304 ステンレス鋼の応力腐食割れ破断寿命の 確率分布に及ぼす CaCl_2 濃度の影響†

柴 田 俊 夫* 藤 本 慎 司**
麻 田 篤 志*** 中 田 淳 二****

Effect of CaCl_2 Concentration on the Probability Distribution of Stress Corrosion Cracking Failure Time of Type 304 Stainless Steel

by

Toshio SHIBATA*, Shinji FUJIMOTO**, Atsushi ASADA***
and Junji NAKATA****

In order to compare the failure time distribution of a laboratory accelerated test with the field failure time distribution of stress corrosion cracking of Type 304 stainless steel, the effect of CaCl_2 concentration on the probability distribution of the failure time T_f , crack initiation time T_i and crack propagation time T_p for smooth plate specimens with or without crevice under a constant condition of 373K and 200 MPa has been analyzed. Two parameter Weibull distribution fitted approximately to all the distributions obtained. The apparent shape parameter m'_i for T_i of both type of the specimens with or without crevice was found unity, indicating that a chance failure mode was operating. On the other hand, m'_f and m'_p for T_f and T_p show a maximum value of 4 or 6 at an intermediate concentration range of 30 or 40 mass% CaCl_2 , corresponding to a wearout failure mode, and decrease to unity with a decrease of CaCl_2 concentration. This fact means that SCC fracture and propagation at a low concentration range take place by a change failure mode. Since the same chance failure mode had been reported for the field failure time distributions of Type 304 and 316 stainless steel heat exchanger tubes, an approximate acceleration factor of the laboratory test conducted under the condition of 25 mass% CaCl_2 , 373K, 200 MPa with crevice was estimated to be ca. 10^4 by comparing the mean failure time of both distributions of the field and the accelerated test.

キー・ワード：ステンレス鋼，応力腐食割れ，寿命分布，ワイブル分布，加速係数

1 緒 言

応力腐食割れ (SCC と略記) を支配する因子は多様であり，そのため材料学的，破壊力学的あるいは電気化学的アプローチなど種々の研究方法が用いられ，その機構の解明や耐 SCC 材料の開発に大きな寄与をしている。

近年上記三分野からのアプローチに加えて，信頼性工学的手法による寿命予測の観点から，SCC 寿命分布の確率統計的性質の検討がなされるようになってきた。従来 SCC 寿命分布については対数正規分布に従うとして解析される例が多かったが，最近信頼性工学で用いられるワイブル分布に従うとして解析されるようになってきた。例えば高温高圧水中における鋭敏化ステンレス鋼の粒界 SCC については，Clarke²⁾，明石³⁾，国谷⁴⁾，菊池⁵⁾らによる解析があり，乾湿繰返し試験については佐藤⁶⁾らの報告がある。また Al 合金

については岡^{7,8)}による研究がある，われわれは沸とう MgCl_2 溶液中のステンレス鋼の SCC 寿命分布に及ぼす，濃度^{9)~11)}，温度^{9)~11)}，表面処理¹²⁾，鋭敏化熱処理¹³⁾の影響について検討を加えてきたが，その結果いずれの場合も SCC 寿命分布は 3 パラメータのワイブル分布に従うことが明らかとなった。

しかしながら沸とう MgCl_2 試験は高い濃度，温度などの厳しい環境条件を用いて，比較的短時間で破断寿命を測定する，いわゆる実験室加速試験である。一方実地における SCC 事例は多くの場合温和な低濃度塩化物環境中で生じている。

寿命予測の観点からは，加速試験の寿命分布の塩化物濃度依存性および低濃度の分布特性が明らかにされ，それらと実地寿命分布との比較がなされる必要がある¹⁾。そこで本研究においては，304 ステンレス鋼/ CaCl_2 系について，温度，応力一定の条件における SCC 寿命

† 原稿受理 昭和61年3月7日 Received Mar. 7, 1986

* 正 会 員 大阪大学工学部 吹田市山田丘, Department of Metallurgical Engineering, Osaka University, Yamadaoka, Suita

