

Research Report of the Research Institute
of Industrial Safety, RIIS-RR-89,1989
UDC 620.194:178.3,669.14.298,539.211:219.2:431

大形構造用低炭素鋼の疲労き裂伝ば挙動 に対する寸法および水環境の影響*

田中正清**

The Influence of Size and Aqueous Environment on Fatigue Crack Growth Behaviours in Large Structural Low-Carbon Steels*

by Masazumi TANAKA**

Abstract; Structural elements in large scale machines and constructions are often used under the condition of low cycle fatigue where heavy loads are slowly repeated, and besides, in the corrosive environment such as in rain and sea water.

In this study, as part of the investigation to clarify their fracture characteristics and ultimately to prevent possible fracture accidents under such conditions, fatigue crack growth experiments have been carried out on large plate specimens of two kinds of low carbon structural steels under low cycle, that is, high stress fatigue conditions. And the effects of width and thickness of specimens and the influences of salt and pure water environments under free corroding condition on crack growth behaviours, the application limit of formula $dl/dN=C(\Delta K)^m$, and the relation of macroscopic crack growth rate dl/dN and microscopic fracture morphology have been examined by means of fracture mechanics and fractography.

Main results obtained are as follows,

(1) The relation between macroscopic crack growth rate dl/dN and stress intensity factor range ΔK is not remarkably affected by specimen sizes: width from 70 to 500mm and thickness from 3 to 28 mm, and can be represented by the following simple formulae;

$$dl/dN = 4.9 \times 10^{-5} \times \Delta K^{2.3} \dots \dots \text{for SB42,}$$

$$\text{and } dl/dN = 3.7 \times 10^{-4} \times \Delta K^{1.9} \dots \dots \text{for HT80}$$

respectively in the wide range of dl/dN up to about $2 \mu\text{m}/\text{c}$. For higher rates, the narrower the specimen width is, the earlier the dl/dN value deviates upwards (to higher side) resulting in the narrower range where these formulae are applicable. Final fracture occurs under the net stress condition influenced by the maximum stress intensity factor K_{max}

(2) Macroscopic fractures of thick plate are of rectangular type both in air and in water for SB42. Those for HT80, however, change from rectangular-shear transition type in air to rectangular type in water, showing remarkable environmental effects.

(3) Aqueous environment under free corroding conditions remarkably accelerates subcritical fatigue crack propagation, regardless of the existence of dissolved oxygen and salt in water. And the lower the load frequency, the larger the acceleration effects.

(4) This acceleration effect relates with the brittle fracture mechanism represented by the brittle striation of SB42 and the quasi-cleavage fracture of HT80.

*日本機械学会論文集 (A編) 48巻428号 395~404ページに掲載した論文に若干の加筆を行ったものである。

**機械研究部 Mechanical Safety Research Division

(5) The width of ductile striations formed dominantly in air practically coincides with the dl/dN value. On the other hand, the width of the brittle striations of SB42 is fairly larger than that of ductile striations and also dl/dN at the corresponding ΔK , increasing with the decrease of load frequency.

(6) Such brittle fracture behaviours in water environment seems to be caused by local embrittlement of crack tip region due to hydrogen cyclically induced by the plastic deformation.

Keywords: Low Cycle Fatigue, Crack Growth, Size Effect, Environmental Effect, Steels, Fracture Mechanics,

1. 緒 言

機械や構造物は繰り返し荷重条件下で使用されることが多く、しかもそれらの部材中には種々の原因で導入された強度上の欠陥が含まれていることが多い。このような部材の寿命を把握しそれらを安全にしかも経済的に設計、製作および使用する条件の決定のためには、速度を中心とする疲労き裂伝ば挙動の主な支配因子を見出すことが必要となる。Parisら¹⁾はそのような因子として破壊力学の主なパラメータである応力拡大係数の変化幅 ΔK を用いた。一般的には疲労き裂伝ば速度 dl/dN は ΔK を用いて次の形で表わされる²⁾

$$dl/dN = C (\Delta K)^m \cdots (1)$$

ここで、 l はき裂長さ、 N は荷重繰返し数、 m および C は材料定数である。しかし、詳細にはき裂伝ば速度は種々の因子の影響を受けるためそれらに対する検討がなされており、例えば応力比やき裂伝ばの上限界条件の影響を考慮した上式に対する修正式も提案されている^{3,4)}。

一方、電子顕微鏡を用いたフラクトグラフィは、破壊事故解析および破壊機構の究明のための有力な手法となっている⁵⁾が、ストライエーション間隔と dl/dN あるいは応力拡大係数との対応が指摘されて以来⁶⁾、破壊機構の定量的解析法として用いられ、式(1)の関係を仲介に、とくに疲労き裂伝ば挙動の解明や寿命予測に力を発揮している。

ところで、じん性の大きな材料を用いる大形構造物は低サイクル(高応力)の繰返し負荷条件下で使用されることが多いが、このような条件でのき裂伝ば挙動の研究^{7,8)}によれば、比較的高い ΔK まで式(1)の関係が成立するとされている。そのような ΔK の上限の決定には、高応力条件下でことにその影響が強くなると予想される応力比や、試験片寸法の効果を考慮に入れた

検討が必要と思われる。しかし、そのような観点からの系統的研究は見当たらない。

また、疲労き裂伝ば挙動に着目した環境効果の研究は歴史が浅く不十分な状態にあり、鋼に限って概観しても、耐食性の高級・高強度の材料に対してはかなり報告されているが、実用上重要と思われる構造用低炭素鋼の高応力条件を対象としたもの^{9,10)}は極めて少ない。

本研究は、最終的には冒頭に述べたように材料を安全に使用する条件の確率を、直接的には破壊事故調査における破面の定性的および定量的評価のための資料を得ることを目標にした一連の実験的研究の一環として実施したものである。前報^{11,12)}では高サイクル領域における疲労き裂伝ば特性に注目して検討したが、本報では上述の状況を考慮し、強度の異なる2種の構造用低炭素鋼の大形試験片について低サイクル(高応力)域の疲労き裂伝ば実験を行い、そのような条件でのき裂伝ば速度に及ぼす板幅および板厚の影響、それと関連しての式(1)の適用限度、き裂伝ばと巨視的および微視的破壊様式の関係、巨視的および微視的き裂伝ば速度の関係、さらにそれらに対しての自由腐食条件下の食塩水および純水環境の効果を、破壊力学的およびフラクトグラフィ的に検討した。

