

〔論 文〕

往復動圧縮機における状態把握のための周期性計測*

福島 学^{*2}, 伊藤 毅登^{*3}, 沖田 和久^{*4}, 林 友哉^{*4}, 近藤 善隆^{*5}, 手島 祐二^{*5}

Periodicity Measurement for Condition Monitoring in Reciprocating Compressors*

Manabu FUKUSHIMA^{*2}, Taketo ITO^{*3}, Kazuhisa OKITA^{*4}, Yuya HAYASHI^{*4},
Yoshitaka KONDO^{*5}, Yuuji TESHIMA^{*5}

^{*2, *3}Department of Media Technologies, School of Engineering, Nippon Bunri University

^{*4}Department of Environmental Engineering and Applied Information Science,
Graduate School of Engineering, Nippon Bunri University

^{*5}J-TEC Co., Ltd.

Abstract

Reciprocating compressors used in chemical plants to compress gases and transport them to the production site are the most important equipment for operations. This equipment must be kept in safe operating condition. For this reason, TBM (time based maintenance), in which repairs are made at regular intervals, is used. However, the amount of load applied to the equipment varies depending on the operating conditions. As a result, malfunctions may occur earlier than expected. Conversely, if the time interval is made too short, maintenance is performed even though the equipment is in a less deteriorated state, which not only increases maintenance costs but also reduces production volume due to the time that the equipment is out of operation. Therefore, CBM (condition based maintenance), in which repairs are performed according to the condition of the equipment, is required. This research aims to realize CBM. In this paper, we attempted to accurately detect the period of measurement signals. As a result, it was found that the accumulated deterioration status of the equipment and the recovery status by periodic repairs can be obtained. It was also confirmed that it is possible to obtain the operating status of the engine, which is a similar device.

*2022年6月15日受理

^{*2}日本文理大学工学部情報メディア学科 教授

^{*3}日本文理大学工学部情報メディア学科 学部生

^{*4}日本文理大学大学院工学研究科環境情報学専攻 大学院生

^{*5}(株)ジェイテック

キーワード：往復動圧縮機, TBM (time based maintenance), CBM (condition based maintenance), 周期検出

Keywords : reciprocating compressors, TBM (time based maintenance), CBM (condition based maintenance), period term detection

1. はじめに

工業分野において、回転運動を動力源とすることが多い。例えば、気体を使用する化学プラントにおいて、効率良く気体を供給するために、往復動圧縮機にて気体を圧縮する方法がある。往復動圧縮機は最重要機材であり、往復動を回転運動から生み出している。配管パイプの保守は気体材料が外部に漏れないようにするために重要であるが、気体の気圧を上げる圧縮機が正常動作していなければ、生産量だけでなく製品品質にも大きく影響を与える。このため往復動圧縮機のメンテナンスはプラントだけでなく、地域の安全安心においても重要である。

一般にメンテナンスは使用する部品の耐久時間から整備計画を立てる TBM (Time Based Maintenance・時間メンテナンス) である。しかし、プラント全体を停止すなわち生産量 0 という大きな犠牲を払ってメンテナンスしても取り換える程には劣化していない場合がある。逆に、大雨や嵐などのような想定外の外力により、想定よりも早く劣化する場合がある。劣化が少ない場合は不要な部品交換となるだけでなく、部品交換後のエイジング時に品質が不安定になるだけでなく他の機体部品に負荷をかけることになる。劣化が大きい場合は、事故につながり働いている人の人命にかかわるだけでなく、気体材料の種類によっては地域の安全を脅かす脅威となりかねない。このため、TBM ではなく機械の状態に応じたメンテナンスである CBM (Condition Based Maintenance・状態メンテナンス) が提案されている^[1]。

しかし、現状では機械の安全を確認する検査は行っているものの、CBM に何が必要かが明確化されていないのが現状である。

そこで本研究では、これまでに回転機械の振動計測とその分析に関し取り組んできている。著者らはこれまでに、回転機械稼働状況を把握するための時間・周波数分析手法についての検討^{[2][3]}、計測時のアタッチメント^{[4][5]}、過渡的現象となる弁運動の解析についての検討^[6-11]、について検討を進めてきている。

気体は外気温や天候による気圧変化により変化するた

め、1 周期以内の詳細な分析ではデータのばらつきが大きく、CBM につなぐことが難しい。

一方で、周期そのものを正確に推定する PLATE 法は、1 周期または概周期信号を構成する周期信号を分析するために考案した手法であるが、原理的に長時間波形における周期を検出することが可能である^{[2][3]}。