** 大阪大学大学院 吹田市山田丘, Graduate Student, Osaka University, Yamadaoka, Suita

*** 大阪大学大学院 (現在, 日本板硝子(株)) 吹田市山田丘, Graduate Student, Osaka University, Yamadaoka, Suita

**** 大阪大学工学部 吹田市山田丘, Department of Metallurgical Engineering, Osaka University, Yamadaoka, Suita

分布に及ぼす濃度の影響を検討し, 実地寿命分布との比較を試みた。

2 実 験

2・1 定荷重型 SCC 試験装置および試料

Fig. 1 に定荷重型 SCC 試験装置 (東伸工業製 CRT-S10 型) を示した。腐食槽は上下のテフロン製円板で支持されたガラス円筒 (内径 107 mm, 高さ 40 mm) である。上下のテフロン円板にシリコン栓で保持された試片が装着され, 試片の下端は支持台に固定され, 上端は支持ロッドを介してスプリングによって荷重が負荷される。

Fig. 1. Schematic illustration of the SCC test apparatus of constant load type.

腐食槽内部にはヒータを入れたガラス管および熱電対とが挿入されており, 試験溶液の温度を一定に制御することができる。本実験ではすべての実験を 373 ± 1 K, および 200 MPa の一定温度・応力条件で行った。

使用した SUS 304 ステンレス鋼の組成は, C: 0.05, Si: 0.55, Mn: 0.98, P: 0.026, S: 0.008, Ni: 9.38, Cr: 18.39, Mo: 0.12, Cu: 0.05 mass% であって, 板厚 2 mm の試料より, Fig. 2 に示した形状の平滑試片を作製し, その後これを $1373 \text{ K} \times 15 \text{ min}$ の溶体化処理後水冷した。本試片の常温における 0.2% 耐力は 220 MPa, 引張強さは 690 MPa であった。SCC 条件と同一の温度である 373 K のシリコンオイル中で, $4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ の引張速度で測定したときの, 0.2% 耐力は 141 MPa で, 引張強さは 494 MPa であった。

Fig. 2 (a) の試片はすき間なしの自由表面で溶液中に完全に浸漬する実験に用いたが, 以後これをすき間な

Fig. 2. Shape of specimens.

し (without crevice) 試片と呼ぶ。また Fig. 2 (b) はすき間付き半浸漬実験に用いた試片であって, これをすき間付き (with crevice) 試片と呼ぶ。(b) に示したすき間は試片と同材質の 304 鋼平板をアクリル樹脂製のビスナットで締めつけることによって付与した。なお 304 鋼平板の代りにアクリル樹脂板を用いると寿命が長くなる傾向が認められたので, ここでは 304 鋼板を用いた。すき間なしの場合もすき間付きの場合も, 実験直前に乾式エメリー紙を用いて 6/0 番まで試片表面を研磨して SCC 実験に供した。

2・2 溶液ならびに腐食電位測定システム

SCC 実験には特級 CaCl_2 と蒸留水によって調整した種々の濃度の CaCl_2 溶液を用いた。検討した濃度は, 55, 50, 40, 30, 2, 20, 17, 15 mass% である。

SCC 割れ発生と伝ぱとを分離し, かつ全破断寿命を決定するために, SCC 実験中の試片の腐食電位を連続的に測定した。腐食電位は自作の Ag/AgCl, 飽和 KCl 電極に参照して測定し, この値を補正せずに $V_{\text{Ag/AgCl}}$ として示した。なお自作参照電極は飽和カメル電極に対して $-50 \pm 1 \text{ mV}$ の値を示した。

