切欠き平板の疲労き裂発生寿命推定[†] (SCM 435 材の場合および平均応力の影響)

公 江 茂 樹* 中 村 宏* 恒 成 利 康**

Estimation of Fatigue Crack Initiation Life of Notched Plates (In the Case of SCM 435 and Influence of Mean Stress)

by

Shigeki KOE*, Hiroshi NAKAMURA* and Toshiyasu TSUNENARI**

A method to estimate the fatigue crack initiation life of notched specimens from the $S-N$ curve of smooth specimens had been proposed in the previous papers by the present authors. In the method, the local stress and strain were calculated through the relationships of cyclic stress-strain and $K_\sigma-K_\epsilon$, where K_σ and K_ϵ are the stress and strain concentration factors respectively, based on the assumption that the damage in local material by local stress was just the same as the damage in material of smooth specimen by nominal stress, provided that the local stress of the notched specimen was equal to the nominal stress of the smooth one. From the test results, the applicability of the method was shown to be good for carbon steels (S35C, S15C) in reversed stress.

In order to confirm its applicability to high strength steel, fatigue tests were executed on the notched specimens of an alloy steel (SCM435). The influence of mean stress on fatigue crack initiation life of notched specimens was also investigated on both SCM435 and S15C steels. The results showed that the fatigue life prediction method proposed by the authors was valid to SCM 435 and that the influence of mean stress was insignificant.

キー・ワード：応力集中，疲労き裂発生，寿命推定，平均応力

1 緒 言

機械，構造物の疲労強度設計を行う場合には，最終的にはその材質および形状に合った方法をとらねばならないが，個々のデータを逐一求めていたのでは時間もかかり不経済でもあるので，多くの材料や形状に適用できる応力集中部の疲労寿命を推定する方法の確立が望まれる。その方法の一つとして，筆者らは材料の繰返し応力ひずみ関係および集中応力の簡易計算式，平滑材の $S-N$ 線図から応力集中部の両振り下での疲労き裂発生寿命を推定する方法を提案し，炭素鋼（S 35 C，S 15 C）^{1,2)} についてはこの方法が有効であることを確認してきた。

そこで，この方法がさらに他の材料に対しても適用できるかどうか，また平均応力がある場合についてはどうかを調べた。切欠き材における平均応力の影響は，破断の疲労限については $\sigma_a-\sigma_m$ 線図において両振疲労限と材料の引張強さあるいは真破断力とを結んだ線図で表されるとされている。³⁾ また，疲労き裂の発生に関しては，平均応力に依存しないという結果が得られている。^{4)~6)} なお，実働荷重下の寿命評価の場合には平均応力の影響も考慮する必要があると言われている。⁷⁾

ここでは炭素鋼以外の材料として，比較的強度が高く使用頻度の多い低合金鋼 SCM 435 調質鋼を選び，両振疲労試験を行って提案してきた方法の有効性を調べるとともに，平均応力の影響についてはこの合金鋼と炭素鋼（S 15 C）について，片振りおよびある一定の高い平均応力下の疲労試験を行って調べた。

2 試 験 方 法

供試材の SCM 435 材は直径 32 mm の棒材を 850℃ で 1 時間保持して油焼入れした後 600℃ で 1 時間保持して油焼もどしし，その後機械加工で試験片を製作した。また，平均応力の影響をみるための試験には SCM 435，S 15 C 両材を用い，S 15 C 材は前報と同じく試験片を機械加工で製作した後，真空中にて 750℃ で 30 分保持し炉冷焼なましを行った。この両材の化学成分および機械的性質を Table I, II にそれぞれ示す。

試験片形状を Fig. 1 に示す。Fig. 1 (a) は SCM 435 材の平滑試験片，Fig. 1 (b) は S 15 C 材の平滑試験片で前者は変位制御にて試験を行うために平行部を付与した。Fig. 1 (c) は切欠き試験片で両材料とも同じ形状である。

負荷は軸荷重であり，疲労試験機，疲労き裂の検出

[†] 原稿受理 昭和58年10月29日 Received Oct. 29, 1983

* 正 会 員 川崎重工業(株)技術研究所 明石市川崎町，Technical Institute, Kawasaki Heavy Industries Ltd., Kawasaki-cho, Akashi

** 川崎重工業(株)技術研究所 明石市川崎町，Technical Institute, Kawasaki Heavy Industries Ltd., Kawasaki-cho, Akashi

Table I. Chemical composition (wt%)

Mat.	Comp.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
SCM 435		0.33	0.23	0.73	0.017	0.010	0.02	1.06	0.18	0.01
S15C		0.15	0.25	0.44	0.018	0.019	—	—	—	—

Table II. Mechanical properties.

