作用し、腐食環境が厳しくなる働きをされると考えられる。

(3) アニオン交換膜付着腐食試験

①塩素イオン200ppm単味溶液中における腐食電位は図-4.13に示すように試験開始時、約-170mV であったが浸漬時間20時間後に-10mVまで上昇し、時間と共に電位が徐々に貴側へ移行し250時間後、約20mVで一定であったが、孔食は発生しなかった。

②塩素イオン濃度2000ppmでは図-4.14に示すように初期の電位は約-50mVであったが、時間と共に電位が除去に貴側へ移行し、試験終了時には約50mVであったが、微小な孔食が発生した。孔食の発生状況を写真-4.10に示す。

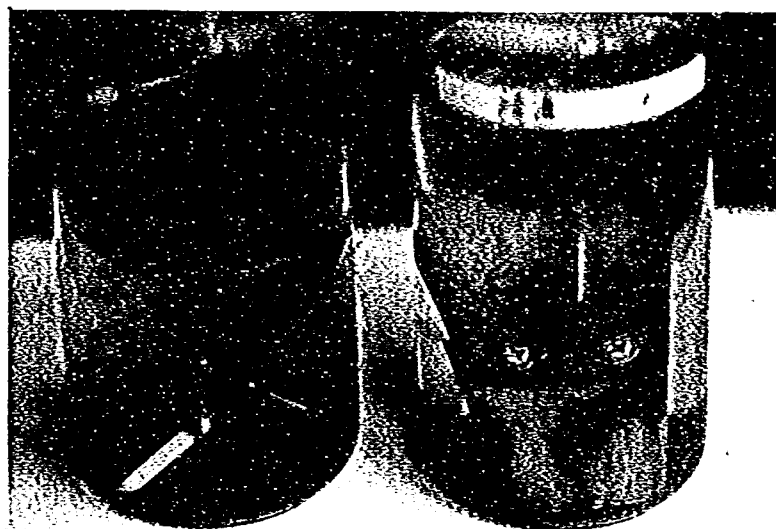
アニオン交換膜は、すき間への塩素イオンの濃縮を加速し、すき間内のpH低下により不動態皮膜を破壊し局部腐食の発生を容易にするものと考えられる。

(4) 塩素イオン単味溶液中での電位測定

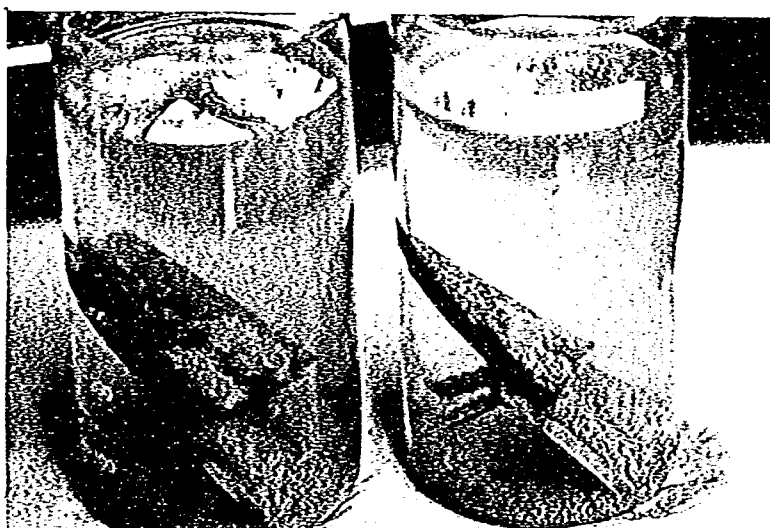
①塩素イオン200ppm単味のSUS304の腐食電位は図-4.15に示すように約-70~-140mV の範囲で推移し、ほぼ安定した電位を示し、孔食の発生しなかった。

②塩素イオン濃度2000ppmでは図-4.16に示すようにあまり腐食電位は急激な変化が認められず、時間と共に徐々に貴側へ移行し、最高40mVまで上昇したが、孔食が発生していた。

③塩素イオン濃度20000ppmでは、図-4.17に示すように腐食電位は試験開始後-150 mVであるが、時間の経過と共に電位は下がり、120時間後には-340mV であった。その後一定の-350mV で推移したが、孔食は発生していた。



1 日間浸漬



4 日間浸漬



10 日間浸漬

写真-4.1 もらい鍍再現試験（ステップ-Ⅰ）

〔SUS304-普通鋼, 2000ppm Cl^- , 50°C〕

2000ppmCl⁻, 50℃, 3week後(4日浸漬)

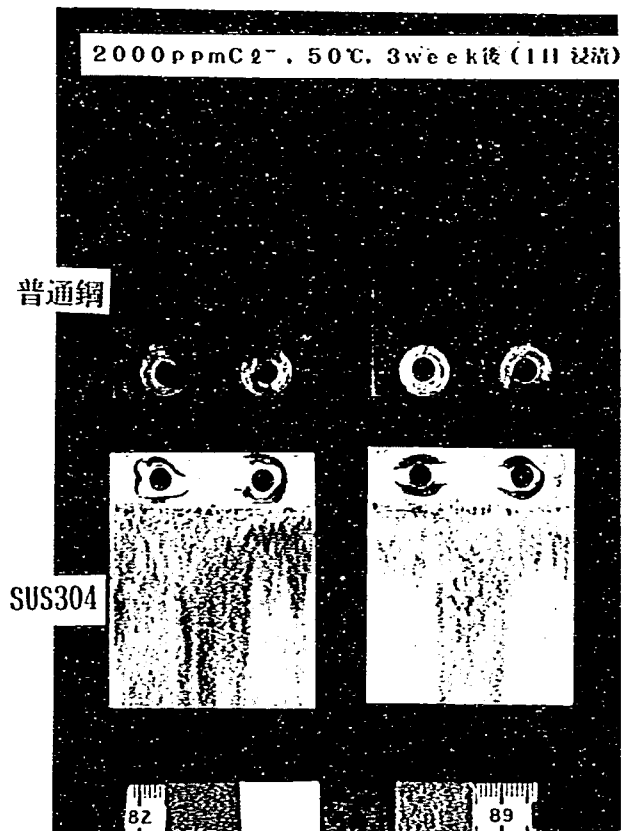
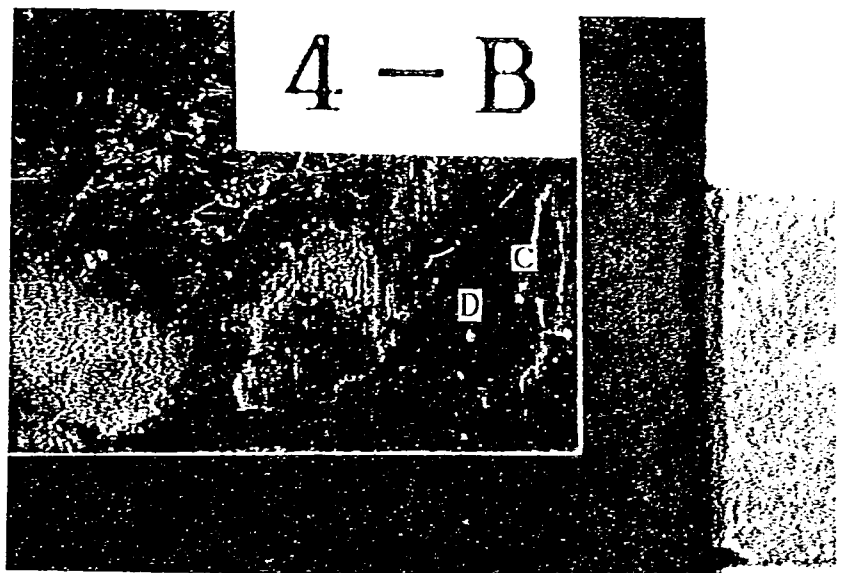
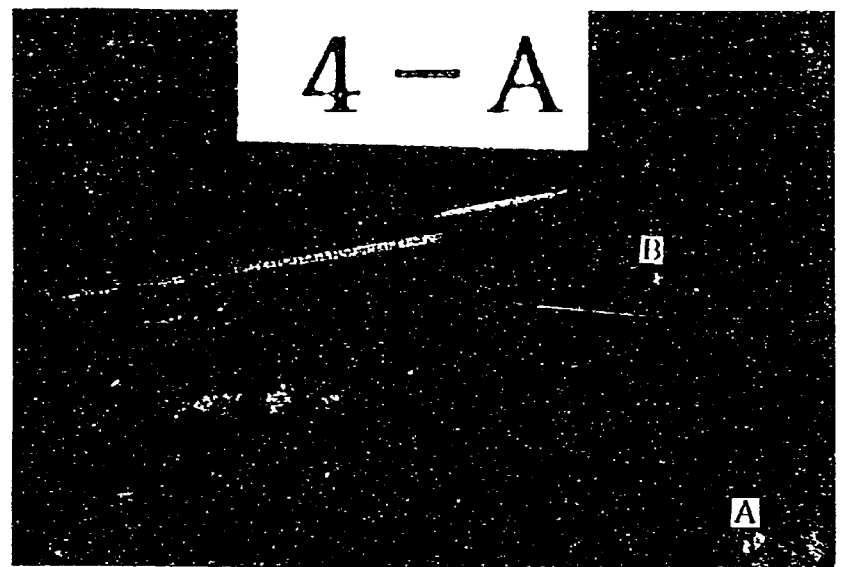
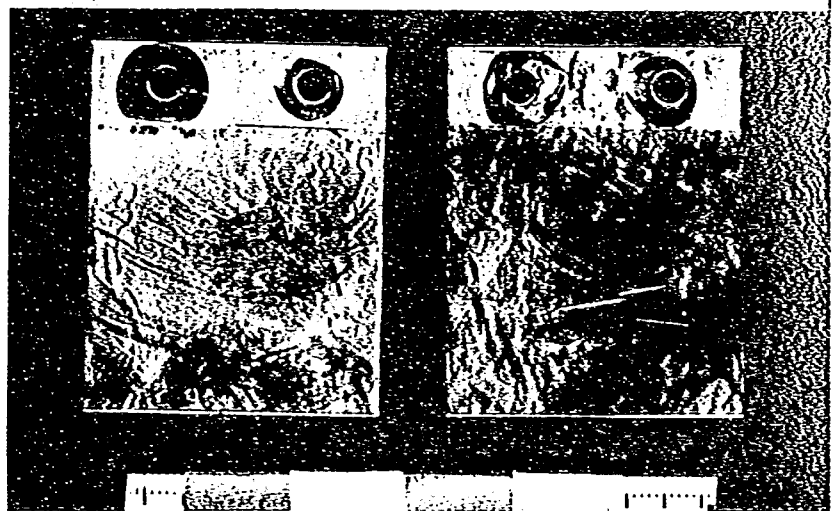
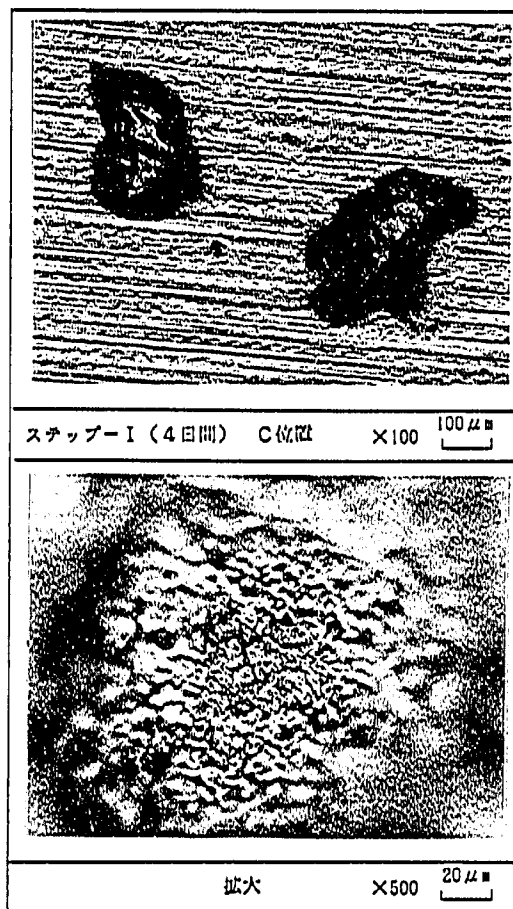


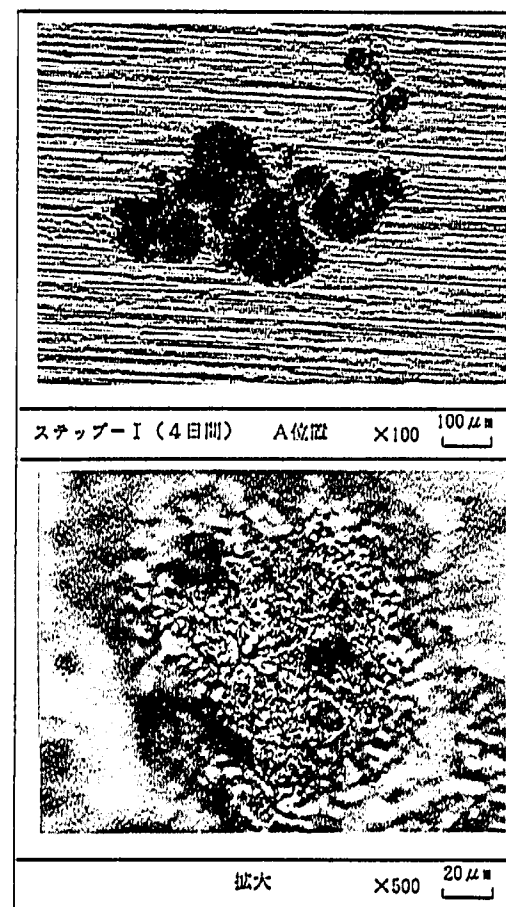
写真-4.2 SUS304と普通鋼の腐食状況
(ステップ-Ⅰ(2000ppm Cl⁻, 1日間浸漬)
→ステップ-Ⅱ(2000ppm Cl⁻, 21日間浸漬)

写真-4.3 SUS304と普通鋼の孔食発生状況
(ステップ-Ⅰ(2000ppm Cl⁻, 4日間浸漬)
→ステップ-Ⅱ(2000ppm Cl⁻, 21日間浸漬)



4B-1

写真-4.4(1) SUS304 に発生した孔食発生状況
〔ステップ-I (2000ppmCl⁻, 4日間浸漬)^{Cl⁻, 21日間浸漬}〕
→ステップ-II (2000ppmCl⁻, 21日間浸漬)〕



4A-1

写真-4.4(2) SUS304 に発生した孔食発生状況
〔ステップ-I (2000ppmCl⁻, 4日間浸漬)^{Cl⁻, 21日間浸漬}〕
→ステップ-II (2000ppmCl⁻, 21日間浸漬)〕

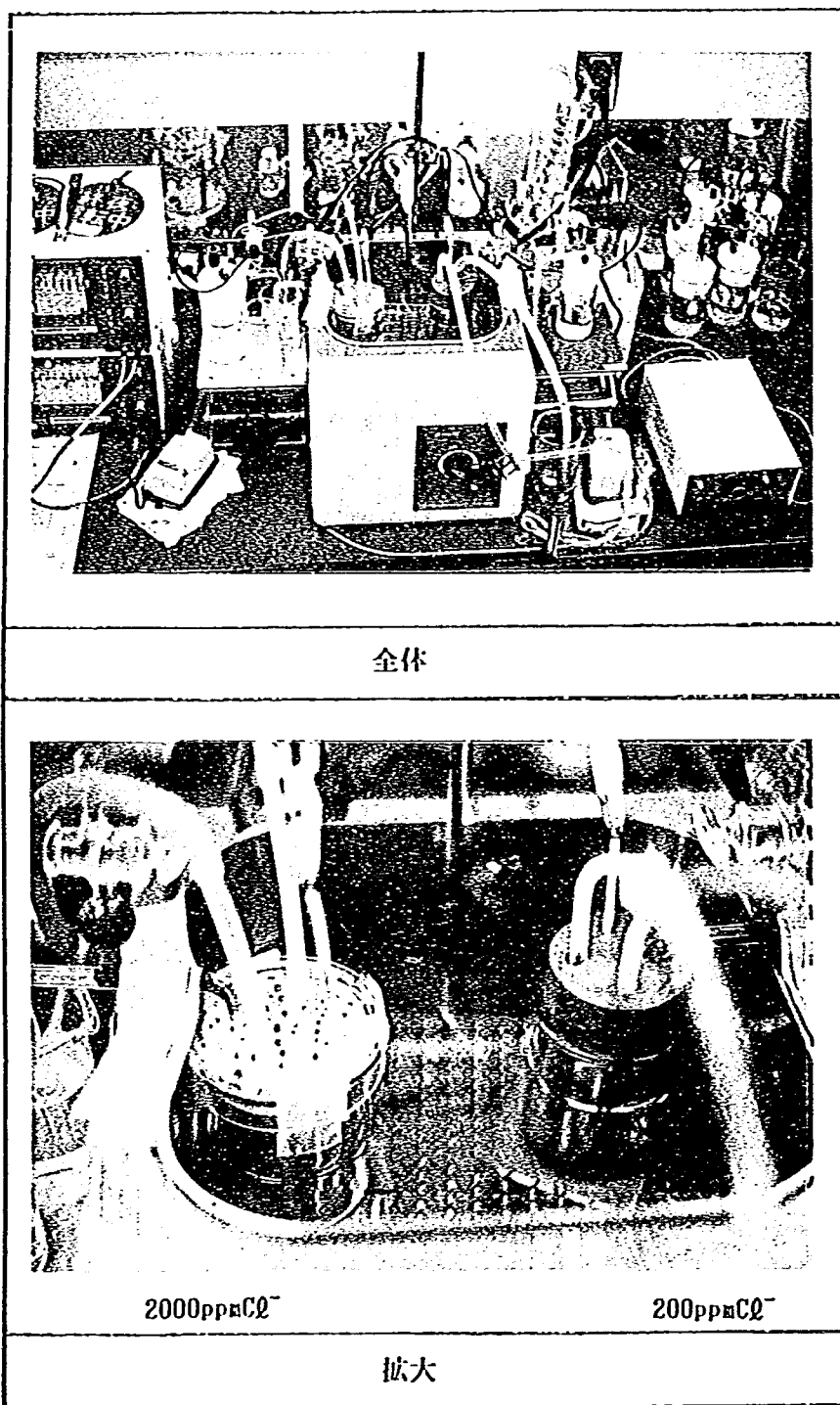


写真-4.5 Fe_2O_3 中にSUS304を埋没した腐食試験装置の外観状況

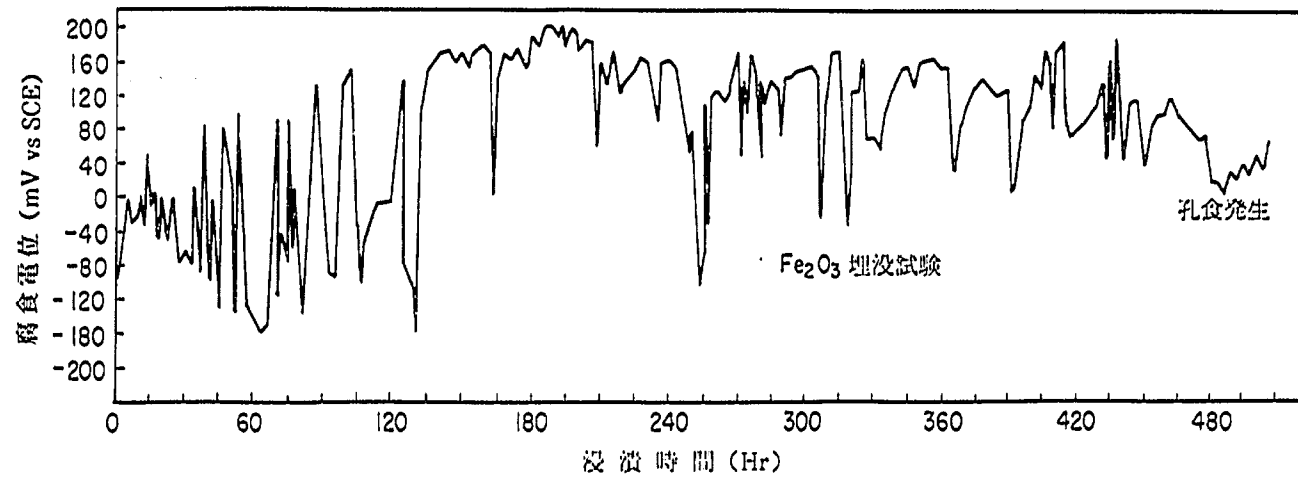


図-4.7 Fe_2O_3 に埋没したSUS 304の腐食電位の経時変化
〔200ppmC ℓ^{-} +20g Fe_2O_3 , 50°C, 21日間浸漬〕

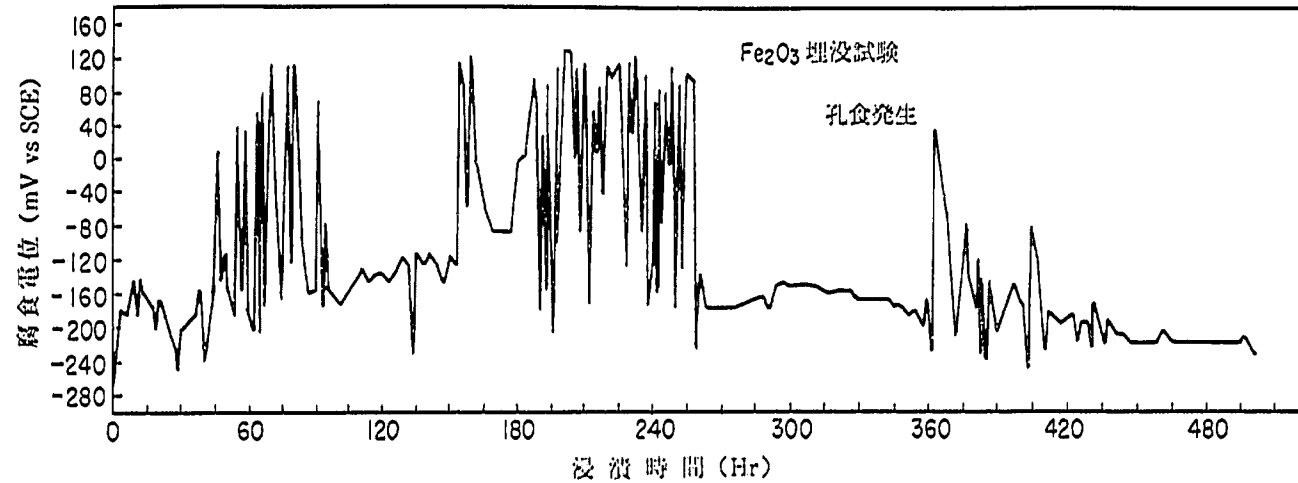


図-4.8 Fe_2O_3 に埋没したSUS 304の腐食電位の経時変化
〔2000ppmC ℓ^{-} +20g Fe_2O_3 , 50°C, 21日間浸漬〕

