再不動態化電位による 316 鋼/各種ガスケット-すきまの評価*

辻川 茂男**, 柏瀬 正晴**, 玉置 克臣***, 久松 敬弘**

**東京大学工学部金属材料学科

***川崎製鉄株式会社技術研究所

Repassivation Potential as Crevice Corrosion Characteristic for Various Gaskets / Metal Crevices of Type 316 Steel in 3% NaCl Solution*

Shigeo Tsujikawa**, Masaharu Kashiwase**, Katsuomi Tamaki*** and Yoshihiro Hisamatsu**

Department of Materials Science, Faculty of Engineering, the University of Tokyo**Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.*

Feasibility of repassivation potential, E_R , as a crevice characteristic has been studied by using various gaskets/nuts crevices of Type 316 steel in 3% NaCl solution at 25°C. Cyclic polarization procedure to determine E_R was conducted under sufficiently slow rates of potential sweep especially at potentials near E_R . Influence of the tightening torque to form the crevice assembly seemed to be of minor importance. This was already brought out for a nut/nut crevice in our previous paper. The situation was found to be the same for the crevice between top face of nut and typical gasket of PTFE or chrysotile asbestos investigated in this study. The E_R values for these crevices were found to be independent of the extent of previous growth of crevice corrosion and coincide with the critical potentials below which crevice corrosion do not initiate in 10^8 min. Such values of E_R are regarded to be well reproducible crevice characteristics which cover repassivation as well as initiation of crevice corrosion. Values of E_R for about 20 kinds of gasket were measured and summarized in a table together with those for the artificial crevices such as cylindrical hole and two-dimensional slit of certain geometrical sizes. For example the E_R became less noble in the order: PTFE > SBR > asbestos. This result has a good correspondence with that of the practical experiment conducted by others in a similar environment which showed increased extents of crevice corrosion in the same order. Of all gaskets studied conventional asbestos gave the least noble E_R . But some of the special asbestos developed for better resistance to crevice corrosion showed markedly noble E_R values comparable to the one for PTFE.

1. はじめに

我々はこれまですきま腐食の研究に幾何学的形状の定義が明瞭な金属/金属-すきまを用いてきた。耐海水材としての 25 Cr-(0~4) Mo 高純度フェライト系ステンレス鋼の評価¹⁾には試片に導入した円柱孔すきま²⁾を用いた。低濃度塩化物水溶液中の応力腐食割れを容易に再現しえ

た 316 鋼 DCB 試片に付与したのは二次元スリット³⁾である。これらの人工すきまが各種実際すきまといかなる関係にあるかを検討することは本報の目的の一つである。

すきまの再不動態化電位, $E_{R, crev}$ (以下では E_R と略記) が測定法あるいはすきまの成長度合に依存せず求められる, すきま構造の特性値であって, かつすきま腐食開始の下限界電位 V_{crev} に一致する事実のあることは, 316 鋼製のナット/ナット-すきまについて先に報告した⁴⁾。

我々は, 実環境にみられる各種のすきま構造をその E_R によって評価し防食設計に役立たたいと考えている。

* 日本鉄鋼協会第 99 回講演大会 (1980.4 東京大学), 腐食防食協会 '80 春期学術講演大会 (機械振興会館) で口頭発表

** 〒113 東京都文京区本郷 7-3-1 (7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113 Japan)

*** 〒260 千葉市川崎町 1 (1, Kawasaki-cho, Chiba, 260 Japan)

以下にとりあげるのは、二つのナット間にガスケットをはさんで構成されるすきまである。本報告は結果的にガスケットの性能の評価^{6)~7)}を含むことになるが、研究の主眼は各種のすきま構造の評価にあることを強調しておきたい。