	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	ϕ (%)	ϕ (%)
SCM 435	810	933	21.3	66.2
S15C	254	387	37.0	72.2

(a) Smooth specimen of SCM35 steel.

(b) Smooth specimen of S15C steel.

(c) Notched specimens.

Fig. 1. Shape of specimens.

法などの実験手法は前報と同じである。なお Fig. 1(c) の形状係数 $K_t=1.91$ の試験片ではき裂の進展期間が全寿命に比べて短いのでき裂発生繰返し数を検出できない場合があった。そのときは他の試験片について応力振幅とき裂進展寿命との関係を求めて、この線図上でき裂進展寿命を読みとり破断繰返し数からこの繰返し数を引いてき裂発生繰返し数とした。

平均応力が存在する場合として片振負荷を選び、一部非常に平均応力の高いもの（最大公称応力が引張強さの約 2/3 倍となるもの）も実施した。片振応力を選んだ理由は、設計資料として多くの場合に両振りと片振りの下でのデータが要求されることと、平均応力をあまり高くすると試験片が伸び破断をおこし、疲労破壊する負荷領域が小さくなるためである。

3 疲労き裂発生寿命推定手順

応力集中部の疲労き裂発生寿命の計算手順を以下に示す。

局部応力の簡易計算式にはすでに提案した次の式を用いる。

$$\frac{K_t-1}{K_\sigma-1} - 1 = 2.4 \left(\frac{K_\varepsilon-1}{K_t-1} - 1 \right) \quad (1)$$

ここに K_t は形状係数、 K_σ は応力集中率、 K_ε はひずみ集中率である。応力集中部の応力を σ 、ひずみを ε とし公称応力を σ_n とすると、 $K_\sigma = \sigma/\sigma_n$ 、 $K_\varepsilon = E\varepsilon/\sigma_n$ で表される。式(1)を σ 、 ε 、 σ_n で表し、 σ_n について解くと次式が得られる。

$$\sigma_n = 4.8 E \sigma \varepsilon / [(1.4 K_t + 1) \sigma + 2.4 E \varepsilon + \sqrt{\{(1.4 K_t + 1) \sigma + 2.4 E \varepsilon\}^2 + 9.6 K_t (K_t - 3.4) E \sigma \varepsilon}] \quad (2)$$

この式に材料によって決まる応力とひずみの関係、

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \sigma/E + (\sigma/c)^{1/n} \quad (3)$$

から求まる応力とひずみの値を代入すると、応力集中部の応力と公称応力との関係が得られる。ここで E はヤング率、 c 、 n は定数である。つぎに、応力集中部の応力と等しい応力が負荷された場合の破断寿命を平滑試験片の $S-N$ 線図から読みとり、これを応力集中部のき裂発生寿命 N_e と見なせば公称応力 σ_n とき裂発生寿命 N_e の関係が得られる。

4 試験結果

すでに実施した S15C 材の平滑試験片の疲労試験は荷重制御であったが、SCM 435 材は繰返し応力下で加工軟化が激しく、荷重制御で試験すると疲労試験中に生じるひずみの変化が非常に大きいので、平滑試験片の両振試験の場合だけはつかみ部間の変位制御にて試験した。その結果得られた疲労試験中の塑性ひずみ幅の変化を Fig. 2 に示しており、この図から分るよ

Fig. 2. Variation of plastic strain range.

