

# 蒸気タービン高圧ケーシングの熱応力

## Thermal Stress in High Pressure Steam Turbine Casing

蒸気タービン高圧ケーシングは、高温・高圧蒸気を内包して長年月のタービン運転に耐える高い信頼性をもつものでなければならない。そのためには、精度の良い熱応力解析が不可欠である。

この論文では、モデルによる熱応力試験、応力測定ゲージの較正試験及び3次元有限要素法による計算について述べる。この結果、求められた熱応力とその分布によって、ケーシング形状の最適化が図られると同時に、ケーシングの寿命評価が可能となる。ここではその一端についても触れる。

大田原康彦\* Ôtawara Yasuhiko  
池内和雄\* Ikeuchi Kazuo  
加藤文雄\*\* Katô Fumio

### 1 緒言

蒸気タービン高圧ケーシングは、高温・高圧蒸気を内包する過酷な使用条件のもとで、長年月の安全なタービン運転を保証するものでなければならない。このケーシングの強度評価には、内圧による応力だけでなく高温蒸気にさらされることによって発生する非定常、及び定常の熱応力解析が必要である。精度の良い強度評価によってケーシング寿命の把握と、最適なケーシング形状設計が可能となる。

この論文では、熱応力に主眼をおいて行なった研究、開発の一端について論述する。

### 2 タービン高圧ケーシング熱応力試験

熱応力を正確に把握するには、ケーシング寿命の推定と最適なケーシング形状の決定が重要であるが、ケーシングの形状が複雑であるため、理論計算だけでは十分な精度が期待しにくい。そこで、モデルによる熱応力試験を行なった。

ケーシングは外部ケーシングと内部ケーシングとに分かれ、更に内部ケーシングは、軸方向に幾つか分割されている。外ケーシングは、高圧タービン・中圧タービンを一つのケーシングに収めている。したがって、特に外ケーシングのほうが使用条件は厳しいといえる。そのため、外ケーシングについて熱応力試験を行なった。

#### (1) 実験装置

モデルは、350MW級再熱形高・中圧一体ケーシングについてプラスチック製の縮尺 $\frac{1}{10}$ のものを作製した。図1にその外形を示す。加熱流体としては空気を用い、実機の起動条件を模擬して温度を上げてケーシング内に導き、過渡状態での熱応力を測定した。ここで留意した点は、外ケーシングだけでなく内ケーシング形状も実機相当とし、ケーシング中の流れを実機に近づけたことにある。図2にこの実験装置の概略図を示す。熱風ブロワで加熱された空気は、主蒸気管及び再熱蒸気管を通じてケーシング内に入り、排気管を通じて排出される。

#### (2) 相似則と実験条件

モデル実験での相似則を適用するには次の二条件が必要である。(a)フーリエ数( $F=Kt/l^2$ )を一致させる。(b)ビオー数( $B=hl/\lambda$ )を一致させる。ここで温度場が相似となれば、実機熱応力 $\sigma_p$ とモデル熱応力 $\sigma_m$ との関係式は次式となる。

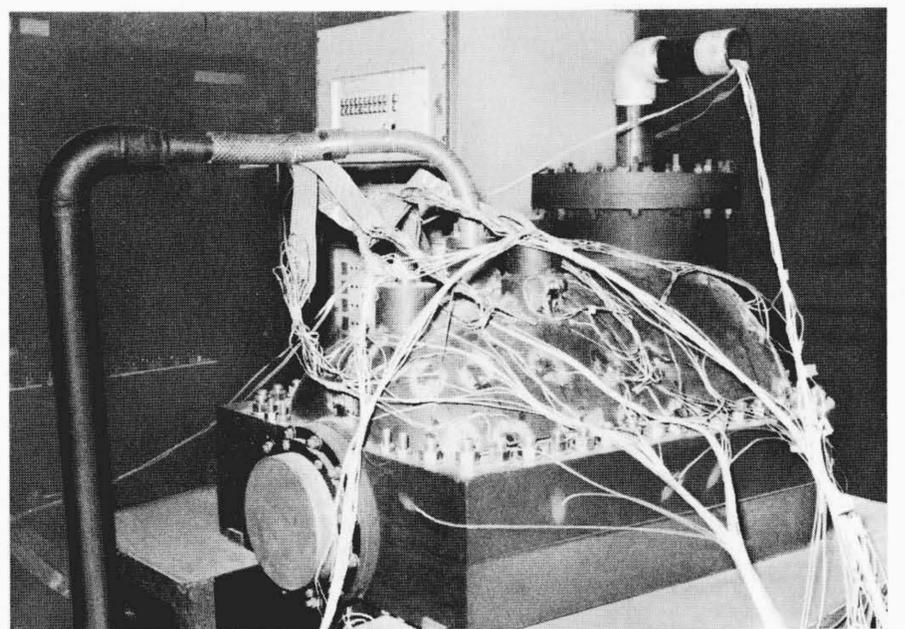


図1 実験装置の外観 実機の $\frac{1}{10}$ スケールプラスチック製モデルの実験状況、ゲージはり付け数110点(2方向ゲージ)、熱電対取付数159点とした。

