

(技術資料)

# 圧縮機の運転監視、保守診断システム

## System for Monitoring Operation and Diagnosing Maintenance of Compressors



松本泰治\*1

Yasuharu MATSUMOTO

Kobe Steel's compressors are equipped with Kobenicle® as a standard control and monitoring system. Kobenicle® is the trademark of a system for supervisory control and data acquisition (SCADA) and has an international standard communication interface called the "OLE for Process Control (OPC)." The company uses this system as a platform to provide services including collection, storage, remote monitoring and diagnosis of compressor operation data. This paper introduces these functions provided by the Kobenicle®.

まえがき = 圧縮機に対しては従来、機械の保護や制御、メンテナンスに必要なデータを計測するためのセンサが取り付けられており、運転監視用のデータや履歴情報を表示する機能としてSCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) などが活用されている。近年の制御機器の高性能化やITの発達により、履歴情報だけでなくさらに効果的な保全計画を行うための診断情報を提供する機能の要求が高まってきている。

当社では2007年以降、非汎用圧縮機の制御・監視システム (コベニクル<sup>注)</sup><sup>1)</sup> を開発して標準搭載している。さらには2010年以降、リモートモニタリング用のクラウドサービス (Webコベニクル) を導入して当社納入機の稼働データを収集・蓄積することにより、診断機能の充実に取り組んでいる。本稿ではそれらの機能について紹介する。

### 1. システム構成

コベニクルおよびWebコベニクルのシステム構成を図1に示す。圧縮機に取り付けられたセンサはPLC (Programmable Logic Controller) あるいはDCS

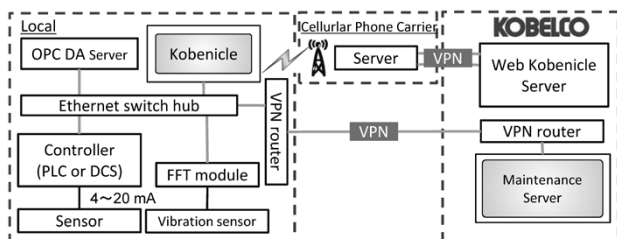


図1 コベニクルおよびWebコベニクルのシステム構成図  
Fig. 1 System configuration of Kobenicle® and Web Kobenicle

脚注) コベニクルおよびKobenicleは当社の登録商標 (第5110397号) である。

(Distributed Control System) などの制御装置に計測信号を送信する。これらの制御装置に入力された計測信号はイーサネット通信にてOPC DA (OLE for Process Control Data Access) インタフェースを持つOPCサーバを経由してコベニクルに取り込まれる。

コベニクルは0.2秒間隔でデータ採取を行い、これらのデータの15分間分を一次記憶に蓄え、警報発生時にはそのデータを保存する。また採取したデータは、データ量の削減を目的として1秒間隔のデータとして連続的に保存し、通常時のデータとしている。

コベニクルに保存したデータについては、通常時のデータは10秒間隔のデータに加工した上で1日1回定期的に、また警報発生時には都度、Webコベニクルへ送信される。Webコベニクルとのリモート接続手段としては携帯通信端末あるいはVPN (Virtual Private Network) ルータのいずれかの手段が選択可能である。

#### 1.1 セキュリティ対策

リモート接続手段としては一般的にインターネットが利用される。しかしながらその場合には、当社圧縮機専用の回線を顧客に準備いただく必要がある。このため当社では、携帯通信端末を利用したシステムを標準としている。

インターネットには接続されていない無線通信によって携帯通信キャリアサーバを利用する。キャリアサーバとWebコベニクルサーバ間は、セキュリティプロトコルにIPsec (Security Architecture for Internet Protocol) を利用したVPNで接続することによって不正なアクセスを防止している。また、SIM (Subscriber Identity Module) カードの通信量や状態を定期的に確認して回線が適切に利用されているか確認するなど、セキュリティには細心の注意を払っている。

