

ポンプ設備予防保全の新技术

Recent Technology for Preventive Maintenance of Pump

現在運転されている火力発電設備の大半は、高度経済成長期に建設され運転開始後10年以上を経過したものである。一方、電力の需給事情によって運用も過酷化し、DSS(毎日起動・停止)やWSS(毎週起動・停止)などの中間負荷運用を求められている。このため、火力発電設備に納入されたポンプも経年劣化および運転の過酷化に対して安定運転を維持継続するため、従来よりも精密な検査による保守管理を行うことが重要な課題となっている。

このような背景のもと、火力発電設備に納入されるポンプの中で最重要補機であるボイラ給水ポンプを対象として予防保全の新技术の開発に取り組み、ポンプ軸の余寿命診断の基礎的技術を確立するとともに余寿命診断装置を開発した。

植山淑治* *Yoshiharu Ueyama*
 三角洋史* *Hiroshi Misumi*
 林 真琴** *Makoto Hayashi*
 橋本義之*** *Yoshiyuki Hashimoto*

1 緒 言

わが国の火力発電所に納入されたポンプは、高度経済成長期の昭和30年代から昭和40年代に製作されたものが多く、プラント建設後15年以上を経過したものが全納入台数の60~70%を占め、機器の経年化がますます進む状況にある。

一方、電力の需給事情からプラントのDSS(毎日起動・停止)化やWSS(毎週起動・停止)化に伴い、ポンプの起動・停止回数や低流量域での運転時間は増加する傾向にある。このため、ベースロード運転を前提として設計製作された経年火力ポンプは、運転条件の過酷化に対し種々の耐力向上策を実施するとともに¹⁾、従来よりも高精度な点検技術を保守管理に取り入れることによって、安定運転を維持することが可能になると考えられる(図1参照)。

本稿では、火力発電設備に納入されたポンプの予防保全技術、および最重要補機であるボイラ給水ポンプを対象として開発した余寿命診断技術について以下に述べる。

2 ポンプの予防保全システム

ポンプの余寿命診断を行う方法としては、大別して以下の3種類の方法がある。将来はトータルシステム化を図り、図2に示すような総合予防保全システムを確立する必要があると考える。

- (1) 運転履歴や定期検査履歴に基づく簡易寿命診断
- (2) 運転中の軸振動などを測定、評価する故障診断
- (3) 非破壊検査に基づく余寿命診断

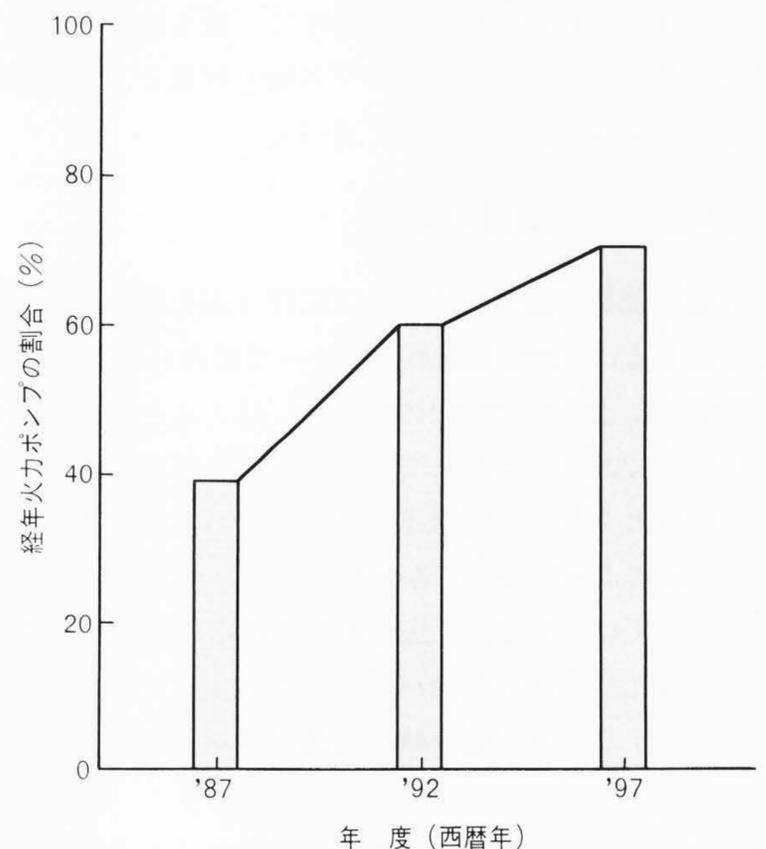
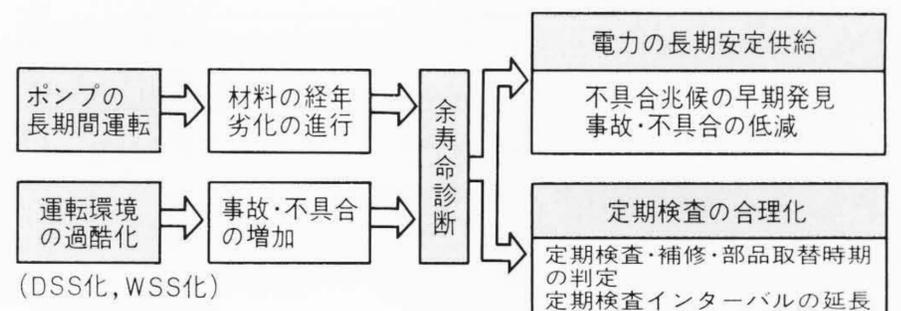
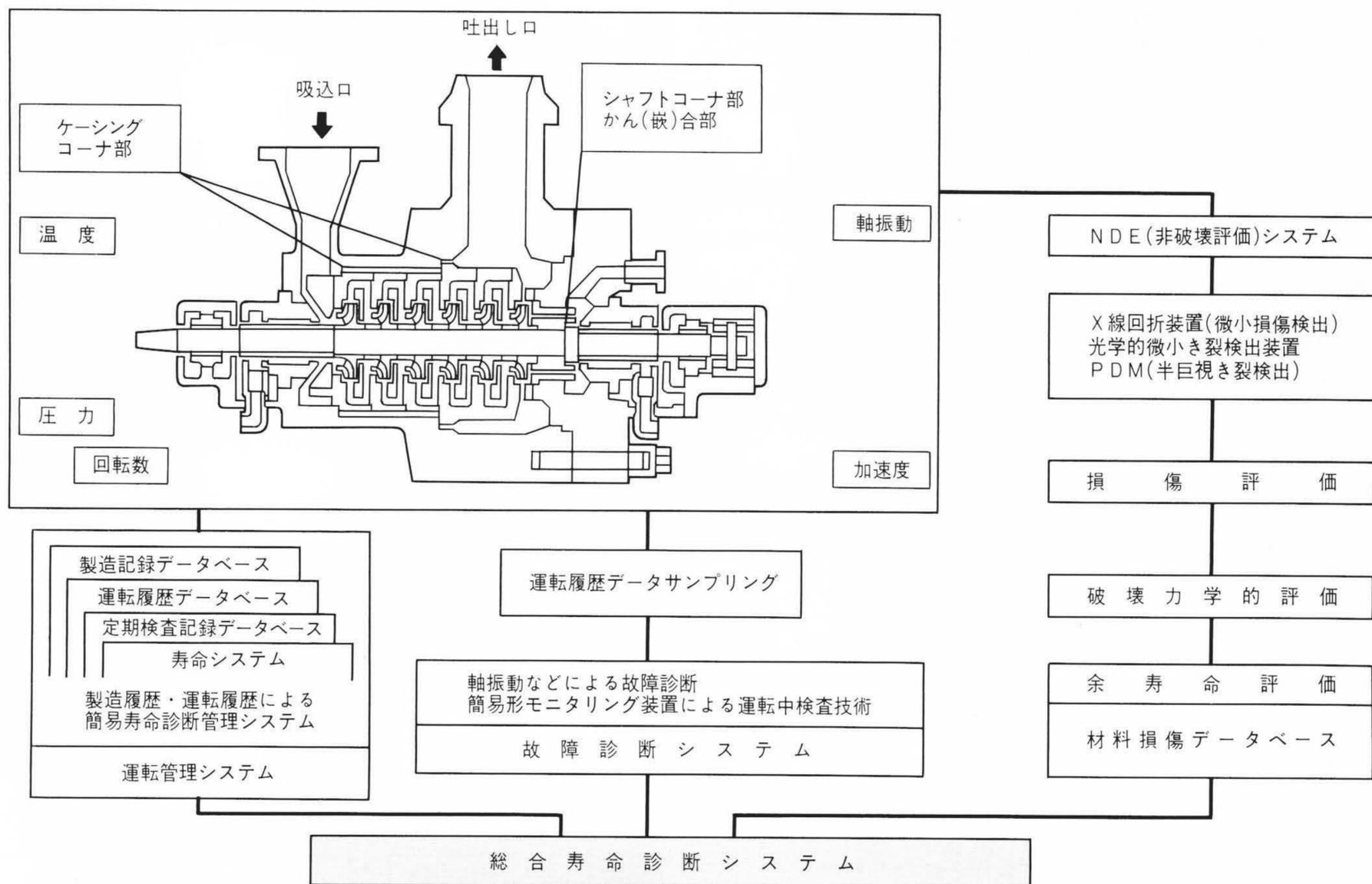


