

当社の回転機械診断・予知保全技術への取り組み

劉 信芳（技術本部 技術部）

本稿は、お客様から「選ばれる」、「頼りにされる」、「安心して任せられる」屈強なパートナー企業を目指すために、回転機械メンテナンスサービス全般にわたり、従来から有する保全技術に加え、①診断技術の研究・開発および現場展開、②整備技術・施工法の確立および施工事例、③お客様と一体となった予知保全・計画保全システム構築実績、④メンテナンス技術・技能の伝承への取り組みについて既発表の論文・講演資料を引用し、解説する。

1. はじめに

生産性と競争力はモノづくりおよび企業生き残りの根幹であり、人と生産設備は生産性と競争力維持の基本要素である。しかし、モノづくり大国日本の産業界は団塊世代の大量退職によるノウハウの消失、いわゆる2007年問題、並びに高度成長期に大量に建設された生産設備の高経年化問題に直面している。一方、人による生産設備の維持管理すなわちメンテナンスは安全・安心な生産現場づくりに直接関係し、企業の生産性と競争力を左右する。産業界を取り巻く環境が非常に厳しい状況の中、当社はプラント建設とメンテナンスサービスを通じて、お客様の安全・安心な生産現場づくり並びに生産性および競争力向上に貢献するために、メンテナンス技術・技能力の向上や提案型メンテナンス、「最適整備（当社登録商標）」などの施策を講じている。本稿は生産設備の一役を担う回転機械のメンテナンスに対する当社の取り組みについて紹介する。

2. 診断技術の研究・開発および現場展開

2.1 汎用振動信号計測システム構築および診断解析ソフトの開発¹⁾

一般的な回転機械の状態診断は最近の携帯型振動診断機でほとんど対応できる。しかし、構造が複雑な回転機械や異常が多発する回転機械の異常診断・原因特定を行う場合は、振動信号のほか、回転信号、または多チャンネルの振動信号を同時に計測し、高分解能の解析が必要となる。当社は図1に示した多チャンネル対応の振動信号計測システムを構築し、独自の信号解析・診断ソフトを開発した。この計測診断システムと携帯型診断機を活用し、2002年から多数の診断解析を行っている。

本システムはすべて低価格の市販品により構成され、①8CH対応、②コンパクトで携帯便利、③長時間リアルタイム計測、④高分解能のFFT(Fast Fourier Transform)解析などの特徴がある。

現場応用の一例を紹介する。図2はスクリー圧縮機オ

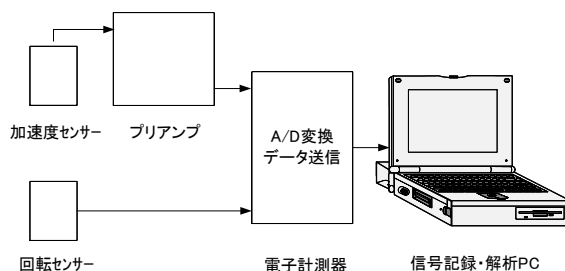


図1 多チャンネル振動信号計測システム

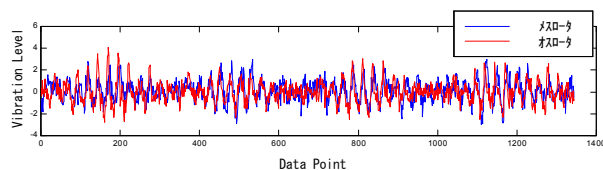


図2 2CH同時計測した振動信号の重ね書き

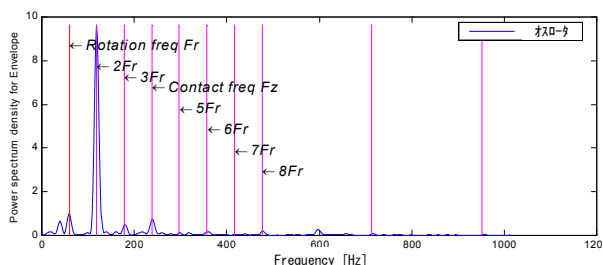


図3 包絡線処理後の振動信号パワースペクトル密度

スロータとメスロータ反カップリング側軸受部に2CH同時計測した振動波形であり、各ロータ2回転分の時系列波形の重ね書きである。この高調波成分に含まれる脈動成分を解析するために、生振動信号に1kHzのハイパスフィルタを掛け、包絡線処理したパワースペクトル密度を図3に示す。同図より、回転周波数 f_r (59.5Hz)とその整数倍の成分が顕著であるとともに、 $2f_r$ の成分は著しく強いことから、軸受の組み込み不良によるものと特定できた。半

