マルテンサイト系ステンレス鋼の衝撃疲労特性および単一衝撃
荷重下の応力-ひずみ特性と衝撃疲労き裂進展特性との関係*田 中 道 七^{*1}, 木 下 賢 一 朗^{*2}, 中 山 英 明^{*3}Impact Fatigue Characteristic of Martensitic Stainless Steel and the
Relationship between the Impactive Fatigue Crack Growth Behavior
and the Dynamic Stress-Strain Response of Material

Tsuneshichi TANAKA, Ken-ichiroh KINOSHITA and Hideaki NAKAYAMA

It has already been indicated, as a general trend in impact fatigue, that the impact fatigue strength is lower than the ordinary fatigue strength, and that the crack growth rate under impact fatigue is higher than that under non-impact fatigue, excepting a few materials with relatively high static strength. The first aim of this study is to clarify the impact fatigue behaviors of high-strength alloy steels with the ultimate tensile strength of about 1 800 MPa, and the second is to evaluate the crack growth behavior under impact fatigue load in connection with the dynamic stress-strain response. For these purposes, a series of impact fatigue tests were first carried out on martensitic stainless steel, and then single impact tests were performed to obtain dynamic stress-strain relationships of the martensitic stainless steel and the other three steels whose crack growth behavior in impact fatigue were already obtained by the authors. The S-N property of the martensitic stainless steels is similar to the other steels but the fatigue crack growth rate under impact fatigue load is equivalent to that under ordinary fatigue load. An interesting finding is that the crack growth behavior of each material under impact fatigue load is well correlated with the dynamic stress-strain response of that material.

Key Words: Fatigue, Impact Strength, Crack Propagation, Impact Fatigue, Martensitic Stainless Steel, Dynamic Stress-strain Response, Single Impact Tests

1. 結 言

著者らは、高繰返し数範囲における金属材料の衝撃疲労特性を体系的に評価することを目的としてホプキンソン棒方式を原理とする油圧・ばね式高速衝撃疲労試験機を開発し、これにより2種類の炭素鋼(S 35 C, S 45 C)を用いて繰返し数が 10^7 回に至る高サイクル範囲で疲労試験を行い、正弦波荷重下での結果との比較により、高繰返し数側において衝撃荷重下での疲労強度低下が顕著なことを報告してきた⁽¹⁾。また、0.1% C低炭素鋼(S 10 C)を用いた、く形波状衝撃応力波形下で負荷時間を変えた疲労試験を行い、上述した衝撃荷重下での疲労強度の低下傾向とともに、高サイクル領域でのS-N特性は明確な負荷時間依存性を示し、負荷時間が大きくなるほど疲労強度が低下することを報告した⁽²⁾。このような衝撃荷重下でのS-N特性は、著者らがこれまでに報告してきた振動モータ式衝撃試験機による両振り衝撃荷重下での実験結果(S 10 C⁽³⁾, S 20 C⁽⁴⁾, S 50 C⁽⁵⁾, SCM 440⁽⁶⁾, 純アルミニウム⁽⁷⁾, ア