図1 経年火力ポンプの増加推移 火力発電所に納入したポンプ全台数に対して、経年火力ポンプ(納入後15年以上経過)の占める割合の推移を示す。

* 日立製作所 土浦工場 ** 日立製作所 機械研究所 工学博士 *** 日立テクノエンジニアリング株式会社



注：略語説明 PDM (Potential Drop Method：直流ポテンシャル法), NDE (Non-Destructive Examination：非破壊評価)

図2 火力発電所向けポンプの総合予防保全システム ポンプの安定運転を得るため、必要となる総合的な予防保全システムの概要を示す。

ここでは、火力発電用ポンプの中で、最も高速・高圧・高温で使用されるボイラ給水ポンプの軸を対象とした非破壊検査に基づく余寿命診断について述べる。

3 非破壊評価技術の確立

火力発電機器の疲労やクリープに伴う劣化損傷を、非破壊的に検出することが重電機器メーカーで試みられている²⁾。非破壊的手法による劣化検出の対象は、ほとんどが微小なき裂または欠陥であり、これまで主として行われてきた蒸気タービンの疲労とクリープ重畳下の損傷については、微小き裂をレプリカ法によって観察するものである³⁾。き裂発生前の疲労損傷については、X線回折法により残留応力や半価幅を測定し、その変化状態から寿命消費率を判定することによって余寿命を診断することが各種機械構造材料を対象として行われている^{4)~6)}。

材料の疲労に伴う損傷は、図3に示したような過程を経て形成される。繰返し応力により、転位の増殖や再配列によって結晶内部に疲労特有の下部組織が形成され、下部組織の発達によって微小き裂が発生し、それが成長して巨視的なき裂となり、ついには破損に至るものと考えられる。そこで、疲労に伴う損傷形態に則した検出方法を検討し、以下のように段

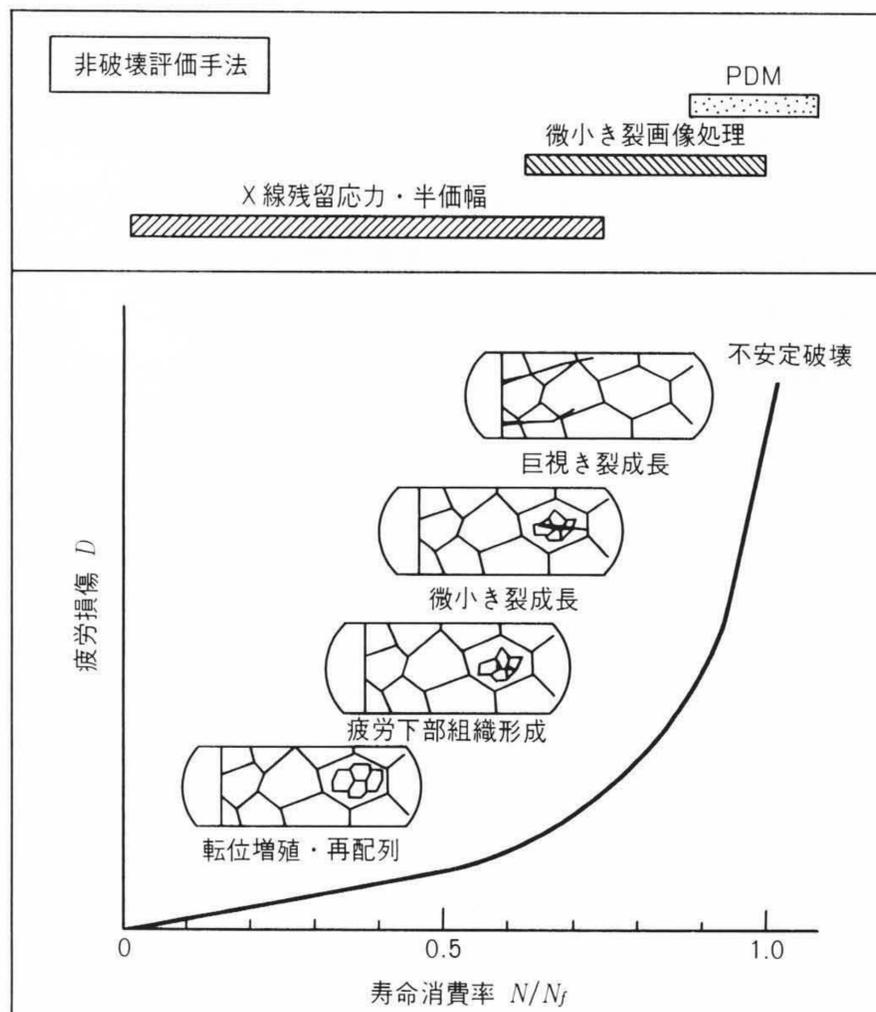


図3 疲労損傷の進展と寿命の関係 金属組織に蓄積される疲労によって、表面き裂が発生し進展して寿命末期には破損に至る疲労損傷の概念を図示したものである。

階ごとに損傷を検出して余寿命を推定することにした。

- (1) 疲労初期の結晶内部の損傷は、X線回折法を用い半価幅と残留応力によって検出する。
- (2) 疲労中期の損傷は微小き裂を検出する。
- (3) 疲労末期の巨視き裂の進展についてはPDM(直流ポテンシャル法)によってき裂形状を検出する。

