高速引張加工を与えた SUS 304 および SUS 305 ステンレス鋼の応力腐食割れ*

内田 仁, 小寺沢啓司, 山田 巖

姫路工業大学**

Stress Corrosion Cracking of SUS 304 and SUS 305 Stainless Steels Deformed at High Strain Rate*

Hitoshi Uchida, Keiji Koterazawa and Iwao Yamada

Himeji Institute of Technology**

This investigation has been carried out to make clear the effect of high strain rate deformation on stress corrosion cracking (SCC) behavior of austenitic stainless steels in boiling 35% MgCl_2 solution. The main results obtained are as follows: (1) The yield strength, tensile strength and hardness of these stainless steels deformed at high strain rate are larger than those at low strain rate. The strain rate gives a remarkable effect on the work hardening of these stainless steels. (2) The threshold stress in SCC of SUS 304 stainless steel deformed at low strain rate is larger than that at high strain rate. It has shown that such behavior is caused by the difference of α' martensite transformation induced by low or high strain rate deformation. (3) The induction and the propagation periods in SCC are influenced considerably by pre-plastic strain. It was observed that the time to fracture is controlled by the propagation period in low pre-plastic strain and by the induction period in high pre-plastic strain.

1. 緒 言

オーステナイト系ステンレス鋼の応力腐食割れ(以下, SCC と略称)に対する感受性が冷間加工の影響を強く受けることについては, これまで Hines¹⁾の研究など多くの議論がある^{2~5)}。わが国においてもその影響が論じられているが^{6~10)}, それらの研究はおもに加工材の SCC 感受性あるいはその防止について行なったものである。

ところで, 近年の高エネルギー高速度加工法の実施に伴い, 特に SCC 感受性におよぼす高速加工の功罪について明らかにする必要があると考えられるが, この種の研究はきわめて少ない。上出ら¹¹⁾は, 低ひずみ速度の範囲 ($5.5 \times 10^{-6} \sim 5.5 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$) で同一ひずみ量を与えた場合の SCC 感受性を転位配列と表面のすべりの様相

より考察し, ひずみ速度が小さいほど SCC 感受性が大きくなることを報告している。一方, 爆発成形材などのような衝撃波を伴う高速加工では, SCC 抵抗がかなり低下するといわれている¹²⁾。しかし, 爆発成形による材質変化には, 高ひずみ速度による分と衝撃波による分とが含まれており, したがって単なる高ひずみ速度変形と同列に論ずることができず, 高ひずみ速度効果 (high strain rate effect) と衝撃波効果 (shock wave effect) とは分離して研究する必要があるが¹³⁾, この種の研究はほとんど行なわれていない。

著者の2人は, 以前から高ひずみ速度変形を与えた各種材料の機械的性質について検討してきた^{14~17)}。今回はこれらの知見をもとに, オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS 304, 305) の SCC 感受性におよぼす前加工速度の影響の有無について検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片

供試材としては, 溶体化処理 (Ar 中で $1050^\circ\text{C} \times 30 \text{ min}$, W.Q.) した SUS 304, 305 を原材とし, その成分

* 高速引張加工を与えたオーステナイト系ステンレス鋼の応力腐食割れに関する研究 (第1報) (Studies on stress corrosion cracking of austenitic stainless steels deformed at high strain rate (Part 1)) 1975 年 5 月, 本協会 '75 春期大会 (東京) に一部発表

** 〒671-22 姫路市書写 2167 (2167, Shosha, Himeji-shi 671-22, Japan)

Table 1. Chemical composition of materials (wt%).

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
SUS 304	0.06	0.54	1.44	0.030	0.004	9.04	18.09	0.11	—
SUS 305	0.06	0.51	1.59	0.033	0.01	12.28	17.89	0.15	0.16

Table 2. Mechanical properties of materials.

Material	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (D.P.N.)
SUS 304	19.8	57.2	61.4	182.4
SUS 305	18.3	52.0	61.4	133.4

組成および機械的性質を Table 1, Table 2 に掲げる。

SCC 試験片の低速 (静的) および高速 (動的) 引張前

Fig. 1. Dimension of specimens (mm).

Fig. 2. Schematic illustration of experimental apparatus for SCC test.

1: load cell, 2: silicon rubber, 3: specimen, 4: glass cell, 5: testing solution, 6: heater, 7: micro switch, 8: differential transformer, 9: micrometer, 10: frame, 11: loading bar, 12: spring, 13: thrust ball bearing, a: hole for thermometer, b: hole for condenser.

