

ボイラ給水ポンプの予防保全技術

— 耐力向上策と劣化診断技術 —

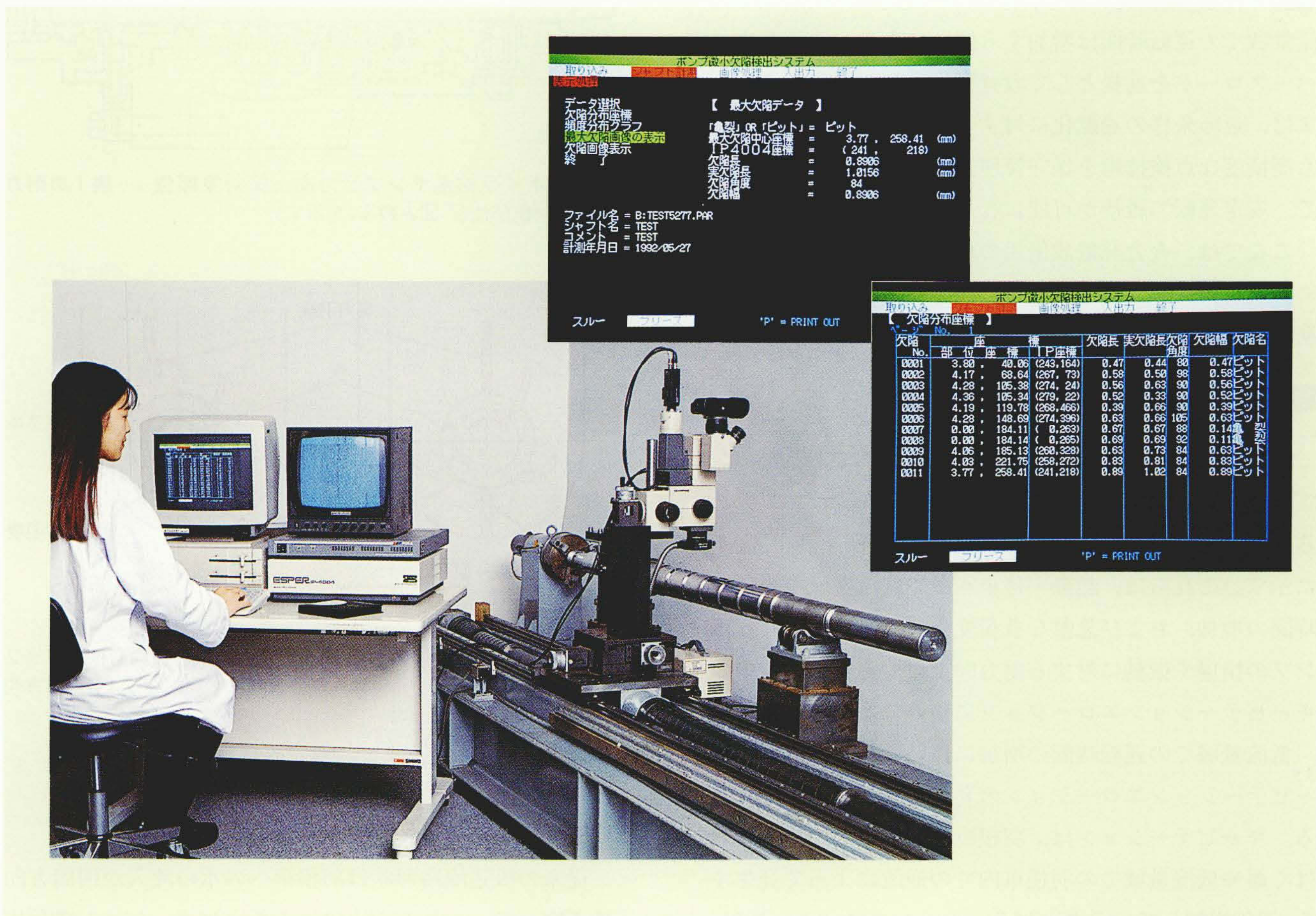
Preventive Maintenance Technology for Boiler Feed Pump

三角洋史* Hiroshi Misumi

林 眞琴** Makoto Hayashi

高木亨之** Michiyuki Takagi

植山淑治* Yoshiharu Ueyama



画像処理によるポンプ軸自動検査システムおよび実機軸表面の欠陥検出結果の出力例 ポンプ軸表面の疲労き裂や腐食ピットを画像処理によって自動的に検査するシステムである。検出された欠陥の中心座標、欠陥長さ、欠陥の幅、ポンプ軸方向に対する傾き、および欠陥の種別が自動的に判定され、画面に表示される。

火力発電設備用のポンプは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、ポンプ自身の耐力向上を図り、従来よりも精密な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、ボイラ給水ポンプ初段羽

根車の耐キャビテーション性能向上などの耐力向上につながる新技術、プラント稼動中のポンプの故障を振動によって診断する技術、および定期検査時での軸の光学顕微鏡による精密点検ならびにトレンド管理による経年劣化を診断する技術の開発を行っている。

* 日立製作所 土浦工場 ** 日立製作所 機械研究所 工学博士

1 はじめに

わが国の火力発電所に納入されたポンプは昭和30～40年代に製作されたものが多く、運転開始後15年を経過したものが全台数の60～70%を占め、経年劣化が進む方向にある。一方、プラントのDSS(Daily Start-Stop：毎日起動・停止)運転化やWSS(Weekly Start-Stop：毎週起動・停止)運転化に伴い、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する耐力向上策と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、安定運転の維持が可能になると考えられる。

ここでは、火力発電設備用のポンプでの耐力向上のための新技術、プラント稼動中の故障診断技術、および定期検査での劣化診断技術について述べる。

2 ボイラ給水ポンプの耐力向上策

ボイラ給水ポンプは高温、高速のポンプであるため、プラント運用の過酷化の影響を最も受けるポンプである。ボイラ給水ポンプの耐力向上策の代表例を表1、図1に示す。これらは、起動・停止回数や低流量域での運転時間の増加、および急激な負荷変化に対応して生じるポンプの損傷や振動に対する耐力向上策である。この中のキャビテーションエロージョンについて次に述べる。

低流量域での運転時間の増加に伴い、初段羽根車のキャビテーションエロージョンの発生が近年増加傾向にある。キャビテーションは、羽根車羽根入口部での流れのはく離や低流量域での羽根車内での逆流によって発生する。近年増加しているキャビテーションエロージョンは、

表1 ボイラ給水ポンプの耐力向上策代表例 キャビテーション振動、応力低減について、耐力向上を図っている。

部位	項 目	改 善 方 法
①	キャビテーションエロージョン	吸込流路、初段羽根車および案内羽根の形状改善
②	バランスブッシュすきま増加による自励振動	制振型バランスブッシュ採用 高剛性ロータ採用
③	ケーシングの熱変形による起動時の過大応力	排水温度制御採用 封水(冷水)の内部流入低減
④	負荷変化時のギャカップリングの歯の拘束による振動	ダイヤフラムカップリング採用