うに塑性ひずみ幅は繰返し数の増加とともに急激に増し、各変位レベルに応じてほぼ一定値に落ちついた後破断する傾向にある。なお破断寿命の約1/2の繰返し数における応力振幅 σ_a を図中に示している。繰返し負荷時の応力とひずみの関係はヒステリシスループの頂点を連ねた線図として得られる。その取り方はインクレメンタルステップテスト等いくつかあるが、ここでは疲労試験中に Fig. 2 の黒ぬりの印で示す繰返し数のところで、一時試験を中断し、応力振幅を漸減、漸増させて得た。その結果を応力振幅 σ_a と塑性ひず

み幅 $\Delta\epsilon_p (=2\epsilon_p)$ の関係として Fig. 3 に示す。繰返し応力とひずみの関係を式で表すときは添字 a を省いて単に σ , ϵ , ϵ_p とすることにし、得られた実験点から応力と塑性ひずみの関係を直線で近似すると図中の実線で示す次式が得られる。

$$\sigma = 1370 \epsilon_p^{0.14} \quad (4)$$

繰返し時の応力と塑性ひずみの関係はすでに報告したように、引張強さ σ_B から次式で推定できる。

$$\sigma = c \epsilon_p^n = 1.73 \sigma_B \epsilon_p^{0.16} \quad (5)$$

この式で $\sigma_B = 933$ とおくと $\sigma = 1610 \epsilon_p^{0.16}$ となる。

この式で表される線図を Fig. 3 に破線で示すが、式(4)の実線とはほぼ一致する。疲労寿命推定の計算には実験で得られた式(4)を用いるべきであるが、ここでは材料の基礎データを用いて推定を行うという意味で、 σ_B から得られる次の応力ひずみ関係式を用いた。

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p = \sigma / 206000 + (\sigma / 1610)^{6.25} \quad (6)$$

なお弾性ひずみ ϵ_e を求める際のヤング率を 206000 GPa としている。

SCM 435 材の切欠き試験片を両振荷重下で疲労試験して得られた、き裂発生および破断に対する S-N 線図を Fig. 4 に示す。図中の線は実験結果を直線近似したものである。実験で得られたき裂発生寿命と、式(2)と式(6)を用いて推定した寿命を比較して Fig. 5 に示す。実験寿命は推定寿命よりもやや長い傾向にあるが両者はほぼ一致しており、本材についてもすでに提案した疲労き裂発生寿命を推定する方法が有効であることを示している。

つぎに、片振荷重で疲労試験して得られた SCM 435 材の S-N 線図を Fig. 6 に示す。

き裂発生には平均応力がほとんど影響しないと言われているので、ここではまず平均応力の影響がないと考えた場合の整理を行ってみる。平均応力を無視すると応力振幅だけを扱うことになり、両振りの場合と推定寿命は同じになる。片振りのき裂発生寿命と推定寿命を比較して Fig. 7 に示す。この図中には比較のために両振りの実験値も入れている。この図から、最大応力の高い領域では伸び変形が進行して破断するので実験値と推定値は一致せず、特に平滑材では平均応力の影響がかなりみられるが、公称応力の振幅値が約 350 MPa 以下の切欠き材では両者はほぼ一致している。また図中に白ぬきの記号で示した以前に行った両振りの結果よりは、やや短寿命となっはいるがこれらともほぼ合っており、片振応力下では切欠き材に対して平均応力の

Fig. 3. σ - ϵ_p diagram for SCM 435 in cyclic stress.

Fig. 4. Reversed direct stress S-N curves for SCM 435.

Fig. 5. Comparison of tested and predicted S-N_c curves.

Fig. 6. Pulsating direct stress S - N curves for SCM 435. Fig. 7. Comparison of tested and predicted S - N curves for SCM 435. Fig. 8. Pulsating direct stress S - N curves for S15 C.

影響は少ないと言える。これは後にも考察するように、公称応力が片振りであっても応力集中部ではむしろ両振りに近くなっているためと思われる。

S15C材の片振疲労試験結果の S - N 線図を Fig. 8 に、実験寿命と推定寿命を比較して Fig. 9 に示す。なお Fig. 9 中の左側の二つの $\bullet$ 印は伸び変形が大きく、明りょうなき裂発生が認められないまま破断したので $N_c = N_f$ と考えて図中に示している。本材の場合

も最大応力が 360 MPa 以上の領域を除いた、振幅応力が約 180 MPa 以下の領域では実験寿命と推定寿命はほぼ一致しており、両振りの結果ともほぼ合っている。

