

製品紹介

熱電EH振動センサデバイス KSGD-SV

Thermoelectric Energy Harvesting Vibration Monitoring Device KSGD-SV

村瀬 隆 浩
Takahiro Murase
後藤 大 輔
Daisuke Goto
柴田 勲
Isao Shibata
村田 知 紀
Tomonori Murata

2018年に日本機械工業連合会が行った生産設備保有期間に関するアンケートによると、金属工作機械、第二次金属加工機械、鋳造装置の50～80%が導入後15年以上経過している。設備保全を担ったベテラン社員の引退が進んでおり、故障予兆検知用センサデバイスにて適切なタイミングで保全を実施する予知保全（CBM）の重要性が高まっている。センサの低コスト化と小型化が進行しているものの、センサデバイスの設置コストと運用コストの課題により、CBMの導入はダウンタイムによる機会損失の大きな一部の設備に限られている。多くの設備では作業員による巡回点検が続いている。

株式会社KELK（以下KELK）は、熱電エネルギーハーベスト（EH）による自己発電で動作する電池レスで配線レスのIoTセンサデバイスKELGEN SD（ケルジェン エスディー）を開発した。

本稿では、KELGEN SD製品群の中で、設備故障原因の割合が最も高い回転機器の故障予兆を検知する電池レスIoT振動センサ『熱電EH振動センサデバイスKSGD-SV』の特長と活用方法を説明する。

According to a survey in 2018 conducted by the Japan Machinery Federation, 50% to 80% of machine tools, secondary operation machine, and foundry equipment have been installed for 15 years or more. Retirement of veteran employees in charge of equipment maintenance is in progress. Predictive maintenance (PdM) is becoming more important by detecting signs with monitoring equipment and perform maintenance at the right time. Although the cost reduction of sensors is progressing, the introduction of PdM is limited to some equipment with large opportunity loss from downtime due to the problems of installation and operational costs of monitoring devices. Much equipment continues to undergo patrol inspections.

KELK Ltd. has developed the battery-less and wiring-less monitoring device “thermoelectric EH (Energy Harvesting) vibration monitoring device KSGD-SV.” This paper describes the features and usage of KSGD-SV that detects signs of failure of rotating equipment, which has the highest ratio of equipment failure causes in the KELGEN SD product group.

Key Words: 熱電発電, エネルギーハーベスティング (EH, 環境発電), 予知保全 (CBM), 振動センサ

1. はじめに

KELKは、1957年からコマツが始めた熱電半導体の研究開発を前身とし、1966年に熱電素子応用製品メーカーとして設立した。熱電半導体を温度制御として使うサーモ・モジュール（熱電素子モジュール）に関して、素材からモジュール、熱交換器、応用機器までの開発・製造・販売を一貫して手掛けており、半導体製造装置で使用される温度制御装置においては世界トップメーカーとして市場をリードしている。また、熱電半導体により熱を電気に変換する熱電発電においても要素技術の開発から応用製品の開発まで手掛けるリーディングカンパニーであり、ボタン電池レベルのmW出力から商用電力レベルのkW出力まで幅広い出力範囲の熱電発電製品とその応用製品を開発している。

2. 熱電発電のしくみ

熱電発電は、熱電半導体と呼ばれる材料を介して熱を電気に直接変換するゼーベック効果（図1）を応用した技術である。ゼーベック効果は、金属もしくは半導体の両端に温度差が生じると、両端の電子もしくは正孔濃度分布に差異が発生し、起電力（熱起電力）が生じる現象である。

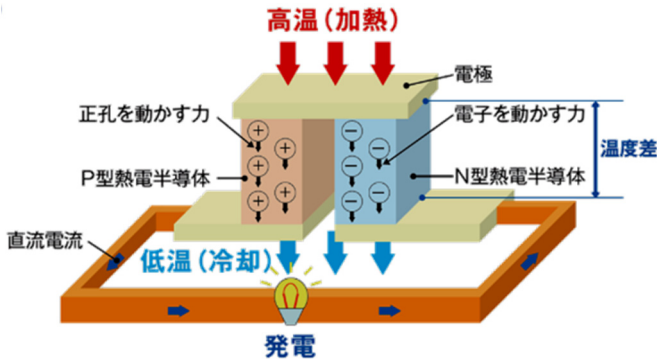


図1 ゼーベック効果の原理図

熱電発電モジュールは図2のようにP型、N型の熱電半導体素子を金属電極により交互に多数直列接続したモジュールである。この構造により、同じ熱流方向に対して、それぞれの熱電半導体素子の熱起電力が累積され、より大きな電圧が得られるようになる。KELGEN SDは、搭載する熱電発電モジュールKELGENに温度差が生じることで自己発電する電力を電源としている。