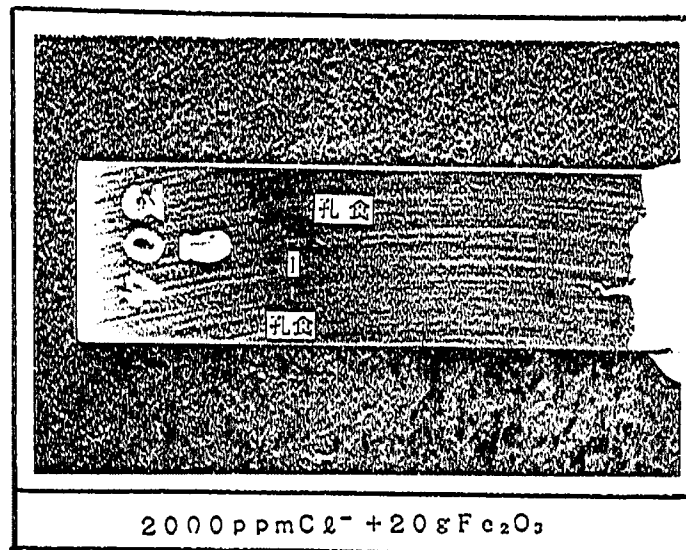


写真-4.6 Fe_2O_3 中に埋没腐食試験後のSUS304の腐食状況
〔2000ppm Cl^- +20g Fe_2O_3 , 50°C, 21日間浸漬〕

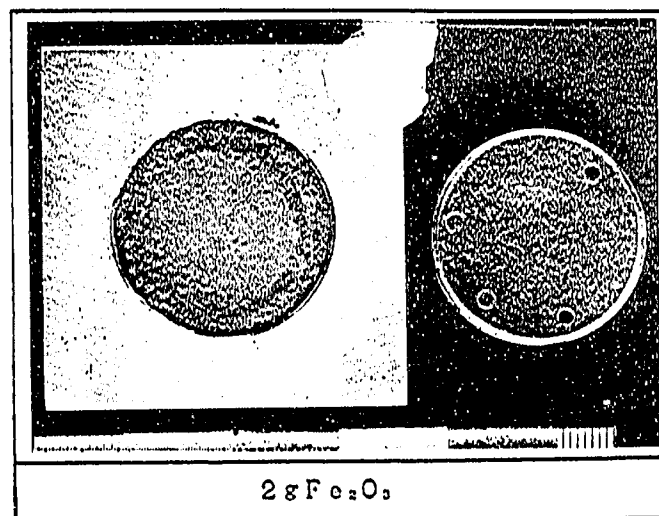


写真-4.8 Fe_2O_3 をバックした腐食電位測定試験前の外観状況
〔200ppm Cl^- +2g Fe_2O_3 , 50°C, 21日間浸漬〕

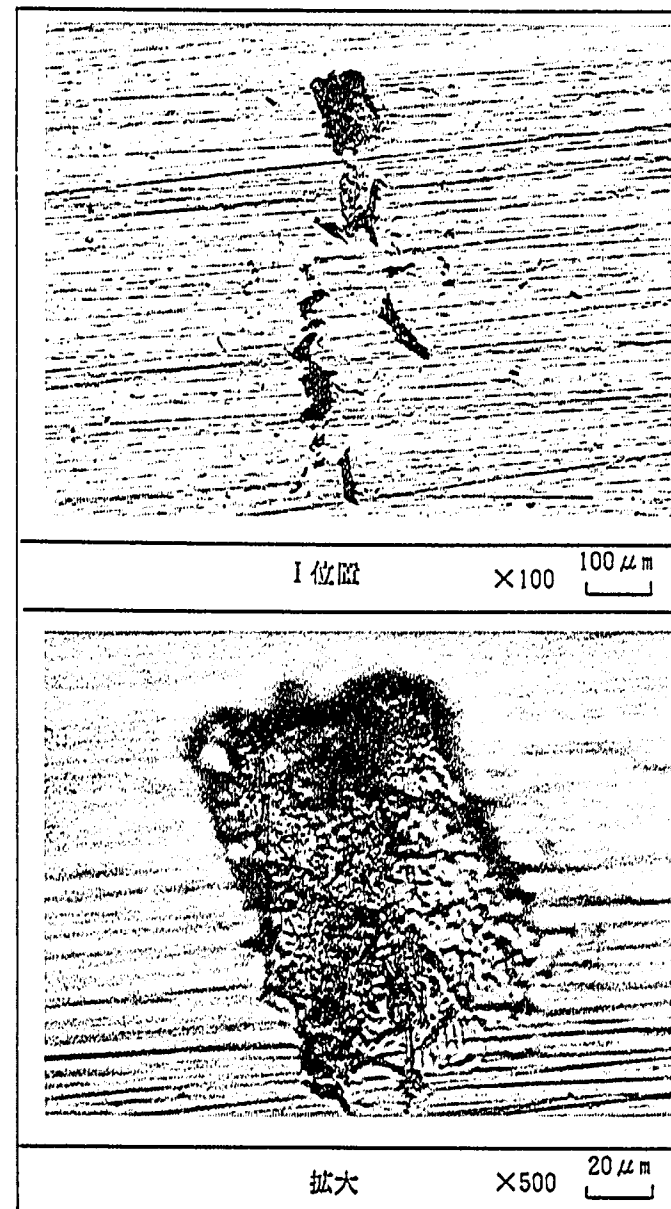


写真-4.7 Fe_2O_3 中に埋没腐食試験後のSUS304の腐食状況
〔2000ppm Cl^- +20g Fe_2O_3 , 50°C, 21日間浸漬〕

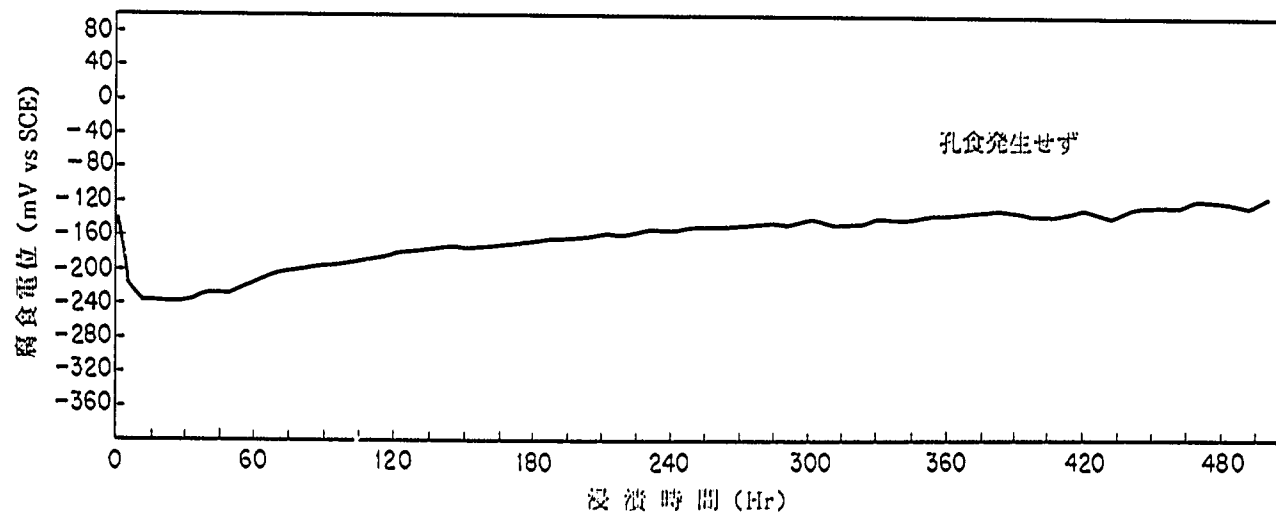


図-4.9 2 g Fe_2O_3 をパックした SUS 304 の腐食電位の経時変化
[200ppm $\text{C}\ell^-$ + 20g Fe_2O_3 , 50°C, 21日間浸漬]

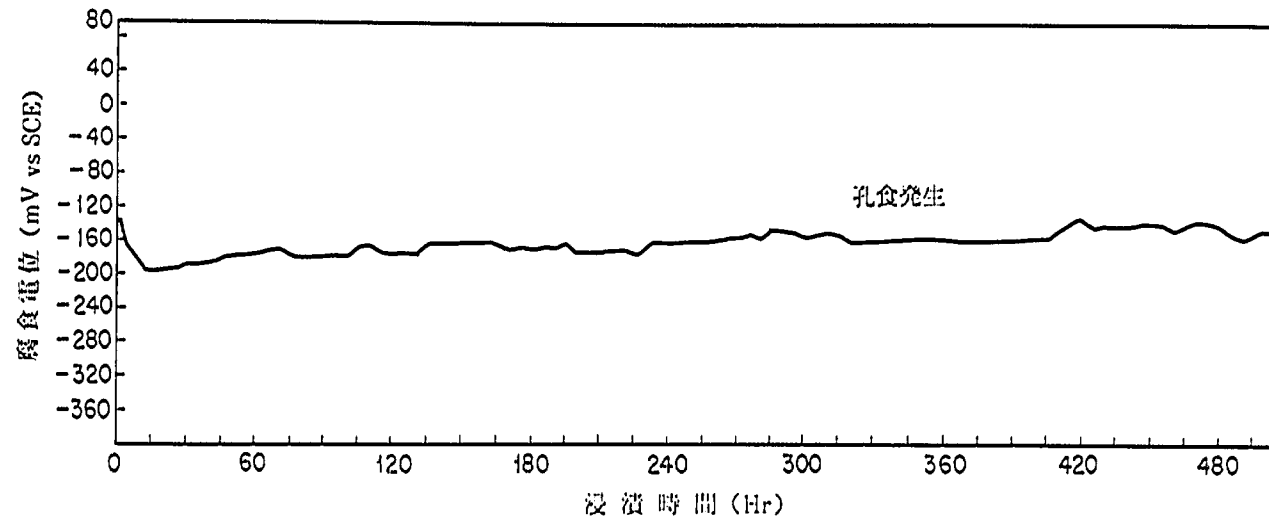


図-4.10 2 g Fe_2O_3 をパックした SUS 304 の腐食電位の経時変化
[2000ppm $\text{C}\ell^-$ + 20g Fe_2O_3 , 50°C, 21日間浸漬]

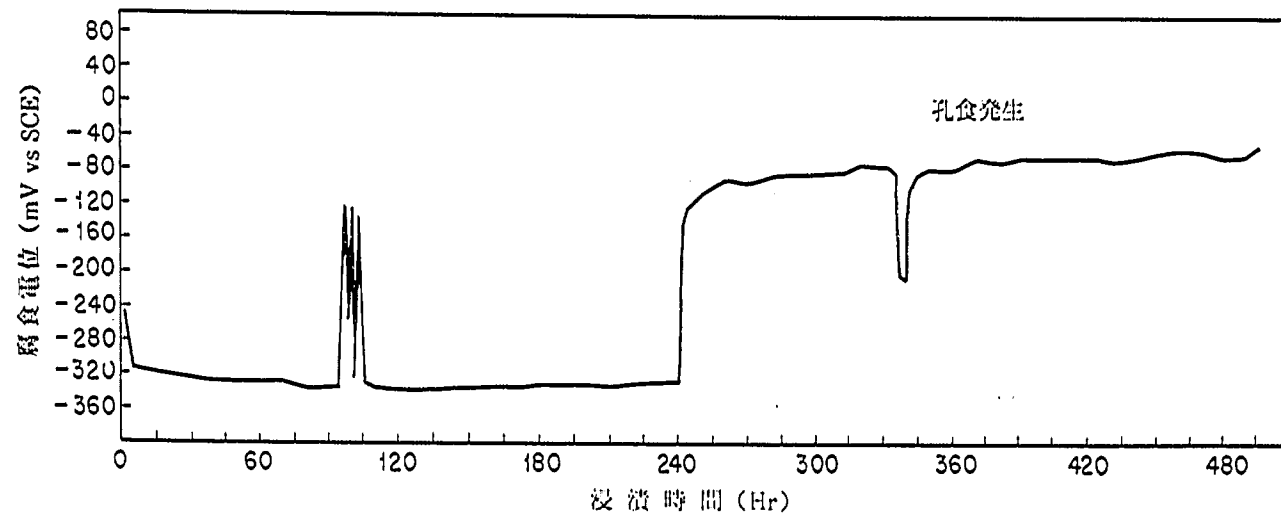


図-4.11 2 g Fe_2O_3 をパックしたSUS 304の腐食電位の経時変化
[20000ppm Cl^- +20g Fe_2O_3 , 50°C, 21日間浸漬]

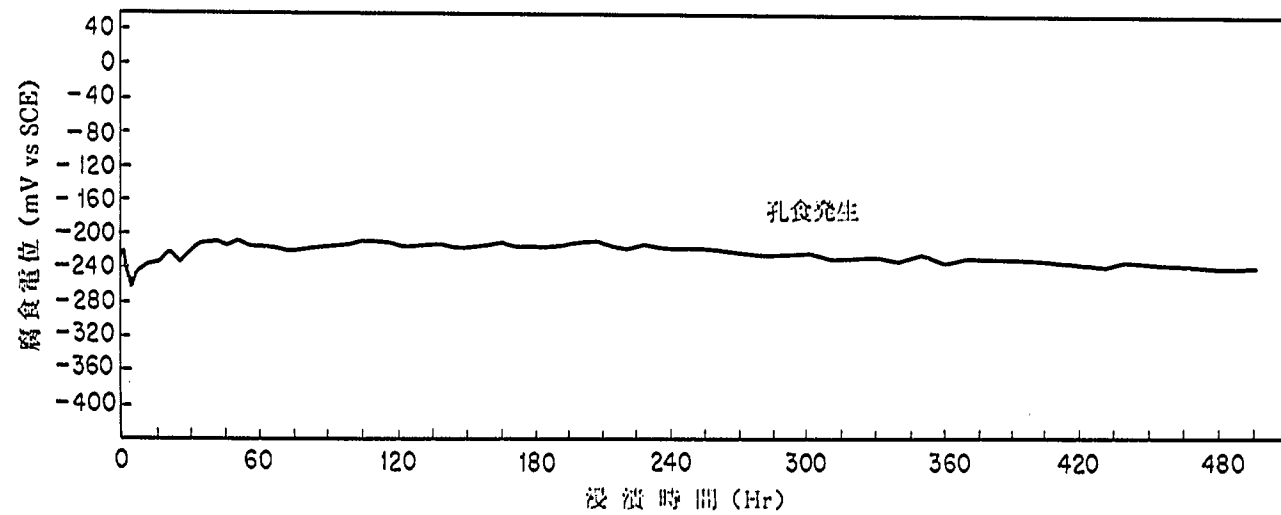


図-4.12 20000ppm Cl^- 溶液中で $\gamma\text{-FeOOH}$ (1.7g) パックしたSUS 304の
腐食電位の経時変化 [50°C, 21日間浸漬]

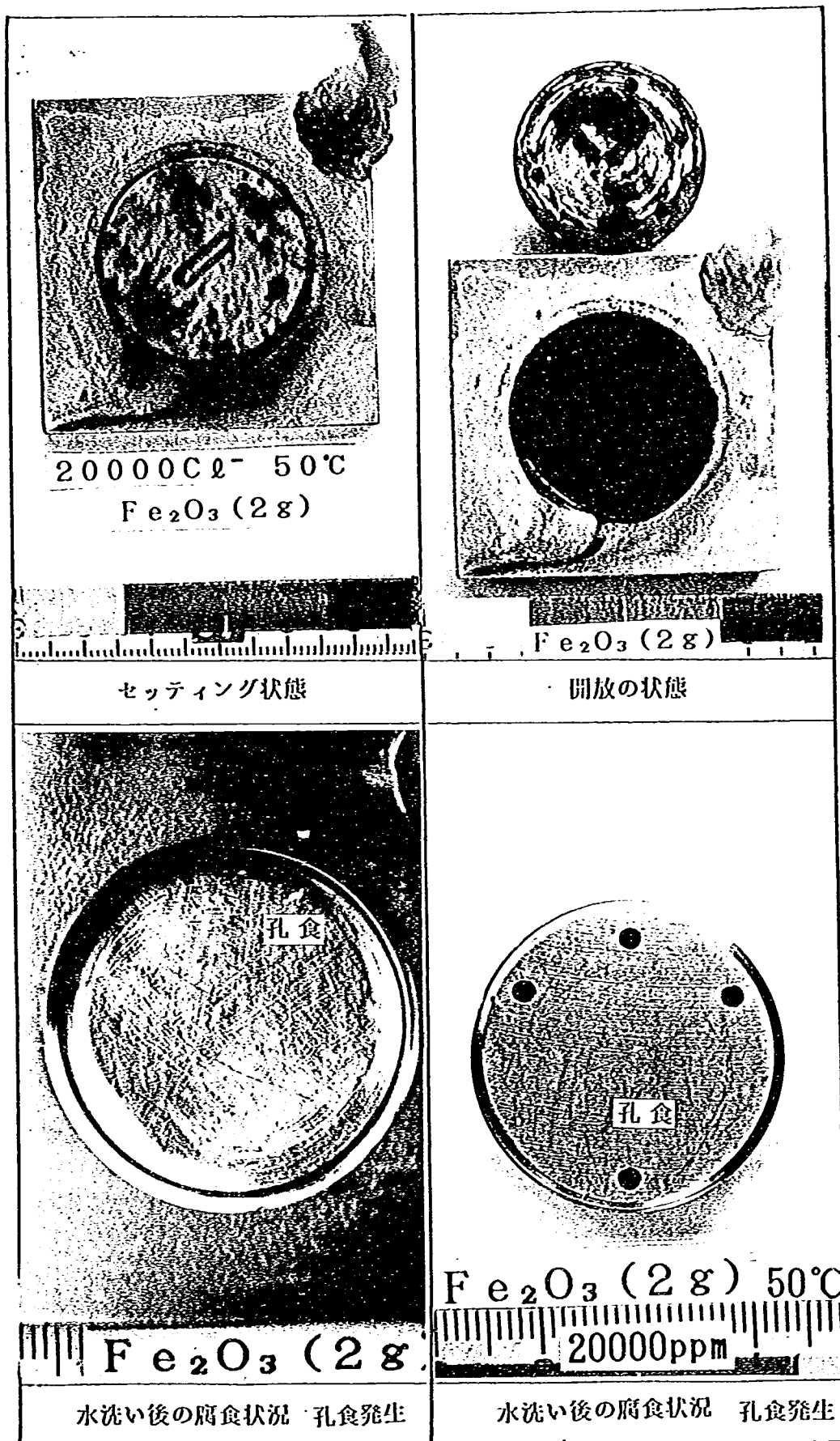


写真-4.9 Fe₂O₃をバックした腐食電位測定試験後の孔食発生状況
(20000ppmCℓ⁻+20gFe₂O₃, 50℃, 21日間浸漬)

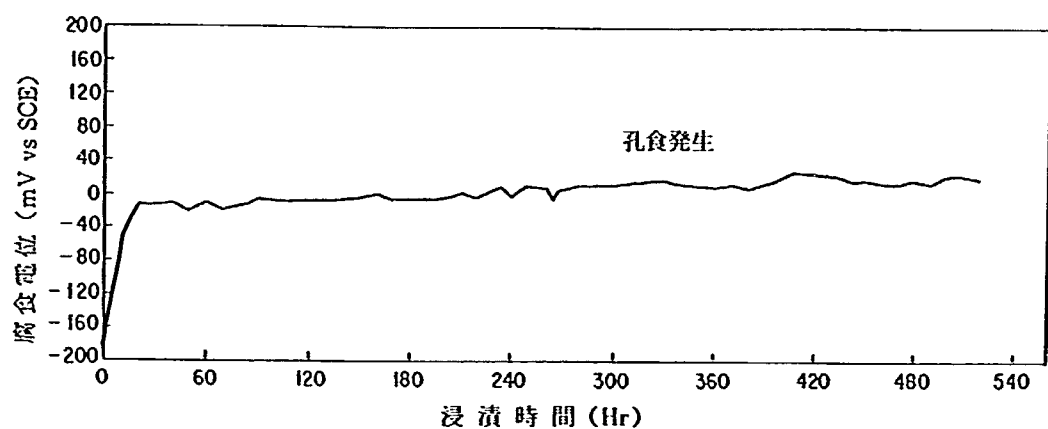


図-4.13 200 ppm Cl^- 単味溶液中でのアニオン交換膜付 SUS 304 の腐食電位の経時変化 (50℃, 21日間浸漬)

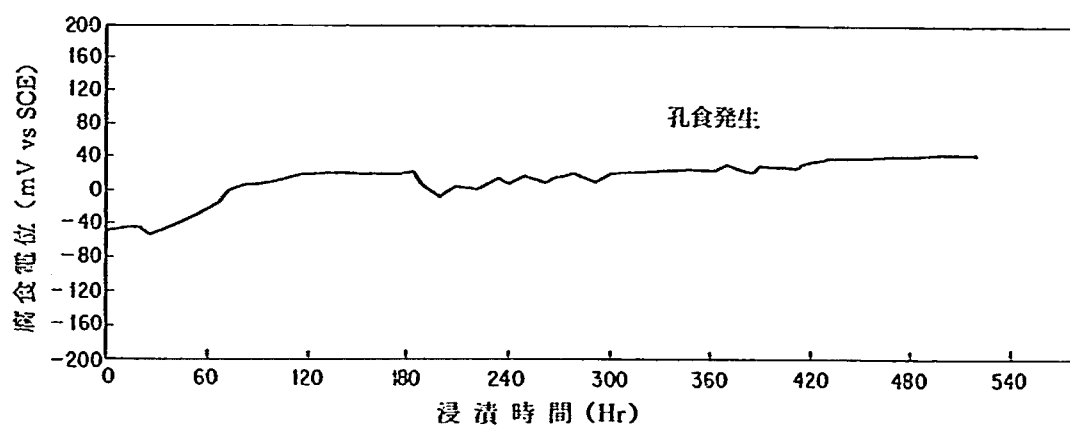


図-4.14 2000 ppm Cl^- 単味溶液中でのアニオン交換膜付 SUS 304 の腐食電位の経時変化 (50℃, 21日間浸漬)

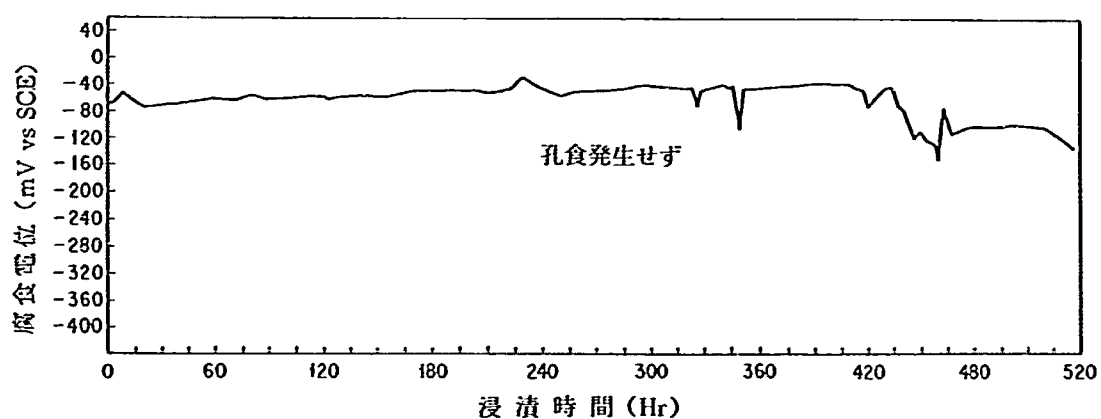
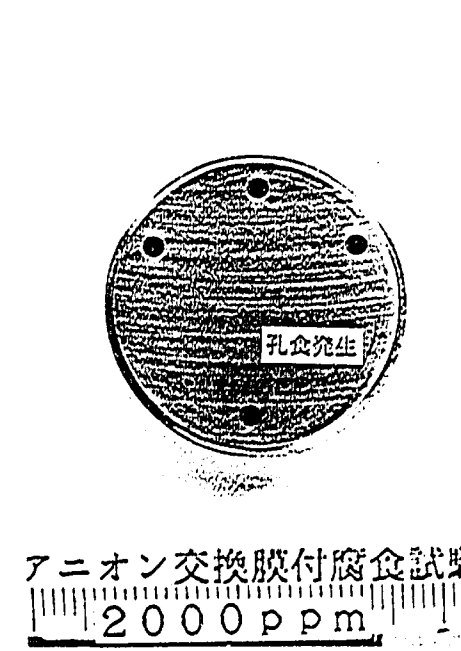
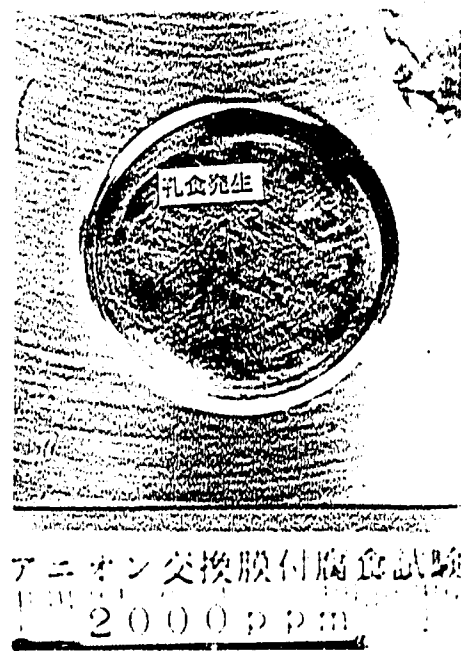
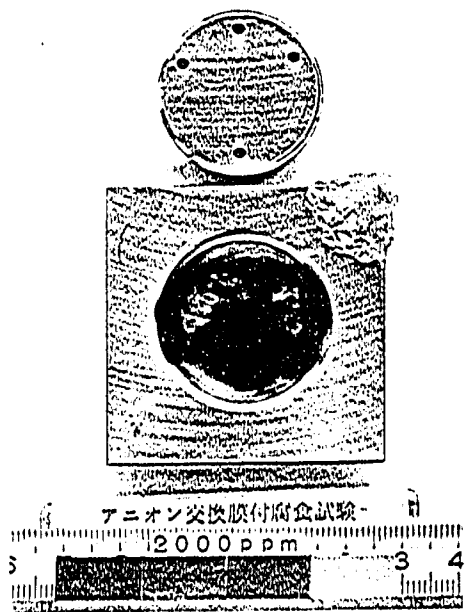
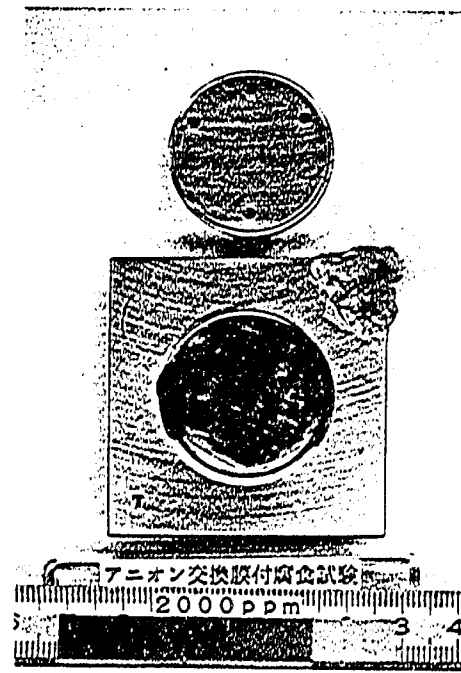
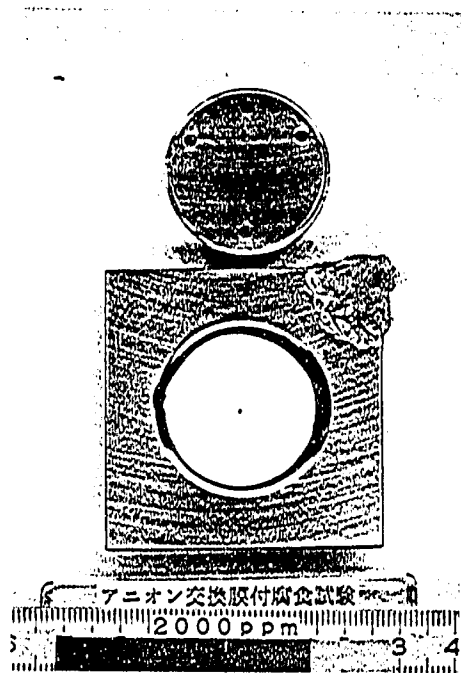
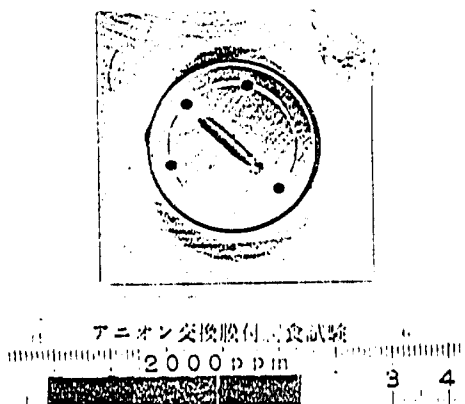