\*1 機械事業部門 圧縮機事業部 回転機本部 回転機技術部

上記のシステムはコベニクルからデータ送信する一方のみのアクセスである。しかしながら近年、PLCやコベニクルを遠隔地から診断、メンテナンスしたいという要求も増加しており、その場合にはIPsecを利用したVPNルータを準備して、当社メンテナンスサーバに接続するシステムを採用している。

## 2. 運転監視機能

コベニクルの運転監視機能には主にデータロギングと履歴情報がある。以下にその概要を紹介する。

### 2.1 データロギング

アナログデータは1秒間隔でリアルタイムトレンド表示する。それらのデータは1年間分を標準的に保存してヒストリカルトレンドとして表示させる機能を備えており、長期的な運転傾向を確認することができる。

また、警報発生時には原因究明のためのより詳細なデータが必要である。このため、警報発生前15分間、および発生後1分間は0.2秒間隔で保存すると同時に、トレンド表示することによって警報発生前後の状態が視覚的に確認できる(図2)。

さらに、コベニクルと制御装置との通信状態の健全性を確認するためのウォッチドッグ機能も標準で搭載している。

### 2.2 履歴情報

警報やイベントなどの発生、および解除履歴情報を1ms分解能で表示させる機能を有している(図3)。また、顧客要求に応じてNTP(Network Time Protocol)サーバや制御装置との時刻同期機能にも対応し、より正確な時刻管理をしている。

いっぽう、当社制御装置の履歴情報としてはOPCサーバソースのタイムスタンプを標準採用しているが、通

信による時間遅れが問題とされる場合にはPLC側でタイムスタンプを取得して履歴情報を更新する仕様にも対応可能である。

## 3. 診断機能

従来の異常診断は、各種運転データが管理値以内で運転されているかを確認・診断するものであった。しかし、管理値以内でも異常の兆候を検知する手段はある。たとえば、通常の運転状態の変動範囲外にブレイアラームを設定し、アラームが発生する前にオペレータに注意を喚起する機能、あるいはデータの変化の傾きから将来管理値を超過する時期を予測する機能が挙げられる。当社では異常の兆候を監視する手段の開発にも取り組んでおり、本章ではその概要を紹介する。

### 3.1 高速データサンプリング

一般的なPLCでのアナログデータの変換周期は1kHz程度である。これに対してコベニクルでは、25kHz周期サンプリングのアナログデータを圧縮機の振動解析に重要な振動、位相診断に活用している。

#### 3.1.1 振動解析

コベニクルでは、振動信号を10kHzのLPF(Low Pass Filter)で折り返しひずみ成分を除去した後、25kHz周期でサンプリングして振動波形の表示、オービット表示する。同時に、FFT分析(Fast Fourier Transform)した結果をスペクトル表示(図4)することによってオーバーオール値での振動値の変動がどの周波数成分の変動によるものかを確認している。さらに、ころがり軸受損傷による特徴的な周波数成分に着目した警報設定にも対応している。

#### 3.1.2 位相解析

コベニクルは、振動信号と位相信号を入力することによって振動成分を位相別に解析している。一般的にはボード線図やポーラ線図表示で確認できるが、コベニクルではさらに位相ごとの振動値トレンドを表示させる機能を導入している。たとえば、レシプロ圧縮機の回転運動を直線往復運動に変えるクロスガイド振動の解析に導入しており、これにより、各振動値の初期状態からの変動を位相別に一目で確認できる(図5)。さらに、時系列での変動を記録することにより、クロスヘッドの緩みあ