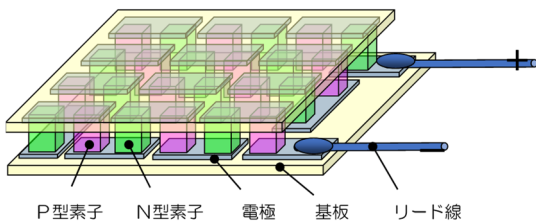


図2 熱電モジュールKELGENの基本構造

3. KELGEN SDの発電部

熱電半導体素子は、他の金属材料に比べ機械的な強度が弱い。また、水分に触れるとマイグレーションや短絡により破損に至る。一方、熱電半導体素子を直接樹脂などで覆って保護すると熱電半導体素子の両端の温度差が小さくなり発電効率は著しく低下する。KELKはKELGENへの機械的衝撃や熱変形の影響を低減し、熱電半導体素子の両端の温度差を保ち、保護等級IP67規格へ対応する防塵・防水性能を備えた発電部を開発した(図3)。

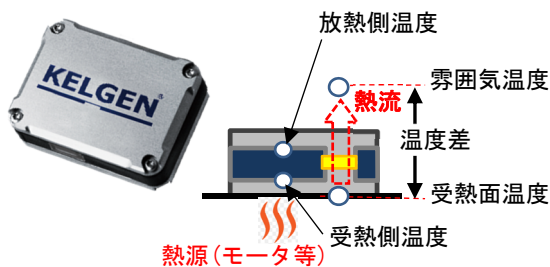


図3 KELGEN SD発電部の外観と温度測定位置

4. モータの排熱とKELGEN SDの発電性能

モータは、省エネルギー化が進んでいるものの、その効率により入力する電気エネルギーに対し、5%~15%が熱エネルギーとして捨てられる(図4)。

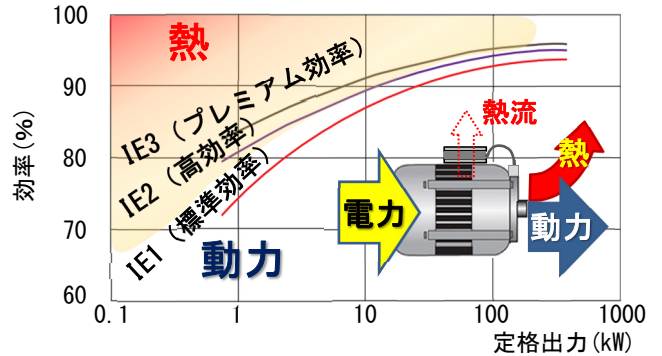


図4 モータ効率値比較 (IP4X 50Hz 4極200V) ^[1]

KELGEN SDは動作するモータに置くだけでモータ表面と雰囲気との温度差10℃から発電する。

KELGEN SD全体の温度は、昼夜・天候・季節により変わる周囲環境からの受熱量(モータ等からの排熱を除く)により変化する。一方、モータが動作するとその効率により電気エネルギーの一部が排熱となり、モータの表面温度は周囲環境に比べ高くなる。モータの表面に設置されたKELGEN SDは、モータが動作すると受熱面温度と放熱面との温度差によりKELGEN SDは発電し動作する。

屋外の負荷が一定な排気モータにKELGEN SDの発電部を設置し、昼夜、天候の変化に対する発電性能を評価した(図5)。晴天の6月19日において、モータの表面温度は昼と夜で15℃変化したが、発電部の設置側と放熱側との温度差は一定である。雨天の6月20日において、7時から12時にかけて発電部は降雨により一時的に10℃近く冷却されたが、モータからの一定な排熱を受熱する発電部の温度差はほぼ一定している。また、8月と12月とでの気温の変化に対する発電部の設置側と放熱側との温度差を評価し結果、気温の差は30℃以上となったが、発電部の温度差は一定であることを確認した。