図-4.15 200 ppm Cl^- 単味溶液中での SUS 304 の腐食電位の経時変化 (50℃, 21日間浸漬)



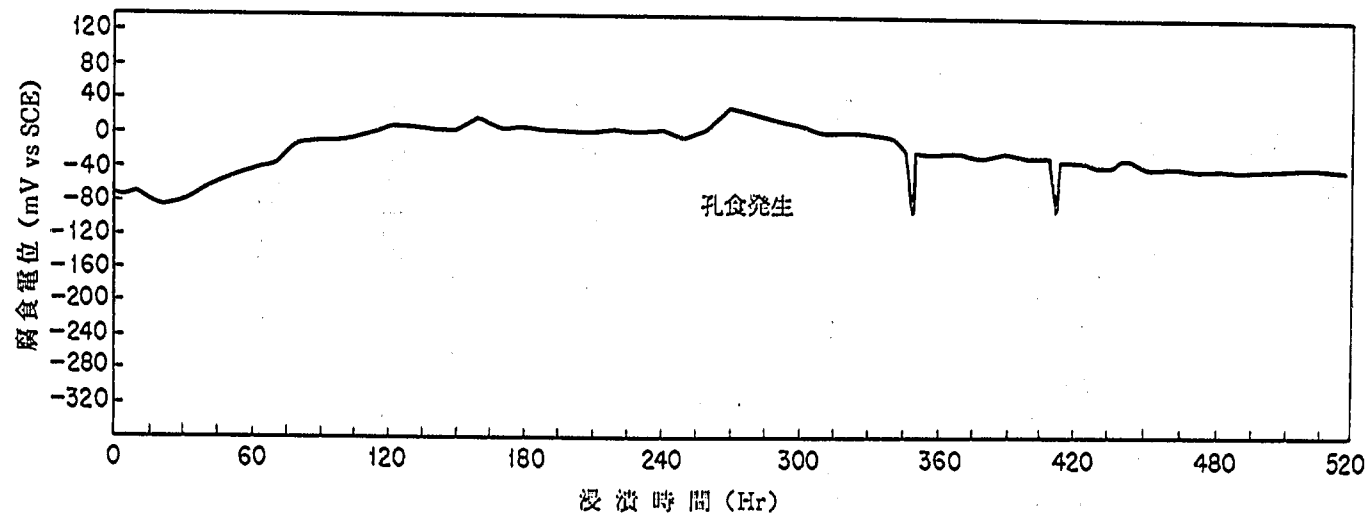


図-4.16 2000 ppm Cl^- 単味溶液中での SUS 304 の腐食電位の経時変化
〔50°C, 21日間浸漬〕

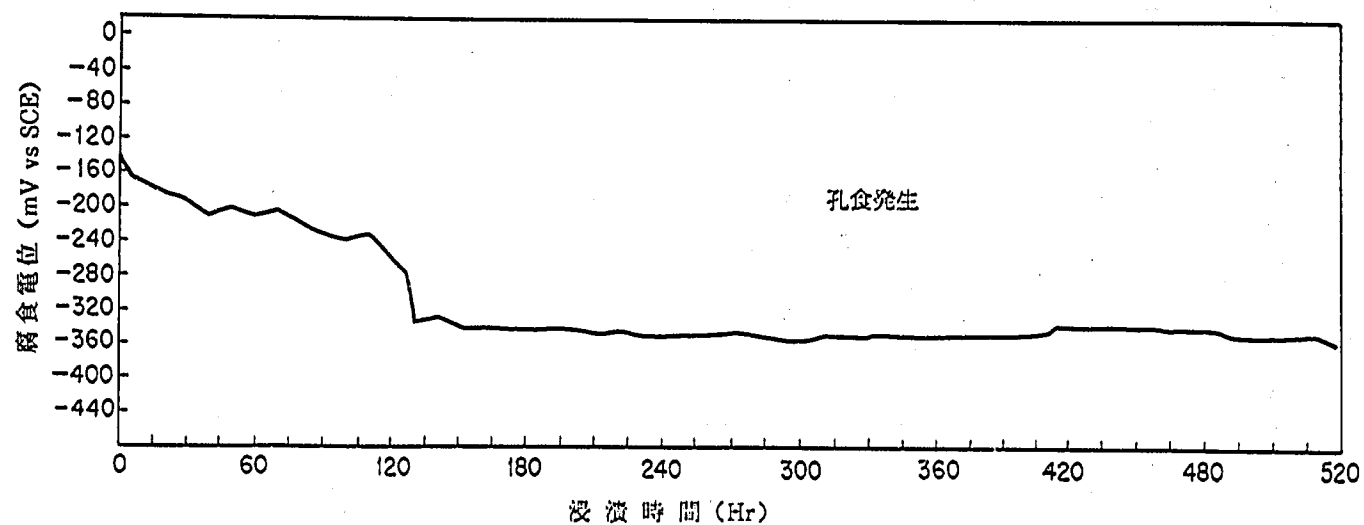


図-4.17 2000 ppm Cl^- 単味溶液中での SUS 304 の腐食電位の経時変化
〔50°C, 21日間浸漬〕

4.2.3 孔食発生試験

(1) 塩素イオン濃度及び温度の影響

①表-4.3 及び図-4.18に示すように試験温度が室温(29℃)で、塩素イオン濃度が200ppmにおける電流密度 $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ のときの孔食発生電位は558mVで、塩素イオン濃度が2000ppmにおける孔食発生電位は460mVまで低下した。

②試験温度が60℃以上に上昇すると図-4.19に示すように塩素イオン濃度が200ppmの孔食発生電位は468mVで、塩素イオン濃度が2000ppmの孔食発生電位は280mVまで低下した。

したがって、SUS304の孔食発生電位は塩素イオン濃度の増加及び試験温度の上昇と共に低下するので、孔食が発生しやすくなることが明らかとなった。

(2) 塩素イオン濃度、 Fe_2O_3 及び $\gamma\text{-FeOOH}$ の影響

Fe_2O_3 及び $\gamma\text{-FeOOH}$ を含む塩素イオン溶液において、 Fe_2O_3 埋没、半浸漬及び上澄浸漬のいずれの状態でもSUS304に微細な孔食が発生した。

塩素イオン濃度40ppmにおける孔食発生状況を写真-4.11に、孔食部の拡大を写真-4.12に示す。

①試験温度を常温まで下げて塩素イオン濃度が200と2000ppmの溶液に長時間浸漬すると、 Fe_2O_3 が存在すると、 $50\mu\text{m}$ 程度の孔食が発生した。

したがって、 Fe_2O_3 は、電位-pH図から明らかなように腐食電位を上げる働きと、 Fe_2O_3 が付着することによりSUS304との間にすき間を形成し、孔食発生電位を下げると推測される。

②50℃における $\gamma\text{-FeOOH}$ を含む200ppm塩素イオン溶液中でも微細な孔食が発生した。

表-4.3 SUS304の孔食電位測定結果
〔塩素イオン(as NaCl), 20mV/min Ar脱気〕

試験温度 (°C)	塩素イオン濃度 (ppm)	孔 食 電 位	
		Vc' 10 (mV)	Vc' 100 (mV)
室温 (29°C)	200	558	658
	2000	460	466
50°C	200	525	554
	2000	324	335
60°C	200	468	485
	2000	280	290

表-4.4 各種腐食環境下でのSUS304の孔食発生状況調査結果

	試 験 環 境	孔食発生の 有 無	自 然 電 位 (mV vs SCE)	孔食発生電位 (V' c10mV)
1	塩素イオン200ppm, 50°C, 21日間	な し	-40~-110mV	525
2	塩素イオン2000ppm, 50°C, 21日間	あ り	-50~-100mV	324
3	塩素イオン20000ppm, 50°C, 21日間	あ り	-140~-340mV	
4	塩素イオン40ppm +16g Fe ₂ O ₃ , 50°C, 500時間	あ り		
5	塩素イオン200ppm +16g Fe ₂ O ₃ , 50°C, 500時間	あ り		
6	塩素イオン2000ppm +16g Fe ₂ O ₃ , 50°C, 500時間	あ り		
7	塩素イオン200ppm +20g Fe ₂ O ₃ , 50°C, 21日間	あ り		
8	塩素イオン2000ppm +20g Fe ₂ O ₃ , 50°C, 21日間	あ り		
9	塩素イオン200ppm +16g Fe ₂ O ₃ , 室温, 157日間	あ り		
10	塩素イオン2000ppm +16g Fe ₂ O ₃ , 室温, 157日間	あ り		
11	塩素イオン200ppm + 2g Fe ₂ O ₃ , 50°C, 21日間	な し	-120~-240mV	
12	塩素イオン2000ppm + 2g Fe ₂ O ₃ , 50°C, 21日間	あ り	-130~-190mV	
13	塩素イオン20000ppm + 2g Fe ₂ O ₃ , 50°C, 21日間	あ り	-40~-340mV	
14	塩素イオン2000ppm + 16g γ-FeOOH, 50°C, 500時間	あ り		
15	塩素イオン2000ppm + 1.7g γ-FeOOH, 50°C, 21日間	あ り	-210~-260mV	
16	塩素イオン200ppm + 16g γ-FeOOH, 50°C, 500時間	あ り		
17	塩素イオン40ppm + 16g γ-FeOOH, RT, 157日間			
18	塩素イオン200ppm + 16g γ-FeOOH, RT, 157日間			
19	塩素イオン2000ppm + 16g γ-FeOOH, RT, 157日間			

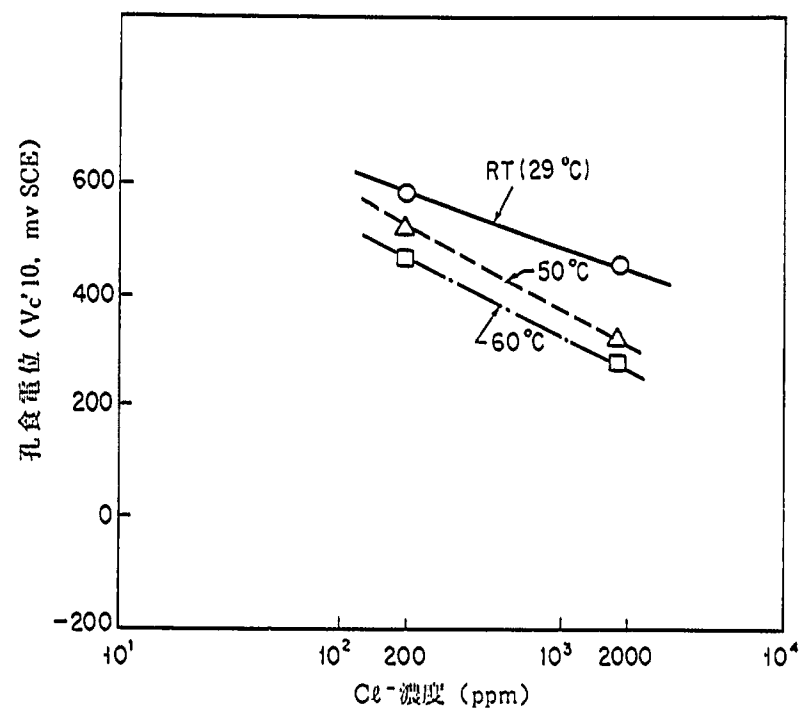


図-4.18 SUS 304 の孔食電位に及ぼす塩素イオン濃度の影響
[Cl⁻ (as NaCl), 20mV/min, Ar脱気]

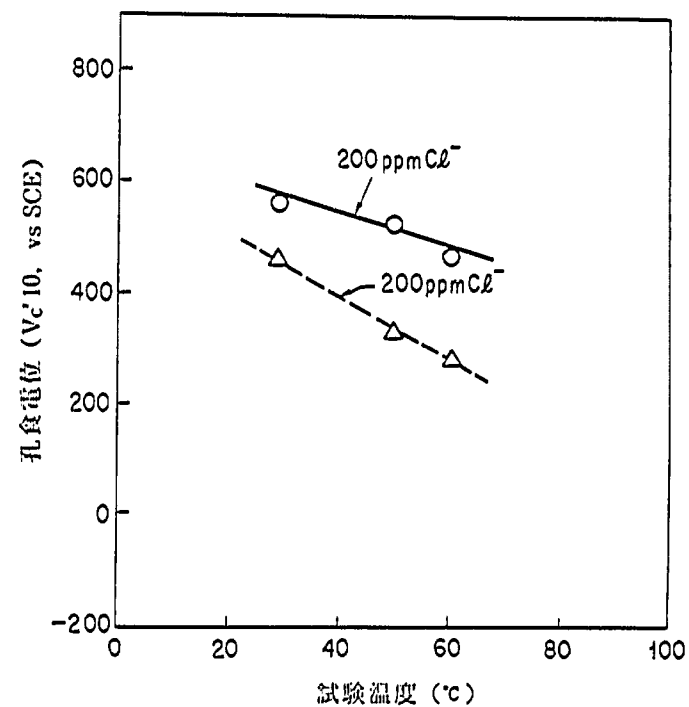


図-4.19 SUS 304 の孔食電位に及ぼす試験温度の影響
[Cl (as NaCl), 20mV/min, Ar脱気]

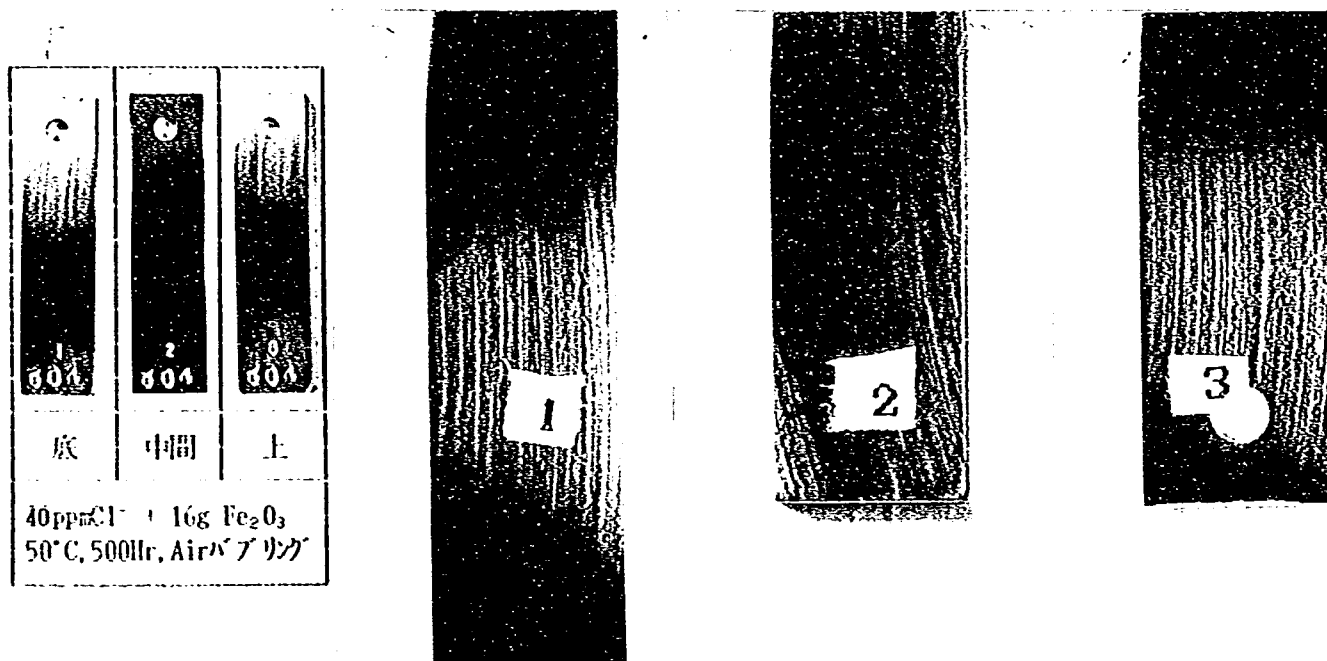


写真-4.11 SUS304の浸漬試験後の外観
(40ppm Cl⁻ + 16gFe₂O₃, 50°C, 空気バブリング, 500時間)

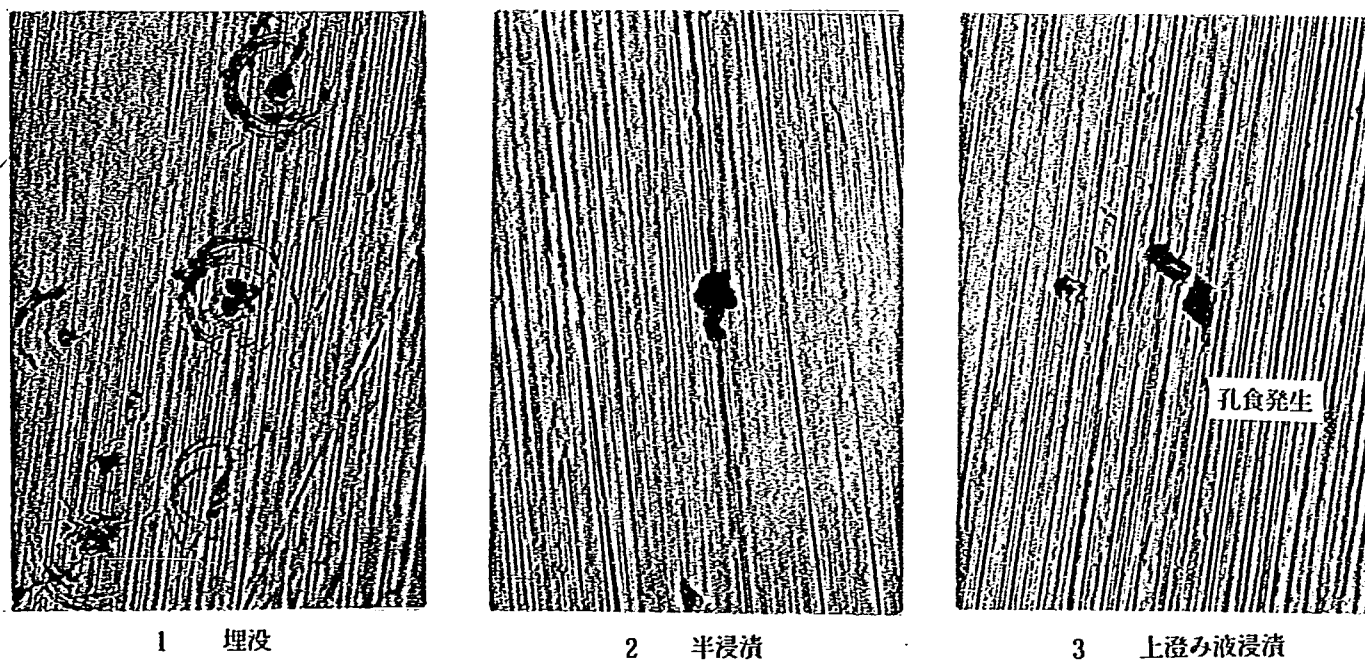


写真-4.12 SUS304の孔食発生状況
(40ppm Cl⁻ + 16gFe₂O₃, 50°C, 空気バブリング, 500時間)

4.3 まとめ

SUS304へのもらい錆の付着による耐食性の劣化を調査する為に Fe_2O_3 及び赤さび($\gamma\text{-FeOOH}$)中でのSUS304の腐食電位の経時変化と孔食発生の有無について調べた結果を以下に示す。

4.3.1 もらい錆再現試験

- (1) ステップⅠにおいて、SUS304への赤さび($\gamma\text{-FeOOH}$)の付着量は、時間と共に増加した。
- (2) ステップⅡにおいて、 50°C で塩素イオン濃度2000ppm, での浸漬時間が4日以上になると孔食が発生した。

4.3.2 もらい錆による腐食電位の経時変化と孔食発生

(1) Fe_2O_3 中にSUS304を埋没した腐食試験

①20gの Fe_2O_3 を含む塩素イオン濃度200ppm溶液中でSUS304の腐食電位は、浸漬時間と共に電位が上下に振動する。この現象は不動態皮膜の破壊と修復が繰返し生じているためと考えられる。孔食が発生した。

②塩素イオン濃度が2000ppmの場合も同様の腐食電位の変動が認められた。

(2) Fe_2O_3 をパックした腐食電位の経時変化

①2g Fe_2O_3 をパックして塩素イオン200ppm溶液中でのSUS304の腐食電位は、一担卑に下がり、60時間後初期電位に回復してほぼ一定で推移した。21日間浸漬後、孔食の発生は認められなかった。

②塩素イオン濃度が20000ppmになると腐食電位は、すぐに下り長時間一定の電位で推移し、無数の孔食が発生した。

(3) アニオン交換膜付腐食試験

①塩素イオン濃度が200ppm溶液中で腐食電位は、 -170mV から 20mV まで緩やかに移行した。

②塩素イオン濃度が2000ppmでも同様に電位が上昇して 50mV になった。

③塩素イオン濃度が200ppmでは孔食は発生しないが、2000ppmになると孔食が発生した。

(4) 塩素イオン単味溶液中での電位測定

①塩素イオン濃度200ppm単味の溶液中で腐食電位は、 $-70\sim-140\text{mV}$ の範囲ではほぼ安定した電位を示し、孔食は発生しなかった。

②塩素イオン濃度2000ppmでは腐食電位は、 $-70\sim-40\text{mV}$ で推移したが、孔食は発生した。

③塩素イオン濃度20000ppmでは腐食電位は、 -350mV まで下がり、孔食が発生した。

4.3.3 孔食試験

- (1) 試験温度50℃では、 Fe_2O_3 を含む塩素イオン溶液中で Fe_2O_3 に埋没した場合、半浸漬した場合及び上澄液に浸漬した場合でもいずれも微細な孔食が発生した。

Fe_2O_3 が共存すると、塩素イオン濃度が40ppmでも孔食が発生した。

- (2) 試験温度を常温に下げても塩素イオン濃度が200ppmで Fe_2O_3 が存在すると大きな孔食が発生した。 Fe_2O_3 の付着により腐食電位が下がり、すき間が形成されて孔食発生電位が下がったものと推測される。