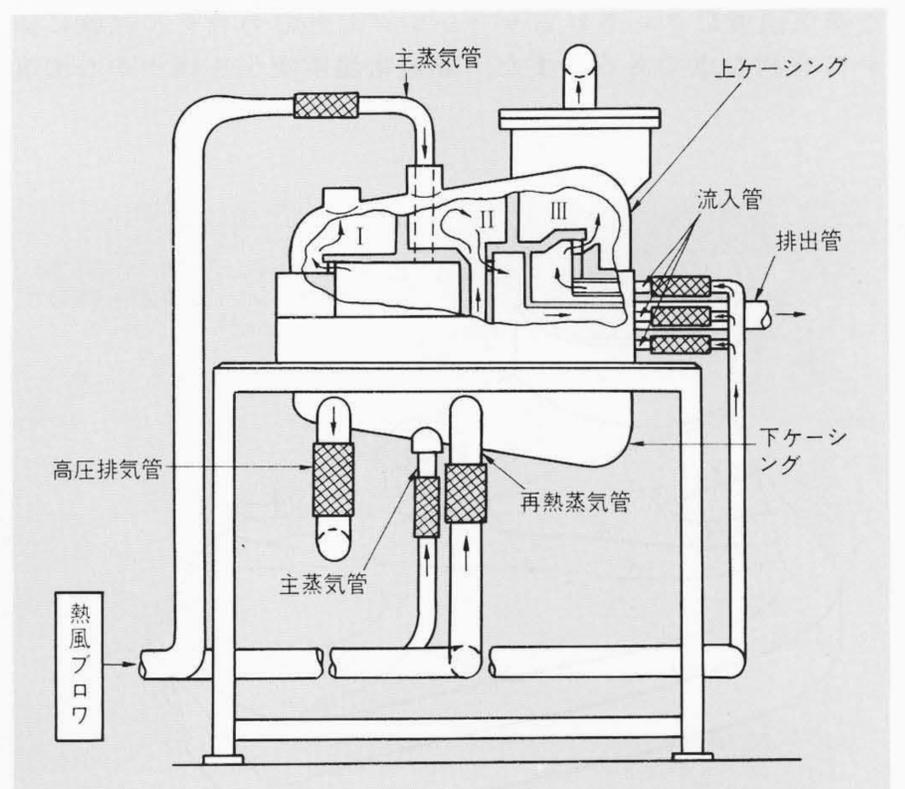


図2 実験装置断面図 内外ケーシング共、実機と相似形状とし、加熱流体の流れ状況も実機と同一とすることにより、熱応力の相似則が適用できる。

\* 日立製作所日立工場 \*\* 日立製作所機械研究所

表1 モデルと実機との相似則関係 プラスチックは熱伝導率小、ヤング率小、線膨張率大のため、温度差をつけやすく、時間を引き延ばして観察できるので熱応力測定に適している。

		プラスチック製モデル/実機
材料定数比	熱伝導率	0.02
	比熱	2.1
	ヤング率	0.04
	比重	0.2
	線膨張率	2.7
相似比	寸法比	1/5
	時間比	1/1.4
	熱伝導係数比	1/8.6
	熱応力比	$0.114 \times \Delta T_p / \Delta T_m$

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_m} = \frac{E_p}{E_m} \cdot \frac{(1-\nu_m)}{(1-\nu_p)} \cdot \frac{\alpha_p}{\alpha_m} \cdot \frac{\Delta T_p}{\Delta T_m} \dots\dots\dots(1)$$

ここに K: 温度伝導度

l: 長さ

E: ヤング率

h: 熱伝達率

t: 時間

α: 線膨張係数

λ: 熱伝導率

ν: ポアソン比

ΔT: 温度差

添字 p: 実機

m: モデル

実験では、前記(a)(b)の相似則を満足させるよう実験条件を選び、ひずみゲージでσ<sub>m</sub>を測定して実機応力σ<sub>p</sub>を求めた。

プラスチック製モデルと実機との材料定数比及び相似比を表1に示す。

プラスチック製モデルでは線膨張係数が大きいので、比較的小温度差で大きなひずみを得られるので測定が容易であり、かつ熱伝導率が小さいので、小熱源で大きな温度差が得られる。これは、タービンケーシングのように500°Cを超えるような蒸気温度にさらされるケーシングの熱応力モデル試験に極めて有利な点である。また、非定常温度変化を緩やかな温度

変化として観察できるので、過渡状態の観察にも適している。

熱応力測定に際しての最大の問題は、ストレインゲージの熱ヒステリシスによる誤差である。したがって、測定前にモデルの加熱・冷却サイクルを繰り返し、ゲージの安定化を図った。

(3) 試験結果

ストレインゲージによる測定点は110点(220方向)、また温度測定点は159点をとった。加熱空気は最高90°Cまで温度上昇させ、108 Nm<sup>3</sup>/hを流した。熱サイクルとしては、温度上昇過程、定常過程及び冷却過程を与えた。

図3(a), (b)は、起動後60分の最大応力発生時の応力測定結果を示すものである。この測定結果に基づいて、等応力線で応力分布を示した。起動後60分とは、温度上昇過程で流入空気温度87°Cとなり、最高温度(90°C)に近づいて温度上昇が鈍化する時期である。ここで、最大応力は上ケーシングの左右対称線上で、フランジとの継ぎ目に当たる点(同図(a)中の測定点No.1)で発生している。これを実機相当熱応力に換算すると約10kg/mm<sup>2</sup>となる。またこの熱応力は、周方向よりも長手方向が高い。この傾向は下ケーシングの同一点でも同じである。このように、この部分で長手方向の応力が大きくなる理由としては、(1)高圧排気室入口で流れが直接ケーシング内面に当たり、内外面温度差が大きい。(2)ケーシングの伸びがフランジで拘束される。などの理由と考えられる。実機では、熱応力に加え内圧による応力が付加されるので、応力の高い部分には応力集中を低減するような考慮が払われている。このように、全体の応力レベルと分布を知ることは強度設計上極めて有益である。

図4は、最大応力発生点である測定点No.1について温度と応力の時間的変化を示したものである。過渡的な温度上昇時に熱応力が上昇し、温度が定常状態になると漸減している。定常状態での熱応力は、ケーシング外表面からの放散熱量に支配されるから、実機では保温材を十分に施工することにより、応力低減を期待することができる。