ルミニウム合金⁽⁷⁾)および秋園らの回転円盤式衝撃試験機による応力比 R が約-0.3の部分片振り引張荷重下での結果(S 20 C⁽⁸⁾)と一致している。

一方、著者らは衝撃疲労強度特性に関する研究と並行して衝撃荷重下での疲労き裂進展特性についても調べてきたが、衝撃荷重下での疲労き裂進展速度は正弦波荷重下に比べて高くなるのがS 10 C⁽⁹⁾, アルミニウム合金⁽⁹⁾, オーステナイト系ステンレス鋼(SUS 316)⁽¹⁰⁾について観察された。このような傾向は井口ら(S 20 C⁽¹¹⁾), 村上ら(アルミニウム合金⁽¹²⁾, SCM 435⁽¹³⁾, 各種ステンレス鋼⁽¹⁴⁾)によっても観察されているが、著者らの行った高張力鋼(HT-60)⁽¹⁰⁾および村上らの行った引張強さが1 700, 1 950 MPaの2種類のS 50 C⁽¹⁵⁾および引張強さが約1 600 MPaのSCM 435⁽¹⁶⁾については観察されていない。また、前報で報告したS 10 Cを用いた三角波状衝撃波形においては上述したようなき裂進展速度の増加が観察されていないが、く形波状衝撃応力波形ではき裂進展速度の増加が観察されている⁽²⁾。このため、衝撃荷重下でのき裂進展特性の現れ方は材料の降伏強度⁽¹⁰⁾, 応力波形⁽²⁾およびひずみ速度の影響等に関連していることが考えられる。

ところで、著者らの一連の疲労強度試験および疲労

* 原稿受付 平成2年3月5日。

^{*1} 正員、立命館大学理工学部(〒603 京都市北区等持院北町56-1)。^{*2} 正員、立命館大学大学院。^{*3} 正員、大阪産業大学短大部(〒574 大東市中垣内3-1-1)。

き裂進展試験で用いた材料の引張強さをみると、いずれも 1 000 MPa 以下であり、他の研究者も含めて引張強さが 1 000 MPa 以上の材料については、金山ら⁽¹⁷⁾、Yan らによる⁽¹⁸⁾ S 45 C を用いた疲労強度試験、村上らの S 50 C⁽¹⁵⁾、SCM 435⁽¹³⁾⁽¹⁶⁾ を用いたき裂進展試験以外は見当たらない。

したがって、本研究においては上述の引張強度レベルと衝撃疲労特性との関連性をさらに明確にすることを第一の目的として、引張強さが 1 600~1 900 MPa と高く、実用上重要である高強度マルテンサイト系ステンレス鋼の衝撃荷重下での疲労強度、および下限値を含む全体的な疲労き裂進展挙動を正弦波荷重下での結果と比較しながら調べた。なお、この材料について疲労試験を行う今一つの理由としては、近年、汎用圧縮機の弁材として用いられ、衝撃疲労による破壊が問題となっていることにもよる⁽¹⁹⁾。実験の結果、高強度マルテンサイト系ステンレス鋼の衝撃荷重下での疲労強度は正弦波荷重下に比べて低いが、き裂進展挙動については正弦波荷重下と差異がなかった。

次に、本研究の第二の目的は前述したような衝撃疲労き裂進展特性を単一衝撃荷重下における動的応答性との関連で調べることにある。このため、ホプキンソン棒方式の単一衝撃引張試験機を用いて、これまでに報告した 3 種類の金属材料 (S 10 C⁽²⁾、HT-60⁽¹⁰⁾、SUS 316⁽¹⁰⁾) と高強度マルテンサイト系ステンレス鋼について動的な場合の応力-ひずみ特性を調べた。主な実験結果として、静荷重下と単一衝撃荷重下での応力-ひずみ特性において顕著な差がみられた材料においては衝撃荷重下での疲労き裂進展速度は正弦波荷重下でのそれを上回ることが認められ、単一衝撃荷重下の応力-ひずみ特性と衝撃疲労き裂進展特性とは密接な関連性があることが明らかになった。

表 1 マルテンサイト系ステンレス鋼の化学成分

Material	Chemical composition (%)				
	C	Si	Mn	Cr	Mo
GIN6	0.37	0.40	0.35	13.5	1.2
UHB716	0.35	0.40	0.45	13.5	1.0

表 2 マルテンサイト系ステンレス鋼の静的強度

Material	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation δ (%)	Experimental data
GIN6	1840	5	S-N
UHB716	1817	5	da/dN - ΔK