年後、この軸受部の振動加速度が危険レベルを超えたため、スクリー圧縮機を開放検査した結果、異常と診断した軸受にフレーキングの発生が確認できた。

2.2 非定常系回転機械診断技術の開発²⁾

半導体製造プロセスにおいて、単結晶シリコン引上げや成膜などの製造工程では真空ポンプが多く使われており、そのプロセス条件により生成物などが悪影響を及ぼし、製品製造中に真空ポンプの突発停止が発生する場合がある。その場合、多額の損失をもたらすことになる。このようなお客様の課題に対して、お客様と一体になって、真空ポンプの故障原因究明から、状態監視・診断方法の開発まで取り組んだ。

半導体用真空ポンプは、流体回転機械の一種であるが、従来の流体回転機械の機械系による異常や流体系による異常と異なり、以下の問題がある。

- (1) 生成物が生じ、真空ポンプの内部に付着、堆積し、回転部に摺動・摩耗が発生する。
- (2) 半導体製造プロセスのほとんどはバッチ処理であり、真空ポンプの負荷は定常状態ではなく、振動値が常に変化する。
- (3) メカニカルブースタポンプとドライポンプの組み合わせ使用により振動の相互影響が発生する。
- (4) 真空配管の詰まりにより吐出抵抗が高くなるため、従来の振動信号による監視・診断方法は半導体用真空ポンプに適用できない。

このような状況の真空ポンプに対して、長時間にわたり振動信号と温度、排気圧などの物理量を同時に計測・解析し、真空ポンプの正常または各種異常状態の動特性と故障の原因を分析した。それを基に真空ポンプ用常時監視・診断装置 VPMS(Vacuum-Pump Monitoring System)を開発し、現場検証と実運用により診断アルゴリズムおよび診断機器の実用性を確認した。

計測した振動信号に対して、時間領域での有・無次元特徴パラメータ解析だけでなく、周波数領域の解析も行った。真空ポンプの過渡状態・非定常状態解析の一例として、3次元瞬間パワースペクトラム解析結果を図4、図5に示す。図4は真空ポンプ異常の初期状態の解析結果であり、図5は真空ポンプ異常が進行した状態の解析結果である。両図の比較により、初期異常の場合は低、中周波領域の振動が主体であるが、異常進行した場合には高周波領域の振動が顕著になった。また、低、中、高周波領域共に特定の周波数にピークが現れているため、真空ポンプの異常は生成物に起因する摺動から内部接触または軸受故障まで進行したと推定した。そして、分解・整備を行い、この推定が正しかったことを検証した。

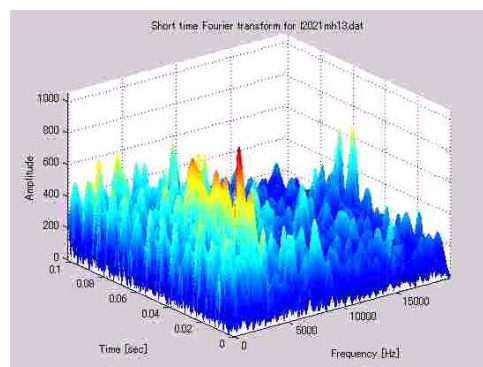


図4 真空ポンプ初期異常状態の解析結果

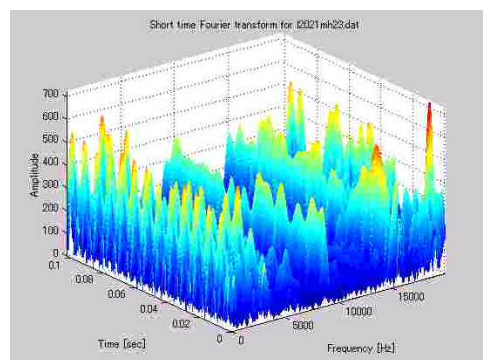


図5 真空ポンプ異常進行した状態の解析結果

2.3 複合センシングを用いた低速回転機械診断技術の開発³⁾

回転数 300rpm 以下、特に 180rpm 以下の低速回転機械には、①振動信号のレベルが弱くなり、有効信号とノイズの比が大幅に低下し、異常特徴の抽出が困難である。②異常特徴信号が不安定でばらつきが大きいいため、異常の識別が難しい。③市販の振動計測装置で、検出または解析できる振動信号の周波数範囲は殆んど 3Hz 以上となり、3Hz 以下の信号の検出が困難である。などの問題点があり、通常の振動診断方法では検出できないケースが多い。

