

第二部 令和3年度(2021年度)

10. 事業の目標

10.1 本事業の最終目標

IoT 無線振動・温度センサ及び状態監視診断システムとしてのコントローラの商用試作品を開発する。

(1) IoT 無線振動・温度センサの開発

- 1) センサ1個で55点のアナログ出力(1方向18点×3軸+温度)
- 2) 省電力無線と節電回路を改良し、電池駆動期間1年以上とする。
- 3) 無線電送距離は30m以上とする。

(2) 状態監視診断システムの開発

- 1) システムへのセンサ同時接続数は20センサ以上とする。
- 2) システムは20センサ×55点=1100点以上の同時処理能力を維持する。

11. 事業内容

11.1 2021年度(令和3年度)の実施内容

(1) IoT 無線振動・温度センサ及び機器状態監視診断システムの調査

初年度の成果と新たに生まれた課題を整理し、性能や機能について再検討する。

(2) IoT 無線振動・温度センサ及び状態監視診断システムの商用設計/試作

1) IoT 無線振動・温度センサの設計

初年度に開発した技術検証用の試作品を元に、調査で導き出した商品仕様を実現するための商用試作品の設計を行う。

- ・センサ1個で55点のアナログ出力(1方向18点×3軸+温度)
- ・電池で一年以上の運用が可能
- ・無線電送距離30m以上を実現できるセンサの設計を行う

2) IoT 無線振動・温度センサの試作

商用試作品の設計に基づき、製品の試作を行う。センサは耐久試験等の試験に用いるだけでなく、実船調査にも利用するため40個を試作する。

3) 機器状態監視診断システム/コントローラの設計

初年度に開発した技術検証用の試作品を元に、調査で導き出した商品仕様を实

現するための商用試作品の設計を行う。また、異常診断技術を導入することで、多数のセンサを同時接続して得られる多数の計測データから自動的に状態変化を判断し、精度のよい予兆監視を実現するとともに、判りやすい異常診断の表示画面を設計する。なお、令和3年度は同時接続数を20センサ以上とし、システムはDC24Vで駆動するよう設計する。

4) 機器状態監視診断システム/コントローラの試作

商用試作品の設計に基づき、製品の試作を行う。コントローラは耐久試験等の試験に用いるだけでなく、実船調査にも利用するため3個を試作する。

(3) 実船調査

試作したIoT無線振動・温度センサと機器状態監視診断システム/コントローラを就航船に搭載し、実運用を行い評価（実際の運用環境下での電波状況の確認やセンサとコントローラ間のデータ取得、センサの耐久性や設置運用面での評価）する。

(4) 船級試験対応

製品の船級試験に必要な予備試験（環境試験、振動試験、EMC試験）を行う。

(5) 報告書作成

令和3年度の事業内容を取り纏め、報告書を作成する。

12. IoT 無線振動・温度センサ及び機器状態監視診断システムの調査

12.1 設計要件の調査と再定義

令和2年度に行った開発では、提示したすべての目標を達成することができた。その達成にあたり、小型軽量のIoT無線振動・温度センサの開発を完了できたが、そのセンサの稼働時間に関する課題が見えた。

一般に電池で駆動する機器は、電池容量が大きければ大きいほど機器の稼働時間を延ばすことができる。当該センサも同様であり、電池容量とセンサの計測寿命はトレードオフであるが、令和2年度の開発内容として小型化を優先した結果、電池も小型を採用せざるを得ず、連続で長時間運用が難しいという新しい課題が見えた。

具体的には、30分間隔の計測で2.3年という推定連続稼働時間となる。計測間隔を1時間、2時間と延ばすことで連続駆動時間を延ばすことは可能であるが、機器監視の観点からはなるべく短周期でのデータ収集が望まれるため、30分間隔で使用した場合の連続駆動時間を延長する必要があると判断した。

今回、当該開発品を製品化した際に、顧客のもとで3年程度は稼働すること、いわゆるドック間隔での交換対応が可能であることを最低限必要とし、将来の商用製品を見越した仕様要件に見直すこととした。

新しい要件を実現するためには、大きく電力消費を下げる必要があり、かつ可能な限り電池容量を増加させる両面での対応が必要となる。

前者の対応には、現状の回路構成のままでは低電力化はこれ以上できないため、新しい振動センサ／処理回路を再設計し、抜本的に電力消費を大きく下げることが必要となる。また、電池容量を小型化の思想からずれない程度に大型化し、容量を増加する。この両者を改善することによりバランスのよい製品とする必要がある。

つまり、今期の目標である

- ・センサ1個で55点のアナログ出力（1方向18点×3軸+温度）
- ・電池で一年以上の運用が可能
- ・無線電送距離30m以上を実現できるセンサの設計を行う

を実現しながら、電池寿命を3年以上に延長するという新たな要件を加え、小消費電力を最優先にしたMEMS振動センサ、CPU、駆動回路、BLE通信、ソフトウェア等の再選定を行い、基板の再設計の開発を行った。

13. IoT 無線振動・温度センサ及び状態監視診断システムの商用設計／試作

13.1 開発する試作品について

令和 3 年度に開発する製品は、令和 2 年度で開発した試作品をベースに改良するものであり、基本的な計測システムの構成と考え方は同じである。

変更部分は、各機器（子機、親機、Wi-Fi 受信機、コントローラ）であり、従来親機とコントローラは有線 Ethernet 接続であったが、無線 Wi-Fi での子機からコントローラまでを無線化したことである。

図 63 に、全体システム概要を記す。

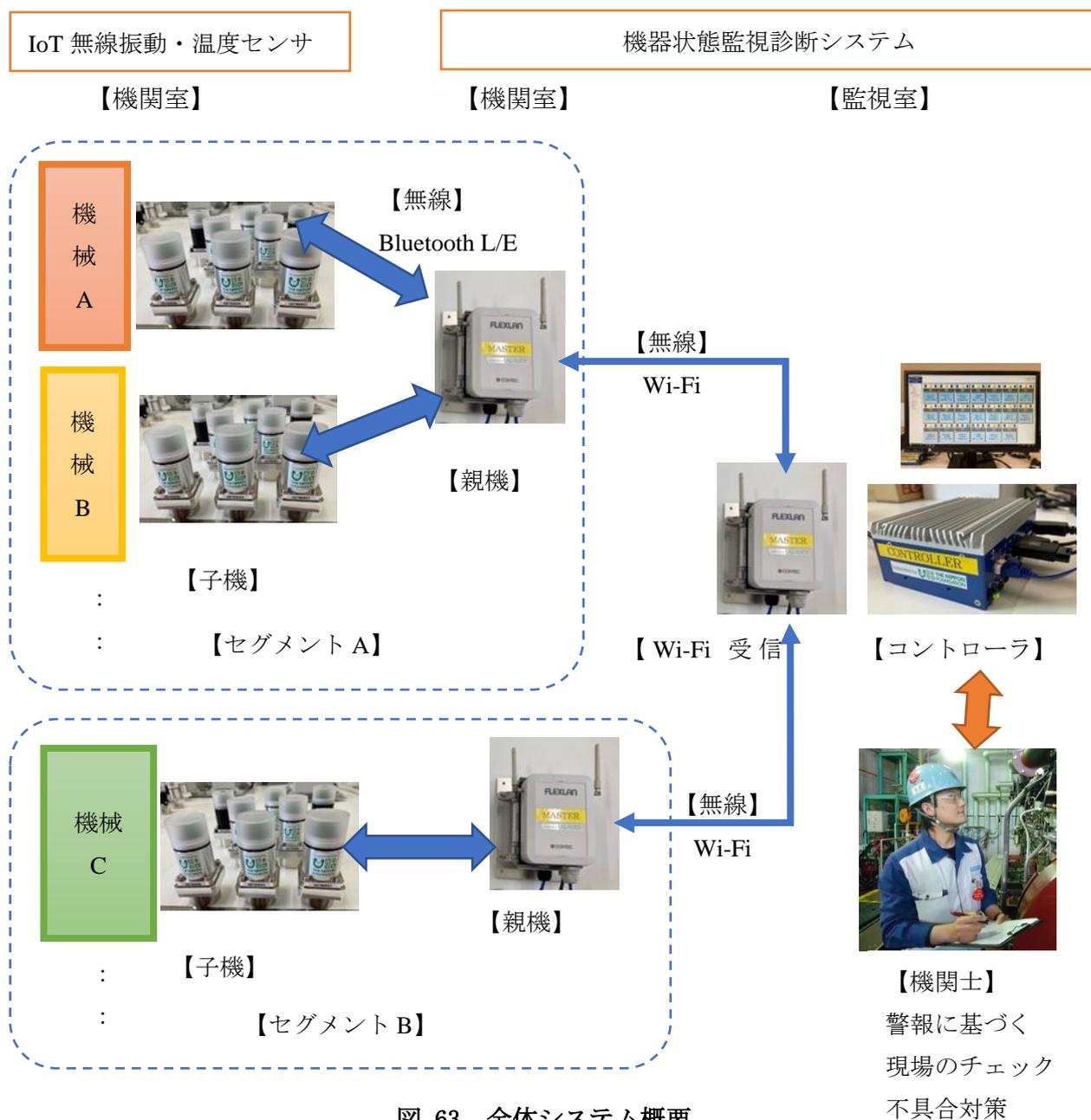


図 63 全体システム概要

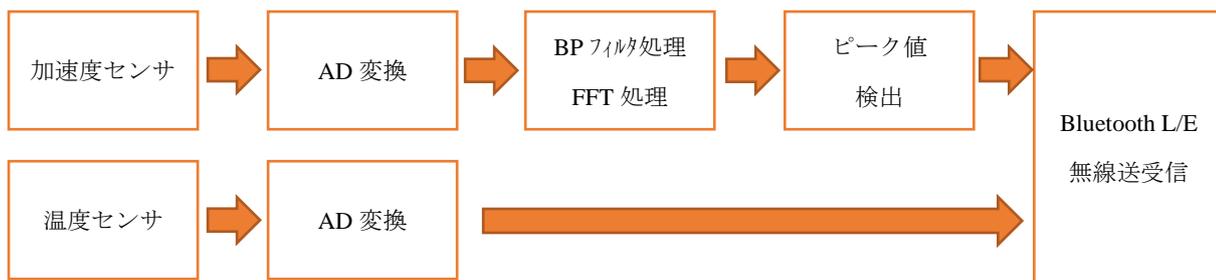
13.2 IoT 無線振動・温度センサの設計／試作

令和3年度に開発するIoT無線振動・温度センサは、基本思想や構成は、令和2年度の開発内容を踏襲し、新しい課題として低電力消費を最優先した部品選定と回路の再設計を行った。

特に、センシングの要となる素子は、従来と同等の計測性能を持ち、かつ更なる低消費電力が実現できる新たなMEMS振動センサ素子を選択した。

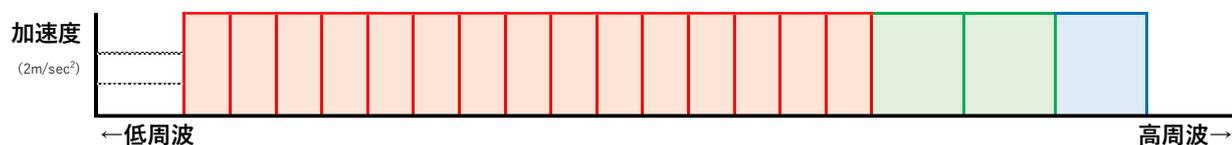
超低消費電力を実現するために、計測時の低消費電力であることは勿論のこと、ほとんどの時間を占める計測休止期間、つまりスリープ時に消費電力が発生しないことが重要となる。今回選択したMEMS振動センサ素子や演算素子は、スリープ時に電流が数 μ Aしか流れないものを選択した。

子機では、MEMS振動センサ素子から得られた加速度を、マイクロコントローラでFFT処理を行う方式を選択した。図64に示すように、センサ内部の基本処理フローは令和2年度試作品と同じだが、その演算処理は電力消費面から最適化を行っている。



(再掲) 図 64 IoT 無線振動・温度センサ内部の処理フロー

計測したデータは、FFT処理をした後、図65に示す周波数分割のイメージと同様に、振動データを1軸18点の周波数帯のピークを示すアナログ信号に変換して保管する。



(再掲) 図 65 周波数分割のイメージ

つまり、3軸×18点に一点の温度データを加えた、計55点の信号を計測ごとに生成し、親機に転送する。この仕様は、センサの低消費電力化に大きく寄与するため、令和2年度開発品と同じ設計思想を踏襲した仕様とした。

次に、令和3年度に開発したセンサの内部構造概要を図66、外観写真を図67に示す。

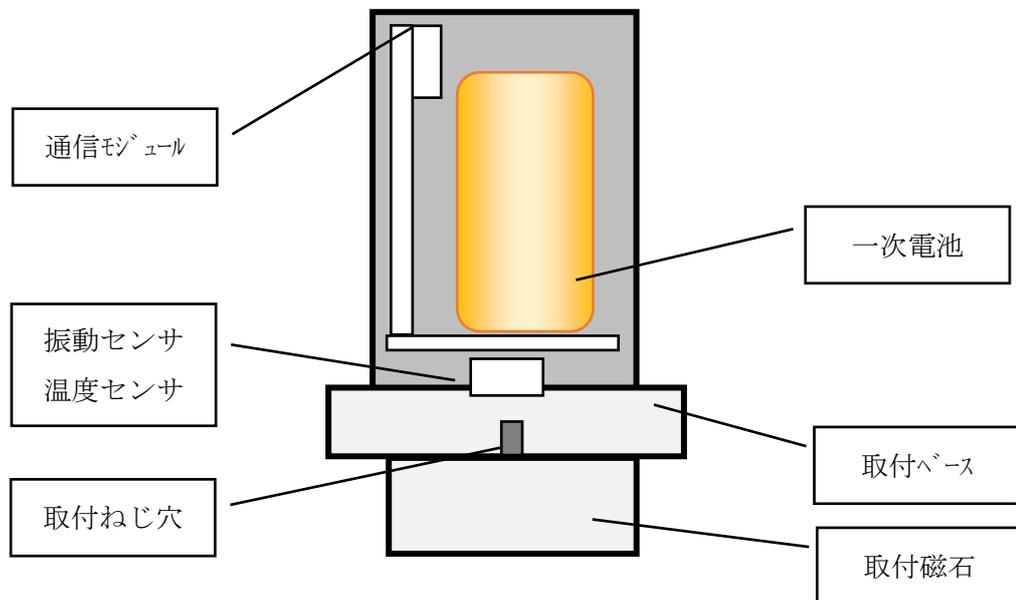


図 66 IoT 無線振動・温度センサの内部構造概要図

・取付ベース

金属製の取り付けベースであり、取り付けねじ穴が用意されている。今回、実機への設置試験を考慮し、取付磁石を取り付けている。

・振動センサ、温度センサ

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) の3軸加速度振動センサを、新しい要件に合わせて再選定した。センサは取り付けベースに極力近づけて正しく計測できるように配慮した。今回、温度センサはMEMSセンサに内蔵される温度センサを使用した。

・通信モジュール

今回も、2.4GHz帯の近距離無線プロトコルである、Bluetooth Low Energy5.0 (BLE) を通信プロトコルとして採用した。

・一次電池

電池は、令和2年度開発品より大型化し、リチウムボタン電池から、大容量の円筒形の塩化チオニルリチウム一次電池に変更した。今回の開発による連続稼働時間を確認することで、より最適なサイズの電池を選定し、筐体デザインを再検討する予定である。



図 67 IoT 無線振動・温度センサの外観

13.3 機器状態監視診断システム／コントローラ的设计／試作

・親機、リピーターについて



図 68 親機、リピーターの全体像

図 68 (左図) の親機は、IoT 無線振動・温度センサ (子機) とは BLE (Bluetooth Low Energy) 無線で接続し、子機からの定期的なデータ転送を受けてデータを収集する機能、定期的に子機に指示を与える機能を持つ。

また、Wi-Fi 無線により上位のコントローラと接続し、子機のデータを転送する機能を持つ。親機は Ethernet によるコントローラとの直接接続も可能である。

図 68 (右図) のリピーターは、親機とコントローラの間が離れており Wi-Fi 通信の電波が届きにくい時に、親機とコントローラの間に設置することで無線を中継する中継器である。今回の実船試験用に用意したが、十分な電波強度が得られ、問題なく通信できることが把握できたため使用しなかった。

Wi-Fi 通信部分は市販の通信機器を採用し、子機と接続する Bluetooth 送受信部分の子機通信部分と合わせて開発を行い、相互に連結して親機を構成している。

当該親機は防水構造とし、機関室の壁面等に設置されることを想定している。

・コントローラについて

図 69 (左図) のコントローラは、機関室の監視対象機器数を考えると、接続できるセンサ数をなるべく多く考えておく必要があること、多数のセンサのデータ処理に加え、異常診断技術を採用する予定であること、ユーザビリティを考えた様々な表示を行うための表示能力を必要とすることなどから、性能と拡張性を考えて、Windows ベースの工業用小型 PC を採用した。

なお、工業用 PC は、小型高速タイプと船級対応タイプを購入した。船用には船級対応タイプを採用することを検討している。

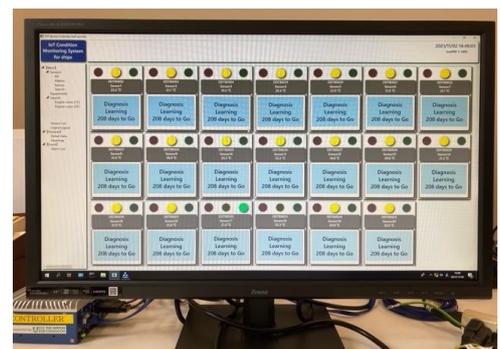


図 69 コントローラ (小型高速タイプ) と画面表示 (受信ステータス表示)

図 69 (右図) は、液晶画面 (受信ステータス表示) を示している。タイルのように各センサのステータスを並べており、通信状況を信号機のように一覧表示している。警報時には赤色、通信不能なら黄色、正常通信時は緑色の表示となる。なお、画面に関しては、ユーザの使い勝手等からさらなる追加・改善を図る予定である。

14 試作品の評価と考察

14.1 IoT 無線振動・温度センサ単体試験

振動計測データは、令和2年度開発センサと同じ周波数帯に分割し、それぞれのピーク値を計測するよう設計した。令和3年度開発センサも各周波数帯で正しく計測できるか評価するため、正弦波を使った検証試験を行った。図70から図72に、異なる周波数を3つ抜粋して示す。

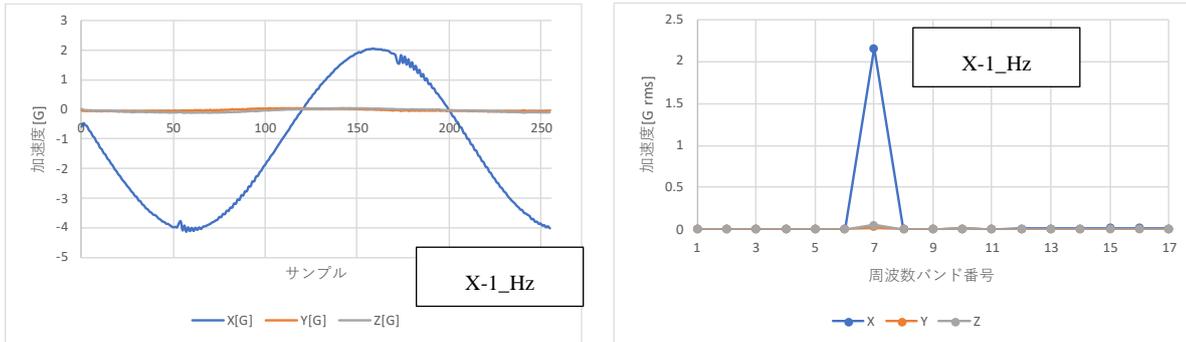


図70 X-1_Hz 時の加振データ (左) と IoT 無線振動センサの計測値 (右)

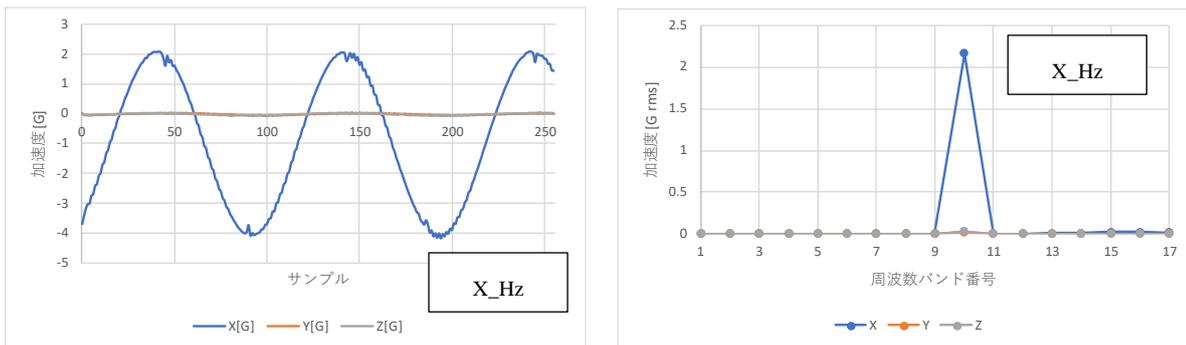


図71 X_Hz 時の加振データ (左) と IoT 無線振動センサの計測値 (右)