- (3) $\gamma\text{-FeOOH}$ を含む塩素イオン濃度200ppm溶液中でSUS304に微細な孔食が発生した。

$\gamma\text{-FeOOH}$ も孔食発生電位及びすき間腐食発生電位を低下（卑側）させる働きがあると考えられる。

- (4) もらい錆が存在すると、ステンレス鋼の耐食性に悪影響を及ぼすことが明らかとなった。もらい錆がアニオン交換膜的な性質を有しているため、塩化物の濃縮を促進し局部腐食が発生し易くなるためと考えられる。

SUS304へのもらい錆の付着による耐食性の劣化を調べた結果、塩素イオン濃度200ppm単味溶液中では孔食の発生は認められなかったが、もらい錆（ Fe_2O_3 または $\gamma\text{-FeOOH}$ ）が存在する環境下で、50℃において塩素イオン濃度が40ppm以上でも孔食が発生することが明らかとなった。もらい錆（ Fe_2O_3 または $\gamma\text{-FeOOH}$ ）がSUS304の孔食発生に及ぼす影響が非常に大きいことが明らかとなった。

5. 不動態化処理に関する試験

ダム湖水環境におけるステンレス鋼表面の不動態化処理の効果を明らかにするため、不動態化処理したステンレス鋼と大気中に放置した無処理のステンレス鋼との耐食性の検討及び不動態化処理したステンレス鋼の長期耐食性の検討を行った。

5.1 試験方法

(1) 供試材

試験には、市販されているSUS304を400番エメリー紙で研磨仕上げし、図-5.1に示す孔食試験片とすき間腐食試験片を製作した。

(2) 不動態化処理条件

不動態化処理は、以下に示す2条件で行った。

①30℃の15% HNO_3 に30分間浸漬

②30℃の15% NaNO_3 中で700mV(vsAg/AgCl)で30分間電解

(3) 試験方法

不動態化処理したステンレス鋼と大気中に放置した無処理のステンレス鋼との耐食性を比較するため、図-5.2及び表-5.1に示すように①、②の条件で不動態化処理した孔食試験片、すき間腐食試験片について30℃の塩素イオン濃度200ppmのNaCl水溶液中で20mV/minで孔食発生電位及びすき間腐食発生電位を測定した。また、無処理で大気中に0, 1, 3, 5, 10日間放置した試験片について、同様に孔食発生電位及びすき間腐食発生電位を測定した。

不動態化処理したステンレス鋼の長期耐食性を明らかにするため、図-5.3及び表-5.2に示すように①、②の条件で不動態化処理した試験片を20～22℃の塩素イオン濃度20ppm, 200ppm, 20000ppmのNaCl水溶液中に不動態化処理した試験片は60日間、研磨のままの試験片は113日間浸漬した後、孔食発生電位を20℃でそれぞれの塩素イオン濃度のNaCl水溶液中で2mV/minで測定した。また、不動態化処理していない試験片についても同様の測定を行った。

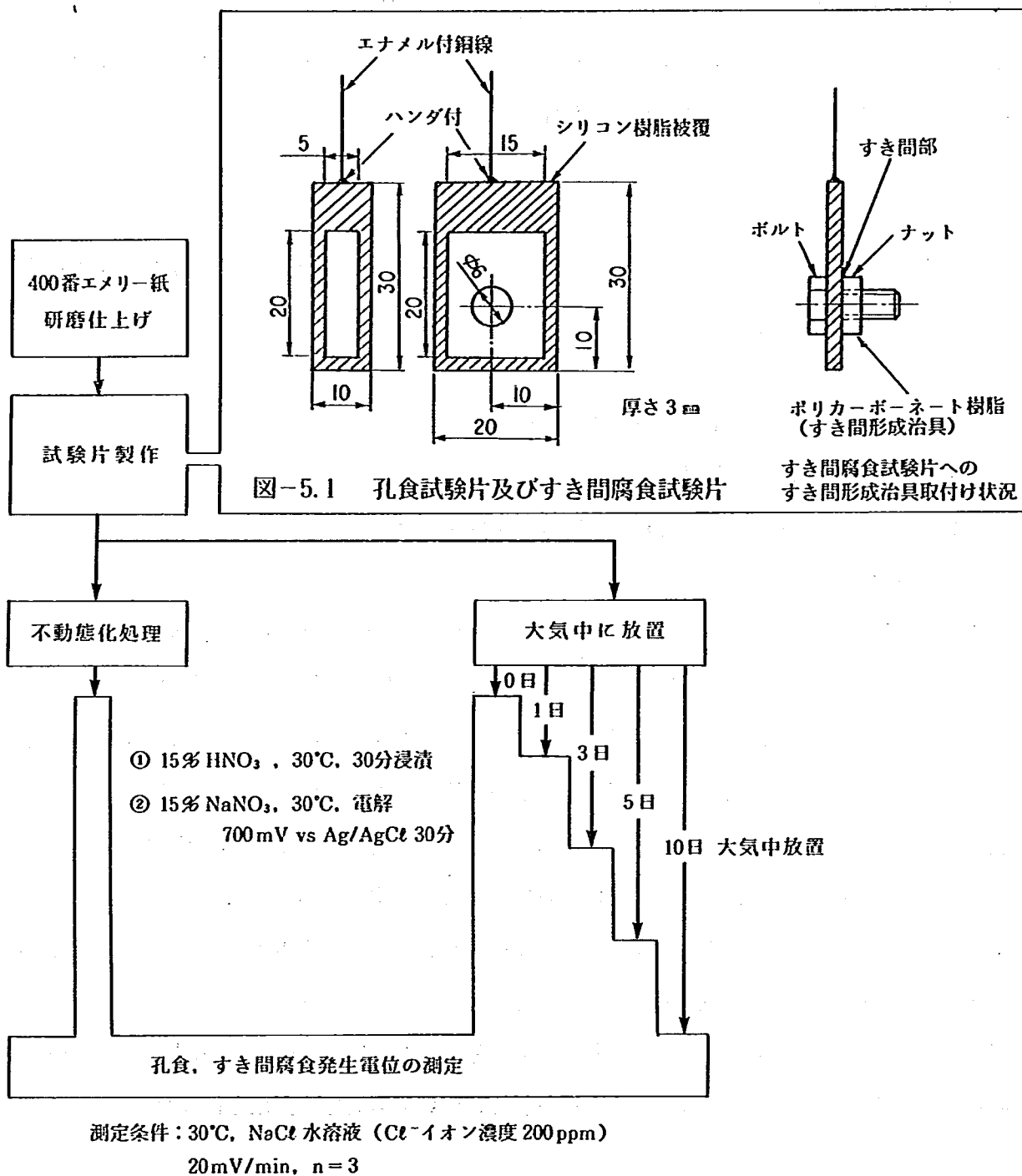


図-5.2 不動態化処理の有無によるステンレス鋼の耐食性試験

表-5.1 不動態化処理及び大気中に放置したステンレス鋼の耐食性調査表

○：孔食発生電位測定(n=3)

●：すき間腐食発生電位測定(n=3)

前処理条件 放置時間	不 動 態 化 処 理		大気中に放置
	HNO ₃ 浸漬	NaNO ₃ 電解	
0 日	○ ○ ○ ● ● ●	○ ○ ○ ● ● ●	○ ○ ○ ● ● ●
1 日	—	—	○ ○ ○ ● ● ●
3 日	—	—	○ ○ ○ ● ● ●
5 日	—	—	○ ○ ○ ● ● ●
10 日	—	—	○ ○ ○ ● ● ●

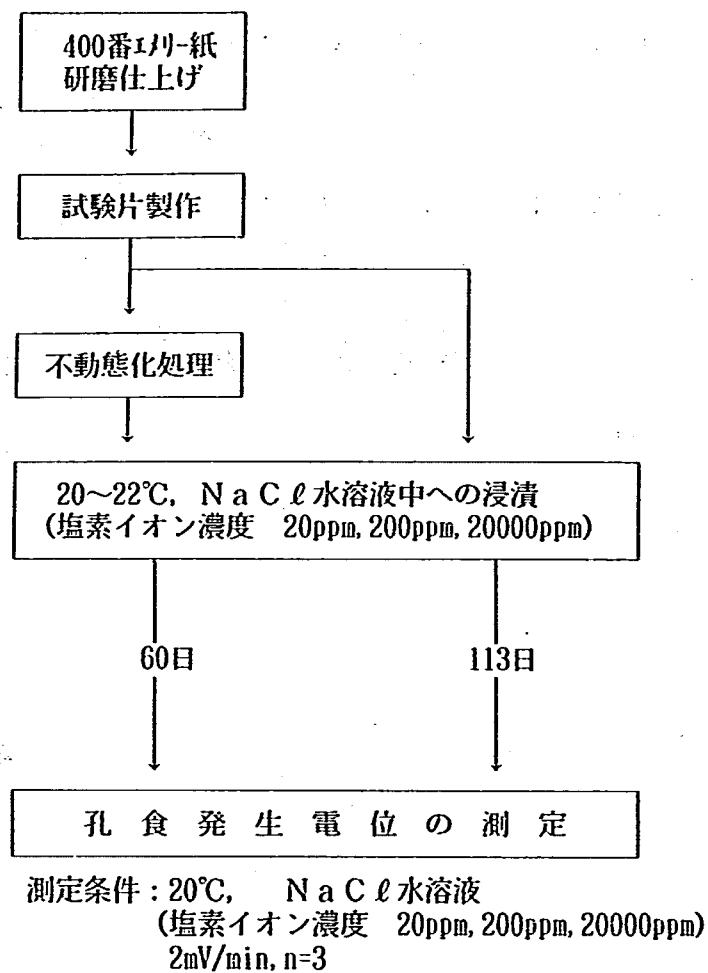


図-5.3 不動態化処理の有無によるステンレス鋼の長期耐食性試験

表-5.2 不動態化処理の有無によるステンレス鋼の長期耐食性試験

○: 孔食発生電位測定 (n=3)
◎: 電位の経時変化も測定

前処理条件	不動態化処理						400番エメリー紙研磨		
塩素イオン濃度 (ppm)	HNO ₃ 浸漬			NaNO ₃ 電解					
浸漬時間	20	200	20000	20	200	20000	20	200	20000
100日	◎○○	◎○○	◎○○	◎○○	—	◎○○	◎○○	◎○○	◎○○

5.2 試験結果

(1)不動態化処理したステンレス鋼と研磨のみで無処理まま大気中に0, 1, 3, 5, 10日間放置したステンレス鋼の大気中放置時間と自電位, 孔食発生電位及びすき間腐食発生電位の関係を図-5.4 に示す。

研磨後大気中に放置したSUS304の、NaCl水溶液浸漬10分後の電位は、大気中放置時間が長いほど高い電位を示した。しかし、試験片の電位をプラス側に20mV/minで電位走査し、電流値が $10\mu\text{A}/\text{cm}^2$ になったときの電位を孔食発生電位, すき間腐食発生電位と定義したときの孔食発生電位, すき間腐食発生電位は、いずれも大気中放置時間に関係なく0.5V vs Ag/AgClの近くを示している。また、0.4V以下では孔食, すき間腐食が発生しなかったことから、0.4Vが局部腐食(孔食, すき間腐食)の発生する下限界電位とみられる。試験片の電位がこの下限界電位を超えることがなければ、局部腐食が発生する可能性はほとんどないといえる。図-5.5は塩素イオン濃度200ppmのダム湖水より厳しい腐食環境模擬液中での電位の経時変化を示す。113日間で自然電位は0.1Vと0.2Vの間を変動したが、0.4Vを超えることはなく局部腐食は発生しなかった。不動態化処理をした場合、硝酸浸漬, 硝酸ナトリウム水溶液電解いずれの方法でも孔食発生電位は高くなる傾向を示し、不動態化処理を施すことで耐食性が増すことが明らかとなった。

(2)不動態化処理したステンレス鋼の長期耐食性は、塩素イオン濃度を変えた溶液に113日間浸漬した研磨のみのSUS304及び不動態化処理したSUS304を60日間浸漬したときのそれぞれの孔食発生電位を測定した結果を図-5.6 に示す。

電位変化速度を20mV/minと遅くして孔食が低い電位で発生し易い条件で測定した。ダム湖水環境に近い塩素イオン濃度20ppmでは、1.0Vを超えるとステンレス表面から酸素が発生し孔食は発生しなかった。無処理で研磨のみステンレス鋼と不動態化処理したステンレス鋼の孔食発生電位差は、200ppmではほとんど変わらず、海水環境に近い20000ppmで若干不動態化処理した方が孔食発生電位が高かった。

図-5.4の結果から塩素イオン濃度200ppmの溶液中では局部腐食が発生する可能性はほとんどない。したがって、塩素イオン濃度20ppm程度もしくはそれ以下の実際のダム湖水環境においては、さらに局部腐食発生の可能性は低くなる。不動態化処理を施すと、耐食性が向上する傾向がみられるが、ダム湖水のような環境では、不動態化処理を施さなくても局部腐食発生の可能性はほとんどなく、SUS304は十分な耐食性を有していることが明らかとなった。

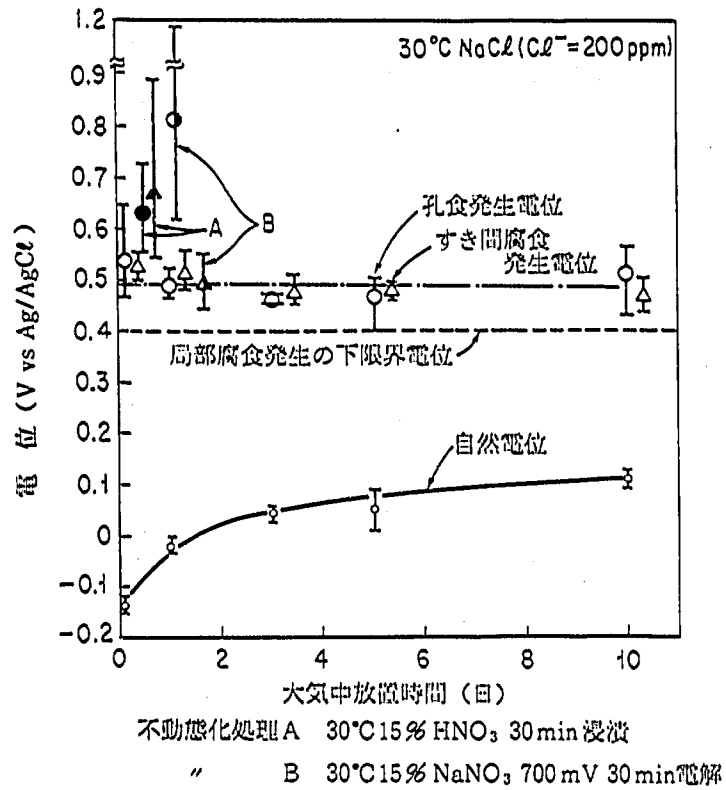


図-5.4 不動態化处理及び無処理研磨ステンレス鋼の大気中放置時間と自然電位、孔食発生電位、すき間腐食発生電位

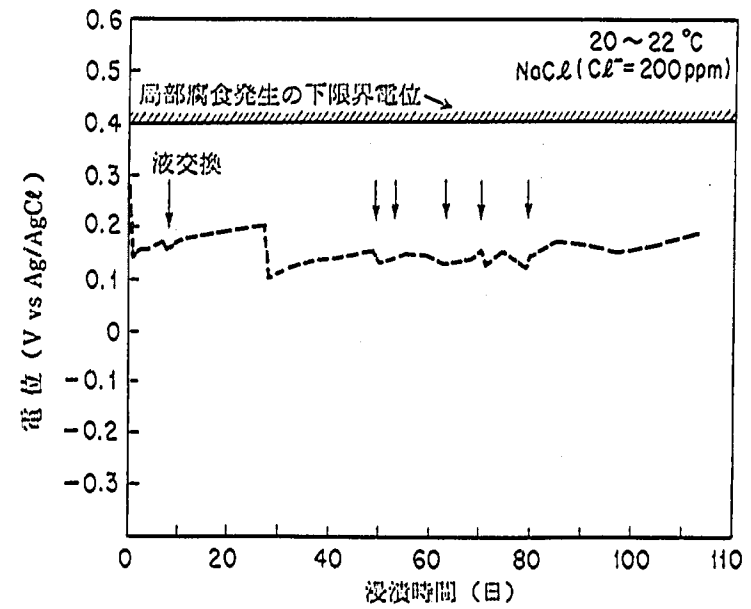


図-5.5 無処理研磨ステンレス鋼の自然電位の経時変化

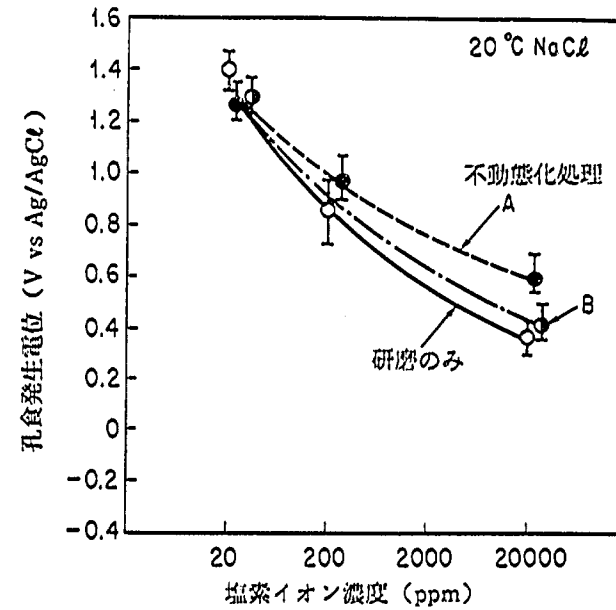


図-5.6 塩素イオン濃度と孔食発生電位

6. 暴露試験

実環境におけるステンレス鋼と普通鋼との異種金属接触腐食及びステンレス鋼のすき間腐食現象を明らかにするため、七が宿ダム湖に10年間の予定で1991年10月30日に試験片の暴露を開始した。1992年10月29日に暴露1年目の試験片の回収及び調査を行った。

試験片の形状及び試験片番号を図-6.1 と表-6.1 に示す。

6.1 異種金属接触腐食に関する暴露試験

6.1.1 異種金属接合試験片

SUS304とSM400Bを溶接材料にD309を用いて溶接した試験片（面積比1：1）の余盛りを研削後、塗装部はサンドブラスト仕上げを行い、露出部は# 400番エメリー紙研磨仕上げを行った。

なお、塗装はタールエポキシ樹脂塗料を 300 μ m 塗装した。

6.1.2 異種金属接合試験片（塗膜欠陥）

ステンレス鋼と異種金属接合した普通鋼の塗装部に欠陥があった場合の異種金属接触腐食に及ぼすステンレス鋼と塗膜欠陥までの距離の影響を明らかにするため、SUS304とSM400Bを異種金属接合した試験片の普通鋼表面を塗装し、面積 30mm²の普通鋼露出部（塗膜欠陥）を塗装境界から20, 50, 100, 150, 300mm の位置に一箇所ずつ作った。

6.1.3 異種金属接合試験片（ステンレス鋼塗装）

ステンレス鋼と普通鋼を異種金属接合した際、ステンレス鋼表面のある範囲を塗装することにより、普通鋼塗装部に欠陥があった場合の異種金属接触腐食状況を明らかにするため、SUS 304とSM400Bを異種金属接合した試験片（面積比 SUS304：SM400B=1000：1）の普通鋼表面を塗装し、面積 30mm²の普通鋼露出部（塗膜欠陥）を接合部中心から20mmの位置に一箇所作った。

なお、ステンレス鋼側にも接合部中心から50, 100, 150, 500mmの範囲まで塗装を行った。

6.1.4 普通鋼単独試験片（比較材）

異種金属接合試験片の比較材として、無塗装部と塗装部とが同一面積となるSM400Bの試験片を作成した。

6.2 すき間腐食に関する暴露試験

6.2.1 A S T M法

A S T M-7 8法に準拠したすき間腐食試験片をSUS304, 410, 430で、3. 1と同様の試験片を作成した。

図-6.1(1) 試験片形状

試験片の種類		暴露期間				試験片形状
		1 Y	3 Y	5 Y	10 Y	
1	異種金属接合試験	○			○	
2	異種金属接合試験 (塗膜欠陥)	○			○	
			○			
				○		
					○	
		○				
			○			
				○		
					○	
		○				
			○			
				○		
					○	

図-6.1(2) 試験片形状

		1 Y	3 Y	5 Y	10 Y	
2	異種金属接合試験 (塗膜欠陥)	○				
			○			
				○		
					○	
		○				
			○			
				○		
					○	
3	異種金属接合試験 (ステンレス鋼塗装)	○				
			○			
				○		
					○	
		○				
			○			
				○		
					○	

図-6.1(3) 試験片形状

		1 Y	3 Y	5 Y	10 Y	
3	異種金属接合試験 (ステン鋼塗装)	○			○	
4	普通鋼単独試験片 (比較材)	○	○	○	○	

図-6.1(4) 試験片形状

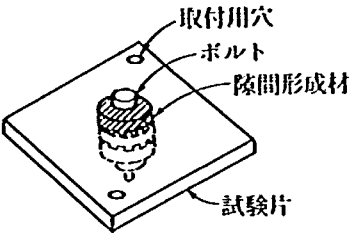
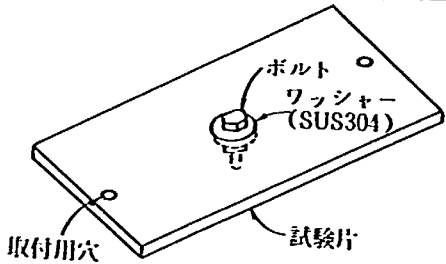
試験片の種類		暴露期間				試験片形状	
5	すき間腐食試験片 (ASTM法)	1 Y	3 Y	5 Y	10 Y		
						試験片	
		○	○	○	○	5A-1 5A-3 5A-5 5A-10	SUS304
		○	○	○	○	5B-1 5B-3 5B-5 5B-10	SUS410
		○	○	○	○	5C-1 5C-3 5C-5 5C-10	SUS430
6	すき間腐食試験片 (異種金属法)	1 Y	3 Y	5 Y	10 Y		
						試験片	ボルト
		○	○	○	○	6A-1 6A-3 6A-5 6A-10	SUS304 SUS410
		○	○	○	○	6B-1 6B-3 6B-5 6B-10	SUS304 SUS430
		○	○	○	○	6C-1 6C-3 6C-5 6C-10	SUS304 SUS304
		○	○	○	○	6D-1 6D-3 6D-5 6D-10	SM400B SUS304

表-6.1(1) 試験片番号 (異種金属接触腐食)

暴露 年数	取付 架台	①異種金属接合 試験片	②異種金属接合試験片 (溶接欠陥)	③異種金属接合試験片 (ステンレス鋼塗装)	④普通鋼単独試験片 (比較材)
1 年 目 1992	A	1-1 (3-5-1-1)	2 E-1 (3-5-2-17)	3 C-1 (3-5-2(2)9) 3 D-1 (3-5-2(2)13)	
	B		2 A-1 (3-5-2-1) 2 B-1 (3-5-2-5) 2 C-1 (3-5-2-9)		
	C		2 D-1 (3-5-2-13)	3 A-1 (3-5-2(2)1) 3 B-1 (3-5-2(2)5)	4-1 (SM4 1-1)
3 年 目 1994	A		2 E-3 (3-5-2-19)		
	B		2 A-3 (3-5-2-2) 2 B-3 (3-5-2-6) 2 C-3 (3-5-2-10)		
	C		2 D-3 (3-5-2-14)	3 A-3 (3-5-2(2)2) 3 B-3 (3-5-2(2)6)	4-3 (SM4 1-2)
5 年 目 1996	A		2 E-5 (3-5-2-20)		
	B		2 A-5 (3-5-2-3) 2 B-5 (3-5-2-7) 2 C-5 (3-5-2-11)		
	C		2 D-5 (3-5-2-15)	3 A-5 (3-5-2(2)3) 3 B-5 (3-5-2(2)7)	4-5 (SM4 1-3)
10 年 目 2001	A	1-10 (3-5-1-2)	2 E-10(3-5-2-18)		
	B		2 A-10(3-5-2-4) 2 B-10(3-5-2-8) 2 C-10(3-5-2-12)		
	C		2 D-10(3-5-2-16)	3 A-10(3-5-2(2)4) 3 B-10(3-5-2(2)8)	4-10 (SM4 1-4)

表-6.1(2) 試験片番号 (すき間腐食)