2. マルテンサイト系ステンレス鋼の衝撃疲労特性

2.1 実験材料、実験装置および実験方法 本実験で用いた材料は 2 種類の高強度マルテンサイト系ステンレス鋼 (GIN 6, UHB 716) の調質材であり、それらの化学成分と静的強度を表 1 および表 2 に示す。両材料の化学成分にはほとんど差がないが、静的強度は GIN 6 のほうが UHB 716 を多少上回っている。

図 1 に、疲労試験で用いた試験片の形状および寸法を示す。図 1(a)、(b) はそれぞれ疲労強度試験および疲労き裂進展試験に用いたものであり、前者には GIN 6 を、後者には UHB 716 を用いた。試験片は所定の形状、寸法に加工したのち、表面をエメリーペーパー #2000 まで研磨し、図 1(a) についてはエッジをバフ研磨仕上げ、図 1(b) については電解研磨仕上げとした。

衝撃疲労強度試験は油圧・ばね式高速衝撃疲労試験機を用いて、20 Hz の荷重繰返し速度で行い⁽²⁾、疲労き裂進展試験はクランクスライダ式衝撃試験機⁽²⁾により応力範囲一定、実験繰返し速度 12 Hz の条件下で行った。さらに、疲労き裂進展の下限界値 K_{I0} を求めるため、以下の手順に従い ΔK 漸減試験を行った。すなわち、き裂長さが 0.1 mm 進展するごとに荷重を前段階の K 値に対して 10 % 以下の範囲で漸減させ⁽²⁰⁾、き裂進展速度 da/dN (mm/cycle) が 10^{-7} を下回るとき

(a) 疲労強度試験用 (GIN 6)

(b) 疲労き裂進展試験用 (UHB 716)

図 1 マルテンサイト系ステンレス鋼の試験片の形状、寸法

の ΔK の値を下限界値とした。なお、この際の荷重繰返し速度は 12~8 Hz の範囲とした。

正弦波荷重下での疲労試験および疲労き裂進展試験は容量 30 kN の電気油圧式サーボ試験機を用い、応力比 $R=0$ 、繰返し速度 30 Hz の条件下で行い⁽²⁾、 ΔK 漸減試験の条件は上と同様とした。

2.2 マルテンサイト系ステンレス鋼の衝撃疲労特性 上述のマルテンサイト系ステンレス鋼の衝撃荷重下での疲労強度試験と疲労き裂進展試験および ΔK 漸減試験における応力波形をそれぞれ図 2 および図 3 に、それぞれの実験結果を図 4 および図 5 に示す。なお、図 4 中の実線および破線はそれぞれ正弦波荷重下および衝撃荷重下の実験点を通るように引いたものであり、図 5 においては正弦波荷重下の結果を実線のみで示した。また、応力拡大係数の算出には Tada の式を用いた⁽²⁴⁾。

まず図 4 より、マルテンサイト系ステンレス鋼 (GIN 6) の衝撃荷重下の S-N 特性は $N_f < 10^5$ の範囲では正弦波荷重下のそれと変わらないが、 $N_f > 10^5$ 回になると正弦波荷重下よりも低くなり、1 章で述べた衝撃荷重下での一般的 S-N 特性と一致している。

一方、図 5 より衝撃荷重下の疲労き裂進展挙動 (UHB 716) は正弦波荷重下のそれと差がなく、以前に報告した引張強さが 600 MPa 級の高張力鋼 (HT-60) と傾向が類似している⁽¹⁰⁾。さらに、このような傾向は村上らが報告した 1700 および 1950 MPa の引張強さをもつ 2 種類の S 50 C の衝撃荷重下 (応力比 $R=-0.55$) でのき裂進展挙動⁽¹⁵⁾ および約 1600 MPa の引張強さをもつ SCM 435 の衝撃荷重下 (応力比 $R=-0.4$) でのき裂進展速度⁽¹⁶⁾ についても認められている。また、図 5 にみるように、下限界領域でのき裂進展挙動についても両荷重下で明確な差が観察されない。

図 2 疲労強度試験での応力波形 (GIN 6)