寿命分布を解析するために同一条件における多数の寿命値を得る必要があるので, Fig. 1 に示した SCC 試験装置を 7 台用い, それぞれの装置で測定される実験中の腐食電位をパーソナルコンピュータで集録するシステムを試作した。このシステムは腐食電位の時間的变化を高インピーダンス ($10^2 \Omega$) のプリアンプと 8 ch の A/D インターフェース (ADTEC, AB81-05, 12 bit) を介して, パーソナルコンピュータ (NEC, PC8801) のデスクに記録し, 必要に応じてディスプレイあるいはプリンタに出力するシステムである。これによって多数回の実験についての長期間にわたる腐食電位の変化を効率よく管理することができた。なお腐食

電位は実験開始から 3×10^3 までは 100 sec, 5×10^4 sec までは 500 sec, 5×10^5 sec までは 10^3 sec, 10^5 sec までは 2×10^3 sec の間隔で測定し、各測定時刻では約 0.1 sec 間隔で5回の測定を行いその平均値を腐食電位とした。すでに述べたように試片表面は実験直前に乾式エメリー紙にて6/0番まで研磨したのち、すぎ間なし試片はそのまま、すぎ間付き試片はすぎ間板を付与したのち、腐食槽に装着し、あらかじめ加熱しておいた溶液を加えた。その後応力を付加し、その時点を経時零として直ちに腐食電位の記録を開始した。同一条件の実験回数は最大15回であるが、寿命値が長い場合は現在までに得られている1~2回のデータも含めた。

3 実験結果

3.1 腐食電位の時間的变化

Fig. 3 に、373K, 200 MPa での 50 mass % CaCl_2 溶液中における、すぎ間なし完全浸漬の 304 ステンレス鋼の腐食電位の時間的变化を示した。図にみられるように、試片の腐食電位は浸漬直後には $-0.37 \sim -0.38$ volt を示した。ついで徐々に貴の値に変化し、図中 T_i で示したピーク電位に達したのち再び卑の値へ変化し、 T_f で示した時刻で最終破断に至る。すぎ間

Fig. 3. Corrosion potential vs. time curve for Type 304 stainless steel without crevice measured in 50 mass % CaCl_2 solution at 373 K and 200 MPa.

Fig. 4. Corrosion potential vs. time curve for Type 304 stainless steel with crevice measured in 15 mass % CaCl_2 solution at 373 K and 200 MPa.

なしもすぎ間付きの場合も、20 mass %以上の濃度における腐食電位の変化は、Fig. 3 とほぼ同一であったが、濃度の低下に伴って電位の変化幅は少なくなる傾向を示した。また Fig. 4 に示したように、低濃度溶液中におけるすぎ間付き試片の腐食電位の変動は大きい。

Fig. 3 や Fig. 4 の T_i で示したピーク電位以前にも他にピーク電位が認められるが、この値は表面研磨などの表面状態に敏感に依存し、再現性に乏しい。

前報¹⁾で示したように、腐食電位の変化と試片の伸び速度の変化との比較から、図中の T_i で示したピーク電位で割れが発生する。そこでここでもピーク電位から T_i を求め、全破断寿命 T_f との差から割れ伝ば時間 T_p を決定した。

3.2 寿命値のワイブルプロット

Fig. 5 と Fig. 6 はすぎ間なしおよびすぎ間付き試片について測定された T_f , T_i , T_p の累積確率をワイブル確率紙にプロットした一例である。ここで累積確率のプロット位置は次の式(1)による平均ランク法による値

$$P = i / (1 + N) \quad (1)$$

を用いた。ここで N は測定値全数、 i は寿命値を小さ

Fig. 5. Weibull probability plots of failure time T_f , crack initiation time T_i and crack propagation time T_p measured in 40 mass % CaCl_2 solution for Type 304 stainless steel without crevice.

Fig. 6. Weibull probability plots of failure time T_f , crack initiation time T_i and crack propagation time T_p measured in 30 mass % CaCl_2 solution for Type 304 stainless steel with crevice.

Fig. 7. Effect of CaCl_2 concentration on the probability distribution of failure time T_f for Type 304 stainless steel without crevice.

