



の6割程度が予知可能という検出精度に留まり目標性能を満足することができなかった。

表.1 システム目標性能と制約事項

開発目標	半年先の故障による真空ポンプの異常による停止を80%の確度で予知できること 冷却性能が所定の性能以下になると真空ポンプは、アラームを発生する。左記アラームが、発生する前に故障の予兆を警告する
設計制約	負荷や製造上に必要なガス(アルゴン等)の注入により、装置内の温度は安定しない 環境騒音が大きく、可聴域の動作音を診断に使用することが難しい

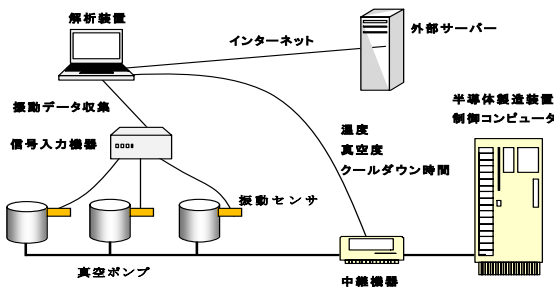


図.3 開発された故障診断システム

設計者は、性能未達要因を下記のように分析した。

1. 信号同期検出技術不足：ポンプは、1.2Hz 程度の周波数で動作しているが、その動作周波数が不安定なため、振動データを安定してサンプリングできない。
2. 音響診断技術不足：工場内の環境音が大きく、真空ポンプの動作音の小さな変化を抽出することができない。

しかし、設計内容を詳細に分析すると、設計プロセス自体は正しく行われたものの、根本となる真空ポンプの故障モデルが経験則に基づいたものになっており精緻化が不十分であったこと、豊富な経験知を保有するゆえに、取得した設計データにバイアスがかかった推論がなされたことが、目標性能を満足する設計ができなかった要因のひとつではないかと考えられた。上記確認のために、設計で用いた故障モデルを明確にし、データに基づく推論プロセスを可視化することで、課題を具体的に検証し、システム性能を改善することを試みた。

### 3. 設計における推論の可視化

設計における推論の可視化方法を検討した。本可視化への要求仕様として、下記を設定した。

1. ミクロ視点：推論の種別(演繹, 帰納, アブダクション)の可視化が可能であること
2. マクロ視点：設計における議論のスキーム(観察事実, 結果, 設計根拠, 反証)の可視化が可能であること

#### 3.1 本論文で適用した可視化手法

上記要件を満足するため、下記の既存技術をベースとした可視化手法を構築した。

1. 言語処理：自然言語で記述された要求仕様を簡潔に記述するために、記述された文を単文化し、単文をセミ

形式化記述する。セミ形式記述は、関係(主体, 対象)という形式で一般的に記述する[2]。要求仕様が日本語記述である場合は、日本語が膠着語としての性質を持つことから[3]、計算機上での単文化処理が困難であると判断し、本研究では人手を介した単文化を行う。

2. 命題記述手法：命題論理記述の可読性は、高いとはいえない。可読性の改善のため、命題ネットワーク[2]のコンセプトを基本とした方法を考案した。命題ネットワーク記述方法は、確立されていない[2]が、本研究では、主体と対象をリンクとして持ち、中心部に関係を記述したノードとして記述するものとした(図.4)。
3. 設計における推論過程の可視化手法：設計における推論過程の可視化のスキームとして、観察事実、導出された結論、上記推論の成立に必要な設計根拠を表現できることが必要と考えた。これら要素を備えた議論フレームとして提案されている Toulmin モデル[4]を可視化のテンプレートとして利用する。

これらの検討より、本研究では、設計における推論を図.4に示すように可視化する。図.4の Data, Warrant, Claim, Rebuttal, Backing の箱は、命題ネットワークを用い記載される。

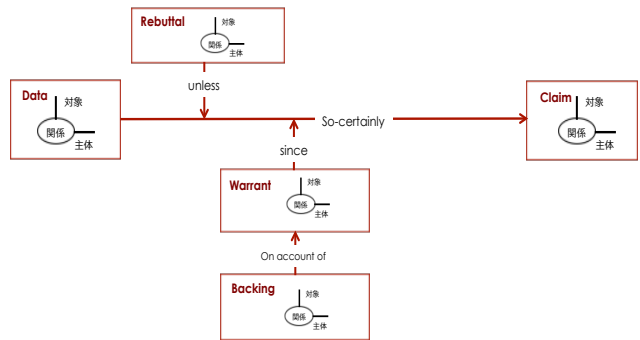


図.4 設計における推論の可視化

一例として、本可視化方法により、設計における基本的な推論と考えられる演繹推論、アブダクションの可視化を行った(図.5)。図.5に示すように、本可視化により推論種別毎の構造を可視化することが可能となる。

- |                      |                 |
|----------------------|-----------------|
| D: カルロスは、メキシコ人である。   | D: カルロスは、陽気である  |
| W: すべてのメキシコ人は、陽気である。 | C: カルロスは、メキシコ人だ |
| C: カルロスは、陽気である。      | W: メキシコ人は、陽気である |

[セミ形式記述]

- D: である (カルロス, メキシコ人)  
W: である (メキシコ人, 陽気)  
C: である (カルロス, 陽気)

[セミ形式記述]