そこでここでは、これまでの観測時間波形のミクロ的な分析ではなく、マクロ的な分析に PLATE 法を適用することで、CBM につながる手がかりを探すこととする。

2. 往復動圧縮機

往復動圧縮機は、図 1 に示すように、吸入した気体をピストン運動により圧縮し、指定圧力を超過すると吐出する機械である。これにより化学プラントに材料を送るため、生産にかかわる重要な装置である。

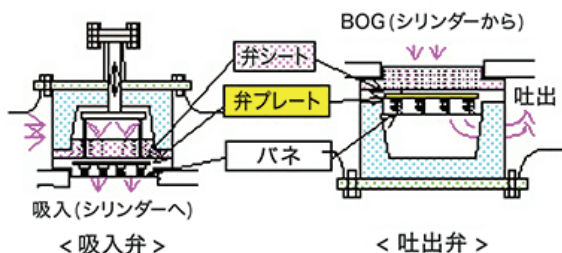


図1 往復動圧縮機の模式図^[12]

吸入弁および吐出弁には弁プレートがあり、図2に示すような構造となっている。



図2 弁プレート

図2に示した弁プレートは一般に図3に示す構造となっている。

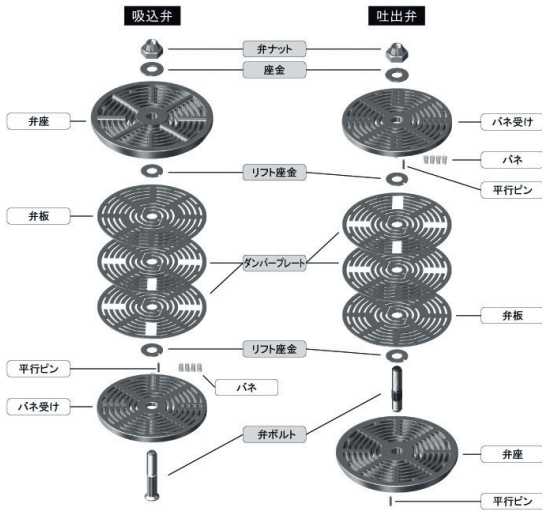


図3 吸入・吐出弁の構造

このため、往復動圧縮機の弁近くに計測プローブを接触し計測した加速度の時間変化は図4のようになる。図は横軸に時間を秒で、縦軸に計測値を示している。

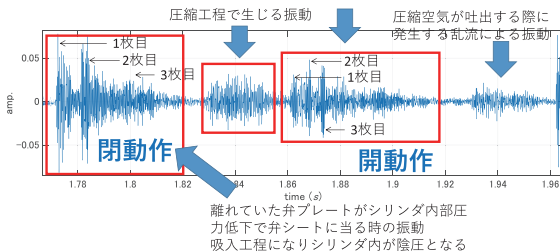


図4 弁付近で計測した加速度データの例

図4からわかるように、3枚の弁プレートがぶつかるタイミングは気体の状態に依存し、吸入および吐出の際に生じる気流は統計的なもので確定的に捉えることができない。図5に約5周期の動作を観測した例を示す。なお、図中赤枠は図4に示した範囲である。

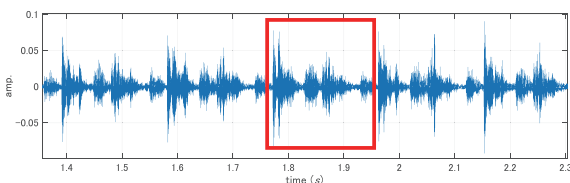


図5 約5周期の計測データ例（赤枠が図4）

図5から、前後の周期において同じ波形が繰り返していないことがわかる。このような観測信号において、動作状況を把握し、劣化の状況を確認することが、往復動圧縮機において求められる。

一般に機械の保全管理では、波形の大小およびスペクトルピーク位置から部品の状態を推察する。ベテラン検査員は機械から生じる音の音色を機械近傍または聴音棒を使用して確認する。

そこで、これまでに図6に示すように PLATE 法を使用した周期の精密分析に基づき、高精細ソノグラムにより状態把握の可能性を試みてきた。図は1段目左に時間波形、右側に横軸に時間、左手方向に周波数、縦軸に大きさを dB で示している。図の2段目は横軸に時間、縦軸にパワーを dB で示している。図3段目および4段目はソノグラムであり、横軸に時間、縦軸に周波数を示している。3段目は周波数をリニア、4段目は対数で示している。