注：部位No.については図1参照

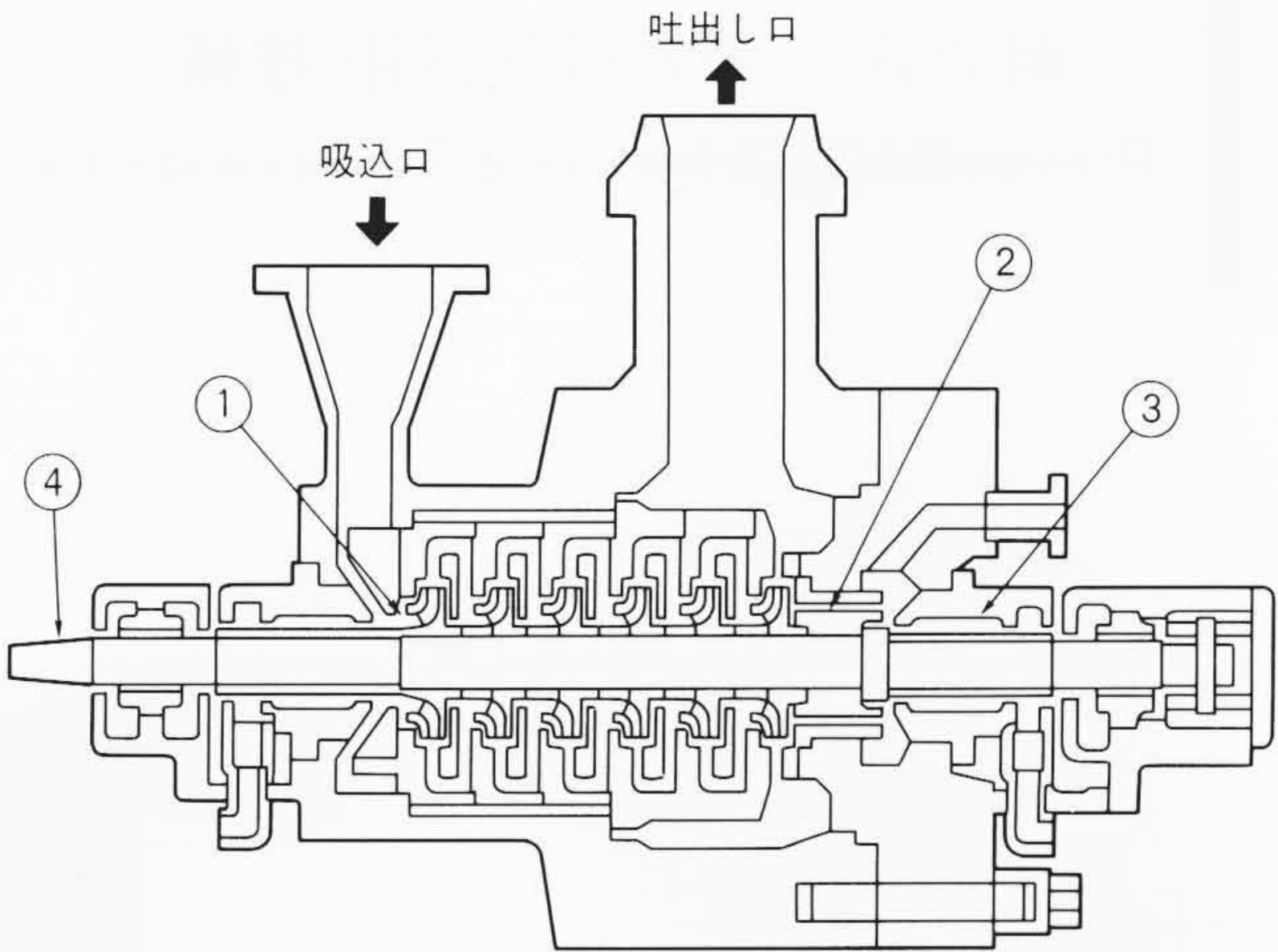
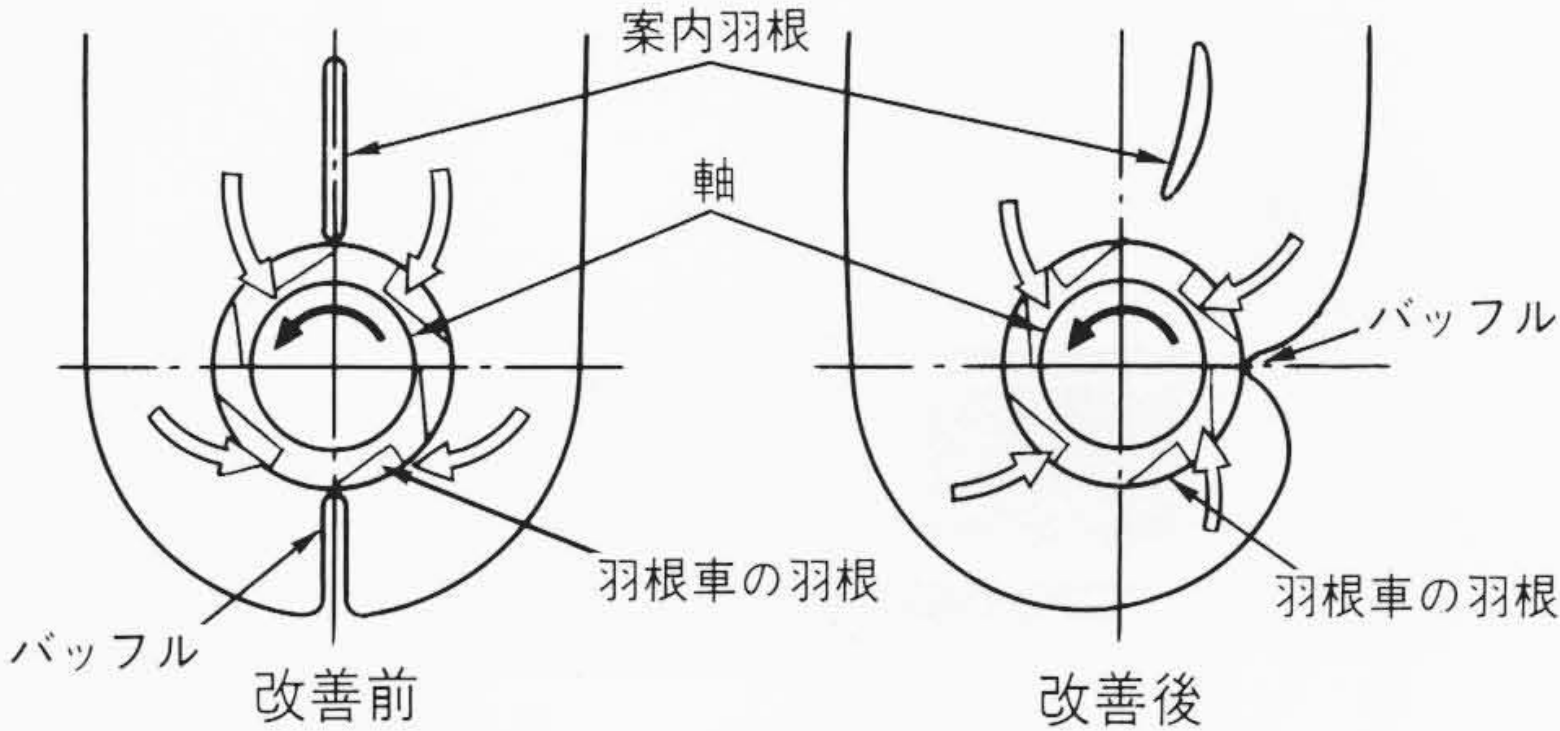


図1 ボイラ給水ポンプ耐力向上策対象部位 表1の耐力向上策対象部位(○囲み数字)を示す。



注：→ (回転方向), ⇨ (流れ方向)