加工は、室温 (20~22°C) で Fig. 1(a) の形状のものをインストロン型引張試験機、火薬の爆発を利用した高速引張試験装置^{*1}により、それぞれひずみ速度 1.7×10^{-3} , $6 \times 10 \text{ sec}^{-1}$ で与え、その一部は前加工材の機械的性質を調べるのに使用した。その後、Fig. 1(b) の形状にフライス加工を施し、角に軽く丸味を持たせてから全面エメリー #1000 仕上げした。アセトンで脱脂後、試験直前に混酸洗 (13 vol % HNO_3 + 3 vol % HF + 0.5 vol % HCl , 55°C, 10 sec), 純水で洗浄して SCC 試験に供した。

2.2 SCC 試験

SCC 試験は Fig. 2 に示した定荷重試験装置を使用して、単軸引張応力下での負荷応力と破断時間の関係を求め、同時に破断まで試験片の伸び変化を自記させた。

試験液としては、pH メーターにより室温で pH 3 に調整 (HCl の添加) した沸騰 35% MgCl_2 (沸点 $124.5 \pm 1^\circ\text{C}$) を使用した^{*2}。なお純水にはイオン交換水を 2 度蒸留したものを使用し、各実験条件が一定になるように留意した。

3. 実験結果

3.1 引張前加工材の機械的性質

一般に前加工材の機械的性質のひずみ速度依存性には、純粋にひずみ速度そのものに起因するもの (力学的

^{*1} この装置は、高速引張と衝撃引張とを区別して行なうことができる。本実験は前者で行なったが、詳細は文献 14) を参照されたい。

^{*2} この試験液の特徴については、すでに木島⁹⁾ によって指摘されているが、著者らも基本的には同一主旨で採用した。また割れの発生伝播を観察するのには、35% の透明液の方が都合がよい。

要因)とひずみ速度にもとづく材質変化に起因するもの(材料学的要因)の二つが含まれている。特に前加工材の SCC 感受性におよぼす前加工速度の影響を調べるには、ひずみ速度の遅速によって起こる材質の変化の差、すなわち後者の要因をは握ることが重要である。

いま Fig. 3 において、a の前加工度を与えたときの低速前加工材(以下、㊟材と略称)と高速前加工材(以下、㊤材と略称)とでは、すでにひずみ速度によって材質変化に相違を生じている。したがって、その後ただちに同一ひずみ速度で引張試験(たとえば㊟-S^{*}と㊤-S^{*})すれば、前加工速度の差による材質変化の差(材料学的要因のみによる)がわかる。㊟-D^{*}と㊤-D^{*}を比較することによっても、同様ながいえる。なお、㊟-S^{*}と㊟-D^{*}あるいは㊤-S^{*}と㊤-D^{*}の差は力学的要因のみによる。

Fig. 4 に SUS 304, 305 の㊟材および㊤材の 0.2%

Fig. 3. Schematic stress-strain diagrams.

Fig. 4. Effect of pre-plastic strain and strain rate on 0.2% yield strength of SUS 304 and SUS 305 stainless steels.

*8 実験結果の整理にこれらの記号を使用する。

たとえば、㊟-S は低速前加工材を引き続き低速引張試験した結果を、㊤-S は高速前加工材を低速引張試験した結果を示す。

耐力を前加工度に対して、公称応力および真応力で整理したもの示す。同様に Fig. 5 に引張強さ、伸びおよび硬さの変化をまとめて示す。以上から明らかなように前加工度が同一であっても、㊟材に比較して㊤材の方が耐力、引張強さおよび硬さに高い値を示していることがわかる。なお伸びについては、その差が不明瞭である。

3.2 引張前加工材の SCC 試験

前加工材の SCC 感受性を破断時間で代表し、SUS 304, 305 の各前加工度に対する 0.2% 耐力の 80% 定率初応力で試験した結果を Fig. 6 に示す。公称応力の定率初応力試験では、㊟材および㊤材ともに 20~30% まで SCC 感受性が増加し、それ以上ではわずかに減少の傾向にある。これは、真応力から求めた前加工材の耐力

Fig. 5. Effect of pre-plastic strain and strain rate on tensile strength, elongation and hardness of SUS 304 and SUS 305 stainless steels.