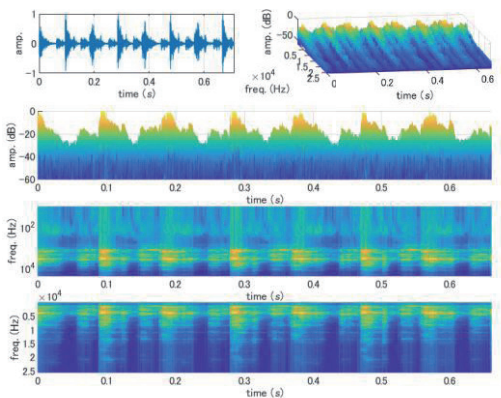


図6 PLATE 法による高精細ソノグラムによるエネルギー変動および周波数の時間変化を可視化した例

ソノグラムが2種類あるのは、機械のうねり音が低周波に、音色が倍音で現れるためである。

図6から、エネルギー変動が図5と同様に周期毎に異なること、ソノグラムも同一ではないことがわかる。従来の平均パワースペクトルを使用するのに比べ、ソノグラムにすることで時間的な変化を確認することができ、現場の印象を反映させることができています。

しかしばらつきが大きく、劣化を把握するには至っていない。そこで原点に立ち戻り、図4に示した基本周期の検出を行い、部品劣化に伴う基本周期の変化を確認する。ここでは、2017年9月から2020年7月までのデータを対象とし、定期修理（期間内に3回）における劣化回

復と劣化累積を分析することとする。

計測時期が異なるデータを比較するには、波形の先頭位置を合わせないと時間波形の比較ができない。そこで、図4に示した閉動作を波形先頭となるように周期を切り出すことを考える。

各月の計測データから先頭波形を取り出した結果を図7および図8に示す。図は横軸に時間を秒で示し、縦軸に振幅を示している。なお、図8の図タイトルに計測した日付を入れている。

各月の先頭位置を自動検出した結果と、検査員が確認し訂正した結果を図9に示す。図9は横軸に月、縦軸に先頭位置を示している。

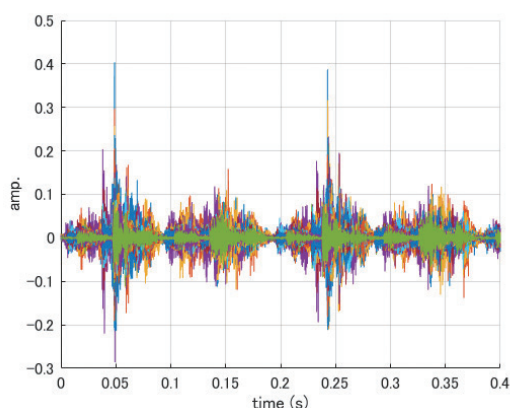


図7 各月の先頭波形を重ね書きした図

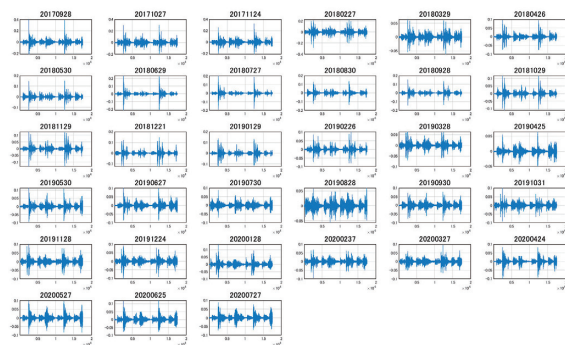


図8 各月の先頭波形の個別図

次に各月の計測データから PLATE 法を用いて周期を抽出する。PLATE 法は、周期信号において正確に周期を区間として自己相関関数を求めると、そのスペクトルがパワースペクトルとなるという性質を利用した周期検出方法である。この手法では、図10上段に示す時間波形

において、信号末尾から波形を1サンプルずつ短縮しながらその自己相関関数のスペクトルの位相累計値を求める。各サンプルにおける位相累計値を図10中段に示す。この最小値を最適区間長とし、切り出した波形を図10下段に示す。なお、探索範囲は対象時間波形の半分までである。