Fig. 8. Effect of CaCl_2 concentration on the probability distribution of failure time T_f for Type 304 stainless steel with crevice.

な値から並べた際の順位である。

Fig. 5, 6 にみられるように, T_f は T_b によって決定されており, 両者の分布形状はほぼ等しい. また T_i の分布は T_f や T_b よりも小さな傾きを示している。

Fig. 7 と Fig. 8 には, T_f の分布に対する CaCl_2 濃度の影響を示した. Fig. 5 や Fig. 6 のように確率紙上で直線に近似される場合と, Fig. 7 の 55% の場合のように上に凸の曲線となる場合がある. これらは一般に 3 パラメータのワイブル分布として解析される^{11)~13)}. しかしながら, 酒井らによってワイブル分布のパラメータの推定には 30 個以上の測定値が必要とされることが示されており, 本実験での測定値数は最大でも 15 個であることから, 正確なパラメータ推定は困難である. そこでここでは近似的に 2 パラメータ分布

$$F(t) = 1 - \exp(-t^{m'}/t_0) \quad (2)$$

に従うとして, Fig. 5~8 の直線の傾きからみかけの形状パラメータ m' を決定した. T_f , T_b , T_p の分布のそれぞれに対する m' 値を m'_f , m'_b , m'_p として示した. また上と同様の理由によって平均値の推定は困難であるので, 分布の中央値をもって代表値とし, 必要に応じて, それぞれを T_f , T_b , T_p として示した。

3.3 ピーク電位の統計的変動

Fig. 3 あるいは Fig. 4 などに示した腐食電位の時間の変化におけるピーク電位の値も, 破断寿命と同じ統計量である. Fig. 9 は種々の濃度の CaCl_2 溶液中

Fig. 9. Normal probability plots of peak potential for Type 304 stainless steel without crevice.

Fig. 10. Normal probability plots of peak potential for Type 304 stainless steel with crevice.

において観測されたピーク電位の測定値の累積確率を式(1)の平均ランク法によるプロット位置の値を用いて, 正規確率紙にプロットしたものである. 図にみられるように, いずれの濃度においてもほぼ直線となることから, ピーク電位の分布は正規分布に従うことが明らかとなった. Fig. 10 はすき間付き試片について Fig. 9 と同様にしてプロットした結果である. Fig. 9 のすき間なしの場合と比較すると, データのばらつきは大きい, 基本的には Fig. 9 と同様に正規分布に従っているものと考えられる. これらの図より $P=50\%$ の平均値を各濃度における分布の代表値として, これをピーク電位と呼ぶ. なおすき間なし試片での 15% と 20%, またすき間付き試片における 15% と 17% などの低濃度の値は, 測定数が少ないため Fig. 9 や Fig. 10 中には分布としては示していないが, いずれも平均値をもってそのピーク電位とした。

以上のようにして求められたピーク電位の値を CaCl_2 濃度の関数として Fig. 11 に示した. 図から明らかなように, ピーク電位はすき間なし試片の場合には

Fig. 11. Change in peak potential with CaCl_2 concentration.

30%に、すき間付き試片の場合には40%に極小値を示す下に凸の曲線を示す。すなわち高濃度領域では濃度の減少とともに、ピーク電位は卑の値に変化し、極小値を示した後濃度の減少とともに再び貴の値に変化した。極小値を示す濃度はすき間のある場合には高濃度に移る。

4 考 察

4・1 寿命分布パラメータに及ぼす CaCl_2 濃度の影響

Fig. 7 と Fig. 8 に破断寿命 T_f の分布に対する CaCl_2 濃度の影響が示されている。いずれの場合も濃度の減少とともに T_f の分布は長寿命側に移行し、その傾きすなわちみかけの形状パラメータ m_f' は増大後再び減少する傾向を示している。なお T_p の分布は T_f とほぼ類似の傾向を示し、 T_i の分布は多くの場合 $m_i' \approx 1$ となる。