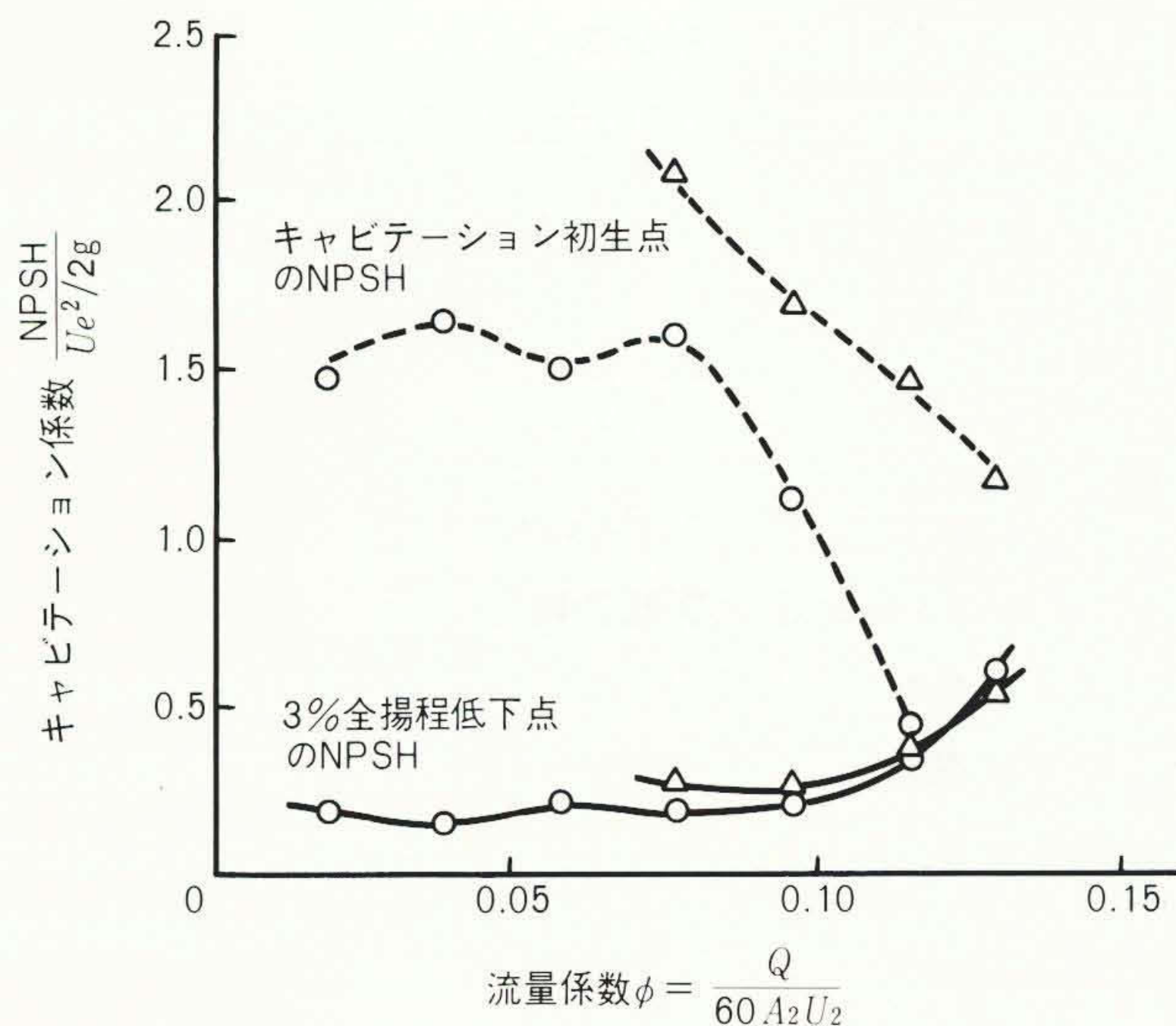
図2 吸込流路形状の改善例 吸込流路の案内羽根とバッフルの位置を改善して、羽根車入口の流れに予旋回を与え、円周方向の水の流入を一様化した。

低流量域での逆流に起因するものである。

従来の吸込流路形状は羽根車への水の流入が円周方向で不均一で、これが逆流によるキャビテーションの発生を助長していることが吸込ケーシングの流れ解析やキャビテーションの観察実験から判明した。このため、吸込流路の三次元流れ解析と羽根車内の流れ解析を行い、図2に示す円周方向での水の流入が均一となる予旋回形吸込ケーシング、および低流量域で逆流が生じにくい羽根車を開発した^{1),2)}。改善の効果を図3に示す。低流量域でのキャビテーションの発生が大幅に低減されていることがわかる。この開発品を既納機に組み込み、2年後の点検で改善の効果を確認している。

3 プラント稼動中の故障診断技術

プラント稼動中のポンプの故障診断は、図4³⁾に示すように定期検査中に行われるNDE(非破壊評価)や、定期



注：略語説明など

NPSH (Net Positive Suction Head：有効吸込ヘッド),
 Q [吐出し量(m^3/min)], U_e [羽根車目玉部周速度(m/s)], A_2 [羽根車出口面積(m^2)], U_2 [羽根車出口周速度(m/s)]
 Δ (改善前), $\circ$ (改善後)