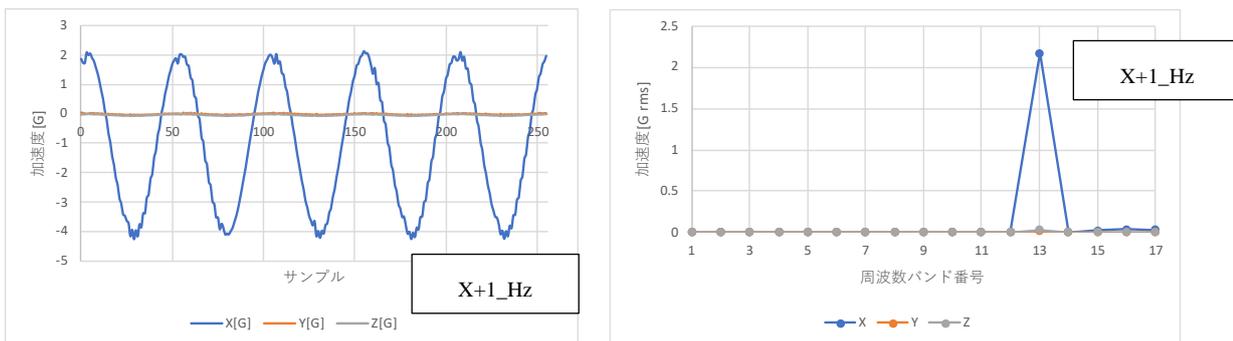


図72 X+1_Hz 時の加振データ (左) と IoT 無線振動センサの計測値 (右)

IoT 無線振動・温度センサの X 軸に、正弦波 (X_Hz、2G) を与え、ターゲットとする周波数分割した帯域のピーク値、X_Hz に、同じ加速度 (2G) が計測値として表示されることを確認した。となりの周波数である、X-1_Hz や、X+1_Hz の計測値に加速度が表れていないか、別の軸である Y 軸、Z 軸の計測値に顕著な影響がないかも同時に検証した。

その結果、令和2年度と同様に正しく計測ができていることが確認できた。

14.2 温度センサ評価試験

子機に搭載される MEMS 振動センサには、温度センサが内蔵されており、センサ設置面（底面）の温度を計測している。温度を計測することで、装置の稼働を温度から把握して、振動の評価に組み合わせるといった使い方や、温度を直接異常検知に使用するといった可能性が生まれる。

以下に、温度センサ特性の評価試験を行った。

温度特性試験は、1つは与えた温度が正しく計測できるかの精度の試験、もう1つは、与えた温度まで到達するまでどのくらいの時間が掛かるかの過渡応答の試験である。

当該試験は、ホットプレートを用意し、アルミ板を置いて 80 度に温めた定盤を作り、その上に子機を載せて温度計測を行った。

定盤であるアルミ板には、子機のすぐ近くに熱電対を設置し、同じタイミングで温度計測を行った。

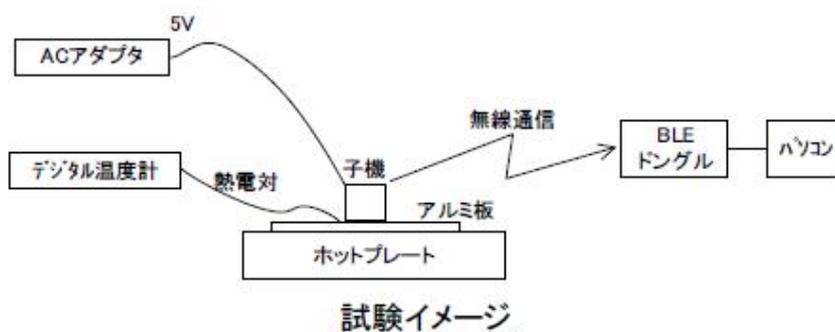


図 73 温度センサ応答評価試験

なお、令和 2 年度の開発品は 70℃設定にて検証したが、温度調整の困難さから実質 80℃での評価となった。令和 3 年度の試験では、最初から 80℃設定で試験をおこなった。令和 3 年度のセンサは仕様上 85℃まで対応しており、耐久性としては問題ない。

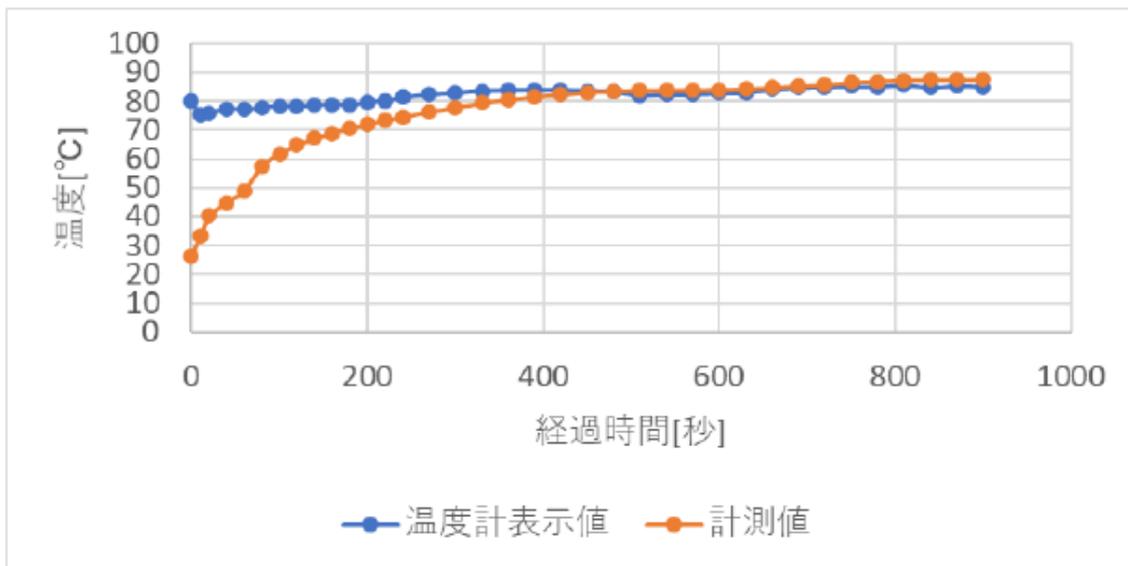


図 74 温度センサ応答特性（固定台座なし）

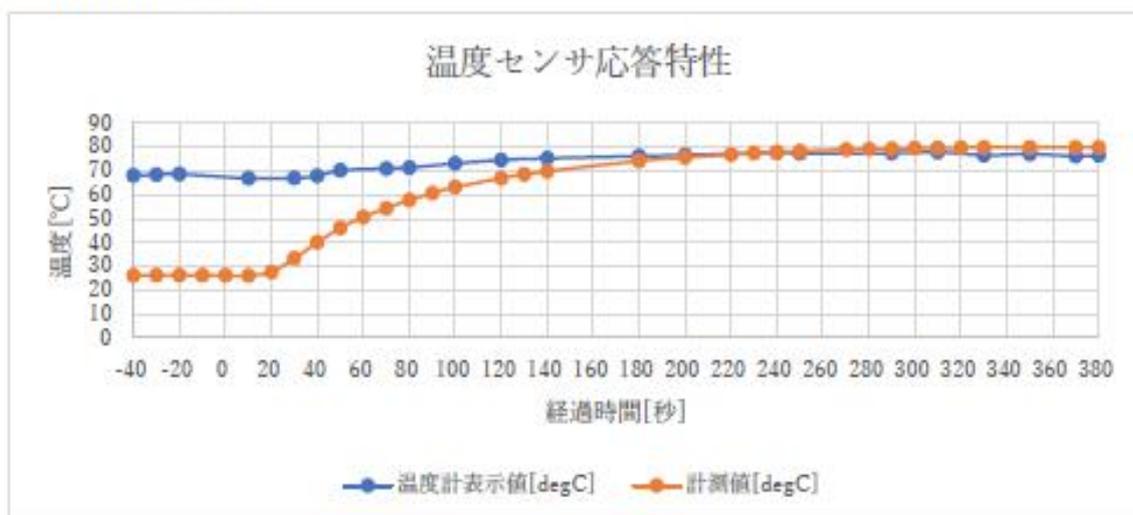


図 75 （参考）令和 2 年度開発したセンサの温度センサ応答特性

図 73 に示す試験装置にてアルミ板を 80°C に熱し、図 74 の応答特性の経過時間が 0 秒のポイントで子機をアルミ板上に置き、計測を開始している。設置後すぐに温度上昇が始まり、200 秒で 80°C の 10°C 以内に収束した。参考として示す図 75 の令和 2 年度開発のセンサによる応答特性では、100 秒時点で 65°C（アルミ板 70°C に対して）と今回より早い応答の結果を示している。ベース構造が従来と異なることや、各種部材の熱容量、温度センサ設置場所の違いから、応答特性にずれが生じたと考えられる。

ただし、実運用時には、対象機械に常設され、中長期的な温度変化のトレンドを捉えることから、この特性でも問題ないと判断した。

14.3 子機の動的消費電流測定

図 76 に示す試験条件にて、子機へ安定化電源から 3.6V を供給し、子機の電源電流をデジタルマルチメータで測定した。

子機の各動作シーケンス毎に、低消費電力が実現できているか判断するために、起動、振動データの計測時、スリープ時の電流を調査した。

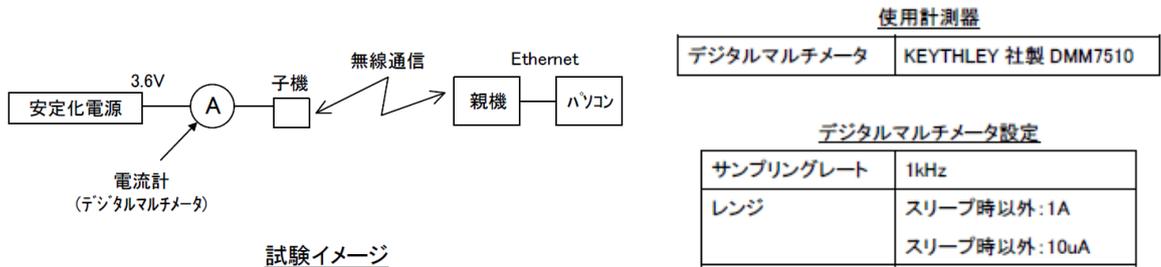


図 76 試験の条件について

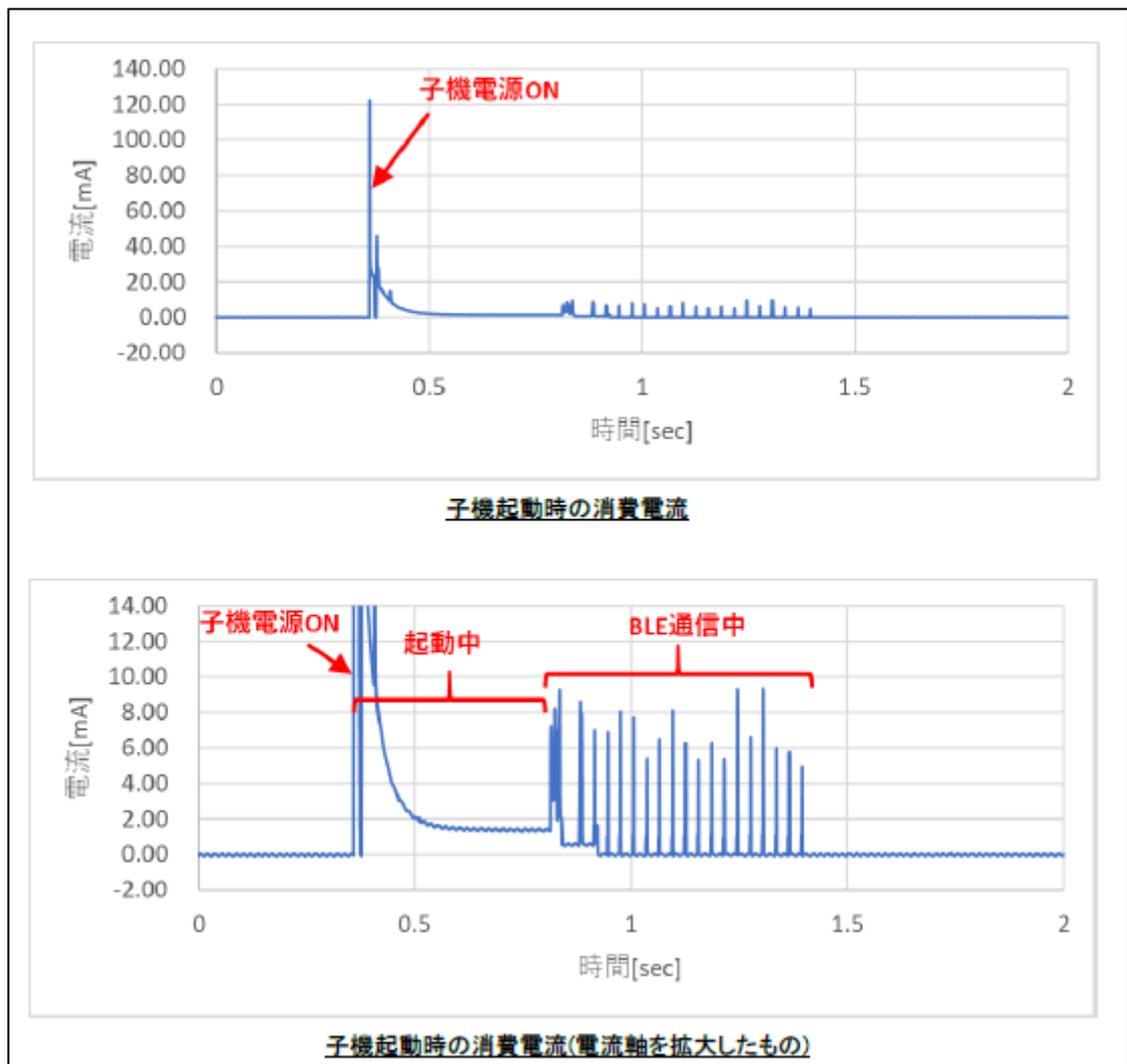


図 77 子機起動時の電流計測

図 77 に子機起動時の電流計測の結果を示す。

子機は電源を ON にすると、まず親機と通信を行い、すぐにスリープ状態に入るシーケンスである。

図 77 は、子機が起動してから安定するまでの電流波形である。

起動時には、突入電流として 100mA を超える電流が一瞬流れるが、これは回路上のコンデンサに充電を行うためであり、ごく瞬間的なものである。

子機起動には 0.5 秒ほどかかり、その後、BLE 通信を行い、約 1 秒でスリープ状態になる。

前試作品では、起動に 7 秒ほどかかり、BLE 通信時間も約 2 秒、BLE 通信時の電流もピーク 20mA 程度であり、瞬時突入電流を除けば消費電力を大きく削減できた。

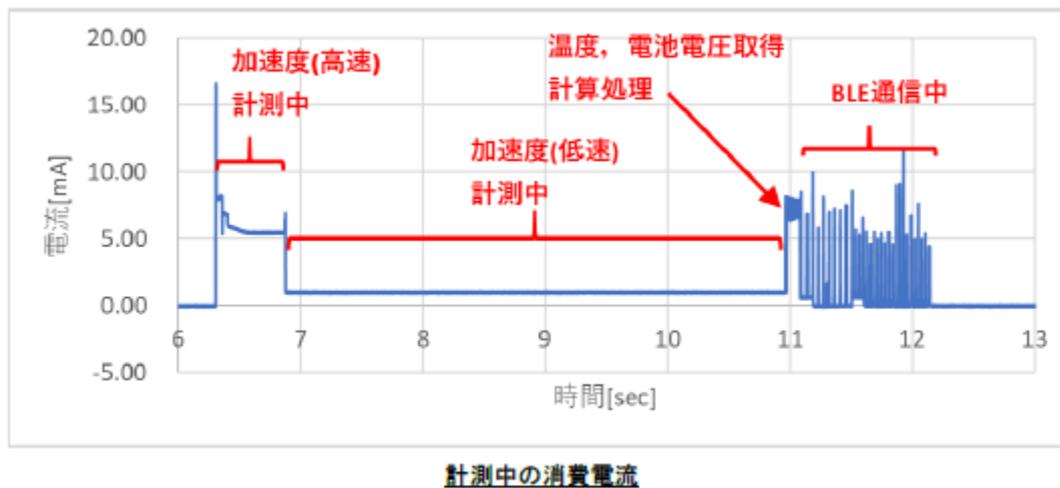
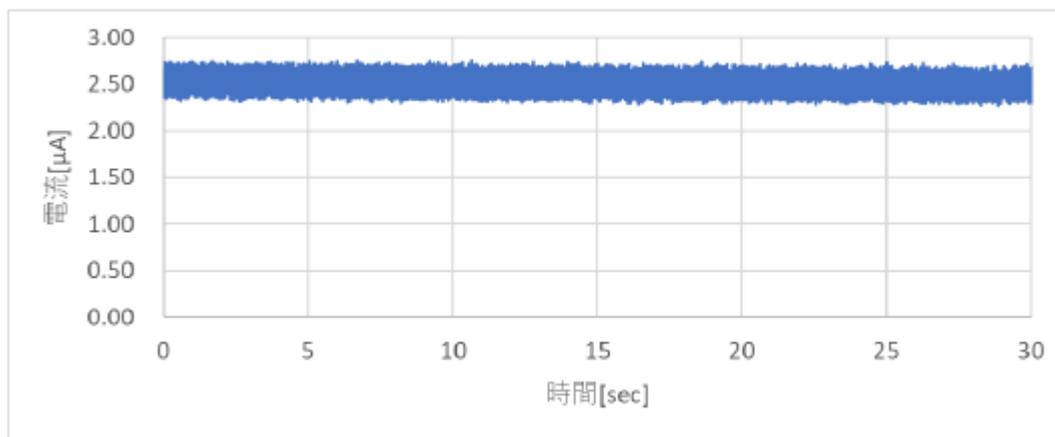


図 78 子機計測中の電流計測

図 78 に、子機計測中の電流計測の結果を示す。

子機の計測時のシーケンスは、スリープから起動して加速度計測を行い、計算処理にて生成したデータを BLE 通信にて親機に送り、再びスリープする。このサイクルは約 6 秒である。

令和 2 年度の試作品では、シーケンスの 1 サイクルは 5 秒間、BLE 通信時は 20mA であった。令和 3 年度の試作品では、シーケンスの 1 サイクルは 6 秒間。スリープからの復帰時に瞬時 17mA、計測時 5mA～1mA、BLE 通信時には 10mA 程度と十分に低い値となっている。



スリープ時の消費電流

図 79 子機のスリープ時の電流計測

図 79 に、子機のスリープ時の電流計測結果を示す。令和 3 年度試作品の子機スリープ時の平均消費電流は $2.51 \mu A$ であり、令和 2 年度の試作品の $3.16 \mu A$ より低消費となっており、さらなる低消費電力が実現できている。

結果をまとめると

起動シーケンスでは、

- ・ 起動時シーケンスは 2 秒と令和 2 年度試作品の 7 秒から大きく削減した。
- ・ 起動時のみコンデンサ充電のための突入電流が流れるが、瞬時であり影響は少ない。
- ・ BLE 通信は 0.5 秒間で 10mA 程度となり、通信時間と電流値がほぼ半分となった。

計測シーケンスでは

- ・ 計測シーケンスは 6 秒間と令和 2 年度試作品の 5 秒とほぼ同等である。
- ・ 計測時は $5mA/0.5$ 秒間、 $1mA/4$ 秒と十分に低い電流値である。
- ・ 計測期間の平均消費電流は 1.25mA であり、令和 2 年度試作品は 2.64mA より半減した。

スリープ時は

- ・ スリープ時の平均消費電流は $2.51 \mu A$ であり、令和 2 年度試作品の $3.16 \mu A$ から削減した。

結論として、令和 3 年度試作品の方が総じて電流値が低く、令和 2 年度試作品より電力消費が少なくなった。令和 3 年度開発では、低消費電力設計を追求した結果、大幅な低消費電力化を実現できたことが分かる。

14.4 子機の連続駆動時間の推定

子機の動的消費電流評価より、計測時の平均消費電流は 1.25mA（計測 7 秒間の平均値）及び、スリープ時の平均消費電流は 2.51 μ A と計測できた。

次に、この結果を元に連続駆動時間を推測する。

令和 3 年度の開発では、低消費電力設計を追求したセンサに、電池を大容量化することで、連続稼働時間を大きく延ばすことを計画した。

なお、電池の公称容量は 2.1Ah、安全率を 0.5 として計算した。

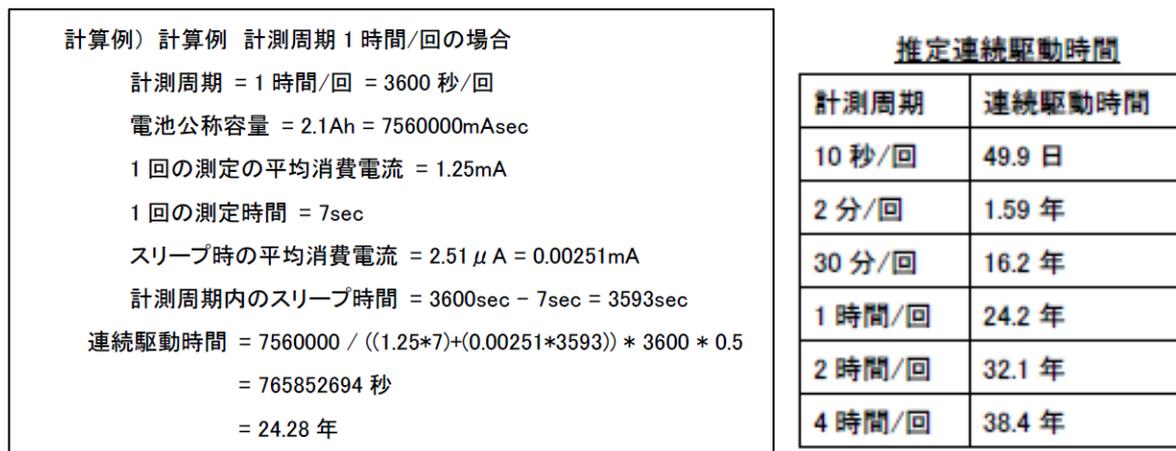


図 80 連続駆動時間の推定

図 80 の連続駆動時間の推定で示すように、計測周期が 30 分に於いて 16.2 年と計算でき、令和 2 年度開発品の 2.3 年の計算からは、約 7 倍に駆動時間を延ばせる見込みとなった。