3 ストレインゲージの零点移動

通常に応力測定に比べ熱応力測定では、測定対象であるひずみが増加するとともに、使用条件である温度が変わる。更に、

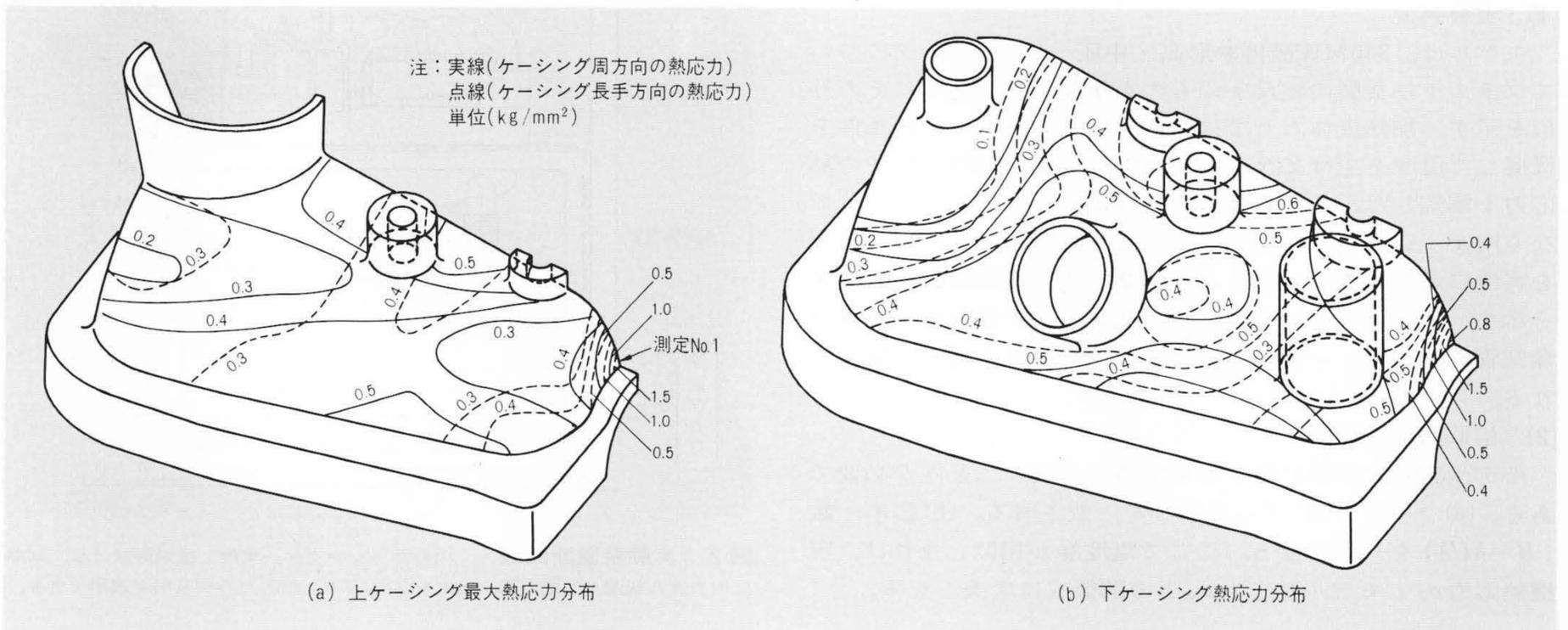


図3 最大熱応力分布 過渡熱応力は、ケーシング中央の高温部では比較的lowく、水平フランジの拘束が強く、流体の速度が速い、高圧排気部で大きい。

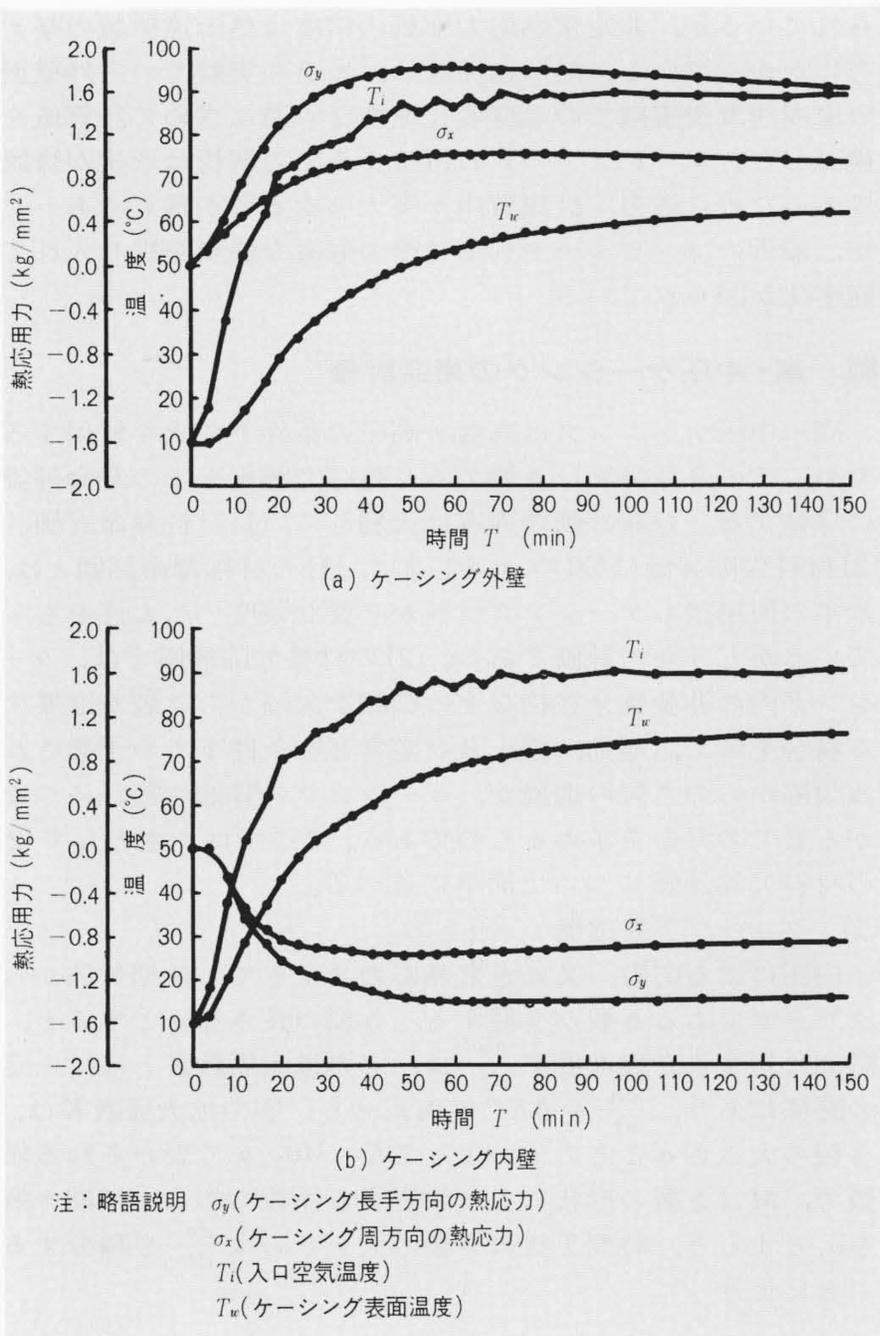


図4 熱応力実測値(No. 1点) 温度と熱応力の時間的変化を示す。温度変化と内外壁応力の対応が明確に表われる。

自然熱膨張による見掛けひずみを差し引いたものが測定しようとしているひずみになるので、慎重な取扱いが必要である。

そこで、前述のモデル試験に先立ってストレインゲージの検定試験を行なった。試験した内容は、ストレインゲージの零点移動と温度特性である。

ストレインゲージの指示値を  $\epsilon_{app}$  として、ゲージの零点移動及びゲージ率の変化が存在する温度場での外荷重並びに熱応力によって生ずる真のひずみ  $\epsilon$  は、