当社は振動信号に加え、動的ひずみ信号と動的変位信号を用いた複合センシングによる低速回転機の状態診断、特に構造系の異常診断方法を開発し、その有効性を攪拌機、高炉炉頂挿入装置の診断実績により検証した。

攪拌機の回転数を 20rpm、水量をそれぞれ、「なし、少、中、多」に設定し、攪拌軸の動的変位、攪拌軸軸受部のひずみと振動を計測した。レーザ変位計で計測した動的変位の FFT を図6に、ひずみの FFT を図7に示す。図6、図7より、水量の変化とともに、動的変位の FFT と動的ひずみの FFT は回転周波数およびその高調波のピークははっきり現れ、攪拌機のダイナミックストレスの変化を忠実に表している。従来方法では、これほど低い回転数の回転機械の振動信号の FFT 解析はほとんど期待できないが、本開発により実現した。

2.4 モータ電流情報量診断技術開発および診断技術の商品化⁴⁾

振動信号による回転機械の状態診断方法は広く使われている。しかし、液中回転機械、高温・高湿環境下回転機械、原子力発電所放射線管理区域用回転機械、毒・劇物エリア用回転機械、ロボットについては、振動信号の計測作業が困難であり、有効な診断方法が確立されていないため、新しい診断技術・商品が求められている。

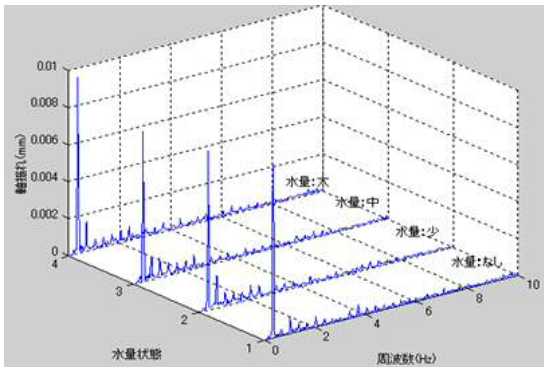


図6 水量変化による攪拌軸の動的変位 FFT

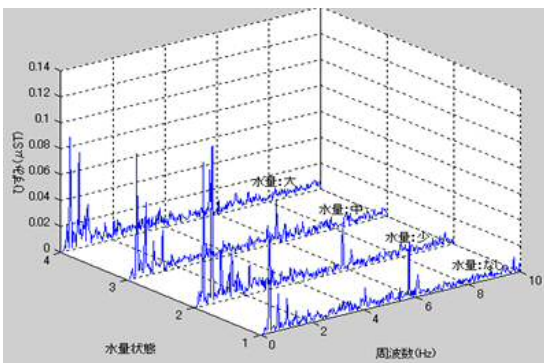


図7 水量変化による攪拌軸軸受部動的ひずみ FFT

当社では以上の状況を踏まえ、モータ電流信号による回転機械系（モータと負荷側設備）状態診断技術の基礎研究から、商品開発までを実施してきた。統計解析と情報理論を用い、電流信号に含まれている回転機械系の状態情報を十分に抽出し、活用することにより、初めて電流信号による回転機械系の簡易診断・劣化傾向管理技術を確立した。精密診断として、高周波電流時系列波形の包絡線処理・解析手法を負荷側の状態診断に初めて実現し、また、従来モータ固定子と回転子の状態識別に用いる側帯波解析技術を負荷側回転機械軸系の状態識別および流体回転機械の状態識別へと応用幅を拡大させた。さらに、包絡線処理・解析、側帯波解析、高調波解析、過渡電流解析など4種類の解析手法を体系化し、回転機械系の状態診断技術として「電流情報量診断システム（T-MCMA：TAKADA Motor Current Multiplex Analysis）」を開発した。

本診断システム商品の基本タイプの開発が完成し、お客様の現場で実用検証と系列商品の開発を行っている。診断システムの構成を図8に示す。診断システムの特徴として、モータ電流信号を多重解析することにより、モータ本体および被駆動回転機械の同時状態監視・診断を可能にした。電気盤で電流信号を計測するため、センサーを設置する必要がなく、液中、高温、高湿などの劣悪な環境他、毒・劇物などを扱う危険エリアなど振動計測が困難な回転機械の状態監視・診断も簡単・安全・正確に行うことができる。また、インバータ等制御機器および電源品質の監視・診断も可能である。