KELGEN SDの発電部は、昼夜、天候、季節の変化に対し、安定した温度差を保つことができ、安定した電力を発電する。

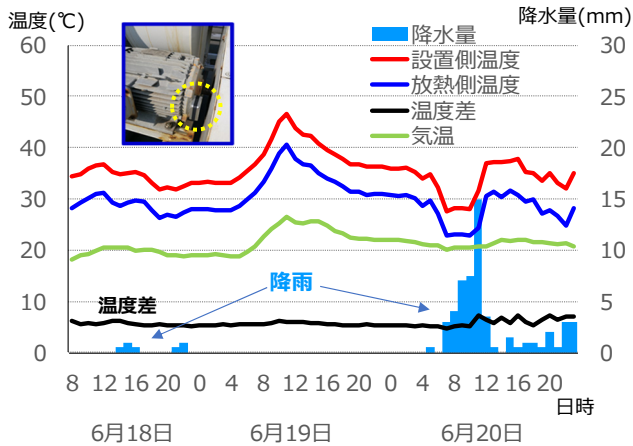


図5 屋外の排気モータに取付けたKELGEN SD発電部の受熱面と放熱面との温度差

5. 設備機器の故障と予知保全

米国エネルギー省の報告書^[2]によると、故障の予兆を検知し、適切なタイミングで故障前に保全を行う予知保全は、予防保全に比べて保全費用を10%削減でき、さらにダウンタイムを削減できるなど効果がある。一方、故障予兆検知システムの導入には設備投資と保全員の教育への投資が必要となる。

設備機器の故障の半数は回転機器（転がり軸受、油圧ポンプ、歯車部、すべり軸受部）で発生している。^[3]

回転機器は、異常が発生すると初期の段階で振動の異常が発生し、その後、異音、温度の異常が発生し故障に至る（図6）。

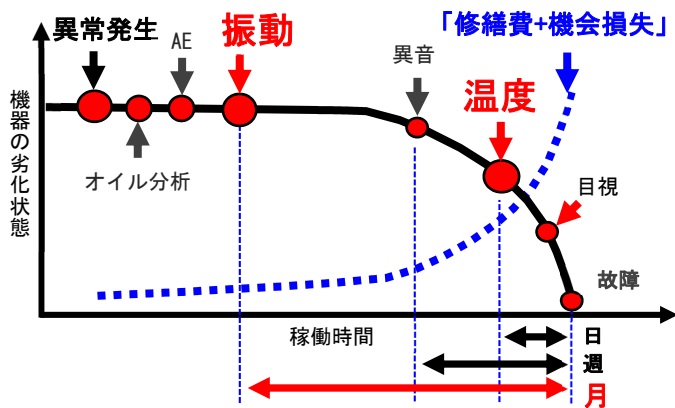


図6 故障による予兆と損失のイメージ^[4]

振動の異常は温度の異常に比べてその発生時期から故障に至るまで期間が長い。このため、適切なタイミングで故障前に保全部品を調達し計画的な保全を実施することができ、ダウンタイムによる機会損失の防止と保全費用を削減できる。回転機器の故障予兆検知のため、振動によるモニタリングが求められているが、有線式振動センサでは設置コスト、電池式振動センサでは電池交換による運用コスト

が課題となり、振動センサによるモニタリングの導入は進んでいない。

6. 熱電EH振動センサデバイス KSGD-SV

KELKは、熱電変換効率の向上と、低消費電力化により、熱電EHによる自己発電で動作する実用レベルの故障予兆検知用振動センサ『熱電EH振動センサデバイスKSGD-SV』を開発した。KSGD-SVは配線レスで設置でき、電池レスで継続的に動作するため振動センサデバイスの設置コストと運用コストを大幅に削減できる。

一般的な振動センサデバイスは測定した波形データを解析器に送信する。解析器は受信した波形データを解析し、解析器での結果をモニタリングする。KELKはこの構成の振動センサデバイスを試作開発し評価した。試作機は3軸の振動の波形を各255点測定し、波形データをBluetoothで解析器へ送信する。試作機による1回の振動測定には、温度差25°Cの設置環境で10時間の蓄電が必要であった。そこで、KELKは熱電EHによる振動センサデバイスを実用レベルにするため、熱電変換効率の向上と、低消費電力化の改良を実施した。