$$\epsilon = \{ \epsilon_{app} - F(T) \} (K_0 / K) \dots \dots \dots (2)$$

ここで  $T$ : 測定点での温度

$K_0$ : 室温でのゲージ率

$K$ : 温度  $T$  でのゲージ率

$F(T)$ : ゲージの温度  $T$  での見掛けひずみの指示値

通常、 $K_0/K$  は一定の温度範囲でゲージは使用するが、熱応力測定では、 $\epsilon_{app}$  と  $F(T)$  が同レベルの大きさになることもあるから、精度よく  $F(T)$  を求めておくことが重要である。これが温度特性の試験である。また  $F(T)$  が、熱サイクルの繰返しに従って変化し、一定にならないと測定は不可能である。そこで、幾つかの条件を変えて熱サイクルを繰返し、常温に戻したときに  $F(\text{常温}) = 0$  となるかどうかをみた。  $F(\text{常温}) \neq 0$  のとき、これを零点移動とした。

図5はストレインゲージ検定試験装置を示す。テストバーの両端を単純支持となるよう三角柱で支えた。これはバーの

たわみによって支持点距離が変化しないようにしたものである。バーの中央部に荷重おもりを下げ、テストバー荷重をかけた。荷重おもりをつり下げている二つの支持部の間のテストバーでは曲げモーメントは一定である。そこに、ストレインゲージをはり付けた。ストレインゲージはり付け部の周囲を加熱炉で覆い、雰囲気温度を変えられるようにした。また、荷重おもりを増減することにより荷重を変え、テストバー表面のひずみも変化させることができる。

試験したゲージは箔フェステルゲージである。接着剤にはシアノアクリレート系を、コーティング剤にはシリコンコンパウンドを用いた。温度は  $0 \sim 80^\circ\text{C}$ 、荷重はひずみで  $0 \sim 818 \times 10^{-6}$  ストレインの間で試験した。試験したゲージは約1,000枚である。

ゲージの温度補償には、A-D式と3線式を用いた。A-D式とは、測定対象物に直接はり付けたアクティブゲージ(A)を、その近傍にひずみが出ぬよう取り付けしたダミー板などにはり付けたダミーゲージ(D)で補償する方式である。アクティブゲージとダミーゲージが同一温度であり、かつダミー板の熱膨張率が測定対象物と同じであれば、ダミーゲージで測定対象物の真のひずみ以外の見掛けひずみが検出される。ここでいう見掛けひずみとは、温度上昇による自然熱膨張、ゲージ抵抗の変化などによって出るゲージ指示値を意味する。したがって、それを差し引いたものが真のひずみとなる。3線式では用いるゲージは1枚であるが、外力をかけずに自然熱膨張している測定物にはり付けたときの検出値は零になるようゲージの材質などを選択してあり、更にゲージからのリード線を3本として、リード線の温度補償を行なう方式である。

実際には上記のいずれの補償方式でも完全ではないので、なお残る見掛けひずみ  $F(T)$  をあらかじめ試験するわけである。

図6は温度と荷重(ひずみ)のサイクルを与えて、ストレインゲージの零点移動をみた一例である。ゲージのはり付けは比較的熟練した者が行ない、A-D式26点、3線式16点で行なった。温度・荷重サイクルを繰り返すと、零点移動量はほぼ一定に落ち着いてくるが、最初の1サイクルでの零点移動が大きい。これからみると、最低2サイクル程度経てからデータをとる必要があると思われる。零点移動は3線式、A-D式共大差はないが、ばらつきは  $80\mu\text{s}$  ( $80 \times 10^{-6}$  ストレイン) はみえておく必要があるようである。