2. 材料および試験片

供試材は市販の厚さ32mmのボイラー用圧延鋼SB42および80キロ級高張力鋼HT80厚板である。一部に厚さ6mmの板材(SB42-T6)を用いた。Table 1および2にそれらの化学成分および機械的性質を示す。この供試材から、圧延方向を荷重軸に一致させFig. 1に示す形状の中央スリット付きの大形試験片を作成した。板幅変更試験の場合、厚さ T は28mmで板幅を70, 110, 160, 240, および500, (HT80のみ)mmとし、板厚変更試験の場合 $W=240$ mmで厚さ

Table 1 Chemical compositions of test materials(wt%)
供試材の化学成分 (重量%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cu	Mo	B
SB42	0.18	0.22	0.72	0.014	0.010	—	—	—	—
SB42(T6)	0.14	0.24	0.70	0.018	0.006	—	—	—	—
HT80	0.11	0.26	0.88	0.008	0.003	0.21	0.71	0.40	0.001

Table 2 Mechanical properties of test materials
供試材の機械的性質

	δ_y MPa	δ_s MPa	δ %	ϕ %	Hv
SB42	238.3	433.5	36	60	125
SB42(T6)	294.2	431.5	32	—	161
HT80	747.3	796.3	22	61	268

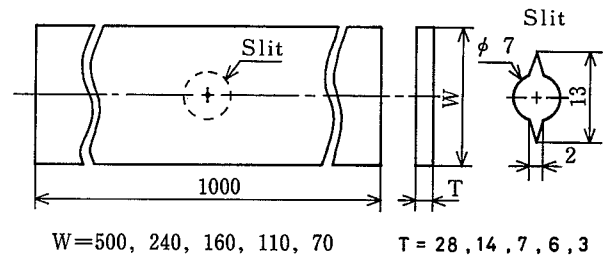
はSB42に対し3, 6 (以上だけT6材), 7, 14および28mm, またはHT80では, 7, 14および28mmとした。水環境試験片はすべて $T=28\text{mm}$, $W=160\text{mm}$ である。 $W=240\text{mm}$ および 500mm の試験片は平行部の長さを板幅の2倍とし, 両端にR部を介して220mm幅のチャック部を設けた。長さは $W=500$ 試験片のみ2mで他はすべて1mである。

3. 実験方法

疲労試験はプログラム制御装置付きの500t万能試験機を用い, 繰返し引張り-引張りの形式で実施した。応力条件は $\sigma=132.4\pm 98.1\text{MPa}$, 応力比 $R=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=0.15$, 繰返し速度は 0.05Hz である。環境試験では一部 0.005Hz についても実験した。板幅・板厚変更試験の環境は実験室空気とくに温度制御はしていない。

研削仕上げした試験片は中央部表面をエメリー紙およびバフで研磨した後, スリット前方に, 0.5mm 間隔のけがき線を入れた。それを基準にして50倍の読取り顕微鏡でき裂半長 $l\text{mm}$ を測定し, それと荷重繰返し数 N サイクルとの記録から $l-N$ 関係曲線を描き, 曲線の傾斜から巨視的き裂伝ば速度 $dl/dN \sigma_m/c$ を求めた。

水環境中での試験では, 表面にカシューを塗布した試験片中央部に容量約2Lの水そうを取りつけ, これに $0.3\text{L}/\text{min}$ の流量で80Lの環境水を循環させ, 自然腐食条件とした。水温は試験部で $25\pm 2^\circ\text{C}$ になるよう

Fig. 1 Configuration of fatigue specimens
疲労試験片の形状および寸法

制御した。水環境は, イオン交換蒸留水 (以下純水) とそれに3%のNaClを溶かした食塩水に, それぞれ空気を吹込んで溶存酸素を飽和させたものと, N_2 ガスを吹込んで溶存酸素を除去したものの合計4種である。試験片は試験開始の前日から終了までこの環境水中に浸した。水そう, 循環系統はすべて塩化ビニールかアクリル製である。き裂伝ば状況は水そう外部から観察した。

破面の観察は主として走査型電子顕微鏡を用いて, 一部は二段レプリカを作成して透過型電子顕微鏡を用いて実施した。微視的破面形態の占める面積率は一箇所 0.6mm^2 を基準とする領域について撮影した連続写真(1000~3000倍)において, 各々の破面形態に含まれる格子数(5mm間隔)から計算した。

4. 実験結果および考察

4.1 巨視的き裂伝ば挙動に対する試験片寸法の影響

SB42の場合, 板表面では, 試験開始とともに中央スリット先端から荷重軸に対し 45° の方向に明確な塑性変形(すべり)帯を生じ, それは荷重繰返しにつれて長さと幅を増しき裂伝ばの初期に全板幅に及ぶ。従って板厚方向のくびれもき裂伝ばの初期から始まり, き裂長さの増大につれて漸次増加して最大17%(T28試験片)~33%(T3試験片)に達する。これに対して

HT80 ではき裂伝ばの後期まで上述のような明確な塑性変形はみられず、最終段階近くになって輪郭の不鮮明な塑性変形を生じる。くびれは最終破断直前に急に発生して最大14% (T28試験片) ~20% (T7試験片) である。

巨視的破面形態は、SB42の場合、T28試験片で板幅が変わっても基本的に違いはなく、き裂伝ばの大部分の過程において荷重軸に垂直な引張り形の平坦面であり、き裂伝ばの最終段階で急速に板表面と45°のせん断形へ移行する [Fig. 2の(a)]。ただし板厚が減少するとともにせん断形への遷移が早まり、最も薄いT3試験片ではスリット先端から3mm 伝ばして完全にせん断形となっている。

これに対してHT80 では板幅の種々異なるT28 試験片およびT7 試験片のいずれの場合とも、き裂伝ば開始とともに引張り形-せん断形遷移が始まり、SB42

に比較して早期に遷移を完了する [Fig. 2の(b)]。しかしいったんせん断形となっても、その後、引張り形の破面や、板幅と荷重軸に対し45°で板面に垂直なせん断破面 (以後板幅方向せん断) が局部的に形成される場合の方が多く、W500およびW110の厚板試験片では数cmにわたる平坦な板幅方向せん断形破面が形成されている。最終静破断面はそのような場合を含め板厚方向せん断が基本で、板幅が小さい場合のみ板幅方向せん断形が生じていた。