- D: である (カルロス, 陽気)  
C: である (カルロス, メキシコ人)  
W: である (メキシコ人, 陽気)

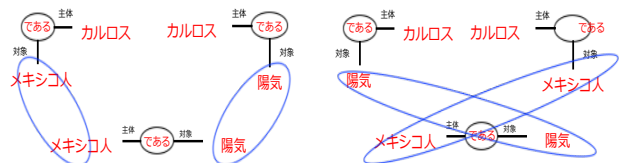


図.5 設計における推論過程の可視化(右: 演繹, 左: アブダクション) (可視化事例は、文献[5]より引用)

#### 4. 可視化によるシステム事例の分析と認知的背景

前章で検討した可視化手法を用い、図.3に示したシステム開発事例における設計の推論プロセスを図.6に示す。

- 観察事実：真空ポンプは、異音を発生する
- 結論：真空ポンプの故障を発見する
- 理由：故障は、異音を発生するから

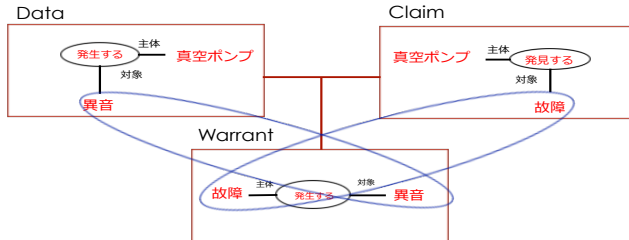


図.6 事例における設計の推論の可視化

図.6は、典型的なアブダクション型の推論である。アブダクションは、後件肯定がなされており、論理的には必ずしも正しい結論を導けるとは限らない。さらに、命題ネットワークで示された各要素にも、曖昧な点が多い。例えば、「異音とは何?」、「故障とは何?」、「故障と異音の関係は?」というような疑問が生じる。しかし、特筆すべきは、システム設計者は、本システム設計段階で何ら疑問を持ってはおらず、上記推論に対し、推論の妥当性に対し確信を持っていたという事実である。何が設計者を確信へと導いたのかを明らかにするために、設計者に対しヒアリングを実施した。

##### 4.1 システム設計者へのヒアリング結果

システム設計者へのヒアリングの結果を下記に記載する。

1. 信頼すべき顧客の声の存在：
 

信頼できるベテランの保守担当者から寿命末期になると真空ポンプの動作音に異音が発生するという証言があった。これは、自身も現場で確認できたし、さらに、実験室で故障した真空ポンプの動作音を観察した際にも、異音(後述の排気音が消失した音)を観察することができた。
2. 蓄積されたメンテナンス実績からの検証：
 

フィールドで発生する故障要因分析をデータベース化し長年蓄積していた(図.7)。これら結果から、シーリング、ベアリング摩耗等による摩耗性故障が全体の故障の9割を占める要因であり、大半の故障が摩耗に起因することを知っていた。さらに、故障品の8割以上に特定部品(グランドシール)の目に見える大きな破損が観察された(図.8)。
3. 分解調査による確認のしにくさ：
 

上述のグランドシール以外の部品は、サイズが小さい上に、摩耗レベル測定が難しいぐらい見た目の損傷も少ないため、データを蓄積していなかった。メンテナンス時の交換部品は、ポンプ製造メーカーからパッケージ化され提供されており(図.9)、部品コストより分解コストの方が遙かに高い、安全を見てパッケージの部品すべてを特に意識せず交換していた。
4. ドメイン知識：
 

異常な機器は、異音を発生するという常識があり、変な動作音をする機械は故障だ(性能に異常がある)と

いう推論には、全く疑いを持たなかった。図.6に示すWarrantの逆論理である、「異音を発生する機器」⇒「故障である」の確認のために、異音を発生する機器に対し、実験室で冷却性能の試験を実施したが、冷却異常は再現できなかった。しかし、現場には、種々の変動要因(並行動作する真空ポンプの数や負荷として流す不活性ガス等の影響)が想定されるので、論理の妥当性に問題があるのではなく、現場との環境の差異が要因で再現できないものと解釈した。

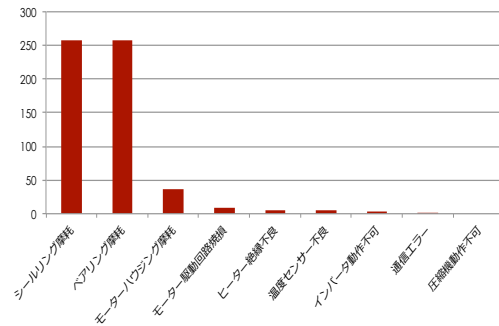


図.7 故障部位の統計データ(実績)