図 3 疲労き裂進展試験および ΔK 漸減試験での応力波形 (UHB 716)

以上より、引張強さが高い材料については衝撃荷重下でのき裂進展速度と正弦波荷重下のそれとの差が現れ難いことが明らかになったが、マルテンサイト系ステンレス鋼の衝撃荷重下での疲労強度が $N_f < 10^5$ の範囲では正弦波荷重下のそれと変わらず、 $N_f > 10^5$ 回になると正弦波荷重下よりも低下する現象は両荷重下におけるき裂発生寿命の差によると考えられる。しかし、この点を含めた衝撃荷重下でのき裂発生機構については今後の課題である。

3. 単一衝撃荷重下の応力-ひずみ特性と衝撃疲労き裂進展特性との関係

種々の金属材料を用いた単一衝撃荷重下の応力-ひずみ関係の諸特性については茶谷⁽²¹⁾⁽²²⁾、河田⁽²³⁾らが報告しているが、本章では単一衝撃荷重下の応力-ひずみ特性と衝撃疲労き裂進展特性との関連性を 1 章で述べた 3 種類の金属材料 (S 10 C, SUS 316, HT-60) の場合および 2 章で扱ったマルテンサイト系ステンレス鋼の場合について述べることにする。

図 4 衝撃 S-N 特性 (GIN 6)

図 5 da/dN - ΔK 関係 (UHB 716)

表 3 疲労試験で用いた材料, 熱処理条件, 静的強度および試験片形状

Material	Condition of heat treatment	Yield stress $\sigma_{ys}(\sigma_{0.2})$ (MPa)	Tensile strength σ_b (MPa)	Elongation δ (%)	Experimental data	Specimen type	Reference
SiOC	1050° C.3hr,P.C.	178	314	52	da/dN- ΔK	CCT	(2)
SiUSi8	1050° C.1hr,W.C.	(255)	580	71	da/dN- ΔK	CCT	(10)
HT-80	As supplied	481	587	27	da/dN- ΔK	CCT	(10)

表 4 単一衝撃試験で用いた材料、熱処理条件、静的強度および試験片寸法

Material	Condition of heat treatment	Yield stress σ _y (σ _{0.2}) (MPa)	Tensile strength σ _t (MPa)	Elongation δ (%)	Specimen size W×T(mm ²)
SiOC	900° C.lhr.F.C.	235	335	38	1.8×0.85
SUS316	1050° C.lhr.W.C.	(258)	588	72	1.8×0.85
HT-60	As supplied	(453)	574	32	1.7×0.8
GIN8	Supplied after Q&T	(1540)	1718	5	0.8×0.8

図 6 単一衝撃試験での試験片の形状、寸法

図 7 単一衝撃引張試験装置の構造

3-1 実験材料, 実験装置および実験方法 単一

衝撃試験で用いた材料は上で述べたように既に疲労き裂進展特性が求められている材料, すなわち, 0.1% C 低炭素鋼 (S10C), オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS 316), 高張力鋼 (HT-60) および今回のき裂進展試験で用いた UHB 716 と同種の高強度マルテンサイト系ステンレス鋼 (GIN 6) の4種類である。

まず、表3に著者らが以前に衝撃疲労き裂進展特性を調べた際に用いた材料の熱処理条件、静的強度、試験片形状をまとめて再掲している。なお、表3に示す降伏応力において0.2%耐力は括弧を付けて示しており、以下の表においても同様とした。

次いで、表4にマルテンサイト系ステンレス鋼を含めて今回の単一衝撃試験で用いた材料の熱処理条件、静的強度および試験片寸法を、図6に試験片の形状および寸法を示す。なお、図6中の W と T の値が表4に示してある。試験片の表面および側面はエメリーペーパー(#1200)仕上げとした。なお、GIN 6は2章の疲労試験で用いたものとは供給時が相違するため、静的強度は表2とわずかに異なる。