2. 実験方法

2.1 試片

前報⁴⁾と同じ市販 316 鋼製の長ねじボルトと六角ナットとを用いた。ガスケットと接触するナット頂面の湿式研磨仕上げには特にのべない場合 #100 SiC 紙を用いた。2.2 に示す各種ガスケットの板材から内、外径がそれぞれ 10, 25 mm の環状板を切り出し、板面を #600 SiC 紙で湿式研磨した。これらから図 1 に示す試片を組立てた。ナット間にガスケットを締めつける強さはトルクレンチで管理した。試験液も前報と同じ 25°C の 3% NaCl 水溶液である。

2.2 ガスケット材

用いたガスケット名(略号)、(厚さ, 単位 mm) を以下に示す。ガスケットはプラスチック類, ゴム類およびアスベスト類に大別した。プラスチック類は, ポリテトラフルオロエチレン (PTFE), (3.8), ポリカーボネイト (PC), (4.9), ペークライト (2.9), ポリエチレン (3.1), メタクリル (PMMA), (3.0), エポキシ樹脂 (6.0), ポリ塩化ビニル (PVC), (4.9), およびジアリルフタレート (DAP), (4.4) である。ゴム類は, シリコンゴム (2.2), 天然ゴム (2.9), クロロスルホン化ポリエチレン (CSM, ハイパロン), (2.6), ニトリルゴム (NBR), (2.8), ウレタンゴム (3.1), エチレンプロピレンターポリマー (EPT), (3.2), ブタジエンゴム (BR), (3.2), ネオプレン (1.5), およびスチレンブタジエンゴム (SBR), (2.9) である。ア

Fig. 1. Test specimen. The crevice assembly is formed by a bolt, two nuts made of Type 316 steel and a gasket ring. The top faces of nuts in contact with gasket provide crevice conditions.

スベストはとくにのべない場合温石棉 (クリソタイル石棉), (2.8) である。その他に各種青石棉 (0.8, 2.5, 2.7) および市販「耐すきま腐食用」アスベスト (No. 1, 2, 3, 厚さ約 3 mm) を使用した。

2.3 再不動化電位 E_R およびすきま腐食開始の下限界電位 V_{crev} の測定

E_R および V_{crev} の測定はそれぞれ前報の 2.2 および 2.3 の方法によった。試験液の脱気を行わないため E_R 近傍で試片に流れる電流が負になるが、そのアノード方向への増加傾向が認められなくなる上限の電位として E_R を精度よく求めることができる。これは、ナット/ナット-すきま⁴⁾の他ナット/PTFE, ナット/アスベスト-すきまにおける定電位保持下の電流挙動とすきま腐食の目視検査結果との対比により確かめている。

E_R に及ぼすすきま成長度合の影響を調べるためにすきまを大きく成長させるときは、当初から所定の電位 (ナット/アスベスト-すきまでは -0.10 V, ナット/PTFE-すきまでは -0.05 V (SCE)) に適当時間保持してのち、前報 2.2 の E_{max} 以降の操作により E_R を求めた。本報においてすきまの成長度合の尺度として採用したのは、 E_R 測定後の試片上で 2.4 の方法により測定される最大侵食深さである。これは、本報のナット/ガスケット-すきまについてはその成長操作が一般にボルト/ナット-すきまの E_R (約 -0.14 V) より貴な電位域におよび、かつすきま内の腐食が局所的になることが多いので、通電電流量の意味が不明確になるためである。なお前報のナット/ナット-すきまにおける最大の成長度合は最大侵食深さとして $40 \mu\text{m}$ であった。

2.4 すきま内溶解速度の測定

ナット/ガスケット-すきま内壁における 316 鋼の深さ方向への溶解速度を次のようにして求めた。図 1 の試片を定電位保持して適当な時間後に液から取り出し、試片を解体、洗浄、乾燥後ナット頂面に生じた最大侵食深さをダイヤルゲージ付光顕下に測定した。最大侵食深さの対時間直線の勾配が求めるものである。なおこの目的に使う試片については侵食深さ測定の便宜上ナット頂面の湿式研磨仕上げに #600 SiC 紙を用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 ナット/PTFE-すきまおよびナット/アスベスト-すきまにおける再不動化電位の挙動

