(昭和 35 年 5 月造船協会春季講演会において講演)

大形試験片による海水腐食曲げ疲労試験

正員 原 三 郎*

正員 星 野 次 郎*

正員 新 井 淳 一*

Bending Fatigue Tests on Large Specimens under Sea Water Corrosion

By Saburo Hara, *Member*, Jiro Hoshino, *Member*
and Junichi Arai, *Member*

Abstract

The authors have newly designed and manufactured a large rotating bending fatigue test machine (Cantilever type, Max. bending moment 7 t-m, Standard diameter of specimen 125 mm ϕ) and tested specimens of 135 mm ϕ under sea water corrosion.

The specimens have been taken from steel bars forged from 1.4 ton ingots made by acid open-hearth process (forged ratio=6) and annealed in the furnace. The chemical and mechanical properties of the specimens are as shown below :

Chemical Properties		Mechanical Properties	
C	0.22	Tensile strength (kg/mm ²)	46.4~47.0
Si	0.23	Yield point (kg/mm ²)	24.0~24.5
Mn	0.42	Elongation (50 mm, %)	36.8~37.2
P	0.013	Reduction of area (%)	58.1~63.2
S	0.043		

10 mm ϕ specimens of the same material having similar shape have been also tested under sea water corrosion for comparison.

The following facts have been revealed by the tests :

(1) Fatigue strengths of 130 mm ϕ and 10 mm ϕ specimens at 10^8 stress reversal were 11.2 kg/mm² and 3.5 kg/mm² respectively.

(2) Depth of cracks found on the corroded surface of specimens is calculated by the following formula :

$$l = C \times \log_{10} \left(\frac{N}{N_c} \right)$$

where l : Depth of corrosion cracks (mm)

C : Constant, determined by the method of corrosion (=0.86 in this experiment)

N_c : Limit of stress reversal at which corrosion cracks will originate (= 1.7×10^6 in this experiment)

N : No. of stress reversals.

(3) When N does not exceed 1.7×10^6 , cracks will not originate.

(4) A reversal stress limit (σ_e) at which surface cracks have originated on large corroded specimens may be presumed about 5 kg/mm².

原稿受付 昭和 35 年 1 月 9 日

* 日本海事協会技術研究所

(5) There is also a reversal stress limit (σ_0) at which fine cracks on the non-corroded specimens begin to develop, σ_0 is assumed about 11 kg/mm² for the steel tested

(6) Failure of corroded specimens may occur when reversal stress has increased as the result of reduction of effective area by surface cracks and exceeds σ_0 .

(7) Fatigue limit of large corroded specimens is designated by σ_0 .

(8) There may be no fatigue limit for small corroded specimens.

1. 緒 言

著者のうちの一人、原は、先に主として経験的観点から船のプロペラ軸の折損を論じ、その原因の1つが、軸身が海水に触れて腐食疲労現象を生ずることにあると断定し、小形試験片による疲労試験を行なつてその可能性を立証した⁽¹⁾。しかし、その際にも述べたように、船のプロペラ軸のような大径の軸に発生する現象を、径 10 mm 程度の小形試験で再現して論ずることの妥当性には、大きな疑問が残つた。

しかるに、著者らは、今回、幸に運輸省の科学技術試験研究補助金の交付を受け、また、日本造船研究協会よりの補助金をも得て、新たに、大形回転曲げ疲労試験機を設計製作し、大形試験片による試験を実施する機会を得た。

この研究は、日本造船研究協会第 31 部会の 1 部として行なわれたもので、元来の目的は、大形試験片の腐食疲れ強さを求めることにあり、試験機の構造、試験方法、疲れ強さなどについては、すでに同協会報告⁽²⁾に発表済みであるのでそれにゆずり、本論文では、その後著者らが委員会とは別に更に研究を進めて得た成果、すなわち、き裂発生応力限界、き裂発生繰返し限界、き裂の発生経過、腐食疲れ強さの意義などについて論ずる。