なお、本稿では、微小き裂とは長さが0.1~2mmの範囲のき裂を指し、2mm以上のものを巨視き裂と呼ぶ。

3.1 X線回折法による損傷検出

X線回折法は結晶内部の転位構造に敏感な手法であり、X線回折法によって測定される半価幅や残留応力は、そのような結晶内部の状態を反映したものと言える。ここで対象としている高サイクル疲労の場合には、疲労損傷は材料のごく表面層に形成される。X線回折法ではX線の侵入深さが20μm程度と浅いため、高サイクル疲労損傷を検出するのに適している。

半価幅は回折X線の広がりを表すパラメータで、結晶内部の転位密度や格子ひずみに対応している。焼鈍された材料では転位密度は低く、格子ひずみが小さいため、半価幅は小さい。引張り変形などの塑性変形を受けた材料では、逆に転位密度が高く、格子ひずみが大きいため、半価幅は大きい。疲労の場合には、材料の前歴に影響される。あらかじめ機械加工や塑性変形を受けた材料では、転位密度が高く、格子ひずみが大きいため、半価幅は大きい。疲労変形を受けると応力の繰返しに伴って、徐々に半価幅は減少する。一方、焼鈍された材料の場合には応力の繰返しによって繰返し加工硬化するため、半価幅は徐々に増大する。

ボイラ給水ポンプ用軸材料に疲労試験を行って得られた半価幅変化を図4に示す。縦軸は疲労前の半価幅 b_0 に対する疲労後の半価幅 b の比 b/b_0 である。横軸は破断繰返し数 N_f に対する応力繰返し数 N の比 N/N_f で、寿命消費率 ϕ に相当する。半価幅比 b/b_0 は応力繰返し数比 N/N_f の対数に比例して減少するが、初期の機械加工による塑性変形が小さいため、変化量は小さい。ただし、荷重形式や応力振幅の影響は小さい。

残留応力比 σ/σ_0 の変化を図5に示す。残留応力は繰返し数比の対数に対して比例して減少する。残留応力の変化は荷重形式の影響は受けませんが、半価幅の場合とは異なって応力振幅の影響が認められる。

図4、5でわかるように、半価幅と残留応力は繰返し数比の対数に対して比例して減少するため、疲労初期は変化が大きいが、疲労後期では変化が小さくなる。したがって、半価幅と残留応力は疲労初期損傷を検出するのに適している。

3.2 微小き裂による損傷検出

疲労試験中の微小き裂の進展挙動を、レプリカによって観察した結果を図6に示す。ただし、き裂の開口量がきわめて小さいため、応力振幅の半分の荷重を静的に加えた状態でレプリカを採取してき裂長さを測定した。縦軸はき裂長さ $2a$ の

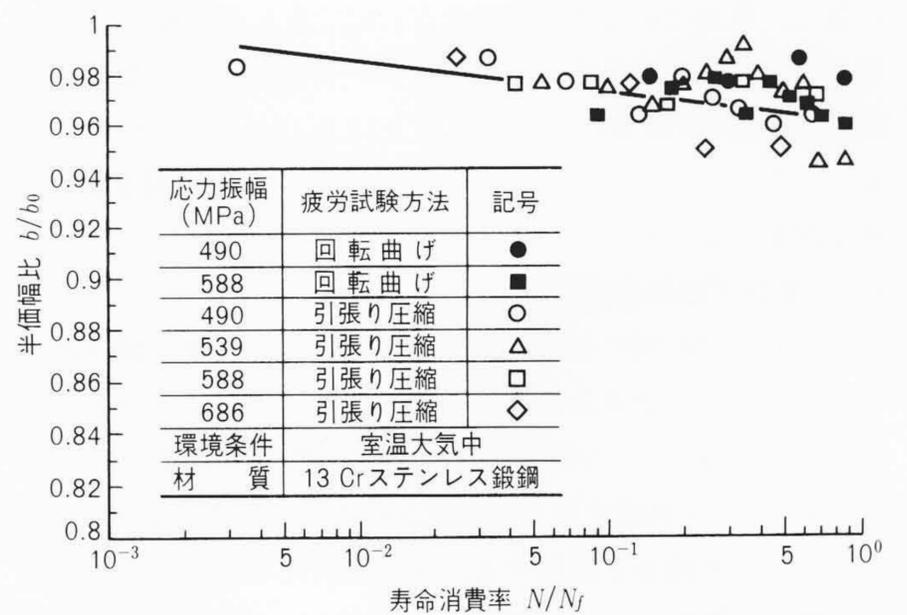


図4 半価幅の繰返し数比に対する変化 横軸は破断繰返し数 N_f に対する応力繰返し数 N の比で、縦軸は疲労前の半価幅 b_0 に対する疲労後の半価幅 b の比を表す。

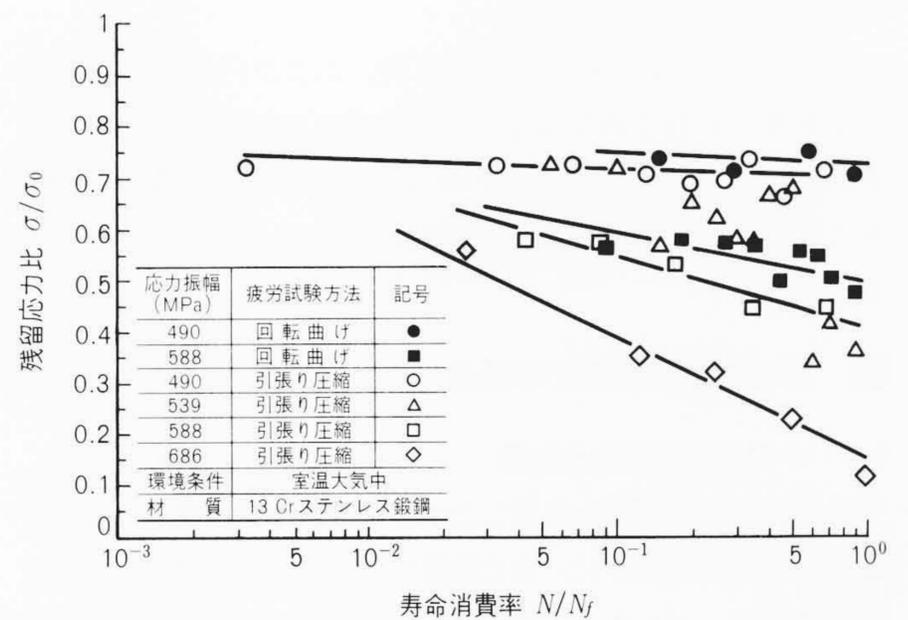


図5 残留応力の繰返し数比に対する変化 横軸は破断繰返し数 N_f に対する応力繰返し数 N の比で、縦軸は疲労前の残留応力 σ_0 に対する疲労後の残留応力 σ の比を表す。