図3 吸込性能の改善効果 吸込流路形状および羽根車の改善により、キャビテーション初生点のNPSHを大幅に向上することができた。

検査記録データなどを基にした運転管理データの評価と組み合わせて、余寿命を総合的に評価するシステムとして確立する必要がある。

ポンプの故障診断は、故障の検知に有効な振動法によって行われている⁴⁾。診断手順の概要を図5に示す。故

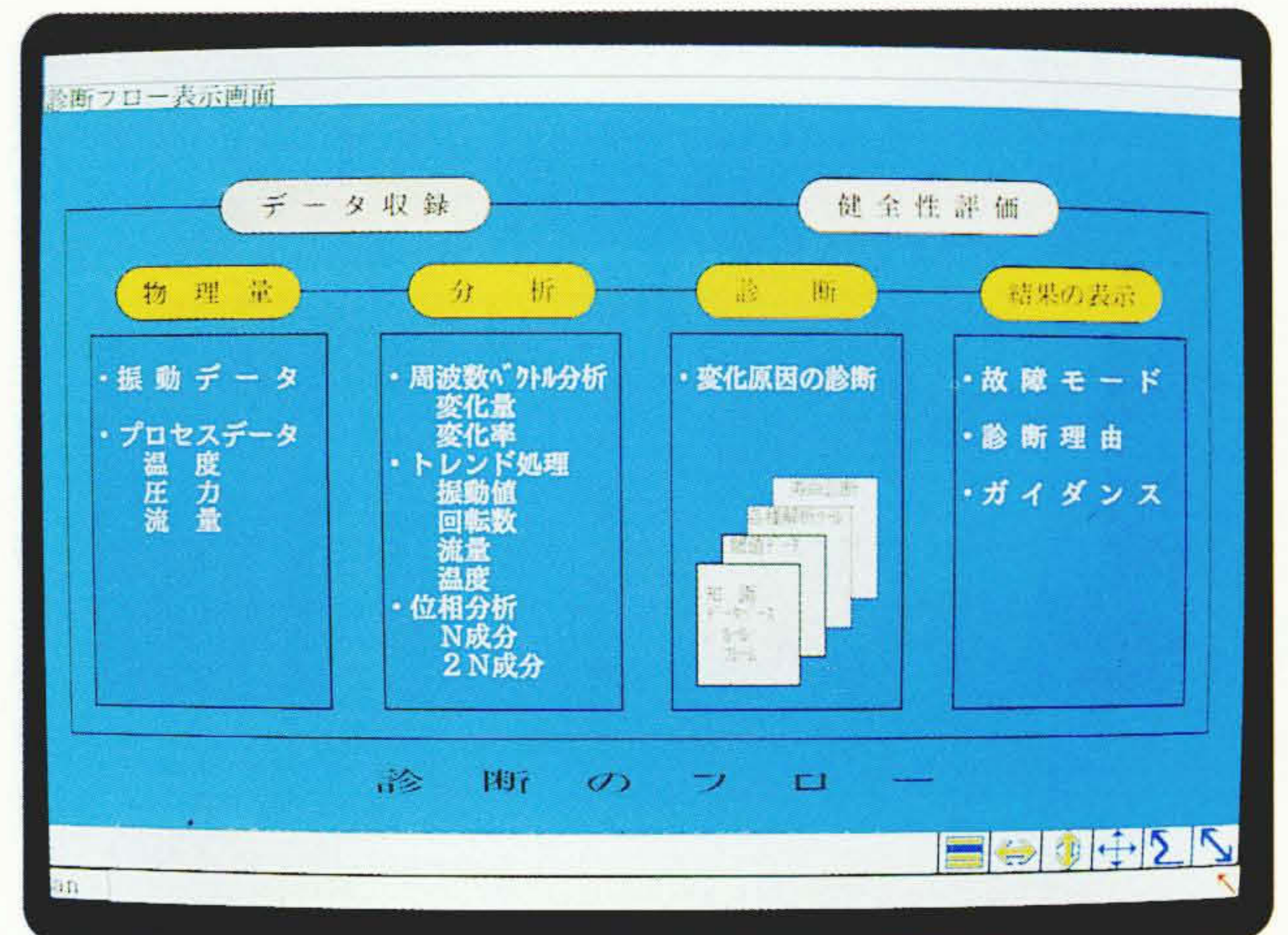
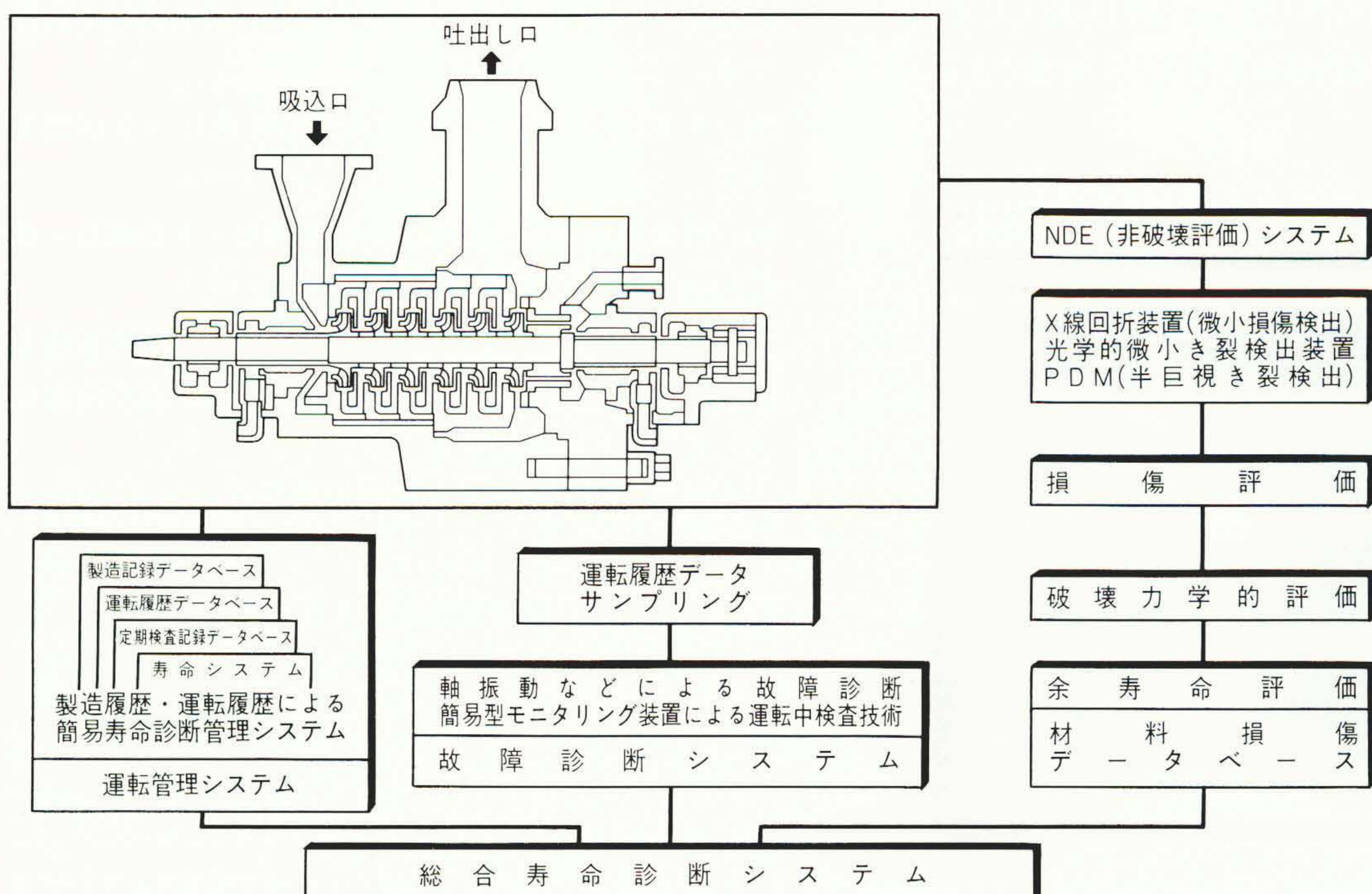


図5 診断フロー画面 振動データやプロセスデータを取り込み、分析、診断および結果の表示を行う診断のフローを示す。

障診断では、ポンプの振動データやプロセスデータを取り込み、周波数分析や位相分析などの信号処理、トレンドパターン処理などを行う。診断部はAI言語で記述された振動現象に関する既存のデータベース、および振動工学に関するノウハウを基にして振動現象を解析し、振動原因を同定し、出力部で推論結果を表示するようにしている。

3.1 周波数分析

故障要因と振動周波数の間には密接な関連があり、振動周波数は振動診断する上で最も重要な情報である。振



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4 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に必要となる総合的な予防保全システムの概要を示す。