3.1.1 ガスケット締めつけ強さの影響

試片を組立てる際のガスケット締めつけ強さによって E_R の値がどう変わるかをしらべた。結果を図 2 に示す。ガスケットとして PTFE またはアスベストを用いるとき、締めつけトルクが約 $100 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$ 以上で E_R がわずかに貴になるほかは広いトルク範囲において E_R は締め

Fig. 2. Effect of the tightening torque to form the crevice assembly upon repassivation potential for a nut/PTFE crevice and a nut/asbestos crevice.

Fig. 3. Repassivation potential, E_R , for a nut/PTFE crevice and a nut/asbestos one vs. the maximum penetration depth as a extent of previous growth of crevice corrosion. The parameters in figure show torques in kgf·cm. There exist characteristic E_R values for both crevices which do not depend on usual measuring procedure in the depth range below $\sim 200 \mu\text{m}$.

つけ強さに依存しない。このときの E_R の値は、ナット/PTFE およびナット/アスベスト-すきまについてそれぞれ -0.18 および -0.32 V である。

3.1.2 すきま成長度合の影響

すきまの成長度合による E_R の変化を図 3 にまとめた。下横軸には E_R 測定終了後のナット頂面における最大侵食深さ、上横軸には対応する電気量を目盛った。図中の Δ と $\circ$ 印は図 2 のデータを成長度合に対して再整理したもので、プロットに付した数値は締めつけトルクを

kgf·cm 単位で表わす。図 2 にみた E_R の変化が成長度合によるものではないことがわかる。 Δ と $\circ$ 印は締めつけトルク 20 kgf·cm でえた結果である。このトルク値は Vreeland ら⁸⁾が静海水中 316 鋼暴露試験において、外径がそれぞれ約 $6.8, 18.6 \text{ mm}$ の環状すきまを形成するのに用いた 15 inch·pounds (17.3 kgf·cm) を参考にした。ナット/PTFE およびナット/アスベスト-すきまにおいて最大侵食深さがそれぞれ約 1 mm および約 $150 \mu\text{m}$ 以下の範囲において、 E_R は成長度合によらずほぼ一定である。これらの侵食深さ範囲は通常の E_R 測定に必要なすきま成長度合の範囲内にあるであろう。本報における 2.3 の通常法による E_R 測定におけるすきま成長度合は後述の各種ガスケットの場合をすべて含めて $40 \sim 200 \mu\text{m}$ の範囲内にあった。

より大きな成長度合の範囲ではナット/PTFE-すきまの E_R は約 30 mV 、ナット/アスベスト-すきまの E_R は約 60 mV だけ、いずれも卑な値になっている。ナット/アスベスト-すきまの E_R が、最大侵食深さ約 $150 \mu\text{m}$ に相当する成長度合の前後でそれぞれ -0.32 V と -0.38 V という二つの異なる値をもつことについて、Suzuki らの実験結果⁹⁾が参考になる。すなわち 70°C の 0.5 N NaCl 水溶液中の 316 鋼/アスベスト-すきまにおいて、すきまアノードの腐食電位はすきまの活性化直後および定常電位到達後においてそれぞれ -0.32 V および -0.375 V であると報告されている。

3.1.3 すきま腐食開始の下限界電位との関係

締めつけトルク 20 kgf·cm で組立てたナット/PTFE およびナット/アスベスト-すきま試片について、前報 2.3 の方法により V_{crev} をしらべた結果を図 4 に示した。

試験時間 10^8 min 内でみた V_{crev} は、ナット/PTFE-すきまにおいて -0.20 V である。この値と 3.1.1 で求めた $E_R = -0.18 \text{ V}$ との差は小さい。なお V_{crev} より貴で E_R より卑な -0.19 V において最長 230 h まで保持しても最大侵食深さは $8 \mu\text{m}$ 以下であり、かつ経過時間と共に増加する傾向を示さなかった。すなわち -0.19 V におけるナット/PTFE-すきまは非成長性すきまである。これは $E_R = -0.18 \text{ V}$ の意味に含まれることである。