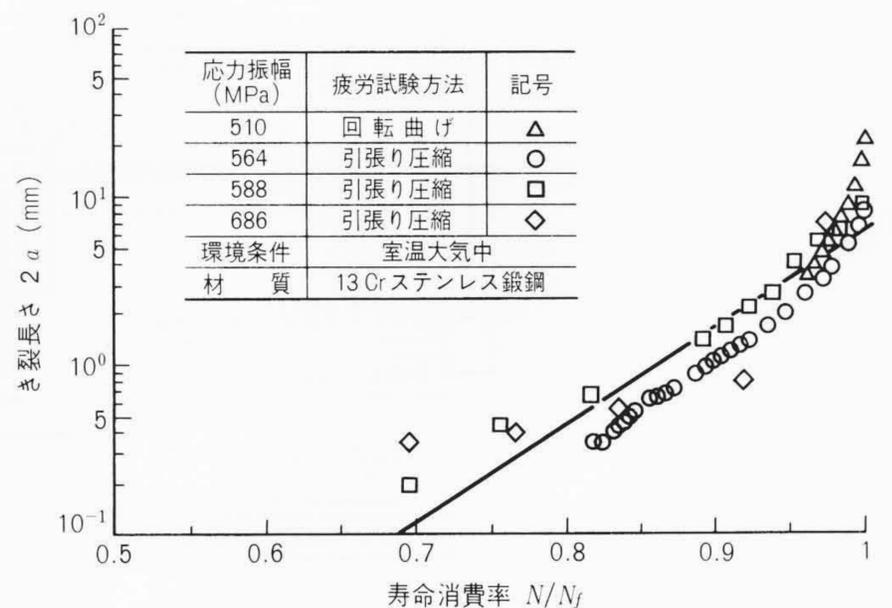


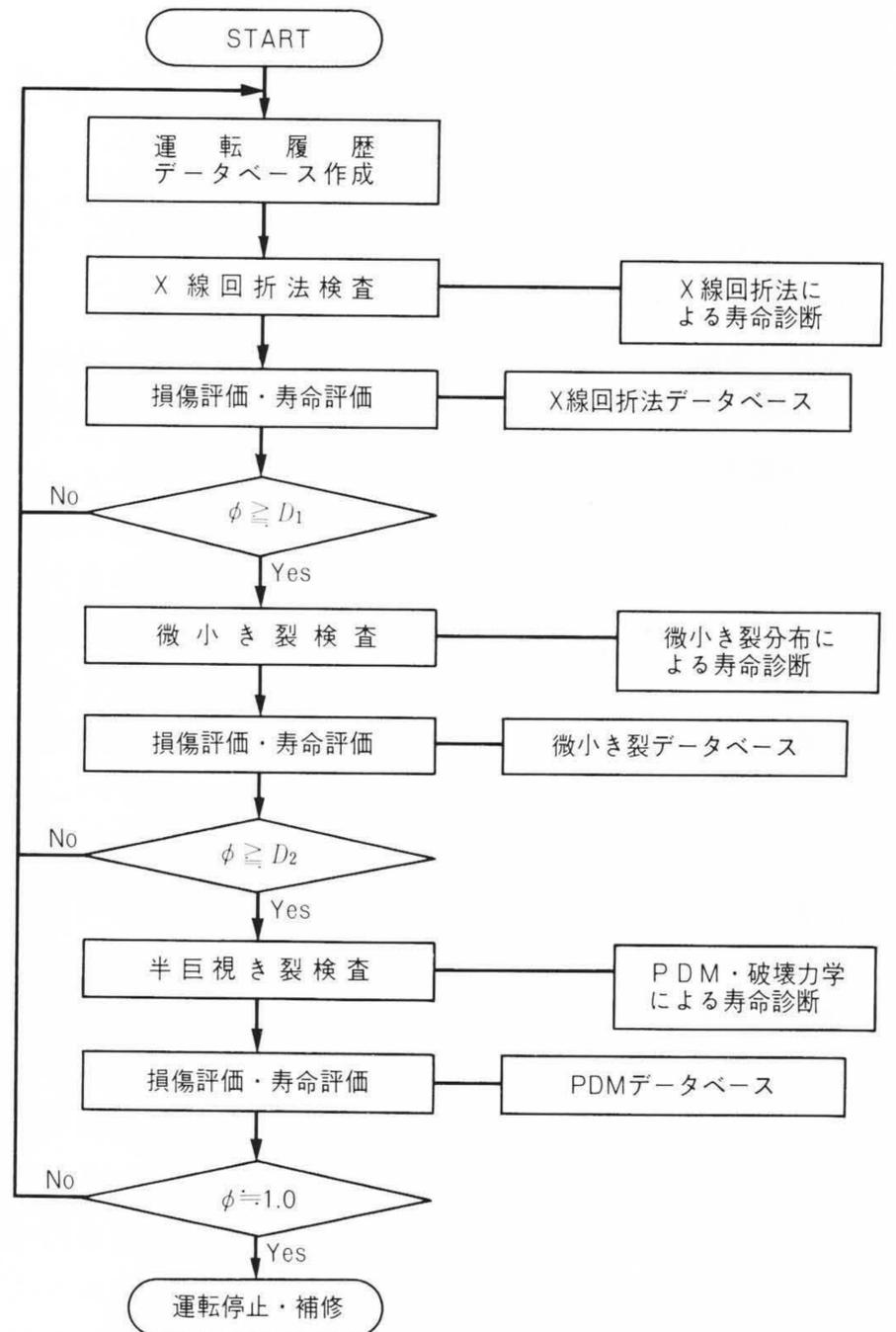
図6 疲労き裂の繰返し数比に対する変化 横軸は破断繰返し数 N_f に対する応力繰返し数 N の比で、き裂長さ a を縦軸にとり、そのき裂進展挙動を示したものである。

対数で、横軸は応力繰返し数比 N/N_f である。き裂長さ $2a$ は応力振幅には依存せず、片対数グラフ上で直線的に増大する。 $2a=0.1\text{ mm}$ となる応力繰返し数比は $N/N_f=70\%$ 程度である。一方、き裂長さが $2a=3\text{ mm}$ 以上となった巨視き裂は急速に進展し始める傾向にある。

3.3 ポンプ軸寿命診断法

以上の検討結果に基づき、ポンプ軸寿命診断法を図7のようにまとめた。余寿命診断にあたっては、ポンプの運転履歴が必要であるので、回転数または運転時間を記録して、そのデータベースを作成する。使用開始後の疲労初期段階ではX線回折法による検査を実施する。測定された半価幅と残留応力から図4や図5のようなX線データベースに基づいて損傷評価と余寿命評価を行う。損傷率 ϕ が限界値 D_1 を超えると、微小き裂検査による寿命診断に移る。疲労中期から疲労後期にかけての微小き裂による損傷率 ϕ が限界値 D_2 を超えると、疲労末期の巨視き裂の進展をPDMによってき裂形状を検出して、余寿命を推定する。

このとき、X線回折法と微小き裂、およびPDMによる損傷検出を独立に行うのではなく、それぞれの損傷検出限界値 D_1 や D_2 の付近では、その前後の検査法を併用して損傷を評価することによって、余寿命診断の精度を上げることが必要である。



注：略語説明

ϕ (損傷率)

D_1 (疲労初期から中期へ移行する時点の寿命消費率)