図.8 グランドシールの破損

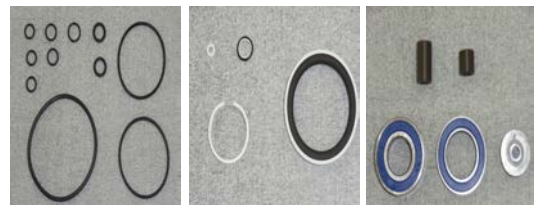


図.9 メンテナンス部品のパッケージ

##### 4.2 設計をミスリードした認知的背景

上述の設計のミスリードした要因となる認知的知見を文献で調査した[1][6]。

1. 代表性：目につきやすく印象に残りやすい現象を重要視し、仮説をたてる。人は、予期できない・意味の理解できない現象を嫌い、曖昧なデータに本来はないルールを見いだす傾向が認知機構に組み入れられている。
2. 共起した現象が確信(因果関係)に変わる。ひとたび現象が存在すると思えば、妥当な説明理由を見つけるのは、人間にとって極めてやさしい問題である。理由を見つけることで単なる現象が確信に変わる。
3. 事例を必要十分条件と思込むことでさらに確信が高まる。仮説を否定する情報でなく肯定する情報(事例)を探す。否定的な結果が出た時は、厳しく吟味するが、肯定的な事例が出た時は、吟味されない。

システム開発事例では、上述のような認知的錯誤が、データとその観察に裏付けられ、結果的に推論プロセスをミスリードし、目標性能を満足するシステムが得られなかったものと考えられる。

## 5. モデルと推論の見直しによるシステムの再設計

### 5.1 課題とアプローチの再設定

課題とアプローチの再設定を行うため図.6 に示した設計モデルと推論プロセスにおける課題を以下に詳述する。

#### 1. 故障とは何だ？

真空ポンプの故障により、冷却性能が劣化するが、故障部位が具体的に示されていない。真空ポンプの構成を踏まえ、故障部位の定義が必要である。

#### 2. 異音って何だ？

異音とは、何か明確ではない。音を物理的な構成要素に分解すると、周波数、強度、発生位相に分解することができる。これら構成要素に基づき、異音の定義が必要である。

#### 3. 故障と異音の関係は？

要求仕様から、真空ポンプの故障とは、冷却性能の劣化と定義される。異音から、冷却性能の劣化を同定するには、冷却性能の劣化と故障部位の関係、故障部位と異音の関係を分離して同定する必要がある。また、故障予知を行うには、観察した時点の診断だけでなく、その後の時間的進展を含めた診断が必要である。さらに、故障(冷却性能劣化)⇒異音発生(排気音の消失)は、現場の証言や実験で確認できているが、異音発生⇒故障(冷却性能の劣化)という逆方向の論理の妥当性は確認できていない。設計における推論が、演繹推論となるように逆方向の論理の妥当性をデータから確認する必要がある。

以上再設定した課題に基づき、下記の故障モデルをデータから構築し、左記モデルに基いてシステムを再設計する。

1. **故障モデル**：故障部位と動作音の関係、故障部位と冷却性能の関係をモデル化する。
2. **故障進展モデル**：各部位の故障が、時系列的にどのように進展するかをモデル化する。

### 5.2 モデルの構築とデータによる確認

#### 5.2.1 故障モデル

故障モデルとして、故障部位と動作音、故障部位と冷却性能の関係をモデル化する。最初に、真空ポンプの構造から、摩耗性故障を生じる可能性がある部位を抽出し、各部位を摩耗させた真空ポンプを実験室内で動作させ、故障モデルを同定した。

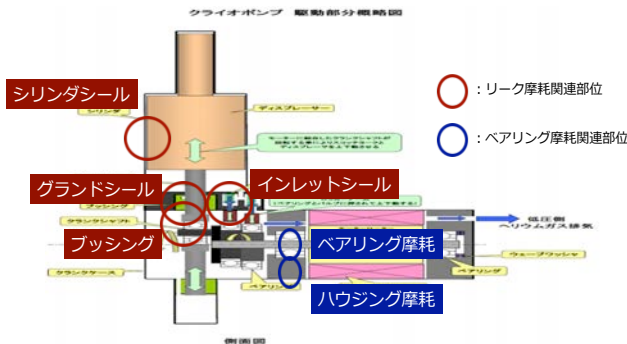


図.10 摩耗性故障の発生可能部位

摩耗性故障を発生する可能性のある部位を図.10 に示す。ヒアリング結果では、破損の目立つグランドシールがフォーカスされているが、他にプッシング、シリンダシール、インレットシールの摩耗により、冷却性能が劣化する可能性が想定される。これらの部位の摩耗サンプルを作成し、実験室で動作させ、摩耗部位と動作音の関係、故障部位と冷却性能の劣化の関係をモデル化した。なお、紙面の都合上、本論文では、シール関連摩耗についての解析結果のみ記載し、ベアリング・ハウジング等の回転部品の摩耗に関する解析に関しては、割愛する。

#### (1)故障部位と動作音の関係

故障部位と動作音の関係を同定するために、Wavelet 変換[7]を用い、動作音を解析した。Wavelet 変換を用いた理由は、真空ポンプは、機械的に吸排気サイクルが決定されることから、動作音の分析においては、周波数軸とともに、時間軸での分析が重要と考えたためである。真空ポンプの動作と発生動作音の関係を図.11 に示す。図.11 において、上部のグラフは、真空ポンプの内部圧力とシリンダ位置を示し、下部のグラフは、動作音を示す。およそ 1.2Hz の周期で機械的に駆動される吸気・排気サイクルに同期して発生する冷媒音・機械音と各サイクル中間期の冷媒のリーク音により動作音が構成されていることが観察される。