Table 3および4にはき裂および破断挙動に関する種々の値を示す。破断繰返し数 N_f は両材とも板幅が広いほど大きい。しかし、き裂長さ l が板幅 W の1/10から1/6 (HT80 では1/4) までの相似区間を伝ばする繰返し数 ΔN および W の1/10 から破断までの繰返し数 ΔN_f みると、板幅の影響は基本的には存在しないと言える。ただしSB42の ΔN_f は板幅の減少とともにわずかだが系統的に増加している。

なお、ビーチマークから判断してき裂フロント形状はわん曲が小さく (板厚の中央と表面とでのき裂長さの差はSB42で0.3~1.2 mm, HT80で0.4~1.5mm程度) ほぼ直線と見なせるので、き裂長さとしては、

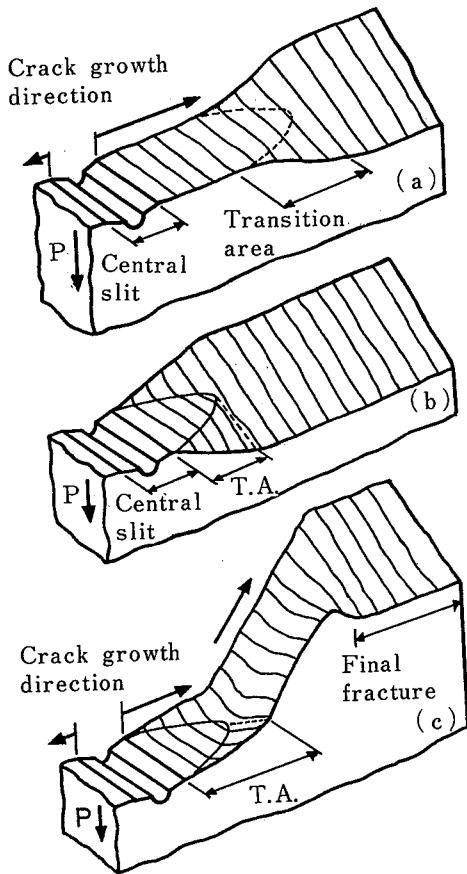


Fig. 2 Effect of water environments on macroscopic features of fractures
材料および環境による巨視的破壊様式の差異

Table 3 Relation between specimen width and conditions of crack growth and final fracture for SB42
き裂伝ばおよび最終破断条件の板幅寸法依存性 (SB42)

mm	N_f c	ΔN c	ΔN_f c	l_f mm	δ_{net}^* MPa	K_{max}^* MPa·m ^{1/2}
240	31179	6680	8579	57.5	442.3	114.6
160	28771	8220	11071	40.7	466.8	98.2
110	22380	8790	12830	29.5	497.2	96.0
70	15708	8100	13008	19.5	520.7	71.2

Table 4 Relation between specimen width and conditions of crack growth and final fracture for SB42
き裂伝ばおよび最終破断条件の板幅寸法依存性 (HT80)

mm	N_f c	ΔN c	ΔN_f c	l_f mm	δ_{net}^* MPa	K_{max}^* MPa·m ^{1/2}
500	173180	33920	39745	178.5	806.1	222.9
240	133920	48310	53060	89.6	910.1	205.0
160	78200	32970	42450	61.0	968.9	161.7
110	76407	34280	44707	43.0	1050.3	150.8
70	34577	24610	29767	27.2	1033.6	120.4

スリットを含む表面き裂を試験片横断面に投影した長さを両表面の左右合計4個につき平均した値を用いている。

Fig. 3は $l-N$ 曲線の傾きから求めたき裂伝ば速度 dl/dN と応力拡大係数の変化幅 ΔK の関係を種々の板幅の試験片について両対数上にプロットしたものである。なお応力拡大係数の計算には次式¹³⁾を使用した。

$$\Delta K = \Delta \sigma \{ \pi l \sec (\pi l / W) \}^{1/2} \dots (2)$$

ここで、 $\Delta \sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$, l はき裂の半長, W は板幅である。せん断破面への移行後も便宜上モード I に対する ΔK を用いている。

Fig. 3からSB42では $dl/dN \approx 0.4 \sim 2.0 \mu\text{m}/\text{c}$, HT80では $dl/dN \approx 0.4 \sim 2.0 \mu\text{m}/\text{c}$ の範囲で共にデータが比較的狭い直線状の帯域に含まれており、 dl/dN と ΔK との間に式(1)の関係が成立する。両材について上記の範囲のデータを代表する直線を最小二乗法で求めると、同式中の定数はSB42に対し $m=2.3$,

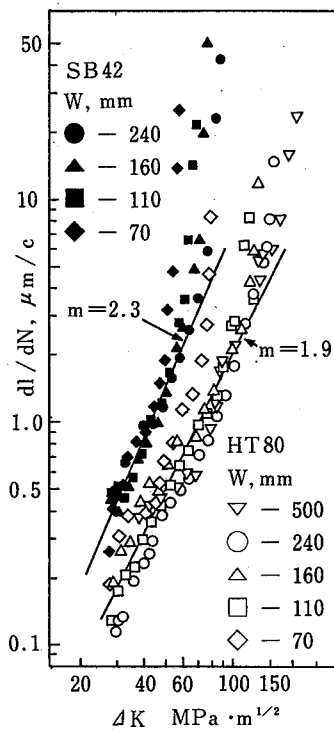


Fig. 3 Effect of plate width on fatigue crack growth rates

疲労き裂伝ば速度への板幅の影響

$C=4.9 \times 10^{-5}$, HT80では $m=1.9$, $C=3.7 \times 10^{-4}$ となる (dl/dN は $\mu\text{m}/\text{c}$, ΔK は $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 単位)。

しかし、これらの dl/dN の範囲を超えた高速度域では、両供試材のいずれの試験片のデータも直線から上側にそって加速されている。その加速傾向は板幅が小さくなるに従って系統的に大きくなっており、このような高速度き裂伝ば域では板幅の異なる試験片のき裂伝ば速度を ΔK によって整理することが不都合なことを示している。