本診断システム商品は先行性、独創性に優れていると評価され、JIPM2010年度TPM優秀商品賞開発賞を受賞した。開発賞ロゴを図9に示す。



図8 電流情報量診断システム(T-MCMA)の構成



図9 TPM 優秀商品賞開発賞ロゴ

3. 整備技術および施工法の確立

3.1 プロアクティブメンテナンス

現在の設備管理における生産損失を含めたトータル保全コスト削減の傾向は、機械摩耗など異常の根本的な原因に焦点を絞ったメンテナンス・ソリューションを指向している。このようなトータル保全コストを削減するためには、設備そのものを劣化させないことが重要である。劣化や故障を防止するための事前保全活動を総称して、「プロアクティブメンテナンス(PRM : Proactive Maintenance)」という。PRMでは、設備診断技術を用いて、原因系のパラメータを科学的に監視診断し、劣化や摩耗などの故障原因を事前に除去する最新の保全技術である。当社は、回転機械劣化の主な原因である回転体アンバランスと回転軸のミスアライメントに着目し、高度な診断・解析技術と修復・整備ノウハウを融合した現場診断・修正施工技術を確立している。それら回転機械 PRM サービスはお客様に高い評価をいただいている。

3.2 現場アンバランス修正施工技術の確立

3.2.1 現場アンバランス修正技術⁵⁾

アンバランスの修正方法には、バランシングマシン法とフィールドバランシング法がある。バランシングマシン法は回転体単体のバランシングを目的にした方法である。この方法では、回転機械を分解し、回転体を取り出し、整備工場へ運び、バランシングマシンを用い、修正作業を行う。本方法は時間と費用が掛かるだけでなく、修正時の運転条件と実稼動状態での運転条件とが異なるため、現場で回転体を据え付けた後、再び振動が発生することがある。一方、フィールドバランシング法は、現場において回転体を据え付けたままの実稼動状態の運転条件下で振動を低減させる方法である。本方法は市販のフィールドバランサーを用い、回転体アンバランスの量と角度を算出し、分解することなくバランス修正作業を行うことができるため、短工期、低コストなどの特徴がある。当社は一面修正と二面修正の施工技術を確立し、施工法を標準化した(図 10)。現場の実績では工期が従来のバランシングマシン法に比べ、60%以上短縮し、設備の長時間停止による生産への影響を最小限に抑えることができる。

3.2.2 現場修正事例紹介

修正対象である分解炉誘引送風機は過去より振動が高かった。それは分解炉スーツブロー後、振動変位 (P-P) は $500\mu\text{m}$ 、振動速度 (OA) は 16 mm/s 以上の激しい振動が発生した。振動値は表 1 の振動判定基準を大幅に超えていた。当社は、診断解析から整備修復まで一括で対応した。

まず、状態診断を実施し、異常振動の原因を次のように



図 10 アンバランス修正とレーザ心出し施工手順書

表 1 送風機振動判定基準

振動管理値	注意	危険
変位 (P-P μm)	110	180
速度 (OA mm/s)	5.0	8.0

* P-P : Peak to Peak, OA : Overall

判断した。

- (1) インペラにダストの大量付着
- (2) インペラ本体のアンバランス
- (3) インペラの軸方向の振れ

診断結果に基づいて、次に示す整備を行い、修復した。

- (1) カップリング心ズレ確認
- (2) 付着ダストの掃除
- (3) フィールドバランシング : 一面修正, 溶接で修正重りを取り付け

今回の対象機器のバランス修正による目標振動レベルは変位 (P-P) $60\mu\text{m}$ 、速度 (OA) 3 mm/s であった。これに対して、バランス修正完了、運転再開後の振動レベルは、変位 (P-P) $30\mu\text{m}$ 、速度 (OA) 1.0 mm/s となった。

今回の現場対応について当社は診断からバランス修正まで一括で 1.5 日の工期で実施し、他社より 62.5% の工期短縮となった。さらに、振動レベルに関しても目標を大きく上回るレベルに到達できた。

3.3 レーザ心出し施工技術の確立

回転機械はミスアライメント状態で運転すると、①ベアリングとシールの寿命を短くする、②カップリングと機械部品の温度が上昇する、③電気エネルギー消費を増加させる、④回転機械およびその周辺接続装置の故障率が上がるなどといった悪影響をプラント全体に及ぼす。