なお、計測間隔と連続駆動時間はトレードオフの関係であり、省電力化で連続駆動時間が伸びると、計測間隔をさらに短くすることが可能となる。つまり、より細かく対象機器を監視できることにもつながる。

例えば、令和 3 年度の開発品であれば、30 分毎の計測時間では 16.2 年間連続使用できる計算であるが、より細かく 10 分毎の計測間隔に変更した場合にも、5.4 年間の連続使用ができることになる。より高頻度計測が望ましい計測対象にも適用対象が広がる可能性が生まれた。

14.5 子機の連続駆動時間の実測

子機の計測周期を 10 秒/回に設定して、計測周期 30 分/回より加速させた条件の下で、長期間の連続駆動試験を実施し、計算値と実測で比較して電池寿命を評価した。

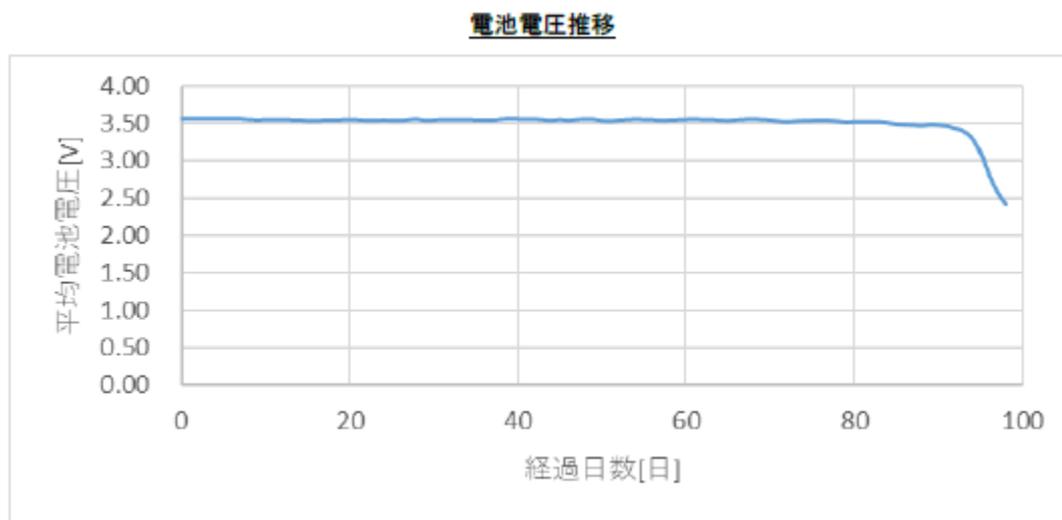


図 81 連続駆動時間計測時の電池電圧の推移

図 80 より、10 秒/回の計測周期の場合、推定連続駆動時間は、49.9 日であることがわかる。図 81 に、10 秒/回の計測周期で、実稼働状態での連続駆動時間の計測を行った結果を示す。

2021 年 10 月 8 日から計測を開始し、2022 年 1 月 13 日に子機の電池電源電圧が落ちて動作が停止した。

つまり、97 日間連続動作したことが確認できた。その間のデータ取得率は 99.0%である。

(計測サイクルが短すぎて、若干のデータの取りこぼしが発生した。)

以上より、推定連続駆動時間 49.9 日の計算 (安全率 0.5) に対して、97 日の実駆動時間となった。

加速試験ではあるが、推定値より 2 倍の実稼働時間が実現できた。安全率を考えると妥当な結果と判断した。

14.6 無線通信の受信成功率の計測

IoT 無線振動/温度センサ（子機）について、無線による通信評価を行った。

試験条件は、図 82、図 83 に示す。子機 20 台と親機を 15m 離れた場所に設置し、床からの高さは約 50cm とした。

計測タイミングは 10 台を 30 分/回、10 台を 5 分/回とし、連続駆動して計測を行った。試験時間は 24 時間である。

試験条件

実施期間	2021 年 9 月 13 日 20 時～2021 年 9 月 14 日 20 時
実施場所	福岡県福岡市博多区板付2丁目11-16 2階北西側廊下
使用送信機数	20 (S/N DDTB0001～DDTB0010, DDTB0036～DDTB0045)
使用受信機数	1 (S/N DDRB0001)
計測間隔	30分/回(S/N DDTB0001～DDTB0010), 5分/回(S/N DDTB0036～DDTB0045)
送信機－受信機間の距離	15m
送信機及び受信機の床からの設置高さ	50cm

図 82 複数台駆動試験による受信成功率の評価

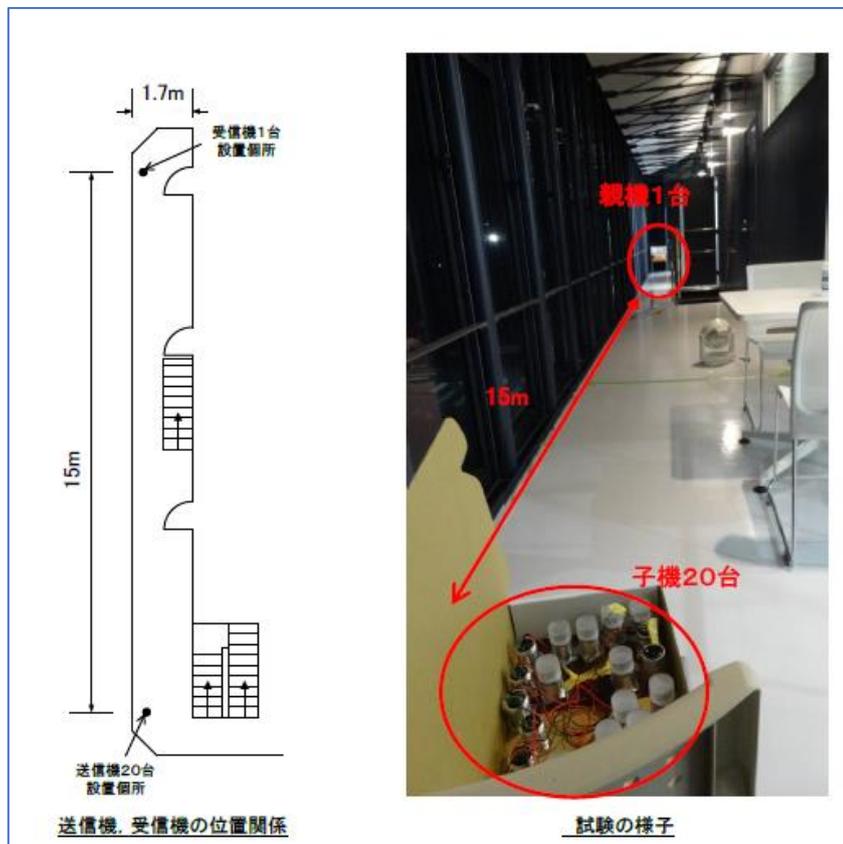


図 83 計測場所

試験結果

S/N	受信成功率[%]	RSSI[dBm]	S/N	受信成功率[%]	RSSI[dBm]
DDTB0001	100	-66.3	DDTB0036	100	-67.9
DDTB0002	100	-62.8	DDTB0037	100	-63.5
DDTB0003	100	-63.1	DDTB0038	100	-70.2
DDTB0004	100	-64.4	DDTB0039	100	-63.6
DDTB0005	100	-65.9	DDTB0040	100	-59.5
DDTB0006	100	-68	DDTB0041	100	-69.7
DDTB0007	100	-59.9	DDTB0042	100	-70.4
DDTB0008	100	-63.9	DDTB0043	100	-67
DDTB0009	100	-61.8	DDTB0044	100	-63.7
DDTB0010	100	-60.8	DDTB0045	100	-66.3

図 84 複数駆動試験による受信成功率の評価（試験結果）

図 84 の試験結果より、20 台の同時駆動による受信成功率は 100%となり、目標を達成できた。また、一つの親機で全ての子機データを受信できることが確認できた。

14.7 無線通信距離の評価

今回、子機と親機の無線通信には BLE を採用している。センサ向けの省電力無線を謳うこの無線通信プロトコルの実力として、実際に距離を離していったとき、どの程度の距離まで通信が可能かの評価が必要である。計測できなくなる距離を測るために、図 85 に示す条件にて、野外で計測を行った。

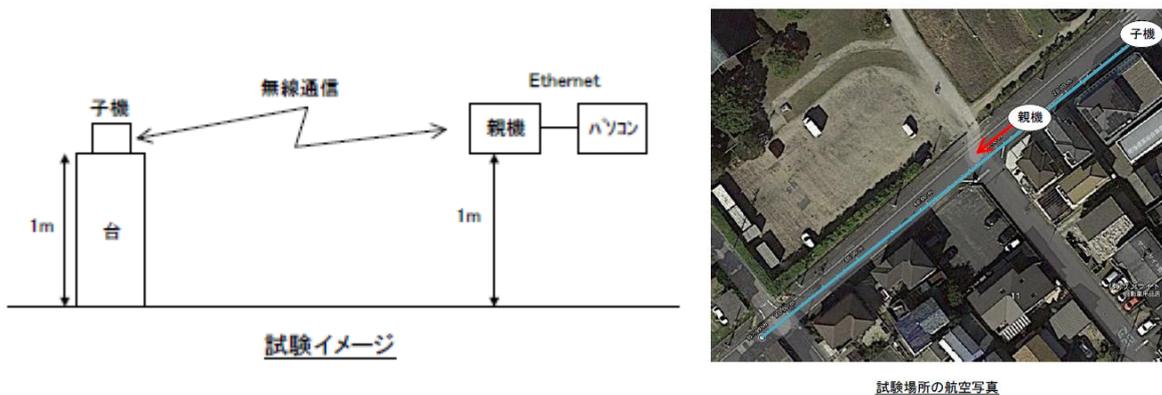


図 85 試験場所と試験イメージ

子機の位置を固定し、子機と親機の距離を離れた状態で測定を行う。子機と親機の距離は 10m 毎に離していく。一つの地点で 10 回の計測を行い、BLE 通信の成功回数と無線強度を計測。通信可能な距離を調査した。なお、子機、親機の地上面からの高さは 1m 程度とした。

図 86 に本試験の結果として、通信距離と無線受信強度、図 87 に通信距離と通信成功回数のグラフを示す。

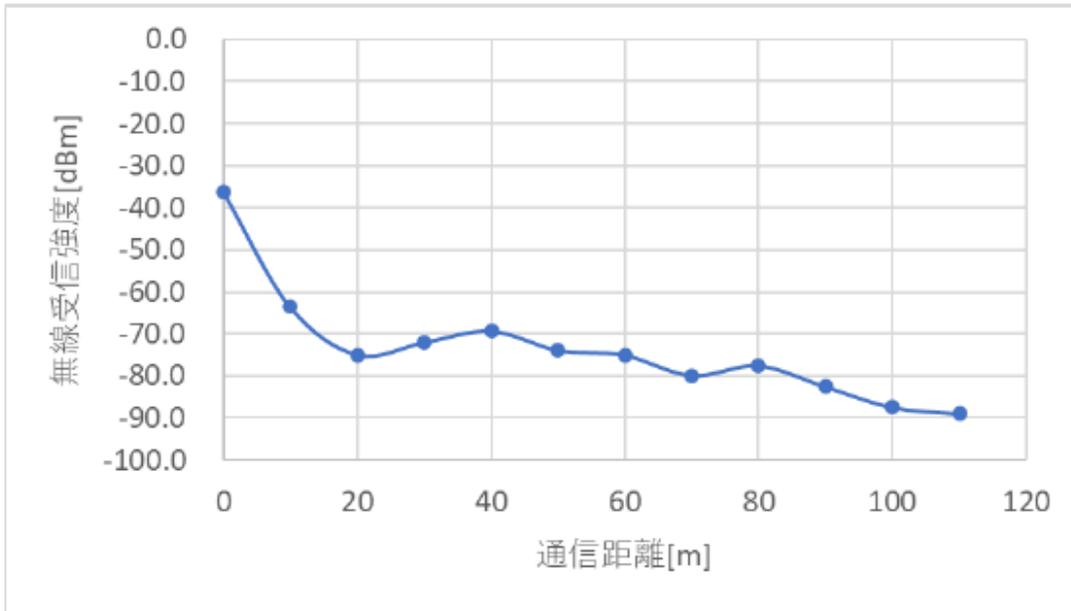


図 86 通信距離と無線受信強度

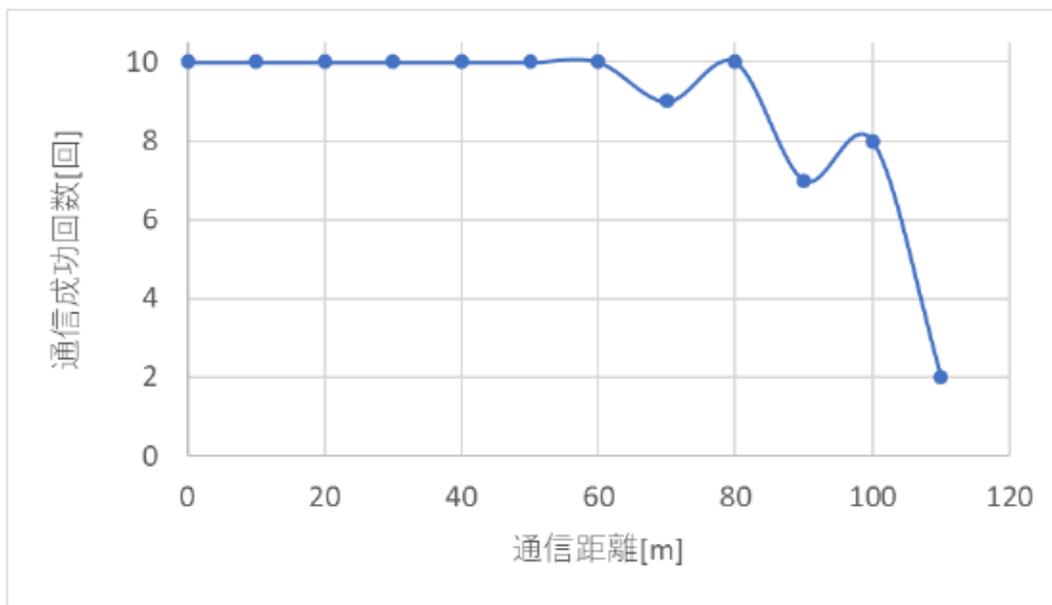


図 87 通信距離と通信成功回数

【試験結果】

無線強度の平均と通信の成功回数により以下の考察が導ける。

無線強度 [dBm] は距離に比例してさがる。電波強度は-80dBm を下回ると失敗が多くなる。

成功回数は 60m を超えた時点できさがる。実用上 70~80m は通信できるレベルと判断できる。

なお、110m 離れると 20%程度の成功率へと著しく悪化した。

なお、本試験は見通しの良い野外での試験であり、機関室内と条件が異なる。

15. 実船調査

令和3年度に開発したIoT無線振動・温度センサと機器状態監視診断システム/コントローラは、計画通り、船舶での搭載試験を実施することができた。

協力頂いた船舶は、商船三井ドライバルク（株）の運航船であるMV. ALAHASである。東南アジアと日本を定期的に往復するバルクキャリアである。

図88にMV. ALAHASの写真を示す。



図 88 MV. ALAHAS 全景

本船は、マキタ製主機関 6L35MC 及び、ダイハツディーゼル製の発電機機関 2 基（6DL-16A 1200rpm/660kW MDO 専焼 発電容量 450kW）を搭載している。機関室内には、他にもピューリファイヤー、ポンプ、モータなどの多くの補機類が設置されている。

定期的に日本に寄港することもあり、本事業による試作品を機関室の各種補機類に設置し、振動から機器状態を評価するには適した船舶として本船を選定した。

15.1 実船試験の設備とセンサの設置

実船試験の目的は、今回開発したセンサを用いて、「実船環境下において、システムが問題なく接続され、稼働するか」を確認することであるが、今回新たなチャレンジである無線適用について「実船環境下での無線環境の調査を定量的に行う」ことも目標とした。

1) 設置する機器について

- ・IoT 無線振動・温度センサ



図 89 IoT 無線振動・温度センサ



図 90 機関室でセンサの設置準備をしているところ

図 89 に IoT 無線振動・温度センサ、図 90 に MV. ALAHAS でセンサの設置準備の状況を示す。今回開発した IoT 無線振動・温度センサは、取付部に強力なネオジム磁石のアタッチメントを取り付けており、設置対象物が金属であれば容易に設置できるようにした。センサの軸方向は、Z 軸を上下とし、Y 軸を（船首—船尾方向）をそろえて設置した。

- ・親機とリピーター（電源ボックス等）



図 91 親機 (MASTER)、電源ボックス等



図 92 リピーター、電源ボックス等

図 91 に示す「親機」は、子機と通信する BLE 通信ユニットと Wi-Fi 通信機器の組み合わせによるユニットである。

図 92 に示す「リピーター」は、Wi-Fi の通信距離を延ばすために使用する、電波を中継する通信機器である。

今回、船内の電波環境が不明であったため事前にリピーターを用意したが、実際には Wi-Fi の電波強度は十分に強く、リピーターは使用しなかった。

親機、リピーターは DC24V 給電で動作するため、船内電源 (AC100V) から DC24V に変換するための電源ボックス (AC/DC コンバータ) を用意した。なお、電源コンセントボックスは船内電源を分配するために用意したものである。

親機は、図 100 の◆の位置、図 93 で示すように 1F と 2F の境目の壁面に設置した。



図 93 1F フロアでの親機設置状況 (1F と 2F の境目壁面)

・Wi-Fi アクセスポイント



図 94 Wi-Fi アクセスポイント

図 94 に示す「Wi-Fi アクセスポイント」は、コントローラと親機/リピーターを繋げる Wi-Fi 無線通信装置である。

今回、エンジンコントロールルーム (ECR) の窓の内側に設置し、コントローラとは Ethernet で接続した。電源は PoE (Power Over Ethernet) により、コントローラから Ethernet を通じて DC24V を給電している。

・コントローラ



図 95 コントローラ、液晶ディスプレイ

図 95 に示す「コントローラ」は ECR 内の卓上に設置した。

船内電源喪失時の機器破損やデータ保護の予防策として無停電電源装置を設置し、コントローラに給電した。

2) 接続概要

今回のシステム構成は、本船で調査の結果、一番シンプルな図 96 のシステム構成となった。

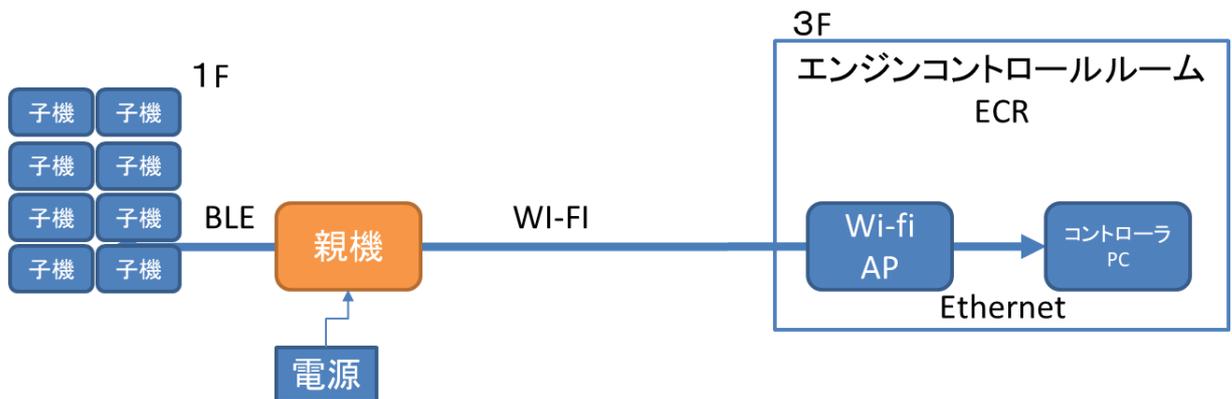


図 96 最小構成/今回の構成（子機—親機—Wi-Fi アクセスポイント—コントローラ）

図 96 の構成は、機関室の機器に設置する複数の子機と 1 台の親機間で BLE 通信を行う。

親機は Wi-Fi 通信機能も持ち、ECR に設置する Wi-Fi アクセスポイントへ接続する。Wi-Fi アクセスポイントとコントローラ PC は、Ethernet で接続する。