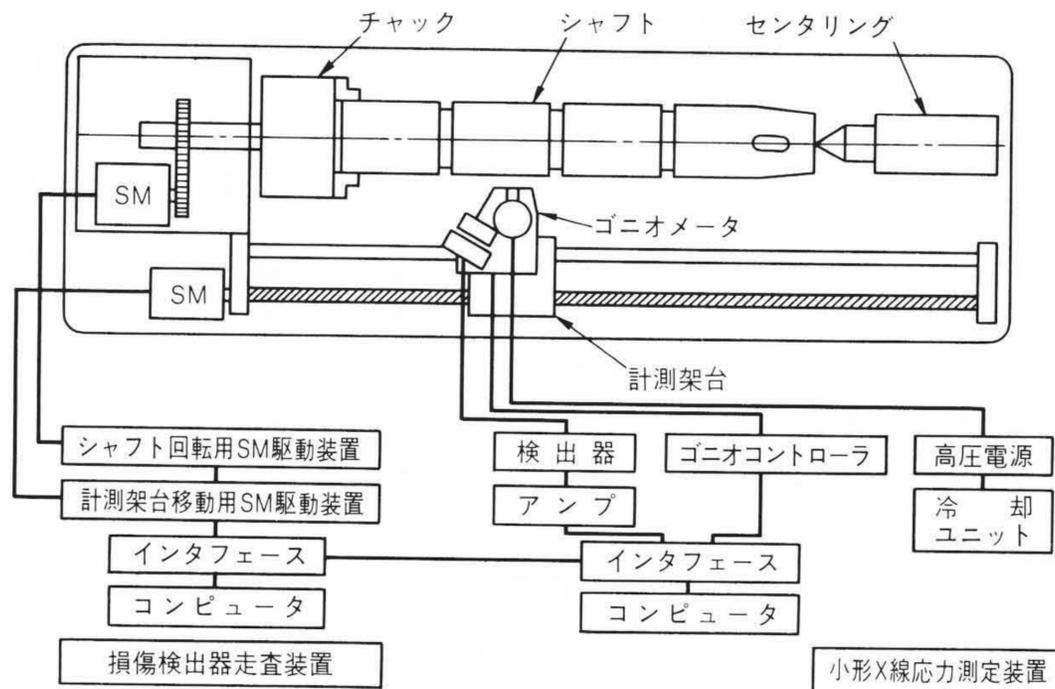
D_2 (疲労中期から末期へ移行する時点の寿命消費率)

図7 BFP用軸材の寿命診断フロー BFP軸に関して行った種々の実験、研究によって得られた寿命診断の診断フローを示す。

4 非破壊診断装置の開発

4.1 小形X線損傷検出装置

小形X線回折装置を具備したポンプ軸の損傷検出システムを図8に、装置を図9に、またX線回折装置のゴニオメータ部を図10に示す。ゴニオメータは、小形X線管球と新たに開発した受光スリット回転形X線検出系によって非常にコンパクトに



注：略語説明 SM (ステッピングモータ)

図8 小形X線損傷検出システム X線回折装置と16ビットのマイクロコンピュータを組み合わせた損傷検出システムを示す。

きており、従来のものに比べて約 $\frac{1}{2}$ の大きさである。そのため、残留応力測定に要する時間は約20分と従来装置の半分の時間であり、ポンプ軸の検査を短時間で行うことが可能である。X線回折装置と後述するポンプ軸走査装置は、パーソナルコンピュータで制御され、測定範囲を指定すれば自動的に残留応力および半価幅を測定し、結果はインタフェースを介してデータベース管理用ワークステーションに転送される。

X線回折法によるポンプ軸材の余寿命診断アルゴリズムを図11に示す。使用開始前に損傷検出対象部の残留応力と半価幅を測定しておく。運転を開始すると、運転履歴として延べ回転数あるいは運転時間を記録する。定期検査時で、残留応力と半価幅を測定して、半価幅比 b/b_0 または残留応力比 σ/σ_0 を、図4または図5に示したようなマスタカーブに代入する