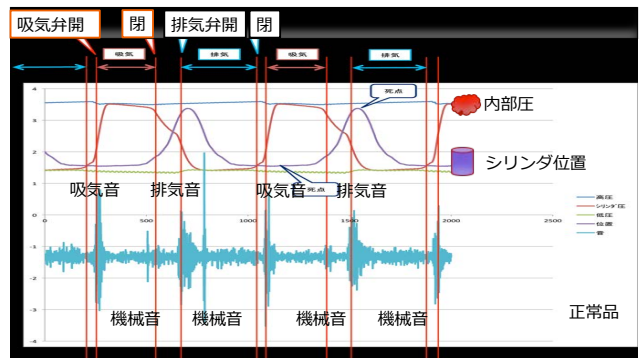


図.11 真空ポンプ動作と動作音の関係

動作音の解析ツールを、R を用いて自作した。解析ツールで可視化した故障部位毎の動作音を、図.12~図.14 に示す。各図において、最上部のグラフは、一連の吸気・排気の1サイクルの動作音データ、中央グラフは、1 KHz~20KHz 帯域の動作音の信号強度を可視化したもの、最下部のグラフは、1 kHz~20KHz (5 KHz 間隔) の動作音波形を示す。

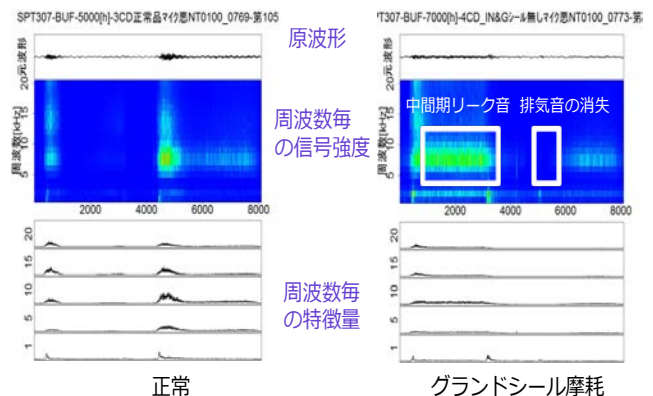


図.12 グランドシール+プッシング摩耗時の動作音

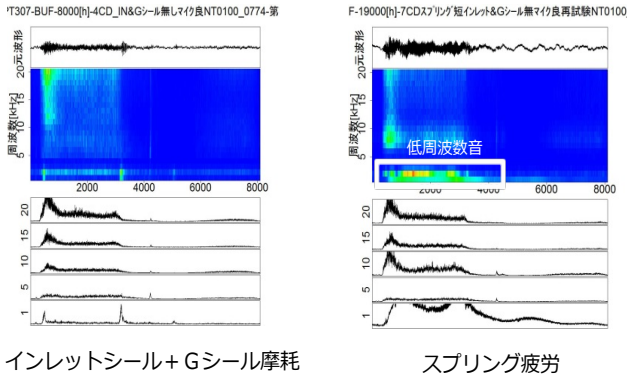


図.13 グランド+インレットシール摩耗時の動作音

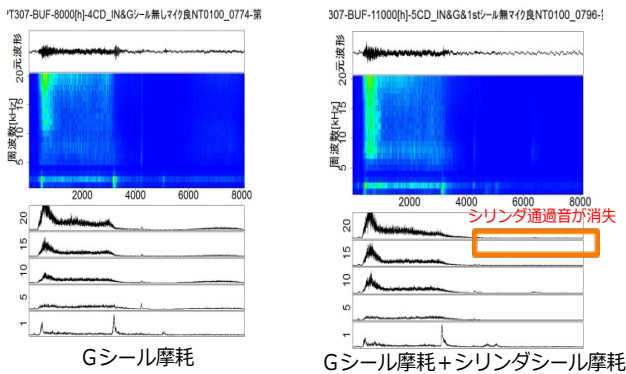


図.14 グランド+シリンダシール摩耗時の動作音

表.2に示すように、故障部位により、動作音に特徴的な差異が発生することが分かる。これらの動作音の差異は、図.11に示した真空ポンプの動作原理と物理的知見[8][9]から下記のように説明される。

1. グランドシール+ブッシング摩耗動作音：

吸気サイクルの中間期は、シリンダ内の圧力が高く、グランドシール、ブッシングに摩耗が発生すると、これら摩耗部分からの冷媒漏洩により動作音に変化する。摩耗レベルが進んで吸気サイクルにおけるリーク量が多くなると、排気時のシリンダ内圧力が低くなるため排気時の動作音が消失する。動作音発生メカニズムとしては、リーク箇所から高压の冷媒が発射されることによる噴流音と見なすことができる。動作音周波数は、 $f = StV/d$  但し  $f$ : ピーク周波数、 $V$ : 平均流速、 $d$ : 噴射口径、 $St$ : ストローハル数(定数)と表現される。この式によれば、部位の摩耗が進むほど、動作音周波数が低くなることが予想される。

2. グランドシール+インレットシール摩耗動作音：

インレットシール摩耗による動作音は、排気・吸気時の弁の閉タイミングで発生する。開動作は、モータの回転により機械式に行われるが、閉動作は弁に取り付けられたスプリングにより行われるため、バネ疲労等により閉速度が遅くなると、この時間に同期して比較的低い周波数の動作音が発生する。動作音発生メカニズムとしては、冷媒が、インレットバルブのエッジに衝突し、気流が分断され、分断された冷媒の疎密波による音(笛の原理)と考えられる。