ナット/アスベスト-すきまの $V_{\text{crev}} = -0.32 \text{ V}$ は、3.1.1 で求めた E_R の値に一致している。

3.1.4 すきま内溶解速度との関係

2.4 の方法によりすきま内溶解速度を求めた。ナット/PTFE およびナット/アスベスト-すきまについて、 E_R より貴な諸電位に保持して最大侵食深さの時間変化を調べた結果はそれぞれ図 5a および図 5b のようである。図示の成長直線の勾配として溶解速度を求め試片電位に対して整理すると図 6 をうる。 E_R を異にする両すきまについて、一定の電位におけるすきま内溶解速度は E_R の

Fig. 4. Occurrence (closed) or non-occurrence (open symbols) of crevice corrosion in specimens kept under conditions of various potentials and times. There exist critical potential, V_{crev} , of -0.18 and -0.32 V for a nut/PTFE crevice and a nut/chrysotile asbestos crevice, respectively, which coincide nearly or exactly with the corresponding value of E_R shown in Fig. 3.

Fig. 5. Growth of maximum penetration depth with time in a nut/PTFE crevice (a) and in a nut/chrysotile asbestos crevice (b).

Fig. 6. Dissolution rates in crevices as a function of external potential of specimen.

卑なすぎまにおいてより大きく、かつ両者の差は卑な電位におけるほど大きい。

それぞれの E_R 直上の電位におけるすぎま内溶解速度は両者ではほぼ等しく、およそ $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m/h}$ である。いかえれば、すぎま腐食を維持するための下限溶解速度は二つのガスケットの種類、または E_R の値には依存しないということである。すぎま腐食を起こしている試片の電位は E_R に近い貴側の電位域にある¹⁰⁾ことが多いであろう。たとえば、静かな実海水中に3カ月浸漬した

316 鋼板/316 鋼ワッシャー-すきまにおける最大侵食深さ 33 mils⁸⁾ から算出される 0.39 $\mu\text{m}/\text{h}$ という平均溶解速度は上の値に近い。

3.1.5 すきま構造の特性値としての再不動態化電位

我々は従来食孔^{11),12)}, すきま^{1),3)}の再不動態化挙動の判定は定電位保持法によるべきことを主張してきた。ところで, 実環境に存在する多様なすきま構造を評価するための E_R 値は単一試片の測定によって直ちに求める方が都合である。このため前・本報においては cyclic polarization 法であって, 電位掃引速度が十分低く定電位法の本質を満たしうるものを採用した。

いずれの方法によるにせよ再不動態化電位の測定操作には食孔・すきまを予め成長させる過程が本質的に含まれる。食孔とは異なり, ナット/ナット-すきまの場合にはこの成長過程に依存しない E_R 値が求められるというのが前報の結果であった。本報では代表的なガスケットとして PTFE とアスベストとを選び, これらと 316 鋼ナットとの間に形成されるすきまについて検討した。前報のナット/ナット-すきまと同様に本報のナット/ガスケット-すきまについてもその E_R は, 通常の測定に必要なすきま成長度合に依存せず(3.1.2), またすきま腐食開始の下限界電位に一致する(3.1.3) 事実のあることがわかった。すなわち測定された E_R 値は当該すきまの構造上の特性値であるとみなせる。

3.2 ナット/各種ガスケット-すきまの再不動態化電位

3.1 の結果にもとづき同様すきまの E_R 測定をその他の各種ガスケットへ進めた。

プラスチック類に属するガスケットとしてのポリエチレン, PMMA および PVC の 3 者について, ナット/ガ

スケット-すきまの E_R に及ぼすガスケット締めつけ強さの影響を図 7 に示した。ポリエチレンは図 2 の PTFE に

Fig. 7. Variation with the tightening torque of the repassivation potential for the crevices introduced with PE, PMMA and PVC.