(1) KSGD-SVの基本構成

KSGD-SVは、熱電発電モジュールKELGENを搭載し、熱電EHにより温度差10°Cから動作する発電部と、振動センサを搭載したセンサ部とで構成する（図7）。測定結果は無線で送信する。



図7 熱電EH振動センサデバイスKSGD-SVの外観

(2) 熱電変換効率の向上

式1の熱電変換効率(η)を高めるには、熱電発電素子の性能指数Zまたは温度差 ΔT_j を大きくする。

KELGEN SDは性能指数Zが大きい熱電材料を使った熱電発電モジュールKELGENを使用している。 ΔT_j を大きくするため、受熱した熱をKELGENの受熱面へ効率よく伝え、放熱面から安定して外気に熱伝達する構造の発電部を開発した。

$$\eta = \frac{P_g}{Q_a} = \frac{\Delta T_j}{T_{hj}} \frac{m}{1+m} \frac{\Delta T_j}{1 + Z T_{hj} (1+m)}$$

熱電変換効率を高めるには

- 温度差 ΔT_j を大きく
- 性能指数 Z を大きく

η : 熱電変換効率
 Q_a : 熱入力
 T_{hj} : 熱電素子受熱側端の温度
 P_g : 熱電変換素子による発電電力
 ΔT_j : 熱電素子両端の温度差
 m : (外部負荷抵抗)/(素子の内部抵抗)

式1 熱電変換効率 (η)

(3) 低消費電力化

振動センサの機能を見直し、データの送信時間の短縮、センサデバイスの通信の待ち受け状態の保持を無くす等により、センサデバイスの消費電力を削減した。

振動センサからのデータ送信時間の短縮は、波形データをKELGEN SD内で演算し、結果のみを送信する方法へ変更することで短縮した。

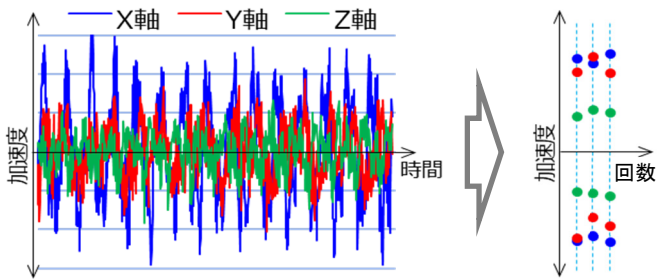


図8 波形データから演算結果の送信への変更

IoT端末は、通信方式にBluetooth, ISA100, WirelessHARTなどの双方向通信を採用しており、IoT端末は受信を待ち受ける状態を保持することが必要となる。エネルギーハーベストによるわずかな電力では待ち受け状態を保持することができないため、KELKは待ち受け状態の保持が不要な、KELGEN SD用の通信網KELGEN SD-Netを開発した。

これらの熱電変換効率の向上と低消費電力化の改良により、試作機に比べ測定点数は4倍、蓄電時間は温度差10℃においても1/20の30分となる実用レベルの熱電EH振動センサデバイスKSGD-SV2を開発した。

表1 試作機とKSGD-SV2の測定仕様

名称	周波数レンジ (±3db)	測定点数	サンプリング周波数	データ送信			軸	温度差と測定間隔	
				項目	点数	通信規格		10℃	25℃
試作機	—	255	1.0kHz	加速度波形	255×3	Bluetooth	XYZ	—	10時間
KSGD-SV2	2.6kHz	1,024	6.7kHz	速度RMS	1	IEEE 802.15.4	XYZ	30分	—
				加速度PEAK, RMS, CF, OA値	各3				
					各3				

表2 KSGD-SV2の基本仕様

項目		基本仕様
ヘッド部	振動加速度センサ	測定範囲 ±16G サンプリング周波数 6.7kHz
	温度センサ	測定範囲 -20℃～80℃ 測定誤差 ±5℃以内
電源部	上下面設置温度センサ	測定範囲 10℃～85℃ 測定誤差 ±5℃以内
	電源	給電方法 温度差による自己発電. 電池非搭載. 電源特性 最小温度差10℃ (無風状態) から動作
無線	通信方式	2.4GHz IEEE802.15.4準拠
	通信チャンネル	25ch (2.474 - 2.476GHz)
	暗号化	AES 128bit 暗号化準拠
保護特性		IP67