次に、図 7 に使用した単一衝撃引張試験装置の構造

を示す。なお、この装置は 2 章の衝撃疲労試験に用いた油圧・ばね式高速衝撃疲労試験機を改造したものである。図のように全長 10 mm の試験片を挟んで両側に直径 20 mm の長さの等しい鋼棒を置き、左側を入力棒、右側を出力棒としている。出力棒の右端はベッドに固定した L 形アングルとナットにより固定して、固定端とし、入力棒にはその外周に直径 40 mm、肉厚 4 mm、長さ 900 mm の衝撃円筒を置いて、これを打撃棒としている。一方、試験片は入力棒および出力棒にゴムシートを介してねじ込まれたチャックに取付けられ、試験片を含めたチャックの断面積は両棒の断面積にほぼ等しく作ってある。なお、試験片への衝撃負荷は入力棒側に設けられたフランジから 100 mm 離れた位置より打撃棒を手動によりベアリング上でスライドさせ、フランジに衝突させることによって加え、打撃棒の衝撃速度はフランジより右側の 2 箇所に置かれた光センサにより検出した。

応力-ひずみ関係を得るための詳細は、茶谷の解説⁽²¹⁾に詳しいので割愛するが、応力とひずみを得るためのゲージの位置を図7中に示した。なお、出力棒側ではひずみ感度を良好にするために半導体ひずみゲ-

ジを用いた。

実験により検出されたひずみは直流アンプ、デジタルメモリスコープを介してパーソナルコンピュータに転送され、自動的に応力-ひずみ関係が描かれる。また、本実験での理論的な衝撃負荷時間 T は衝撃円筒（打撃棒）の長さに対応して $T=350\mu\text{s}$ であり、ここで行った測定法で応力-ひずみ関係を解析する場合はその時間内の変形挙動を求めた。

一方、静的応力-ひずみ関係を検出するための引張試験は TCM 10000 型万能引張圧縮試験機を用いて、クロスヘッドの移動速度が 0.5 mm/min の条件下で行った。

3・2 単一衝撃荷重下の応力-ひずみ特性 図 8(a)~(d) は 3・1 節で述べた方法に従って得られた単一衝撃荷重下の応力-ひずみ特性を静的な場合の応力-ひずみ特性と比較して示したものである。ここで、単一衝撃試験により得られる応力-ひずみ特性において、時間の経過に伴い応力こう配が緩やかとなるが、この原因としては初期の応力波の立上りのわずかな遅れのほか、試験片内で無数に繰返し反射した応力波がステップ状に鋼棒に入射するためと考えられる。この

ため図 8 より得られる単一衝撃試験での降伏応力として便宜的に 0.2% 耐力を用い、図 8 中に σ_{ysi} として示した。また、図 8 において静的応力-ひずみ特性の降伏応力もしくは 0.2% 耐力は σ_{ys} として示した。

表 5 に単一衝撃試験で得られた降伏強度、静的降伏強度との比、ひずみ速度および衝撃円筒の衝撃フランジへの衝突速度を示しておく。

さて、図 8(a), (b) より 0.1% C 低炭素鋼 (S 10 C) およびオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS 316) の応力-ひずみ特性は単一衝撃試験と静的試験とで顕著な差を示す。すなわち、表 5 より両引張試験での降伏強度の差をみると、 0.1% C 低炭素鋼 (S 10 C) では単一衝撃試験での値は静的試験での値の約 2 倍、オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS 316) においては約

表 5 単一衝撃張試験の実験結果

Material	Yield stress σ_{ysi} (MPa)	Yield stress ratio σ_{ysi}/σ_{ys}	Strain rate $\dot{\epsilon}$ (1/s)	Impact velocity V(m/s)
S10C	453	1.93	128	1.06
SUS316	381	1.49	127	0.80
HT-60	533	1.18	148	1.06
GIN6	1657	1.08	210	1.30