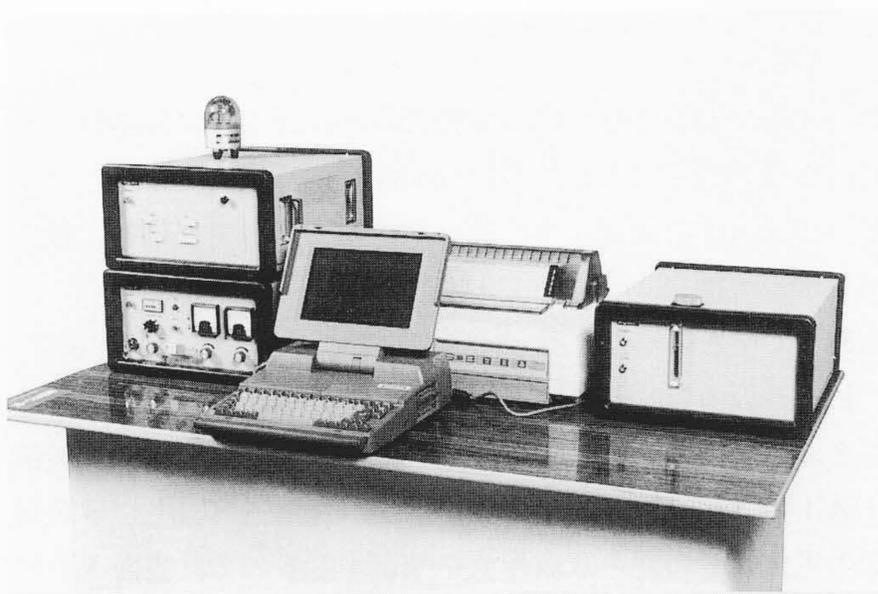


図9 小形X線損傷検出装置 開発した小形X線損傷検出装置の外観を示す。

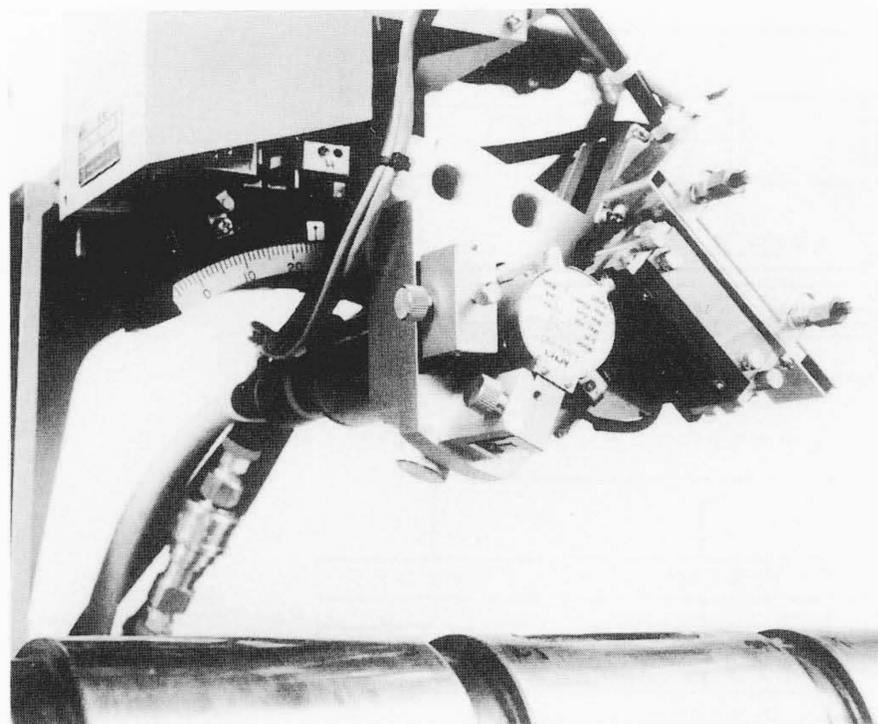
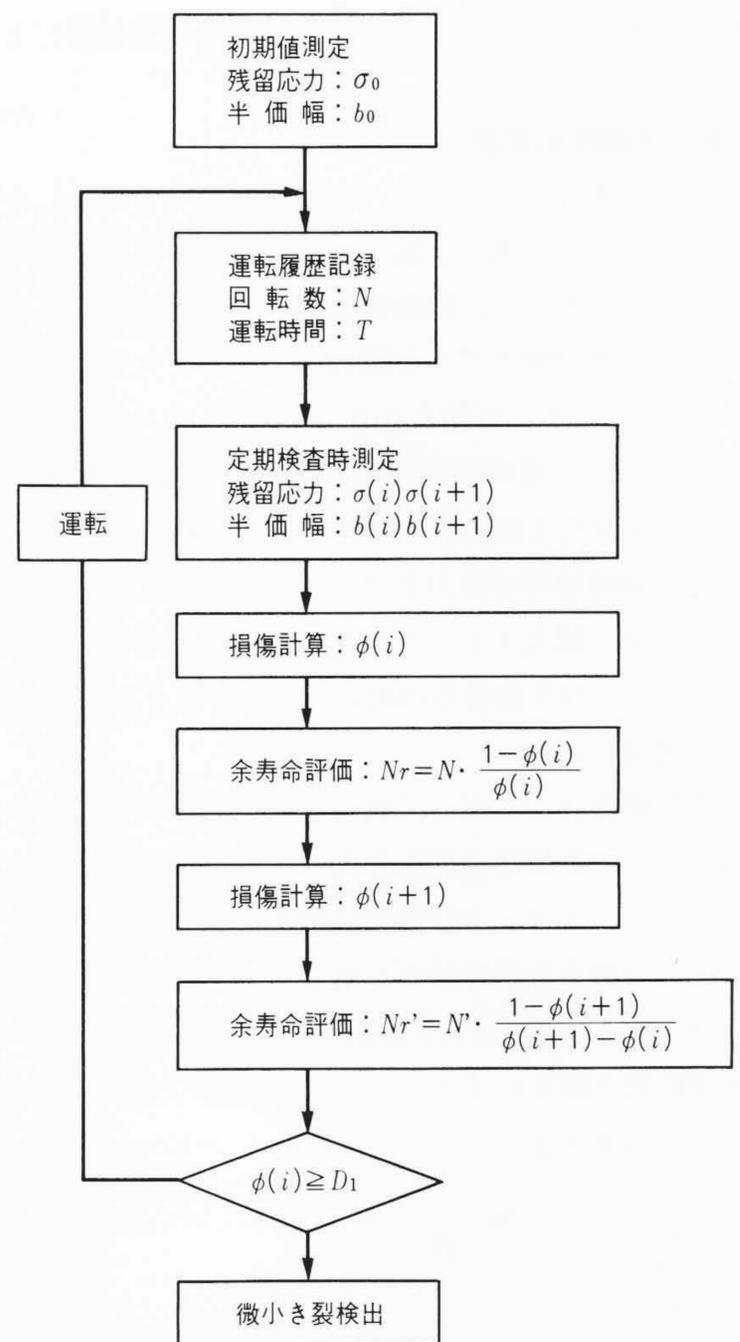


図10 ゴニオメータ X線照射装置(管球)とディテクタをコンパクトにまとめ、従来の大きさに比べて約 $\frac{1}{2}$ に小形化した(世界一小形のゴニオメータ)。



注：略語説明 i (定期検査の回数を示す。)

図11 X線回折法による寿命診断手法 ポンプ軸材の定期検査での余寿命評価フローチャートを示す。初期値不明(既設品)の場合、2回の定期検査での測定値をもとに余寿命を評価する。

ことによって損傷率 $\phi(i)$ を求める。余寿命は、

$$Nr = N \frac{1 - \phi(i)}{\phi(i)} \dots\dots\dots(1)$$

で与えられる。ここで、 N は定期検査時までの延べ回転数であり、 Nr は余寿命となる延べ回転数である。ただし、 N 、 Nr は使用時間 T と余寿命時間 Tr に置き換えることができる。すでに長時間使用されていて延べ回転数がわからない場合で、かつ寿命消費率 ϕ が小さければ、そのまま運転を再開して、次の定期検査時に残留応力と半価幅を測定する。それから計算された損傷率 $\phi(i+1)$ から余寿命は、

$$Nr = N' \frac{1 - \phi(i+1)}{\phi(i+1) - \phi(i)} \dots\dots\dots(2)$$

で与えられる。ここで、 N' は定期検査間の延べ回転数である。このように、納入時の初期値が不明であるような既納品の場合でも、定期点検を2回実施することによって軸材の余寿命を評価することができる。そして、損傷率 ϕ がX線回折法によ

る余寿命診断の限界値 D_1 を超えると、微小き裂検出による損傷評価を行う。

4.2 微小き裂検出装置

高サイクル疲労の場合には、き裂がほとんど開口しないため、レプリカ法では微小き裂を検出することは困難であることがわかった。そこで、顕微鏡視野を画像処理することによって、微小き裂を検出できる図12のようなシステムを開発した。システムはポンプ軸を回転させる機構、CCD(Charge Coupled Device:電荷結合素子)カメラを装備した光学顕微鏡を載せた計測架台を軸方向に駆動できる機構を持つポンプ軸走査装置、画像処理装置およびそれらを制御するパーソナルコンピュータで構成する。この装置により、ポンプ軸表面のき裂の有無およびき裂長さの測定を自動で行うことができる。本装置を図13に示す。

微小き裂検出によるポンプ軸材の余寿命診断アルゴリズムを図14に示す。損傷率 ϕ が D_1 と D_2 の間では微小き裂による寿命診断を行う。このとき、図13に示すような装置によってポンプ軸表面の微小き裂の分布を測定し、き裂長さの頻度分布解析を行うとともに、最大き裂長さ $2a_{Max}$ を求める。それらの測定結果を図6に示すようなき裂進展のマスタカーブに適用して、損傷率 ϕ を

$$\phi = \frac{N}{N_f} = \frac{\log(2a) - a}{\beta} \dots\dots\dots(3)$$

により求める。

この装置による測定例を図15に示す。同図右下に示した顕微鏡視野を画像処理した結果は、それぞれのき裂ごとに、中心座標と軸に対する角度および長さがリストとして表形式で、あるいはき裂長さの頻度分布のグラフなどが出力される。な