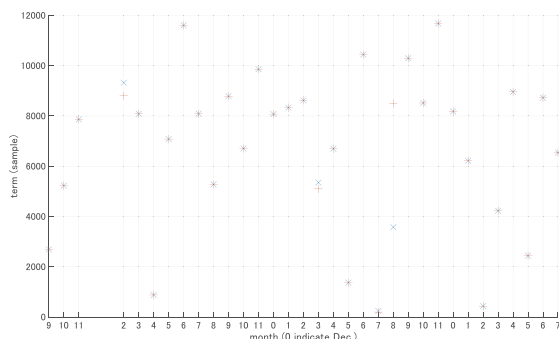


図9 各月の先頭位置
(自動検出結果：青×，検査員による補正結果：赤+)

このようにして求めた区間波形を3D表示した結果を図11に示す。図は、横軸に時間、左手方向に切り出し順、縦軸に振幅を示している。

図11は、図5または図6に比べ、より周期によるばらつきが生じていることが可視化されていることがわかる。

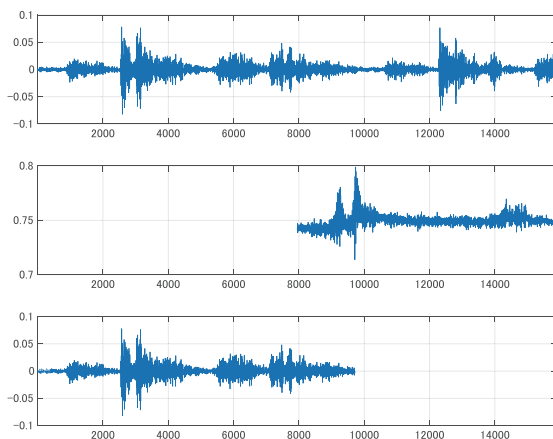


図10 PLATE による周期検出
(上段：対象時間波形，中段：区間長と位相累計値，
下段：最適区間長で切り出した時間波形)

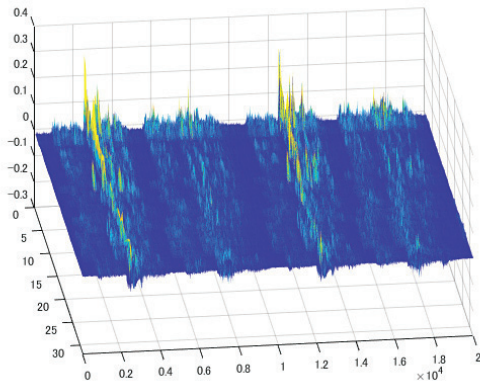


図11 PLATE 法により切り出した1月の周期波形を3次元表示した例

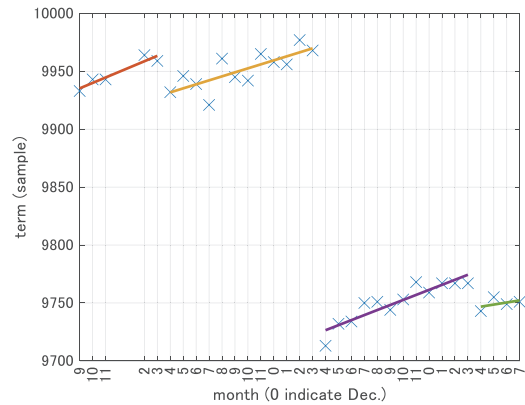


図13 各月推定周期の中央値と定期修理後（4月）から翌年定期修理前（3月）の近似直線

3. 定期修理における回復と劣化の累積調査

対象区間において図11に示した周期検出を行った。検出された周期の中央値と分散を調べた結果を図12に示す。図の横軸は計測月、縦軸に周期をサンプル数で示している。

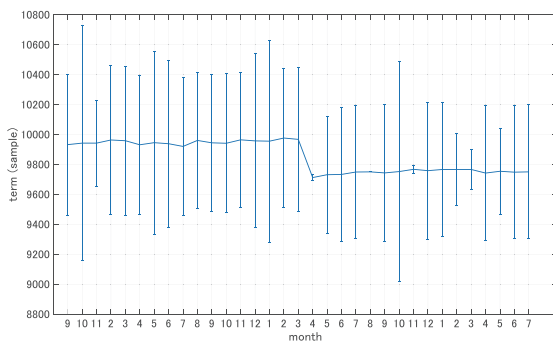


図12 計測月における回転数の中央値と分散

図12より、図5、図6、および図11で確認した通り分散が大きいことがわかる。ここでは、計測月の中央値に着目し、中央値の変化を調べる。定期修理は毎年3月に行われるため、3月の計測データが定期修理前、4月の計測データが定期修理後となる。図13に各月の計測データから推定した周期の中央値を示す。図に4月（定期修理後）から翌年3月（定期修理前）で直線近似した補助線を合わせて示す。図は横軸に計測月、縦軸に周期を示している。