図7は温度特性  $F(T)$  を調べたもので、荷重は与えず、熱サイクルだけを繰り返した。A-D式32点、3線式64点での例

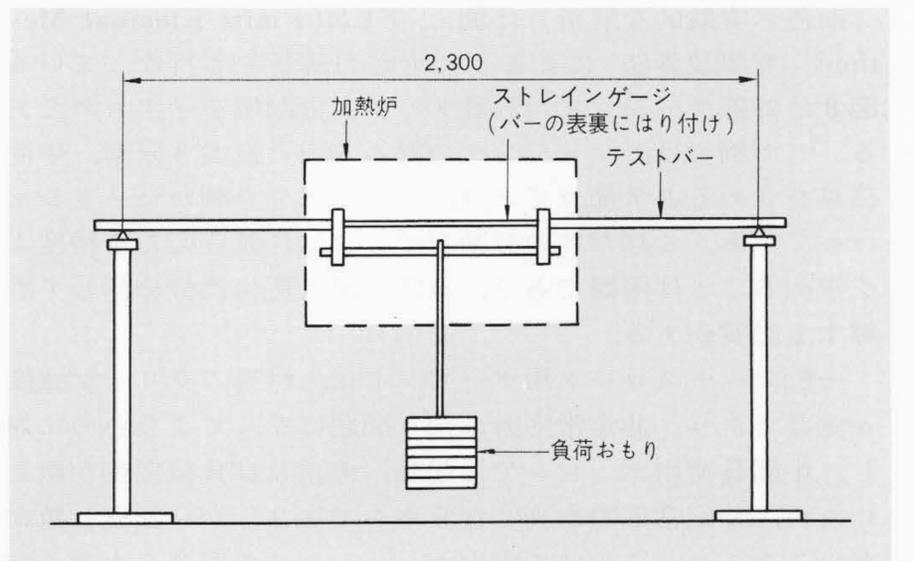


図5 ストレインゲージ検定装置 テストバー中央部は同一ひずみであり、自由に荷重、温度を変えることができる。

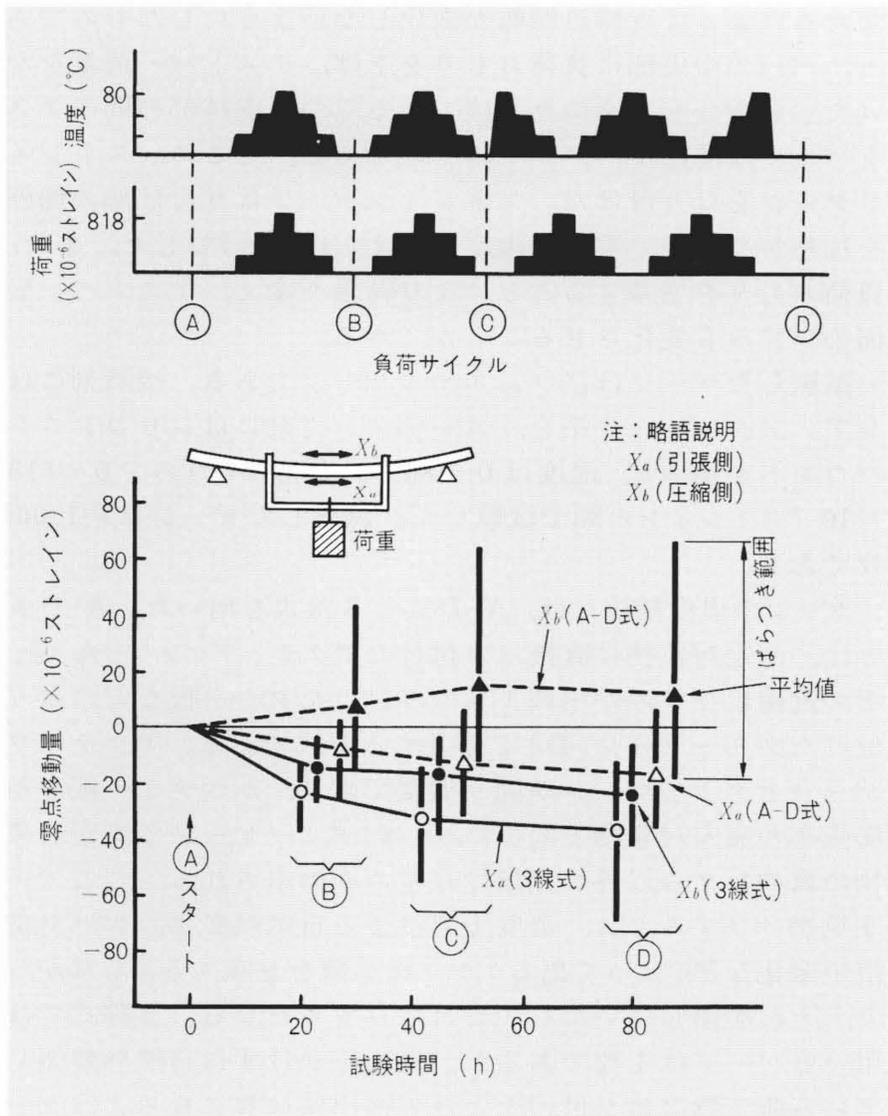


図6 負荷サイクルと零点移動 最低2サイクル以上の温度あるいは荷重を付加した後のデータを採用しないと、誤差が大きい。

である。熱サイクルを繰り返すとばらつきは幾分減少し、また再現性がありほぼ一定のカーブとなる。データのばらつきでは、A-D式のほうが優れている。

以上からみると、温度変化を伴うひずみ測定では、A-D式のほうが優れているといえる。また、精度よい測定には、ストレインゲージ、接着剤、コーティング剤、リード線などの組合せ及び作業法の影響を受けやすいので、数多くのストレインゲージで検定して実測データを較正することが重要である。基礎的な点であるが、おろそかにできぬところである。

図6、7は試験結果の一例を示すものであるが、蓄積した膨大なデータは、その後の測定に大きな貢献をしている。

#### 4 3次元応力解析

前述の実験的な解析とは別に、FEM(Finite Element Method:有限要素法)による3次元応力解析も行なっている。図8は外部ケーシングの計算メッシュ分割例を示すものである。この例では、ケーシングの厚み方向に最大3分割、中間節点を含めると7節点であり、高応力部分を細かいメッシュとしている。これだけの分割数でも全体に渡る応力を精度よく求めることは困難であり、高応力部は更に部分分割して計算する必要がある。

一般にベースロード用タービンでは、材料のクリープ強度が重要であり、非定常応力は余り問題になってこないのに対し、中間負荷用タービンでは起動、停止及び負荷変動が激しいため、非定常応力が高くなりがちであり、かつ繰返し数が多いことより、この種の応力がケーシングの寿命を大きく左右する。内圧による応力、定常熱応力に関しては計算条件が比較的明確であり、実験値とかなりよく一致することが認め

られているが、非定常熱応力解析の精度は熱伝達係数の与え方にかかっている。熱伝達係数は、モデル実験での内外壁面の温度速度や実機での温度変化速度から逆に求めて計算値を検証した。ケーシングのFEMによる応力解析は形状が複雑であるために労力、計算費用が多くなるのが難点であったが、最近のコンピュータ利用技術の急激な進歩を採り入れて能率化が図られている。

#### 5 高・中圧ケーシングの寿命評価

高・中圧ケーシングは高温・高圧の条件下で永年使用するため、その寿命評価は重要であり熱応力解析もこの寿命評価に帰結する。寿命評価の内容は大別して、(1)材料寿命評価、(2)材料欠陥評価に分けられる。まず、(1)の材料寿命評価とは、永年の使用後もケーシング材料が必要な強度・じん性を持っているかどうかの評価である。(2)の材料欠陥評価とは、ケーシング内の非金属介在物などの微細な欠陥からき裂が進展する場合を考え、起動、停止及び定常運転条件下での予想される欠陥からのき裂の進展が、ケーシングの貫通や割れにつながるまでの寿命を求めるものである。ここでは、主として(2)の材料欠陥評価について簡単に述べる。