Fig. 6. Effect of pre-plastic strain and strain rate on time to fracture of SUS 304 and SUS 305 stainless steels in boiling 35% MgCl_2 solution with the 80% stress level of 0.2% yield strength (applied stress 0.8 Y.S.).

に比較して負荷応力が減少するためであり、一方、真応力の定率初応力試験では前加工度の増加とともに SCC 感受性が増大する。このように、負荷方法によって SCC 感受性の評価も異なる。

Fig. 7 に 35.0 kg/mm^2 定値初応力下での SUS 304, 305 の各前加工材に対する破断時間と前加工度の関係を示す。㊟材および㊤材ともに 5% 前後で SCC 感受性が最大になり、その後前加工度の増加とともに減少する。このように、いずれの負荷方法においても、SCC 感受性におよぼす前加工速度の影響が少ないことがわかる。

そこで、オーステナイトが比較的不安定な SUS 304 について、各前加工材に対する負荷応力と破断時間の関係を Fig. 8 に示す。5% 前加工材が示した挙動の一部

Fig. 7. Effect of pre-plastic strain and strain rate on time to fracture of SUS 304 and SUS 305 stainless steels in boiling 35% MgCl_2 solution with the constant stress level of 35.0 kg/mm^2 (applied stress 35.0 kg/mm^2).

を除くと、総体的に前加工度の増加とともに SCC 感受性が低減されることがわかる。特に Fig. 7 のように 5% 前後で最大の SCC 感受性が現われるのは、焼鈍材の耐力以上の定値初応力試験の場合である。なお実験結果を概観すると、焼鈍材および 5% 前加工材のみ、それぞれの耐力付近に破断曲線の折点が認められる。一方、見かけの限界応力については、㊟材および㊤材ともに前加工度の増加とともに高くなる。さらに SCC 感受性におよぼす前加工速度の影響は、見かけの限界応力付近で現われ、㊤材よりも㊟材の方がわずかに高い見かけの限界応力を示し、その差は前加工度の増加とともに大きくなることをわかる。

3.3 引張前加工材の潜伏期間および伝播期間

㊟材および㊤材の SCC 感受性の差は、見かけの限界応力付近で認められた。しかし、それより高い応力レベルでの定率および定値初応力試験では、SCC 感受性に

Fig. 8. Effect of applied stress and strain rate on time to fracture of annealed and deformed SUS 304 stainless steel in boiling 35% MgCl_2 solution.

Fig. 9. Typical elongation rate-time curves of deformed SUS 305 stainless steel in boiling 35% MgCl_2 solution with applied stress 35.0 kg/mm^2 .

およぼす前加工速度の影響は少ない。そこで㊟材および㊤材のその差が少ないとはいえ、両者の潜伏期間および伝播期間に前加工速度の影響が認められるかどうか検討した一例を SUS 305 について示す。

実験で得られた試験片の伸び-時間曲線より、Fig. 9 に示すような伸び速度-時間曲線を作成した。Fig. 9(a) のように試験片の伸び速度がなめらかに減少し、ある時間経過後、急激な増加とともに破断に至る場合と、Fig. 9(b) のように途中数回の不連続な伸び速度の増加が認められ、その後急激な増加とともに破断に至る場合との 2 種類の形式がある。著者らは、最初に明らかに急激な伸

び速度の増加が認められるまでの期間を潜伏期間、その後破断に至るまでの期間を伝播期間とした。

定率初応力試験 (Fig. 6) および定値初応力試験 (Fig. 7) から得られた潜伏期間および伝播期間と前加工度との関係を Fig. 10, Fig. 11 に示す。いずれの場合においても、㊟材および㊤材の破断時間に対して、低前加工度では伝播期間が支配的であり、高前加工度では潜伏期間が支配的であることがわかる。このように、前加工度の増加とともに潜伏期間と伝播期間とは互いに相反した関係にあることに、著者らは興味をひかれたので後ほど考察する。なおこれらのデータには、かなりのばらつきがあるが、潜伏期間および伝播期間におよぼす前加工速度の影響は少ないように思われる。

4. 考 察

オーステナイト系ステンレス鋼の SCC 感受性におよぼす冷間加工の影響は、非常に複雑である。冷間加工によって合金内部に生じたひずみ、格子欠陥、変態、析出などの金属組織的变化が SCC 感受性に影響をおよぼすが、これは鋼種、加工度、加工方法のみならず腐食環境、負荷応力などの SCC 試験条件などによっても変化する。