(a) S10C

(b) SUS316

(c) HT-60

(d) GIN6

図 8 単一衝撃荷重下の応力-ひずみ特性

1.5倍である。一方、図8(c), (d)の高張力鋼 (HT-60) およびマルテンサイト系ステンレス鋼 (GIN 6) の応力-ひずみ特性は両引張試験で顕著な差が認められず、単一衝撃試験での降伏強度の上昇割合は高張力鋼 (HT-60) で約1.2倍、マルテンサイト系ステンレス鋼 (GIN 6) で約1.1倍である。

以上のことから、材料により衝撃負荷が降伏強度に及ぼす影響が異なり、静的降伏強度が低く延性の大きい材料は衝撃負荷の影響を受けやすいことが認められたが、このことと疲労き裂進展特性との関連性については次節で考察する。

3.3 単一衝撃荷重下の応力-ひずみ特性と衝撃疲労き裂進展特性との関係 図9(a)~(c)は以前に報告した0.1% C 低炭素鋼 (S10C), オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS316) および高張力鋼 (HT-60) の衝撃荷重下でのき裂進展速度 da/dN と応力拡大係数幅 ΔK の関係⁽²⁾⁽¹⁰⁾をそれぞれ示したものである。

前節より静荷重下と単一衝撃荷重下での応力-ひずみ特性において顕著な差がみられなかった材料、すなわち、マルテンサイト系ステンレス鋼および高張力鋼においては図5および図9(c)より衝撃荷重下での疲労き裂進展速度は正弦波荷重下のそれと差が認められない。一方、静荷重下と単一衝撃荷重下での応力-ひずみ特性において顕著な差がみられた材料、すなわち、0.1% C 低炭素鋼およびオーステナイト系ステンレス鋼においては図9(a), (b)より衝撃荷重下での疲労き裂進展速度は正弦波荷重下でのそれを上回ることが認められる。

したがって、前者の場合はひずみ速度の小さい正弦波荷重下とひずみ速度の大きい衝撃荷重下でのき裂先

端の応力-ひずみ挙動はほとんど等しく、形成される塑性域もほとんど等しいと考えられるので、き裂進展挙動に両荷重下で差がないことが理解できる。これに対して、後者のように応力-ひずみ挙動が両荷重下で大きく異なるときは疲労き裂進展挙動も異なり、き裂先端塑性域の小さい衝撃荷重下のほうが⁽¹⁰⁾き裂進展速度が増すものと考えられる。

以上の結果から、静的降伏強度の低い材料ほど衝撃負荷の影響を受けやすいことが認められ、単一衝撃試験での応力-ひずみ特性と衝撃疲労き裂進展特性との間には密接な関連性があることが明らかになった。

4. 結 言

本研究ではまず、高強度マルテンサイト系ステンレス鋼を用いて衝撃荷重下での疲労強度および下限界値を含む疲労き裂進展挙動を調べた。次いで、本材料と既に研究を行った3種類の金属材料を用いて単一衝撃荷重下での応力-ひずみ特性を求め、衝撃疲労き裂進展特性と単一衝撃荷重下の動的応答性との関連性を調べた。

本研究で得た結論は以下のとおりである。

(1) 本研究で用いたマルテンサイト系ステンレス鋼の衝撃荷重下での疲労強度は $N_f > 10^5$ の範囲で正弦波荷重下と比べて低く、従来よりいわれている衝撃荷重下でのS-N特性とよく対応していることが認められたが、衝撃荷重下での疲労き裂進展挙動は下限界値を含む全領域において正弦波荷重下のそれと差がなかった。