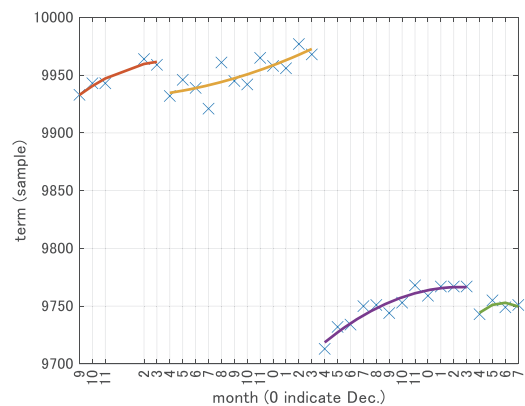


図14 各月推定周期の中央値と定期修理後（4月）から翌年定期修理前（3月）の2次近似曲線

図14は、現場で「大規模修理後は交換した部品が他の部品となじむまで」という経験値と対応した2次曲線の曲率を示しており、大規模修理前と反り方が逆になっていることを示している。また図右側にある定期修理前後の差が、図左側にある定期修理前後の差よりも小さく、定期修理の回復量に差がある可能性を示している。これは、定期修理による回復量が劣化累積を知る手がかりに

なる可能性を示している。
そこで定期修理前後の差を調べる。表1は図13に示した直線近似と、図14に示した2次曲線の両方を示す。表1は曲線近似がより修理による回復の度合いを適切に示していることを示している。

表1 定期修理前後の近似線の差
左：1次曲線／直線近似 右：2次曲線

1次曲線（直線）			2次曲線		
2018年3月	9963.4		2018年3月	9961.6	
2018年4月	9931.8	31.6	2018年4月	9934.7	26.9
2019年3月	9969.8		2019年3月	9972.7	
2019年4月	9726.5	243.3	2019年4月	9718.6	254.1
2020年3月	9774.4		2020年3月	9766.5	
2020年4月	9746.8	27.6	2020年4月	9744.3	22.2

4. 周期検出の応用

往復動圧縮機の動作状態を把握するため、PLATE法を用いた精密周期推定を行い、その中央値の変化で劣化の状況が把握できることを確認してきた。
この手法は、周期的な動きをする全ての装置において適応可能であると考えている。特にこの手法では装置が稼働状況下において内部状況を把握することが出来る。多くの装置においてオンサイトすなわち稼働状況下での状態把握は、装置およびそれにかかわる人の安全を守るために重要である。
そこで、動力源であるエンジンの破損で人身事故につながりやすい装置としてバイクに着目する。ここではシンプルなモデルとして単気筒エンジンを搭載しているバイクの例として図15に示すホンダ製CB223Sを対象とする。なお、搭載エンジンの諸元は表2の通りである。走行中のバイクに加速度計測用プローブを接触させつつ安全を確保することが難しいため、吸排気周期を因とする排気音を使用することとする。收音は車検に準じて排気口の右後方とすることで、排気で生じる気流の影響を受けない条件とする。



図15 エンジン音を計測したバイク（CB223S）^[13]

表2 搭載されているエンジンのスペック^[14]

エンジン型式	MD33E
エンジン種類	空冷4ストロークOHC 単気筒
総排気量 (cm ³)	223
内径×行程 (mm)	65.5×66.2
圧縮比	9.0

計測した排気音の一部を図16に示す。図は横軸に時間を秒で、縦軸に振幅で示す。また、拡大したものを図17に示す。図の縦軸と横軸は図16と同様で示す。図17から0秒から約0.5秒の間に約6周期が含まれていることがわかる。

