

音響診断による設備監視効率化の検討

Study of efficient condition monitoring method by acoustic diagnosis

株式会社 IIU	角皆 学	Manabu TSUNOKAI	Member
株式会社 IIU	萱田 良	Ryo KAYATA	Member
株式会社 WIT	黄 皓宇	Haoyu HUANG	Non Member

In order to investigate a method for efficiently monitoring multiple machines in a building with an acoustic sensor, an experiment was performed to acquire acoustic data of three rotating machines running simultaneously in a state in which all three machines are normal or one of three is abnormal, with two microphones placed at different positions. The abnormality can be detected from the acoustic signal level, and it can also be specified that the bearing abnormality has occurred by frequency analysis. A method to identify the machine in which the abnormality occurred from the ratio of the increase amount of the signal level of the two microphones was proposed, which showed the ability of identifying the abnormal machine correctly under 5 conditions out of 6 conditions

Keywords: Condition monitoring, Acoustic diagnosis, Acoustic source localization

1. 背景

日本保全学会では平成 18 年度以降「状態監視技術の高度化に関する調査検討分科会 (CMT 分科会)」を設置し、海外調査、文献調査、検証・確認試験等を通じて状態監視技術及び状態基準保全に対する様々な調査、検討を行ってきた。平成 28 年度から、CMT 分科会技術ワーキンググループでは、プラントの広範囲を効率的に監視する技術の検討をテーマとしており、本研究はそのような技術の候補の 1 つと考えられる音響診断の有効性を評価するため、実験データの取得及び分析・検討を行ったものである。

2. 回転機器異常付与試験

建屋内の複数の機器を音響センサで効率的に監視する手法を検討するため、実験室内で 3 台の回転機器を同時に運転し、音響センサによりデータを取得する試験を行った。3 台のうちのいずれか 1 台に異常を付与し、異常の有無の検知、および異常発生機器の特定が可能かどうかを評価した。異常発生機器の特定には異なる箇所でも同時測定した音響信号が有用と考えられるため、複数の音響センサで同時測定を行った。ただし、設置するマイクの数

連絡先: 角皆学、〒110-0008 東京都台東区池之端
2-7-17 井門池之端ビル、電話 03-5814-5350
E-mail:tsunokai@iiu.co.jp

が増えるほど、振動計等により個々の設備を監視する状態に近くなり本検討の目的から外れるため、対象機器数よりも少ない 2 個のマイクを使用した。

2.1 試験条件

図 1 に試験環境の模式図を示す。マイク位置の異常検出性への影響を評価するため、各試験条件につきマイク 1 のみ位置を 3 通り変化させてデータを取得した。表 1 にマイクと各機器間の距離の一覧を示す。

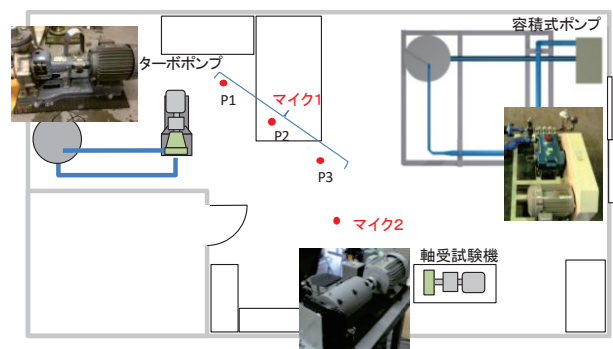


図 1 試験環境模式図

表 1 マイクと各機器間の距離 (cm)

	マイク 1			マイク 2
	P1	P2	P3	
軸受試験機	410	300	275	175
ターボポンプ	140	247	330	348
容積式ポンプ	546	438	315	420

表 2 に回転機器の異常付与条件を示す。3 台すべてが正常な場合（条件 1）の他、内輪に傷加工を施した軸受を軸受試験機に組み込んだ場合（条件 2）、および条件 2 と同一の傷加工軸受をターボポンプに組み込んだ場合（条件 3）の 3 通りの条件で試験を行った。

