

動作音を用いた真空ポンプの故障診断 ——動作音から見た真空ポンプの摩耗性故障進行モデル同定——

非会員 松田 将大 (九州工業大学) 正会員 久代 紀之 (九州工業大学)

非会員 高原 邦夫 (ナガセテクノエンジニアリング株式会社)

Acoustic Diagnosis Method for Vacuum Pump Condition

--Identification of Abrasion Failure Progression Model from the Driving Sound--

1. まえがき

半導体集積装置の製造ラインは、稼働率向上のために終夜の運転が一般的である。しかし、長期の連続運転は構成部品を摩耗させ、故障による装置の突発的停止を生じさせる。

摩耗性の故障を生じる装置の一つとして、冷却用真空ポンプがある。ポンプの停止には製造中の半導体素子への不具合発生のほか、ライン停止による生産計画への影響などの大きなリスクがある。

上記リスクを回避するために、現在は定期メンテナンスが行われている。しかし、その間隔は経験的に求められたものであり、正確とは言えない。そのため、本稿では機器を停止させない故障診断手法を開発することで、メンテナンス間隔の最適化を行う。

機器動作中に獲得可能なデータとしては、振動・電流・温度などが挙げられる。それらのうち、本研究では以下の理由から機器の動作音に着目して開発を行う。

- ・ 長期稼働による動作音の変化が確認されている。
- ・ ベテラン保全員の間で動作音が状態診断の指標として用いられることがある。
- ・ 動作音は他の手法よりも容易・安価に取得できる。

本稿では先行研究に引き続き、主要故障の一つである、シール部品の摩耗による冷媒漏洩（以下、シールリークと表記）を対象とした開発を行う。実フィールドでの動作音から寿命末期品の推定実験を行い、調査・解析結果を元に精緻化した故障状態進行モデルを作成する。

2. 先行研究の成果

実フィールドでの機器動作音を約1年分取得し、解析を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

1. 機器の故障要因調査と基礎実験を行い、動作音の変化とシールリークによる性能劣化の関連を確かめた (図1)。
2. 動作音の物理的特性や再現性を確かめ、ウェーブレット変換によって周波数解析を行う試験ツール

を作成した。

3. 図1 枠内の積分値に着目し、実フィールドデータの解析を行った。その結果、動作音の変化が時系列に沿って起こる傾向があることを発見した (図2)。

4. 図2の線型関係を元にして、動作音の変化から故障進行度合いを判定するアルゴリズムを作成した。

実フィールドにおいて、図1右のような性能劣化を表す音響特徴を示すにも関わらず、異常なく動作する機器が観察された。そのため、4のアルゴリズムに精緻化の余地があることが分かった。よって本稿では、関係に沿わない特性を持つポンプに着目し、詳細な解析を行った。

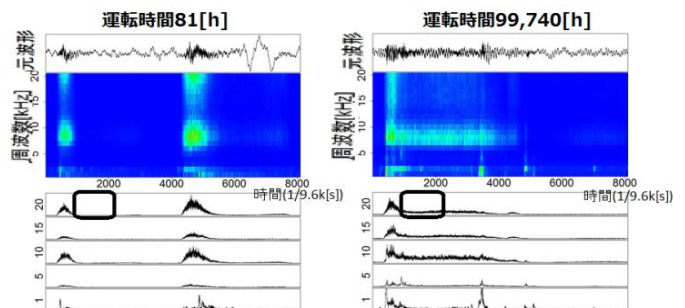


図1. 正常な機器 (左) と摩耗した機器 (右) の周波数特性 (四角枠はシリンダに冷媒が供給された直後の、漏洩特徴が表れやすい時間を表す)

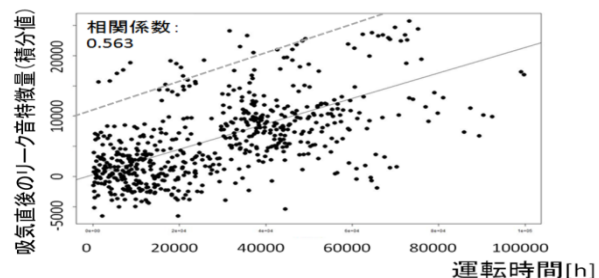


図2. 実フィールドデータ約600個を対象とした漏洩特徴 (積分値) と運転時間の関係

3. 故障特徴の不安定さに着目した寿命末期品推定

図2に示すように、故障特徴はおおよそ時間・積分値の回帰直線に沿った関係を持つ。しかし、図2点線上部

などのように、関係に反して回帰直線から外れ、早期に故障時の波形(図1右)を示す機器があった。加えてそれら外れ値を示す機器の中には、月ごとの特徴が不安定な機器があることが観察された。通常ならば積分値は緩やかに増加すると考えられるため、外れ値や変動の大きい機器は異常な挙動をしていると言える。

上記特徴を故障の徴候ととらえ、変動の特に大きい5機器を対象に1日ごとの動作音取得を行った。その後、上記5機器のうち3機器が故障によって回収されたため、それらについて故障要因の分析を行った。