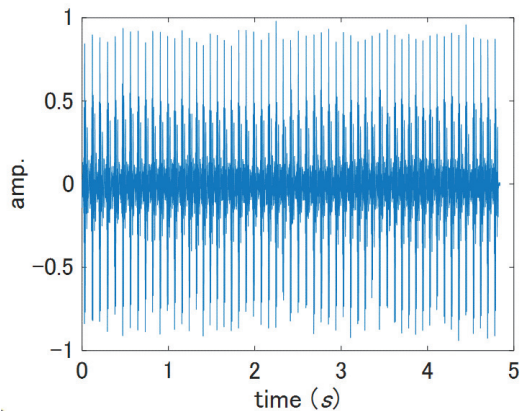


図16 排気口右後方の計測データの時間波形

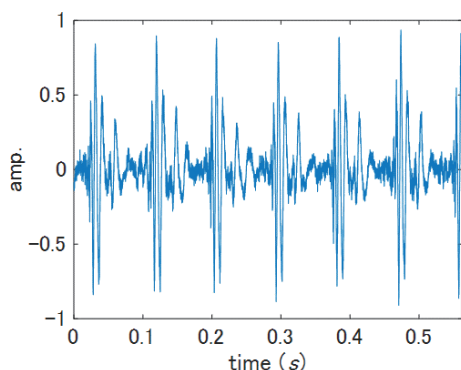


図17 約6周期の計測データ

図16の時間波形包絡線は、振幅に揺らぎを示しており、往復動圧縮機と同様に不安定要素を含む現象であることが確認できる。これは図17に示された1周期の時間波形を個々に確認しても同様に時間波形に違いを生じていることから確認できる。

これらのことから、バイク排気音からここで提案している周期推定手法が適用可能であると判断した。

手法を適用し得られた結果を図18に示す。図18は各図のタイトルに検出された順番を示している。また横軸と縦軸は図16と同じである。

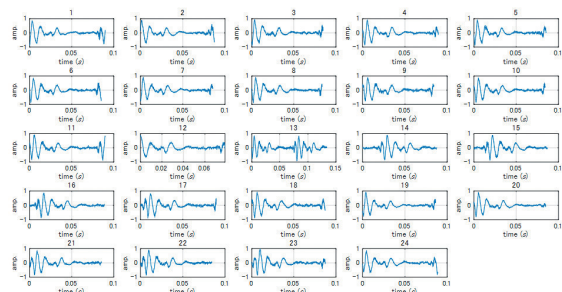


図18 バイク排気音に対して周期検出した結果例

図18は、図8と比較して概ね波形の先頭が検出されているものの、一部の区間で先頭検出が出来ていないことを示している。検出が出来なかった図18の個別図14（検出番号14番目）は、本来先頭となるべき波形ではないそれまでの周期の途中から始まっている。周期検出は、前の周期検出の次サンプルから周期検出するため、このずれは1つ前の周期検出にあると考えられる。

そこで1つ前の検出番号13番（図18中個別図タイトル13）を図19に示す。図の横軸と縦軸は図16と同じである。

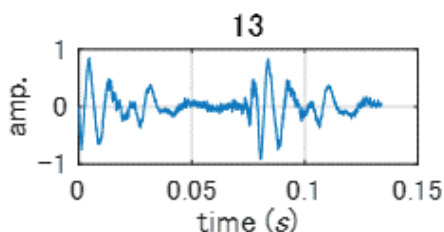


図19 図18のタイトル13を拡大した図

図19は、本来0.07秒付近で周期の終わりを検出すべきものが、次の周期の同様部分を周期の終わりとして検出している。単に2周期を分割できなかったのであれば検出番号13が2周期となり、検出番号14に影響を与えないはずである。

周期検出では、往復動圧縮機は装置によって周期に規定値があり、概周期で稼働することが求められている。このため周期検出では想定周期の大きな逸脱を検出するため検出周期範囲に制限をかけている。一方バイクの場合、路面状況や走行速度によって回転数すなわち周期の変化が大きいのが特徴である。検出周期番号13の事例は、対象の想定周期を安定周期が前提の往復動圧縮機のままで解析したことによって周期制限により検出番号13で打ち切りが生じ、その影響が検出番号14に及んだものであると判断する。

このことから、ここで提案する周期推定手法は、同様の装置においてオンサイトで部品の劣化状況を把握することの可能性を示しているが、対象装置の特性や目的に応じて推定周期範囲の変更を必要とすることが明らかとなった。