2. 大形試験片の疲れ強さ

緒言で述べたように、すでに日本造船研究協会報告に詳細が発表されているので、以下推論を進めるに必要な結果だけを簡単に再録する。

本試験に用いられた大形試験片は、酸性平炉鋼より鍛造され（平滑部の鍛造比 ≈ 6 ）、炉中焼鈍されたもので、第 1 表に示す化学組成および機械的性質を持つている。

第 1 表 試験片の化学組成と機械的性質

化 学 組 成					機 械 的 性 質				
C	Si	Mn	P	S	降 伏 点 (kg/mm ²)	引 張 強 さ (kg/mm ²)	伸 長 (50mm) (%)	紋 理 (%)	空気中における 曲げ疲れ限度 (kg/mm ²)
0.02	0.23	0.42	0.023	0.043	24.0~24.5	46.4~47.0	36.8~37.2	58.1~63.2	20(125 mm ϕ) 21.7(10 mm ϕ)

第 1 図 大形試験の寸法

試験片寸法には第 1 図に示す 2 種類があり、試験片 A 12~A 14 には a に示すものが、試験片 A 15 には b に示すものが用いられた。腐食用海水は 3% 食塩水を以て代用し、中央平滑部に噴霧器で 2~3 ltr/hr の割合で噴射した。また、すみ肉部よりの破断の可能性を考えて、この部分にゴム塗装を施し、海水の接触を避けた。

試験成績を第 2 表に、また、SN 曲線を第 2 図に示す。

A 12 および A 13 は、ともにすみ肉ゴム塗装附近から破断したが、SN 曲線の様子から見て、成績に余り影響を与えなかつたように思わ

第2図 SN 曲線

中および海水腐食疲労試験の SN 曲線をも合わせ記入してある。小形試験片は、大形試験片 A 13 の押込みテーパー部から採取したもので、寸法は、ほぼ、大形と相似であつて、採取要領および寸法は第3図に示されている。SN 曲線によれば、応力繰返し $1.5 \sim 2.0 \times 10^6$ 附近いで、大形の空気中と海水腐食の疲れ強さがほぼ同じ値を与えているが、これは、この時期まで、腐食作用が余り顕著でないことを意味しており、これをこすと、大形と小形の疲れ強さは次第に差がついてきて、 10^8 繰返しにおいて、大形 11.2 kg/mm^2 、小形 3.5 kg/mm^2 (いずれも推定値) となつている。また、大形腐食試験では、 10^8 繰返しにおいて、疲れ強さは、疲れ限度にほぼ接近している様子であるが、小形腐食試験では、なお、低下の一路をたどつている。

3. 腐食き裂の様相

3-1 表面腐食の経過

試験片は、研磨仕上げで、表面を荒さ 3 S 程度とした。表面の油気を十分にぬぐい取つた後運転を開始し、表面腐食の進行状況をストロボ照明装置を用い写真撮影した。

第4図は、試験片 A 14 (応力 12.5 kg/mm^2 , 30.80×10^6 で破断) のストロボ写真で、撮影時の繰返し数はそれぞれの図中に記入されている。すなわち、試験片に所定の応力をかけて海水の噴射を始めると、表面はやがて赤褐色に変色し (第4図 a)、ついで、腐食は斑紋状に全表面に広がり (第4図 b)、繰返し数が 10^7 をこえると円周方向に短い長さを持つ錆の盛り上がりが見られるようになる (第4図 c)。この盛り上がりの下には、いずれも小き裂が存在している。第4図 d においては、錆の盛り上がりはますます激しくなり、左右のゴム塗装の近くに大きなき裂の開口が現われ、この直後に、左側の大きなき裂から破断した。このように、試験片が、海水の噴射量の多い平滑部の中央からでなく、ゴム塗装に近い部分から破断することは腐食が NaCl の作用のみによつて起るものでないことを示している。

3-2 表面における腐食き裂の様相

破断した試験片の表面を磨いて、錆落したままのき裂の様相を第5図に、また、標準的なき裂が内部に進行している様子を第6図の顕微鏡写真に示す。応力の繰返し数が多いものほど表面におけるき裂が長く、深く、かつ幅の広いことは、前回の小形試験の場合⁽¹⁾にも指摘されており、同論文の第12図および第13図にその比較がなされている。

各試験片には、このような標準的なき裂のほか、深さが $5 \sim 10 \text{ mm}$ におよぶ大きなき裂が数個ずつ存在して

第2表 大形試験片の疲労試験の成績

試験片番号	繰返し応力 (kg/mm^2)	破断までの繰返し数 (10^6)	破断の状況
A 13	17.5	3.60	駆動側すみ肉ゴム塗装部附近より破断
A 12	15.2	6.74	荷重側 "
A 14	12.5	30.80	平滑部より破断
A 15	6.6~7.5	17.20	駆動側フランジ押込部より破断