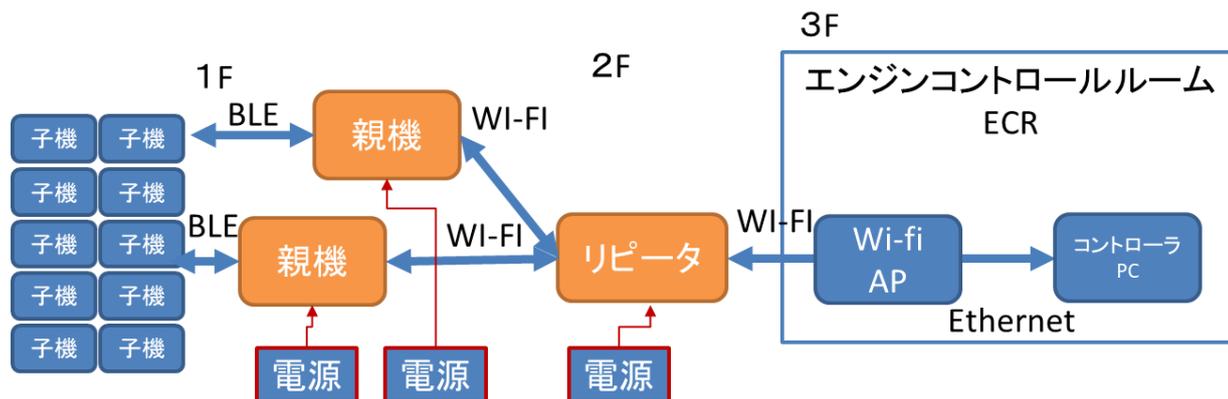


図 97 子機が多い/分散する場合、親機と Wi-Fi アクセスポイントが遠い場合の構成例

次に、子機が多い、設置場所が分散している、親機と Wi-Fi アクセスポイントが遠く、無線が繋がらない、などの船内環境に合わせて、機器追加により接続を可能にする構成案を図 97 に示す。

例えば、子機と親機の距離が遠く、BLE が通信できない場合、親機を追設することで距離が縮まり、通信可能になる場合がある。子機はどの親機とも通信できるため、親機の複数設置で問題を回避することが可能である。

また、親機と Wi-Fi アクセスポイントの間の距離が遠く、Wi-Fi 無線が届かない場合は、リピーターを間に追設することで電波が中継され、無線通信による接続が可能になる。

・計測データの見方について

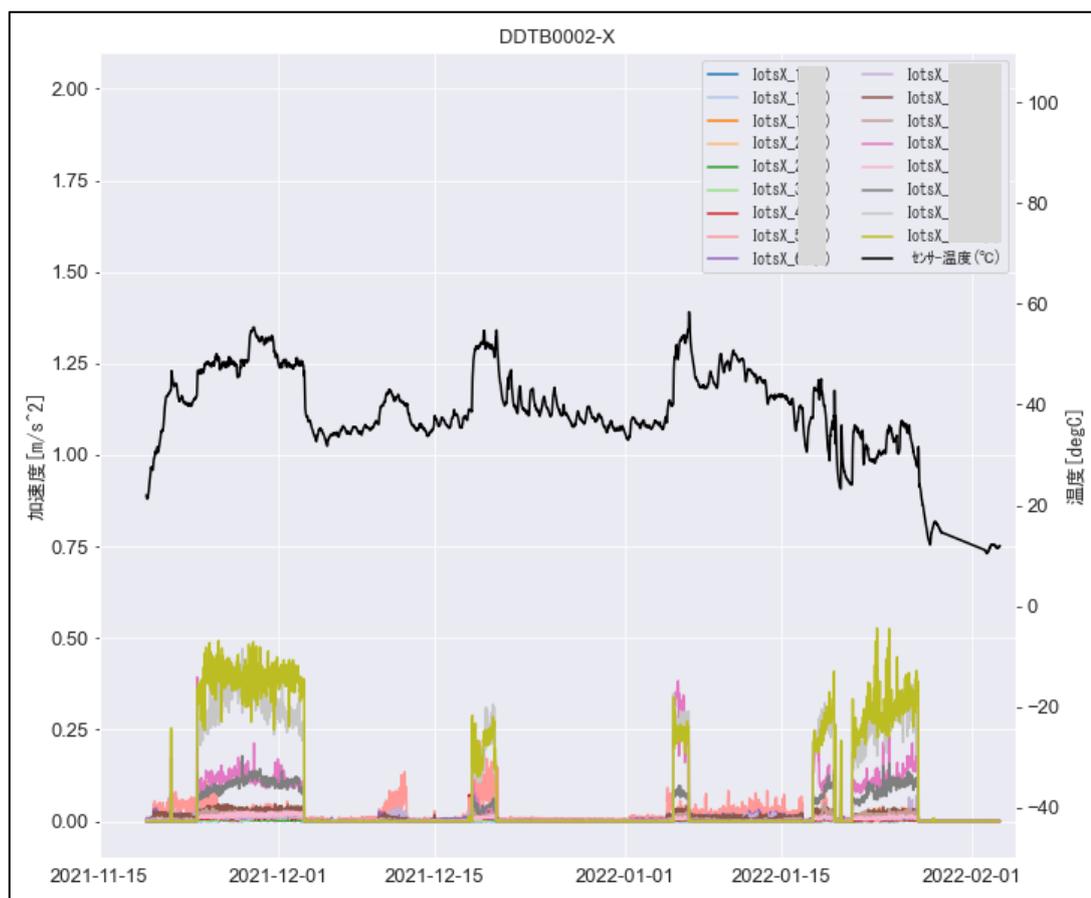


図 98 例) 設置センサの振動データ (X 軸)

計測データのグラフの見方について、説明する。

図 98 は、振動計測したデータを時系列にプロットした参考例 (図 133 を引用) である。

横軸は時間であり、2021 年 11 月 15 日～2022 年 2 月 3 日までの実測データである。

左側の縦軸は加速度 (m/s^2) であり、最大値は $2m/s^2$ 、右側の縦軸は温度 ($^{\circ}C$) である。

計測間隔は 30 分。センサが計測する 18 点の周波数毎の加速度が 18 点のアナログ信号のように一つのトレンドグラフに一括表示した。なお、グラフ中央部にある黒線はセンサに内蔵する温度センサが計測する温度である。なお、凡例の周波数は消してある。

このグラフにより、最も大きい加速度を示す周波数は約 600Hz と約 1000Hz の帯域、次に大きい加速度の周波数は約 100Hz、約 300Hz の帯域であることがわかる。この対象機器は、運転時に周波数ごとに異なる加速度を持つ、特徴的な振動特性があることが分かる。

・異常診断の活用について

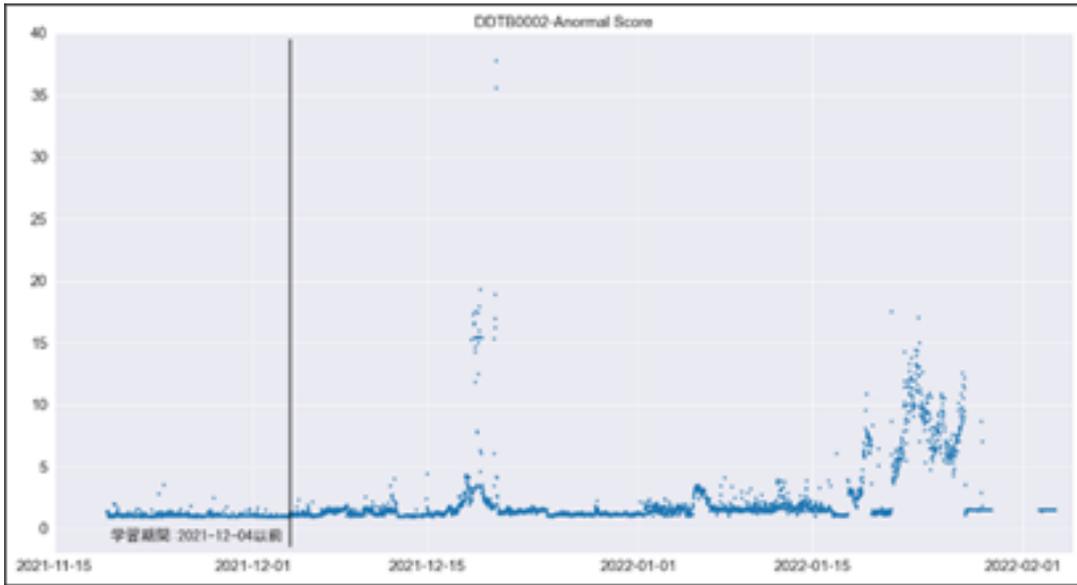


図 99 振動データから異常診断し、異常度指数を算出した事例

参考として図 99 に、計測した振動データから異常診断を行った結果の一例を載せる。横軸は時間、縦軸は異常度である。

異常度を演算するための異常診断ロジックには様々なものが存在する。今回、一つの異常診断ロジックを選定し、対象機器の振動計測値を処理して、通常と異なる状態変化を異常度の強弱として算出した。

一般的な警報システムと今回の異常診断システムでは、異常の捉え方が異なる。一般的な警報システムでは、計測値毎に警報値を事前に設けておくものが多い。計測値を監視し、その値が警報値を超えたときに状態変化が起きたとして異常を捉える。一方、今回採用した異常診断の手法では、複数の計測値の相関やばらつきが急激に変化することを異常として捉え、異常度を算出するものである。

この、異常診断ロジックの利点は、人がグラフを見ているにもかかわらずな状態変化でも、正常状態を基準にすることで感度よく検知できることである。

図 99 のグラフは、縦棒の左側を正常な学習期間と仮定し、それ以降を上記の異常診断ロジックで演算した。値が跳ね上がっている部分が、学習した正常域から状態が大きく変わった部分である。

なお、異常診断システムの能力向上には、正常と異常時の計測データをなるべく多く取得し、診断の正しさを確認しながら診断ロジックの改良を行う必要がある。今後も船舶データを取得し、不具合時の機器データの取得を試み、異常診断技術を改善し続ける予定である。

15.2 実船試験による振動計測

機関室のフロアの呼び方は簡易的に、一番下のフロア（Bottom Floor）を1F、そこから階層が上がるたびに2F, 3F, 4F という表記とした。

- 1F フロア : Bottom Floor

1F は最下層のフロアであり、主機や補機関が設置されている。1F にある機器類に、最も多く 10 個の IoT 無線振動・温度センサを設置した。センサの設置場所を図 100 に示す。

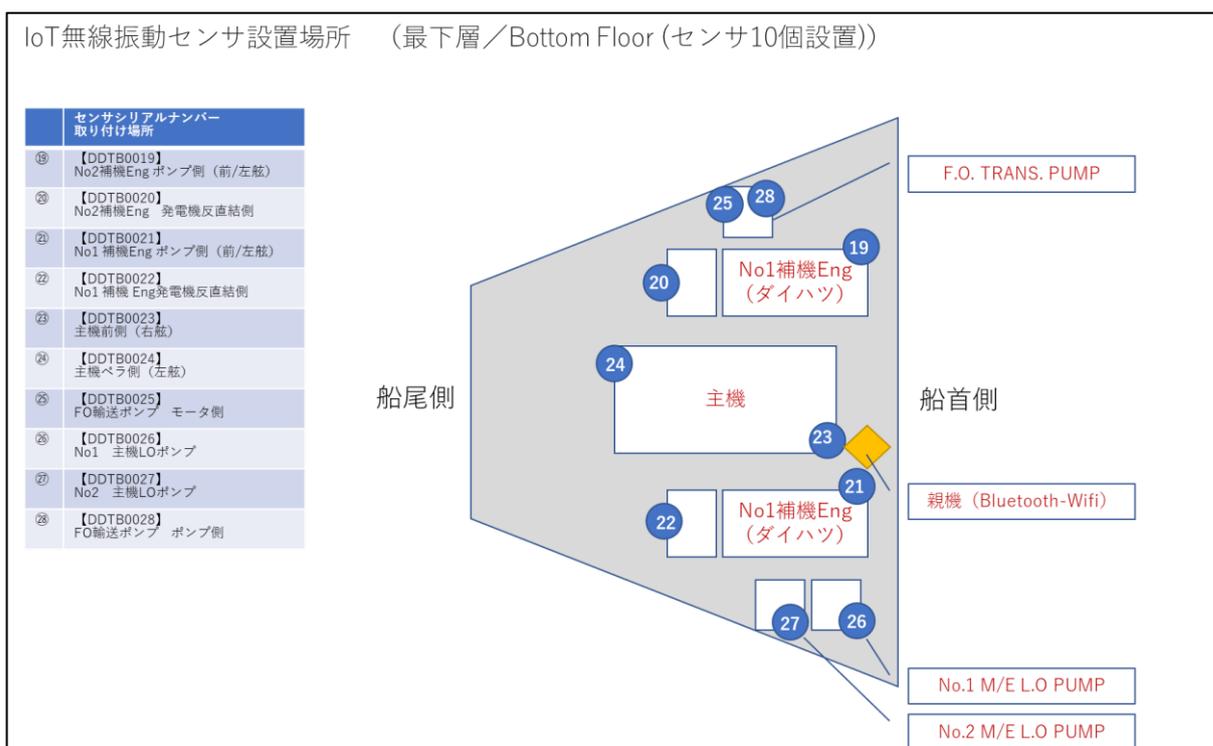


図 100 1F : Bottom Floor でのセンサ設置場所

1F フロアに設置した、IoT 無線振動・温度センサの設置機器と設置場所の写真、計測データと異常診断結果は、以下の図 101～図 130 に示す。

・計測データについて

⑱No2補機Engポンプ側(前/左舷)

センサリアルナンバー 取り付け場所
⑳ 【DDTB0002】 LOビューリファイヤー
㉑ 【DDTB0003】 No1主エアコンプレッサー
㉒ 【DDTB0004】 No2主エアコンプレッサー
⑳ 【DDTB0019】 No2補機Engポンプ側(前/左舷)
㉔ 【DDTB0020】 No2補機Eng 発電機反直結側
㉕ 【DDTB0021】 No1 補機Eng ポンプ側(前/左舷)
㉖ 【DDTB0022】 No1 補機 Eng発電機反直結側
㉗ 【DDTB0023】 主機前側(右舷)
㉘ 【DDTB0024】 主機ベラ側(左舷)
㉙ 【DDTB0025】 FO輸送ポンプ モータ側
㉚ 【DDTB0026】 No1 主機LOポンプ
㉛ 【DDTB0027】 No2 主機LOポンプ
㉜ 【DDTB0028】 FO輸送ポンプ ポンプ側
㉝ 【DDTB0029】 No1 FOビューリファイヤー
㉞ 【DDTB0030】 No2 FOビューリファイヤー



図 101 ⑱No2 補機 Eng ポンプ側 (前/左舷) のセンサ設置場所

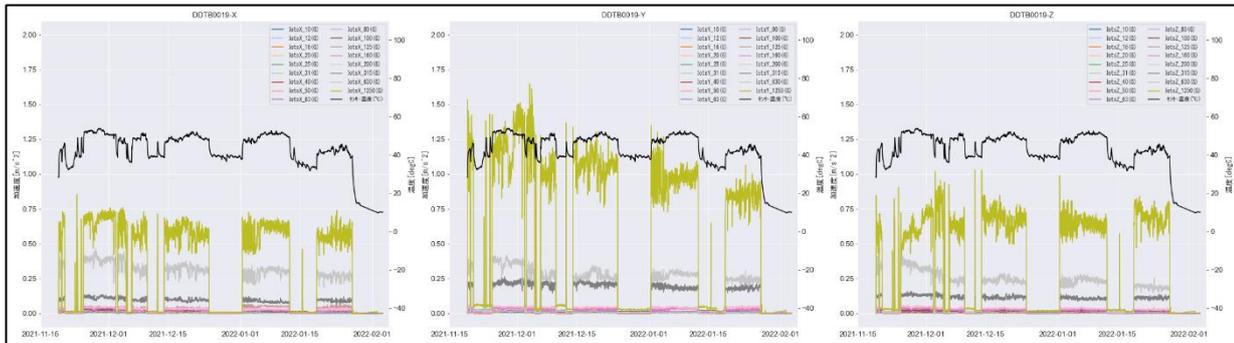


図 102 ⑱No2 補機 Eng ポンプ側 (前/左舷) 設置センサの振動データ (X, Y, Z 軸)

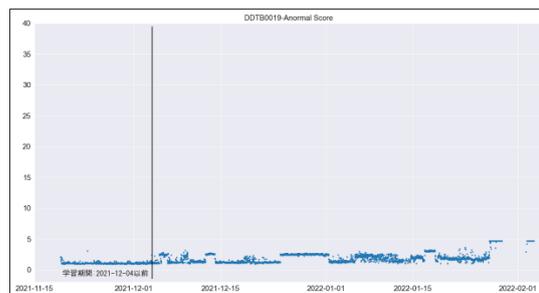


図 103 ⑱No2 補機 Eng ポンプ側 (前/左舷) の異常診断例

②No2補機Eng発電機反直結側

センサシリアルナンバー 取り付け場所
② 【DDTB0002】 LOピューリファイヤー
③ 【DDTB0003】 No1主エアコンプレッサー
④ 【DDTB0004】 No2主エアコンプレッサー
⑬ 【DDTB0019】 No2補機Engポンプ側(前/左舷)
⑳ 【DDTB0020】 No2補機Eng 発電機反直結側
㉑ 【DDTB0021】 No1補機Engポンプ側(前/左舷)
㉒ 【DDTB0022】 No1補機Eng発電機反直結側
㉓ 【DDTB0023】 主機前側(右舷)
㉔ 【DDTB0024】 主機ペラ側(左舷)
㉕ 【DDTB0025】 FO輸送ポンプ モータ側
㉖ 【DDTB0026】 No1 主機LOポンプ
㉗ 【DDTB0027】 No2 主機LOポンプ
㉘ 【DDTB0028】 FO輸送ポンプ ポンプ側
㉙ 【DDTB0029】 No1 FOピューリファイヤー
㉚ 【DDTB0030】 No2 FOピューリファイヤー

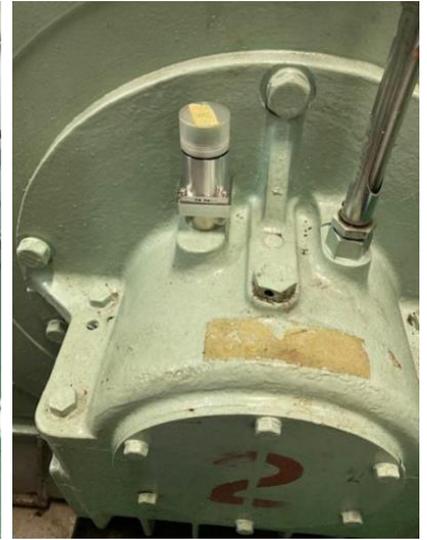
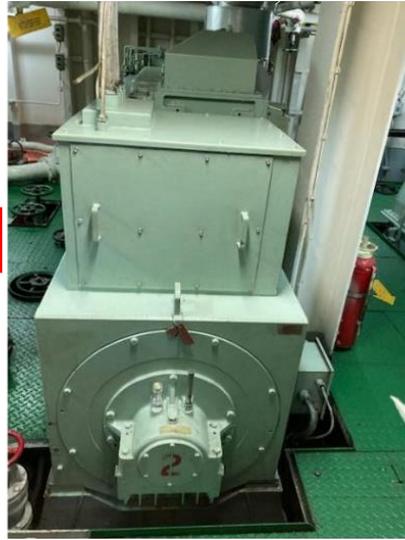


図 104 ②No2 補機 Eng 発電機反直結側のセンサ設置場所

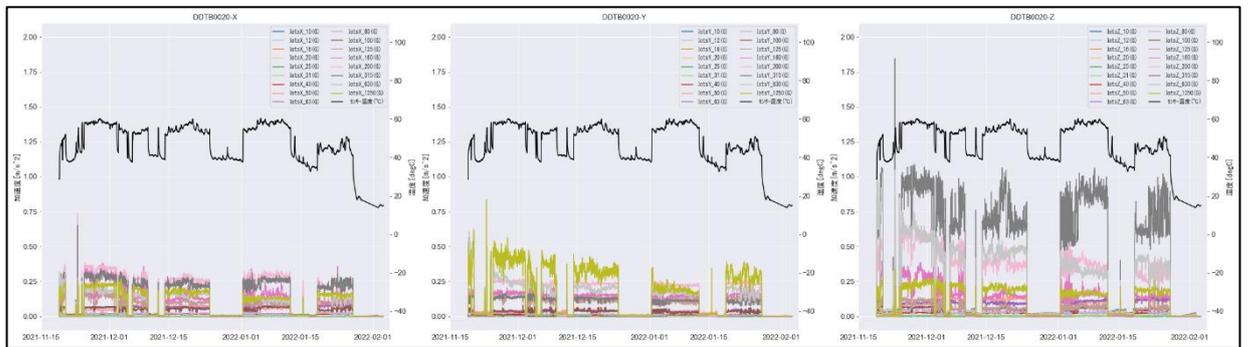


図 105 ②No2 補機 Eng 発電機反直結側 設置センサの振動データ (X, Y, Z 軸)

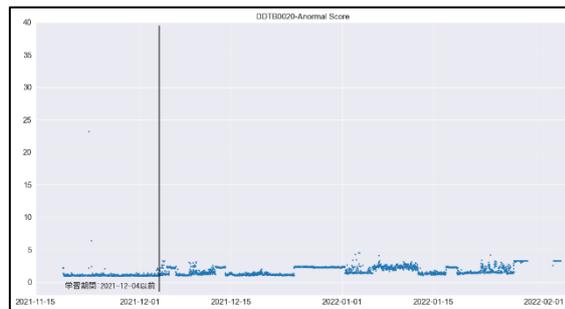


図 106 ②No2 補機 Eng 発電機反直結側の異常診断例

②1 No1補機Engポンプ側(前/左舷)