Fig. 8. Overviews of the crevice corrosion on the nuts in contact with the gaskets under a tightening torque of 100 kgf·cm. Affected areas are localized along the periphery of crevice with PE (a) and general in crevice with PVC (b).

Table 1. Summary of E_R values obtained for the nut/gaskets and the metal/metal crevices of Type 316 steel in 3% NaCl solution at 25°C.

$E_R(\text{V/SCE})$	nut/gasket - crevice (SUS 316, 3% NaCl, 25°C)			metal/metal - crevice
	plastics	rubber	asbestos	
- 0.15		silicon		bolt/nut ⁴⁾
- 0.20	PTFE PC bakelite, polyethylene	natural CSM Neoprene NBR	No.1 No.2	cylindrical (1" x 10)
- 0.25	PMMA, DAP, epoxy PVC	EPT, urethane BR SBR		two-dimensional (a=0.25, h=4)
- 0.30			No.3	nut/nut ⁴⁾
- 0.35			chrysotile blue	

似た挙動をとる。100 kgf·cm 未満のトルク域で E_R は締めつけ強さに依存せず -0.21 V という一定値をとる。PMMA と PVC の E_R は低トルク域でポリエチレンと同程度の値を示すが、10 kgf·cm 以降急に卑になり 20~100 kgf·cm のトルク域ではほぼ一定の値を示す。100 kgf·cm におけるすきま腐食状況を図 8 に示した。PVC ($E_R = -0.27$ V, 図 8(b)) と PMMA では内部まですきま腐食が及んでいるが、ポリエチレン ($E_R = -0.17$ V, 図 8(a)) では矢印で示すようにすきま腐食部分は少なく周辺部に局在するのみである。以上の結果からプラスチック類については締めつけトルク 40 kgf·cm における E_R 値により相互比較することにした。結果を表 1 の第 1 列に示した。PTFE の -0.18 V は 3.1.1 で得た値である。PC,

Fig. 9. Variation with the tightening torque of the repassivation potential for the crevices introduced with urethane rubber and SBR.

ベークライトおよびポリエチレンは $E_R = -0.20 \sim -0.21$ V の比較的貴なグループ、PMMA, DAP, エポキシおよび PVC は $E_R = -0.25 \sim -0.26$ V の卑なグループに属する。

表 1 の第 2 列はゴム類に属するガスケットの結果である。これらの E_R 値は、Finger tight (指締め) からさらに 60° 増し締めして締めつけた条件下の値である。 E_R に対する締めつけ強さの影響を比較的硬いウレタンゴムと SBR について調べた結果 (図 9) によると、その影響は PTFE, アスベストの場合よりは大きい。シリコンゴムを用いた試片の E_R は -0.14 V であった。この値はボルト/ナット-すきまの E_R とも一致するので、ナット/シリコンゴム-すきまの E_R については -0.14 V より貴であるとしかねない。小林ら¹³⁾による 316 鋼/シリコンゴム-すきまの V_{rev} は約 -0.05 V (SCE) である。ゴム類の中では天然ゴム、ハイパロンは $E_R = -0.18 \sim -0.19$ V が次いで貴であり、SBR の $E_R = -0.28$ V が最も卑であった。

表 1 の第 3 列はアスベスト類に属するガスケットの結果である。いずれも 20 kgf·cm の締めつけトルク下に測定した。アスベスト (温石棉) の E_R は 3.1.1 でえた -0.32 V であり、後述の「耐すきま腐食用」以外の各種の青石綿についても同じ値をえた。「耐すきま腐食用」として市販されている 3 種類のアスベスト (No. 1, 2 および 3) について 20 kgf·cm 下に測定した E_R を図 10 に示した。横軸は受領したアスベストから研磨除去した両側表面層の合計厚さ Δ (単位 mm) である。同じ No. のアスベストについてえられた E_R の値は大きくばらつく

Fig. 10. Repassivation potentials for nuts/special asbestos crevices. The asbestos marked with No. 1, 2 and 3 are commercially developed for better resistance to crevice corrosion. The Δ on the abscissa is the reduction of total thickness by removing surface layers of as received asbestos.