著者らは、ひずみ速度が 4 けた以上異なる加工方法で各々低速および高速前加工を与えた SUS 304, 305 について、負荷方法および前加工度の変化とともに SCC 感受性におよぼす前加工速度の影響がどのように現われるかを上述の実験結果で示した。そこで認められるおもな結果を列挙すると、次のようである。

(1) 引張前加工材の耐力、引張強さおよび硬さについては、前加工に引き続いて行なう引張試験速度が同一の場合、低速前加工材に比べて高速前加工材の方が高い値を示す。

(2) 引張前加工材の SCC 感受性は、負荷方法および前加工度によって変化する。特に、前加工速度の SCC 感受性への影響は、オーステナイトが比較的不安定な SUS 304 の見かけの限界応力付近で現われ、高速前加工材に比べて低速前加工材の方が高い値を示す。

(3) 潜伏期間および伝播期間は前加工度によって大きく影響を受け、破断時間に対して低前加工度では伝播期間が支配的であり、高前加工度では潜伏期間が支配的である。

以下、これらの諸点について考察を進める。

4.1 引張前加工速度の影響

4.1.1 機械的性質

前加工材の機械的性質におよぼす前加工速度の影響、特に前述の材料学的要因に着目して、各種材料について

Fig. 10. Effect of pre-plastic strain and strain rate on induction and propagation period of SUS 305 stainless steel in boiling 35% MgCl_2 solution with applied stress 0.8 Y.S. (nominal).

Fig. 11. Effect of pre-plastic strain and strain rate on induction and propagation period of SUS 305 stainless steel in boiling 35% MgCl_2 solution with applied stress 35.0 kg/mm^2 .

すでに検討し報告してきた。たとえば体心立方金属の炭素鋼⁴⁾などでは、ひずみ速度依存性が大きく、⑩材より⑤材の方がより加工硬化している。一方、面心立方金属のステンレス鋼¹⁵⁾、アルミニウム¹⁶⁾、銅¹⁷⁾などではある程度のひずみ速度依存性が認められるが、逆に⑤材より⑩材の方がより加工硬化している。

Fig. 4 および Fig. 5 より、SUS 304, 305 ともに⑤材より⑩材の方が耐力、引張強さおよび硬さに高い値を示し、より加工硬化していることがわかる。このように前加工の際のひずみ速度の大小によって、両者のマルテンサイト変態量や内部の微細構造（転位配列やすべり帯など）に相違が生じ、それが前加工材の機械的性質のみならず SCC 感受性にも影響をおよぼしているものと考えられる。

4.1.2 SCC 感受性

一般に、準安定オーステナイトに M_d 点以下の温度で加工を与えると、 γ から α' へのいわゆるひずみ誘起マルテンサイトを生成することは周知のことであり、これが前加工材の SCC 感受性に大きく影響をおよぼすことは、すでに多くの研究者によって報告されている^{2,4,8-10)}。そこで、前加工速度の大小によってマルテンサイト変態の促進の程度に相違を生じ、その結果 SCC 感受性にも影響をおよぼしているものと推定されるので、次の実験を試みた。

すなわち SUS 304 について、ドライアイスを添加したメチルアルコールの低温度雰囲気中 (-78.5°C) で低速前加工を与えた場合のマルテンサイト変態量および SCC 感受性を調べ、前述の室温で前加工を与えた⑤材および⑩材の挙動と比較して示す。なおマルテンサイト変態量は、X 線ディフラクトメーターを使用して γ (111) 面および α' (110) 面からの回折の積分強度比により定量化した。低温前加工材に対するマルテンサイト変態量と前加工度の関係、負荷応力と破断時間の関係および見かけの限界応力と前加工度の関係をそれぞれ Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14 に示す。

以上の結果から明らかなように、⑩材より⑤材の方がわずかではあるがマルテンサイト変態がより促進され、前加工度の増加とともにこの傾向は大きくなる。特に低温前加工材については、わずかの前加工度からでも著しくマルテンサイト変態量が增大する。このように前加工速度や前加工温度に伴うマルテンサイト変態量の相違が SCC 感受性にも影響をおよぼし、それが促進されるほど SCC 感受性は減少し、特に見かけの限界応力に近づくにつれその傾向は著しい。なお、すでに著者らはオーステナイトの安定度の異なる鋼種を使用して、マルテンサイト変態におよぼす前加工速度の影響と機械的性質の

Fig. 12. Effect of pre-plastic strain, strain rate and deforming temperature on martensite content of SUS 304 stainless steel.