(4) 設置

KSGD-SVの発電部を設置する場所は、表面の温度が雰囲気に対して10℃以上高くなる場所を選定する。しかしながら、温度差を作れる場所の表面は必ずしも平らではない。そこで、KELKは凹凸のある表面においてもKELGEN SDの発電部へ効率よく熱を伝えるため、樹脂パテまたは金属パテを推奨している。回転機器などの表面とKSGD-SVの発電部との隙間をパテで埋めることで、回転機器等から効率よく受熱することができる。

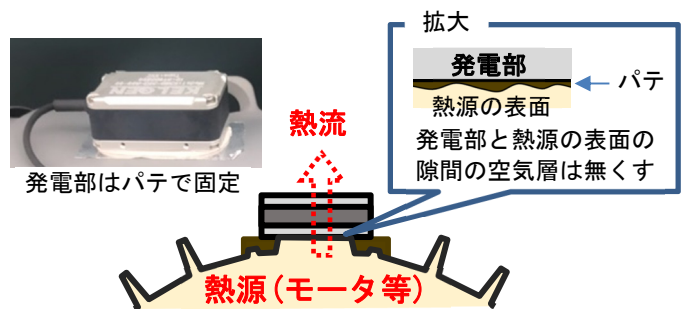


図9 発電部の取り付け方法

表3 接合剤の熱伝導率

項目	樹脂パテ	金属パテ	空気 (参考)
熱伝導 (W/mK)	小さい 0.2~1.5	大きい 1.0~10	非常に小さい 0.025
接着性	金属パテより小さい	高い	—
コスト	安い	高い	—

7. KSGD-SV2の性能と講評

KELKは、外周に打痕を付けたベアリングと、モータの軸に取付けることのできる重さ0.7gのイモネジを一本取付けたフライホイールを準備し (図10)、ベアリングキズ状態とアンバランス状態を変更して、それぞれの振動をKSGD-SV2により測定し、異常検知性能を評価した (表4)。

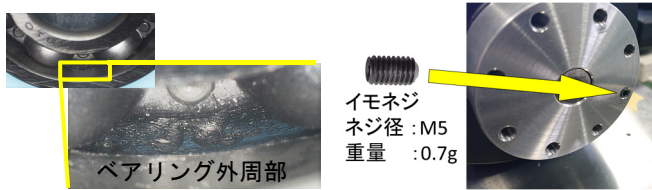


図10 振動評価用サンプル

表4 測定値

測定項目		キズなし		キズあり	
		バランス	アンバランス	バランス	アンバランス
振動 加速度 (相対値)	PEAK	1.0	1.0	2.3	2.3
	RMS	1.0	0.7	3.3	3.2
	OA	1.0	0.5	11.0	10.4
	CF	1.0	1.4	0.7	0.7
速度RMS[mm/s]		1.6	2.8	1.2	2.4
振動センサ部温度		36℃	36℃	38℃	38℃

ベアリングにキズがなく、バランス状態のモータの振動値を基準値とした。測定の結果、ベアリングにキズのあるモータでは、加速度PEAK、加速度RMSは2倍を超え、加速度OA値は10倍を超えた。また、アンバランス状態においては速度RMS値が増大した。以上の測定結果から、KSGD-SV2はモータの故障予兆検知用振動センサとして有効であることがわかる。

2020年2月に発売したKSGD-SV2は、公益社団法人日本プラントメンテナンス協会より「2020年 TPM優秀商品賞 開発賞」を受賞し、モノづくり日本会議と日刊工業新聞社から「2020年“超”モノづくり部品大賞 『電気・電子部品賞』」を受賞した。

8. KSGD-SV4

KELKは、発電変換効率の向上と低消費電力化の改良をさらに進め、2021年1月にKSGD-SV2に比べ周波数レンジとサンプリング点数が大幅に増加し、測定性能が向上したKSGD-SV4を開発した。