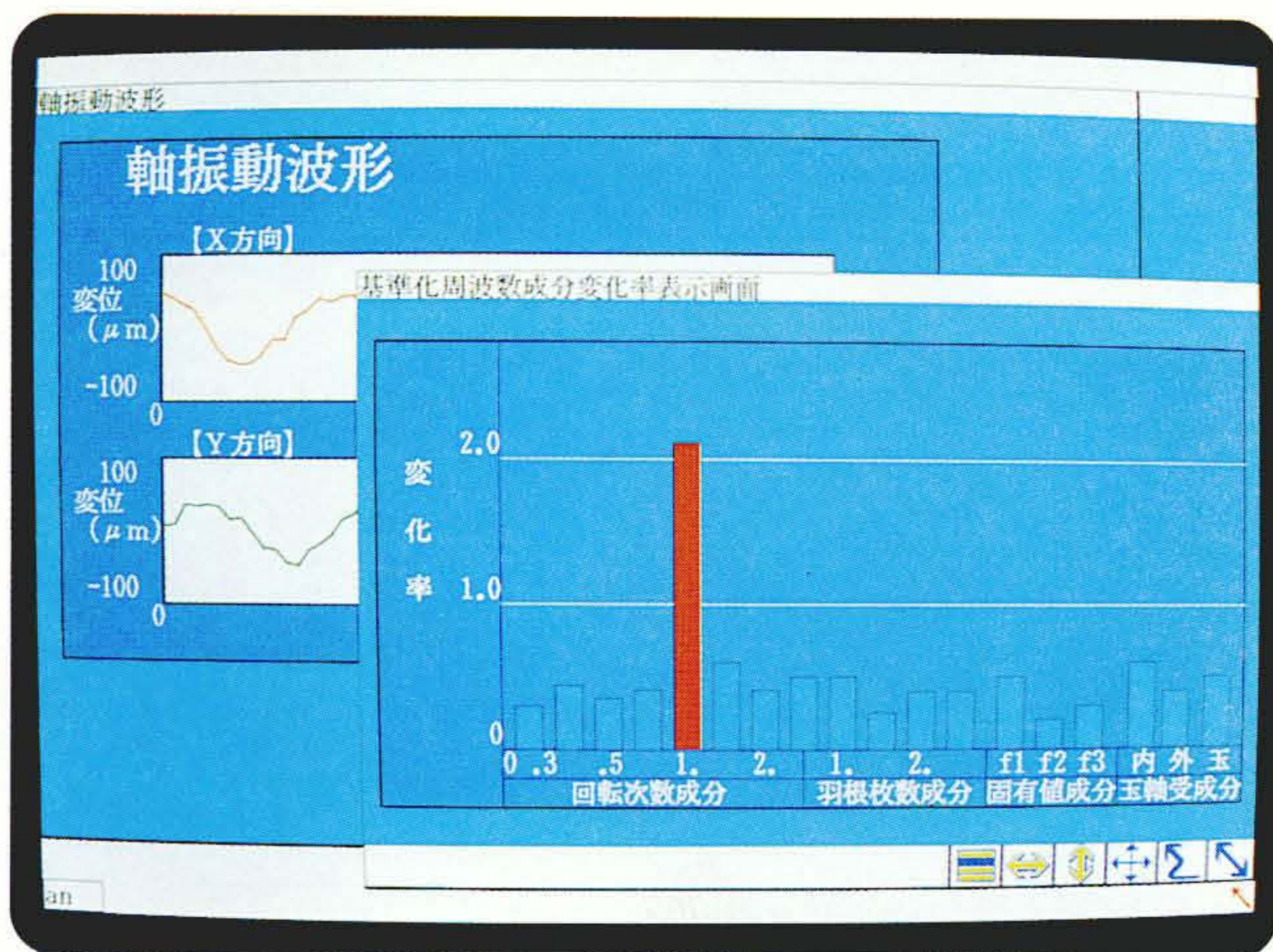


図6 周波数スペクトル表示画面 変化の大きな周波数成分の例を示す。

動周波数成分の変化の大きさを周波数バンド別に表示したものが図6である。この例では回転速度に一致した振動周波数成分の変化が大きいことを示している。これに対応する推定原因は、回転体の欠損、回転軸の熱曲がりなどが考えられる。しかし、周波数成分だけでは故障原因を特定できない場合が多い。

3.2 パターン分析

振動だけでなく、温度、圧力などのプロセスデータの時間的変化(トレンド)を考慮し、要因推定の精度を向上させている。振動位相の変化パターン分類の例を図7に示す。同図中の(3)は位相が急変した場合であり、回転体の欠損が考えられる。これらのパターン情報を導入して、複合的に診断することで振動原因を精度よく特定できるようにした。

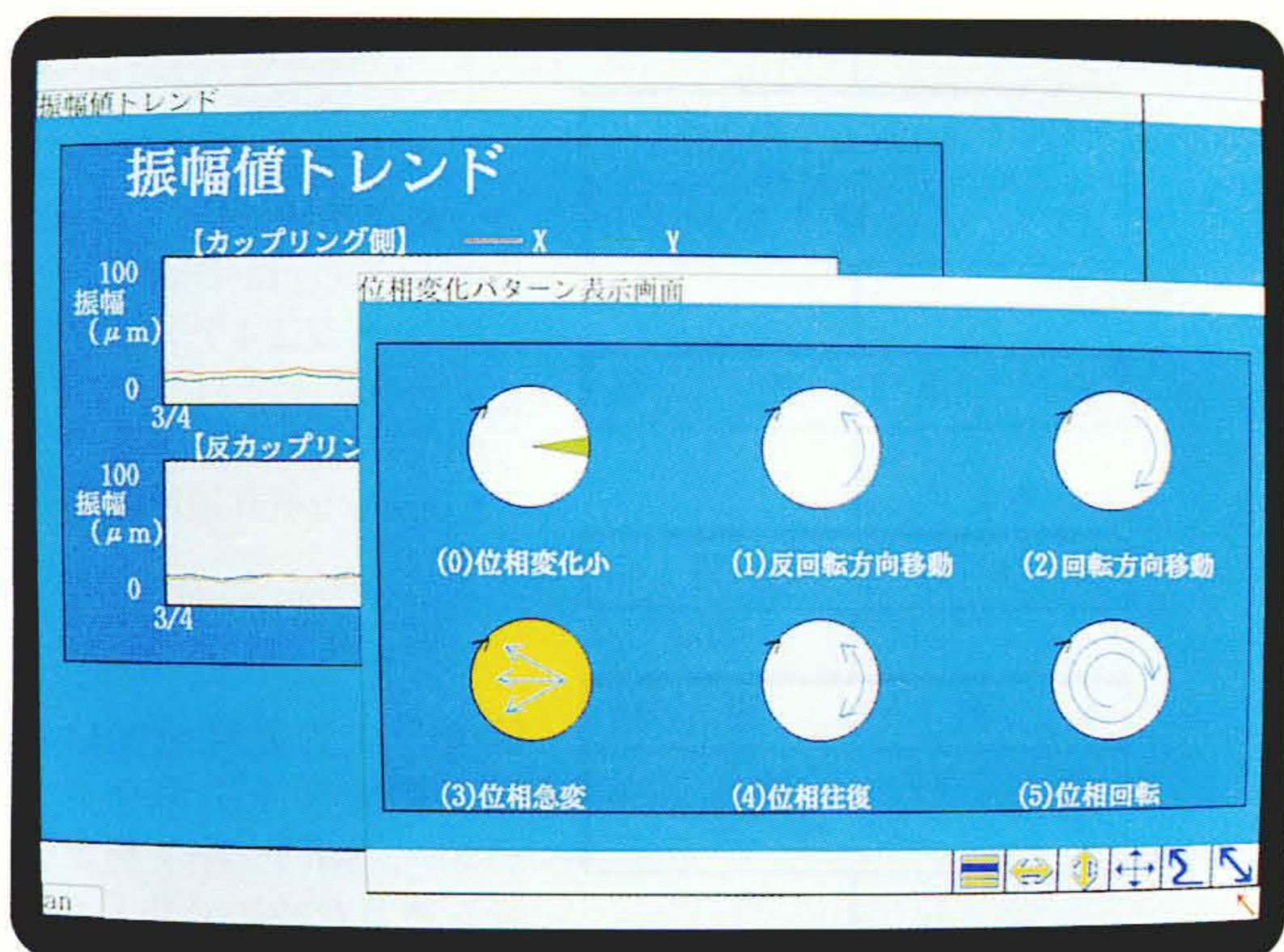


図7 位相変化パターン表示画面 位相が急変した例を示す。

3.3 診断結果とガイダンス

診断表示部では確信度の大きい推定原因を重み付きで表示する。さらに、故障原因を導いた理由や次にどのような対応をとるべきか、をアドバイスする対応ガイダンス機能を大幅に強化した。