表 2 回転機器異常付与条件

	軸受試験機	ターボポンプ	容積式ポンプ
条件 1：正常	正常	正常	正常
条件 2：異常（軸受試験機）	軸受傷	正常	正常
条件 3：異常（ターボポンプ）	正常	軸受傷	正常

2.2 測定条件

2 つのマイクによる同時測定で、サンプリングレート 44.1kHz、各条件につき約 1 分間のデータを取得した。

マイクは無指向性マイク（ベリンガーECM8000）を使用した。

2.3 異常付与の詳細

ターボポンプ及び軸受試験機は同じ型式の軸受を組み込めるようになっており、内輪に傷加工を施した同一の軸受を、それぞれの機器に順番に組み込むことで異常付与試験を行った。またターボポンプ及び軸受試験機は同一の軸回転周波数（48Hz）で運転している。表 3 に使用した軸受の特徴周波数、図 2 に傷加工軸受の外観を示す。

表 3 深溝球軸受 6304 の特徴周波数（軸回転周波数 48Hz）

内輪に対する転動体の通過数	212Hz
内輪に対する保持器の相対回転数	30.4Hz



深溝球軸受 6304

図 2 傷加工軸受

3. 分析結果

3.1 簡易分析結果

まず最も簡易的な分析法として、それぞれのマイクで取得した音圧レベルを試験条件ごとに比較し、異常の有無が検出可能かどうか評価する。図 3 に試験条件ごとの音圧 RMS を示す。マイク 1 についてはそれぞれの設置位置 P1～P3) の場合の値を示している。

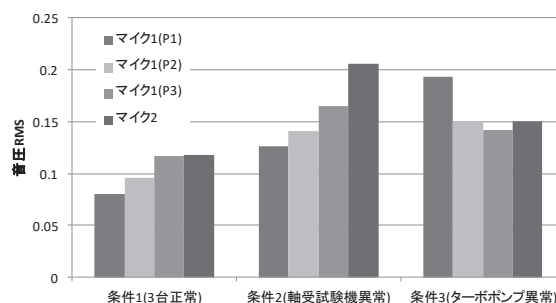


図 3 音圧 RMS

いずれのマイク（位置）においても、正常時と比較して異常時の音圧レベルが上昇しており、異常の検知が可能である。

なお、今回与えた異常の場合、単一の機器のみの運転であれば、人間の聴覚により比較的容易に異常に気付くことが可能であったが、3 台同時運転した場合、最も音が大きい容積式ポンプの影響が大きく、異常の有無を判別することは容易ではなかった。

3.2 周波数分析結果

各試験条件においてマイク 2 で取得した音圧信号生波形及び周波数スペクトルを図 4 に示す。マイク 2 は軸受試験機に近い位置に設置されているマイクである。

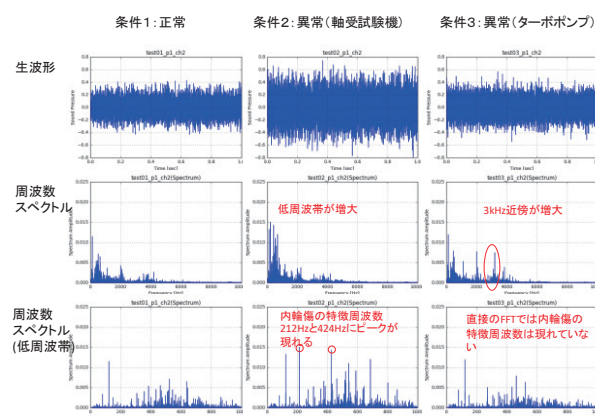


図 4 音圧信号生波形と周波数スペクトル（マイク 2）

条件2は条件1と比較して生波形からも信号レベルが増大していることが確認でき、さらに周波数スペクトルにおいても内輪傷周波数のピークが表れており、軸受試験機の異常を明確に捉えていることが分かる。一方距離が遠いターボポンプの異常については3kHz近傍の増大としてとらえられているが、軸受試験機の異常ほど変化は顕著ではなく、検出性が落ちている。