4. 検証結果と新たな故障要因の発見

回収機器の冷却性能を調査した結果、3機器中2機器にシール部摩擦よりも大きな性能劣化を確認した(図3)。

分解調査を行った結果、全機器に冷媒を吸入・排出する経路からの漏洩を確認した。そのため、故障の主要因を経路からの漏洩と考え、バイパス性リークとして定義した。性能劣化が小さかった1機器は駆動部異常によって故障していたため、冷却性能との関係は薄いと考える。

図4に真空ポンプの構成図を示す。丸枠内がシールリーク発生箇所、四角枠内がバイパス性リーク発生箇所となっている。バイパス性リーク発生箇所は、シリンダよりも冷媒供給箇所に近い。バイパス性リーク発生時にはシリンダに入る以前に冷媒が漏洩することが予想できる。そのため、冷却中に冷媒が漏洩するシールリークよりも性能劣化が大きくなったと考える。

図5に周波数解析結果を示す。図5の四角枠内より、回収品は正常品よりも高周波特性が小さくなっていることが分かる。これも上と同様の理由から吸入・排出される冷媒の減少を表すと考え、故障特徴として利用する。

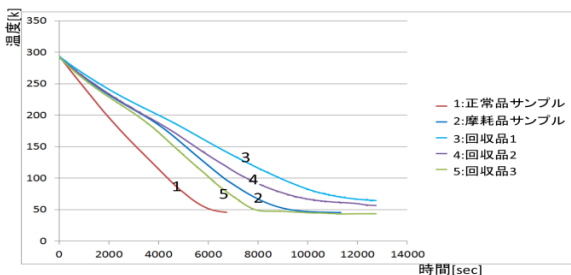


図3. 正常・摩耗サンプルと回収品の冷却性能調査

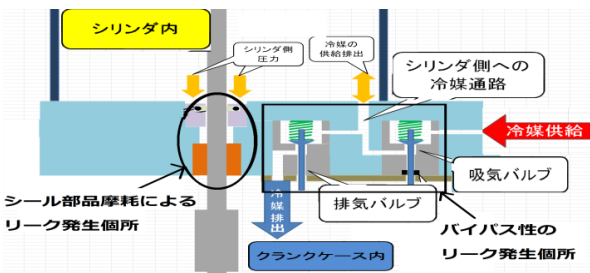


図4. 真空ポンプ構成図と故障箇所

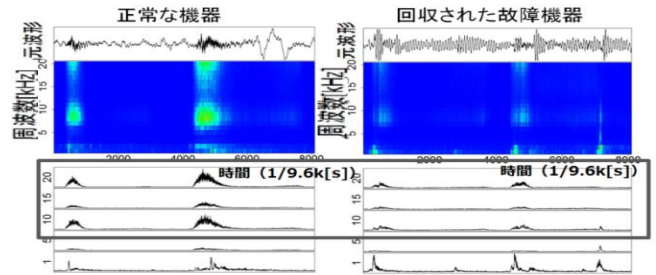


図5. 正常な機器(左)と回収機器(右)の周波数特性

5. 故障のモデル化と診断ツールの作成

図2・図5の特徴から摩耗性故障の進行を図6にモデル化した。図6では動作音の高周波特性が図1左から右に変化するまでの過程を、摩耗状態・性能劣化と関連付けて表し、バイパス性リークへの遷移を付加している。

真空ポンプの摩耗は運転時間の増加に伴って正常から中規模リークへと進行する。その後、特性が不安定な過渡期へと突入するが、その時点では冷却性能の劣化は確認できない。過渡期からは大規模リークとバイパス性リークの2種類への状態遷移が確認されている。

モデルを元に診断試験ツールを作成し、実フィールドデータを解析した。その結果、実フィールドデータの一部にバイパス性リークの特徴を持つ機器を発見した。現在、それらを対象に動作音の連続測定を実施している。

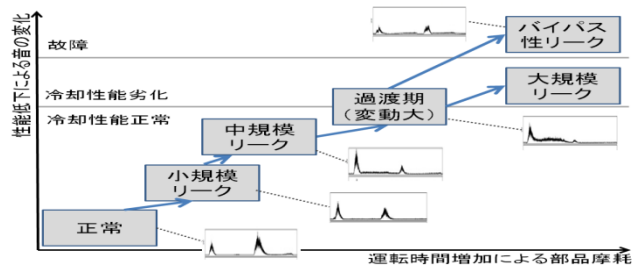


図6. 摩耗性故障進行モデル

6. まとめと今後の展開

本稿では冷却用真空ポンプの故障特徴について実フィールドでの機器動作音を調査し、寿命末期品推定と分解調査によって故障進行モデルの精緻化を行った。

調査の結果、シールリークよりも冷却性能の大きいバイパス性リークを発見し、試験ツールの作成によって実フィールドでの検証対象機器を提示した。

今後は、冷媒漏洩以外の主要故障への対応・アルゴリズムの精度向上に加え、半導体製造の海外移転の動向を踏まえた診断の自動化・遠隔化へと取り組んでいく。

参考文献

[1] 章 忠、川畑 洋昭：ウェーブレット変換による異常診断法に関する研究 日本機械学会 (2001)
 [2] 堀田 洋：音響診断技術とその活用事例 Savemation Review (2004)