これらの T_f , T_i , T_p および m_f' , m_i' の値の CaCl_2 濃度依存性を Fig. 12 と Fig. 13 にまとめて示した。図にみられるように、すき間なしおよびすき間付き試片のいずれにおいても、 CaCl_2 濃度の減少とともに T_f , T_i , T_p は対数的増大を示している。

しかしすき間なし試片で25%以下で、またすき間付き試片の場合には20%以下において、 T_f および T_p は上述の対数関係に従わない著しい寿命の増大を示し、小若¹⁵⁾¹⁶⁾の報告している臨界濃度の存在が認められる。ただし T_i は上記低濃度域においても高濃度域の対数依存関係の延長上にある。

みかけ形状パラメータの濃度依存性は Fig. 12, Fig. 13 の上図に示してある。図中 m_p' は m_f' の変化と重なるため示されていない。図から明らかのように m_f' は濃度の減少とともに極大値を示したのち、再び減少し1に近づく傾向にある。一方 m_i' はすき間なしの場合には、いずれの濃度においても1の値をとる。すき

Fig. 12. Effects of CaCl_2 concentration on the apparent shape parameter m' and median of failure time T_f , crack initiation time T_i and crack propagation time T_p for Type 304 stainless steel without crevice.

Fig. 13. Effects of CaCl_2 concentration on the apparent shape parameter m' and median of failure time T_f , crack initiation time T_i and crack propagation time T_p for Type 304 stainless steel with crevice.

間付きの場合はこの傾向は必ずしも明らかでないが、55%, 25%を除いて同様に1に近い値を示している。すなわち m_i' は濃度に依存せずに1に近い小さな値を示すのに対して、 m_f' , m_p' は極大値を示したのち低濃度域で1に近づく傾向を示している。

沸とう MgCl_2 溶液中における304鋼のSCC寿命分布が3パラメータワイブル分布に従い、 T_i の分布の形状パラメータ m_i が1.3あるいは1.5など、1に

近い値を示すことはすでに報告した。本実験の結果も上述のこれまでの結果と一致して、 T_i の分布は $m_i = 1$ 、すなわち指数分布に従うことを示している。明石らは高温高圧水中の鋭敏化 304 鋼の IGSCC の破断寿命の分布が指数分布に従うことを明らかにし、割れ発生に対してポアソン過程に従うモデルを提案している。応力を付加していない場合の 304 鋼の塩化物溶液中における孔食発生誘導時間の分布は指数分布に従い、これらはポアソン型の確率過程に従うモデルによって解析されている。

本実験で割れの発生過程である T_i の分布が、塩化物濃度に依存せずにランダムなポアソン過程の特徴である指数分布に従う事実は、割れ発生が主として鋼表面上の不働態皮膜のランダムな破壊に関係していることを示唆している。

一方、Fig. 12, 13 の示すように m_f' は中間濃度域で極大値を示しているが、既報の沸とう MgCl_2 系の場合にも、304 鋼も 316 鋼もともに 35%、399K の条件において m_f' の極大値を示している。ただしこの場合は沸とう条件を用いているので、濃度低下に伴う沸点降下が生じ、 m_f' の変化には温度の影響も含まれている。しかしながら本実験の結果から、すき間の有無にかかわらず、 m_f' は濃度依存性を示し、極大値を示すことが明確となった。すなわち 30~40% の濃度において m_f' 大の摩耗故障型の分布が認められると結論される。

破面の SEM 観察によると高濃度域では割れ伝ばの初期は粒内割れで、伝ばとともに粒界割れとなる。それに対して m_f' の極大値を示す濃度では粒内割れの比率が高く、低濃度でも同様である。この事実は腐食速度の大きい高濃度域では、ランダムに分布する粒界を選んで割れが進展し、そのため m_f' が小となることを示唆している。また濃度の低下は腐食の寄与を低下させ、応力因子が主となって粒内割れを生じさせ、かつ割れ過程を単一割れに集中させるため、寿命値のばらつきが少なくなり、 m_f' を大にするものと推定される。しかしながらこれら m_f' の濃度依存性についてはさらに詳細な解析が必要とされる。