以上のことから片振荷重の場合、切欠き試験片が繰返し伸び変形を起さない範囲では、疲労き裂発生寿命に対して平均応力の影響は少ないと言える。

片振疲労試験とは別に、高い平均応力がある場合の試験を疲労限近くの応力について行った。その結果を Fig. 10 に示す。実験点が少ないのであまりはっきりしたことは言えないが、破断寿命が 10^6 回に対応する応力を疲労限とみなして他の負荷条件の場合と強度を比較すると、両振りの結果と比べて、SCM 435 材では強度の低下がかなりあり、S15C 材ではあまり認められない。なお、試験片の側面にき裂が発生してから破断するまでの期間が短いため、き裂の発生寿命は検出できなかったが、以下の考察では、 $N_f \approx N_c$ として取扱う。

5 考 察

片振応力下で、切欠き材の疲労き裂発生寿命に及ぼす平均応力の影響は SCM 435, S15C 両材とも小さく、また最大応力が引張強さの約 2/3 とした部分片振りの場合は S15C 材ではその影響は小さいが、SCM 435 材ではかなりあった。そこで応力集中部をもつ試験片の平均応力の影響を応力集中部の応力およびひずみの状態を考慮して推定する方法を考える。以下は疲労限（あるいは 10^6 回の疲労寿命に対する応力振幅）についての計算であるが、他の応力レベルについても同様に計算できる。ここでは平均応力の影響は平滑材の疲労試験の結果得られた σ_a - σ_m 線図（修正グッドマン線図）で表されるものとし、この関係が切欠き試験片の応力集中部の応力状態に対しても適用できるものとする。

切欠き材の疲労強度に及ぼす平均応力の影響を推定する計算にあたっての仮定は次のようである。

- (i) 基準となる σ_a - σ_m 線図として平滑材の試験結果を用いる。すなわち両振りと片振りの場合の実験点を結びこれを延長する。
- (ii) 局部応力の推定は式(2)を用いて行う。
- (iii) ヒステリシスループのピークを連ねて得られる繰返し応力ひずみ線図は式(3)の形で表されるとし、逆⁹⁾負荷時には材料の降伏挙動は Mróz による移動硬化則

Fig. 9. Comparison of tested and predicted $S-N_c$ curves for S15C.

Fig. 10. $S-N$ curves under mean stress.

Fig. 11. Predicting method for $\sigma_a-\sigma_m$ diagram on a true stress basis.

(降伏曲面の大きさは変らずその位置のみ移動するもの。付録参照)に従うものとする。このとき、逆負荷時(折返し時)の応力ひずみ関係は式(3)で表される線図の応力とひずみをそれぞれ2倍に拡大した線図となる。また切欠き材についても公称応力と局部ひずみの間に同様な関係が成り立つものとする。

(iv) 切欠き底の応力状態(平均応力と応力振幅)が平滑材のそれと等しいとき、切欠き底の疲労き裂発生寿命は平滑材の疲労寿命と等しいものとする。

この仮定の下に疲労限(あるいは 10^6 回の寿命に対する応力)を表す $\sigma_a-\sigma_m$ 線図を切欠き材について求める。計算方法をわかりやすくするためにS15C材を例にとって具体的な数値で示す。S15C材の引張強さ σ_B は387 MPa, 平滑材の両振疲労限は $\sigma_a=185$ MPa, 片振疲労限は $\sigma_{\max}=350$ MPaである。繰返し応力ひずみ関係はすでに実験で得られているが、引張強さ σ_B から求めた式とほぼ一致するので、ここでは式(3)と(5)を用いてS15Cに対し推定した次式を使うことにする。

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \sigma / 206\,000 + (\sigma / 670)^{6.25} \quad (7)$$

この応力とひずみの関係を図に表すと Fig. 11 右上のような曲線となり、この線図上で $\sigma_{\max}=350$ MPa に対応するひずみ値が片振疲労限における最大ひずみ $\varepsilon_{\max}$ でありその値は 1.898×10^{-2} である。付録に示すように除荷時の応力とひずみは折返し点を原点として式(7)の応力とひずみをそれぞれ2倍した式

$$\varepsilon = \sigma / 206\,000 + 2(\sigma / 1\,340)^{6.25} \quad (8)$$

から計算され、 $\sigma=350$ MPa とおくと $\varepsilon=2.15 \times 10^{-3}$ が得られる(iii)の仮定)。したがって除荷後のひずみは $\varepsilon_{\min}=1.898 \times 10^{-2} - 2.15 \times 10^{-3} = 1.683 \times 10^{-2}$ となる。