##### (1) クリープき裂進展

内圧による応力、又は定常熱応力によって、初期欠陥からクリープによるき裂が進展する。き裂の長さを $a$ とすると、時間に対するき裂進展率 $\frac{da}{dt}$ は、応力拡大係数 $K$ とほぼ一定の関係にあり、 $\frac{da}{dt} = AK^m$ で表わせる。応力拡大係数 $K$ は、き裂の大きさ $a$ と応力 $\sigma$ によって $K = M\sigma\sqrt{a}$ で表わされる係数で、 $M$ はき裂の形状によって定まる係数である。初期き裂を $a_i$ とすると、時間 $T$ 後のき裂の大きさ $a_T$ は $\frac{da}{dt}$ を積分することにより

$$a_T = \left[ \frac{2a_i^{\frac{m-2}{2}}}{T \cdot (2-m) AM^m \sigma^m a_i^{\frac{m-2}{2}} + 2} \right]^{\frac{2}{m-2}} \dots\dots\dots(3)$$

となる。ここで、 $a_T$ が脆性破壊を起こすき裂の大きさ $a_c$ より小さく、かつケーシング肉厚 $t_c$ よりも小さければ、余寿命ありと評価される。ケーシング材として広く使われるCr-Mo-V 鋳鋼については佐々木<sup>1)</sup>らの研究があり、図9にその一部を示す。高温になるほどクリープき裂進展は速くなる。