センサシリアルナンバー 取り付け場所	
②	【DDTB0002】 LOピューリファイヤー
③	【DDTB0003】 No1主エアコンプレッサー
④	【DDTB0004】 No2主エアコンプレッサー
⑯	【DDTB0019】 No2補機Engポンプ側(前/左舷)
⑳	【DDTB0020】 No2補機Eng 発電機反直結側
㉑	【DDTB0021】 No1補機Engポンプ側(前/左舷)
㉒	【DDTB0022】 No1補機Eng発電機反直結側
㉓	【DDTB0023】 主機前側(右舷)
㉔	【DDTB0024】 主機ベラ側(左舷)
㉕	【DDTB0025】 FO輸送ポンプ モータ側
㉖	【DDTB0026】 No1 主機LOポンプ
㉗	【DDTB0027】 No2 主機LOポンプ
㉘	【DDTB0028】 FO輸送ポンプ ポンプ側
㉙	【DDTB0029】 No1 FOピューリファイヤー
㉚	【DDTB0030】 No2 FOピューリファイヤー



図 107 ㉑No1 補機 Eng ポンプ側 (前/左舷) のセンサ設置場所

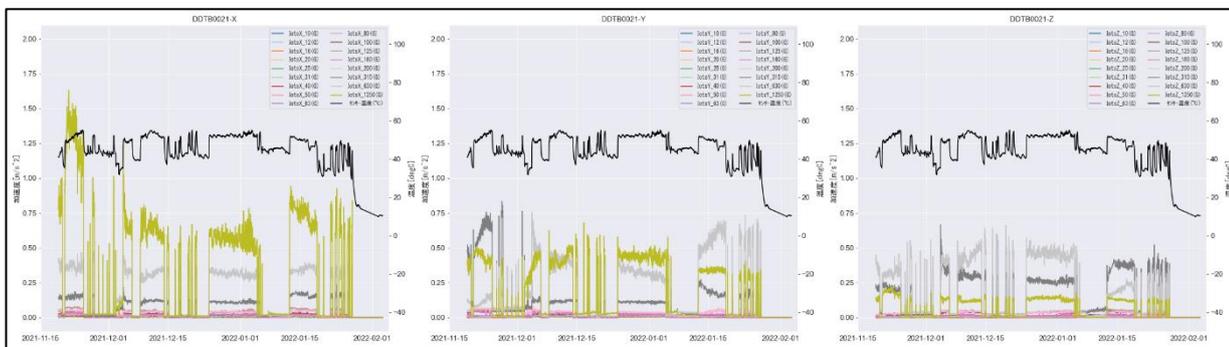


図 108 ㉑No1 補機 Eng ポンプ側 (前/左舷) 設置センサの振動データ (X, Y, Z 軸)

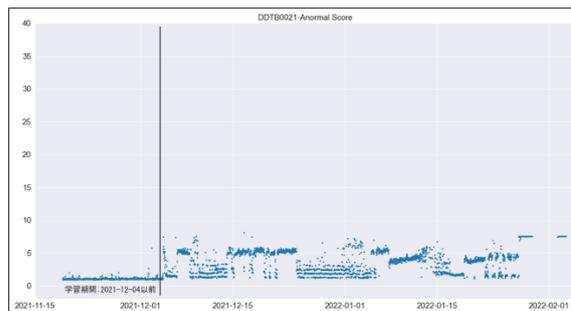


図 109 ㉑No1 補機 Eng ポンプ側 (前/左舷) の異常診断例

②②NO1補機Eng発電機反直結側

センサシリアルナンバー 取り付け場所
② 【DDTB0002】 LOピューリファイヤー
③ 【DDTB0003】 No1主エアコンプレッサー
④ 【DDTB0004】 No2主エアコンプレッサー
⑬ 【DDTB0019】 No2補機Engポンプ側(前/左舷)
⑳ 【DDTB0020】 No2補機Eng 発電機反直結側
㉑ 【DDTB0021】 No1 補機Eng ポンプ側(前/左舷)
㉒ 【DDTB0022】 No1 補機 Eng 発電機反直結側
㉓ 【DDTB0023】 主機前側(右舷)
㉔ 【DDTB0024】 主機ベラ側(左舷)
㉕ 【DDTB0025】 FO輸送ポンプ モータ側
㉖ 【DDTB0026】 No1 主機LOポンプ
㉗ 【DDTB0027】 No2 主機LOポンプ
㉘ 【DDTB0028】 FO輸送ポンプ ポンプ側
㉙ 【DDTB0029】 No1 FOピューリファイヤー
㉚ 【DDTB0030】 No2 FOピューリファイヤー



図 110 ②②No1 補機 Eng 発電機反直結側のセンサ設置場所

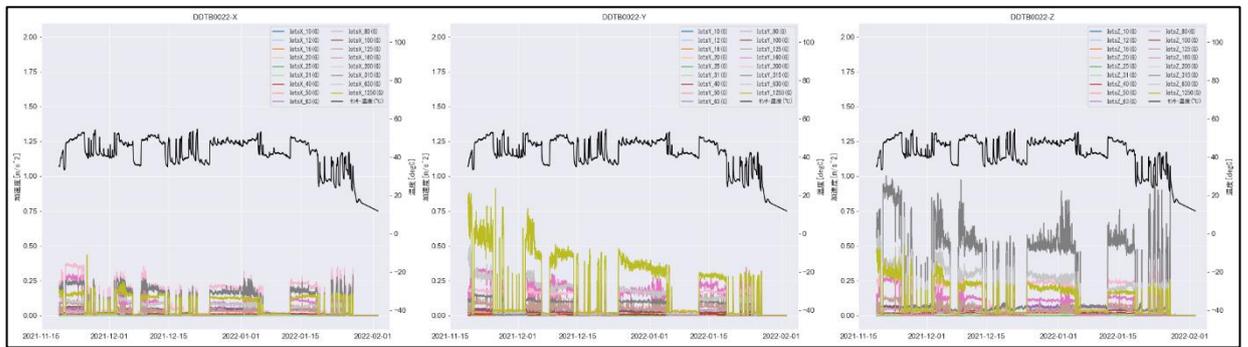


図 111 ②②No1 補機 Eng 発電機反直結側 設置センサの振動データ (X, Y, Z 軸)

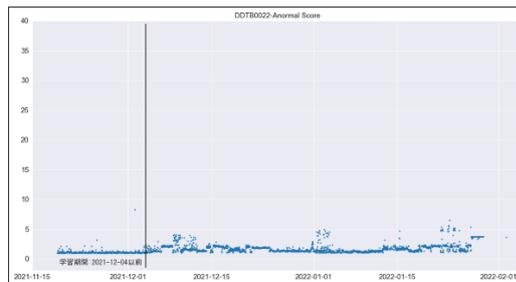


図 112 ②②No1 補機 Eng 発電機反直結側の異常診断例

②③主機前側(右舷)

センサシリアルナンバー 取り付け場所
② 【DDTB0002】 LOピューリファイヤー
③ 【DDTB0003】 No1主エアコンプレッサー
④ 【DDTB0004】 No2主エアコンプレッサー
⑯ 【DDTB0019】 No2補機Engポンプ側(前/左舷)
⑳ 【DDTB0020】 No2補機Eng 発電機反直結側
㉑ 【DDTB0021】 No1 補機Engポンプ側(前/左舷)
㉒ 【DDTB0022】 No1 補機 Eng発電機反直結側
㉓ 【DDTB0023】 主機前側(右舷)
㉔ 【DDTB0024】 主機ベラ側(左舷)
㉕ 【DDTB0025】 FO輸送ポンプ モータ側
㉖ 【DDTB0026】 No1 主機LOポンプ
㉗ 【DDTB0027】 No2 主機LOポンプ
㉘ 【DDTB0028】 FO輸送ポンプ ポンプ側
㉙ 【DDTB0029】 No1 FOピューリファイヤー
㉚ 【DDTB0030】 No2 FOピューリファイヤー



図 113 ②③主機前側(右舷)のセンサ設置場所

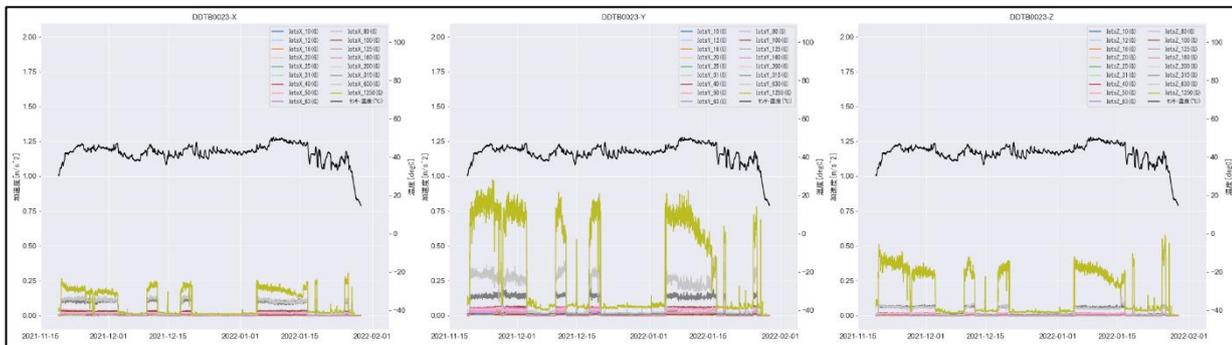


図 114 ②③主機前側(右舷) 設置センサの振動データ (X, Y, Z 軸)

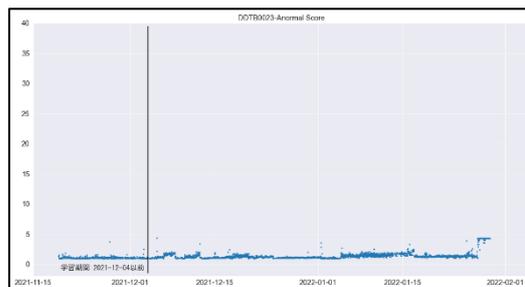


図 115 ②③主機前側(右舷)の異常診断例

②4主機ペラ側(左舷)

センサシリアルナンバー 取り付け場所
② 【DDTB0002】 LOビューリファイヤー
③ 【DDTB0003】 No1主エアコンプレッサー
④ 【DDTB0004】 No2主エアコンプレッサー
⑬ 【DDTB0019】 No2補機Engポンプ側(前/左舷)
⑳ 【DDTB0020】 No2補機Eng 発電機反直結側
㉑ 【DDTB0021】 No1補機Engポンプ側(前/左舷)
㉒ 【DDTB0022】 No1補機Eng発電機反直結側
㉓ 【DDTB0023】 主機前側(右舷)
㉔ 【DDTB0024】 主機ペラ側(左舷)
㉕ 【DDTB0025】 FO輸送ポンプ モータ側
㉖ 【DDTB0026】 No1 主機LOポンプ
㉗ 【DDTB0027】 No2 主機LOポンプ
㉘ 【DDTB0028】 FO輸送ポンプ ポンプ側
㉙ 【DDTB0029】 No1 FOビューリファイヤー
㉚ 【DDTB0030】 No2 FOビューリファイヤー

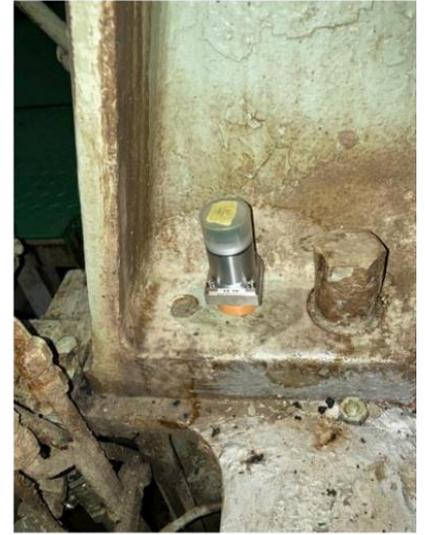


図 116 ②4主機ペラ側(左舷)のセンサ設置場所



図 117 ②4主機ペラ側(左舷)設置センサの振動データ(X, Y, Z軸)

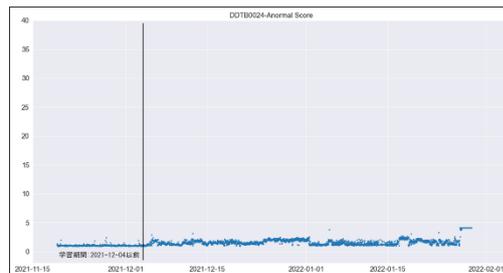


図 118 ②4主機ペラ側(左舷)の異常診断例

②5 FO輸送ポンプ モータ 側

センサシリアルナンバー 取り付け場所
② 【DDTB0002】 LOビューリファイヤー
③ 【DDTB0003】 No1主エアコンプレッサー
④ 【DDTB0004】 No2主エアコンプレッサー
⑬ 【DDTB0019】 No2補機Engポンプ側(前/左舷)
⑳ 【DDTB0020】 No2補機Eng 発電機反直結側
㉑ 【DDTB0021】 No1補機Eng ポンプ側(前/左舷)
㉒ 【DDTB0022】 No1補機 Eng発電機反直結側
㉓ 【DDTB0023】 主機前側(右舷)
㉔ 【DDTB0024】 主機ベラ側(左舷)
㉕ 【DDTB0025】 FO輸送ポンプ モータ側
㉖ 【DDTB0026】 No1 主機LOポンプ
㉗ 【DDTB0027】 No2 主機LOポンプ
㉘ 【DDTB0028】 FO輸送ポンプ ポンプ側
㉙ 【DDTB0029】 No1 FOビューリファイヤー
㉚ 【DDTB0030】 No2 FOビューリファイヤー



図 119 ②5FO 輸送ポンプ モータ側のセンサ設置場所

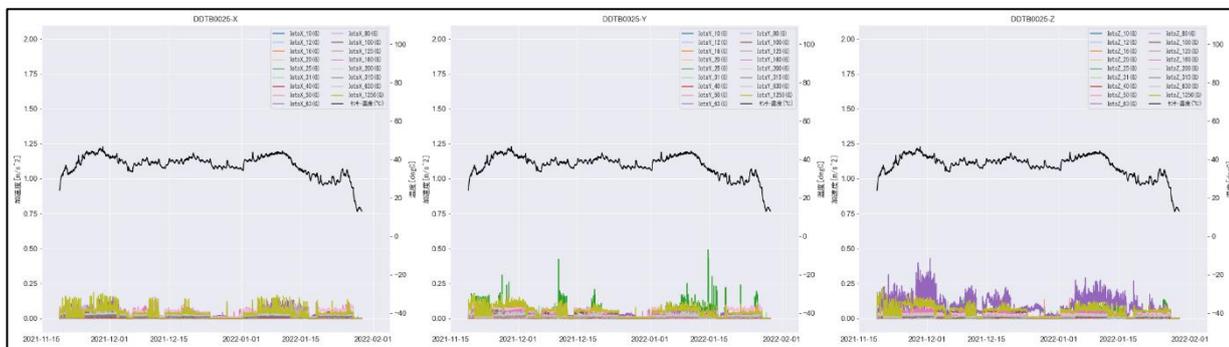


図 120 ②5FO 輸送ポンプ モータ側 設置センサの振動データ (X, Y, Z 軸)

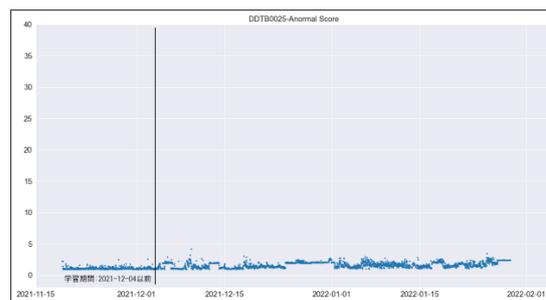


図 121 ②5FO 輸送ポンプ モータ側の異常診断例

②6 No1主機LOポンプ

センサシリアルナンバー 取り付け場所
② 【DDTB0002】 LOピューリファイヤー
③ 【DDTB0003】 No1主エアコンプレッサー
④ 【DDTB0004】 No2主エアコンプレッサー
⑬ 【DDTB0019】 No2補機Engポンプ側(前/左舷)
⑳ 【DDTB0020】 No2補機Eng 発電機反直結側
㉑ 【DDTB0021】 No1補機Engポンプ側(前/左舷)
㉒ 【DDTB0022】 No1補機Eng発電機反直結側
㉓ 【DDTB0023】 主機前側(右舷)
㉔ 【DDTB0024】 主機べら側(左舷)
㉕ 【DDTB0025】 FO輸送ポンプ モータ側
㉖ 【DDTB0026】 No1 主機LOポンプ
㉗ 【DDTB0027】 No2 主機LOポンプ
㉘ 【DDTB0028】 FO輸送ポンプ ポンプ側
㉙ 【DDTB0029】 No1 FOピューリファイヤー
㉚ 【DDTB0030】 No2 FOピューリファイヤー

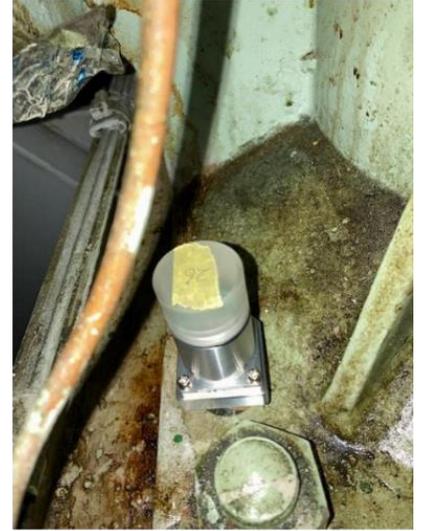


図 122 ㉖No1 主機 LO ポンプのセンサ設置場所

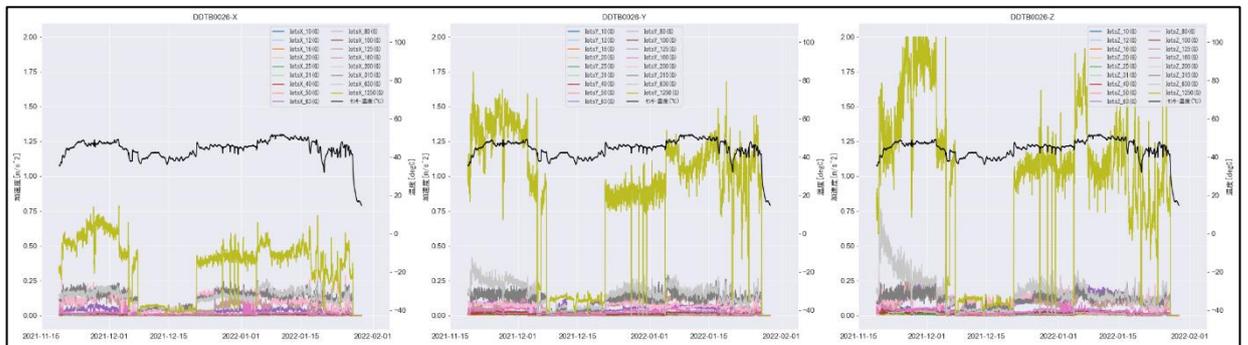


図 123 ㉖No1 主機 LO ポンプ 設置センサの振動データ (X, Y, Z 軸)

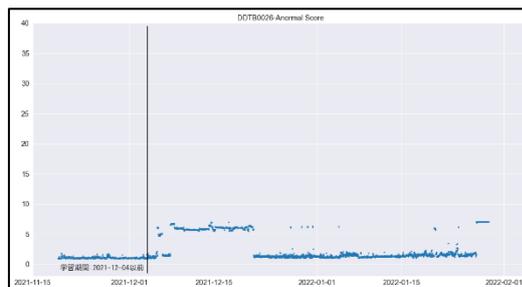


図 124 ㉖No1 主機 LO ポンプの異常診断例

②7 NO2 主機LOポンプ

センサリアルナンバー 取り付け場所	
②	【DDTB0002】 LOビューリファイヤー
③	【DDTB0003】 No1主エアコンプレッサー
④	【DDTB0004】 No2主エアコンプレッサー
⑬	【DDTB0019】 No2補機Engポンプ側(前/左舷)
⑳	【DDTB0020】 No2補機Eng 発電機反直結側
㉑	【DDTB0021】 No1補機Engポンプ側(前/左舷)
㉒	【DDTB0022】 No1補機Eng発電機反直結側
㉓	【DDTB0023】 主機前側(右舷)
㉔	【DDTB0024】 主機ベラ側(左舷)
㉕	【DDTB0025】 FO輸送ポンプ モータ側
㉖	【DDTB0026】 No1 主機LOポンプ
㉗	【DDTB0027】 No2 主機LOポンプ
㉘	【DDTB0028】 FO輸送ポンプ ポンプ側
㉙	【DDTB0029】 No1 FOビューリファイヤー
㉚	【DDTB0030】 No2 FOビューリファイヤー



図 125 ㉗No2 主機 LO ポンプのセンサ設置場所

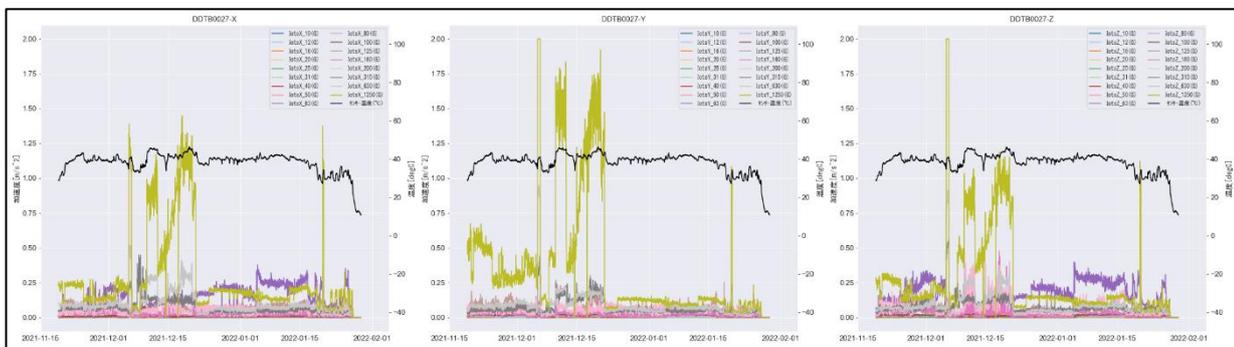


図 126 ㉗No2 主機 LO ポンプ 設置センサの振動データ (X, Y, Z 軸)