4 定期検査中の劣化診断技術

4.1 ボイラ給水ポンプ軸の精密点検

ボイラ給水ポンプは火力発電設備に使用されるポンプの中で最重要補機であり、高温、高圧、高速と過酷な運転条件が要求される。このため、主要部品である軸については、健全性を維持し延命化を図るために定期的な精密点検を実施する必要がある。

ボイラ給水ポンプ軸の非破壊評価手法の開発については、日立評論平成2年8月号など^{3),5)}で述べた。ここでは、ポンプ軸表面の疲労き裂検査システムの改良により、現在実用化されている経年的に発生する腐食ピットの自動検査システムについて述べる。

(1) 腐食による損傷メカニズム

ボイラ給水ポンプ軸は、材料の経年劣化とプラント負荷変動や起動・停止時に作用する過大応力により、疲労が蓄積して損傷に至ると推定されていた。

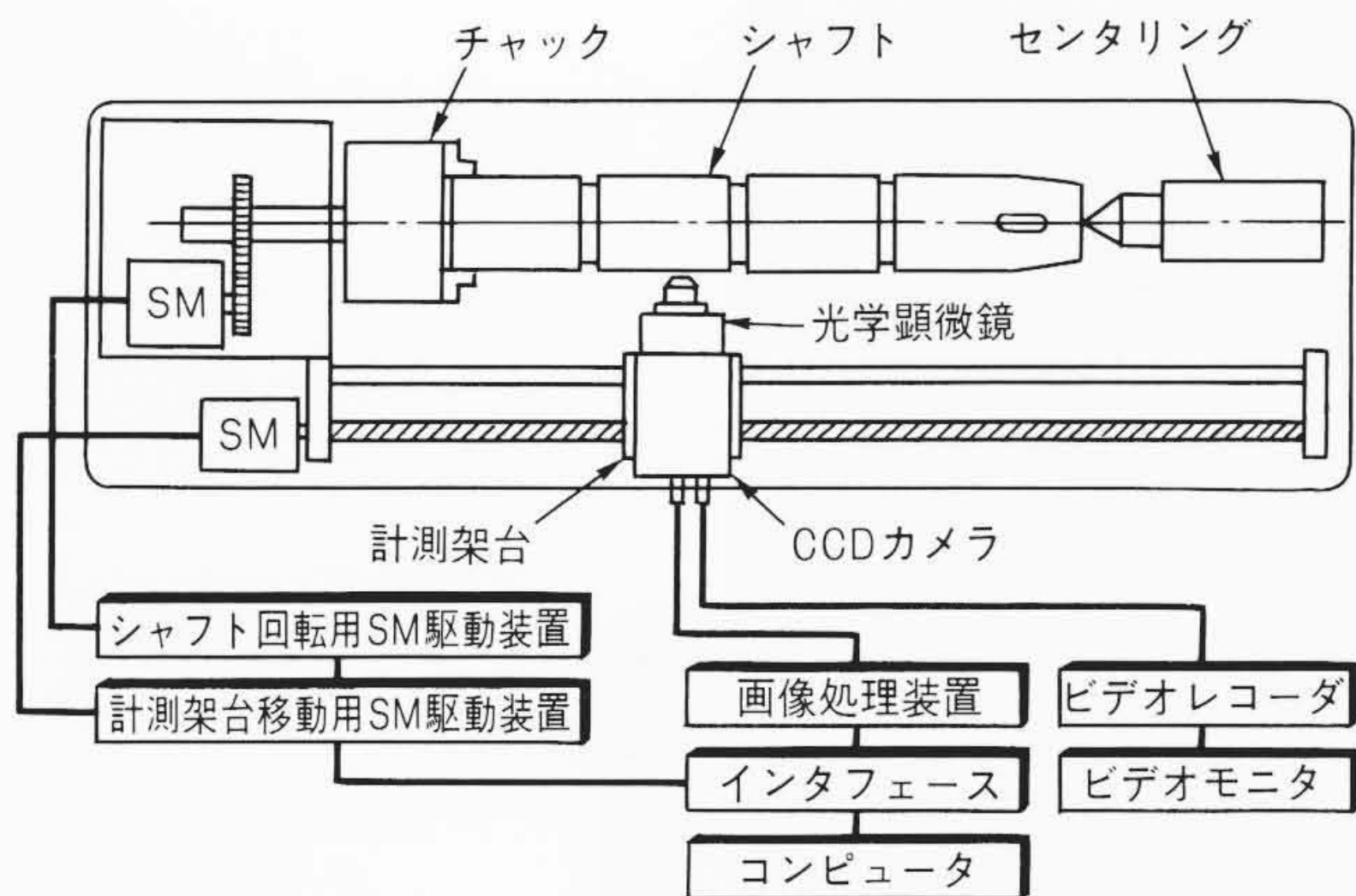
しかし、これまでの損傷事例を再分析した結果、ポンプ軸が損傷に至るメカニズムは以下であると推定することができた。

- (a) ポンプロータの長時間の使用または復水器などの海水リークによって、すきま構造部の腐食環境が悪化する。
- (b) すきま腐食によって軸表面に腐食ピットが発生する。
- (c) 腐食の進行によって微小な腐食ピットが成長・合体し、軸表面に存在する欠陥になる。
- (d) この欠陥を起点として、運転時の応力による応力拡大係数が腐食疲労の進展下限界を超え、腐食疲労によって進展し損傷に至る。

(2) 画像処理によるポンプ軸の自動検査システム(本文37ページの図参照)

光学顕微鏡画像の画像処理による欠陥検査装置を具備したポンプ軸損傷検出システムの構成を図8に示す。

このシステムは、ポンプ軸を回転させる機構と、光学顕微鏡を載せた計測架台を軸方向に走査させる機構を持つスキャナ、および画像処理システムで構成する。検査対象となるポンプ軸は、コンピュータで制御されたSM



注：略語説明 SM（ステッピングモータ）
CCD（Charge Coupled Device：電荷結合素子）

図8 ポンプ軸の損傷検出システム ポンプ軸表面の疲労き裂や腐食ピットを、画像処理装置とマイクロコンピュータによって自動的に検出し、数値データと画像データをデータベース化する。

（ステッピングモータ）によってチャックを介して回転させられ、計測架台はコンピュータで制御されたSMによるボールねじの回転によって走査されるので、ポンプ軸表面の全面検査が実施可能である。光学顕微鏡画像はCCD（Charge Coupled Device：電荷結合素子）カメラによってビデオ信号に変換されて、画像処理装置へ転送される。このシステムには8mmビデオレコーダが組み込まれ、検査時の全顕微鏡画像を記録する。また、欠陥が検出された場合には、ビデオ信号の生画像データはフロッピーディスクに記録される。

(3) 画像処理方法

顕微鏡画像のビデオ信号は、画像処理ユニットで輝度分布に変換されて2値化処理される。処理結果は600ドット×400ドットのCRTモニタに表示される。2値化処理では、最大輝度の約50%に処理レベルを設定している。欠陥の検出は欠陥に対応したクラスタの検知と、欠陥の合体処理のための図9に示したようなクラスタ先端からのベクトルサーチによって行う。腐食ピットと微小な疲労き裂との判別は、欠陥のアスペクト比（欠陥の長さ $2c$ とその直角方向の幅 b から求められる比 b/c ）の大小によって判定するものとした。

実機ポンプ軸で検出された腐食ピットと微小き裂の顕微鏡画像、画像処理後のディスプレイイメージを図10の(a)と(b)にそれぞれ示す。0.1～0.3mmの腐食ピットが13個明瞭(りょう)に検出されており、顕微鏡画像から判断される結果とよく一致している。なお、0.1mm以下のきわめて微小な腐食ピットも多数認められるが、2値化処