従来のダイヤルゲージを用いた心出し施工法では、①修正には経験が必要、②個人の技量・技能により心出し精度がばらつく、③治具の製作が必要となる場合もある、④精度が確保できないなどといった問題点があり、ミスアライ

メントは回転機械振動異常の主要因でもある。

そこで、当社はレーザ心出し装置を導入し、異なる構造の回転機械と複雑な現場環境に対応できる施工法を確立した。これを社内展開するため、①レーザ心出し施工要領書・作業手順書の作成（図 10）、②運転中の回転機械ミスアライメントの診断および修正要否の判断方法策定、③技術・技能社員に対する教育、④施工法の現場展開、⑤ニーズの高い事業所へのレーザ心出し装置の導入などの活動を実施してきた。現在、全国に配置する支社・事業所の大半が施工実績を保有している。

施工実績の一例として、某製紙工場の抄紙機整備作業を紹介する。中間軸があるため、従来の施工法ではあらかじめ治具を製作し、心出し作業前に治具の取り付け作業が必要となり、心出し精度が確保できないだけでなく、施工工数が 420 人・hr かかっていた。レーザ心出し施工法の導入により、心出し精度を確保した上で、施工工数が 72 人・hr まで下がり、83%の工期短縮を実現した。

4. お客様と一体となった予知保全・計画保全システム構築^{6),7)}

4.1 予知保全方法の導入

第 3 項に記述したように、保全費のコストダウンは製造業にとって永遠のテーマである。事後保全（BDM）、時間基準予防保全（TBM）、予知保全（CBM）など 3 種類の保全方式の中で、予知保全のコストが一番低い。しかし、予知保全方法を導入するためには、一定の技術力と診断装置の初期投資が必要である。特にこの技術力の不足が企業の予知保全方法導入の壁となっている。このため、当社は長年蓄積してきた設備診断と予知保全の技術を活かし、お客様とともに予知保全・計画保全システムの構築を行っている。

4.2 予知保全のための基盤整備

基盤整備の第 1 ステップは、お客様と共同で設備の現状調査を行うことから始まり、機器の所在、機器の仕様、運転状況、故障・整備履歴を調査する。第 2 ステップでは生産への影響度合い、品質への影響度合い、保全コストの大きさ、安全および災害への影響度合いの総合評価により点検設備の選定と保全方法の決定を行う。第 3 ステップは対象機器の振動計測箇所・方向、点検周期、判定基準（仮）を設定し、機器ごとの点検仕様書を作成する。これら基盤整備は、お客様と共同で作業する場合とお客様の承認を得て当社単独で作業する場合がある。

4.3 定期点検・簡易診断・精密診断

予知保全の基本は設備の状態管理である。点検仕様書に基づいて、定期的な点検（振動計測）作業を実施し、対象

機器の劣化傾向管理と簡易診断を行う。それらの結果に基づいて精密診断対象機器、または整備対象機器を抽出し、製造部門と調整を行い、精密診断または整備作業を実施する。これで、予知保全・計画保全は軌道に乗る。この一連の作業は当社によってすべて業務代行可能である。

4.4 診断結果に基づく修復

予知保全のための基盤整備作業完了後、当社は一回目、または一定期間までの点検（振動計測）、傾向管理、簡易診断作業を依頼されるケースが多い。ここでは、その事例を紹介する。

当社は某化学工場に予知保全システム構築から点検（振動計測）、傾向管理、簡易診断作業までの依頼を受けた。機器大型定修前から状態管理業務がスタートし、定修後までの定期点検作業時の管理対象機器数を表 2 に示す。

定修前の振動レベルに比較すると、振動測定対象機器の 9 割以上は振動値が横ばいか、下がった。それ以外の 7 台の振動レベルは高く、整備不良の可能性があるとして、是正工事を提案した。そのような状況の中、是正対象である攪拌機減速機整備時に固定ピンが脱落していることがわかり、突発故障を未然に防ぐことができた。

5. メンテナンス技術・技能の伝承

5.1 受講者と講師

はじめに述べた 2007 年問題への対応は重要であり、当社も従来以上に人材育成に力を入れている。ここでは、回転機械メンテナンス人材育成の取り組みを紹介する。教育の対象者は保全関係の技術社員と中堅以上の仕上げ技能社員である。講師陣は当社技術部回転機械診断グループのベテラン技術員に加え、日本において設備診断の第一人者である豊田利夫先生のご指導を受けている。