表5 KSGD-SV2とKSGD-SV4の測定仕様の比較

名称	周波数レンジ (±3db)	測定点数	サンプリング周波数	データ送信			温度差と測定間隔		
				項目	点数	通信規格	軸	10℃	15℃
KSGD-SV2	2.6kHz	1,024	6.7kHz	速度RMS	1	IEEE 802.15.4	X Y Z	30分	12分
				加速度PEAK, RMS, CF, OA値	各3				
					各3				
					各3				
KSGD-SV4	7.5kHz	7,168	26.7kHz	速度RMS	1	IEEE 802.15.4	Z	40分	16分
				加速度PEAK, RMS, CF, OA値	1				
				エンベロープFFT	1				
					5				

KSGD-SV4は、周波数レンジ7.5kHz (±3db)、測定点数7,168点の振動測定性能を持ち、ベアリングの初期の異常をセンシングすることができる。さらに、KSGD-SV4は、熱電EH振動センサデバイスでは初の、有線式や携帯型の振動診断計に備わるエンベロープFFT解析機能を備える (図11)。回転機器の異常時に発生する規則的な衝撃波の周期を解析するエンベロープFFT解析機能は、回転機器の故障箇所の特定を支援する。携帯型の振動センサレベルに性能が向上したKSGD-SV4は、保全員による巡回点検の廃止を支援する。

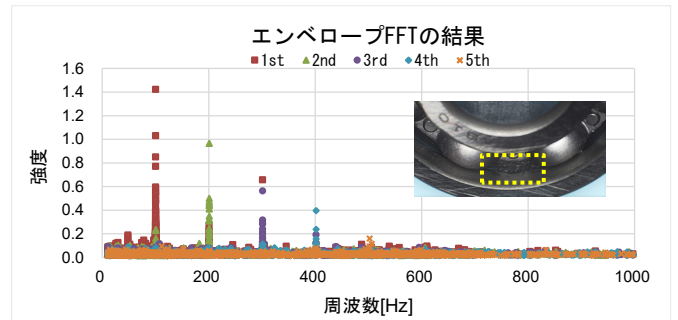


図11 ベアリング外輪キズのエンベロープFFT結果

9. KELGEN SD-Net (KSGD-SVの通信網)

KELGEN SDの通信網KELGEN SD-Netには、200台程度接続できる標準ネットワークと、30台程度接続できる小規模ネットワークの2種類ある。標準ネットワークは通信経路を最大3経路設定することができ、冗長性と堅牢性を向上させている。親機はKELGEN SDのデータを集約しEthernet経由でデータを送信する。親機からの出力データはデータ管理用PCでの受信、または出力データのカスタマイズによりシーケンサなどで受信することができる。小規模ネットワークは中継器により最大5段のホッピングで親機にKELGEN SDの測定データを送信する。親機は受信したデータをシリアル通信で出力する。

電波の状態はセンサデバイスの設置場所と周囲の環境により変わるため、通信網の中継器は周囲環境に応じて配置する。KELKは、通信網KELGEN SD-Netを短時間での構築できるよう、各機器の電波強度を見える化するソフトを準備した(図12)。電波強度見える化ソフトによりKELGEN SDと中継器の各機器の電波強度状態を確認しながら中継器の設置場所を決めることができ、通信網KELGEN SD-Netを短時間で設置することができる。

送信\受信	#C20154BB 親機	#A2014815 中継#1	#A201484B 中継#2	#A20149DE 中継#3
#C20154BB 親機	\	107	99	97
#A2014815 中継#1	111	\	120	107
#A201484B 中継#2	98	117	\	140
#A20149DE 中継#3	94	101	137	\

図12 電波強度見える化ソフトでの電波強度測定例

KELGEN SDシリーズの通信網はセキュリティの向上のため、AES128準拠の暗号化を採用している。

10. KELGEN SDM (KSGD-SVのデータ管理)

KELGEN SDの発電量は、環境から受熱する熱エネルギー量により変わる。KELGEN SDの測定間隔は、1回の測定に要する蓄電時間が環境の変化により変動するため一定していない。また、IoTデバイスで測定した数週間、数ヶ月単位で蓄積されデータの数は非常に多い。この不定期で膨大なビッグデータを解析する作業は難易度が高くIoTデバイスによる故障予兆検知の導入を妨げている。