Fig. 11. Corroded areas after cyclic polarization procedures to determine E_R in the top faces of nuts in contact with asbestos No. 1 in Fig. 10. E_R values obtained are -0.18 V (a) and -0.23 V (b), respectively, under a tightening torque of 20 kgf·cm and d of 0.15 mm.

ようにみえるが、図示のように貴、卑いずれかの両端値をとることが多い。対応するすきま腐食の状況を No. 1, $d = 0.15$ mm について図 11a ($E_R = -0.18$ V), 図 11b ($E_R = -0.23$ V) に示した。すきま腐食箇所は、 E_R が貴端値をとったものではすきま部分の周辺部に限られ、卑端値をとったものではすきま中央部にも及んでいることが観察される。これは No. 2, 3 アスベストについても同様であった。No. 1 を最高としてこれら「耐すきま腐食用」アスベストが普通アスベストに比し著しく貴な E_R 値を示すのは注目すべきことと思われる。

3.3 実際試験結果との対応

E_R の測定結果を実際試験結果と対比できるいくつかのデータがある。

表 1 には示していないが、温または青石綿を 25 または 80°C の 5% $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 水溶液中に 20 h 浸漬する前処理を施すと E_R は -0.30 または -0.29 V と未処理のものより $20 \sim 30$ mV 貴になった。これは、 300 ppm Cl^- と 300 ppm Cu^{2+} を含む沸騰 40% 硫酸水溶液中の 316 L 鋼のアスベスト系シートパッキン下のすきま腐食の防止に対して同処理が有効であったという徳永らの報告¹⁴⁾を本実験条件下で追認したものである。

鈴木ら⁷⁾は、流動循環 5% NaCl 水溶液 (50°C , pH=3.0) 環境における 316 L 配管のフランジすきま腐食試験を 360 h 実施してガスケット材質の影響を比較した。その結果によると、

PTFE < SBR < 青石綿 < 温石綿

の順にすきま腐食の程度が激しかった。このことを表 1 でみるとナットとの組合せによるすきまの E_R は、

PTFE → SBR → 青, 温石綿

の順に卑になっている。青石綿と温石綿との E_R の差がみられない点以外では、すきま腐食の激しいガスケットほど表 1 でみる E_R が卑であるという対応関係がある。これは 3.1.4 でえたすきま内溶解速度と E_R との関係によって解釈できよう。

実海水中に浸漬した試片の観察結果¹⁵⁾によると、金属/付着貝類-すきまの E_R は金属/ペークライト-すきまのそれ (表 1 では -0.21 V) より貴になるようである。実海水中の 316 鋼について測定された動電位法によるすきま腐食開始電位 V'_{rev} においても、金属/海藻, 金属/フジツボ, 金属/金属 (板/丸棒)-すきま, の順に卑になっている¹⁶⁾。

3.4 人工すきまとの比較

1 でのべた人工すきまについて、その E_R の測定結果を表 1 の第 4 列に示した。 $\phi 1$ mm, 深さ 10 mm の円柱孔すきまの E_R は -0.20 V であった。このすきまは本試験に用いた 316 鋼ボルト材に加工付与され、ナット/ガスケット-すきまと同様の方法により E_R 測定された。また、幅 0.25 mm, 深さ 4 mm の二次元すきまの E_R は -0.24 V であって、ナット/ガスケット-すきまのうち比較的 E_R が卑なものに相当することがわかった。すなわち、ここにとりあげたような適当な幾何学的寸法をもつ人工すきまは実際すきまをシミュレートしうるものであって、その対応の評価にそれぞれの E_R 値がつかえると結論される。