(備考) (1) A 15 は平滑部の応力が一定でないで、最大および最小値を記入した。

(2) 室温は $20 \sim 25^\circ \text{C}$

れる。また A 15 は低い応力でき裂発生の有無を調べる目的で行なつた試験であつて、数は多くなかつたが明かに腐食き裂の発生が認められた。

第2図には、参考として、大形平滑試験片 ($125 \text{ mm} \phi$) 空気中疲労試験ならびに小形試験片 ($10 \text{ mm} \phi$) の空気

第3図 小形試験片の寸法

第4図 大形試験片 A14 の表面腐食状況を示すストロボ写真

第5図 大形試験片表面の腐食き裂

第6図 大形試験片断面の腐食き裂

いた。これらは、前記のき裂とは性格の異なるもので、応力、繰返し数には無関係にどれも同じような状態で存

在し、選択的に進行したものと見られ、そのうちの1つが、特に伸びて破断に結びついたものと想像される。

3.3 破面の状況

第7図は破面の写真である。いずれも左斜上がき裂の起点で、右斜下に最終破面が見られる。aは最も繰返し数が少なく応力の高いA13のもので、き裂の起点は1個であつて、破面の腐食の痕跡は少なく、空气中破断の破面とほとんど同じ様相を呈している。bおよびcは、繰返し数が多く、応力が比較的低いA12およびA14のもので、外周部に「ひだ」が多く、数多くのき裂が互に合わさつて破断に至つたものであることをよく物語っている。また、破面は全体として、A13よりやや激しい腐食が見られるが、さほど顕著なものではない。最終破面の外側の表面に沿つて見られる深さ数mmの細長い帯状の変色層は、腐食によつて発生した表面き裂の破面であつて、数個のものが互に合わさつてできている。破断の起点側にこのような変色層が見られないのは、き裂が連続的に進行したためと思われ、これに反し、最終破面側では、破断時に瞬間的に最終破面とつながつたため、このような色彩の不連続が現われたものと思われる。また、変色帯が浅く長いことも注目すべき特徴であつて、表面は応力が大きく、腐食作用も盛んであるので、き裂が早く進行するが、内部に進むと応力は急激に減少し腐食作用も緩慢になるのでき裂の進行がおそくなり、このような形状になるものと想像される。

a: A13 (17.5 kg/mm², 3.6×10^6) b: A12 (15.2 kg/mm², 6.74×10^6) c: A14 (12.5 kg/mm², 3.08×10^6)

第7図 大形試験片の破面

これと同じような現象も、前回の小形試験⁽¹⁾において確認されており、同論文の第17図に、同様なき裂破面の一例が示されている。

4. 腐食疲労における破壊の考察

4.1 腐食き裂が発生する繰返し数の限界 (N_c)

腐食き裂の深さと応力繰返し数の関係を定量的に調査するために、破断した試験片の平滑部を中心線を含む面で縦断し、断面をよく磨いて、中央の長さ70mmの部分に発生した表面き裂の数と深さをコンパレータで詳細に測定して第8図に示すき裂分布図を作つた。また、第9図は、き裂の長さとの関係を示すヒストグラムで、試験片A13は深さ0.2~0.3mmの所に、A12は0.5~0.6mmの所に、また、A14は1.0~1.1の所にそれぞれピークがあり、繰返し数が増加するにしたがつて、ピークが深さの大きい方へ移行していることを示している。また、A12およびA14には、それぞれ0.1~0.2mmのところにも別なもう一つのピークがあるが、これらのき裂は、停留き裂と称せられるべきもので第6図cの中央のもののように口元は広いが、深さの浅いものであつた。