暴露 年数	取付 架台	①ASTM法	②異種金属ボルト 試験片-ボルト
1 年 目 1992	B	5 A-1 (SUS304) 5 B-1 (SUS410) 5 C-1 (SUS430)	
	C		6 A-1 (SUS304-SUS410) 6 B-1 (SUS304-SUS430) 6 C-1 (SUS304-SUS304) 6 D-1 (SM400B-SUS304)
3 年 目 1994	B	5 A-3 (SUS304) 5 B-3 (SUS410) 5 C-3 (SUS430)	
	C		6 A-3 (SUS304-SUS410) 6 B-3 (SUS304-SUS430) 6 C-3 (SUS304-SUS304) 6 D-3 (SM400B-SUS304)
5 年 目 1996	B	5 A-5 (SUS304) 5 B-5 (SUS410) 5 C-5 (SUS430)	
	C		6 A-5 (SUS304-SUS410) 6 B-5 (SUS304-SUS430) 6 C-5 (SUS304-SUS304) 6 D-5 (SM400B-SUS304)
10 年 目 2001	B	5 A-10 (SUS304) 5 B-10 (SUS410) 5 C-10 (SUS430)	
	C		6 A-10 (SUS304-SUS410) 6 B-10 (SUS304-SUS430) 6 C-10 (SUS304-SUS304) 6 D-10 (SM400B-SUS304)

6.2.2 異種金属ボルト

300mm×100mm で厚さ 5 mmのSUS304とSM400Bのバフ研磨仕上げした鋼板にSUS304, 410, 430のボルトをSUS304のワッシャーを介して締付けトルク0.9kgf-mで接合した試験片を作成した。

6.2.3 試験片取付け

試験片取付け治具の形状を図-6.2 に示す。また、試験片取付け状況を写真-6.1 に示す。

6.3 調査項目

6.3.1 異種金属接触腐食試験

試験片回収後の調査項目を表-6.2 に示す。試験片の回収直後の外観状況観察、もらい錆の有無及び自然電位測定などの電気化学特性の調査を行った。また、水質調査を行った。

表-6.2 調 査 項 目

		①異種金属接合試験片	②異種金属接合試験片 (溶接欠陥)	③異種金属接合試験片 (ステンレス鋼塗装)	④普通鋼単独試験片 (比較材)
材 料	現 場	回収直後の外観観察, 写真撮影 普通鋼の腐食状況, ステンレス鋼表面の錆の付着状況			
	実験室	付着物除去後の外観観察, 写真撮影, 普通鋼の腐食状況, ステンレス鋼表面のもらい錆の有無			
		断面観察, 写真撮影 腐食深さと溶接部からの距離の関係	断面観察, 写真撮影 腐食深さと溶接欠陥距離の関係	断面観察, 写真撮影 腐食深さと表面塗装範囲の関係	断面観察, 写真撮影 腐食深さ
環 境	現 場	a) 水質分析: 水温, 溶存酸素, pH, 電気伝導度, Cl^- b) 電気化学特性: アノード・カソード分極特性			
	実験室	a) 水質分析: pH, Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , 溶存酸素, 電気伝導			

6.3.2 すき間腐食試験

暴露1年後に回収した試験片の調査項目を表-6.3 に示す。

暴露試験片引き上げ直後の外観状況観察、もらい錆の有無及び電位測定を行った。さらに、試験片を実験室に持ち帰って、すき間腐食発生の有無及び腐食深さなどを測定した。

表-6.3 すき間腐食試験の調査内容

調査場所	調 査 項 目
現 場	外観写真: 架台から取り外し前後 孔食発生電位, すき間腐食発生電位の測定
実験室	腐食面積, 腐食深さ

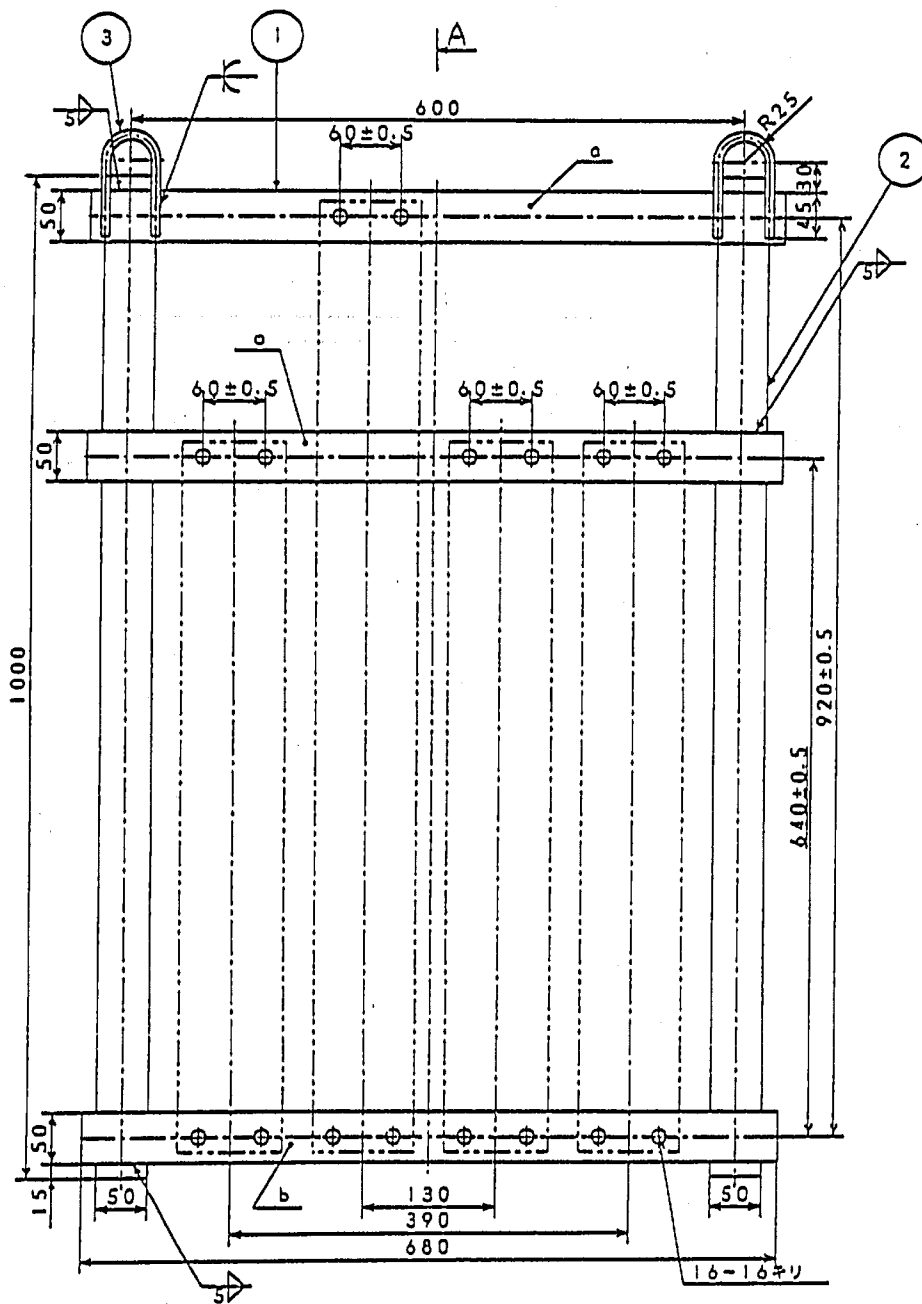
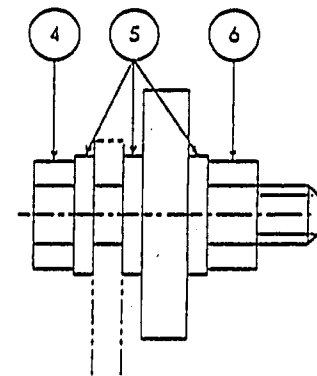


図-6.2(1) 試験片取付け治具 (A形式)

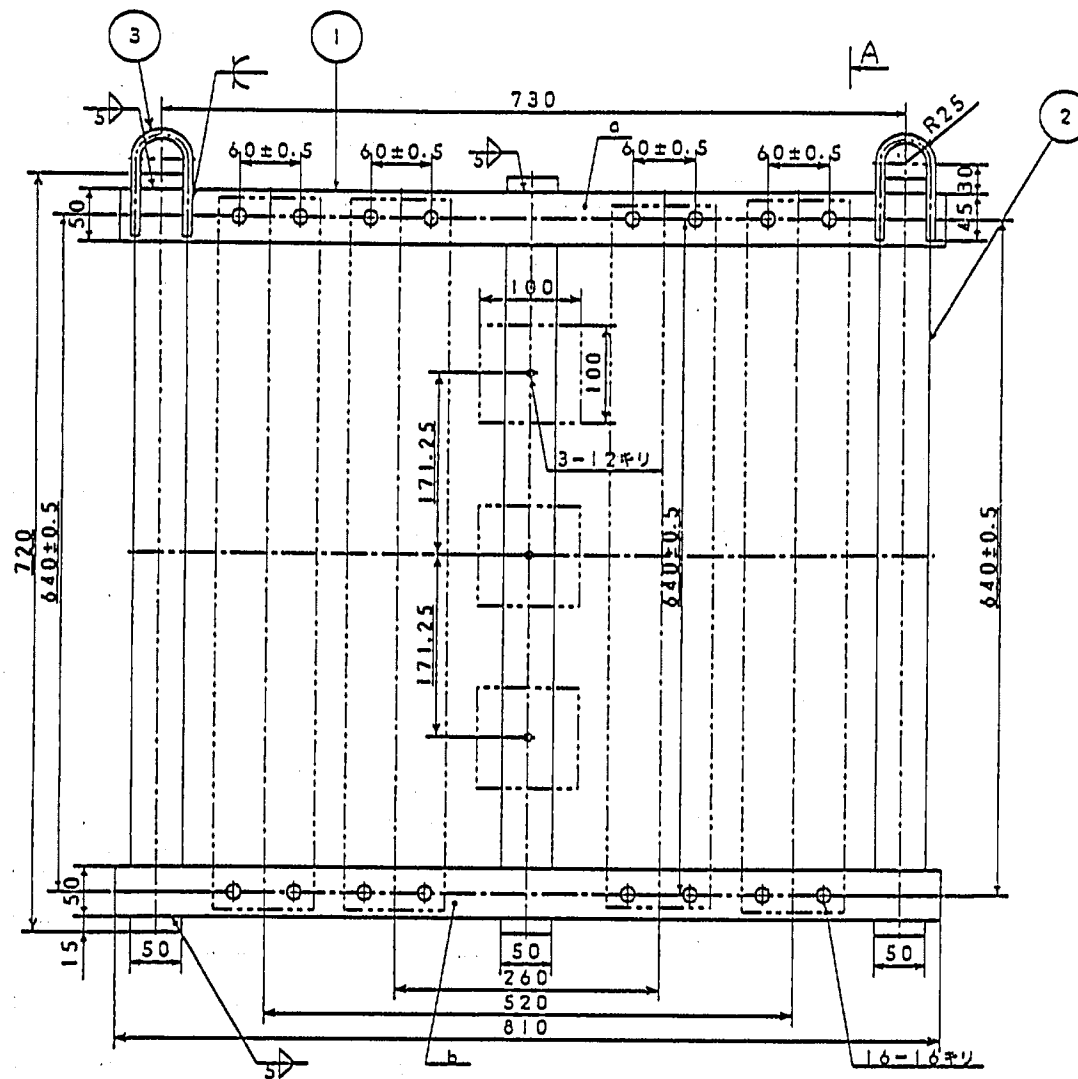
A (S-1/1)



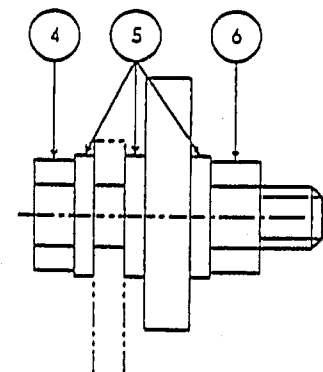
注記：1. 面a, b, cは同一平面になるように仕上げなければならない。
併に、溶接による面のゆがみを防止するため、材料②を定盤の上に
固定してから、材料①を②に溶接固定すること。

2. 本図にて4個複製すること。

製品1個当り合計重量				16.304	
③	SUS304	M12 (ナット一種)	16	0.017	0.272
⑤	F R P	14X(φ24-φ13)	48	0.005	0.24
④	SUS304	M12X150X30mmナット	16	0.059	0.944
③	SUS304	RB9X229	2	0.152	0.304
②	SUS304	PL9X50X1000	2	3.6	7.2
①	SUS304	PL9X50X680	3	2.448	7.344
NO	材 質	寸 法	個 数	密度kg	重量kg
溶接継手浸漬試験片取付治具 (A形式)					
S-1/5					



A (S-1/1)

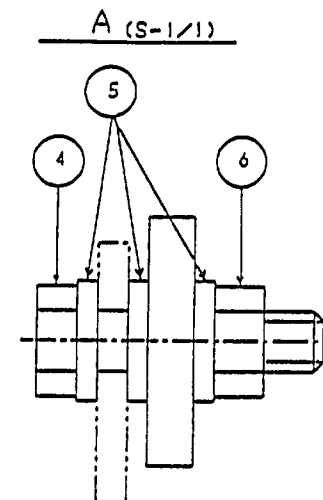
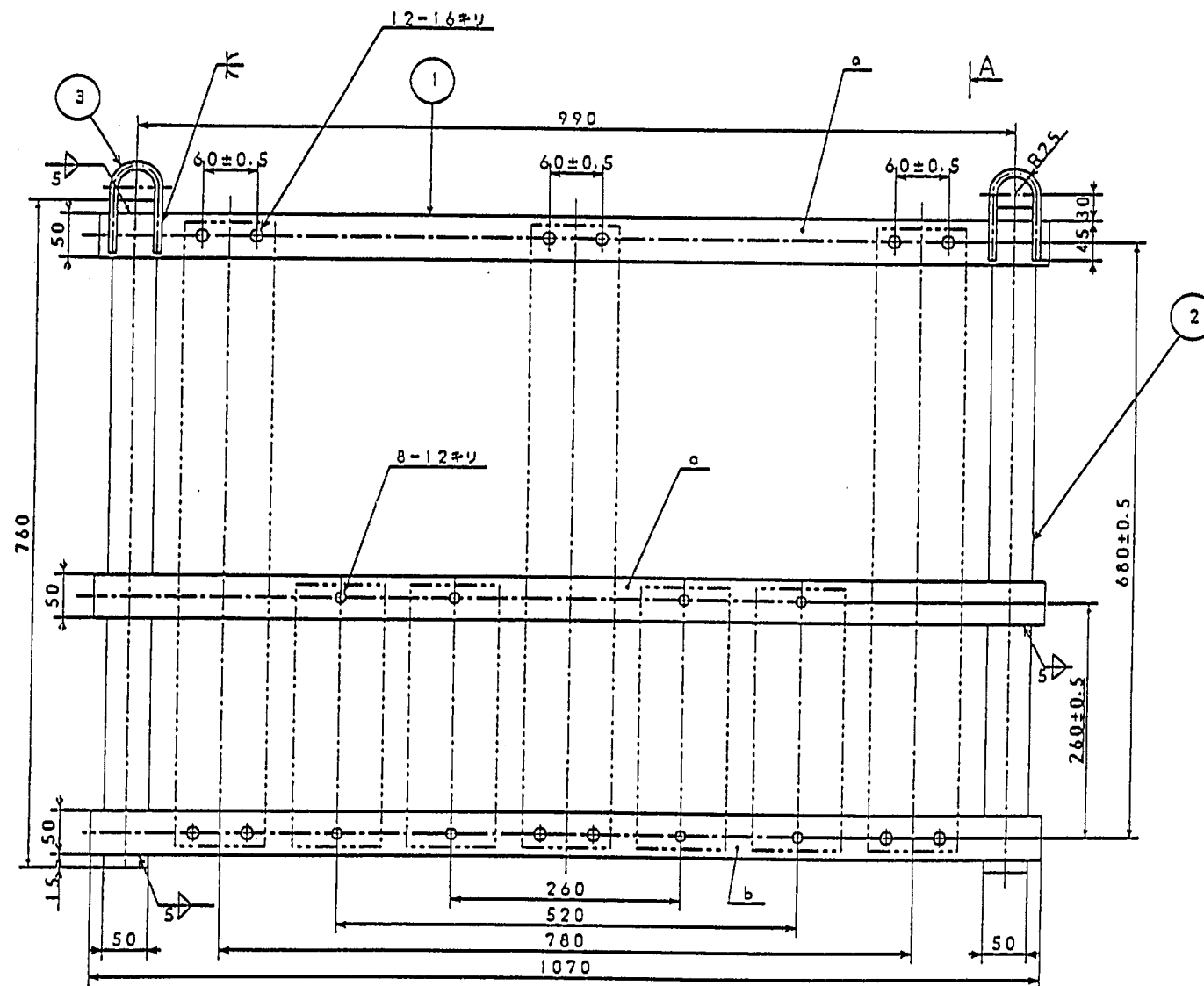


注記：1.面oと面bは同一平面になるように仕上げなければならない
 補に、溶接による面のゆがみを防止するため、部材②を定盤の上に
 固定してから、部材①をものに溶接固定すること。

2.本図にて4個作製すること。

部品1個当たり合計重量					15.314
⑥	SUS304	M12 (ナット一種)	16	0.017	0.272
⑤	F R P	14×(φ24-φ13)	48	0.005	0.24
④	SUS304	M12×L50×S304溶接ボルト	16	0.059	0.944
③	SUS304	RB9×229	2	0.152	0.304
②	SUS304	PL9×50×720	3	2.574	7.722
①	SUS304	PL9×50×810	2	2.916	5.832
NO	材 質	寸 法	個 数	重量kg	重量kg
溶接継手浸漬試験片取付治具 (B形式)					
S-1/5					

図-6.2(2) 試験片取付け治具 (B形式)



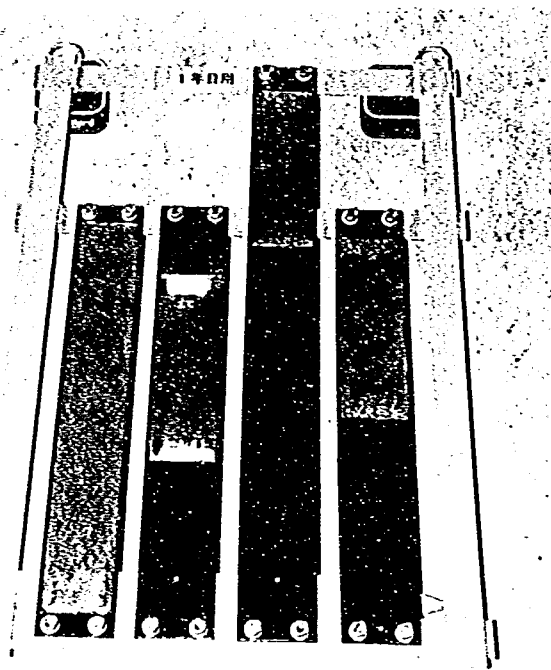
注記：1. 面a, b, cは同一平面になるように仕上げなければならない
特に、面aによる面bのゆがみを防止するため、部材⑤を定盤の上に
固定してから、部材④を⑤に面aで固定すること。

2. 本図にて4倍作製すること。

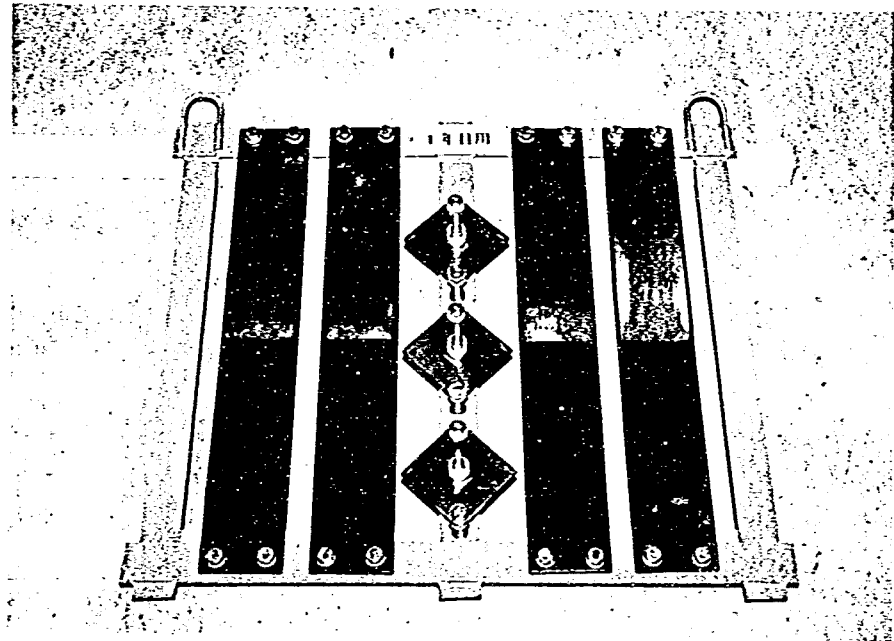
部品1倍あたり合計重量						18.65
⑥	SUS304	M12 (ナット1個)	16	0.017	0.272	
⑤	F R P	14×(φ24-φ13)	48	0.005	0.24	
①	SUS304	M12×L50×S30 六角ボルト	16	0.059	0.944	
④	SUS304	RB9×229	2	0.101	0.202	
②	SUS304	PL9×50×760	2	2.736	5.472	
③	SUS304	PL9×50×1070	3	3.852	11.55	
NO.	材質	寸法	個数	重量kg	重量kg	
測定結果表(試験片取付け治具 (C形式))						
S-1/5						

図-6.2(3) 試験片取付け治具 (C形式)

A 形式



B 形式



C 形式

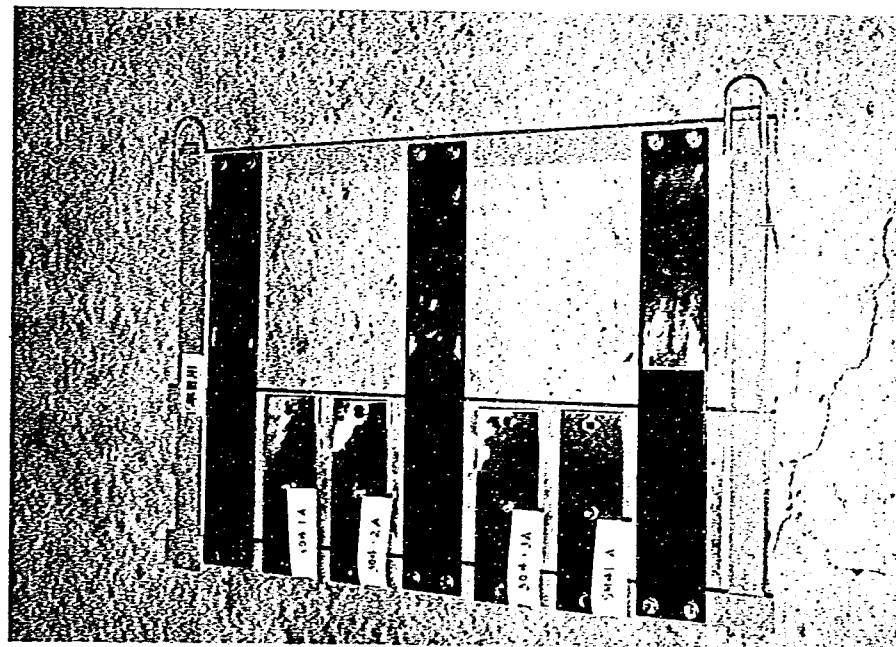


写真-6.1 暴露試験片取付け状況

6.4 調査結果

七が宿ダム湖で1年間暴露し、回収に試験片の状況を写真-6.2に示す。

6.4.1 水質調査結果

七が宿ダム湖において測定した水質調査結果を表-6.4に、湖水を採取して実験室に持ち帰って水質分析した結果を表-6.5に示す。

表-6.4 現地水質調査結果

項目 水深	温度 ℃	溶存酸素量 mg/ℓ	pH	電気伝導度 μS/cm	塩素イオン濃度 mg/ℓ
0	16.7	10.1	7.22	—	4.0
1.5	15.1	9.7	7.38	65	3.0
3.5	16.0	9.4	7.39	74	3.0
5.5	16.0	9.3	7.41	83	3.0
7.5	15.8	8.7	7.45	89	3.0
9.5	16.1	8.8	7.42	96	3.0

表-6.5 水質分析結果（実験室測定）

測定項目	単位	測定値	
pH	—	6.6	環境庁告示第64号
Cl ⁻	mg/ℓ	1.54	上水試験法（水道協会法）
SO ₄ ²⁻	mg/ℓ	9.9	JIS K 0101
Na ⁺	mg/ℓ	5.5	同上
Ca ²⁺	mg/ℓ	8.1	上水試験法（水道協会法）
Mg ²⁺	mg/ℓ	1.5	JIS K 0101
溶存酸素	mg/ℓ	7.2	環境庁告示第64号
電気伝導度	μS/cm	80	JIS K 0101

6.4.2 異種金属接触腐食試験

現地における暴露試験片の電位測定結果を表-6.6に、回収した試験片に付着していた藻を除去した後の試験片の状況を写真-6.3に示す。また、除錆後の板厚測定結果を表-6.7に示す。また、七が宿ダム湖で採取した湖水で、暴露していないSUS304とSM400Bの分極測定の結果