このような状況の生ずる原因としては、き裂先端の塑性域の大きさが、小規模降伏状態として取扱える範囲を超えたことが考えられる。試みに、上述の板幅による差の現れる点の ΔK に対応する最大応力拡大係数 K_{\max} を用いて、平面応力条件での塑性域寸法 R_p を次式¹⁴⁾から求めてみる。

$$R_p = 1 / \pi (K_{\max} / \sigma_y) \dots (3)$$

ここで、 σ_y は降伏応力である。 R_p はSB42で30mm, HT80で12mm程度となる。 K 値のとり方にもよるが R_p はほぼ板厚に匹敵する値となっている。

なお式(1)が成立し、しかも ΔK が式(2)で与えられるならば、相似区間の消費繰返し数 ΔK は、 $m=2$ のとき板幅に存在せず、 $m>2$ の場合は板幅の小さいほど大きく、また $m<2$ の場合その逆となる。本実験では寿命を支配する dl/dN の小さい領域で m が2に近いためにTable 3および4の ΔN に顕著な寸法効果がみられないものと思われる。

ΔK を基準にして比較するとSB42の dl/dN は全体的にHT80のそれより大きく、その差は ΔK が大きいほど顕著である。この材料間での差は、上述の降伏域の議論と関連して、定性的には横堀ら¹⁵⁾の指摘しているように、両供試材の降伏応力がかなり大きく異なるためと思われる。

一方、板幅の増加につれ最終破断時の正味応力 σ_{net}^* はわずかに減少し、その時の最大応力拡大係数 K_{\max}^* は増大している。すなわち、最終破断はこれらのうちのいずれかの単独の因子によってではなく、正味応力と若干応力拡大係数が影響した条件で生じている。本実験条件の範囲では σ_{net}^* は σ_B より大きい。これらのことを、 K_{\max}^* および σ_{net}^* と W との関係としてFig. 4に示す。この図によるとこれらの因子の間には

$$K_{\max}^* = AW^\alpha$$

$$\text{あるいは } \sigma_{\text{net}}^* = BW^\beta \dots (4)$$

の関係が成立している。ここでWは板幅、A、 α 、B
 および β は定数でSB42に対し $A=13.2$ 、 $\alpha=0.39$ 、 B
 $=1030$ 、 $\beta=-0.15$ であり、HT80に対しては $A=31.$
 7 、 $\alpha=0.32$ 、 $B=2670$ 、 $\beta=-0.20$ である。断面収縮
 がなく σ_{net}^* が一定なら $\alpha=0.5$ となる。材料の違いに
 よってAおよびBは大きく変化するが傾き α 、 β は変
 化が小さい。なお、これらの関係の成立する範囲、板
 厚および応力条件の影響、さらに安全の見地からは
 $\sigma_{net}^* < \sigma_B$ となるのかどうかなどの検討は今後の課題
 である。

Fig. 5には板厚を変えた場合の $dl/dN - \Delta K$ 関係を
 示す。SB42の dl/dN は $\Delta K = 62 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ から上側
 では板厚減少につれわずかに加速され、それよりも下
 側の領域では、ばらつきのためもあるが明確ではない
 が、逆の傾向がみられる。しかし全体的には両供試材
 とも本実験範囲での板厚効果はないと言ってよさそ
 うである。このことと、板厚によってせん断破面への遷
 移完了き裂長さが異なることと合わせて考えると、中
 沢らの報告¹⁶⁾と同じく、き裂伝ば速度は巨視的破壊形
 態によって著しく変化しないといえそうである。

4.2 巨視的き裂伝ば挙動に対する水環境の影響

4種の水環境中での巨視的き裂伝ば形態はSB42の
 場合空気中と同じく引張り形であり、違いはわずかに
 平坦度が良好な程度である。しかしHT80の場合は、
 N_2 吹き込み純水中、空気吹き込み食塩水中のいずれの
 場合とも最終破断直前までSB42材以上に平坦度の
 良い引張り形の破面となっており、空気中の典型的な

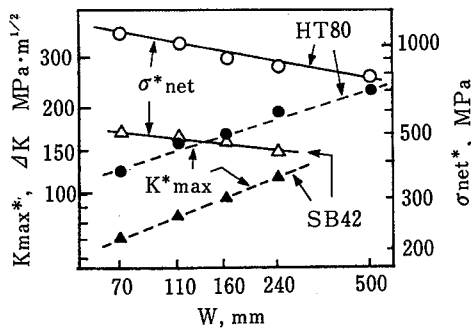


Fig. 4 Dependence of final fracture conditions on plate width for the two steels
 最終破断条件の板幅への依存性

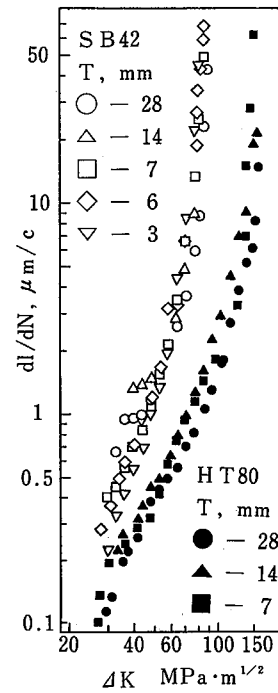


Fig. 5 Effect of plate thickness on crack growth rates
 疲労き裂伝ば速度への板厚の影響

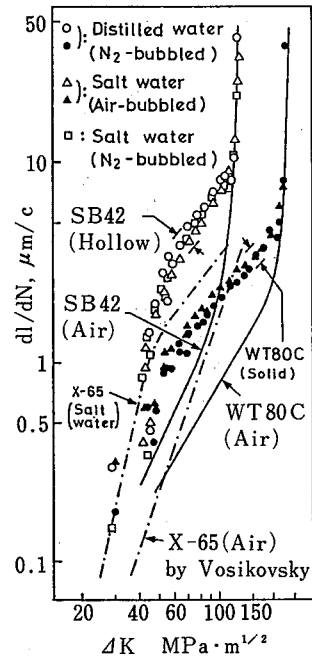


Fig. 6 Crack growth rates in various water environments
 疲労き裂伝ば速度への種々の水環境の影響

引張り-せん断遷移形の破面とは対照的である。

Fig. 6は両供試材のいろいろな水環境中での $dl/dN-\Delta K$ 関係を、空気中の場合と比較したものである。SB80では $\Delta K=26.4\sim 71.3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 、HT80では $\Delta K=18.6\sim 117 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ の広い範囲で空気中に比べ水環境中での dl/dN は大きく加速され、しかも4種の水環境中のデータには差がない。軟鋼の水中における腐食速度および寿命は、溶存酸素濃度が本実験と同程度異なる場合かなりの差を示すが^{17),18)}、上述の結果はこの領域のき裂伝ばに対して溶存酸素は少なくとも顕著な影響を与えないことを示している。また同様に電解質としての食塩の存在も著しく影響を与えないようである。