Fig. 13. Effect of applied stress, strain rate and deforming temperature on time to fracture of deformed SUS 304 stainless steel in boiling 35% MgCl_2 solution.

Fig. 14. Effect of pre-plastic strain, strain rate and deforming temperature on threshold stress of SUS 304 stainless steel in boiling 35% MgCl_2 solution.

関係を明らかにした^{18)*4}。このように、③材および④材の SCC 感受性におよぼす前加工速度の影響は、ある程度マルテンサイト変態の難易によって一応説明できる。しかし、マルテンサイトの生成そのものが直接的に③材および④材の SCC 感受性に影響するものか、あるいは単に副次的効果を与えるのか明らかでない。特に、転位配列やすべり帯などにおよぼすひずみ速度の影響についても不明な点があり、オーステナイトの安定度の異なる鋼種を使用してさらに検討する必要がある。

4.2 潜伏期間および伝播期間の影響

SCC の潜伏期間と伝播期間を分離する試みは、電位-時間曲線の測定あるいは伸びの変化の測定などによって多くなされている^{8,20,21)}。しかし、どの時点から伝播期間と見なすかについては、研究者により見解が異なる。

著者らは Fig. 9 のように、試験片の伸び-時間曲線より得られた伸び速度-時間曲線により、最初に明らかに急激な伸び速度の増加が認められる時点で両者を分離した。これは、沸騰 35% MgCl_2 溶液中での焼鈍材の SCC 試験では、潜伏期間に対する伝播期間の占める割合が大きいので²²⁾、単なる伸びの変化からでは両者の区別がむずかしいためである。Bleckmann ら²³⁾は、非常に感度の良い伸び測定方法により、SCC にはまず最初変動のないクリープ段階、次に不連続な割れ成長段階、最後に連続的な割れ成長段階の3段階があることを見い

出し、すべり段階-再不動態化モデルを考えて、真の潜伏期間は常に実験で求めた値より短いことを報告している。Fig. 9(b)に見られる不連続な割れ成長段階は、伸び測定方法の感度にもよるが、いかなる条件のとき、この現象が現われるかについては明らかではない^{*5}。

潜伏期間および伝播期間と前加工度との関係を SUS 305 について調べた一例を Fig. 10, Fig. 11 に示した。いずれの場合においても、前加工度が増加するにつれ割れの発生には長時間かかるが、ひとたび割れが発生すると、伝播は非常に早く進むことを示している。特に低前加工度では、短時間で数個所に割れが発生し伝播するが、高前加工度では大半が単一割れて破断に至る (Fig. 15)。なお割れは、いずれも粒内割れである (Fig. 16)。したがって、たとえ前加工度に対してあまり破断時間に変化がなくても、内容的にはかなり異なっていることがわかる。また、SUS 304 に関しても同様な傾向が認められたが、前加工度の増加とともに見かけの限界応力が高くなり SCC 感受性が減少する原因の1つとして、マルテンサイトの生成によって腐食の局所性が失われ、全面腐食の様相を呈することが考えられる^{6,7,24)}。このことからでも前加工度の増加とともに潜伏期間が支配的になり、割れの発生が少なくなることと関係があるように思われるが、転位配列や材料強度などの面とあわせて今後検討する必要がある。一方、割れ伝播に関しては、前加工度の増加と

Fig. 15. Effect of pre-plastic strain and applied stress on fracture of SUS 305 stainless steel in boiling 35% MgCl_2 solution.

*4 低速より高速前加工時の試験片の発熱が非常に大きいため¹⁹⁾、同一前加工度では④材より③材の方がマルテンサイト変態量が多いが、しかし低速前加工を高速前加工時の発熱と同等な温度雰囲気を買想して調べた場合 (純粋の前加工速度の影響)、③材より④材の方がわずかながらマルテンサイト変態が多い。したがって機械的性質におよぼす前加工速度の影響も、本来オーステナイト系ステンレス鋼では③材より④材の方が加工硬化が大きい、オーステナイトが特に不安定な場合 (たとえば SUS 301) は逆の挙動を示す。詳細は、文献 18) を参照されたい。

*5 明らかに急激な伸び速度の増加が認められる以前に、試験片の同一個所より連続的な単一気泡の発生が観察され、大半がそこから割れることが認められた。

Fig. 16. Transgranular fracture of annealed SUS 305 stainless steel in boiling 35% MgCl_2 solution with applied stress 0.8 Y.S. (nominal).