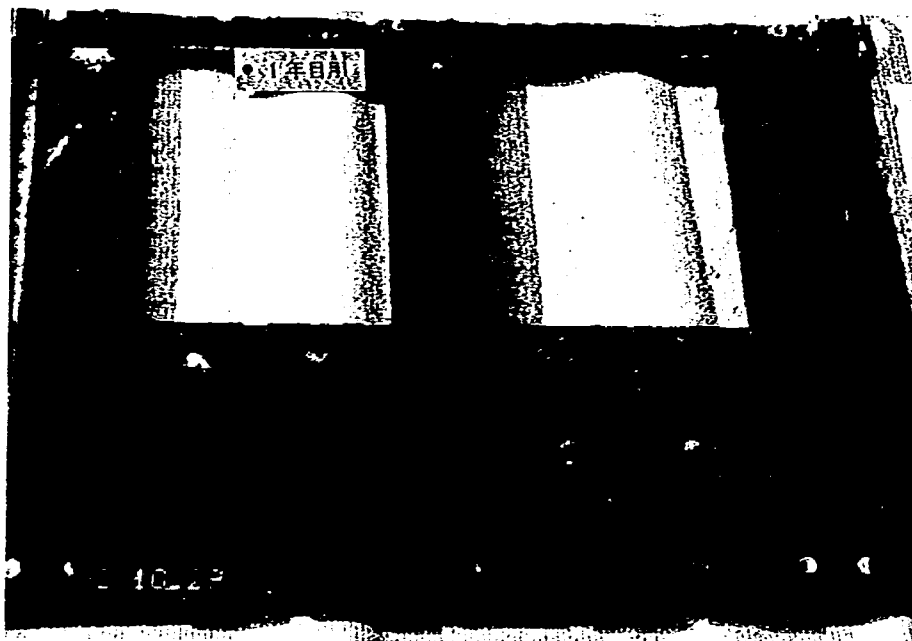
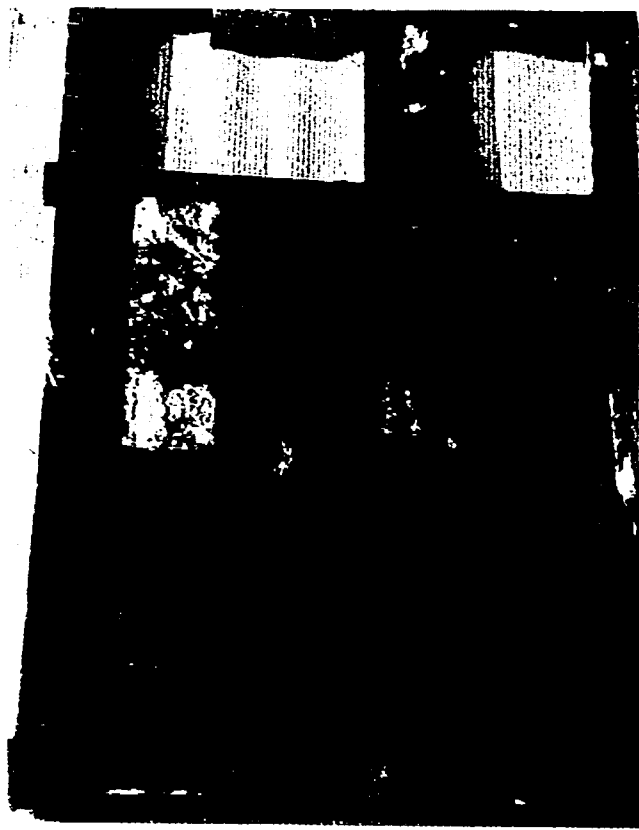


写真-6.2 回収した試験片の状況

表-6.6(1) 電 位 測 定 結 果

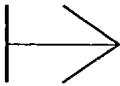
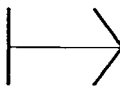
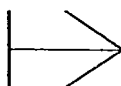
試 験 片 1-1				試 験 片 4-1				試験片 2A-1	
測定点	電位(mV)	測定点	電位(mV)	測定点	電位(mV)	測定点	電位(mV)	測定点	電位(mV)
1.5mm	-52.0	-1.5mm	-240	1.5mm	-445	-1.5mm	-250	1.5mm	-312
10	-30.3	-10	-437	10	-440	-10	—	10	-305
20	-16.5	-20	-530	20	-510	-20	—	20	-304
30	-2.2	-30	-480	30	-540	-30	—	30	-300
40	9.5	-40	-420	40	-565	-40	—	40	-302
50	16.3	-50	-403	50	-476	-50	-290	50	-298
100	39.4	-100	-447	100	-470	-100	-280	100	-296
150	52.0	-150	-412	150	-576	-150	-290	150	-288
200	62.0	-200	-430	200	-470 ±1	-200	-300	200	-283
250	74.0	-250	-383	250	-581	-250	-280	250	-280
300	66.0	-300	-406	300	—	-300	-286	300	—
 (-) (+) SM400B SUS				*藻の表面：-434mV  (-) (+) SM400B 塗装				傷位置	-538
								 (-) (+) 塗 装 SUS 傷位置：-20mm	

表-6.6(2) 電 位 測 定 結 果

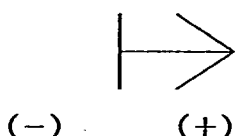
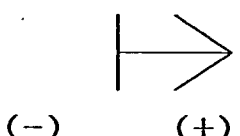
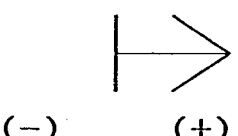
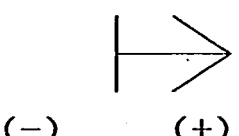
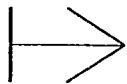
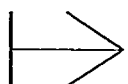
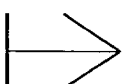
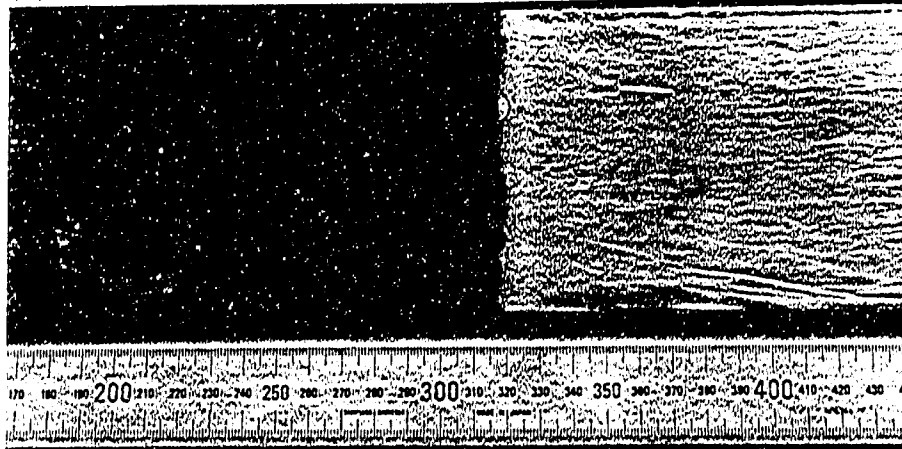
試験片 2 B - 1		試験片 2 C - 1		試験片 2 D - 1		試験片 2 E - 1	
測定点	電位 (mV)	測定点	電位 (mV)	測定点	電位 (mV)	測定点	電位 (mV)
1.5mm	-336	1.5mm	-347	1.5mm	-344	1.5mm	-220
10	-335	10	-343	10	-334	10	-222
20	-338	20	-338	20	-339	20	-210
30	-337	30	-335	30	-335	30	-220
40	-336	40	-334	40	-335	40	-220
50	-333	50	-333	50	-329	50	-210
100	-327	100	-328	100	-326	100	-207
150	-324	150	-318	150	-320	150	-203
200	-316	200	-305	200	-314	200	-192
250	-308	250	-294	250	-300	250	-188
300	—	300	—	300	—	300	—
傷位置	-580	傷位置	-544	傷位置	-564	傷位置	-450
 (-) (+)		 (-) (+)		 (-) (+)		 (-) (+)	
塗 装 SUS		塗 装 SUS		塗 装 SUS		塗 装 SUS	
傷位置 : -50mm		傷位置 : -100mm		傷位置 : -150mm		傷位置 : -300mm	

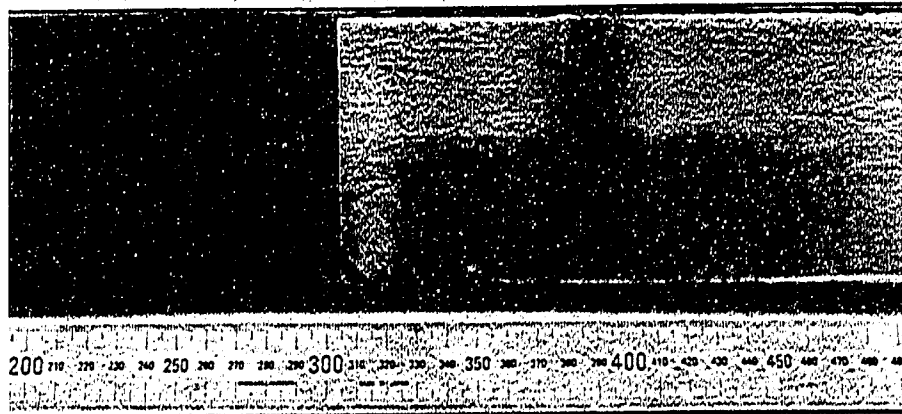
表-6.6(3) 電 位 測 定 結 果

試験片 3 A - 1		試験片 3 B - 1		試験片 3 C - 1		試験片 3 D - 1	
測定点	電位 (mV)	測定点	電位 (mV)	測定点	電位 (mV)	測定点	電位 (mV)
1.5mm	-330	1.5mm	-321	1.5mm	-305	1.5mm	-308
10	-320	10	-315	10	-302	10	-310
20	-323	20	-310	20	-304	20	-310
30	-324	30	-310	30	-296	30	-308
40	-313	40	-302	40	-300	40	-310
50	-311	50	-308	50	-291	50	-306
100	-306	100	-300	100	-287	100	-306
150	-307	150	-304	150	-271	150	-298
200	-300	200	-303	200	-261	200	-290
250	-294	250	-275	250	-253	250	-280
300	—	300	—	300	—	300	—
傷位置	-571.6	傷位置	-573.7	傷位置	-514	傷位置	-554
 (-) (+) 塗 装 SUS 傷位置 : -70mm		 (-) (+) 塗 装 SUS 傷位置 : -120mm		 (-) (+) 塗 装 SUS 傷位置 : -170mm		 (-) (+) 塗 装 SUS 傷位置 : -520mm	

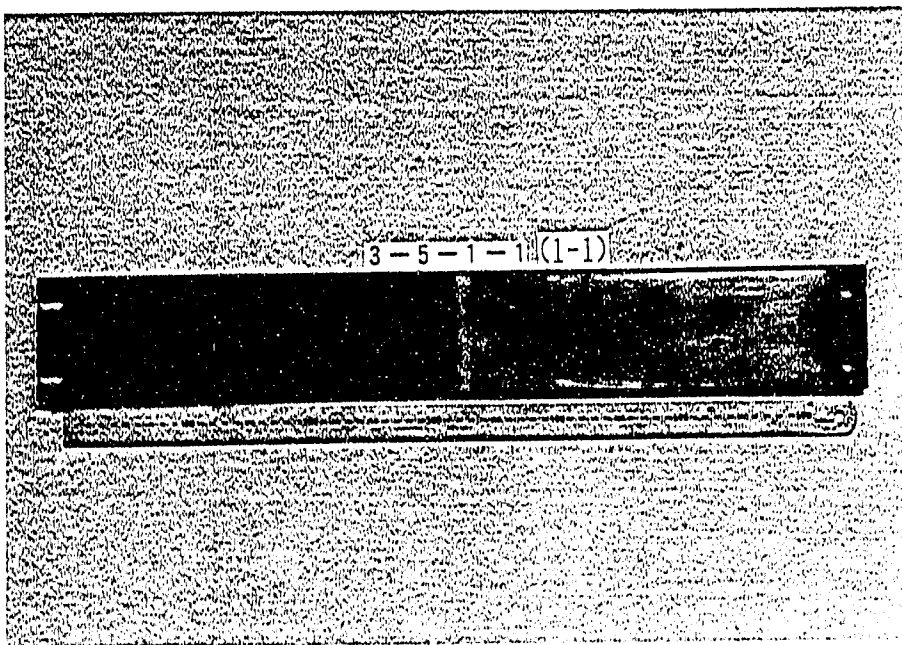
3-5-1-1 (1-1)



3-5-2-1 (2A-1)



3-5-1-1 (1-1)



3-5-2-1 (2A-1)

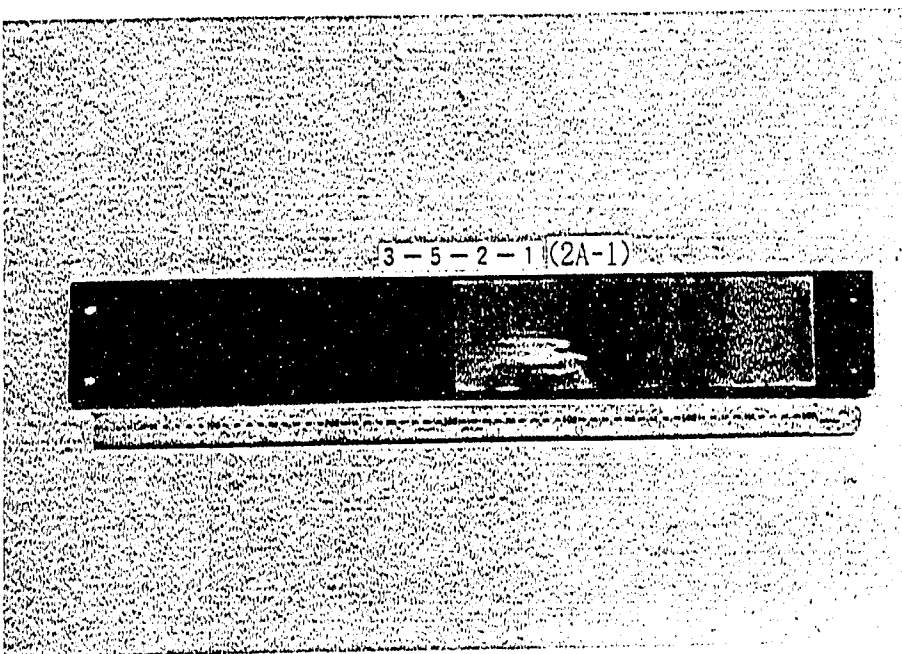


表-6.7(1) 板厚測定結果

試験片 1-1

10mm

40 39 38 37 36 35 34 33 32 31 30 29 28 27 26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

塗装部																									SM400B										SUS
-----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-----

SUS	番号	厚さ (mm)	番号	厚さ (mm)	番号	厚さ (mm)	番号	厚さ (mm)
	1	5.230	11	5.420	21	5.665	31	5.655
	2	4.890	12	5.515	22	5.600	32	5.600
	3	5.005	13	5.625	23	5.655	33	5.795
	4	5.155	14	5.420	24	5.585	34	5.690
	5	5.300	15	5.380	25	5.795	35	5.700
	6	5.485	16	5.510	26	5.570	36	5.705
	7	5.410	17	5.515	27	5.535	37	5.725
	8	5.630	18	5.515	28	5.470	38	
	9	5.440	19	5.570	29	5.560	39	
	10	5.520	20	5.690	30	5.820	40	

塗装部

試験片 4-1

5mm

10mm

5mm

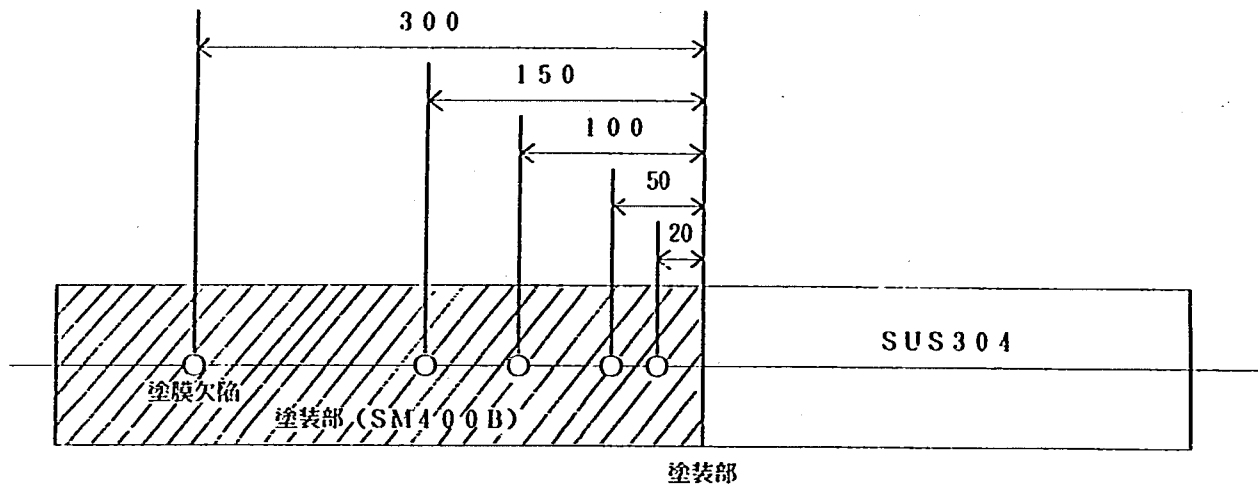
40 39 38 37 36 35 34 33 32 31 30 29 28 27 26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

塗装部																									SM400B										塗装部
-----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-----

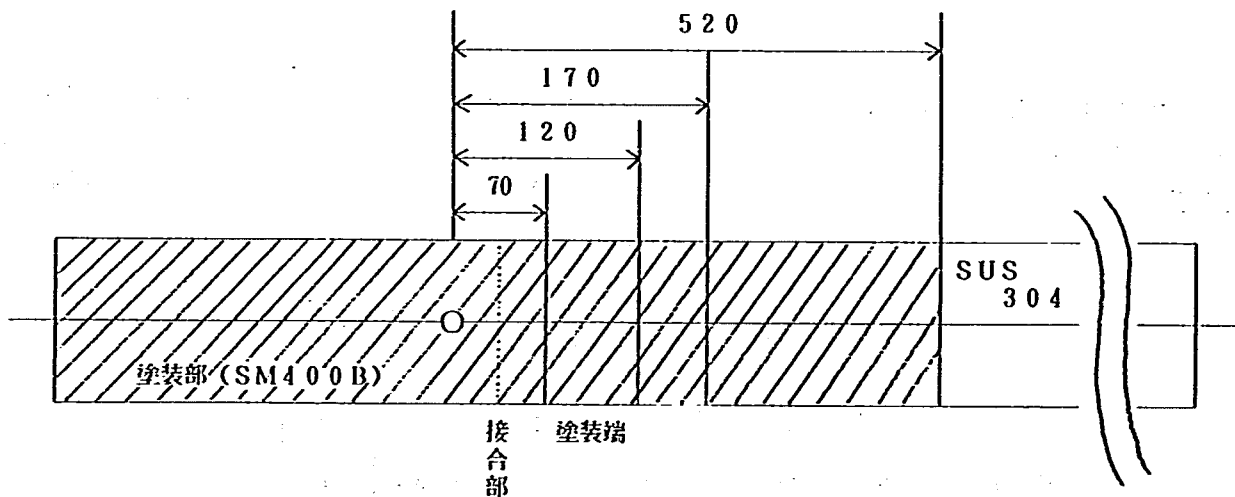
塗装部	番号	厚さ (mm)	番号	厚さ (mm)	番号	厚さ (mm)	番号	厚さ (mm)
	1	5.730	11	5.445	21	5.435	31	5.395
	2	5.720	12	5.315	22	5.445	32	5.510
	3	5.725	13	5.555	23	5.660	33	5.630
	4	5.760	14	5.500	24	5.455	34	5.525
	5	5.710	15	5.480	25	5.505	35	5.435
	6	5.550	16	5.555	26	5.470	36	5.745
	7	5.595	17	5.550	27	5.720	37	5.705
	8	5.555	18	5.600	28	5.505	38	5.660
	9	5.535	19	5.465	29	5.725	39	5.690
	10	5.420	20	5.575	30	5.500	40	5.610

塗装部

表-6.7(2) 板厚測定結果



試験片	塗装端と欠陥の距離 (mm)	孔食最大深さ (mm)
1-1	20	0.7744
2B-1	50	0.6080
2C-1	100	0.6214
2D-1	150	0.6482
2E-1	300	0.6188



試験片	塗装端と欠陥の距離 (mm)	孔食最大深さ (mm)
3A-1	70	0.5780
3B-1	120	0.7620
3C-1	170	0.6216
3D-1	520	0.3942

を図-6.3 に示す。

①SUS304とSM400Bを溶接接合した供試体1-1及びSM400Bの半分を塗装した供試体4-1の中心からの電位の測定結果を図-6.4 に、電位測定後、SM400Bの除錆後の板厚測定結果を図-6.5 に示す。

普通鋼単独の電位は、100mV 程度の変動はあるが平均で-550mV 程度であった。ステンレス鋼と異種金属接合した供試体のSM400Bでは、これよりも平均して約150mV ほど貴側にシフトした-400mV 程度を示していた。また、ステンレス鋼側の異種金属の影響がないと思われる接合部中心からの距離が 200mm以上の領域では約65mVであった。一方、図-6.3 に示すように現地で採取した湖水中での普通鋼の電位は-310mV、ステンレス鋼は-34mVであった。したがって、普通鋼は、新しい試験片の電位より暴露した方が240mV 程度電位が低く、ステンレス鋼では、新しい試験片との差はあまり見られなかった。異種金属接合試験片の普通鋼と普通鋼単独試験片との板厚の分布は、その傾向がきわめて類似している。異種金属の影響が見られるのは、ステンレス鋼との接合部から約50mmのところまでであった。普通鋼は、その板厚が塗装部で平均5.7mm であったことから腐食速度は、平均0.2mm/年と算定される。溶接部近傍において最大0.8mm/年であった。

②SUS304とSM400Bを溶接接合し、普通鋼側のみ塗装した際の接合部中心から塗膜欠陥までの距離と塗膜欠陥部の普通鋼の電位及びステンレス鋼の電位の測定結果を図-6.6 に示す。このときの塗膜欠陥部の孔食最大深さを図-6.7 に示す。

試験片 2 E - 1 の電位が、例外的に貴側にシフトしているものの、その他の試験片では、塗膜欠陥が溶接部に近い程、電位がステンレス鋼に引っ張られることがわかる。ステンレス鋼の電位は、いずれの試験片においても現場で採取した湖水中での新しい試験片の腐食電位-34mV (図-6.3 参照) に比べ、200~300mV 卑側になっている。これは試験片に藻が密集して付着したことにより酸素の拡散が抑制された結果であろうと思われる。

接合部中心から100mm、50mmの2点で孔食最大深さが若干小さくなっているが、溶接部から離れるにしたがい腐食減量が小さくなっている。接合部中心から 300mmでは、板厚減少が0.62mmで、普通鋼単独暴露試験片の0.2mm より大きいことから、300mm 離れても異種金属の影響はあるものと思われる。

③SUS304とSM400Bを溶接接合し、普通鋼側からステンレス鋼側に塗装をした場合の塗膜欠陥部における普通鋼の電位及びステンレス鋼の電位を図-6.8 に示す。このときの塗膜欠陥部の普通鋼の孔食最大深さを図-6.9 に示す。