上述の範囲より上の ΔK 領域は最終破断に近いき裂伝ばの加速領域であり、空気中のデータと同一曲線上に並んでいる。他方 ΔK の小さい側では ΔK の減少につれき裂伝ば速度は急激に低下し空気中のデータに近

づいている。従って $dl/dN-\Delta K$ 曲線は全体にかなり屈曲が多い。

Fig. 6には比較のためX-65ライン・パイプ鋼(0.16% C, $\sigma_y=459 \text{ MPa}$, $\sigma_B=570 \text{ MPa}$) に対するVosikovskyの結果¹¹⁾も併記した。3種の低炭素鋼に対する食塩水の加速効果は同じ速度領域に対してほとんど同じ程度である。従って材料間の差も両環境で同じであり、低 ΔK 領域では小さく、高 ΔK 領域になるほど強度の高い材料のき裂伝ば抵抗が大となっている。なお同じくSB42およびHT80の、き裂伝ば下限界 (ΔK_{th}) を含む低き裂伝ば速度域での水環境効果の実験¹⁹⁾によると、本実験での低速度域に相当する ΔK 条件では水環境による加速効果がみられるが、それは ΔK の減少につれて減少し、ついには逆転して減速効果を示している。これは本実験の低速域での加速効果の減少と定性的に同じである。

Fig. 7は両供試材について、純水中のき裂伝ば速度に対する繰返し速度低下の効果を示す。0.05Hzと0.105Hzのデータを比べると、SB42では $\Delta K=46.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ までは両者にはほとんど差はみられないが $\Delta K=46.5\sim 74.4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ の範囲の高 ΔK 領域では繰返し速度低下によりかなりの加速効果がみられる(最大2倍程度)。HT80の場合もほぼ同様の繰返し速度効果がみられるが、最大加速率が若干大きく(約2.5倍)、また効果の現れる ΔK の範囲が広い。

4.3 フラクトグラフィ

SB42の板幅変更試験片の板厚中央部での微視破面形態は、 $dl/dN-\Delta K$ 曲線の直線部に相当するき裂伝ば速度域では、このような延性材の特徴的ストライエーション形態の形成された比較的大きく平坦なパッチが大部分を占めている。この領域の低速域にはひん度は少ないが、セメントタイト層に沿ってのパーライト粒の割れと思われる特徴的形態が観察された[Photo 1(a)]。ほかにはパッチ間のがけや複雑で無特徴な形態などが形成されているが、これらの微視破面形態はこれまで報告されているもの^{15),16)}と同様である。

$dl/dN=2 \mu\text{m}/\text{c}$ あたりになると、ストライエーションの間隔が増すとともにその溝に沿って割れや枝分かれき裂が増加すると共に、Photo 1(b)に示すように、荷重サイクルに対応すると思われるストライエーションの間に小間隔のストライエーション状形態が形成される場合が多くなり、また荷重サイクルとの対応が不明確なストライエーション状形態や、パーライト

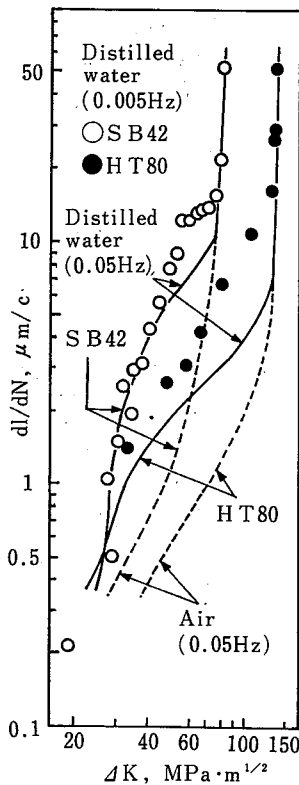
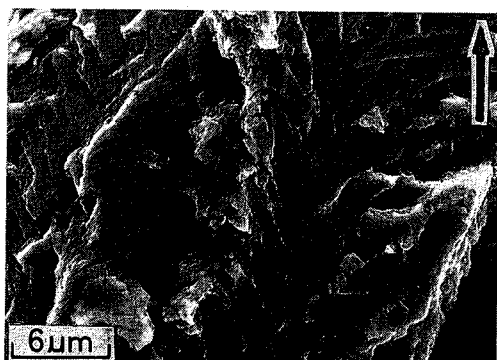
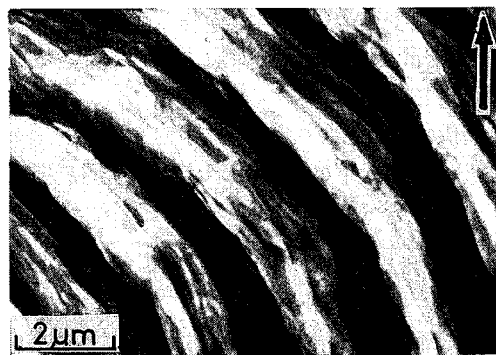


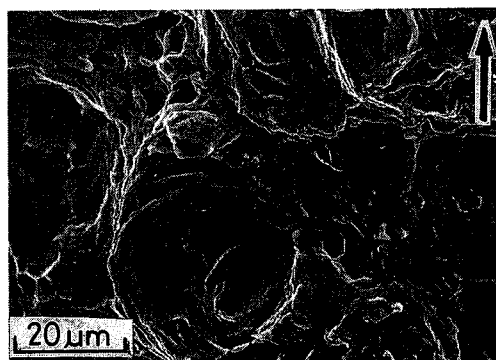
Fig. 7 Effect of load frequency on crack growth rates in pure water
疲労き裂伝ば速度への荷重繰返し速度の影響



(a) Fracture at a pearlite particle
(0.05Hz, $dl/dN = 0.60 \mu\text{m}/\text{c}$)
パーライト部での割れ



(b) Wide striations with fine parallel stripes
(0.05Hz, $dl/dN = 4.7 \mu\text{m}/\text{c}$)
細かい平行縞を伴った間隔
の大きいストライエーション