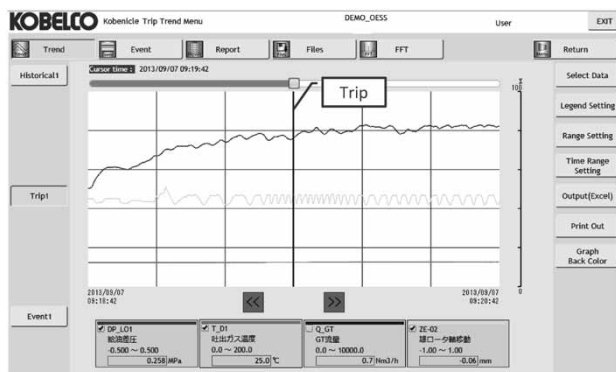


図2 トレンドデータ  
Fig. 2 Trend data

Time	Alarm	Message	Unit
2017/03/09 13:48:36	731 Alarm	HMI COMMUNICATION FAILURE	ON-2
2017/03/09 13:55:46	099 Alarm	PAH-507C 1-1 BYPASS LINE PRESS. HIGH	ON-2
2017/03/09 14:01:47	643 Alarm	UNLOADER TIME OVER	ON-2
2017/03/09 14:11:44	121 Alarm	PAH-507C 1-1 BYPASS LINE PRESS. HIGH	ON-2
2017/03/09 14:38:00	322 Alarm	PAH-508C 2-1 BYPASS LINE PRESS. HIGH	ON-2
2017/03/09 15:10:20	080 Alarm	COMMON ALARM	ON-2
2017/03/09 15:10:20	080 Alarm	PAL-501C 1ST STG. SUC. GAS PRESS. LOW	ON-2
2017/03/09 15:27:14	449 Alarm	LAH-501C BUFFER DRUM LEVEL HIGH	ON-2
2017/03/09 15:27:38	572 Alarm	HMI COMMUNICATION FAILURE BY HMI	OFF-2
2017/03/09 15:27:41	427 Alarm	COMMON ALARM	ON-2
2017/03/09 15:27:41	850 Alarm	HMI COMMUNICATION FAILURE BY HMI	ON-2
2017/03/09 15:27:42	568 Alarm	HMI COMMUNICATION FAILURE BY HMI	OFF-2
2017/03/09 15:27:42	595 Alarm	PDH-501C SUCTION GAS FILTER DIFF. PRESS. HIGH	ON-2
2017/03/09 15:27:45	438 Alarm	COMMON ALARM	OFF-2
2017/03/09 15:27:45	656 Alarm	COMMON ALARM	OFF-2
2017/03/09 15:27:47	937 Alarm	HMI COMMUNICATION FAILURE BY HMI	ON-2
2017/03/09 15:27:48	567 Alarm	HMI COMMUNICATION FAILURE BY HMI	OFF-2