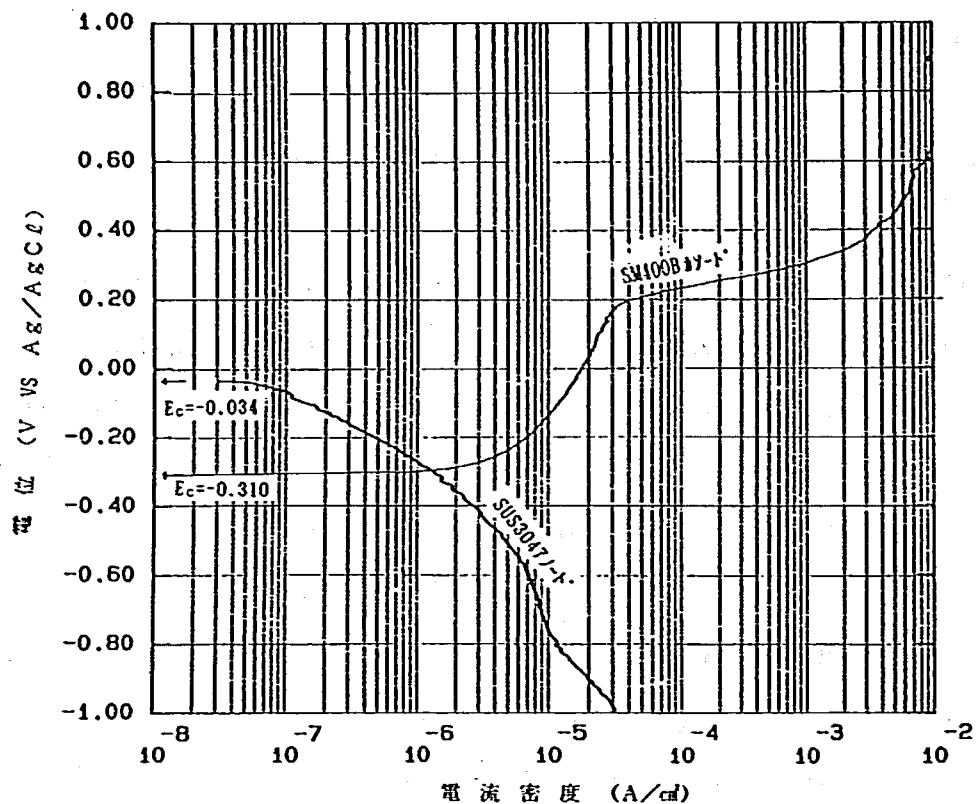


図-6.3 分極曲線の測定結果

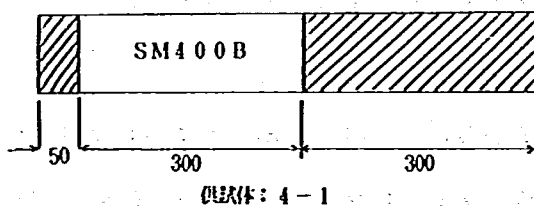
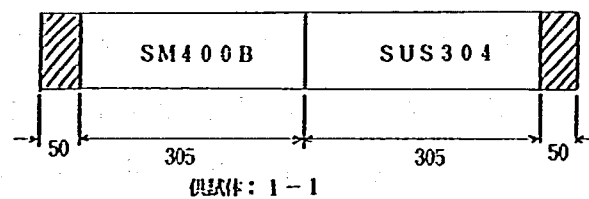
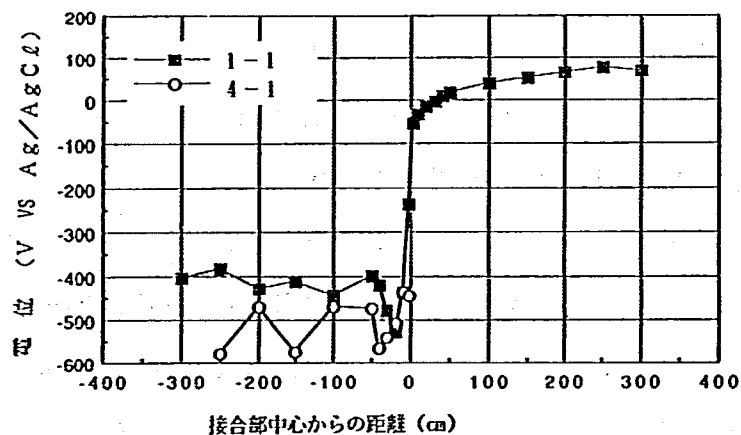
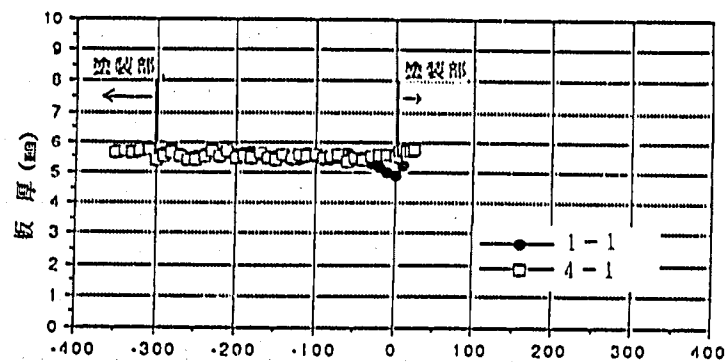


図-6.4 電位測定結果



接合部中心からの距離 (mm)

拡大図

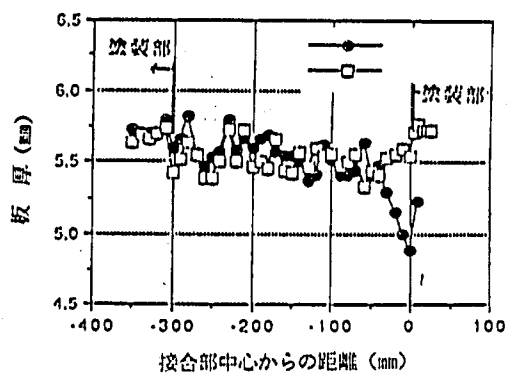
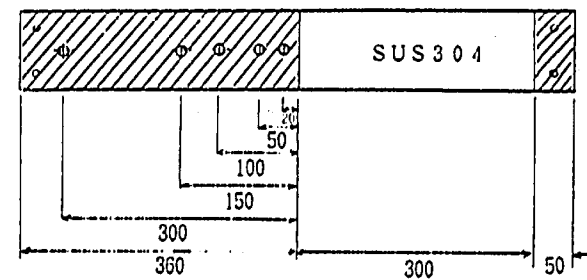
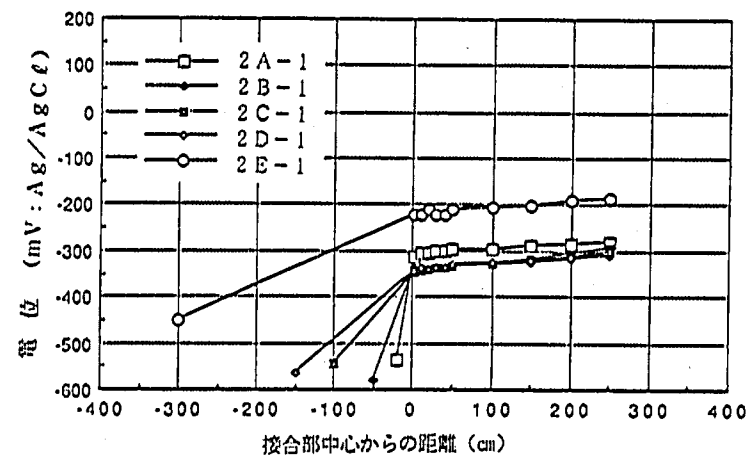


図-6.5 板厚測定結果



供試体: 2A-1
 供試体: 2B-1
 供試体: 2C-1
 供試体: 2D-1
 供試体: 2E-1

図-6.6 電位測定結果

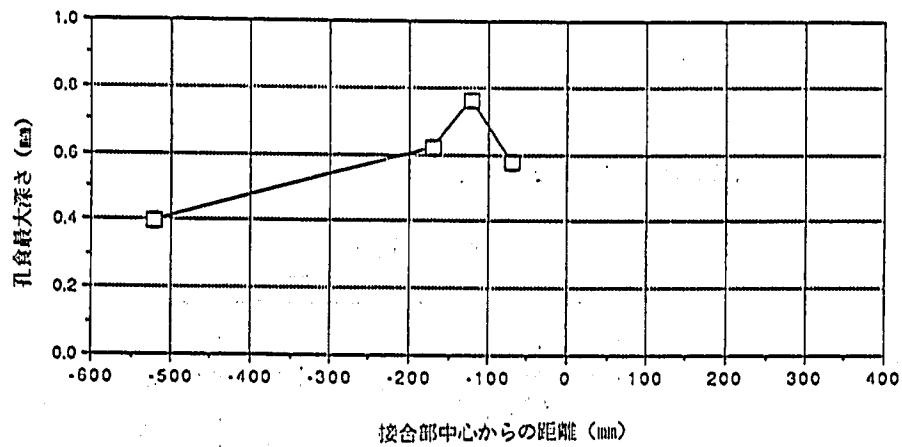


図-6.7 孔食の最大深さ

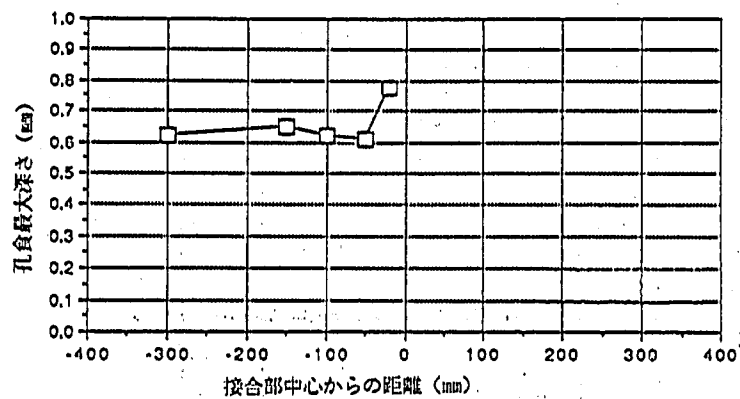


図-6.9 孔食の最大深さ

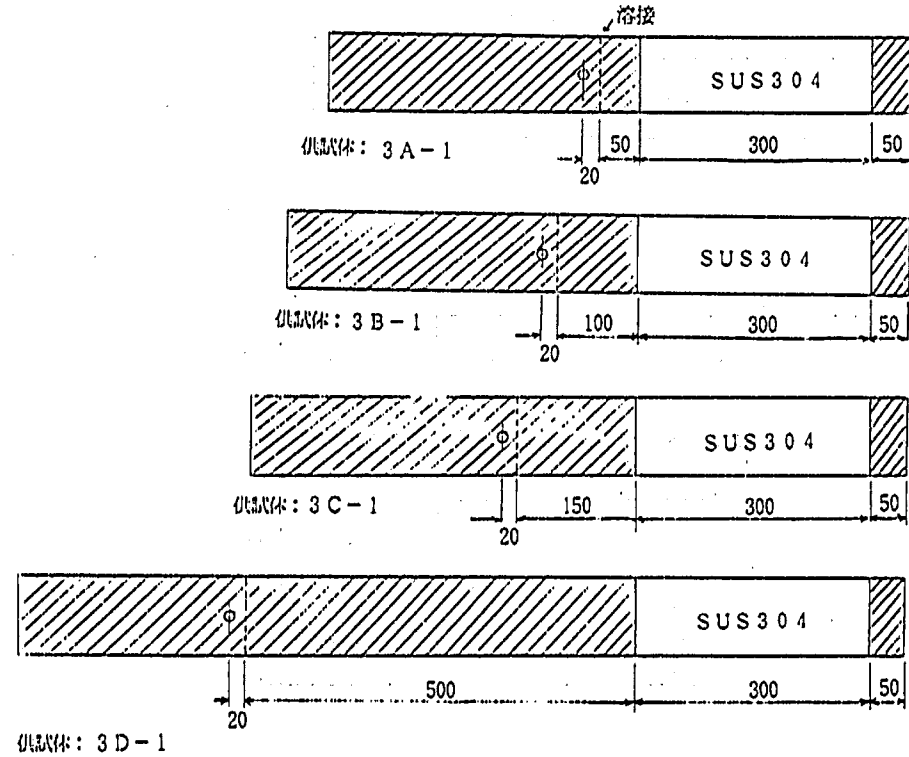
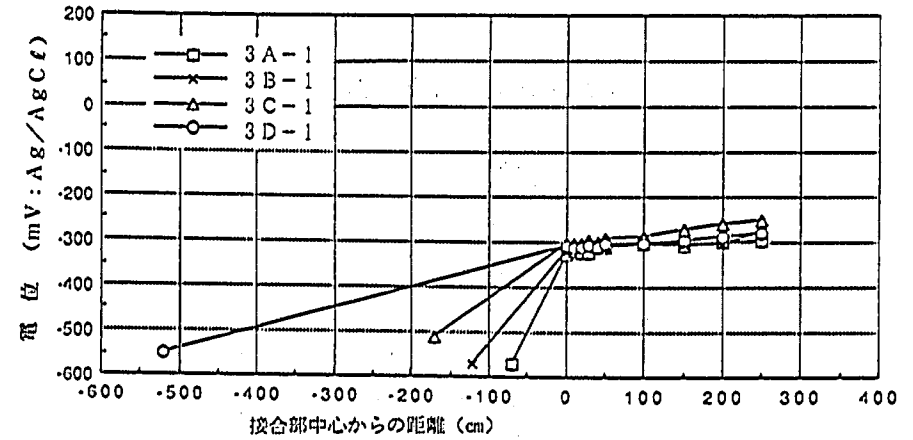


図-6.8 電位測定結果

図-6.8 に示すように、図-6.4 の異種金属接合試験片の普通鋼、ステンレス鋼の腐食電位に比べ、いずれも電位が卑となった。ここでは塗装端から塗膜欠陥までの距離と腐食電位との間に特に関係は見いだせなかった。塗装端から塗膜欠陥までの距離が70mmの位置での孔食最大深さが少なくなっているものの、溶接部からステンレス鋼側に塗装される幅が増えるにしたがって、孔食最大深さが下がっていることがわかる。普通鋼単独試験片の板厚減少0.2mm より大きいことから、500mm 離れても異種金属の影響はあるものと思われる。

6.4.3 すき間腐食試験

(1) ASTM法

七ヶ宿ダムでの1年間の暴露後、SUS304及びSUS430には青緑色の藻が試験片の全面に生息していた。藻はタールエポキシ樹脂塗料を塗装したホルダー及びポリサルホン樹脂製すき間治具にも生息していた。

現地でのすき間腐食試験片の電位測定結果を表-6.8 に示す。また、現地での電位測定状況を写真-6.3 に示す。測定位置はすき間治具、穴及びボルト取付の3ヶ所である。SUS410の電位は 6.4~36.6mV (vs Ag/AgCl) であった。SUS430の電位は 330~351mV であった。SUS304の電位は 340~370mV であった。クロム量が低いSUS410の電位はSUS430及びSUS304と較べて非常に低い値であった。しかし、SUS304及びSUS430の電位が海水中の腐食電位と同等かそれより高い値であった。このため、局部腐食が発生し易い状況であると思われる。この電位はすき間腐食及び孔食発生電位以上であった。

藻を除去した後のSUS410、SUS430及びSUS304の腐食状況も写真-6.4 示す。また、すき間腐食及び孔食発生状況を表-6.9 に示す。すべての鋼種においてすき間腐食は発生していなかった。しかし、試験片を固定しているボルトの近傍に多数微小な孔食及びすき間腐食が発生していた。この孔食深さは、SUS410では最大0.08mm、SUS430及びSUS304は0.01mmであった。

(2) 異種金属ボルト

七ヶ宿ダムでの1年間の異種金属ボルトによるすき間腐食試験後の腐食状況を写真-6.2 に示す。SUS430には藻が試験片全面に生息しているが、SM400Bには藻が生息していなかった。試験片の外観は全面が赤さびであった。したがって、全面腐食している試験片には藻は生息しにくと考えられる。

現地での異種金属ボルトによるすき間腐食試験片の電位測定結果を表-6.10に示す。

測定位置はボルトの位置から左右へ50mm間隔で8点測定した。

供試体No.16のSUS304試験片の中央部にSUS410製のボルト・ナットを取付けたものである。ボルト近傍部の腐食電位は93～130mV であるが、ボルト・ナットから離れると腐食電位は 207～210mVに上昇していた。

供試体No.13はボルト・ナット材質がSUS430である。この試験片の電位は 315～340mV でボルト材質の影響があまり認められなかった。

供試体No.14はボルト・ナット材質が試験片と同じSUS304である。この試験片の電位はほぼ一定の395～405mVであり、位置による電位変化は認められなかった。

供試体No.17は試験片がSM400Bでボルト・ナットがSUS304である。この試験片の電位は－536～－580mV であった。SM400BとSUS304が接触するところでSM400Bよりも若干電位が貴側へ移行するはずであるが1年後の測定データでは認められなかった。この理由としてはSM400Bがさびて、ボルトの囲りに赤さびが生成したため、赤さびの電位を測定しているものと推測される。

藻を除去した後の異種金属ボルトによるすき間腐食試験後の腐食状況を写真－6.5 に示す。また、異種金属ボルトによるすき間腐食試験結果を表－6.11に示す。

供試体No.16はボルト・ナットに厳しい腐食が発生した。試験片（SUS304）とワッシャ（SUS304）には顕著なすき間腐食は認められなかった。しかし、試験片（SUS304）のボルト締付け時のキズ部に微小なすき間腐食が発生していた。

供試体No.13はナットに軽微なすき間腐食が発生した。SUS430製ボルトにはすき間腐食は認められなかった。

供試体No.14はボルト・ナット、ワッシャー及び試験片いずれにも孔食・すき間腐食の発生は認められなかった。

供試体No.17はボルト・ナット、及びワッシャー共に孔食・すき間腐食の発生は認められなかった。しかし、SM400Bは凹凸状に腐食しており腐食速度は約0.45mm/年と大きく、一般的な淡水中におけるSM400Bの腐食速度の約2倍であった。

表－6.8 すき間腐食試験片の電位測定結果
(1年間浸漬, マルチプルクレビス法)

鋼種	電 位 (mV Ag/AgCl)			備 考
	すき間治具 (1)	すき間治具 (2)	ボルト取付け (3)	
SUS410	3 6 . 6	6 . 4	9 . 8	供試体No. 7
SUS430	3 6 0	3 5 1	3 4 0	供試体No. 9
SUS304	6 4 0	3 7 0	3 7 0	供試体No. 8

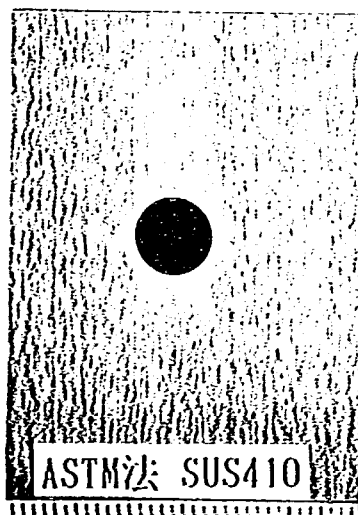
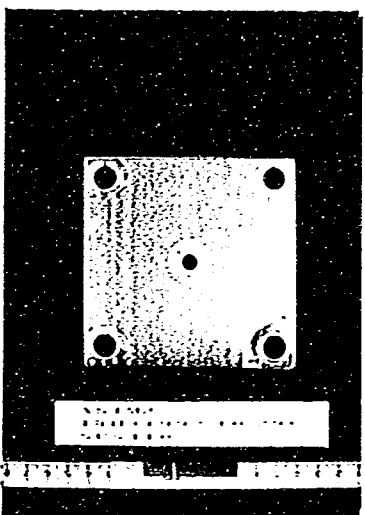
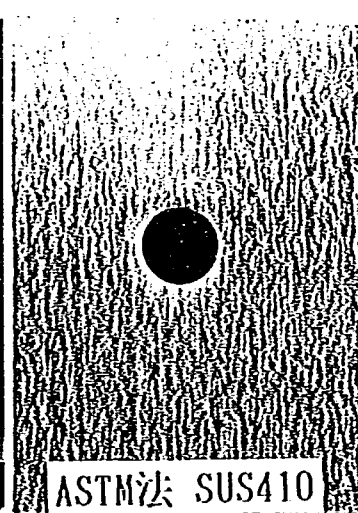
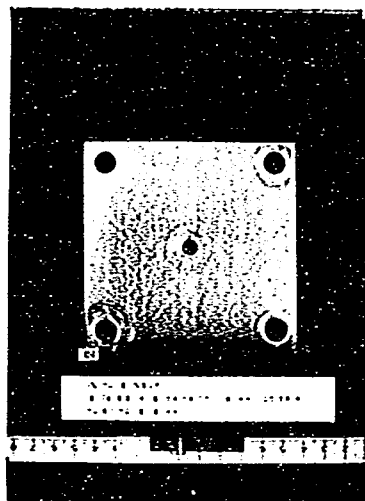
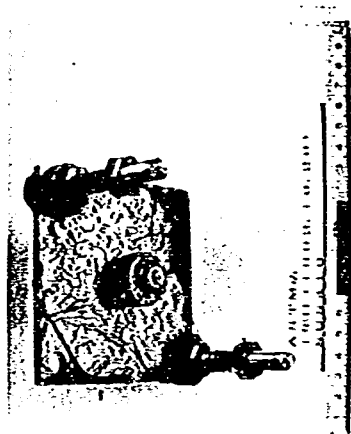
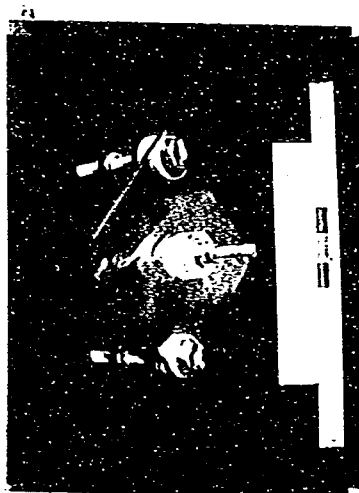