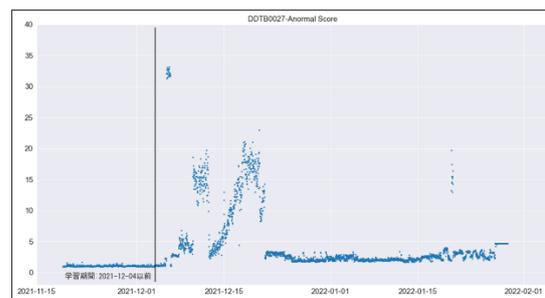


図 127 ㉗No2 主機 LO ポンプの異常診断例

②8 FO輸送ポンプ ポンプ側

センサシリアルナンバー 取り付け場所
② 【DDTB0002】 LOビューリファイヤー
③ 【DDTB0003】 No1主エアコンプレッサー
④ 【DDTB0004】 No2主エアコンプレッサー
⑬ 【DDTB0019】 No2補機Engポンプ側(前/左舷)
⑳ 【DDTB0020】 No2補機Eng 発電機反直結側
㉑ 【DDTB0021】 No1補機Engポンプ側(前/左舷)
㉒ 【DDTB0022】 No1補機Eng発電機反直結側
㉓ 【DDTB0023】 主機前側(右舷)
㉔ 【DDTB0024】 主機ベラ側(左舷)
㉕ 【DDTB0025】 FO輸送ポンプ モータ側
㉖ 【DDTB0026】 No1 主機LOポンプ
㉗ 【DDTB0027】 No2 主機LOポンプ
㉘ 【DDTB0028】 FO輸送ポンプ ポンプ側
㉙ 【DDTB0029】 No1 FOビューリファイヤー
㉚ 【DDTB0030】 No2 FOビューリファイヤー



図 128 ②8FO 輸送ポンプ ポンプ側のセンサ設置場所



図 129 ②8FO 輸送ポンプ ポンプ側 設置センサの振動データ (X, Y, Z 軸)

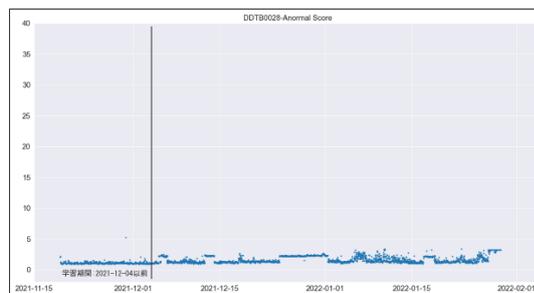


図 130 ②8FO 輸送ポンプ ポンプ側の異常診断例

・ 2F フロア : No2 PART. DECK

2F 部分には、吹き抜けの中央部分に主機が据えられ、その周囲に多数の補機類が設置されている。その中から、L.O. ピュリファイヤーや主機用の L0 ポンプを対象に選定し、IoT 無線振動・温度センサを 3 個設置した。センサの設置場所を図 131 に示す。

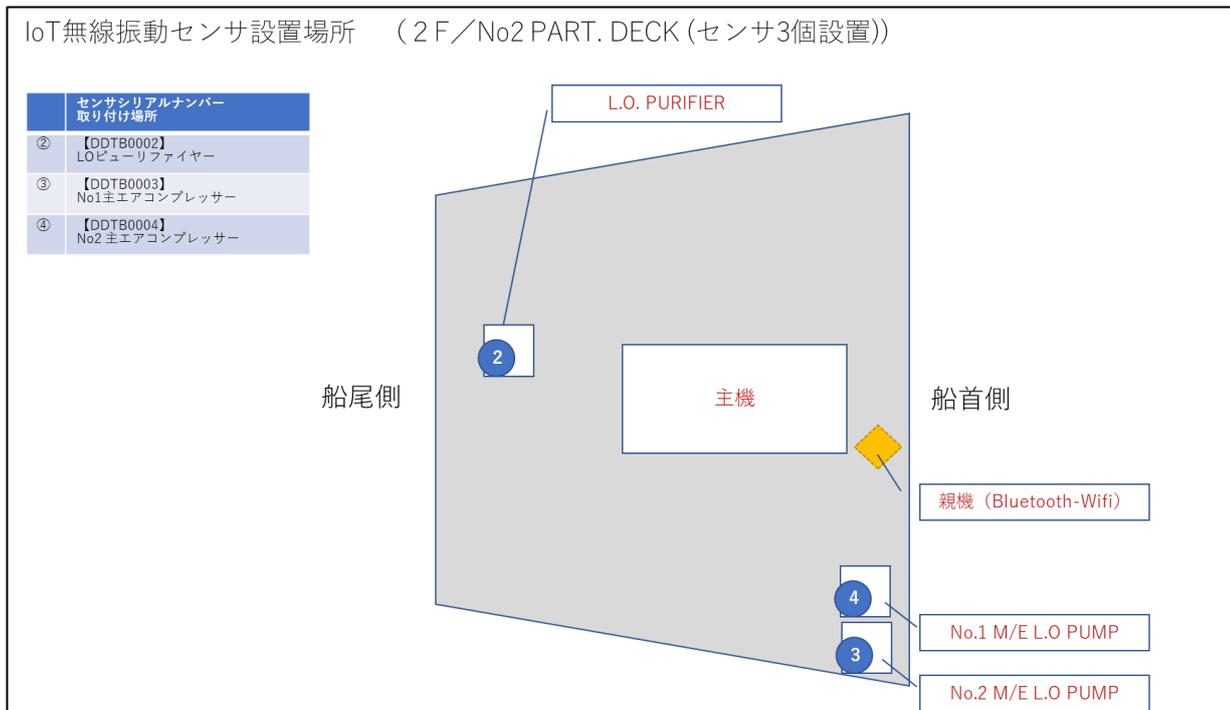


図 131 2F : No2 PART. DECK フloorレイアウト

2F フロアに設置した、IoT 無線振動・温度センサの設置機器と設置場所の写真、計測データと異常診断結果は、以下の図 132～図 140 に示す。

②LOピューリファイヤー

センサシリアルナンバー 取り付け場所
② 【DDTB0002】 LOピューリファイヤー
③ 【DDTB0003】 No1主エアコンプレッサー
④ 【DDTB0004】 No2主エアコンプレッサー
⑯ 【DDTB0019】 No2補機Engポンプ側(前/左舷)
⑳ 【DDTB0020】 No2補機Eng 発電機反直結側
㉑ 【DDTB0021】 No1 補機Eng ポンプ側(前/左舷)
㉒ 【DDTB0022】 No1 補機Eng発電機反直結側
㉓ 【DDTB0023】 主機前側(右舷)
㉔ 【DDTB0024】 主機ペラ側(左舷)
㉕ 【DDTB0025】 FO輸送ポンプ モータ側
㉖ 【DDTB0026】 No1 主機LOポンプ
㉗ 【DDTB0027】 No2 主機LOポンプ
㉘ 【DDTB0028】 FO輸送ポンプ ポンプ側
㉙ 【DDTB0029】 No1 FOピューリファイヤー
㉚ 【DDTB0030】 No2 FOピューリファイヤー



図 132 ②LOピューリファイヤーのセンサ設置場所



図 133 ②LOピューリファイヤー 設置センサの振動データ (X, Y, Z 軸)

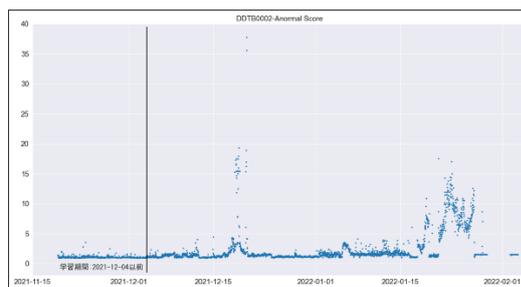


図 134 ②LOピューリファイヤーの異常診断例

③No1主エアコンプレッサー

センサシリアルナンバー 取り付け場所
② 【DDTB0002】 LOビューリファイヤー
③ 【DDTB0003】 No1主エアコンプレッサー
④ 【DDTB0004】 No2主エアコンプレッサー
⑬ 【DDTB0019】 No2補機Eng ポンプ側(前/左舷)
⑳ 【DDTB0020】 No2補機Eng 発電機反直結側
㉑ 【DDTB0021】 No1補機Eng ポンプ側(前/左舷)
㉒ 【DDTB0022】 No1補機Eng 発電機反直結側
㉓ 【DDTB0023】 主機前側(右舷)
㉔ 【DDTB0024】 主機ベラ側(左舷)
㉕ 【DDTB0025】 FO輸送ポンプ モータ側
㉖ 【DDTB0026】 No1 主機LOポンプ
㉗ 【DDTB0027】 No2 主機LOポンプ
㉘ 【DDTB0028】 FO輸送ポンプ ポンプ側
㉙ 【DDTB0029】 No1 FOビューリファイヤー
㉚ 【DDTB0030】 No2 FOビューリファイヤー

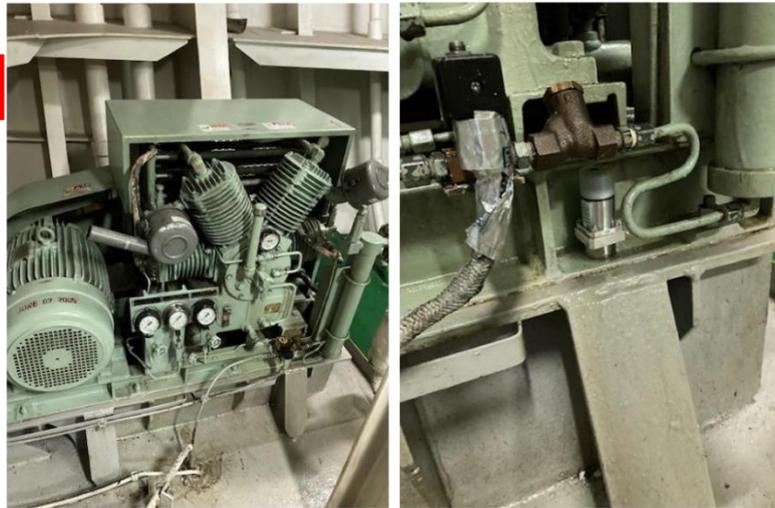


図 135 ③No1 主エアコンプレッサー のセンサ設置場所

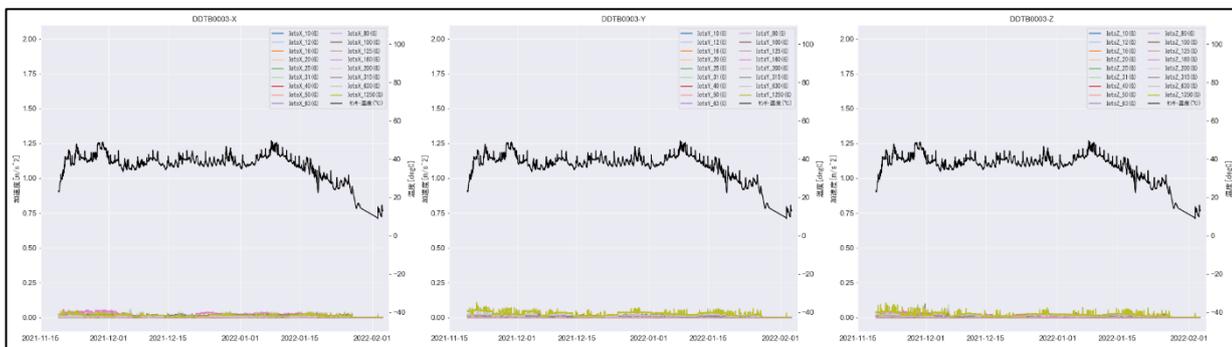


図 136 ③No1 主エアコンプレッサー 設置センサの振動データ (X, Y, Z 軸)

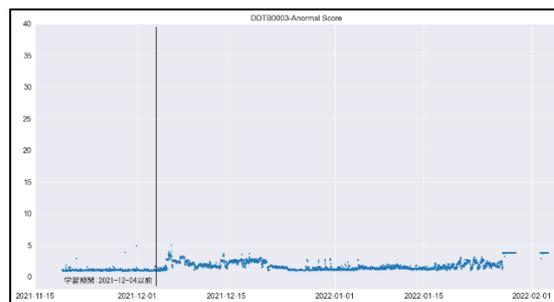


図 137 ③No1 主エアコンプレッサーの異常診断例

④No2主エアコンプレッサー

センサシリアルナンバー 取り付け場所
② 【DDTB0002】 LOビューリファイヤー
③ 【DDTB0003】 No1主エアコンプレッサー
④ 【DDTB0004】 No2主エアコンプレッサー
⑬ 【DDTB0019】 No2補機Engポンプ側(前/左舷)
⑳ 【DDTB0020】 No2補機Eng 発電機反直結側
㉑ 【DDTB0021】 No1補機Engポンプ側(前/左舷)
㉒ 【DDTB0022】 No1補機Eng発電機反直結側
㉓ 【DDTB0023】 主機前側(右舷)
㉔ 【DDTB0024】 主機べら側(左舷)
㉕ 【DDTB0025】 FO輸送ポンプ モータ側
㉖ 【DDTB0026】 No1 主機LOポンプ
㉗ 【DDTB0027】 No2 主機LOポンプ
㉘ 【DDTB0028】 FO輸送ポンプ ポンプ側
㉙ 【DDTB0029】 No1 FOビューリファイヤー
㉚ 【DDTB0030】 No2 FOビューリファイヤー

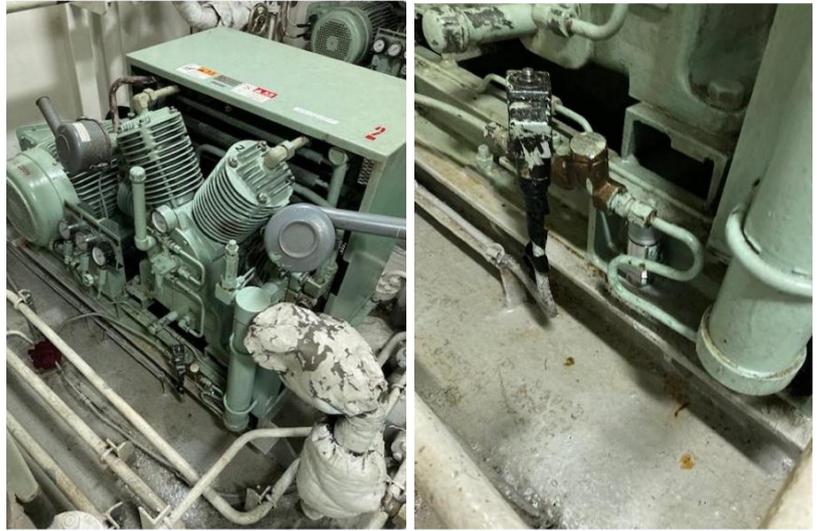


図 138 ④No2 主エアコンプレッサー のセンサ設置場所

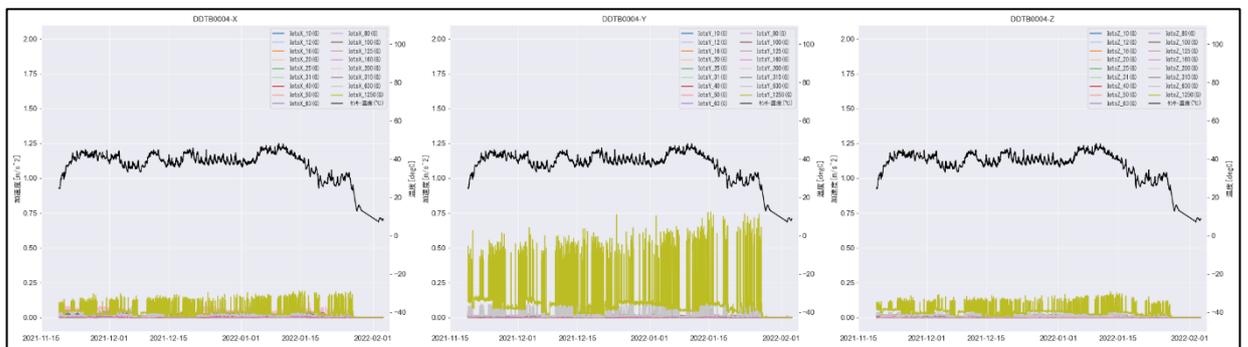


図 139 ④No2 主エアコンプレッサー 設置センサの振動データ (X, Y, Z 軸)

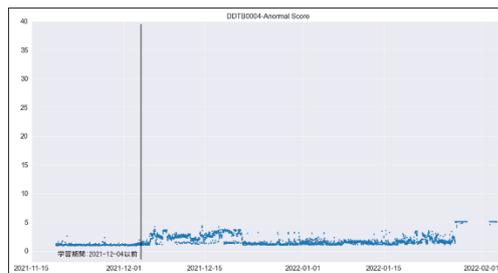


図 140 ④No2 主エアコンプレッサーの異常診断例

・ 3F フロア : SECOND DECK

3F 部分には、ECR (エンジンコントロールルーム) があり、図 142 の Wi-Fi アクセスポイントとコントローラを設置している。IoT 無線振動・温度センサを設置した対象機器はない。フロアレイアウトを図 141 に示す。

また、3F フロア、ECR 側から見下ろしたところに親機を設置した。図 143 で示す。

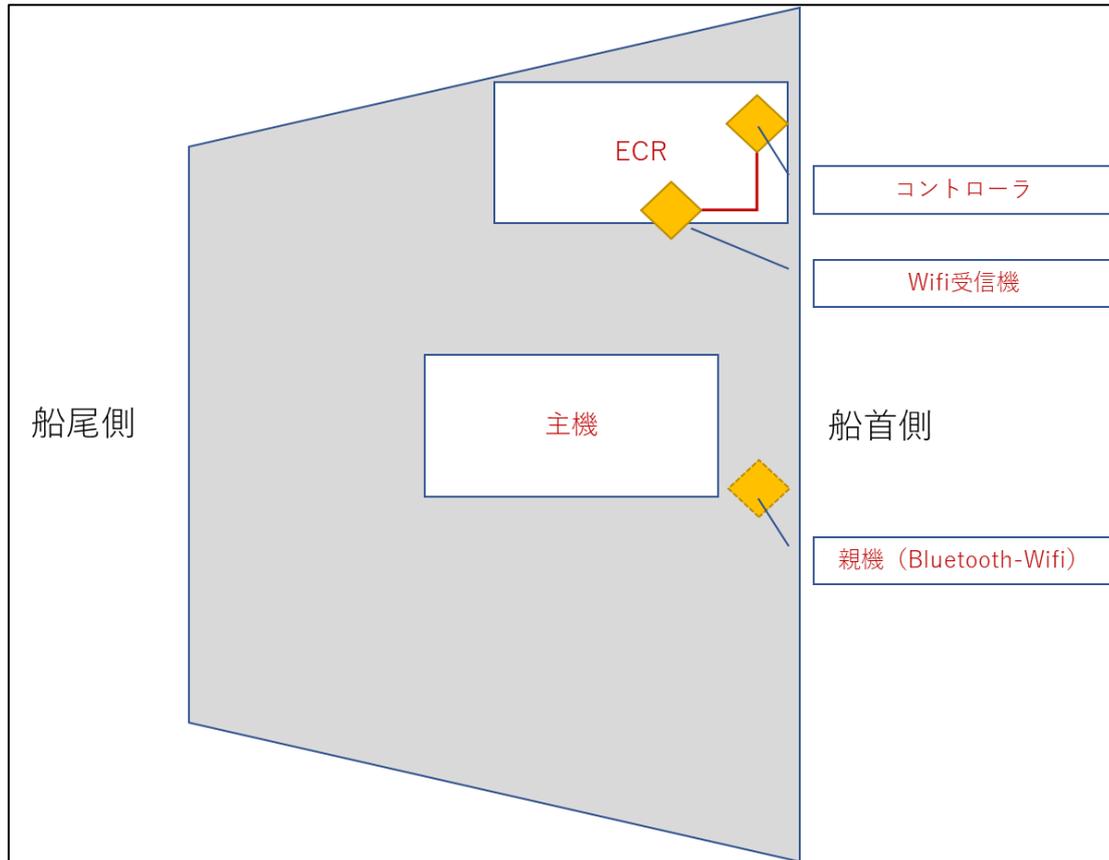


図 141 3F : SECOND DECK

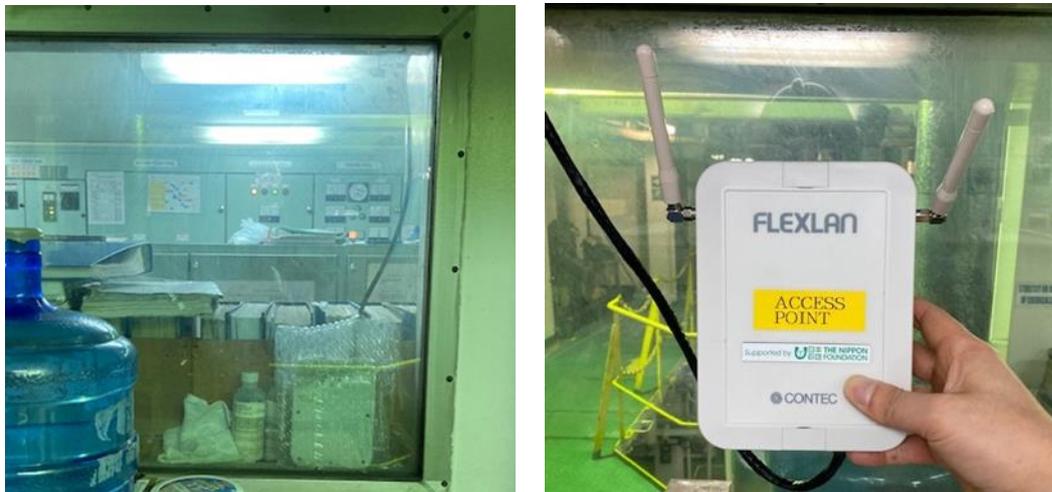


図 142 ECR と Wi-Fi アクセスポイント



図 143 3F フロア (ECR 前) から見た親機の設置場所

・ 4F フロア : No. 1 PART. DECK

4F 部分には、No. 1 及び、No. 2 FO ピューリファイヤーがあり、それぞれに IoT 無線振動・温度センサを 2 台設置している。センサの設置場所を図 144 に示す。