もに材料の脆化(変形能の減少)の効果を勘案すれば, 妥当な傾向と考えられる。特に材料自体の強さレベルを基準とした, すなわち真応力の定率初応力試験のように, 前加工度の増加とともに破断時間が減少することと, そのとき割れが短時間に伝播するようになるという関係とがよく対応する。この意味では, SCC は材料の変形能に依存することを示唆しているように思われる。

5. 結 言

SUS 304, 305 を供試材として, 沸騰 35% MgCl_2 溶液中で定荷重 SCC 試験を行ない, SCC 感受性におよぼす前加工速度の影響を種々の負荷応力下で検討し, 以下の結果を得た。

(1) 低速前加工材に比較して, 高速前加工材の方が耐力, 引張強さおよび硬さに高い値を示し, より加工硬化している。

(2) オーステナイトが比較的不安定な SUS 304 において, SCC 感受性への前加工速度の影響は見かけの限界応力付近で現われ, 高速前加工材に比べ低速前加工材の方が高い値を示す。これは主として, 前加工速度の大小に伴う α' マルテンサイト変態の促進の程度に起因するためである。

(3) 潜伏期間および伝播期間は前加工度によって大きく影響を受け, 破断時間に対して低前加工度では伝播期間が支配的であり, 高前加工度では潜伏期間が支配的であ

る。

終りに本研究の遂行に当たり, 種々便宜をはかっていただいた日本化薬(株) 姫路工場, 川崎製鉄(株) 西宮工場ならびに(株) 神戸製鋼所中央研究所の関係各位に感謝の意を表する。なおこの実験は, 姫路工業大学学生(当時) 牛尾謙司, 神戸博康両君の協力によるものである。記して感謝の意を表する。

(Received April 12, 1976)

文 献

- 1) J. G. Hines: "Physical Metallurgy of Stress Corrosion Fracture," Ed. by T. N. Rhodin, p. 115, Interscience Publishers (1959).
- 2) J. G. Hines & R. W. Hugill: *ibid.*, p. 193 (1959).
- 3) H. P. Hawkes, F. H. Beck & M. G. Fontana: *Corrosion*, **19**, 247 (1963).
- 4) P. J. Greeley, V. J. Russo, R. K. Saxer & J. R. Myers: *ibid.*, **21**, 327 (1965).
- 5) E. R. Burkart, J. R. Myers & R. K. Saxer: *ibid.*, **22**, 21 (1966).
- 6) 森田 茂: 日本金属学会誌, **25**, 610 (1961).
- 7) 前川立夫, 香川 優, 中島宣雄: 同上, **27**, 548 (1963).
- 8) 渡辺正紀, 向井喜彦, 曾根祥光: 溶接学会誌, **36**, 1015 (1967).
- 9) 木島 茂: 防食技術, **17**, 193 (1968).
- 10) 川端義則, 西沢春雄, 西村 強, 生駒和彦, 松原光治: 鉄と鋼, **61**, 1054 (1975).
- 11) 上出英彦, 菅原英夫: 防食技術, **24**, 411 (1975).
- 12) C. A. Verbraak: *Metal Progress*, **83**, 109 (1963).
- 13) J. L. Remmerswaal: *Sheet Metal Industry*, **39**, 475 (1962).
- 14) 山田 巖, 杉田忠彰, 小寺沢啓司: 材料, **14**, 192 (1965).
- 15) 山田 巖, 小寺沢啓司, 杉田忠彰: 同上, **14**, 813 (1965).
- 16) 山田 巖, 小寺沢啓司: 同上, **15**, 425 (1966).
- 17) 小寺沢啓司, 山田 巖: 同上, **18**, 643 (1969).
- 18) 小寺沢啓司, 内田 仁, 山田 巖: 日本金属学会誌, 投稿中。
- 19) K. Koterazawa & I. Yamada: *17th Proc. Japan Cong. Mat. Res.*, 246 (1974).
- 20) T. P. Hoar & J. G. Hines: *J. Iron Steel Inst.*, **182**, 124 (1956).
- 21) H. Kohl: *Corrosion*, **23**, 39 (1967).
- 22) 小若正倫, 工藤起夫: 日本金属学会誌, **37**, 1320 (1973).
- 23) I. Bleckmann & H. Zitter: *Werkstoff und Korrosion*, **25**, 93 (1974).
- 24) C. Edeleanu: *J. Iron Steel Inst.*, **178**, 140 (1953).