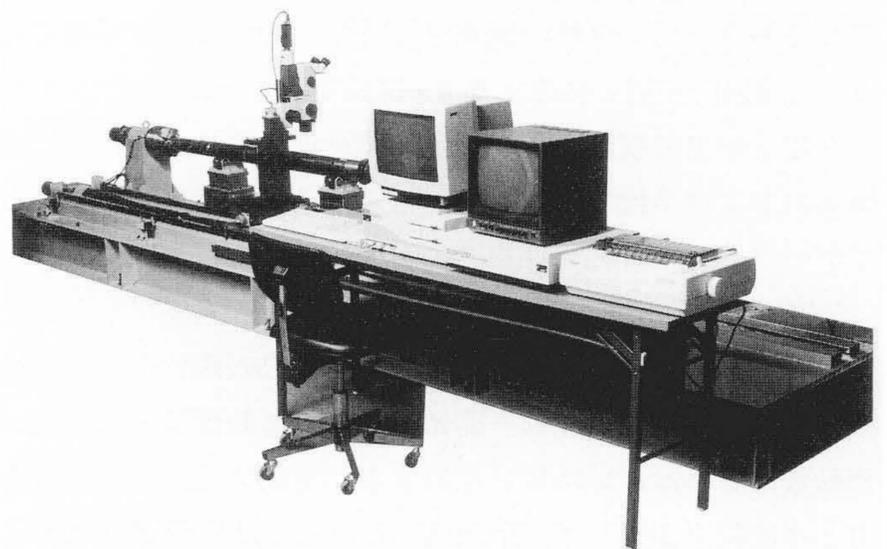


図13 光学的微小き裂検出装置 開発した光学的微小き裂検出装置の外観を示す。

お、ポンプ軸測定中の顕微鏡視野は一視野ごとに画像処理され、き裂と判定された場合には顕微鏡視野のデータをフロッピーディスクに記録して、データベースとして格納し、後で再処理が可能ないようにしてある。

4.3 PDMき裂検査装置

巨視き裂の形状測定には、日立製作所で開発された技術⁷⁾をもとに新たに開発したポータブルPDM表面き裂形状検査装置を適用した(図16)。PDMは部材に直流電流を印加し、き裂周辺の電位差分布からき裂形状を判定するもので、表面き裂形状の検出精度は±0.3 mmである。この装置によってポンプ軸に発生したき裂形状を測定した結果を図17に示す。表面のき

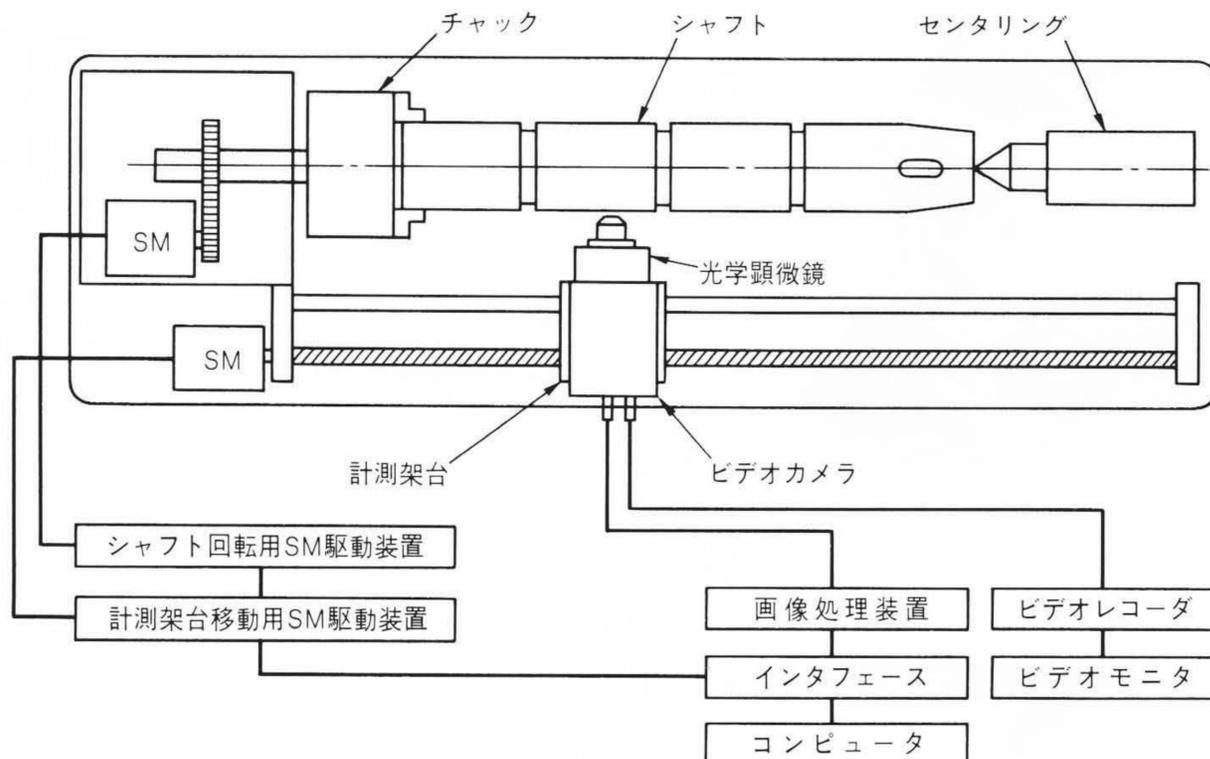


図12 光学的微小き裂検出システム 軸表面のき裂の有無およびき裂長さの測定を、画像処理装置と32ビットのマイクロコンピュータとを組み合わせ自動的に検出し、データベース化される。

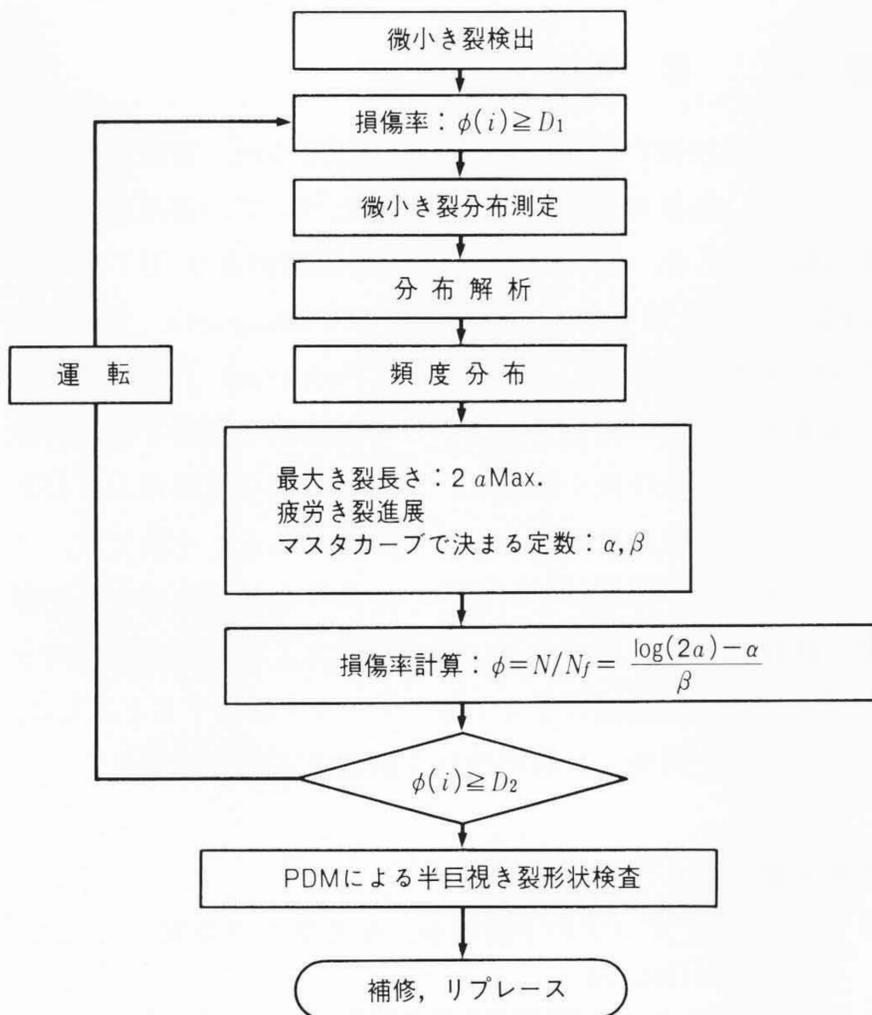


図14 微小き裂検出による寿命診断手法 ポンプ軸材の定期検査で微小き裂を検出し、そのき裂長さとおらかじめ疲労試験から得られたき裂進展マスタカーブとの照合によって余寿命を求める。