3. グランド+シリンダシール摩耗動作音：

冷媒がシリンダを通過する際の動作音と想定される。シリンダは、メッシュ構造になっており、冷媒ガスがこのシリンダのメッシュを通過することで熱交換し冷却される。

シリンダシールが摩耗すると、冷媒がシリンダのメッシュを通過せずにシリンダ周囲から排気されることで排気時の中間期の動作音に変化する。

4. 表.2 シール関連摩耗の動作音の特徴

故障(摩耗)部位	動作音の特徴
グランドシール+ブッシング	<ul style="list-style-type: none"> <li>吸気サイクル中間期のリーク音(10KHz近傍)の増大</li> <li>排気音動作音の消失</li> </ul>
グランドシール+インレットシール	<ul style="list-style-type: none"> <li>吸気サイクルにおける低周波音の増加</li> <li>シリンダ上下運動変位点における動作音の増加</li> </ul>
グランドシール+シリンダシール	<ul style="list-style-type: none"> <li>排気サイクルにおけるシリンダの冷媒通過音の消失</li> </ul>

以上、現場の証言を裏付けるように、故障(部品摩耗)により動作音に変化することが確認された。一方、動作音の変化は、摩耗部位により異なり、(人が認知可能かどうかは可聴範囲に依存してしまうが)これらの各々特徴のある変化が複合したものになっている。表.2に示す動作音の特徴から、故障部位を同定することが可能であること(動作音⇒故障部位のロジックの妥当性)が確認される。

(2)故障部位と冷却性能劣化の関係

故障部位と冷却性能劣化の関係を同定するために、故障部位毎の冷却性能の劣化を測定した(図.15)。リファレンスとして、実フィールドで冷却異常を発生した機器を同グラフ上に乗せた。図.15から、初期設計時に想定していたグランドシール摩耗だけではフィールドでの冷却異常を再現することができないことが確認される。グランド、インレット、シリンダの各シールの摩耗が複合した場合に、初めて冷却性能が異常となることが確認された。

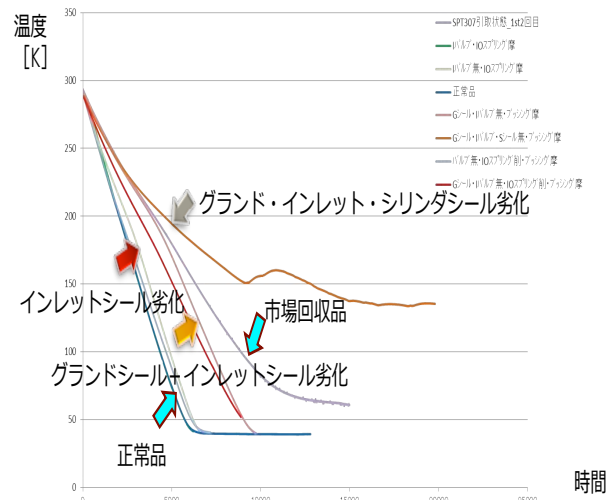


図.15 故障部位と冷却性能劣化の関係

以上の結果から、摩耗部位と動作音、摩耗部位と冷却性能劣化の関係のモデルが同定された。これらにより、動作音変化から、冷却性能の劣化を推定することが可能であることがデータにより確認された。

故障(冷却性能劣化)、動作音の変化(異音)とも当初システム設計時に想定した目立った破損部位であるグランドシールを要因とするものだけではなく、シリンダ、イン

レットシールなどの複数部位の摩耗が複合して影響すること、摩耗進展により、異音が発生する位相と周波数が変化することから、図.3に示す振動センサにより検知した動作音の強弱を用いた判定では、原理的に精度高い故障診断が難しい理由が、説明される。

5.2.2 故障進展モデル

真空ポンプの冷却性能異常には、複数の部品の摩耗が影響するが、運転時間とともに、これら各部の摩耗が一様に進展すると想定することは難しい。市場での各部の故障の進展を調査するために、実フィールドに設置された約 100 台の真空ポンプの動作音を 1.5 年間継続調査した（現在も収集を継続している）。



図.16 フィールドデータ収集装置

フィールドデータ収集のために、図.16 に示す専用収集装置を開発した[10]。フィールドデータ収集装置は、集音器と解析ツールで構成される。集音器は、工場の外部雑音を遮断するためのキャップマイク（工場雑音を1KHz~20KHzにおいて平均30dB遮断可能）と市販ICレコーダから構成される。解析ツールは、汎用PC上にTcI/TkとRを用いて実現した。集音器で取得したフィールドにおける真空ポンプの動作音波形を図.17に示す。

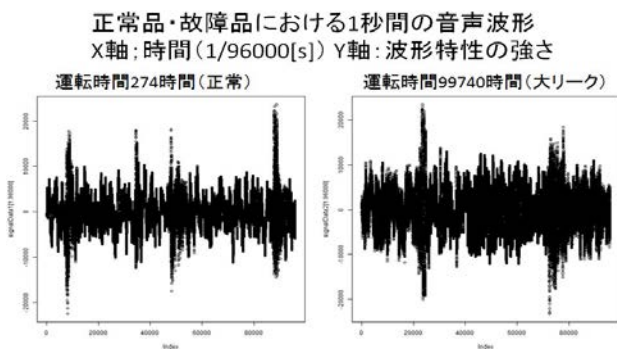


図.17 実フィールドにおける動作音サンプル (右: 正常品, 左: 寿命末期品)