図3 履歴情報  
Fig. 3 Historical Information

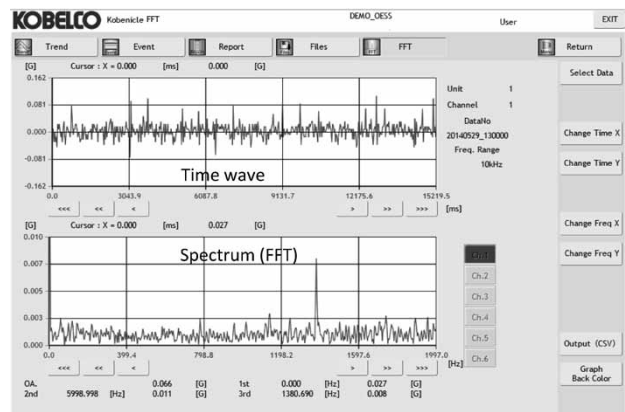


図4 スペクトル分析  
Fig. 4 Spectrum analysis

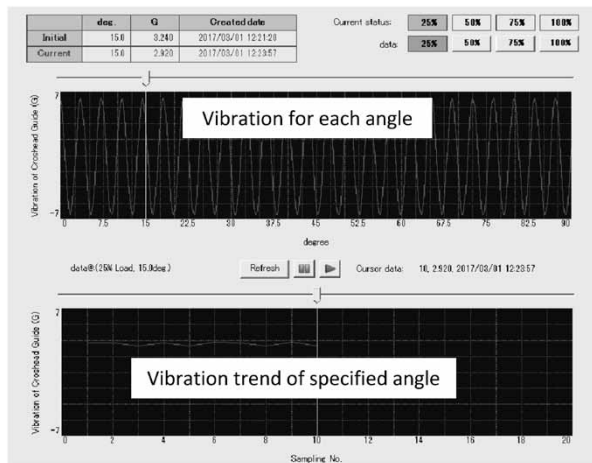


図5 位相解析  
Fig. 5 Phase analysis

るいはブッシュの過度のクリアランスなどの故障要因との相関を判断するためのデータを蓄積している。

### 3.2 診断指標の設定

コベニクルは制御装置から取り込んだデータを自由に組み合わせて内部演算できる。この特徴を利用して様々な診断指標を生成する機能を用意している。

#### 3.2.1 熱交換器診断

熱交換器を長期間使用すると伝熱表面にスケールが堆積し、伝熱が阻害されて効率が低下する。式(1)で示される総括伝熱係数 $U$ によりこの効率を監視している。

$$U = Q / (A \cdot \Delta T) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $Q$ は交換熱流量、 $A$ は伝熱面積、 $\Delta T$ は対数平均温度差である。表1にガスクーラの経年変化の一例を示す。初期のデータから総括伝熱係数が約28%低下し、効率が低下していることがわかる。

#### 3.2.2 断熱効率診断

スクリュ圧縮機やレシプロ圧縮機などの性能を監視する指標として断熱温度上昇比 $\alpha$ を式(2)で定義する。

$$\alpha = T_d / T_{th} \dots \dots \dots (2)$$

ここで $T_d$ は吐出温度、 $T_{th}$ は理論断熱圧縮温度である。この断熱温度上昇比をKPI (Key Performance Indicator)

として設定して、他の計測データと同様にトレンド表示や警報設定する機能を有しており、性能の傾向監視に活用している。表2にドライ圧縮機の経年変化の一例を示す。初期のデータから断熱温度上昇比が約4%上昇し、圧縮機性能が低下していることがわかる。

### 3.3 予兆診断

当社では、多変量の時系列データを扱う圧縮機の予兆診断として、主成分分析の正常モデルをオンラインで学習できる手法を構築している。主成分分析とは、データの分散が最大となる方向に第1主成分を設定し、そのデータの特徴を最大限に表す指標を作り出す手法である。さらに、この第1主成分軸に直交する軸で分散が最大となる方向に第2主成分を設定し、 $n$ 種類の変量を持つデータには順次第 $n$ 主成分までの指標が生成される。当初は第1主成分と第2主成分の分布に着目すればデータ変動の特徴を十分に把握できるものと考え、圧縮機が正常稼働しているときの基準データと比較して図6のように視覚化して監視していた。