写真-6.4(I) SUS410の腐食状況

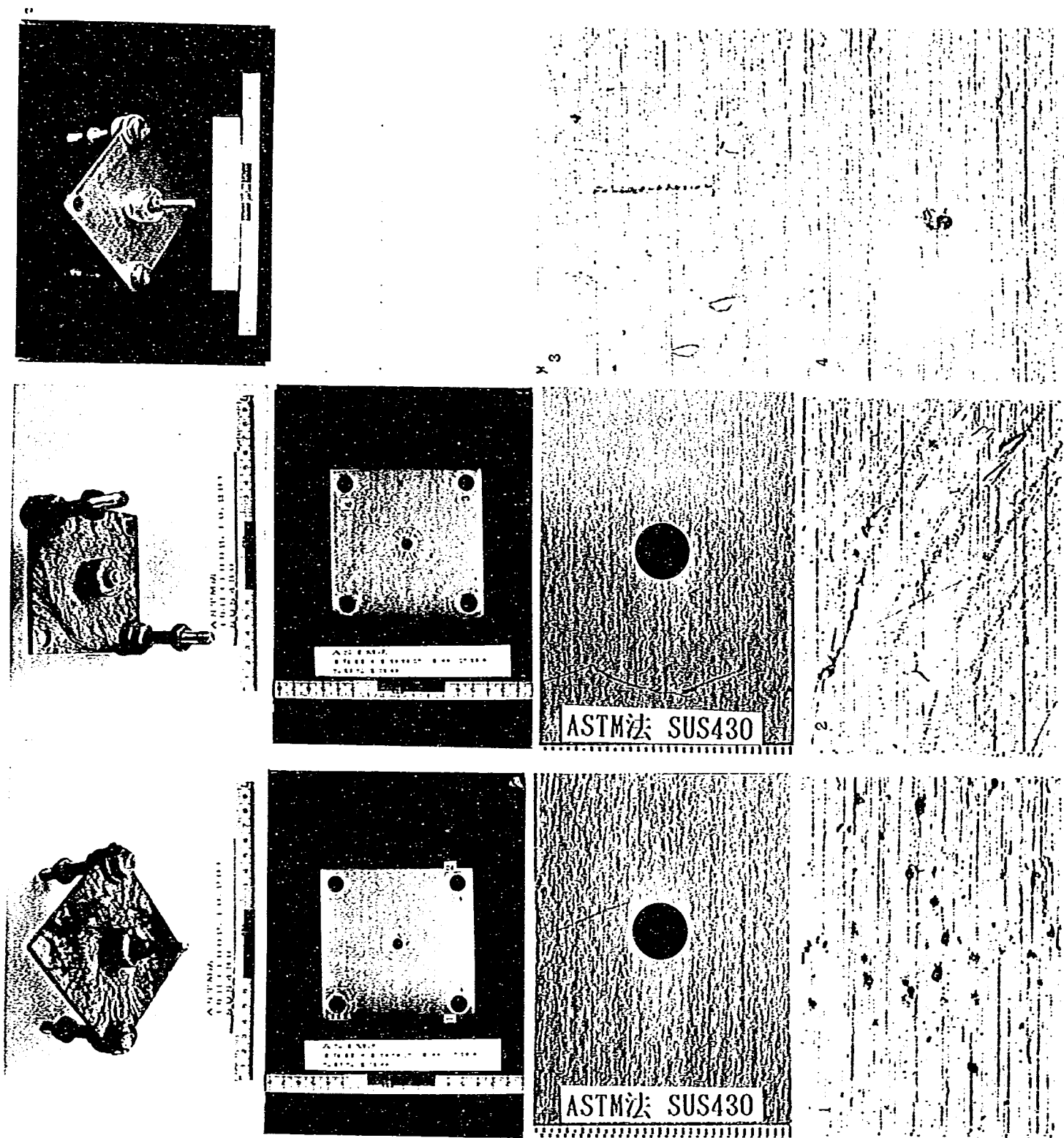


写真-6.4(2) SUS430の腐食状況

表-6.9 すき間腐食及び孔食発生状況

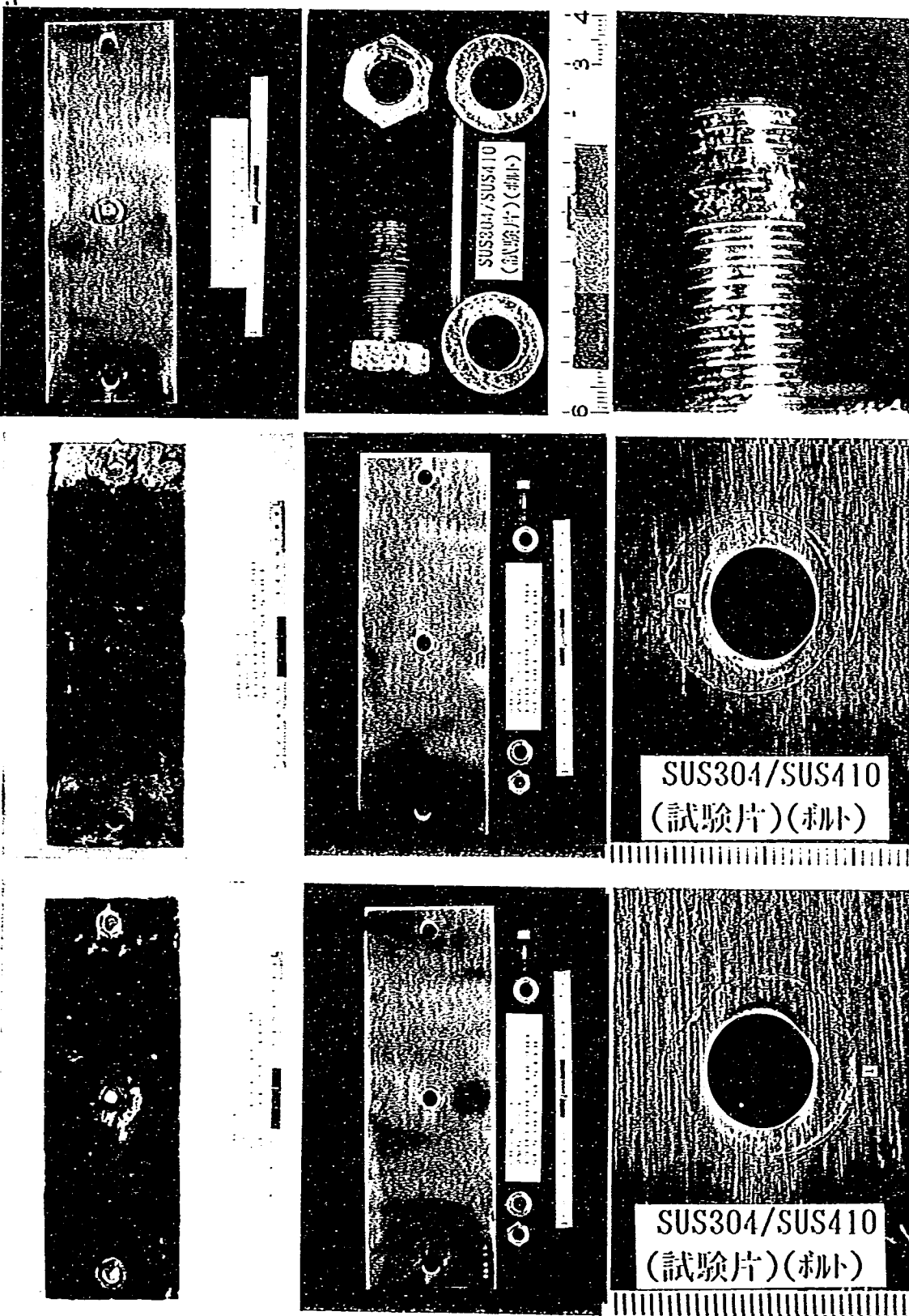
鋼種	すき間部		備 考
	表側(マーク側)	裏側(マーク反対側)	
SUS410	発生なし	発生なし	・すき間部以外で微小な孔食・すき間腐食発生 ・孔食深さは0.01~0.02mmで多数発生, 最大0.08mmであった。
SUS430	発生なし	発生なし	・すき間部以外で微小な孔食・すき間腐食発生 ・孔食深さは0.01mmで多数発生していた
SUS304	発生なし	発生なし	・すき間部以外で微小な孔食・すき間腐食発生 ・孔食深さは0.01mmであった。

表-6.10 異種金属ボルトによるすき間腐食試験片の電位測定結果

試験片	ボルト・ナット 材質	測 定 点 , 電 位 (mV Ag/AgCl)								備 考
		① 0	② 50	③ 100	④ 150	⑤ 0	⑥ -50	⑦ -100	⑧ -150	
SUS304	SUS410	130	183	195	210	93	190	209	207	供試体16
	SUS430	340	340	341	315	320	330	333	330	供試体13
	SUS304	395	405	402	398	380	395	396	396	供試体14
SM400B	SUS304	-564	-482	-512	-580	-565	-558	-549	-536	供試体17

表-6.11 異種金属ボルトによるすき間腐食試験結果

	試験片	ワッシャー	ボルト・ナット	腐 食 状 況			
				試験片	ワッシャ	ボルト	ナット
①	SUS304	SUS304	SUS410	すき間腐食 発生微小 発生	な し	腐食大	すき間腐食大
②			SUS430	微小な すき間腐食 発生	な し	な し	すき間腐食大
③			SUS304	な し	な し	な し	な し
④			SUS304	凹凸状 腐食	な し	な し	な し



2

1

写真-6.5(I) SUS304/SUS410 (ボルト) の腐食状況

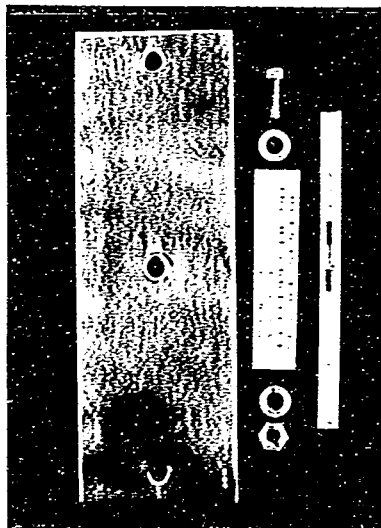
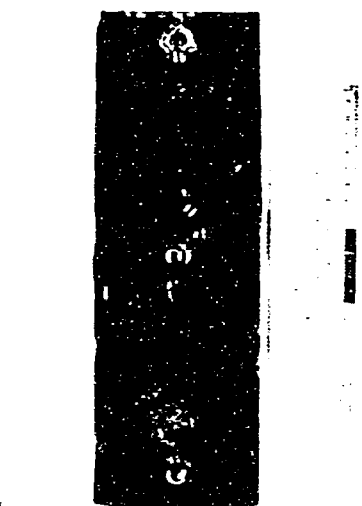
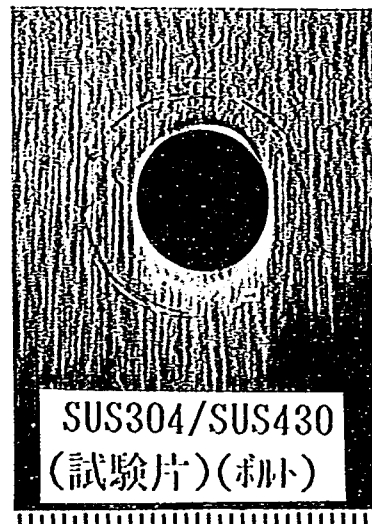
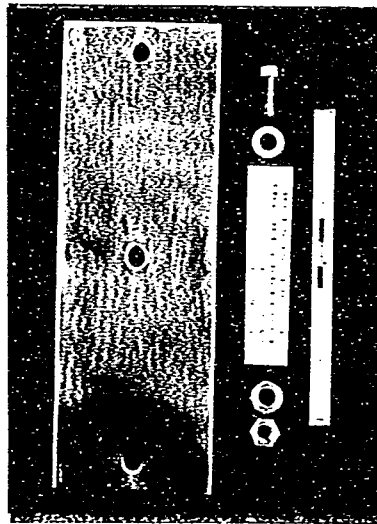
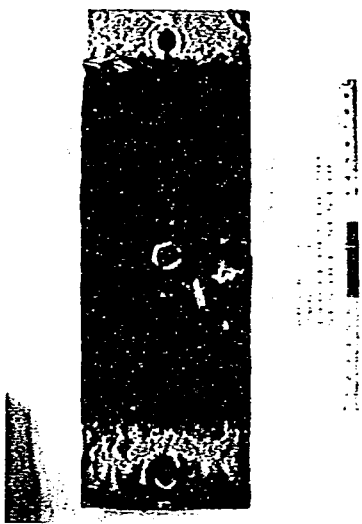
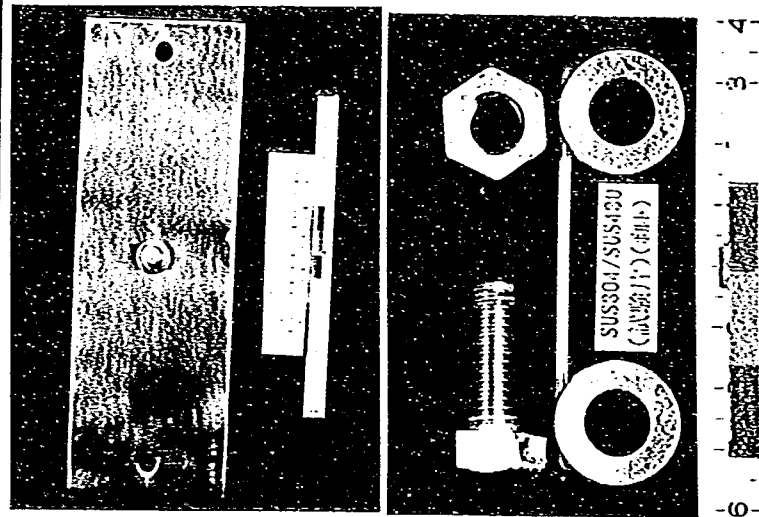


写真-6.5(2) SUS304/SUS430 (ボルト) の腐食状況

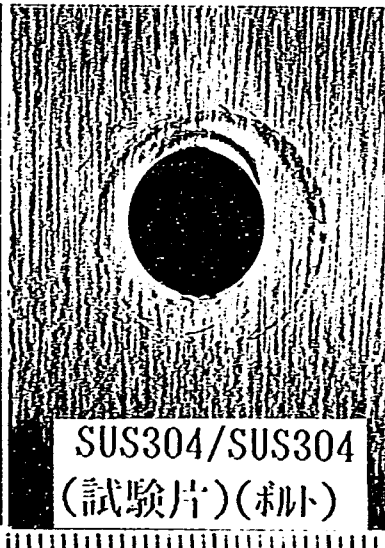
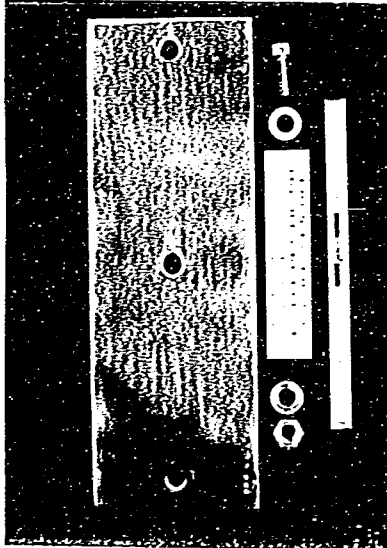
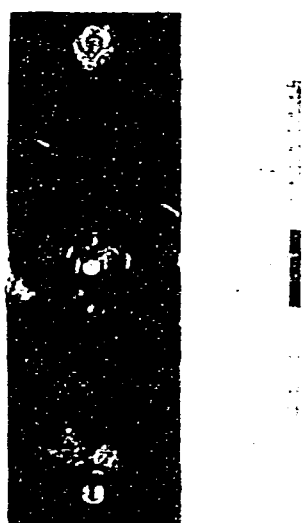
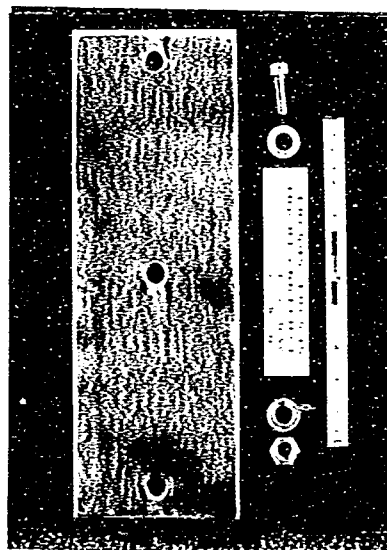
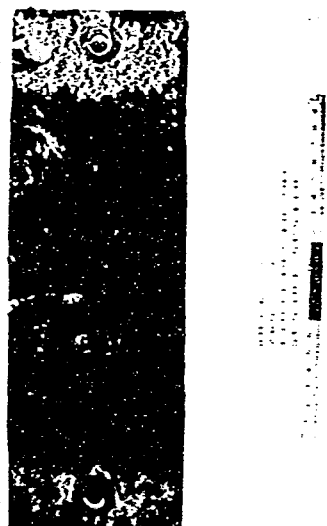
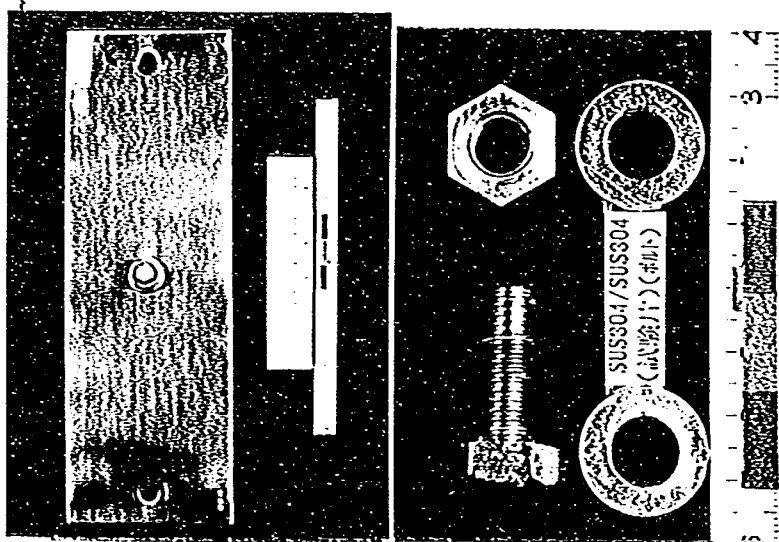


写真-6.5(3) SUS304/SUS304 (ボルト) の腐食状況

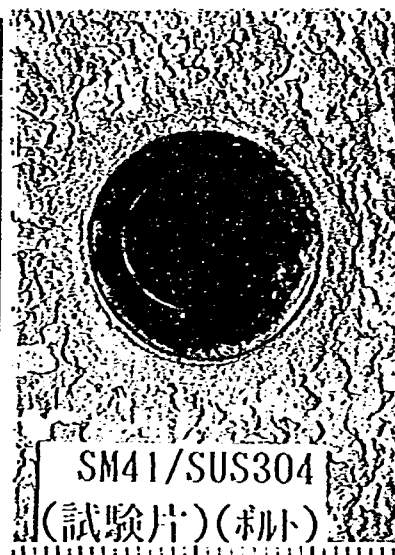
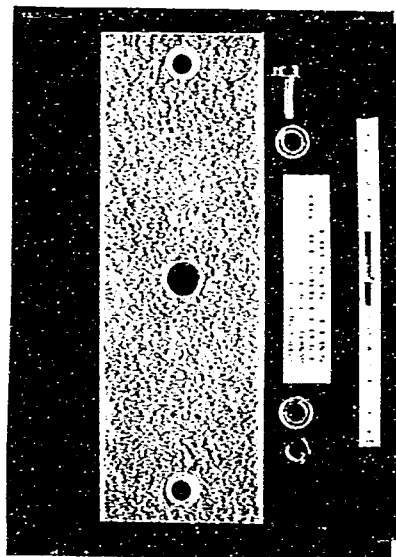
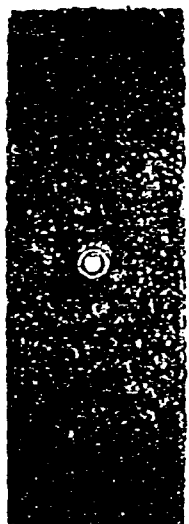
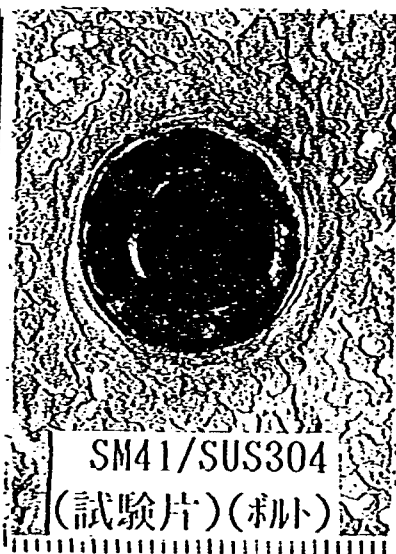
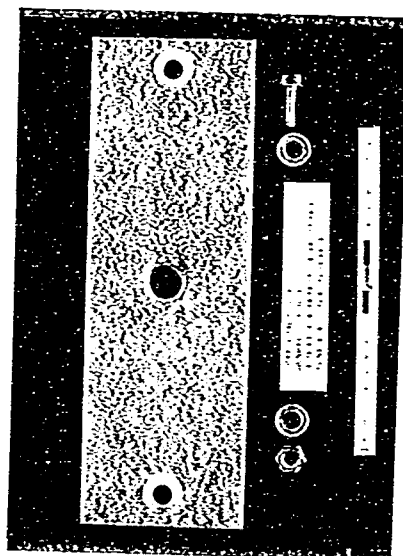
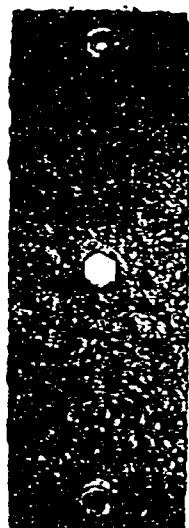
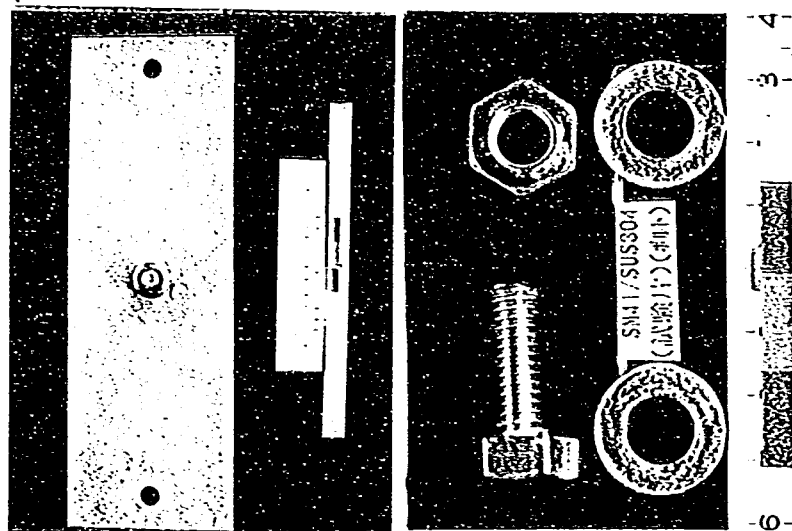


写真-6.5(4) SM400 (SM41) / SUS304 (ボルト) の腐食状況

6.5 まとめ

6.5.1 異種金属接触腐食試験

(1)普通鋼単独の電位は、平均で -550mV 程度であった。ステンレス鋼と異種金属接合した供試体の普通鋼は、 -400mV 程度を示していた。また、ステンレス鋼側で異種金属の影響がないと思われる領域（接合部中心からの距離が 200mm 以上）では約 65mV であった。板厚減少の測定結果より、異種金属の影響が見られるのは、ステンレス鋼との接合部から約 50mm のところまでであった。異種金属接合試験片の普通鋼部の腐食速度は、平均 0.2mm/年 であり、溶接部近傍では最大 0.8mm/年 であった。

(2)普通鋼側の塗膜に塗膜欠陥が有る場合、ステンレス鋼の電位が卑となるのは、試験片に藻が密集して付着したことにより酸素の拡散が抑制されたためと思われる。

普通鋼側の塗膜に塗膜欠陥が有る場合、その欠陥が接合部中心から 300mm 離れても腐食に異種金属の影響が及ぶと思われる。

(3)異種金属接合試験片の普通鋼及びステンレス鋼を塗装した場合、塗装端から塗膜欠陥までの距離が 500mm 離れても異種金属の影響が及ぶと思われる。

6.5.2 すき間腐食試験

(1)いずれの鋼種でもマルチクレビス部のすき間部には、すき間腐食は発生していなかったが、それ以外の藻付着部に孔食が発生していた。

(2)現地における電位測定の結果、SUS430及びSUS304の電位は一般的な淡水中における電位より高く、SUS410の電位はすでに孔食を生じているため低い値であった。

(3)SUS430及びSUS304の電位が高い理由としては、藻が付着し微生物が繁殖したことにより腐食環境が変化したためと推測される。この電位の上昇は、ステンレス鋼に孔食が発生し始めていることを示唆している。

(4)藻はステンレス鋼及び治具等に付着していたが、SM400Bには付着していなかった。

(5)現地における電位測定の結果、SUS410の電位はSUS304ボルト近傍部では約 110mV (vs Ag/AgCl)であるが、ボルトから離れると電位が若干上昇し、約 200mV であった。SUS430の電位は異種金属ボルト（SUS304）を接触してもあまり電位変化が認められなく、約 330mV であった。SUS304の場合は同じ材質であったため、電位は約 390mV であった。

(6)SUS410のボルト・ナットに著しいすき間腐食が発生した。SUS430のナットに軽微なすき間腐食が発生した。SUS410及びSUS430製のボルト・ナットの接触部のSUS304試験片に軽微なすき間腐食が認められた。しかし、SUS304ボルト・ナットにはすき間腐食の発生は認められなかった。

(7)SM400Bは全面腐食を呈し、腐食速度は一般の淡水中よりも約2倍大きい約0.45mm/年であった。一方、SUS304ボルト・ナットにはすき間腐食・孔食の発生は認められなかった。これはSM400Bが犠牲陽極となっているためであると考えられる。

以上のことから、淡水環境において、普通鋼とステンレス鋼の異種金属接触腐食は以外と大きく、すき間腐食や孔食などの局部腐食も藻などの生物付着に影響を大きく受けることが明らかとなった。

7. 今後の課題

ステンレス材料をダム放流設備などの淡水域において使用する際に問題となっているステンレスクラッド鋼の溶接欠陥に関する試験、異種金属接触に関する試験、すき間腐食に関する試験、もらい錆に関する試験及びステンレス鋼の不動態化処理の必要性に関する試験を実施した。また、実環境におけるステンレス材料の腐食性を明らかにする目的で七が宿ダム湖に10年間にわたる暴露試験を開始した。

本報告書は、これらステンレス鋼の耐食性及び腐食性に関する室内試験結果及び七が宿ダム湖暴露1年後の調査結果をとりまとめたものである。また、ステンレス材料をダム放流設備に適切に利用するための「ダム放流設備へのステンレス材料適用マニュアル（案）」（土木研究所資料第3156号）を、本報告書の成果を取り入れて作成した。

今後、マニュアルをより充実したものにするために七が宿ダム湖に暴露した試験片の調査を継続することが重要である。また、ステンレス材料を河川構造物にさらに広く適用するために、感潮区間における腐食性について検討をおこなうことが必要である。

最後に、本調査に御協力いただきました関係各位並びに暴露試験に多大な御協力をいただきました七が宿ダム管理所の関係各位に謝意を表します。

放流設備に使用するステンレス
材料に関する調査報告書

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3165号
平成5年1月(1993)

要 旨

片 脇 清 , 守 屋 進

ステンレス材料をダム放流設備に適用する際に問題となるステンレスクラッド鋼の溶接法に関する試験, 異種金属接触腐食, すき間腐食及びもらい錆に関する室内試験並びに七が宿ダム湖におけるこれらの試験片の暴露試験についてとりまとめたものである。

キーワード: ダム放流設備, ステンレス材料, 溶接法, 異種金属接触腐食, すき間腐食, もらい錆, 暴露試験



郵便はがき

四十一円切
手をはって
下さい。

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所
地質化学部化学研究室
行

No. 30

No. 30

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第 3165 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印