開発したフィールドデータ収集装置を用い、図.17 に示した正常品（稼働時間：178 時間）、寿命末期品（稼働時間：99740 時間）の動作音を解析した結果を図.18 に示す。実験室において観察されたグランドシール摩耗の特徴が、フィールドデータにおいても再現できていることが確認できる。

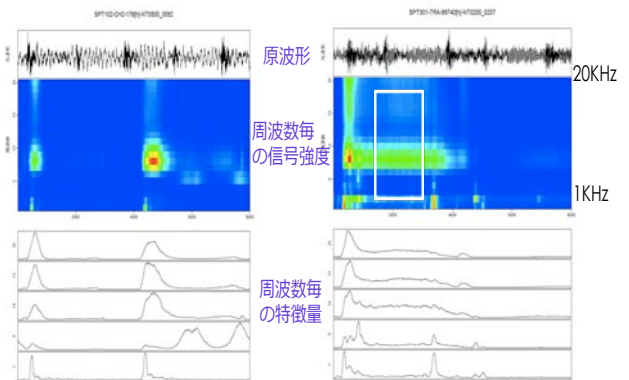


図.18 データ収集ツールによるフィールドデータ解析 (右: 正常品, 左: 寿命末期品)

フィールドデータ収集装置で収集した 1.5 年間のデータを用い故障進展モデルを構築する。表.2 に示したように、主要な摩耗部位であるグランドシール+ブッシング摩耗の特徴は、吸気サイクルの中間期のリーク音に現れるため、フィールドに設置された 100 台の真空ポンプの図.18 の枠線部分の積分値（10KHz 帯域）と稼働時間の相関を調査した（図.19）。

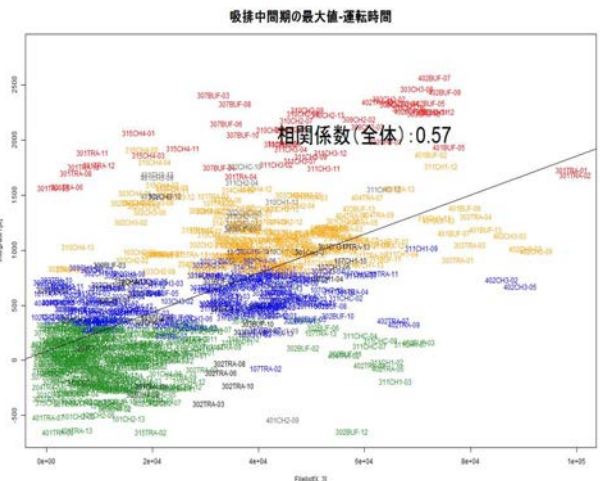


図.19 機器稼働時間と吸気中間期の積分音（10KHz）

稼働時間と積分値は、相関係数 0.57 で相関しており、稼働時間の増加に従って、グランドシール+ブッシング摩耗の特徴が強く出てくることがわかる。これは、稼働時間とともに摩耗が進展し、摩耗による異音の特徴が強く出てくることを意味する。

一方、図.19 からは、回帰線からの一群の外れ値が観察される。例えば、図.19 上部に配置される機器は、回帰直線から乖離してはいるが、一群は独立して稼働時間に相関し変化しているように見える。これは、これら一群の機器は、グランドシール+ブッシング摩耗以外の摩耗による動作音の変化が混在している可能性を示唆するものとも考えられる。

上記確認のために、真空ポンプ約 100 台分の動作期間内の動作音波形を KJ 法[11]を用い、動作音波形に現れる特徴毎に人手により分類した（図.20）。



図.20 KJ 法による波形の分類

KJ 法を用いた分類の結果、表.2 に示した故障部位の特徴が、稼働時間および機器毎に時系列的に現れてくることが観察された(図.21)。また、周波数についても、動作音の中心周波数が、運転稼働時間とともに、低周波に移行することが観察された。