##### (2) 繰返し応力によるき裂進展

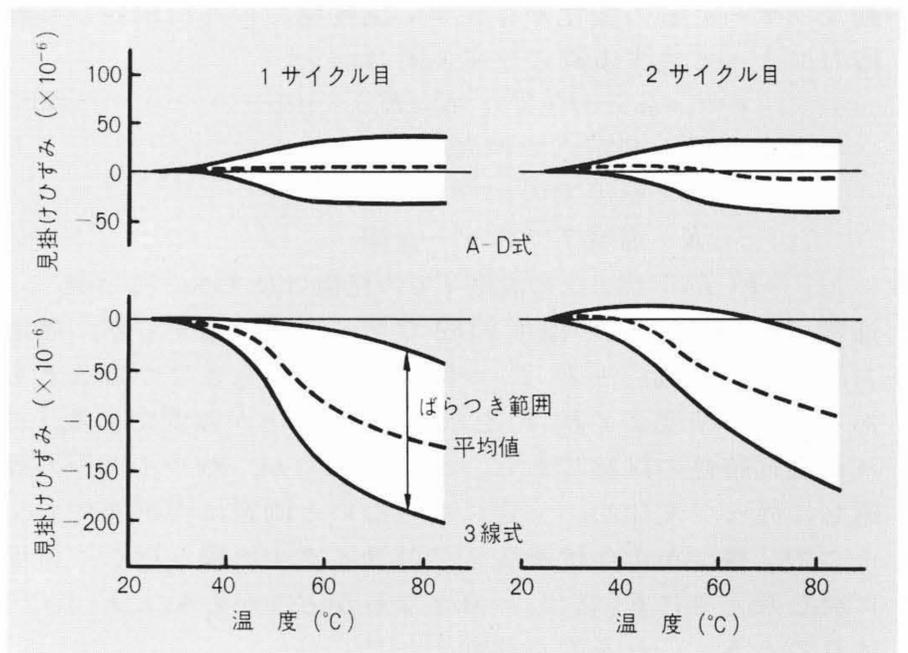


図7 温度特性比較 温度変化を伴うひずみ測定では、A-D式結線にすべきである。

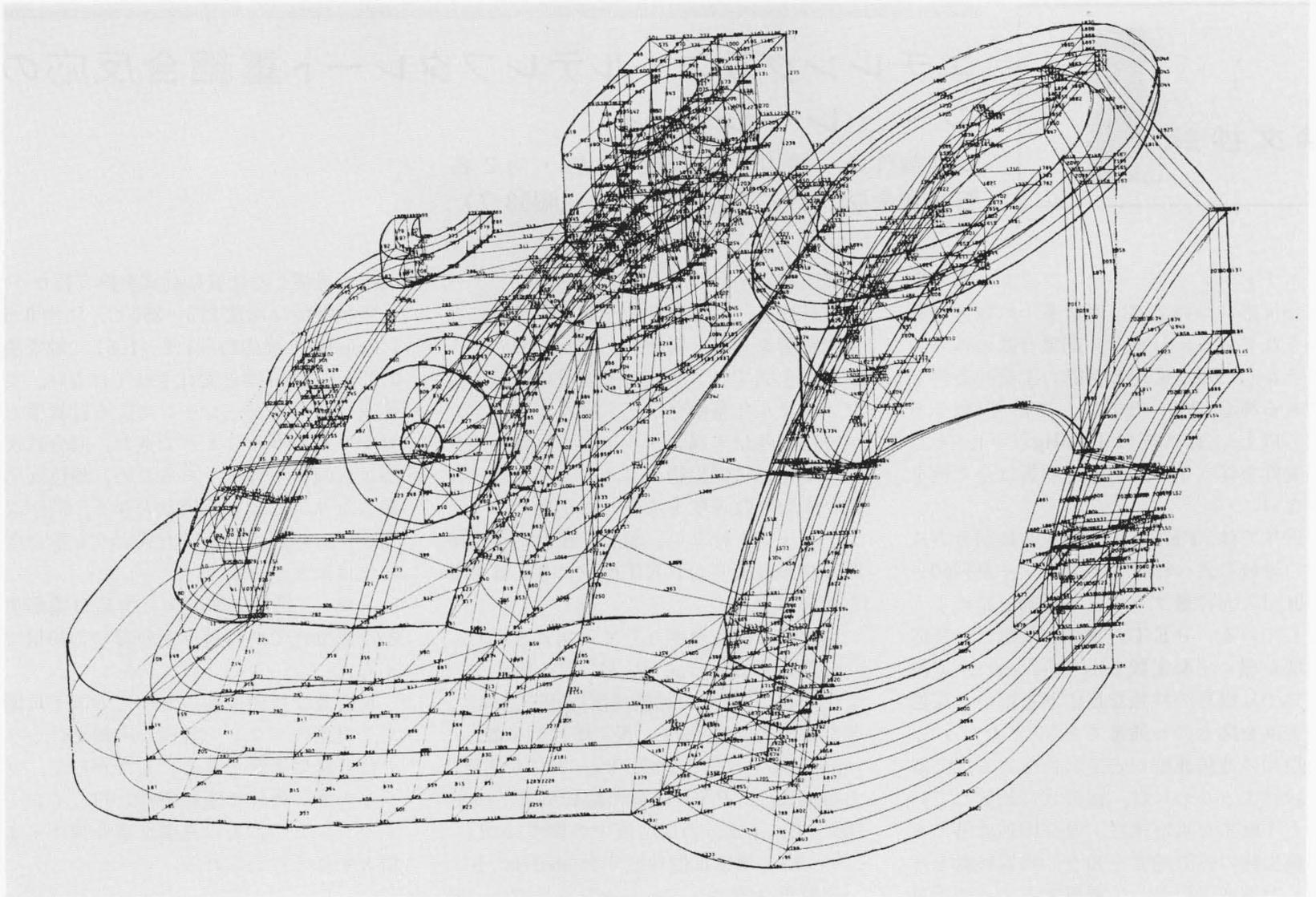


図8 3次元応力解析用分割例 有限要素法による応力解析のケーシング全体のメッシュ分割例である。

起動・停止時、あるいは急激な蒸気条件変化によって生ずる非定常熱応力は、繰返し応力によるき裂進展に参与する。このき裂進展の考え方は、ロータの許容欠陥判定に採り入れられ実用に供されているものである<sup>2)</sup>。

クリープき裂進展と同様に、応力振幅 $\Delta\sigma$ に対応する応力拡大係数 $\Delta K$ に対して、近似的にき裂進展率 $\frac{da}{dN} = B(\Delta K)^n$ の関係があるので、これを繰返し数 $N_f$ まで積分することによりき裂 $a_f$ を(4)式により求めることができる。

$\Delta K = Q(\Delta\sigma)\sqrt{a}$ 、初期き裂を $a_i$ とすると、

$$a_f = \left[ \frac{2a_i^{\frac{n-2}{2}}}{N_f \cdot (2-n) B Q^n (\Delta\sigma)^n a_i^{\frac{n-2}{2}} + 2} \right]^{\frac{2}{n-2}} \dots (4)$$

## 6 結 言

蒸気タービンの高・中圧ケーシングで、強度評価の重要な項目である熱応力を求めるために行なったモデル試験、及びストレインゲージによる測定の前校正試験について述べた。更に、試験値に対応する3次元FEMによる応力解析を紹介した。また、このようにして求めた熱応力をもとに、タービンの寿命評価を行なう手法についてその概要を述べた。

この論文では、現在までの研究及び開発のごく一部を述べたにとどまったが、現在大きく進展しつつある高信頼性蒸気タービン開発の一助になれば幸いと考える次第である。

## 参考文献

- 1) 佐々木, 外: CrMoV 鋳鋼のクリープき裂進展, 材料, 第25巻, 第270号, 236~240ページ(昭51-3)
- 2) K.Kumeno et al.: Defects and Fracture Strength of Large Rotor Forgings for Steam Turbines, ASME 75-Pwr-10

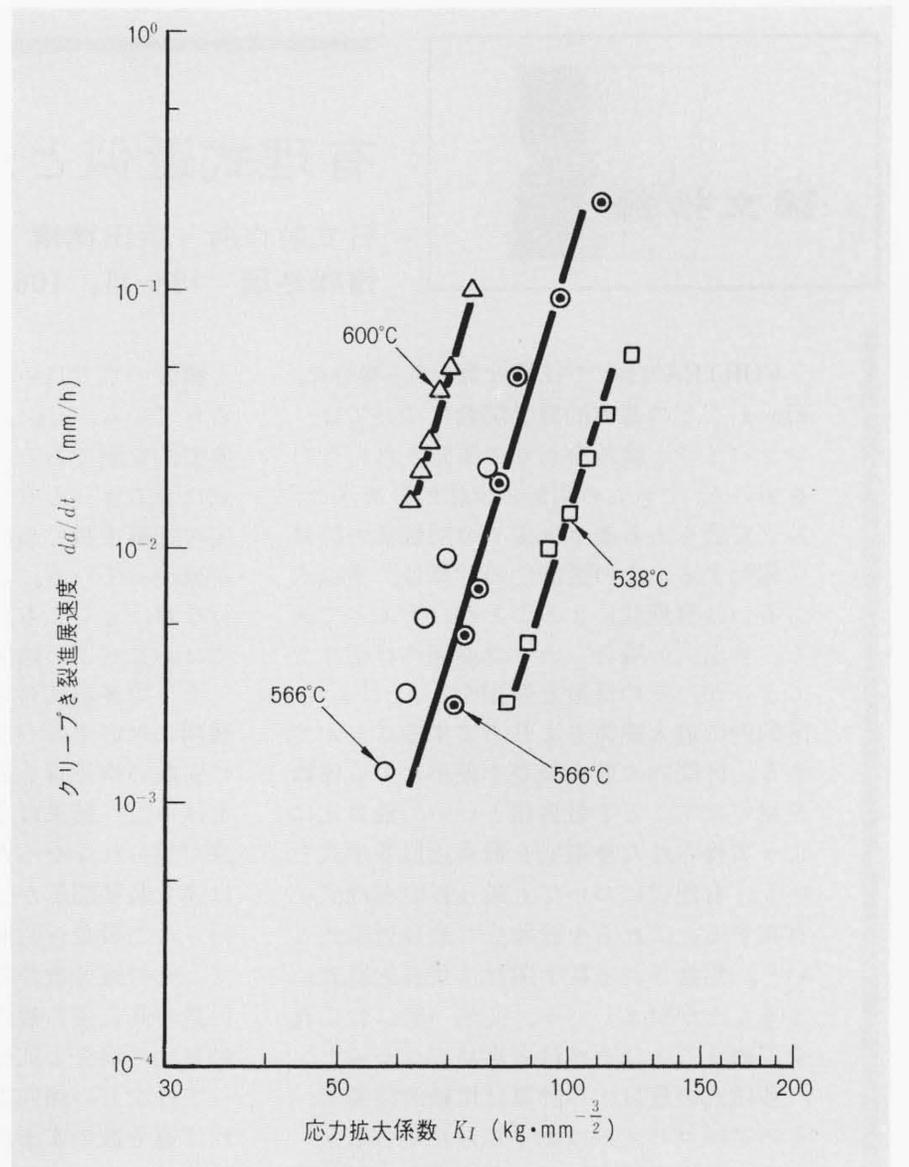


図9 クリープき裂進展速度の温度依存性 使用温度により、材料のクリープき裂進展速度は大幅に変わり、寿命への影響は極めて大きい。

## 論文抄録



## エチレングリコールテレフタレート重縮合反応のシミュレーション

日立製作所 横山 宏・佐野 強・他2名  
石油学会誌 21-5, 271-276 (昭53-7)