低濃度域での m_f' の 1 への漸近は、すでに述べた臨界濃度の存在に関係していると推定される。すなわち SCC 伝ばには臨界濃度に対応する pH、塩素イオン濃度条件が必要とされるが、溶液中の塩化物濃度が低いときには、この条件は腐食生成物の表面への蓄積、あるいはすき間付与によってのみ達成される。そしてこの濃縮過程には温度、濃度、流れ等多数の因子が関与するため、臨界条件達成のための時間は大きくばらつき、結果として破断寿命分布は偶発故障型の特徴である指数分布に近づくものと考えられる。

4・2 破断寿命のピーク電位依存性

Fig. 14 にすき間なしおよびすき間付き試片の SCC 破断寿命 T_f のピーク電位依存性を示した。図にみられるように濃度の減少とともにピーク電位が卑に移行し、それとともに T_f は対数関係に従って増大する。すき間なしでは 30% 以下、すき間付きでは 40% 以下に濃度が減少すると、ピーク電位は逆に貴に移行し、-0.29 volt 近くまで上昇する。この領域のピーク電位は変動が激しいが、低いときで -0.30 また最高でも -0.28 volt を越えない。

Fig. 14. Failure time T_f as a function of the peak potential.

いずれにしても高濃度域と低濃度域とでは、 T_f の電位依存性は異なっており、高濃度域では $\log T_f$ がピーク電位に反比例する。この事実は高濃度域では Tafel の関係に従うアノード溶解反応が T_f を決定していることを意味しており、APC (活性径路腐食) 機構によって SCC が伝ばすることを示している。しかしながら低濃度域では電位が貴となるとともに T_f が増大することからみて、電位上昇に伴う皮膜形成の促進が T_f を抑制することを示唆している。この場合応力および塩素イオンによる皮膜破壊が生じて、皮膜が補修され割れにまで成長する確率が減少し、これが寿命分布を偶発故障型の指数分布に変化させる要因となっているものと推定される。またすき間の存在は T_f を減少させているか、これはすき間部での塩素イオンの濃縮と pH の低下の両者によってアノード溶解反応が促進されるため、 T_f の低下がもたらされるものと考えられる。

4・3 実験室加速試験と実地の寿命分布の比較

4・1 節に示したように、SCC 寿命分布のパラメータは塩化物濃度に依存して変化し、濃度の低下とともに T_f が増大し m_f' は 1 の指数分布に近づく。

従来から比較的地環境を模擬していると考えられている wicking 試験の結果も¹⁸⁾、最近行われた佐藤らによる乾湿繰返し試験の結果も⁶⁾ $m=1$ に近い寿命分布を示している。

さらに実地寿命分布については、化学工学協会化学装置材料委員会が、全国の化学工場で用いられている 304鋼、316鋼製熱交換器管の SCC 寿命解析を行った結果が報告されており¹⁹⁾、その結果によると SCC 寿命分布は指数分布に従う。

以上の事実は指数分布に従う寿命分布を示す実験室加速試験が、実地寿命を模擬する試験として望ましいことを示している。粒内割れを与えしかもできるだけ寿命が短く、またその分布が指数分布に従う条件としては、本実験の場合すき間付き、20%あるいは25%の条件と考えられる。

前述の実地熱交換寿命の303~373Kにおける平均寿命値は約500年であり、すき間付き25% CaCl_2 、373K、200 MPa の実験室加速試験での平均寿命は $8 \times 10^5 \text{sec}$ であるので、両者の寿命比より本加速試験の加速係数は約 10^4 であると結論される。なおしばしば用いられる沸とう45%あるいは35% MgCl_2 試験などでは、寿命分布は上に凸のワイブル分布を与えるので、実地寿命分布との比較は困難である。