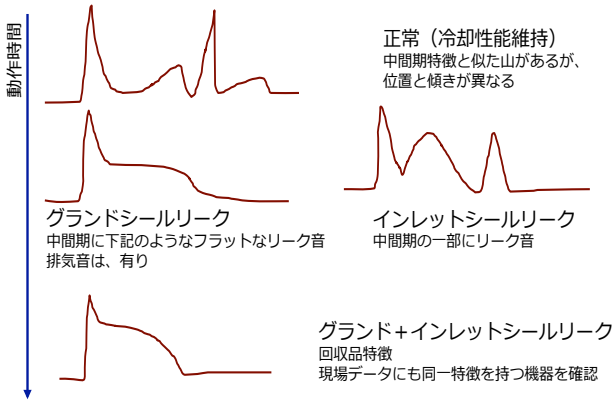


図.21 運転時間と動作波形の変化

これらの KJ 法による分類から導かれた観察が、正しければ、フィールドで取得した運転時間と動作音波形の間に図.22 に示すような傾向を確認できると仮定できる。

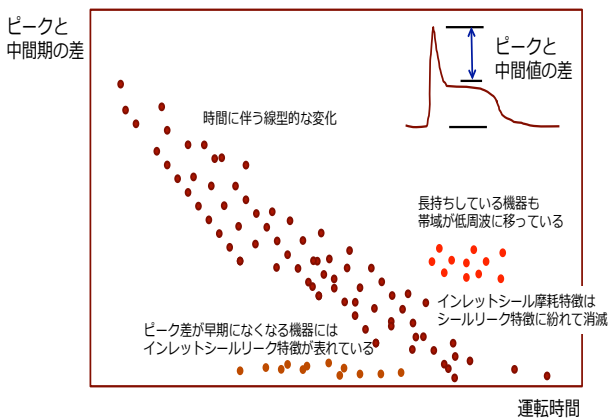


図.22 仮説からの稼働時間と波形特徴量の変化

上記仮説を確認するために、吸気サイクルにおける波形ピーク値と中間期の積分値の差を特徴量とし、全収集期間内のフィールドデータをクラスタリングした結果を図.23 に

示す。観察事実から導きだした仮説を裏付ける結果がデータから確認できることから、仮説の妥当性を確認した。

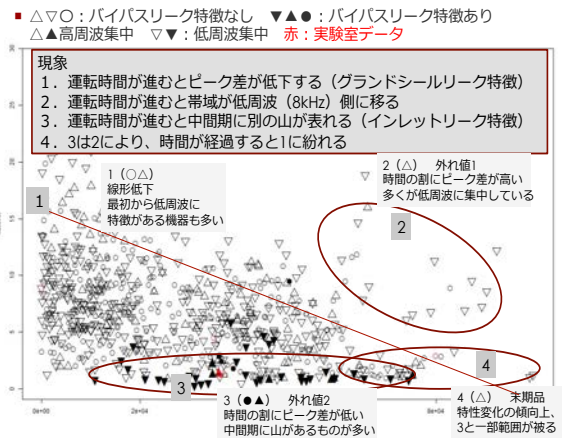
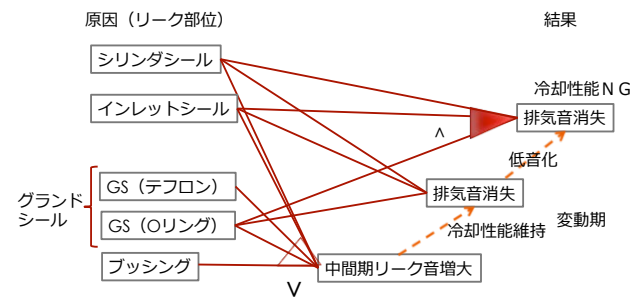


図.23 フィールドデータを用いた仮説の検証

以上の結果を踏まえ故障進展モデルを図.24 のように定めた。

図.24 故障進展モデル



故障は、グランドシールの摩耗を中心に、インレットシール、シリンダシールの摩耗が稼働時間により並行して進行するが、それぞれの摩耗進展速度は、機器に依存する。運転稼働時間中期では、各摩耗部位の特徴が強く出る期間があるが、稼働末期においては、図.21 に示すように、すべての故障が複合した波形となる。この動作音が発生した場合に、冷却性能が大きく損なわれメンテナンスが必要になる。

故障・故障進展モデルに基づき設計における推論過程を図.25 に示すように整理した。設計推論のロジックは、演繹推論型となり、各命題ネットワークに関してもデータに基づき故障モデル・故障進展モデルにより具体的に定義された。

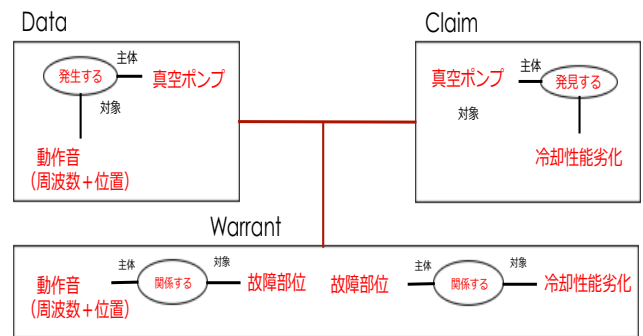


図.25 再構築された設計推論の可視化

5.3 システム開発と性能評価

構築した故障・故障進展モデルと設計推論ロジックに基づき、真空ポンプの故障診断システムを開発した。システムは、図.17 に示したフィールドデータ収集装置を拡張し、下記ソフトウェアを搭載することで実現した。

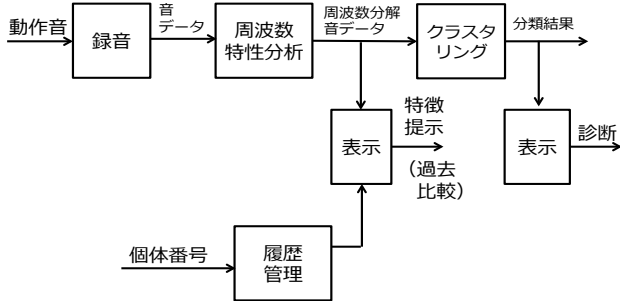


図.26 故障診断システムのソフトウェア構成

図.26 におけるクラスタリング部の故障部位推定のアルゴリズムの概要を図.27 に示す。表.2 に示した故障音の特徴を用い、図.24 に示した故障進展モデルに基づき、故障診断・予知を行う。