KELKは、KELGEN SDのビッグデータを表計算ソフトやBIツールで加工しやすい形式で一次加工して保存する機能を備えたIoTセンサデバイス実証評価用ソフトウェアKELGEN SDMを開発した。KELGEN SDMは、KELGEN SDの生データの他、生データを1分平均にクレンジングしたデータを自動保存する。また、KELGEN SDMには、デバイスの情報管理と簡単な見える化機能を備え、予め設定した判定閾値を超える異常が発生すると、登録した複数の担当者にメール配信する(図13)。

KELGEN SDMは、熱電EHセンサデバイスKELGEN SDにより測定した不定期で膨大なビッグデータの見える化を支援し、予知保全の導入を促進する。



図13 KELGEN SDMの見える化ソフト部の表示画面

11. KELGEN SDシステム

熱電EHによる自己発電で動作するKELGEN SDと、その測定データを活用するシステムは、IoTセンサデバイスによる設備故障予兆検知システムの設置コストと運用コストを大幅に削減する。

KELGEN SDには、KSGD-SVの他、熱処理炉や焼結炉などの温度を測定する熱電EH熱電対センサデバイスKSGD-ST、既存の流量計や圧力計などの外部出力端子から出力される電流値や電圧値を送信する熱電EHアナログ入力デバイスKSGD-SAがあり、いずれも、温度差10℃から動作し、測定データを無線で送信する。

KELGEN SDから無線で送信される測定データは、通信網KELGEN SD-Netによりデータを収集する。KELGEN SDMは、KELGEN SDのデータを保存し、ビッグデータに見える化する簡易な機能を備える。KELGEN SDシリーズは、IoTセンサデバイスを活用したCBMの導入を支援する。

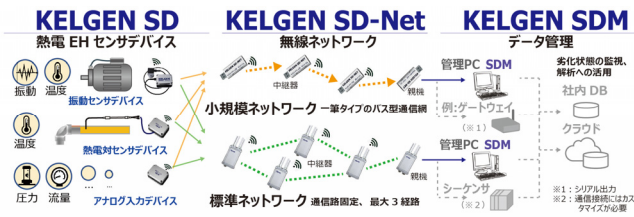


図14 KELGEN SDシステムの概要

KELGEN SDシステムは、コマツの各工場の他、鉄鋼会社、自動車会社、鉄道会社などの生産設備において故障予兆検知システムとして実証評価が始まっている。

12. おわりに

KELKは熱電EHにより動作する振動センサ『熱電EH振動センサデバイスKSGD-SV』の性能を実用レベルにまで向上させた。IoTデバイスによる故障予兆検知用センサデバイスの設置コストと運用コストを大幅に削減するKELGEN SDシステムが、製造業のCBMの導入を促進し、日本の生産性の向上に貢献することを期待する。

また、熱電エネルギーハーベストを電源とするデバイスが、熱電発電の性能の向上、半導体の低消費電力化、蓄電器の自己放電の改善などの技術の進歩により、より複雑な制御が可能となり、より幅広い分野で活用されることを期待する。

参考文献

- [1] 一般社団法人日本電機工業会 トップランナーモータ、モータ効率値比較（2015年11月）にもとづき作成
- [2] 米国エネルギー省、Operations & Maintenance Best Practices, 2011年8月
- [3] D&E 研究会, “機械の診断・評価技術に関する調査報告書”, 1996年
- [4] John Moubray, Reliability-centered maintenance, 1997にもとづき作成

筆者紹介



Takahiro Murase

村瀬 隆浩 2002年, KELK 入社.
熱電発電事業部所属



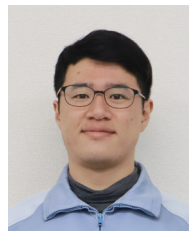
Daisuke Goto

後藤 大輔 1993年, KELK 入社.
熱電発電事業部所属



Isao Shibata

柴田 勲 2017年, KELK 入社.
熱電発電事業部所属



Tomonori Murata

村田 知紀 2011年, KELK 入社.
熱電発電事業部所属

【筆者からひと言】

熱電エネルギーハーベストで動作する実用レベルの振動センサを開発できた。ユーザが設備機器をモニタリングするIoTデバイスを使いこなせるよう、KELGEN SDシリーズの改良を進め、日本の製造業のデジタル変革（DX）の実現に貢献していきたい。