5. おわりに

化学プラントにおいて、気体を効率よく供給するために必要な気体の圧縮を行う機器である往復動圧縮機は、操業だけでなく地域の安全安心を提供するためにも重要機器である。この装置を安全に稼働し、その状態を維持することが求められる。このため一定時間で修理を行うTBM（Time Based Maintenance）が行われている。しかし、稼働状況により装置にかかる負荷量に変化する。これにより想定よりも早期に異常をきたす場合がある。逆に修理期間の間隔を短くしすぎると、劣化が少ない状態であるにも関わらず保守を行うため、保守費用がかさむだけでなく操業できない時間による生産量低下を生じる。このため、装置の状態に応じた修理を行うCBM

(Condition Based Maintenance) が求められている。本研究は CBM 実現を目指している。本稿では、計測信号の周期を正確に検出することを試みた。その結果、装置の劣化累積状況や定期修理による回復状況が得られることを明らかにした。また同様の装置であるエンジンにおいても稼働状況を把握できる可能性が確認された。

参考文献

- [1] 里永憲昭, "化学プラントにおける限界劣化判定法による回転機械設備の状態監視・診断・余寿命予測技術に関する研究", 三重大学・学位論文(博士), 2008年 <http://hdl.handle.net/10076/10949>
- [2] 福島学, 大里一矢, 大塚柊, 河合修平, 上原正志, 河納隼一, 近藤善隆, 手島祐二, 柳川博文, "回転機械稼働状況把握への PLATE 法適用の一検討", 日本音響学会, 日本音響学会2018年秋季研究発表会講演論文集, 1-P-44, 2018
- [3] 長瀬翔太, 大塚柊, 大里一矢, 高橋瑞希, 舟橋宏樹, 河納隼一, 近藤善隆, 福島学, 松本光雄, 風間道子, 手島祐二, 柳川博文, "位相情報に着目した高解像度周波数分析法(PLATE)の提案", 日本音響学会, 日本音響学会2018年春季研究発表会講演論文集, 1-P-40, 2018
- [4] 福島学, 鶴飼拓也, 近藤善隆, 手島祐二, "現場機材による回転機械振動診断で用いるアタッチメントの簡易特性調査", 日本文理大学, 第44巻, 第2号, pp. 45-54, 2016
- [5] 福島学, 鶴飼拓也, 近藤善隆, 松本光雄, 手島祐二, 柳川博文, "回転機械振動診断におけるアタッチメントにより生じる計測値の差異改善に関する一検討", 電子情報通信学会応用音響研究会, EA 2016-50, pp. 13-18, 2016
- [6] 福島学, 鶴飼拓也, 近藤善隆, 松本光雄, 柳川博文, "回転機械振動診断における計測精度改善に関する一検討", 日本音響学会2016年秋季研究発表会講演論文集, 1-P-11, 2016
- [7] 福島学, 鶴飼拓也, 篠原康平, 河納隼一, 近藤善隆, 窪田泰也, "短時間事象の時間周波数分析手法の一検討", 日本文理大学紀要, 第43巻, 第2号, pp. 77-84, 2015
- [8] 福島学, 岩村直樹, 松井庸佑, 三角健太, 河納隼一, 平居安康, 近藤善隆, "無歪周期分析法の時間追従への拡張", 日本文理大学紀要, 第41巻, 第2号, pp. 33-41, 2013
- [9] 福島学, 近藤善隆, 河納隼一, 平居安康, "計測信号から目的データを正しく抽出するための手法について", 日本文理大学紀要, 第41巻, 第1号, pp. 75-86, 2013
- [10] 福島学, 黒岩和治, 近藤善隆, "伝送路特性の周波数振幅包絡に生じる変調分析による距離推定手法を用いた微振動計測の研究", 日本文理大学紀要, 第40巻, 第1号, pp. 37-44, 2012
- [11] 福島学, 近藤善隆, 山下涼介, 大里一矢, 山上洋志, "振動信号による往復動圧縮機吸吐弁劣化診断に向けた定期計測データにみる劣化進行状況の検討", 日本文理大学紀要, 第47巻, 第2号, pp. 7-pp. 16, 2019
- [12] 東邦ガス, "BOG 圧縮機樹脂製弁プレートを使用した吸入・吐出弁 | 生産技術 |", <https://www.tohogas.co.jp/corporate/approach/technologies/technologies-supply/output/output-01/> (2022年6月13日)
- [13] 本田技研工業, "Honda | バイク | CB223S", <https://www.honda.co.jp/CB223S/photo/> (2022年6月14日)
- [14] 本田技研工業, "Honda | バイク | CB223S", <https://www.honda.co.jp/CB223S/spec/> (2022年6月14日)