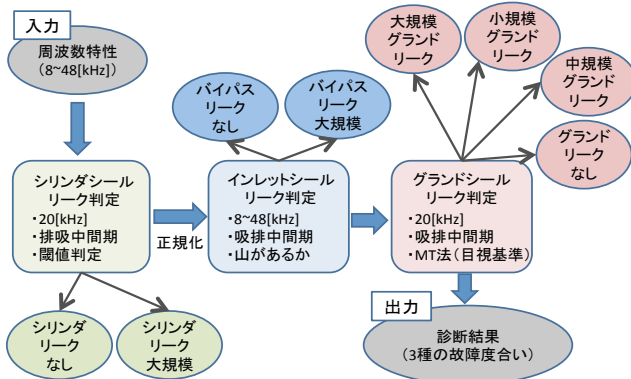


図.27 故障診断アルゴリズム

開発した故障診断システムを用いて、フィールドに設置した真空ポンプの診断を行ったところ図.28 に示す結果が得られた。外れ値には、グラウンドシール摩耗とシリンダリーク摩耗の特徴を示す動作音の機器があり、これらの機器は、故障進展モデルから、近々に冷却性能異常を発生すると想定される。

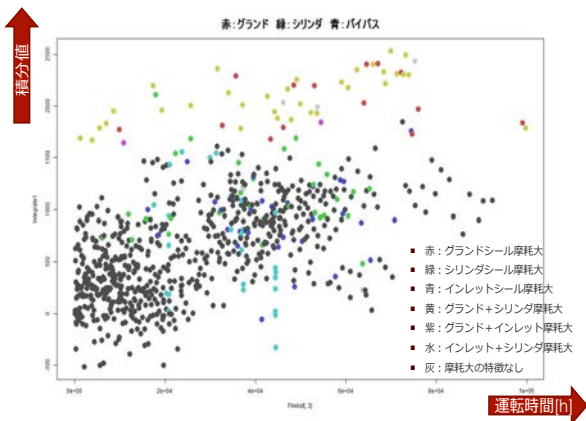


図.28 故障診断システムによるフィールドデータ判定結果

故障診断システムは、現在、フィールド評価中であり、最終的な性能 (故障予知精度) の評価は、上記評価の完了を待つ必要があるが、本論文執筆時点 (1.5 年間) に故障した真空ポンプ 3 台のすべての故障を 6 ヶ月前に予知できていることが確認されている。

6. まとめ

本論文では、半導体製造装置の故障診断システムの開発を事例として採り上げ、その設計における推論過程を可視化することで、その設計モデルと推論の誤りを表出化した。さらに、これら誤りを引き起こした要因を分析し、推論の可視化とデータに基づき、その設計におけるモデルと推論を精緻化した。これらを通じ、システム性能を大幅に改善する事例を示した。

サイバーフィジカルシステムの進展とともに、大量で多様なフィールドデータ入手が容易になる。しかし、これらビッグデータを用い、誤った仮説を裏付ける検証を行うことは、人の認知的側面から見ても容易である。データに裏付けられた仮説は、データの観察や考察により確信になり、誤ったシステム設計に結びついてしまう可能性もある。ビッグデータをハンドリングする能力に加えて、ドメイン知識と正しい推論をハンドリングする能力が非常に重要であることをこの論文で示した。そのための支援となる設計推論の過程の可視化方法に関し提案し、実システム開発に適用した。

謝辞

貴重な経験知をお聞かせいただくとともに、フィールド試験へのご協力をいただきましたルネサスセミコンダクタ九州・山口会社 去川様に謝辞を表します。また、本研究の一部は、JST CREST の支援を受けて実施されました。

参考文献

- [1] T.Gilovich: How We know What isn't so, The fallibility of Human Reason in Every Life, Free Press (1993).
- [2] 大津由起雄: 言語 (認知心理学) 東京大学出版会(1995)
- [3] 金谷武洋: 日本語に主語はいらない 講談社 (2002)
- [4] P.A.Kirschner,S.J.Buckingham-Shum and C.S.Carr: Visualizing Argumentation: Software tools for Collaborative and Educational Sense-Making(Computer Supported Cooperative Work), Springer (2003)
- [5] 市川伸一: 考えることの科学-推論の認知心理学への招待, 中公新書 (1997)
- [6] A.F.Furnham: Lay Theories, Everyday Understanding of Problems in the Social Science, Pergamon Press(1988)
- [7] 金谷健一: これなら分かる応用数学教室-最小二乗法からウェーブレットまで, 共立出版 (2003)
- [8] 吉川茂: 音源の流体音響学, コロナ社 (2007)
- [9] N.Fletcher, T.Rossing: The Physics of Musical Instruments, Springer(1998)
- [10] 久代紀之, 松田将大, 高原邦夫: 動作音を用いた真空ポンプの故障診断手法, 電気設備学会誌 Vol.34 No.3 pp.209-pp.214(2014)
- [11] 川喜多次郎: 発想法-創造的開発のために, 中公新書 (1967)