しかしながら、圧縮機の運転データにおける通常変動範囲からの逸脱を高次の主成分でも検出できることが判明した。図7にその例を示す。全主成分スコアの中心か

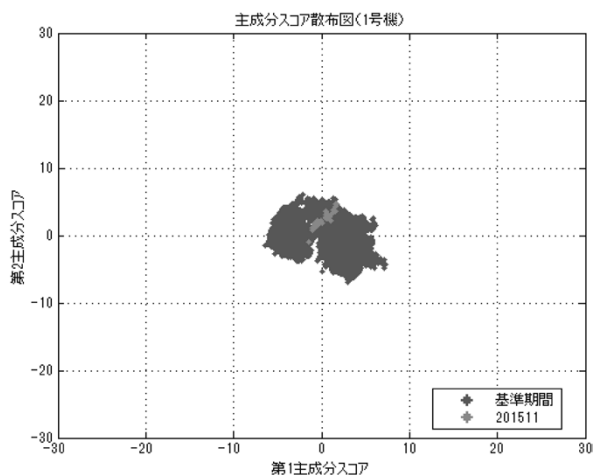


図6 主成分分析  
Fig. 6 Prinsipal component analysis

表1 ガスクーラの経年変化データ  
Table 1 Aging data of gas cooler

No.	Item	Unit	Initial value	Aging	Change rate from initial value
1	Gas cooler inlet temperature	°C	97	98	1%
2	Gas cooler outlet temperature	°C	42	48	14%
3	Cooling water supply temperature	°C	32	32	0%
4	Cooling water outlet temperature	°C	40	35	-13%
5	LMTD	°C	27.0	34.3	27%
6	Exchange heat quantity of gas cooler	kcal/h	584,100	531,400	-9%
7	Overall heat transfer coefficient	kcal/(m <sup>2</sup> h°C)	52.8	37.8	-28%

表2 断熱温度上昇比の経年変化データ  
Table 2 Aging data of adiabatic temperature rise ratio

No.	Item	Unit	Initial value	Aging	Change rate from initial value
1	Suction pressure	kPaG	0	0	0%
2	Suction temperature	°C	0	0	0%
3	Discharge pressure	kPaG	294	294	0%
4	Discharge temperature	°C	160	179	12%
5	Adiabatic temperature rise ratio	none	1.07	1.12	4%

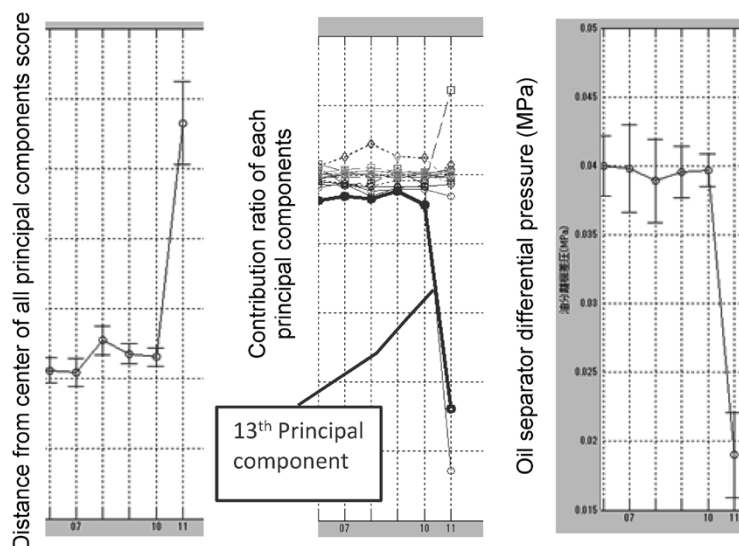


図7 全主成分スコアの中心からの距離による予兆診断例  
 Fig. 7 Predictive diagnosis by distance from center of all principal components score

らの距離が急上昇した要因は第13主成分であり、さらにその寄与度は油分离器差圧が大きいことがわかる。実際に油分离器差圧は管理値未満ではあるが通常変動範囲の $0.04 \pm 0.005$  MPaから0.02 MPaに逸脱している。この経験から当社では、全主成分の変動を監視できる指標として、全主成分スコアの中心からの距離を監視するシステムを構築し、オペレータに注意を促している。

また、予兆診断においては、オンラインでの学習・診断が重要であるが、上述の主成分分析において1～2年分のデータを一括して学習することはデータ処理の観点から非常に困難である。当社では、数年分のデータに対しても、逐次学習手法を活用することによってオンラインによるモデル学習および診断が可能な主成分分析手法を開発しており、今後のオンライン診断に活用を進めてゆく予定である。

むすび＝プラントの安定操業や収益性向上のため、データに基づいた圧縮機のオペレーションとメンテナンスサービスを提供することはメーカーの責務であると認識している。そこで当社では、コベニクルおよびそのクラウドサービスであるWebコベニクルをプラットフォームとして、圧縮機の操業データの収集、蓄積、分析を進めている。これによって、機械学習を進化させて予兆診断の精度向上を進め、適用可能機器の拡大を図っていく考えである。

#### 参考文献

- 1) 松本泰治ほか. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.2, p.47-50.