4F フロアに設置した、IoT 無線振動・温度センサの設置機器と設置場所の写真、計測データと異常診断結果は、以下の図 145～図 150 に示す。

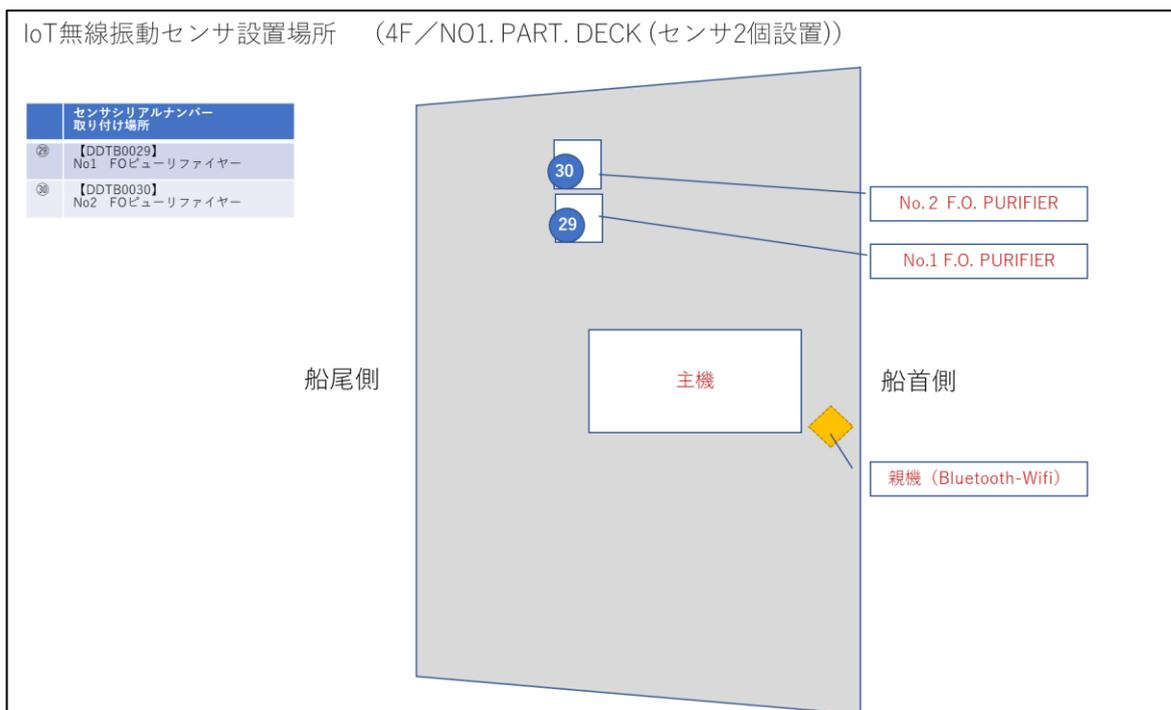


図 144 4F : No. 1 PART. DECK

②9 No1 FOピューリファイヤー

センサシリアルナンバー 取り付け場所
② 【DDTB0002】 LOピューリファイヤー
③ 【DDTB0003】 No1主エアコンプレッサー
④ 【DDTB0004】 No2主エアコンプレッサー
⑬ 【DDTB0019】 No2補機Engポンプ側(前/左舷)
⑳ 【DDTB0020】 No2補機Eng 発電機反直結側
㉑ 【DDTB0021】 No1補機Engポンプ側(前/左舷)
㉒ 【DDTB0022】 No1補機Eng発電機反直結側
㉓ 【DDTB0023】 主機前側(右舷)
㉔ 【DDTB0024】 主機ベラ側(左舷)
㉕ 【DDTB0025】 FO輸送ポンプ モータ側
㉖ 【DDTB0026】 No1 主機LOポンプ
㉗ 【DDTB0027】 No2 主機LOポンプ
㉘ 【DDTB0028】 FO輸送ポンプ ポンプ側
㉙ 【DDTB0029】 No1 FOピューリファイヤー
㉚ 【DDTB0030】 No2 FOピューリファイヤー



図 145 ②9No1 FOピューリファイヤー のセンサ設置場所

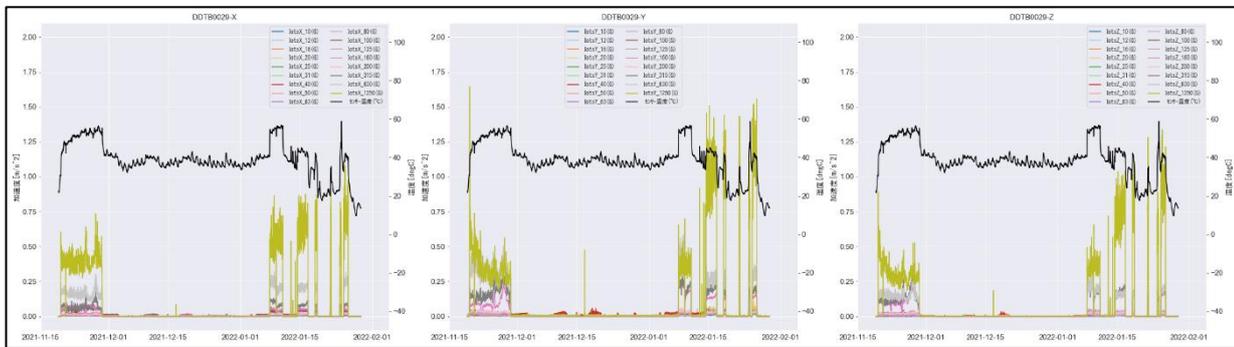


図 146 ②9No1 FOピューリファイヤー 設置センサの振動データ (X, Y, Z 軸)

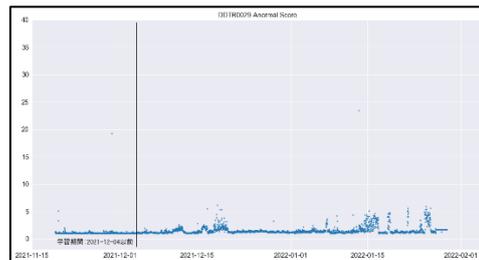


図 147 ②9No1 FOピューリファイヤーの異常診断例

③①No2FOピューリファイヤー

センサシリアルナンバー 取り付け場所
② 【DDTB0002】 LOピューリファイヤー
③ 【DDTB0003】 No1主エアコンプレッサー
④ 【DDTB0004】 No2主エアコンプレッサー
⑬ 【DDTB0019】 No2補機Engポンプ側(前/左舷)
⑳ 【DDTB0020】 No2補機Eng 発電機反直結側
㉑ 【DDTB0021】 No1補機Engポンプ側(前/左舷)
㉒ 【DDTB0022】 No1補機Eng 発電機反直結側
㉓ 【DDTB0023】 主機前側(右舷)
㉔ 【DDTB0024】 主機ベラ側(左舷)
㉕ 【DDTB0025】 FO輸送ポンプ モータ側
㉖ 【DDTB0026】 No1 主機LOポンプ
㉗ 【DDTB0027】 No2 主機LOポンプ
㉘ 【DDTB0028】 FO輸送ポンプ ポンプ側
㉙ 【DDTB0029】 No1 FOピューリファイヤー
③① 【DDTB0030】 No2 FOピューリファイヤー



図 148 ③①No2 FOピューリファイヤー のセンサ設置場所



図 149 ③①No2 FOピューリファイヤー 設置センサの振動データ (X, Y, Z 軸)

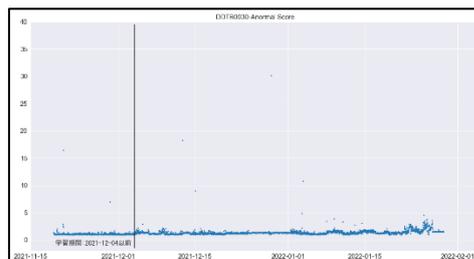


図 150 ③①No2 FOピューリファイヤーの異常診断例

15.3 実船試験環境下での電波環境の確認

今回、IoT 無線振動・温度センサシステムを船舶内に設置するにあたり、事前に使用する無線(Wi-Fi 及びBluetooth Low Energy)の 2.4GHz 周波数帯に影響を与える電波が飛んでいないかをスペクトラムアナライザを用いて調査した。図 151～図 153 は、1F, 2F, 3F で電波環境を計測した場所を示す。

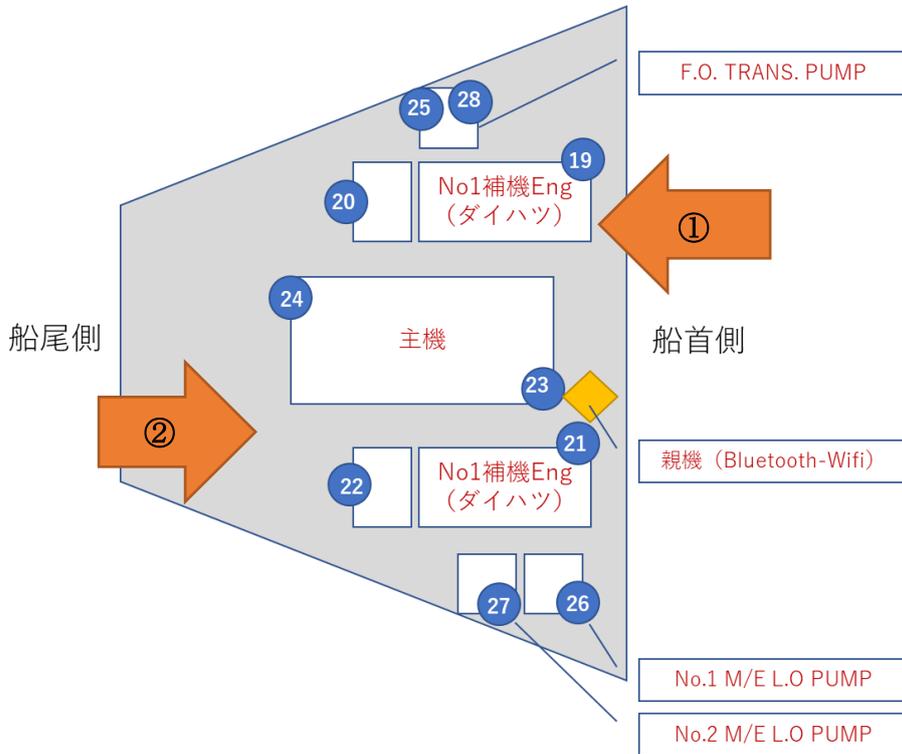


図 151 1F : BOTTOM FLOOR での計測位置

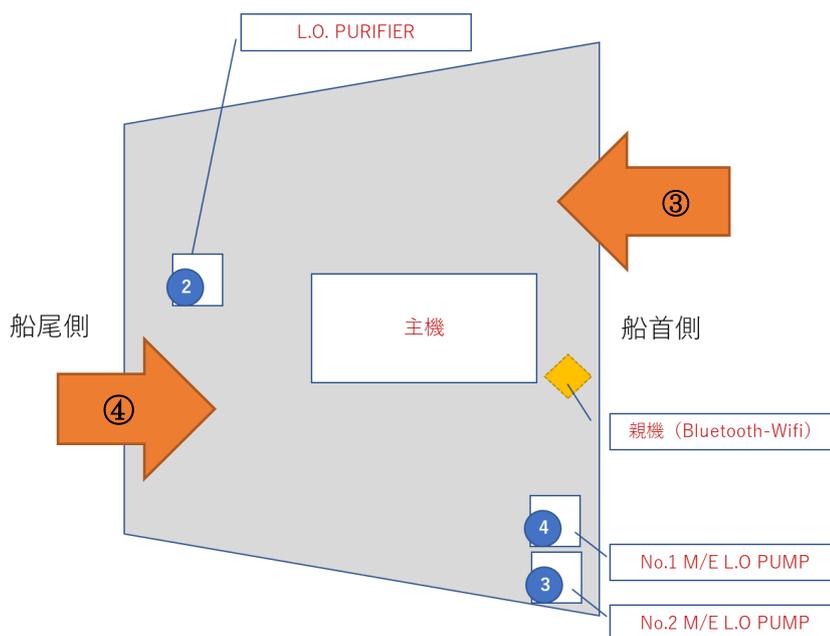


図 152 2F : NO. 2 PART. DECK での計測位置

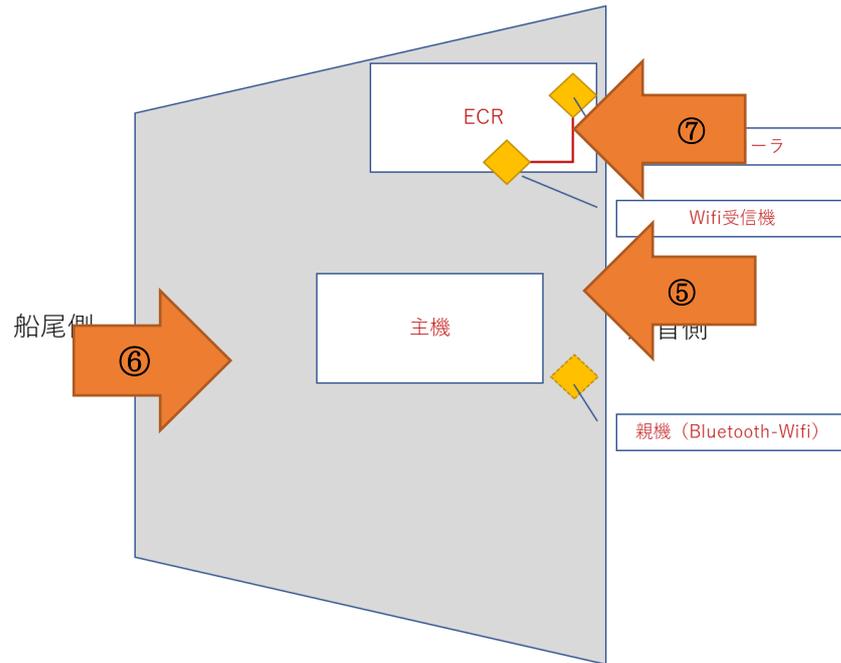


図 153 3F : SECOND DECK での計測位置

なお、スペクトラムアナライザ測定時には、IoT 無線振動・温度センサシステムの電源は切っており、当該システムからの電波は発信されていない。

スペクトラムアナライザは MICRONIX 社製 MSA338、アンテナは MICRONIX 社製 M305 である。図 154 に、スペクトラムアナライザの測定条件と設定を示す。

センター周波数	2.44GHz
周波数スパン	100MHz
分解能帯域幅	1MHz
ビデオバンド帯域幅	1MHz
基準レベル	-30dBm
掃引時間	0.1sec
演算	MAX(最大値測定)

図 154 MSA338 の測定条件と設定

図 155～図 161 に、計測結果を示す。比較対象として図 162 に、令和 2 年度に計測した実施者工場内のコージェネレーション設備での電磁波環境の測定波形を示す。

結論として、船内環境では、実施者工場内の電磁波環境と比較して、Bluetooth や Wi-Fi 通信の周波数帯にほとんど電波が飛んでおらず、今回開発したシステムに影響の与える恐れは少ない状況と分かった。

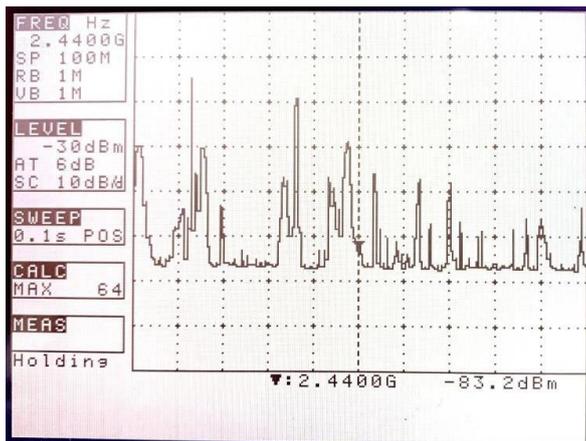


図 155 位置①の電磁波環境

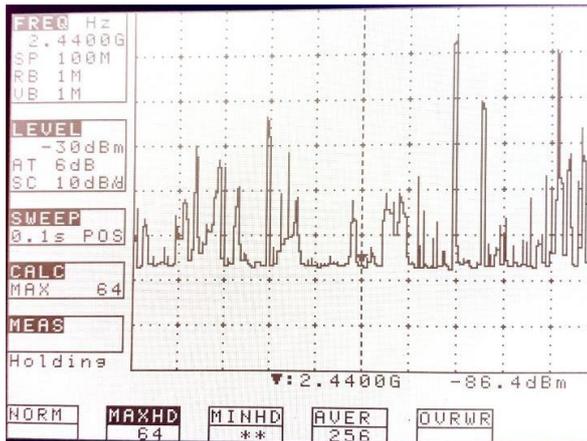


図 156 位置②の電磁波環境

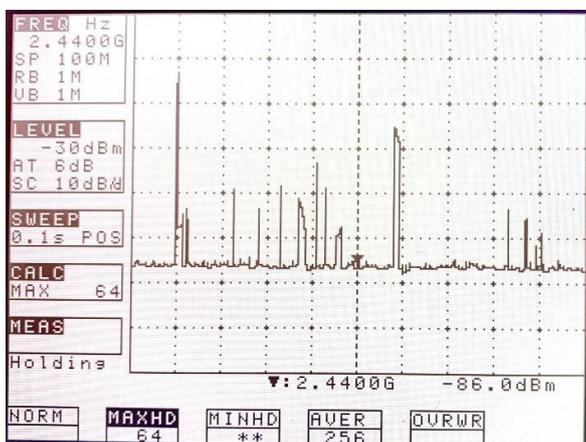


図 157 位置③の電磁波環境

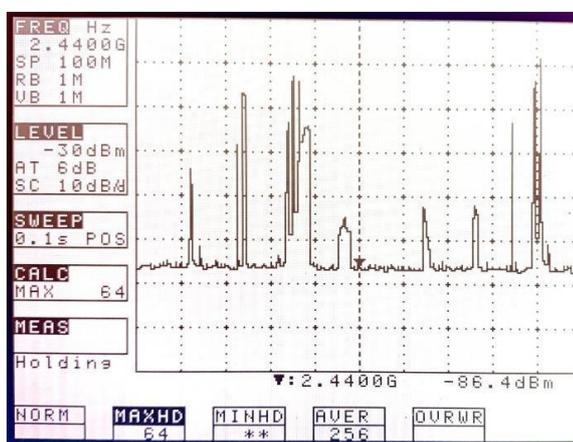


図 158 位置④の電磁波環境

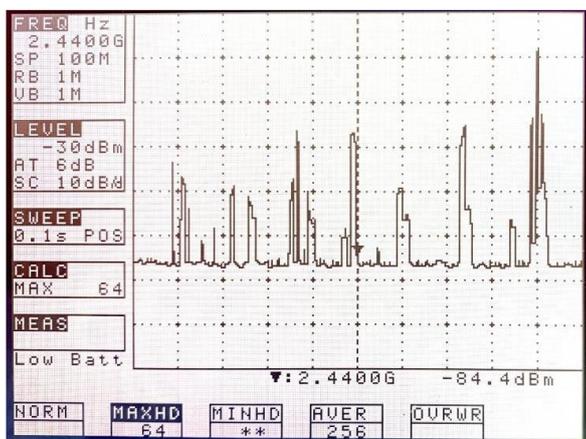


図 159 位置⑤の電磁波環境

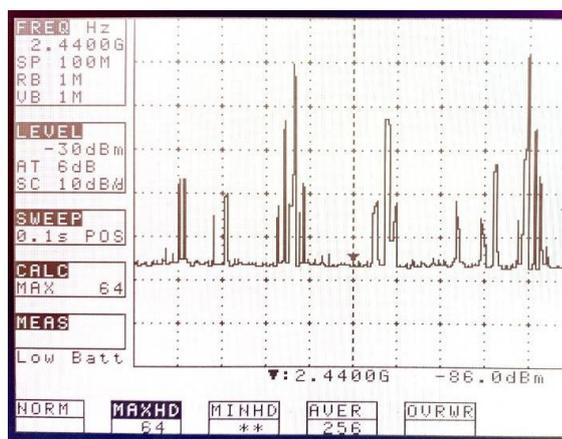


図 160 位置⑥の電磁波環境

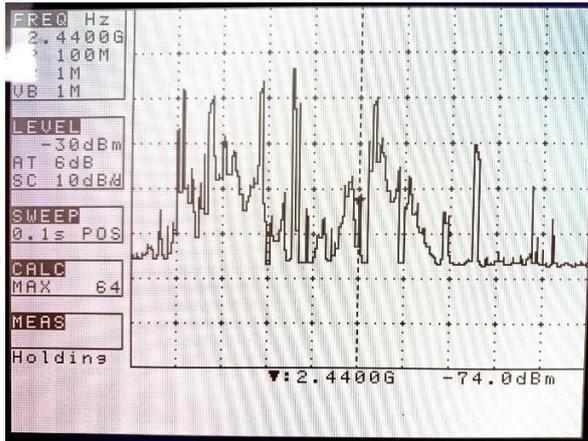


図 161 位置⑦ (ECR 内) の電磁波環境

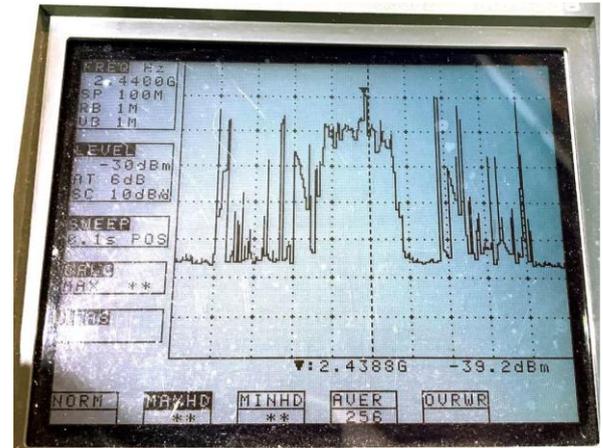


図 162 (参考) 実施社の工場内での電磁波環境

15.4 実船環境下での子機と親機の理想的な位置関係の確認

- ・フロア各所へセンサ配置した場合の無線強度の計測

実船環境下に於いて、子機配置に制限が生じないか検証するために、機関室のフロア内に IoT 無線振動・温度センサをメッシュ状に設置し、それぞれのセンサの電波強度を測定した。