(c) Vacancy growth type fracture
(0.05Hz, $dl/dN = 25.0 \mu\text{m}/\text{c}$)
空洞成長形の破面形態

Photo 1 Microscopic feature of the fractures of SB42
formed in air (Arrows show crack growth direction)
SB42の空气中破面に観られる微視的破面形態の例
(矢印はき裂伝ば方向)

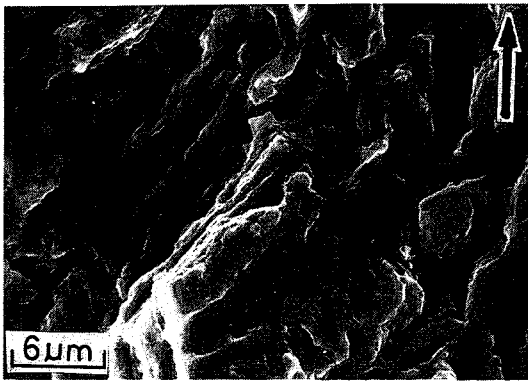
粒内割れ形態も多く観察されるようになる。

さらに速度が増した最終加速領域になると、明瞭なストライエーションの頻度が急に減少し、呼応してパーライトや介在物を起点とし恐らく主き裂に先立って形成されたと思われる大きなわん状形態が形成されるようになる [Photo 1(c)]。これはそれ自体大きなディンプルの形状をしているが、内部に小さいディンプルを含むことも多い。

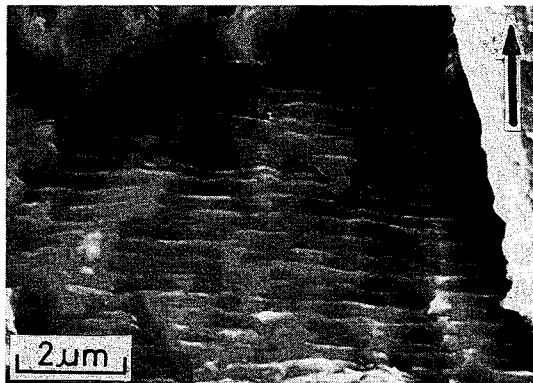
HT80の微視的破面形態、およびそれと dl/dN との関係は基本的にはSB42と同じである。ただし、この材料のストライエーションはSB42に比べて、それらが形成されているパッチが小さく、しかも山の高さが低く扁平で、溝の屈曲が多く、溝に沿っての鋭い割れが多い。これは組織が細かく硬さの大きい焼きもどし材の特徴を示しているものと思われる。低速域 ($< 0.5 \mu\text{m}/\text{c}$) では残留オーステナイト粒内での、非常に微細な組織を単位とするストライエーションやすべり模様のみられないPhoto 2(a)のような複雑な破面が形成されている。Photo 2(b)はこの材料での特徴的なストライエーションの例である。Photo 2(c)は板幅方向せん断破面を巨視的破面に垂直な方向から観察した例である。この種の領域には周期性の良いストライエーションはほとんどみられない。なお最終加速域で形成される大形ディンプル形態はSB42に比べ寸法が小さい。

上述のストライエーションとディンプルの占める破面面積率 (それぞれ r_s, r_d) と ΔK の関係をFig. 8に示す。両供試材での r_s, r_d の変化の状況は同じである。き裂伝ばの最終段階での dl/dN の加速はこのような微視破壊機構の静的破壊様式への遷移と関係していると思われる。ただし、この図で r_s と r_d の交点の位置の ΔK は両供試材で異なっており、両者を dl/dN に対してプロットしてもやはり一致しない。従ってこのような微視破壊様式の遷移は $\Delta K, dl/dN$ のいずれか一つの因子で単純に決まるとは言えないであろう。

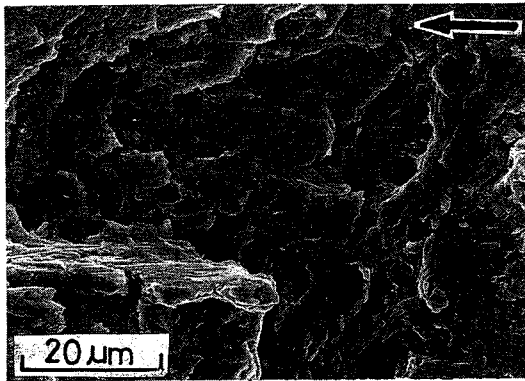
ストライエーション間隔の平均値 S_m を ΔK に対して両対数紙上でプロットするとFig. 9のようになる。 S_m は各パッチ内でのストライエーション間隔の平均値を、1領域あたり20個以上求めてそれを平均したものである。両供試材のデータは共にほぼ直線状に並んでおり次式で表現できる。



(a) Complex feature influenced by fine microstructure (0.05Hz, $dl/dN = 0.60 \mu m/c$)
細かい組織に影響された複雑な破面形態



(b) Representative ductile striations (0.05Hz, $dl/dN = 0.43 \mu m/c$)
代表的な延性ストライエーション



(c) Microscopic feature of Mode-II shear fracture (0.05Hz, $dl/dN = 3.4 \mu m/c$)
板幅方向せん断破面の微視的形態

Photo 2 Microscopic feature of the fractures of HT80 formed in air (Arrows show crack growth direction)
HT80の空气中破面に観られる微視的破面形態の例 (矢印はき裂伝ば方向)

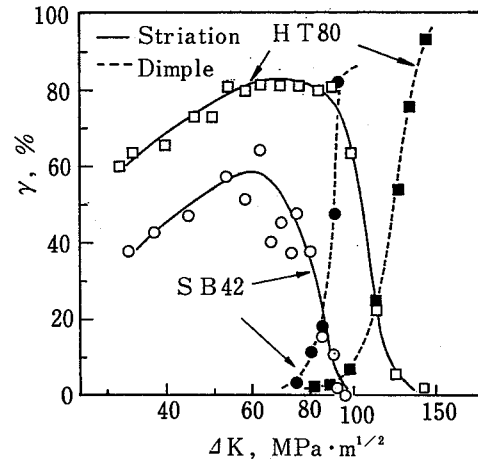


Fig. 8 Relations between ΔK condition and the areal rates of striations and dimples
延性ストライエーションおよびディンプルの破面率と応力拡大条件との関係