(2) 単一衝撃荷重下の応力-ひずみ特性と衝撃疲労特性との関係について総括的に検討するため、マル

図9 da/dN - ΔK 関係

テンサイト系ステンレス鋼と併せて、著者らが前報において正弦波荷重下および衝撃荷重下での疲労き裂進展特性を求めている材料の計四種について単一衝撃試験を行った。その結果、マルテンサイト系ステンレス鋼 (GIN 6) と高張力鋼 (HT-60) については静的応力-ひずみ特性と単一衝撃荷重下でのそれとの間に顕著な差はなく、一方、0.1% C 低炭素鋼 (S 10 C) とオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS 316) の場合には単一衝撃荷重下での降伏応力は静的荷重下でのそのそれぞれ約 2 倍および約 1.5 倍程度となることが観察された。

(3) 静荷重下と単一衝撃荷重下での応力-ひずみ特性において顕著な差がみられなかった材料、すなわちマルテンサイト系ステンレス鋼および高張力鋼においては衝撃荷重下での疲労き裂進展速度は正弦波荷重下のそれと差異のないことが認められた。一方、静荷重下と単一衝撃荷重下での応力-ひずみ特性において顕著な差がみられた材料、すなわちオーステナイト系ステンレス鋼および 0.1% C 低炭素鋼においては衝撃荷重下での疲労き裂進展速度は正弦波荷重下でのそれを上回ることが認められた。

(4) 上記(3)において、前者の場合はひずみ速度の小さい正弦波荷重下とひずみ速度の大きい衝撃荷重下でのき裂先端の応力-ひずみ挙動はほとんど等しく、形成される塑性域もほとんど等しいと考えられるので、き裂進展挙動に両荷重下で差がないことが理解できる。これに対して、後者のように応力-ひずみ挙動が

両荷重下で大きく異なるときは疲労き裂進展挙動も異なり、き裂先端塑性域の小さい衝撃荷重下のほうがき裂進展速度が増すものと考えられる。

文 献

- (1) 田中・中山・森・藤井・木下, 機論, **53**-491, A (1987), 1412.
- (2) 田中・木下・中山, 機論, **55**-512, A (1989), 970.
- (3) 田中・中山, 機論, **39**-320 (1973), 1072.
- (4) 田中・中山, 機論, **42**-356 (1976), 1001.
- (5) 田中・中山, 機論, **40**-331 (1974), 635.
- (6) 田中・中山, 材料, **23**-252 (1974), 678.
- (7) 田中・中山, 機論, **41**-344 (1975), 1062.
- (8) 秋園・村上, 徳島大学工学部研究報告, **23** (1978), 129.
- (9) Tanaka, T., Nakayama, H. and Kimura, K., *Fatigue, Fract. Eng. Mat. Struct.*, **8**-1 (1985), 13.
- (10) 田中・木下・中山, 材料, **36**-408 (1987), 992.
- (11) Iguchi, H., Tanaka, K. and Taira, S., *Fatigue Mater. Struct.*, **2** (1979), 13.
- (12) 村上・秋園, 材料強度学会誌, **16**-2 (1981), 47.
- (13) 村上・秋園, 材料, **33**-370 (1984), 895.
- (14) 村上・楠川・秋園, 機論, **53**-495, A (1987), 2004.
- (15) 村上・秋園, 材料, **31**-346 (1984), 690.
- (16) 秋園・村上・竹ノ内, 材料, **29**-321 (1980), 685.
- (17) 金山・中山・岡部・森・桜井, 材料, **34**-384 (1985), 1064.
- (18) Yang Pingsheng and Chou Shanyuan, Investigation on low cycle impact fatigue, *Proc. Int. Symposium, China*, (1985-10), 801.
- (19) 早川・深見・宅岐・堀, 第 3 回材料の衝撃問題シンポジウム前刷集, (1989-12), 41.
- (20) *ASTM Standard*, Part 10, E647-78T (1980), 340.
- (21) 茶谷, 機械の研究, **23**-12 (1971), 1625.
- (22) 茶谷・中沢・中原, 材料, **19**-202 (1970), 15.
- (23) 河田, 材料, **36**-411 (1987), 2.
- (24) Tada, H., *Eng. Fract. Mech.*, **3** (1971), 345.