つぎに応力集中がある場合として $K_t=3.33$ の試験片形状を選ぶと、式(2)と(5)を用いて公称応力 σ_n と切欠き底のひずみ ε が Fig. 11 右下の図のような線図として得られる。この線図上で $\varepsilon_{\max}=1.898 \times 10^{-2}$ に対応する点の応力を求めればこれが $(\sigma_n)_{\max}$ となり、その値は291 MPaである。除荷時は平滑材の場合と同様に折返し点を原点にし、負荷時の線図の σ_n, ε をそれぞれ2倍にした線図を描き、この線図上で $\varepsilon_{\min}$ に対応する σ_n を読みとれば $(\sigma_n)_{\min}$ が得られる。この図ではその値は167 MPaとなり、これから切欠き材の公称平均応力 $\sigma_m = \{(\sigma_n)_{\max} + (\sigma_n)_{\min}\} / 2$ と応力振幅 $\sigma_a = \{(\sigma_n)_{\max} - (\sigma_n)_{\min}\} / 2$ を計算すると、それぞれ229 MPaと62 MPaとなる。

この値は切欠き底の応力状態が片振疲労限であるような切欠き材の疲労限の一つの点を与える。このような計算を片振りだけでなく他の平均応力の場合についても求めて連ねると、Fig. 11 左図の破線が得られる。

このような方法で、平滑材の両振りと片振りのデー

Fig. 12. σ_a - σ_m diagram for SCM435 steel. Fig. 13. σ_a - σ_m diagram for S15C steel.

を基に SCM 435 材と S15C 材の σ_a - σ_m 線図を求めて Fig. 12, 13 に示す。なお図中の点線は切欠き材の切欠き底の真応力の状態が片振りになる σ_a - σ_m の関係を上記の方法で計算し、各 K_t の場合の値を連ねたものである。この点線の変化状態は、切欠き材では公称平均応力が応力振幅に比べて相当高くならないと切欠き底の応力状態が片振りにならないことを示している。

SCM 435 材の平滑試験片の片振り疲労限は Fig. 12 に示すように両振疲労限と真破断力を結ぶ線図に近い。切欠き材について破線で表した推定値は、平滑材の σ_a - σ_m 線図によって平均応力の影響を考慮して求めたものであり、平滑材の場合にこう配があるのを反映してややこう配をもつ。実験値は推定値と同じようなこう配をもつ傾向にあるが平均応力の影響はあまりなく、本推定法はほぼ安全側の推定値を与えることがわかる。

S15C 材では平滑材の片振り疲労限が両振りの疲労限と真破断力 σ_T を結ぶ線よりも高く、平均応力の影響は疲労限においては平滑材でも非常に小さい。したがって切欠き材に対する推定線（破線）のこう配も小さく、また推定値と実験値はほぼ一致している。

以上二種の鋼材の疲労強度から推測すると、切欠き材では平均応力の影響は小さく、片振り荷重程度の平均応力の場合には両振りの場合とあまり差がない。平均応力がさらに高い場合でもその影響はそれ程顕著ではない。また、切欠き底の応力状態を簡易計算式を用いて計算し、平滑材の σ_a - σ_m 線図を用いて推定した強

度値は安全側の推定値を与える。

なお以上のように平均応力が一定に保たれる場合にはその影響は小さいが、実機の荷重パターンに見られるように起動、停止をひんぱんに行うときは平均応力が変動し、いわゆる間欠負荷波形となる。この場合は実験結果にも見られるように平均応力が変化しない場合より寿命が短くなることが知られている。切欠きのあるときに平均応力が変化する場合の寿命評価は実用上大切であり、その試験も実施中であるが、かなり寿命が短くなるようである。

ここで述べたのは比較的延性に富む材料についての結果であるが高強度材料によく見られるように、破壊の起点が内在する欠陥である場合にはその疲労強度がき裂の進展限界特性で決まると考えられるので平均応力の影響は著しいと思われる。

6 結 言

応力集中部の疲労き裂発生寿命を簡易推定する方法の妥当性を、(1) SCM 435 材を用いて両振応力下で調べるとともに、(2) 平均応力がある場合について SCM 435 材と S15C 材について調べたところ、次の結果が得られた。