次にマイク1設置箇所P1で取得した音圧信号生波形、周波数スペクトル、および1~5kHzをバンドパスした後エンベロープ処理をした信号の周波数スペクトルを図5に示す。マイク1設置箇所P1は、全測定条件のうちターボポンプに最も近い場合である。

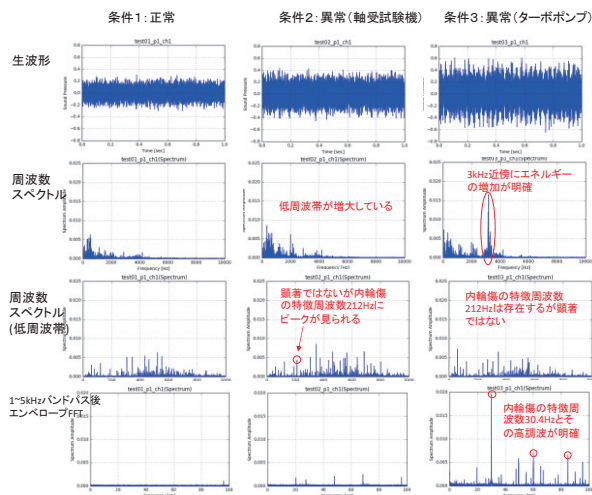


図5 音圧信号生波形とエンベロープFFT
(マイク1-P1)

条件3の生波形は条件1と比較して周期的なパルス状の波形が顕著になっており、距離の近いターボポンプの生波形から明確に異常の検知が可能であることが分かる。またエネルギーの増大が見られる3kHz近傍を残すバンドパスフィルタ後、エンベロープ処理した周波数スペクトルでは、内輪傷の特徴周波数が明確に現れている。一方距離の遠い軸受試験機の異常に対しては、内輪傷周波数が明確ではなく、マイク2の場合と比較して検出性が落ちている。

3.3 異常発生機器の特定

次に、得られた信号から、いずれの機器で異常が発生したかを特定する手法を検討する。対象とする複数機器の仕様や運転条件が異なれば、増大した周波数のみから

異常発生機器を特定することが可能な場合もある。しかし今回の試験では、同一の機器が複数運用されているような環境を想定し、ターボポンプと軸受試験機で同じ型式の軸受を使い、同じ軸回転周波数で運転しているため、軸受異常を示唆する周波数が現れても、いずれの機器で軸受異常が発生しているかを特定することはできない。

音源の位置・方向の特定手法としては、複数マイクで同時測定した信号の位相差を評価する手法が一般的であり、本試験データについてもまずはこれらの手法を検討したが、満足な結果が得られなかったため、結果の記載は省略する。これは、回転機器の運転音が周期的で持続的な信号であるため位相差が明確に得られにくいことや、今回の問題が単純な音源特定ではなく、異常により変化した信号成分の音源を特定する必要があるということが、手法の適用を困難にしていると考えられる。

そこで、異常機器に近いマイクでは信号の変化が大きいという、簡易分析・周波数分析の知見を踏まえ、それぞれのマイクの信号レベルの増加量から異常機器を特定する手法を検討した。

音響インテンシティ（単位時間に単位面積当たりを通過する音響エネルギー）は音源からの距離の2乗に反比例するため、各マイクに到達する、異常により増加したエネルギーの比と、各マイクと異常源との距離の比の関係は、反射や回折等を考慮せず単純化すれば、以下の式で表すことができる。