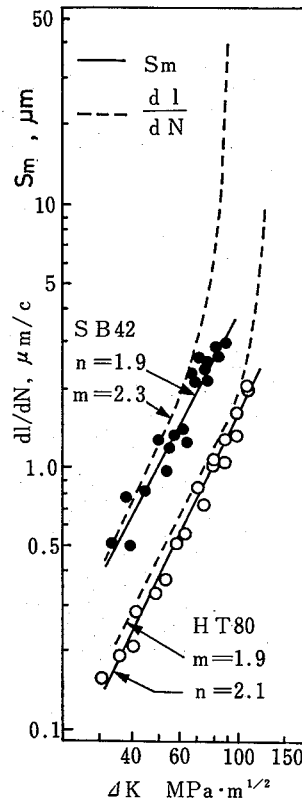
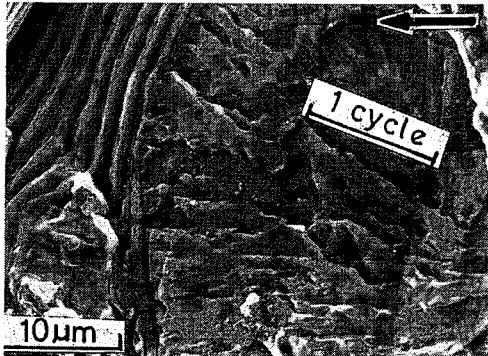
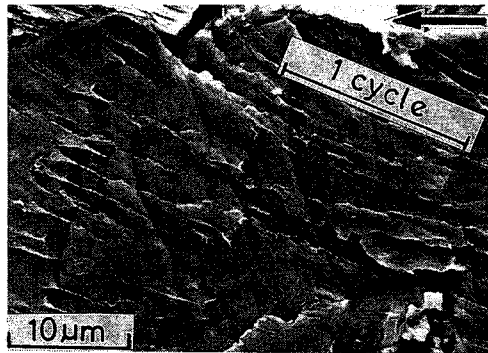


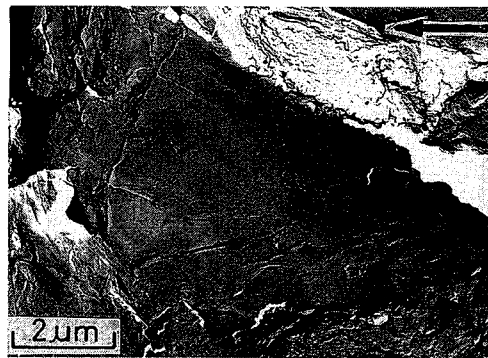
Fig. 9 Relations between striation width and dl/dN
ストライエーション間隔と応力拡大係数との関係



(a) Wide brittle striations
(SB42, 0.005Hz, $dl/dN = 13.1 \mu\text{m}/\text{c}$)
間隔の大きなぜい性ストライエーションの例



(b) Slip lines crossing brittle striations
(SB42, 0.05Hz, $dl/dN = 4.6 \mu\text{m}/\text{c}$)
ぜい性ストライエーションと交差したすべり線



(c) Fan-like microfracture
(HT80, 0.05Hz, $dl/dN = 0.92 \mu\text{m}/\text{c}$)
扇状の微視的破面形態

Photo 3 Microscopic feature of the fractures formed in water environment
(Arrows show crack growth direction)
純水環境中でのき裂成長加速域の微視的破面形態の例

$$S_m = A (\Delta K)^n \dots (5)$$

ここでAおよびnは定数である。nはSB42で1.9, HT80に対し2.1であって他の報告^{12),15)}と同じくほぼ2に等しい。 dl/dN と S_m を比べると, dl/dN の直線部に相当する領域では両者は,両供試材とも,わずかに dl/dN が大きい程度ではほぼ一致している。 dl/dN の加速された領域では両者の差が大きくなる傾向が見られるが,このあたりになると S_m に上限値(SB42で3 μm , HT80で2 μm 程度)が存在するようである。

水環境中での微視破面は,材料によって異なるが,空気中のそれとは明らかに相違する特徴的な形態を示す。しかし4種の水環境間での差は実際上みられない。SB42の場合,空気中で延性ストライエーションが形成される ΔK 領域でPhoto 3(a)および(b)のようなぜい性ストライエーションが形成される。これらは結晶粒規模の平たんなファセット上に形成され,放射状のリバー模様と直交した円弧状のものが多く,Photo 3(b)の形態はかなり延性的性格を有し,擬ぜい性ストライエーションと呼んだ方が妥当であろう。わずかであるが延性ストライエーションも観察された[Photo 3(a)の左側]。これらの形態および高速域で支配的なディンプルの占める面積率と ΔK の関係をFig.10に示す。Fig. 8と比べるとぜい性ストライエーションは空気中での延性ストライエーションにとって代ったこと

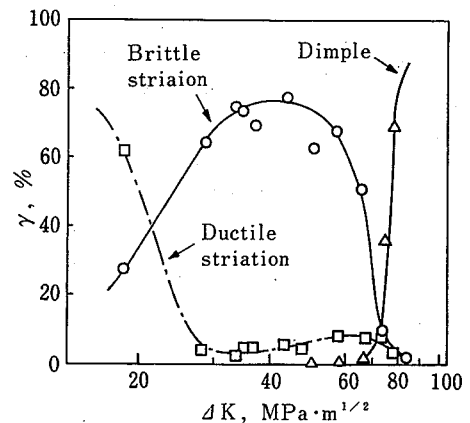


Fig. 10 Relations between ΔK and the areal rates of microfractures in pure water
純水環境中での微視的破面率と応力拡大条件との関係

が分かる。

上記のぜい性および延性ストライエーション間隔の平均値 (S_b および S_d) を ΔK に対してプロットすると Fig.11 のようになる。同図には空気中のストライエーション間隔 S_m および dl/dN も示した。 S_b は全体的に dl/dN より大きい(最大約3倍)。ところが S_d は dl/dN の加速された領域においても S_m の直線とほとんど同じであり、 dl/dN よりはるかに小さい。これと Fig. 10に示した面積率の変化とを考え合わせると、水中の dl/dN は主として急速なぜい性ストライエーション形成機構とそれを抑制しようとする延性ストライエーション形成機構とのかね合いで、両者の中間の値をとったものと思われる。なお、 S_b の値は $10\mu\text{m}$ 程度まで増大してからは ΔK が増加してもほぼ一定となっている。