4. 結 論

25°C の 3% NaCl 水溶液中における 316 鋼/各種ガスケット-すきまの再不動態化電位 E_R を測定し以下の結論をえた。

1) 316 鋼/PTFE, クリソタイルアスベスト-すきまについて、それらの E_R は、すきまの成長度合したがって測定方法に依存せず求められ、かつすきま腐食開始の下限界電位にも一致する、すなわちすきま構造の特性値としうる値である。

2) 同上の両すきまについて、すきま内溶解速度を試片電位の函数として測定しそれぞれの E_R との関係を調べた。

3) 1) の成果に基づき 316 鋼/各種ガスケット-すきまの E_R を測定した。PTFE, SBR およびアスベストについては E_R 値と報告されている実際試験におけるすきま腐食の程度との相対的順序はよく対応し、これは上述の 2) でえられた関係によって解釈しうる。

4) 人工すきま, すなわち $\phi 1$ mm, 深さ 10 mm の円柱孔および幅 0.25 mm, 深さ 4 mm の二次元スリットの E_R はそれぞれ -0.20 , -0.24 V であって、ナット/ガスケット-すきまのうち前者は比較的貴, 後者は卑なものに相当する。

5) 市販ガスケット用アスベストで「耐すきま腐食用」とされているものの中には普通品に比し著しく貴な E_R 値を示すもののあることがわかった。

本試験に用いた各種ガasketの選定にあたり日新製鋼(株)周南研究部渡辺治幾氏と味の素(株)中央研究所鈴木紹夫氏のご教示を賜わった。日本アスベスト(株)と日本バルカー工業(株)の両社からはアスベスト試料のご提供をうけた。記して感謝する。

(Received August 12, 1980)

文 献

- 1) 久松敬弘, 辻川茂男, 曾根雄二: 金属学会春期大会講演概要, p. 119 (1976).
- 2) 小川洋之, 伊藤 功, 中田潮雄, 細井祐三, 岡田秀弥: 第23回腐食防食討論会予稿集, p. 104 (1976), 鉄と鋼, **63**, 605 (1977).
- 3) 辻川茂男, 玉置克臣, 久松敬弘: 鉄と鋼, **66**, 2067 (1980).
- 4) 辻川茂男, 久松敬弘: 防食技術, **29**, 37 (1980).
- 5) E. V. Kunkel: *Corrosion*, **10**, 260 (1954).
- 6) L. M. Rasmussen: *Corrosion*, **11**, 155 (1955).
- 7) 鈴木紹夫, 斎藤 洪, 吉岡和夫, 北村義治: 防食技術, **19**, 133 (1970).
- 8) D. C. Vreeland and G. T. Bedford: *Mater. Perform.*, **9** [8] 31 (1970).
- 9) T. Suzuki and Y. Kitamura: *Corrosion*, **28**, 1 (1972).
- 10) D. A. Jones and B. E. Wilde: *Corr. Sci.*, **18**, 631 (1978).
- 11) 吉井紹泰, 久松敬弘: 金属学会誌, **36**, 750 (1972).
- 12) 辻川茂男, 久松敬弘: 防食技術, **25**, 67 (1976).
- 13) 小林未子夫, 藤山昭三, 新谷与一郎, 和田征也, 砂山幸夫, 宇野秀樹: 腐食防食協会'77春期大会予稿集, p. 10 (1977).
- 14) 徳永一弘, 三木正義, 大久保勝夫: 第24回腐食防食討論会予稿集, p. 75 (1977).
- 15) 小若正倫, 長野博夫, 鈴木英次郎: 鉄と鋼, **65**, 1953 (1979).
- 16) M. Akashi, Y. Imamura, T. Kawamoto and Y. Shinozaki: *Boshoku Gijutsu*, **24**, 31 (1975).