$$\frac{d_1}{d_2} = \sqrt{\frac{I_2' - I_2}{I_1' - I_1}} \quad (1)$$

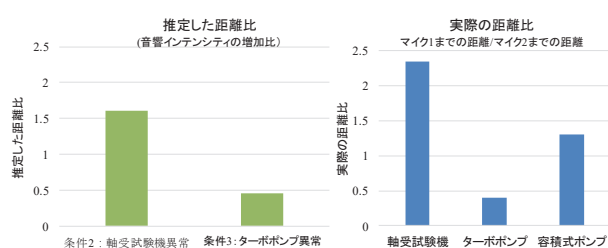
d_i : マイク i と音源との距離

I_i' : マイク i の音響インテンシティ（異常時）

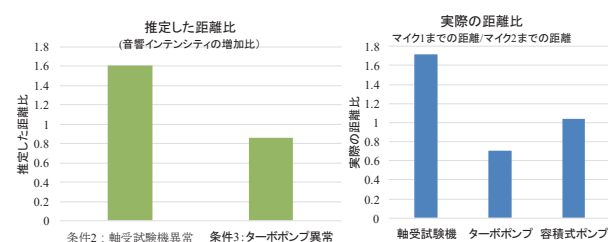
I_i : マイク i の音響インテンシティ（正常時）

式(1)が成り立つとすれば、得られた信号から(1)式の右辺を計算することで、2つのマイクと異常発生源との距離比が推定できる。推定した異常発生源とマイクとの距離比と、実際の機器とマイクとの距離比を比較することで、異常が発生している機器の特定を試みる。

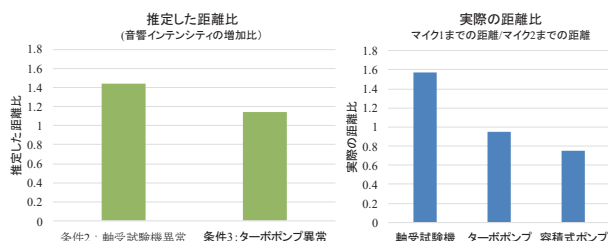
マイク1の位置がP1~P3の場合のそれぞれについて、正常時と異常時の音響インテンシティの増加比（式(1)の右辺）と、実測した距離比（表1の数値から計算）のグラフを図6に示す。



(a) マイク 1 の設置位置 P1



(b) マイク 1 の設置位置 P2



(c) マイク 1 の設置位置 P3

図 6 音圧信号生波形と周波数スペクトル (マイク 2)

マイク 1 の設置位置が P1 の場合、条件 2 における異常発生源との推定距離比は、容積式ポンプのものと最も近く、異常発生源を正しく特定出来ていない。条件 3 における異常発生源との推定距離比は、ターボポンプの距離比に最も近く、異常発生源を正しく推定出来ている。

マイク 1 の設置位置が P2, P3 の場合、条件 2、条件 3 ともに異常発生源を正しく推定出来ている。

6 つの条件 (異常 2×マイク位置 3) のうち、5 つの条件で異常発生源を正しく推定できており、本手法のある程度の有効性を示す結果となった。

4. まとめ

本研究では、建屋内の複数の機器を音響センサで効率的に監視する手法を検討するため、3 台の回転機器を対象とし、全て正常またはいずれか 1 台に異常を付与した状態で運転し、2 つのマイクにより音響データを取得する試験を行った。3 台同時運転の場合、人間の聴覚による異常の有無の判別は容易ではなかったが、異常時に取得した音響信号レベルは正常時と比較して明確に上昇しており、音響信号からは異常の検知が可能であった。また、周波数分析により、付与した異常 (軸受内輪傷) に特徴的な周波数も確認でき、音響センサにより軸受異常が発生していることを特定できることが示された。

さらに、各マイクにおける音響インテンシティの増加率から異常発生源との距離比を推定し、異常機器を特定する手法を考案し、特定性能の評価を行った。この手法により、多くの条件下において異常発生源を正しく推定可能であることが示され、一定の有効性が示された。

ただし、異常発生源の特定に失敗しているケースもあり、対象機器の数が増えれば特定性能が落ちることは自明であるため、周波数分析等、他の手法と組み合わせて用いることが必要と考えられる。

今後の課題として、異常発生源の特定性能を向上させる信号処理方法の検討や、指向性マイクを使用することによる効果の検証等が挙げられる