いまこのような停留き裂は除外し、標準的なき裂の平均深さと、これに対する変動係数を各試験片について求めた結果

第8図 き裂の分布図

第9図 き裂深さのヒストグラム

$$l = C \cdot \log_{10} \left(\frac{N}{N_c} \right)$$

この式において、 C は腐食き裂の速度係数ともいふべき比例常数で、腐食の方法によつて変る値である。また、 N_c はき裂が発生し始める応力繰返し数の限界であつて、き裂の発生し始める腐食くぼみの大いさの限界を意味し、試験片の径によつて変るものであろう。第2図から、 C, N_c を求めると、 $C=0.86$ 、 $N_c=1.7 \times 10^6$ となる。一方 $N_c=1.7 \times 10^6$ なる繰返し数は、大形試験片の海水腐食疲れ強さと、空中平滑疲れ強さとが交わる点にほぼ一致しており (SN 曲線参照)、 N が N_c 以下では、腐食は起るが、き裂は発生しないということを裏付けるものである。

なお、き裂の深さを (1) 式から求めると、 10^8 繰返しに対して 1.5mm という極めて小さな値となり、その速度はきわめておそい。

4.2 腐食き裂が発生する応力の限界 (σ_0)

前項にのべた (1) の関係は、相当高い応力を受けている試験片について行なつた試験結果から推論したものであつて、応力が低ければ、若干これと異なる結果となり、ついに、き裂を発生しなくなる限界がある筈である。今回の小形試験では、応力 5 kg/mm²、繰返し 56.6 × 10⁶ でも破断が起きているので (第2図 A3参照)、更に2本の小形試験片 B2 および K1 を用い、それぞれ 2.9 kg/mm² および 2.0 kg/mm² の応力を作用せしめて、20 × 10⁶ 繰返し後、表面き裂の有無を詳細に顕微鏡で調査した。試験片表面は、第10図の写真で見られるようにはなはだしく腐食していたが、第11図の縦断面顕微鏡写真の一例が示すように、き裂の発生は全然見られなかつた。しかし、前回の小形試験片の実験⁽¹⁾では、応力 3 kg/mm²、繰返し数 75 × 10⁶ で破断した例が

第10図 小形試験片 A13 K1 の表面 (腐食状況 2.0 kg/mm², 20.0 × 10⁶)

を第3表に掲げる。

第3表 大形試験片の表面のき裂の深さ

試験片 番号	破断までの 応力繰返し 数 (10 ⁶)	平均深さ (l) (mm)	標準偏差 (Δl) (mm)	変動係数 ($\Delta l/l$)	き裂の数	
					総数	平均に用いた数
A13	3.60	0.275	0.134	0.487	88	81
A12	6.74	0.562	0.169	0.301	125	95
A14	30.80	1.058	0.135	0.125	115	98

(備考) 各試験片の平均き裂深さは、次の深さの範囲のものから求めた。
A13: 0~0.7mm, A12: 0.21~0.90mm, A14: 0.71~1.40mm

第3表において、変動係数が応力繰返し数の少ないものほど大きいのは、前述のように、き裂発生初期においては、き裂は表面と深さの方向にほぼ同じ速度で進行し、破面が円または楕円状を呈するので、切断位置によつて深さがちがうが、繰返し数が増加すると、き裂は表面のみ早く進んで、破面が帯状となるので、切断位置による深さのちがいが少なくなるためと解釈される。

第3表の標準き裂の深さ (l mm) と応力繰返し数 (N) の関係を第2図の SN 曲線の上に画くと、その関係は、ほぼ直線が示され l は応力に関係なく N の函数として近似的に次の式で示すことができることを知る。

(1)

第11図 A13 K1 の腐食部の顕微鏡写真 (×400)

あり、この試験片の表面には多数のき裂が発見されているから（同論文第 13 図参照）、繰返し数が甚しく増加すれば、 3kg/mm^2 でもき裂発生可能性があるわけである。けだし、小形試験片においては、腐食がはなはだしく進むと、漸次径が減少して表面応力が増加するから、き裂発生の応力限界は存在しないのではないかと思う。

一方、大形試験片では、腐食の影響は少なく有効断面積の減少も余り考えられないので、小形試験片より高いき裂発生の応力限界があるものと考えられる。しかし、A 15 試験片 (6.6kg/mm^2 , 17.20×10^6) の表面には、明らかにき裂の発生が確認されたから、き裂発生応力限度は、これより若干低い 5kg/mm^2 前後にあるのではないかと推察される。

4.3 表面き裂による応力増加率 (ν_b)

いま試験片の表面に小き裂が存在している場合を考え、 ν_a をき裂先端の曲率半径の大きさによつてきまる局部応力集中率、 ν_b をき裂によつて有効面積が減少したための応力増加率とすれば、き裂先端の応力は、 $\nu_a \cdot \nu_b \cdot \sigma_n$ で表わされる。ここに σ_n は、き裂部における表面の見掛けの応力である。