HT80の水環境中での破面はSB42の場合とは異なり、空気中でのストライエーションに代って、Photo 2(a)に示したと類似の形態が支配的となる。その分布と dl/dN の水環境による加速域とは対応している。

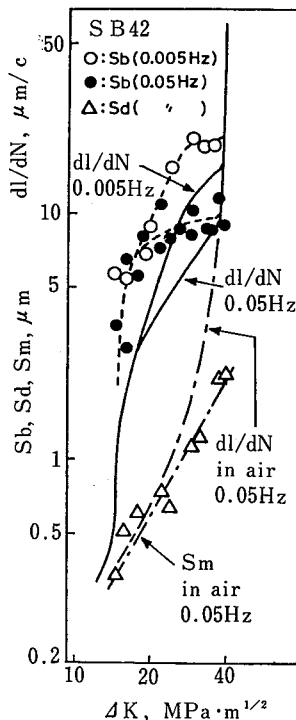


Fig. 11 Influence of load frequency on the widths of ductile and brittle striation
延性およびぜい性ストライエーション間隔に対する荷重繰返し速度の影響

この場合、その複雑な破面の非常に小さいファセットに不鮮明ながらリバー模様がみられることが多く [Photo 3(a)], へき開ないしは擬へき開破壊機構が重要な役割を果たしている。水中での巨視的破面の引張り形への変化はこのぜい性的微視破壊機構と強い関連を有すると思われる。はっきりしたぜい性ストライエーションは確認されなかった。

水中で繰返し速度を低下させた場合の微視破面形態は定性的には両供試材とも変化がない。しかしSB42のぜい性ストライエーション間隔 S_b は dl/dN の増大に対応してかなり大きくなる [Fig. 11]。

上述の両供試材における水中の高 ΔK 条件でのぜい性的破壊機構は、溶存酸素と食塩の影響は受けないが繰返し速度依存性を有すること、破面がへき開ないしは擬へき開様相を示すこと、HT80相当の鋼が水素ガス中で同様の加速効果を示すこと²⁰⁾などから判断して、き裂先端の局部での水素ぜい化が主要な役割を果たしているものと推定される。

5. 結 論

軟鋼 SB42 および高張力鋼 HT80 の大形試験片について繰返し引張り疲労試験を実施し、高速域の疲労き裂伝ば挙動に対する寸法および水環境の影響を検討し、以下の結論を得た。

(1) 両供試材の巨視的疲労き裂伝ば速度 dl/dN は、板幅を70~500mm, 板厚を3~28mmの範囲で変えても、 $dl/dN = 2 \sim 3 \mu\text{mm}/\text{c}$ まではモード I の応力拡大係数変化幅 ΔK によって次式で表示できる。SB42 に対して:

$$dl/dN = 4.9 \times 10^{-5} \times \Delta K^{2.3}$$

HT80 に対して:

$$dl/dN = 3.7 \times 10^{-4} \times \Delta K^{1.9}$$

それより高速域では板幅が狭いほど急速に高速側にそって上式の適用が困難となる。最終破断は正味応力に応力拡大係数が影響した条件で生じる。

(2) 厚板の巨視的破面状態はSB42では空気中、水中とも引張り形であるが、HT80は空気中の引張り—せん断遷移形から、水中での引張り形へと顕著な環境効果を示す。

(3) 自然腐食条件下の水環境は、溶存酸素および食塩の有無に無関係に両供試材の高速域の dl/dN を増加させる。その効果は0.05Hzから0.005Hzへの繰返し

速度の低下によってさらに大きくなる。

(4) この水中での dl/dN の加速効果は、SB42のぜい性ストライエーション、HT80のへき開的粒内破面形態で代表される微視的ぜい性破壊機構によるものと推定される。

(5) 空気中の延性ストライエーション間隔の平均値は両材とも dl/dN とほぼ一致するが、水中でのSB42のぜい性ストライエーション間隔は延性ストライエーション間隔および dl/dN よりかなり大きく、0.05Hzから0.005Hzへの繰返し速度低下につれてさらに大きくなる。

(6) 水中での上記のようなぜい性破壊機構は、繰返し塑性変形によってき裂先端局部に侵入した水素によるものと思われる。

(平成2年3月31日 受理)

参考文献

- 1) Paris, P. C. and Erdogan, F., *Trans. ASME*, Ser. D, 85-4(1963), 528.
- 2) 北川, 機誌, 75-642 (昭 47), 1068.
- 3) Forman, R. G., ほか 2 名, *Trans. ASME*, Ser. D, 89-3(1967), 459.
- 4) 石田・ほか 4 名, 機構論, No.213 (昭 44-10), 89
- 5) 小寺沢, 機誌, 76-658 (昭 48), 1152.
- 6) Forsyth, P. J. E. and Ryder, P. A., *Aircr. Eng.*, 32-374(1960), 96.
- 7) 横堀・ほか 3 名, 機構論, No.203 (昭 44-4), 161.
- 8) Kondo, T., ほか 3 名, *Proc. Int. Conf. Mech. Beh. Mat.*, Kyoto,(1972), 319.
- 9) Bristoll, P. and Opdam, J. J. G., *Oceanology Int.*75,10(1975), 3.
- 10) Vosikovsky, O., *Trans. ASME*, Ser. H, 97-4(1975), 293.
- 11) 田中, 材料強度誌, 15-1 (昭 55), 11.
- 12) 橋内・田中 ほか 2 名, 機論, 42-364 (昭 51), 3669.
- 13) Feddersen, C. E., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 410(1967), 77.
- 14) たとえば, 横堀, 岩波全書・材料強度学 (第 2 版), (昭 49), 104, 岩波書店.
- 15) 横堀・ほか 3 名, 第15回材料強度と破壊国内総合シンポジウム論文集, (昭 45), 39.
- 16) 中沢・ほか 4 名, 機論, 40-338 (昭 49), 2712.
- 17) Uhlig, H., ほか 2 名, *J. Electrochem. Soc.*, 102-59(1968), 449.
- 18) Duquette, D. and Uhlig H., *Trans. ASM*, 61(1968),449.
- 19) 田中, 機構論, No. 804-2 (昭 55-3), 55.
- 20) Clark, W. G., Jr., *Conf. on Hydrogen in Metals, Seven Springs Conf, Centr, Champton*,(1973-9)