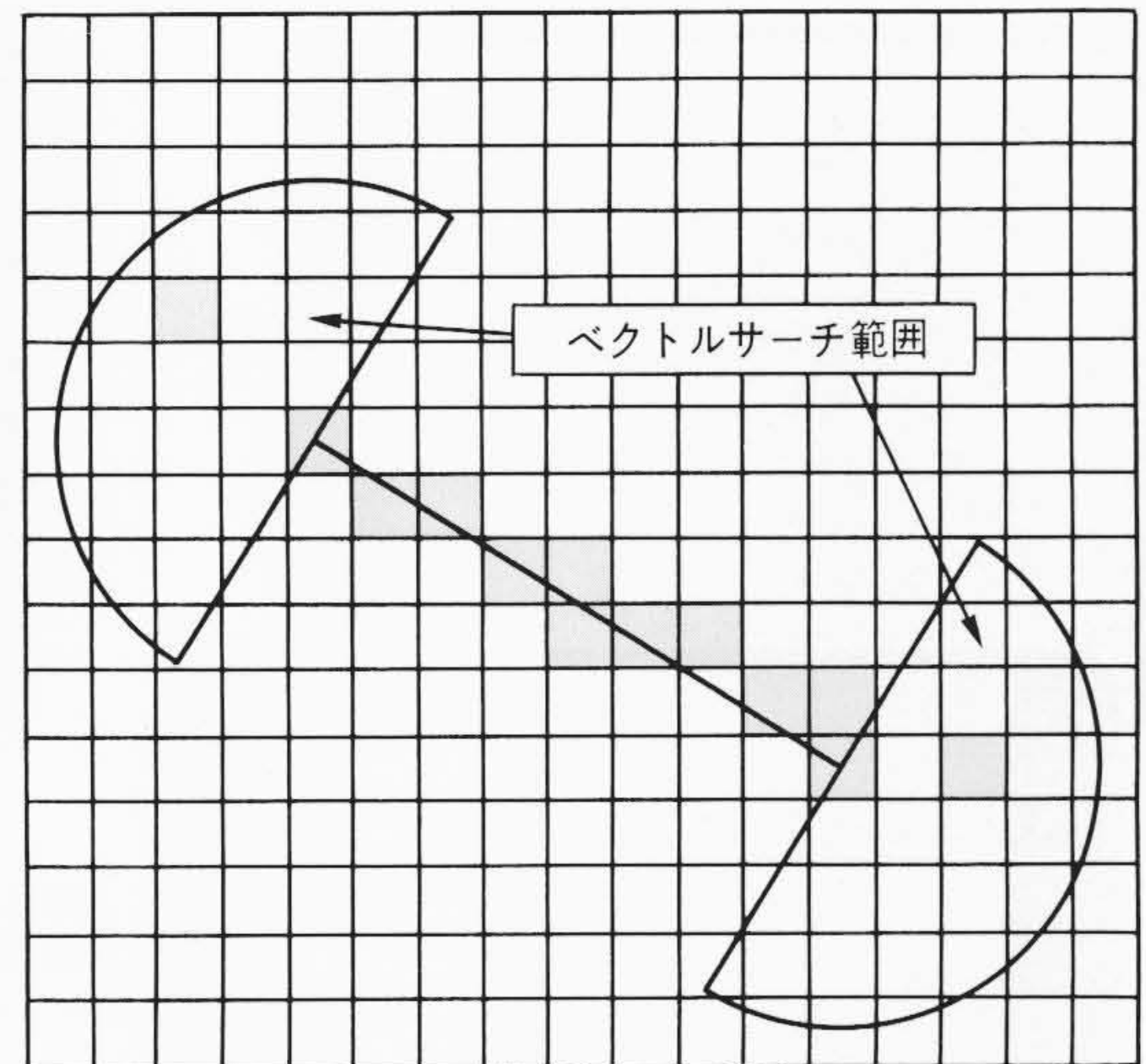


図9 ベクトルサーチによる欠陥の合体処理方法 欠陥と判定されたクラスタの両端から半円形状にベクトルサーチを行い、画像処理装置で欠陥の合体処理および欠陥の判定を行う。

理後の画像でも約30個ほど判定することができる。微小き裂も、顕微鏡画像から判断される結果と一致する。

実機ポンプ軸で検出された腐食ピットと微小き裂の検査結果は、欠陥の中心座標、欠陥長さ、欠陥の幅、欠陥のポンプ軸方向に対する傾き、欠陥の種別などが自動的に求められ、表形式でコンピュータのディスプレイ画面に表示される。また、欠陥の種類、寸法、角度別の頻度分布もグラフ表示が可能である。

このシステムを実用化してから2年半で、約200本の実機軸を検査した結果、平均的には1～2年では腐食ピットの発生は見られない。それ以降になると、有害ではないもののごく軽微な腐食ピットの発生が、大半の軸で認められている。このことは、ポンプは腐食環境に常に置かれており、腐食ピットの発生を完全に防止することが非常に難しいことを意味している。特に復水器で海水リークが生じた場合に、すきま構造部の腐食ピット形成が促進されることが予想される。

このため、腐食ピットの発生を抑制する方策を考案し、実験的にも検証した上で実機への適用を促進した結果、効果を上げることができた。

4.2 トレンド管理

トレンド管理は、ポンプの摺(しゅう)動部クリアランスや振れなどの測定値に対し、従来の絶対値管理に加えて傾向管理を行うものである。従来の絶対値管理は、測定値が許容値内にあるか否かを確認していた。前回の測定値との比較を行うには、前回分解時の定期検査報告書を調べる必要があった。さらに、測定値がどの程度変化