エチレングリコールテレフタレートの重縮合反応については、既に多くの報告が発表されている。しかし、高重合度のポリエステル(PET)を得る実際の工業的条件下である高温(260~290°C)、高粘度(数千ポアズ以上)、高真空(1.0mmHg以下)、そして攪拌を伴う系の動力学的解析は全く例をみない。

近年では、PETの工業的生産は回分方式から連続方式へ移行しており、一系60~100t/dの大容量プラントが稼動を始めようとしている。PETの重縮合反応は、反応速度が遅く平衡定数も小さいために、連続方式では横形の特殊な反応器を用いて反応の促進を図るのが通常である。したがって、長期間の連続運転が安定に行なえる反応器を設計するためには、回分式に比較していっそう厳密な反応速度、及び律速段階である副生物の拡散速度を知り、物質移動を考慮した速度過程として解析することが不可欠である。筆者らは、回分式実験装置及び

連続方式パイロットプラントを用いてデータを採取し、反応条件がPETの生成に及ぼす影響をみると同時に、上記の観点からPET生成でのエステル交換重縮合反応及びエステル化重縮合反応、副反応でのポリマー主鎖及び末端エチルエステル基の熱分解反応並びに副生物のエチレングリコール及び水の拡散速度を考慮した反応のシミュレーションを行ない、温度、圧力、反応時間及び触媒濃度がPET生成に与える影響を検討した。

副生物の拡散速度としては次式を得た。

$$D_i = f(S, N, \mu, P, P_i^0, C_i, K_D)$$

ここで  $D_i$ :  $i$ 成分の拡散速度(mol/△・h),  $S$ : 拡散表面積(m<sup>2</sup>),  $N$ : 攪拌回転数(rpm),  $\mu$ : 反応液粘度(P),  $P$ : 反応圧力(mmHg),  $P_i^0$ :  $i$ 成分の飽和蒸気圧(mmHg),  $C_i$ :  $i$ 成分の反応液中の濃度(mol/△),  $K_D$ : 総括拡散速度定数(mol/m<sup>3</sup>・h)

連続重合器のシミュレーションでは、攪拌翼を1段とした槽列モデルを適用し、逆

流量を考慮した物質移動式を得て行なった。

実験条件は温度275~285°C、圧力0.5~1.0mmHg、反応時間1.2~1.8h、触媒濃度0.03~0.09wt%と変化させて行ない、実測値及びシミュレーションによる計算値と良好な一致を得ることができた。回分式反応器は1.0lの小容量であるため、単位反応液量当たりの拡散表面積が大きく、同一温度及び反応時間では連続方式よりも重合度の変化は大きかった。

しかし、拡散効率を表わす  $K_D$  は横形重合器が回分式である縦形重合器の約20倍であった。

反応及び操作条件のすべての因子に関して、実際のプラント規模の実験を行なうことは非常に困難である。したがって、プラントの設計条件や運転条件に対してシミュレーションの占める重要性は今後ますます増大すると考えられる。

## 論文抄録



## 有理式近似と連分数近似の最良化について

日立製作所 浜田穂積  
情報処理 19-11, 1065-1071 (昭53-11)

FORTRANなどで技術計算をする場合に、 $\sin x$ などの基本的数学関数については、コンパイラと組み合わせて用意されたものを用いる。これらの関数の具体的計算法は、独立変数がある基本区間での関数値の計算に環元する。その区間での計算は、多項式あるいは有理式によるものがほとんどである。多項式の場合、テーラ展開の打切りでもよいが、その係数を修正することにより、区間内の最大誤差をより小にすることができる。区間内の最大誤差を最小にする係数を見いだすことを最良化といい、最良化によって得られた多項式を最良近似多項式という。有理式についても最良近似有理式が存在する。これらを総称して最良近似式という。用意される数学関数は最良近似式によるものが望ましいが、従来一般にはこれを求めることはそれほど容易でなかった。

多項式の最良化の計算は比較的容易で、そのアルゴリズムはよく知られているが、実際には修正量を計算するほうが、計算量

と精度の点で良い結果が得られることも知られている。 $\sin x$ ,  $\cos x$ はこれを用いる典型的な例である。ところが $\tan x$ は多項式によるよりも有理式によるほうが、同程度の計算手数で高精度の値が得られることが分かっている。しかし有理式の最良化を行なおうとしても、通常用いられる計算法ではあまりよい結果が得られない。

そこで多項式の場合にならって、テーラ展開に対応するパデ展開をもとにして、その係数の修正量を求める方法により最良化を試みた。結果は多項式の場合ほどには改良が見られなかった。ところで、 $\tan x$ には連分数展開形が知られているので、上で得られた最良近似有理式を連分数に展開して、元の連分数の打切りの係数と比較し、係数の修正量の観点から見ると、多項式の最良化の場合と同様の、最良化の計算によって好ましい傾向が観察できた。そうであれば連分数のまま、その係数の修正量を計算することによって最良化できることが

望ましいが、多項式の場合と比較して、修正量を未知数とする方程式は高度に非線型となり、計算は不可能と思えた。しかし、修正量の絶対値がもとの係数の絶対値と比べかなり小であることを利用して近似的に線型化し、収束計算によって比較的容易に計算できることを示した。

以上により、有理式の形の最良近似式を得たい場合も、連分数近似の最良化を行なった後に有理式に変形するほうが、計算量、精度の点で良いことを確認した。また、連分数近似の最良化の手法は一般的な形で示したので、多項式の場合と同様に、比較的収束の良い連分数の打切りによる近似式の最良化が容易に行なえる。以上のほか、最良化によって得られた修正量の有効数字が何桁有意であるかを決定する方法を示すことにより、最良化の計算を倍精度で行なっても、四倍精度用の公式まで計算できる予想外の好結果も十分あり得ることを確認することができた。