(1) SCM 435 材の両振応力下の疲労き裂発生寿命は推定値とはほぼ一致したので、これまでに確認した S15C と S35C 材の結果も合せて考えると、他の金属材料についても本推定法が有効であろうと思われる。

(2) 平均応力の影響を、両振り、片振りおよび最大応力が引張強さの約 2/3 となる部分片振りについて調べたところ、平均応力の影響はここで示した推定法で安全側に推定できることがわかった。また片振り程度の平均応力の場合には平均応力の影響は小さかった。

付録 逆負荷時の応力ひずみ関係

単軸荷重の下での応力とひずみの関係を、材料の降伏挙動が移動硬化則に従う場合について考える。

移動硬化する材料の降伏曲面を Fig. 1A の上の図の左に示すように π 平面上の同心円 f_1 , f_2 で表す。いま、 σ_1 方向の応力を負荷すると、降伏曲面は負荷応力の増大とともに順次右側の図に示すように σ_1 の方へ引きずられる。つぎに除荷していくと、こんどは降伏曲面は応力の減少とともに σ_1 と反対の方向へ引きずられる。

これを多直線で近似した応力ひずみ関係で表すと Fig. 1A の下の図のようになる。OABC は材料の繰返し負荷時のヒステリシスループのピークを連ねた基本応力ひずみ関係で、C 点から除荷すると D 点までは弾性変形し、D 点で最小の降伏曲面 f_1 にあたる。CD 間の応力の変化は最小の降伏曲面 f_1 の直径に相当する分であり、引張負荷時の OA 間の応力の変化の 2 倍である。D 点をすぎた後 E 点で次の降伏曲面 f_2 にあ

Fig. 1A. Illustration of kinematic hardening and the stress strain relation.

たるがその長さ DE も同様に AB の 2 倍である。以下同様にして CDEF は OABC を縦軸、横軸方向とも 2 倍にし、 180° 回転して O 点を C 点に一致させればよいことがわかる。

折り返しの線図の関係式は基本の応力ひずみ関係を $\sigma = f(\epsilon)$ と表すと $\sigma/2 = f(\epsilon/2)$ で表される。例えば応力ひずみ関係が式(3)のように表されるときは、 ϵ を $\epsilon/2$, σ を $\sigma/2$ とおきかえて

$$\epsilon/2 = (\sigma/2)/E + \{(\sigma/2)/c\}^{1/n}$$

となり、この式を整理すると次式が得られる。

$$\epsilon = \sigma/E + 2\{\sigma/(2c)\}^{1/n} \quad (1A)$$

なお、折り返しの線図は基本線図の縦軸、横軸の値をそれぞれ 2 倍にする作図によっても得ることができる。

(昭和57年11月9日 第16回疲労シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 中村 宏, 恒成利康, 公江茂樹, 材料, **27**, 773 (1978).
- 2) 公江茂樹, 中村 宏, 恒成利康, 材料, **27**, 847 (1978).
- 3) 河本 実, 関 護雄, 材料試験, **4**, 971 (1955).
- 4) 中沢 一, 小泉 堯, 本間寛臣, 佐柳尚男, 日本機械学会論文集, **35**, 256 (1969).
- 5) 本間寛臣, 中沢 一, 日本機械学会論文集, **38**, 905 (1972).
- 6) 西谷弘信, 蓮尾康博, 日本機械学会論文集, **44**, 1 (1978).
- 7) 菊川 真, 城野政弘, 村田洋一, 材料, **29**, 998 (1980).
- 8) 公江茂樹, 中村 宏, 恒成利康, 岡田友信, 材料, **32**, 522 (1983).
- 9) Z. Mróz, J. Mech. Phys. Solids, **15**, 163 (1967).
- 10) 堀川 武, 中村 宏, 公江茂樹, 日本機械学会論文集, **40**, 1239 (1974).
- 11) 堀川 武, 岡田友信, 中村 宏, 日本機械学会論文集, **45**, 293 (1979).
- 12) 中村 宏, 中野英明, 恒成利康, 堀川 武, 日本船用機関学会誌, **18**, 657 (1983).
- 13) 公江茂樹, 恒成利康, 機械設計, **28**, No. 5, 29 (1984).