5.2 回転機械診断・予知保全技術教育

本教育は、回転機械の設備診断・予知保全に関する全般的かつ初歩的な知識の習得により、現場保全技術者として、携帯型診断機による設備の簡易診断と劣化傾向管理など

表 2 状態管理対象機器数

内 訳		台 数
運転中	振動測定機器	137
	振動未測定機器	12
	計	149
停止中		97
合 計		246

の基礎技術を身につけ、その実務作業ができることを目的とする。

教育は三日間のコースで、座学と実技により構成されている。教育内容は①保全技術の動向と予知保全の基礎、②振動の性質と測定技術、信号処理技術の基礎、③簡易診断・傾向管理技術、④精密診断技術、⑤軸受診断法、歯車診断法などである。

この教育は2001年より年に2~4回定期的を実施しており、現在、お客様の受講者を含め、延べ190名が受講している。

5.3 回転機械整備・修復技術教育

本教育は、回転機械異常振動の主要因であるミスアライメントとアンバランスが発生した場合の動的力学特徴とその診断識別手法の理解を図り、現場においてフィールドバランシング、レーザ心出しの施工管理、施工担当ができるようになることを目的とする。

この教育は回転機械診断技術教育受講済みを前提として、三日間のコースで、座学と実技により構成されている。教育内容は①回転体力学の基礎と釣合い良さ、②振動信号によるアンバランスの識別および修正技術、③バランス修正訓練、④アライメントの重要性とミスアライメントの識別、⑤レーザ心出し技術と施工法、⑥レーザ心出し訓練などである。

この教育は2002年より年に1回実施しており、現在、お客様の受講者を含め、延べ49名が受講している。

5.4 回転機械保全専門技術員の教育

本教育は、回転機械の診断と整備技術を総合的に運用し、故障原因の解析、修復方法の策定、回転機械整備標準書・要領書などの技術書類作成、さらに回転機械の大型定検・定検工事の技術担当ができることを目的とする。

2010年度からは、生産拠点から4名の若手技術員を選し、本社技術部回転機械診断グループで約半年間の集中教育・訓練を実施している。教育・訓練の内容は①精密診断技術、故障解析技術教育とOJT、②回転機械修復技術教育とOJT、③回転機械整備技術書類作成訓練、④大型定検・定修工事技術担当OJTなどである。

若手技術員は所定の教育内容を終了し、所属部署に帰任した。今後は受講者に対するフォローを行い、教育実施の効果を把握した上で、各生産拠点と連携して、この教育を継続的に実施していく。

6. おわりに

本稿では、当社回転機械メンテナンス事業における診断・予知保全の技術開発から、現場展開・人材育成までの

近年の取り組みについて紹介した。従来のようにお客様の指示にしたがって、単なるプラントの補修・整備工事を行うだけでなく、お客様の屈強なパートナーとして、診断解析技術、提案型メンテナンス、メンテナンス・ソリューションといった新しいサービスをお客様に提供するとともに、お客様と一体になって、メンテナンスの方法および結果を最適化する「最適整備」を追求していく。

参考文献

- 1) 劉 信芳, 馮 芳, 豊田利夫: “SRMの診断事例より異常原因の特定および再発防止の考え方”, 高田技報, Vol.15, pp.6-11(2005)
- 2) 劉 信芳, 早瀬勝也, 馮 芳: “半導体工場向け真空ポンプの状態監視診断技術”, プラントエンジニア, Vol.41, No.4, pp60-63(2009)
- 3) 馮 芳, 劉 信芳: “複合センシングによる低速回転機械の状態診断に関する研究”, 高田技報, Vol.18, pp.4-9(2008)
- 4) 劉 信芳, 馮 芳, 河村正樹: “電流信号多重解析による回転機械系の状態診断”, 高田技報, Vol.21, pp.20-25(2011)
- 5) 劉 信芳: “回転機械最適整備技術—アンバランスの診断とフィールドバランシング”, 高田技報, Vol.20, pp.14-19(2010)
- 6) 劉 信芳: “回転機械の診断技術を駆使した最適整備”, 日本プラントメンテナンス協会2009年度PE最新保全調査研究会研究発表会論文集, pp.45-61(2009)
- 7) 豊田利夫: 「予知保全(CBM)の進め方」, 日本プラントメンテナンス協会, pp.7-39(1991)



劉 信芳 Xinfang LIU
㈱高田工業所 技術本部 技術部
回転機械診断グループ グループ長
主任研究員 情報工学博士