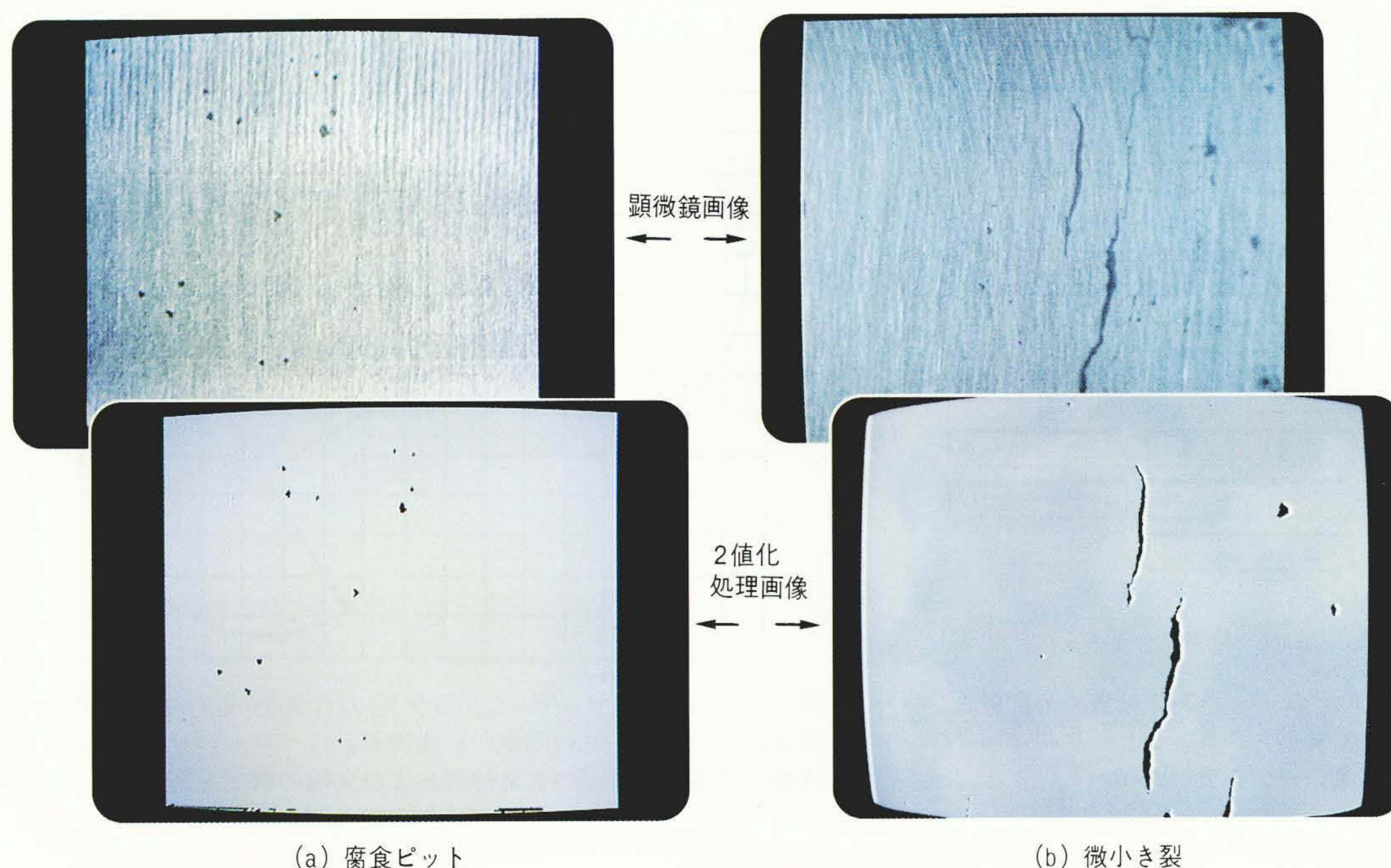


図10 実機軸の腐食ピットと微小き裂の検出画像
ポンプ軸損傷検査システムによって検出された実機軸表面の顕微鏡画像と、2値化処理画像を示す。

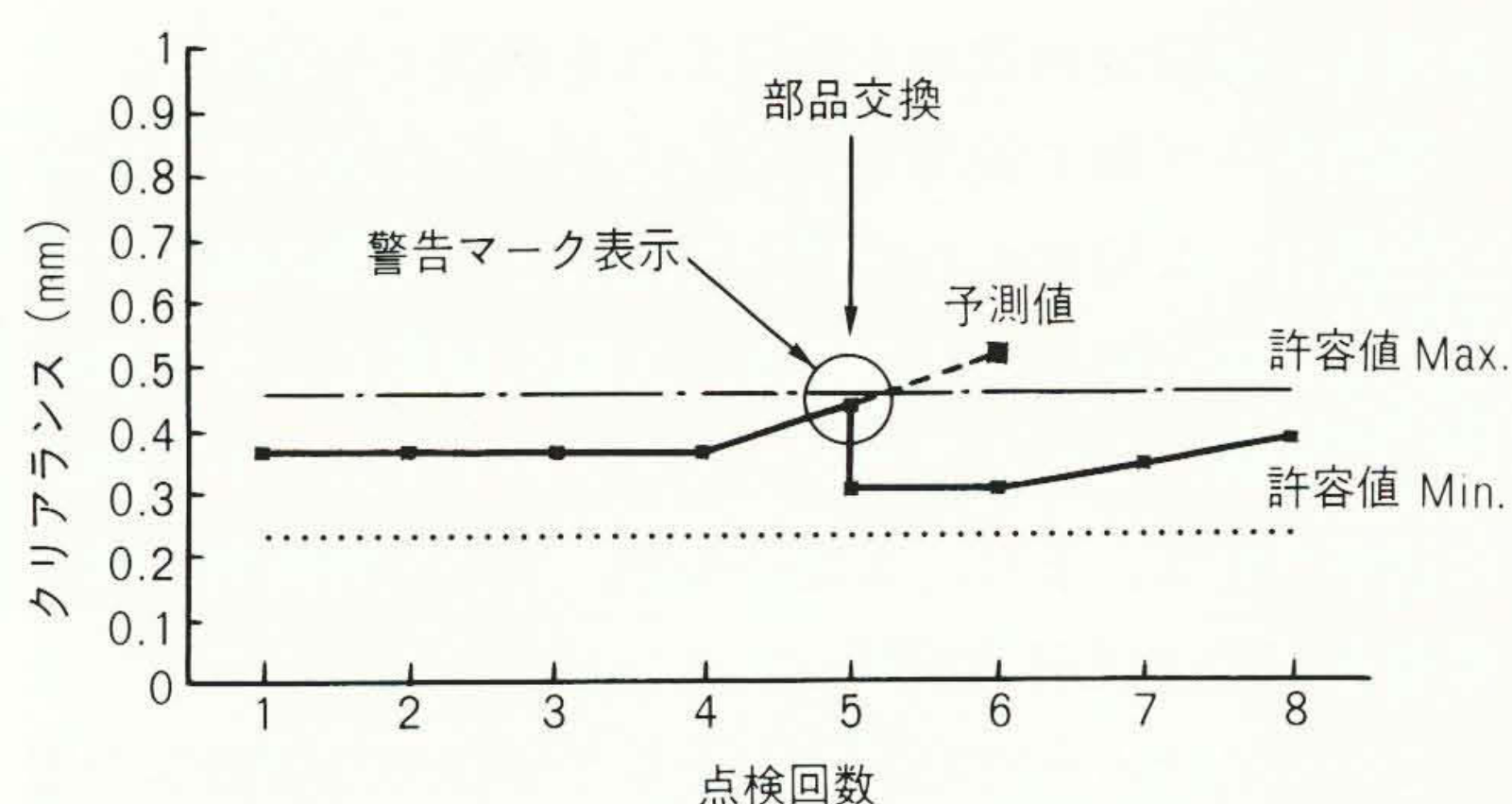


図11 トレンドグラフ 次回予測による検出例を示す。

しているか、その傾向を確認するためには、過去の定期検査報告書から測定値を抜き出してグラフ化する必要があり、多大の労力を要した。

トレンドグラフの例を図11に示す。グラフの実線は実

績を表し、破線は予測を表している。同図に示すように、次回以降の測定値の変化を予測して、許容値を超える前の的確な時期に部品交換などの推奨をするために傾向を管理するものである。

5 おわりに

火力発電設備用のボイラ給水ポンプでの耐力向上につながる新技術、プラント稼動中のポンプの故障を診断する技術、および定期検査中に行われる経年劣化を診断する技術の開発状況について述べた。今後とも電力会社をはじめ関係各位のご指導を得ながら、ポンプの経年劣化および運転の過酷化に対して安定運転を維持、継続するための技術開発を進めていく考えである。

参考文献

- 1) 田中，外：羽根車上流流れの非一様性の吸込性能への影響(第1報 実験結果)，日本機械学会論文集，Vol.54，No.503，1693～1697(1988)
- 2) 田中，外：羽根車上流流れの非一様性の吸込性能への影響(第2報 解析的検討)，日本機械学会論文集，Vol.54，No.503，1698～1702(1988)
- 3) 植山，外：ポンプ設備予防保全の新技術，日立評論，72，8，815～822(平2-8)
- 4) 天野，外：日本機械学会日立地方講演会講演論文集，142～144(1992-9)
- 5) Hayashi, M., et al.: "Life Diagnostic System for Boiler Feed Water Pump Shaft in Fossil-Fuel Power Plants," Materials Evaluation Vol.50, No.5, 616～621(1992-5)