図16 PDM欠陥診断装置 16ビットのマイクロコンピュータを内蔵したPDM欠陥診断装置の外観を示す。

裂長さが6.0 mm、最大深さが0.3 mmである。電位差分布のリストおよびそのグラフとき裂形状は、液晶ディスプレイに表示され、またそのハードコピーを熱転写プリンタに出力させることができる。

右の実画像を2値化した画面

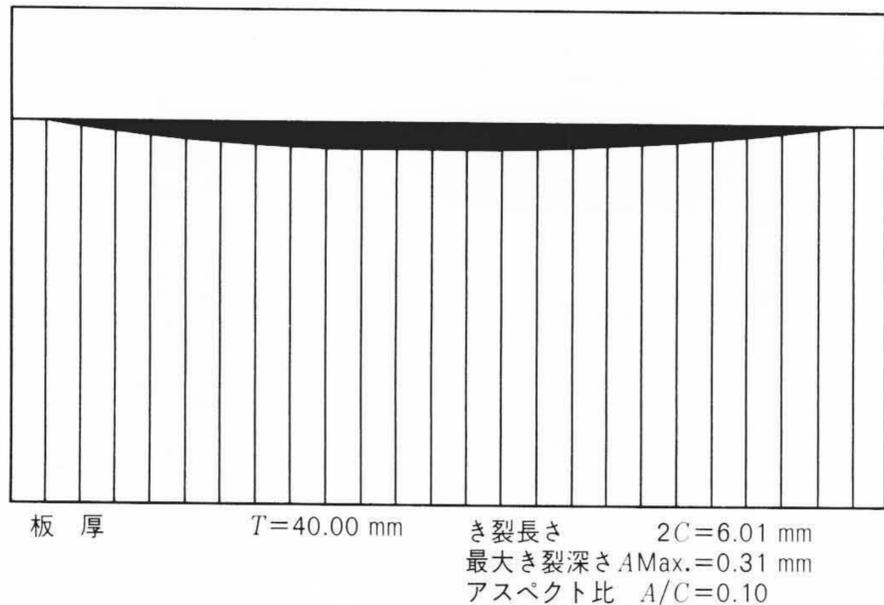
最大亀裂中心座標	=	4.84 ,	4.95 (mm)
IP4004座標	=	(310 ,	317)
亀裂長さ	=	3.1563	(mm)
亀裂角度	=	100	

亀裂 No.	部位座標	IP座標	亀裂長さ	亀裂角度
0001	4.38 , 2.56	(280 , 164)	2.13	94
0002	4.84 , 4.95	(310 , 317)	3.16	100
0003	7.81 , 6.55	(500 , 419)	1.27	75

図15 光学的微小き裂検出装置による実機軸表面き裂の測定例像と、自動検出システムによって実測されたき裂のデータを示す。

光学的微小き裂検出装置によって検出された実機軸表面のき裂画

表面き裂形状



FILE NAME : 測定日時 : 09-08-1988 16:54:46
 COMMENT :

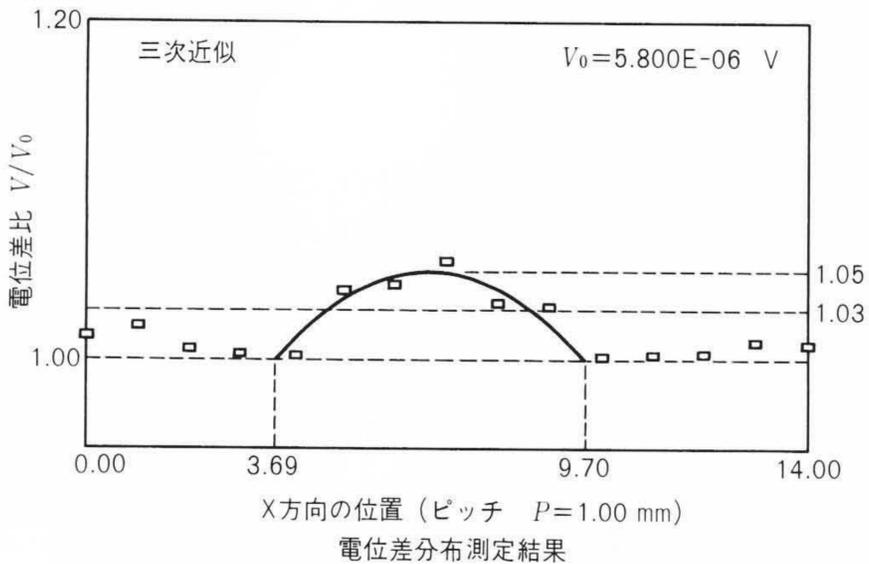


図17 PDMによる実機軸表面き裂の測定例 実機軸表面のき裂近傍の電位差分布の測定から、き裂形状を評価する。

5 結 言

火力発電設備の中間負荷運用が進むにつれ、新設火力ばかりでなく、既設火力発電所に納入したポンプの運用も過酷化する傾向にある。このため、従来の非破壊検査法〔UT(Ultrasonic Test:超音波探傷検査), MT(Magnetic Particle Test:磁粉探傷検査), PT(Liquid Penetrant Test:液体浸透探傷検査)〕では発見できなかった微視的な損傷を検出可能とする予防保全技術を開発し、ポンプの健全性確保および計画的な保守管理に反映することが重要である。本稿では、ボイラ給水ポンプの軸材を対象とした余寿命診断技術を予防保全の新技术として述べたが、検出精度および診断精度の向上を図るため、実機軸のフィールドデータを集積するとともに、今後とも研究開発、装置の改良を継続する考えである。

参考文献

- 1) 三角, 外: ポンプの予防保全, 火力原子力発電, 40, 10, 123~125(1989-10)
- 2) 村田, 外: タービン設備の余寿命診断と耐力向上対策, 火力原子力発電, 40, 10, 78~111(1989-10)
- 3) 桜井, 外: 経年劣化CrMoV 鋼平滑材における微小き裂の発生と成長挙動, 日本機械学会論文集(A編), 53, 487, 451~458(昭62-3)
- 4) 林, 外: 銅の疲労損傷の検出, 日本材料学会第17回X線材料強度に関するシンポジウム前刷, 34~39(1980)
- 5) 林, 外: X線によるCr-Mo-V鋼のFCI損傷の検出, 日本材料学会第19回X線材料強度に関するシンポジウム前刷, 91~96(1982)
- 6) S. Taira: X-ray-diffraction Approach for Studies on Fatigue and Creep, Lecture Presented at 3rd SESA Int. Cong. on Experimental Mechanics, Los Angeles, May, 1973
- 7) 林: PDM技術による機器配管の表面欠陥検査について, メンテナンス, 38~50(1988-4)