ν_a は、疲労き裂のように先端が尖鋭なものでは、大きな値となり、応力が加えられれば局部的に塑性変形を起すが、材料の種類が同じであれば大体同じ値を与え、また、試験片の大小にも関係はない。次に ν_b は、き裂の深さを $l(\text{mm})$ 、試験片の直径を $D(\text{mm})$ とし、簡単のために、き裂が全周におよんでいるとすれば、次の式で表わされる。

$$\nu_b = \frac{D^3}{(D-2l)^3} \quad (2)$$

しかるに、海水腐食き裂の場合は、 l は「(1) 式で与えられるから、これを (2) 式に代入すれば

$$\nu_b = \left[\frac{1}{1 - \frac{1.72}{D} \log_{10} \frac{N}{1.7 \times 10^6}} \right]^3 \quad (2')$$

いま (2') 式を用いて、 ν_b と N の関係を D をパラメーターとして図示すると第 12 図のようになり、小形試験片では、 N の増加が直ちに非常に大きな応力の増加となつて現われることを知る。また、第 13 図は、 ν_b と D の関係を N をパラメーターとして画いたものである。(2') 式は、き裂が全周におよんでいるものと考えて求めたものであるのでき裂発生の初期には当てはまらないが、腐食が進むと、き裂は互に連結して長い带状となるので、上記の式は、近似的に成立すると考えてよいのではないかと思う。

4.4 き裂の発達しめる応力限界 (σ_0) とき裂の速度

著者の一人、星野は、先に多くの大形平滑試験片の破面に生ずる貝殻模様から、空気中曲げ疲労試験におけるき裂の進行速度 (v_c) を求め、(1) 試験片の材質および直径に応じて、それぞれ、表面き裂が進行し始める応力限界 (σ_0) (以下き裂疲れ限度という) が存在すること、(2) き裂進行速度 (v_c) は、腐食き裂の速度に比べて非常に早く、試験片回転につき 10^{-4}mm order のものであること、(3) き裂進行速度 (v_c) と表面応力 (σ_n) の間には次の関係が成立することを発表した⁽³⁾。

第 12 図

第 13 図 ν_b と試験片直径の関係

$$v_c = \frac{v_b \sigma_n - \sigma_0}{B} \quad (3)$$

上式において、 v_c はき裂進行速度 u/cycle 、 v_b, σ_n は前出、 B は試験片の材質、直径などによって定まる係数で、0.2%炭素鋼の 125mmφ 試験片では 18、 σ_0 はき裂疲れ限度で、引張り強さが約 48 kg/mm² の鍛鋼材に対し、11.5 kg/mm² である。

したがって、試験片表面に発生した腐食小き裂が徐々にその深さを増し、 v_b が大になつて、 $v_b \sigma_n$ が σ_0 に達し、更にこれをこえると、き裂進行は腐食によるもののほかに、(3)に示す空気中のき裂進行も加わつて急激に進み、破断に至るものと考えられる。

4.5 腐食疲労における破壊の過程

以上述べたところから、腐食曲げ疲労における破壊は次の過程を経て起るものと推察される。

(1) 試験開始後直ちに腐食が始まり、やがて試験片表面は錆でおおわれる。しかし、この段階では、浅い腐食くぼみができるだけで、き裂は発生しない。

(2) 腐食くぼみは次第に大きく深くなり、くぼみの周囲の応力集中によつて微小な円周方向き裂が生ずる (1.7×10^8 繰返し附近)。

(3) この段階では、き裂は千鳥状に分布し、互に連結されないで、 v_b は大きくならず、発達はきわめて徐々に行なわれる。

(4) き裂が次第に伸びると近接したものは順次連結し、 v_b は (2') 式で示される値をとるようになる。

(5) $v_b \sigma_n$ が σ_0 より小さい間は、き裂は腐食により進行を続け、やがて $v_b \sigma_n$ は σ_0 に等しくなる。

(6) $v_b \sigma_n$ が σ_0 をこすと、進行速度は、空気中のき裂進行も加わつて促進され、やがて腐食の影響から脱却して急速に破断する。

前述の腐食疲労試験の結果が、上の段階をいかに経過したかを考えて見るのに、大形試験片は、(3)の段階には容易に到達するが、 v_b が小さいので、 σ_n が σ_0 に比べて大きくならないと仲々 (4) の段階に到達せず、き裂は停留して破壊は起らない。しかし、 σ_n が σ_0 に等しいかまたは大きいと、直ちに (6) の段階に入り破断する。したがって、疲れ強さは、表面にき裂を有する平滑試験片の空気中疲れ強さにほぼ一致し、疲れ限度はき裂疲れ限度 (σ_0) とほぼ同じ値をとる。