5 結 論

373 K、200 MPa の一定条件において、すき間なしとすき間付きの304鋼平滑試片についての寿命分布に及ぼす CaCl_2 濃度の影響を検討した結果、次の結論が得られた。

(1) いずれの濃度においても、SCC 破断寿命 T_f および割れ発生時間 T_i 、伝ば時間 T_p は近似的に2パラメータワイブル分布に従うことが明らかとなった。

(2) T_i の分布のみかけの形状パラメータ m_i' はいずれの場合も1に近い値をとり、偶発故障型の特徴である指数分布を示した。一方 m_f' および m_p' は中間濃度域で摩耗故障型の大きな値を示し、高濃度と低濃度で1に近づく。

(3) T_f 、 T_p はすき間なし試片で25%、すき間付き試片で20%まで、濃度の低下とともに対数関係に従って増大する。しかしながらこれらの濃度を臨界濃度として、それ以上では急激な寿命増大が認められた。

(4) ピーク電位と T_f の関係から、高濃度域ではAPC機構によってSCCが生じ、低濃度域では皮膜の安定性がSCC寿命を支配していると推定された。

(5) 実地 SCC 寿命が指数分布に従うことが明らかにされているので、これと比較するために加速試験の寿命分布も指数分布に従う必要のあることが指摘された。この条件を満たしている加速試験(すき間付き、200 MPa、373K、25% CaCl_2)の加速係数は約 10^4 である。

本研究は昭和60年度の科学技術振興調整費によって行われたことを付記し謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 柴田俊夫, “鉄鋼材料の環境強度とその評価”, 第78, 79 回西山記念技術講座, p. 11 (1981) 日本鉄鋼協会.
- 2) W. L. Clarke and G. M. Gordon, Corrosion, **29**, 1 (1973).
- 3) 明石正恒, 見城孝雄, 松倉伸二, 川本輝明, 防食技術, **33**, 628 (1984).
- 4) 国谷治郎, 服部成雄, 正岡 功, 佐々木良一, 伊藤久雄, 防食技術, **31**, 261 (1982).
- 5) 菊池英二, 大中紀之, 湊 昭, 防食技術, **33**, 566 (1984).
- 6) 佐藤栄次, 村田朋美, 第13回技術講演会, 腐食環境・高温環境下の強度特性と信頼性評価, 講演論文集, No. 850-1, p. 31 (1985) 日本機械学会.
- 7) 岡 俊博, 武 和彦, 南埜宣俊, 平尾桂一, 山根寿己, 軽金属, **35**, 34 (1985).
- 8) 岡 俊博, 武 和彦, 南埜宣俊, 平尾桂一, 山根寿己, 軽金属, **36**, 15 (1986).
- 9) 柴田俊夫, 竹山太郎, 鉄と鋼, **66**, 693 (1980).
- 10) 柴田俊夫, 竹山太郎, 防食技術, **30**, 47 (1981).
- 11) 柴田俊夫, 古崎圭三, 中田淳二, 防食技術, **33**, 223 (1984).
- 12) 柴田俊夫, 麻田篤志, 中田淳二, 防食技術, **34**, 23 (1985).
- 13) 柴田俊夫, 堀川 純, 中田淳二, 防食技術, **35**, 83 (1986).
- 14) 酒井達雄, 田中道七, 材料, **29**, 17 (1980).
- 15) 小若正倫, 工藤赳夫, 鉄と鋼, **62**, 390 (1976).
- 16) 小若正倫, 工藤赳夫, 鉄と鋼, **63**, 328 (1977).
- 17) T. Shibata and T. Takeyama, Corrosion, **33**, 243 (1977).
- 18) D. Warren, Proc. 5th Ann. Industrial Waste Conf. (1960); “Fundamental Aspects of Stress Corrosion Cracking” p. 214 (1969) NACE.
- 19) 化学工学協会, 化学装置材料委員会編, “多管式ステンレス鋼熱交換器の応力腐食割れ—第2次使用実績調査結果と寿命解析—” (1984) 化学工業社.