一方、小形試験の場合には、(2)、(3) の段階を比較的早く経過して (4) の段階に入り、 σ_n の大小により、直ちに (6) の段階をへて破断するか、または、順次 (5)、(6) の段階をへて破断する。したがって、疲れ強さはいつ $v_b \sigma_n$ が σ_0 に達するかによつてきまり、疲れ限度は、必ず $v_b \sigma_n$ が σ_0 に達するときが来るので理論的には存在しない。

このように、腐食疲労試験において、試験片が破壊するかどうかは、(5) の段階が起りうるかどうか、またいつ起るかによつて決まるものであるから、大形試験片と小形試験片では条件が異なり、疲れ強さに差がでるのは当然で、小形試験の結果を直ちに大形試験の場合に適用することはできない。

つぎに、第2図の SN 曲線によると、 10^8 繰返しにおける腐食疲れ強さは、大形試験片では 11.2 kg/mm²、小形試験片では 3.5 kg/mm² である。この材料の引張り強さは、星野の実験に用いられたものより若干低いので σ_0 をやや低目に 11 kg/mm² と仮定すれば、破断した 10^8 繰返し時における v_b は、 $v_b = \sigma_0 / \sigma_n$ の関係から、それぞれ 0.98 および 3.15 となる。一方、第12図から、130mmφ と 10mmφ 試験片の 10^8 繰返し時における v_b はそれぞれ 1.03 および 3.02 となるから、両者はほぼ一致し、大形試験片では、(3)の段階から直ちに (6) の段階に移つたことが知れ、小形試験片では、(1)ないし (6) の段階が順次経過されたことがわかる。

5. 結 論

以上の海水腐食疲労試験の結果を要約すると次の通りである。

(1) 海水 (3%食塩水) による 130mmφ および 10mmφ 試験片の腐食曲げ疲れ強さは、 10^8 繰返しにおいて、それぞれ、11.2 kg/mm² および 3.5 kg/mm² と推定され、前者の疲れ限度は、この疲れ強さを若干僅か下廻るものと想像され、後者には、疲れ限度はないと見て差しかえない。

(2) 腐食き裂の深さ (l mm) は、繰返し数 (N) の函数として、次の一般式で示される。

$$l = C \cdot \log_{10} \left(\frac{N}{N_c} \right)$$

上式において、 C は腐食の方法によつて定まる比例定数、 N_0 は、腐食き裂が発生し始める応力繰返し数の限界で、海水腐食の場合、 $C=0.86$ 、 $N_0=1.7 \times 10^6$ である。

(3) 前項の式は、作用応力が腐食き裂発生限界応力 (σ_0) をこえる場合に成立し、応力がこれ以下であると繰返し数のいかにかわらずき裂は発生しない。この限界応力は大形試験片においては、 5 kg/mm^2 前後と推定される。

(4) 腐食疲労によつて試験片が破断するか否かは、腐食き裂の発生により、試験片の有効断面積が減少して、き裂先端の応力が増大し、それが供試材のき裂疲れ限度 (σ_0) をこえるかどうかによつて決定される。

(5) 小形試験片の腐食疲れ強さおよび疲れ限度は、大形試験片のそれに比べて著しく小さい。

(6) 大形試験片の腐食疲れ限度は、ほぼき裂疲れ限度 σ_0 に一致する。

(7) 小形試験片には、腐食疲れ限度は存在しない。

参 考 文 献

- (1) 原三郎：プロペラ軸の腐食疲労について（その2）（造船協会論文集 98 号）
 - (2) 日本造船研究協会第 31 部会報告（報告第 29 号）
 - (3) 星野次郎：大形疲れ試験の結果について（第2報，平滑試験片のき裂進行）日本機械学会論文集 26-164.
-