これにより、機関室特有の機器設置や電波の回り込みなど、特殊な環境下での BLE の到達距離や電波強度に問題が発生しないかを調査した。

図 163 に、1F フロアの子機と親機の BLE 電波環境の計測、図 164 に、2F の子機と親機の BLE 電波環境の計測結果を示す。

図 163、図 164 の左側の○で囲んだ数字は、機関室の 1F 及び、2F にメッシュ状に配置した子機の番号を示したものである。

図 163、図 164 の右側の数字は、子機からの電波を親機が受信する際の電波強度 (dBm) を示しており、値が大きければ電波強度が強いことを示す。なお、右側の数字の配置は、左側のセンサレイアウトに合わせて計測値を配置したものである。

右上側の配置は計測した電波強度の平均値、右下側の配置は最低値を示している。電波強度の減衰を見る場合は下側の値を参照頂きたい。

ちなみに、「14.7 無線通信距離の評価」で示すように、IoT 無線振動・温度センサは-80dBmを下回ると受信できない場合が発生し始めることが分かっており、そこを超えて電波強度が下がるにつれて送受信の成功確率は大きく下がっていく。

無線通信では、一般に電波強度が強いほうが通信環境はよく、子機と親機の距離が遠くなるにつれて電波強度は減衰する。なお、BLE が採用する 2.4GHz 帯の電波の特徴として直進性が強いいため、大型機器等が電磁波の経路を遮ることによる影響や、電波が遮られた場合、機器の後ろ側にまで廻りこむことができるか等が問題になることがある。

結論として、機関室は金属で囲まれた部屋であり、電磁波は反射/拡散する為、20m 四方のスペース程度のフロア面積では、一つの親機で子機をフロアのどこにおいても十分に送受信ができる環境となることが分かった。

・実際に機器配置したセンサの電波強度計測

次に、1F～4F フロアの対象機器に設置したセンサの電波強度を計測したデータを図 165～図 167 に示す。各センサから届く電波強度は、センサ設置場所を示すセンサ番号の横に並べて表した。

二つ並ぶ値の左側が最低値、右側が平均値である。濃緑色の方が電波強度が強く、黄色に近いほうが電波強度が弱いという表現で、電波強度が直感的に分かるようグラデーション表示を行った。

IoT無線振動センサ設置場所 (最下層/Bottom Floor (センサ10個設置))

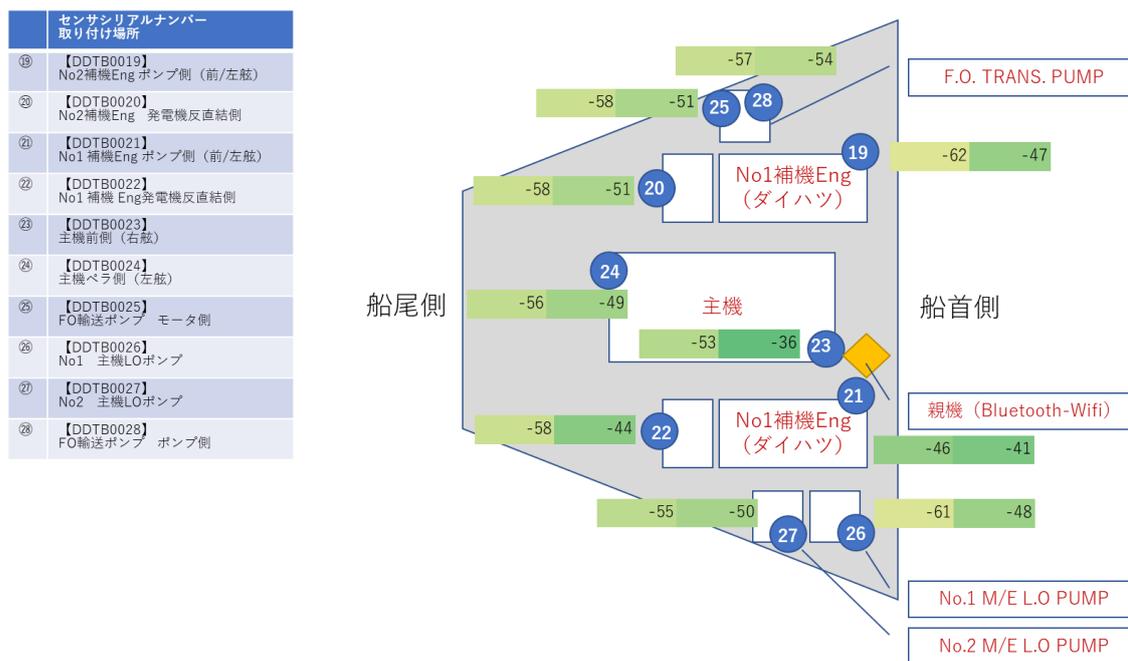


図 165 1F : BOTTOM FLOOR の子機配置と親機の BLE 電波受信強度

IoT無線振動センサ設置場所 (2F/No2 PART. DECK (センサ3個設置))

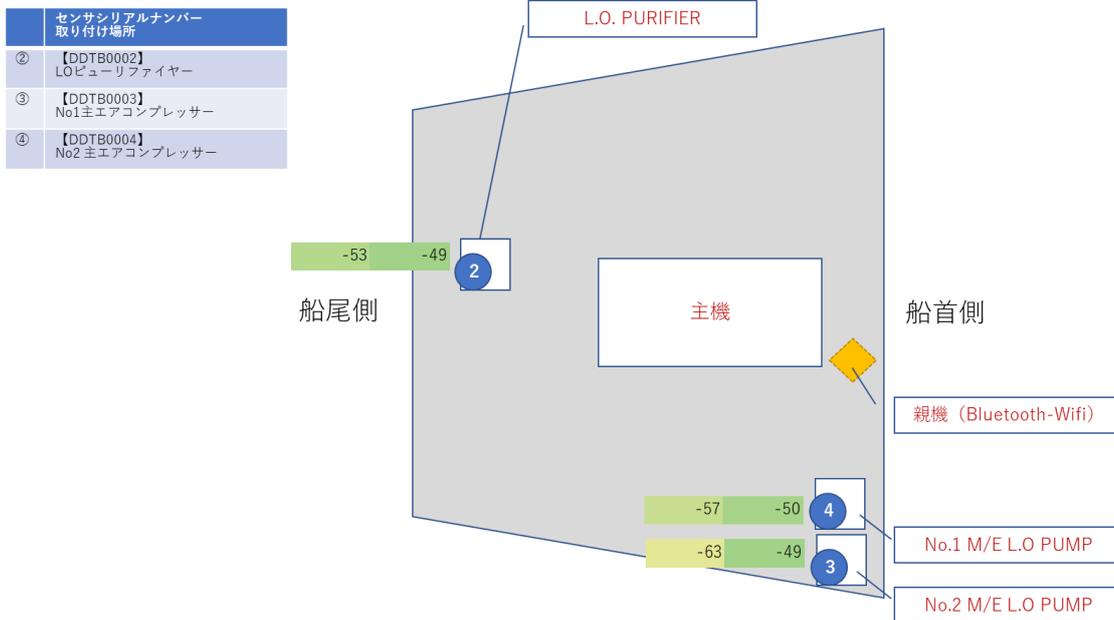


図 166 2F : BOTTOM FLOOR の子機配置と親機の BLE 電波受信強度

IoT無線振動センサ設置場所 (4F/NO1. PART. DECK (センサ2個設置))

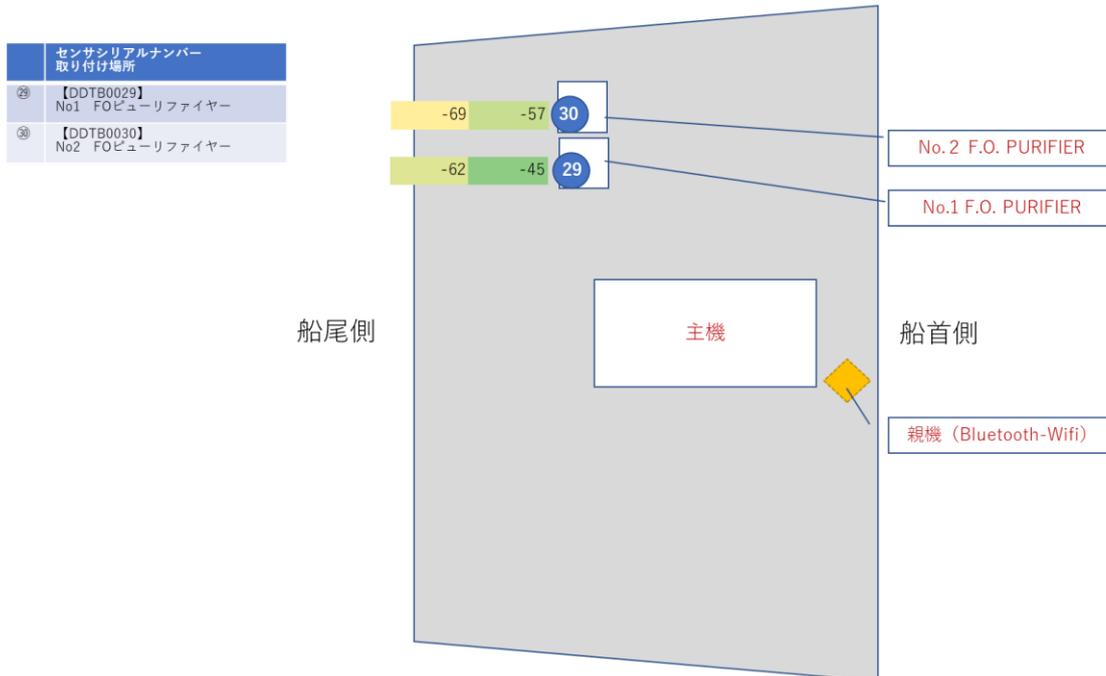


図 167 4F : BOTTOM FLOOR の子機配置と親機の BLE 電波受信強度

親機は1Fと2Fのフロアの境目部分に設置されており、1Fも2Fも同様に電波が飛ぶと推定される。なお、4Fにも2か所にセンサを設置しているがこの二つが親機からは最も距離が遠い場所に設置されている。

今回、図 165～図 167 に示す機関室内の様々な場所に IoT 無線振動センサを設置したが、それぞれのセンサの電波強度を確認することで、距離で減衰する無線通信に対してどれだけのマージンが確保できたかを把握できた。つまり、実際の設置環境においても、親機の数や設置範囲が適切かを電波強度から推定することが可能と考えられる。

最初に、1F の機器に設置したセンサすべての左側（最低値）の電波強度を確認する。最も低い値を示すセンサは、センサ⑱の-62dBm であるが、通信が劣化し始める-80dBm までは 18dBm のマージンがある。すなわち、1F は一つの親機でフロア全体のどこに設置しても通信可能であった。

ちなみにこのセンサ⑱は、補機エンジンのフレーム下部に設置しており、親機から見てエンジンの陰になっていること、若干グレーチングの下に潜り込んだ場所に設置されていることから、電波強度が若干低くなったと推測している。

次に、2F の機器に設置したセンサすべての左側（最低値）の電波強度を確認する。最も低い値を示すセンサは、センサ③の-63dBm であるが、通信が劣化し始める-80dBm までは 17dBm のマージンがある。すなわち、2F も一つの親機でフロア全体のどこに設置しても通信可能と言える。ちなみに、このセンサ③も親機から見えない位置に設置されており、電波強度が若干低くなったと推測している。

3F はセンサの設置がない。

次に、4F の機器に設置したセンサすべての左側（最低値）の電波強度を確認する。最も低い値を示すセンサは、センサ⑳の-69dBm であるが、通信が劣化し始める-80dBm までは 11dBm のマージンがある。このセンサ⑳は、今回計測した中で最も親機から遠く、かつ奥まったところの機器に設置しており、電波強度も他より大きく下がる-69dBm という数字であったが、実際の振動データも問題なく計測ができていたことを確認している。

今回、20m×20m×20m 程度の空間を持つバルクキャリアの機関室程度の大きさであれば、十分にマージンを持った電波強度が得られることが分かった。また、1 台の親機により配置した全てのセンサと常に正常に通信が行われていることが分かった。

これらよりいえることは、各フロアが閉塞空間でない場合、電波が満遍なく飛ぶ位置に親機を設置できると、一つの親機で機関室のすべてを監視することが可能であるということである。

もし、1 つの親機と各センサの間で十分な電波強度が得られない場合は、リピーターや親機を複数台設置することでより望ましい電波環境に近づけることが可能であり、そのようなオプションも無線システムを使用する場合には用意が必要となるということが判った。

16 船級試験対応（予備試験）

16.1 EMC 試験について

船級試験で行う EMC 試験の中から、特に重要な IACS E10 Rev.8 (Corr.1 Jan 2022) に示す No.14 Electromagnetic field/IEC61000-4-3:2020 (EMC イミュニティ試験：図 168 参照) 及び、No.19 Radiated Emission/CISPR 16-2-3:2016, IEC60945:2002 for 156-165MHz (EMC エミッション試験：図 169 参照) を試験基準に従って予備試験として実施した。

この2つの試験は、他の項目に比べて格段にハードルが高い。

EMC イミュニティ試験では、機器自身が外部から電磁的な干渉を受けても性能低下や誤動作を発生さない事を評価する。

また、EMC エミッション試験では、電子機器が発する電波が周辺機器類の性能低下や誤動作を引き起こす電磁的な妨害源とならない事を評価する。

E10					
NO.	TEST	PROCEDURE ACC. TO:*	TEST PARAMETERS	OTHER INFORMATION	
E10 (cont)	13.	Electrostatic discharge	IEC 61000-4-2:2008	Contact discharge: 6kV Air discharge: 2kV, 4kV, 8kV Interval between single discharges: 1 sec. No. of pulses: 10 per polarity According to test level 3.	- to simulate electrostatic discharge as may occur when persons touch the appliance; - the test is to be confined to the points and surfaces that can normally be reached by the operator; - Performance Criterion B (See Note 4).
	14.	Electromagnetic field	IEC 61000-4-3:2020	Frequency range: 80 MHz to 6 GHz Modulation**: 80% AM at 1000Hz Field strength: 10V/m Frequency sweep rate: $\leq 1.5 \times 10^{-3}$ decades/s (or 1%/3 sec) According to test level 3.	- to simulate electromagnetic fields radiated by different transmitters; - the test is to be confined to the appliances exposed to direct radiation by transmitters at their place of installation. - Performance criterion A (See Note 5) **If for tests of equipment an input signal with a modulation frequency of 1000 Hz is necessary a modulation frequency of 400 Hz may be chosen. - If an equipment is intended to receive radio signals for the purpose of radio communication (e.g. wifi router, remote radio controller), then the immunity limits at its communication frequency do not apply, subject to the provisions in UR E22.5.2.

EMC イミュニティ試験

図 168 IACS UR E10/Electromagnetic Field/IEC61000-4-3:2020

E10																																	
NO.	TEST	PROCEDURE ACC. TO:*	TEST PARAMETERS	OTHER INFORMATION																													
E10 (cont)	19.	Radiated Emission	CISPR 16-2-3:2016 IEC 60945:2002 for 156-165 MHz	Limits below 1000 MHz For equipment installed in the bridge and deck zone. <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td>Frequency range:</td> <td>Quasi peak limits:</td> </tr> <tr> <td>0.15 - 0.3 MHz</td> <td>80 - 52 dBμV/m</td> </tr> <tr> <td>0.3 - 30 MHz</td> <td>52 - 34 dBμV/m</td> </tr> <tr> <td>30 - 1000 MHz</td> <td>54 dBμV/m</td> </tr> <tr> <td>except for:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>156 - 165 MHz</td> <td>24 dBμV/m</td> </tr> </table> For equipment installed in the general power distribution zone. <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td>Frequency range:</td> <td>Quasi peak limits:</td> </tr> <tr> <td>0.15 - 30 MHz</td> <td>80 - 50 dBμV/m</td> </tr> <tr> <td>30 - 100 MHz</td> <td>60 - 54 dBμV/m</td> </tr> <tr> <td>100 - 1000 MHz</td> <td>54 dBμV/m</td> </tr> <tr> <td>except for:</td> <td></td> </tr> <tr> <td>156 - 165 MHz</td> <td>24 dBμV/m</td> </tr> </table> Limits above 1000 MHz <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td>Frequency range:</td> <td>Average limit:</td> </tr> <tr> <td>1000 - 6000 MHz</td> <td>54 dBμV/m</td> </tr> </table>	Frequency range:	Quasi peak limits:	0.15 - 0.3 MHz	80 - 52 dB μ V/m	0.3 - 30 MHz	52 - 34 dB μ V/m	30 - 1000 MHz	54 dB μ V/m	except for:		156 - 165 MHz	24 dB μ V/m	Frequency range:	Quasi peak limits:	0.15 - 30 MHz	80 - 50 dB μ V/m	30 - 100 MHz	60 - 54 dB μ V/m	100 - 1000 MHz	54 dB μ V/m	except for:		156 - 165 MHz	24 dB μ V/m	Frequency range:	Average limit:	1000 - 6000 MHz	54 dB μ V/m	- procedure in accordance with the standard but distance 3 m between equipment and antenna - for the frequency band 156 MHz to 165 MHz the measurement shall be repeated with a receiver bandwidth of 9 kHz (as per IEC 60945:2002). - alternatively the radiation limit at a distance of 3 m from the enclosure port over the frequency 156 MHz to 165 MHz shall be 30 dB micro-V/m Peak (as per IEC 60945:2002). - procedure in accordance with the standard (distance 3 m between equipment and antenna) - Equipment intended to transmit radio signals for the purpose of radio communication (e.g. wifi router, remote radio controller) may be exempted from limit, within its communication frequency range, subject to the provisions in UR E22.5.2.
	Frequency range:	Quasi peak limits:																															
0.15 - 0.3 MHz	80 - 52 dB μ V/m																																
0.3 - 30 MHz	52 - 34 dB μ V/m																																
30 - 1000 MHz	54 dB μ V/m																																
except for:																																	
156 - 165 MHz	24 dB μ V/m																																
Frequency range:	Quasi peak limits:																																
0.15 - 30 MHz	80 - 50 dB μ V/m																																
30 - 100 MHz	60 - 54 dB μ V/m																																
100 - 1000 MHz	54 dB μ V/m																																
except for:																																	
156 - 165 MHz	24 dB μ V/m																																
Frequency range:	Average limit:																																
1000 - 6000 MHz	54 dB μ V/m																																

EMC エミッション試験

図 169 IACS UR E10/Radiated Emission / CISPR 16-2-3:2016, IEC60945:2002

16.2 EMC 試験での供試体と試験環境

当該試験は、一般社団法人日本品質保証機構（JQA）の彩都 EMC 試験所にて、22 年 1 月 5 日～7 日に実施した。

試験期間は準備・撤収を加えて 3 日間、JQA の 3m 法電波暗室/シールドルームを貸し切り、供試体となる機器の試作メーカ担当者同席のうえ実施した。図 170 に、今回使用した JQA の電波暗室の全景を示す。

電波暗室は、部屋全体を磁気シールドし、天井や壁には電波吸収体が施工されている。外来電磁波の影響をうけず、また外部に妨害波として電波を漏洩しないように設計されており、安定した電磁波試験環境をつくることが可能である。

室内には、電磁波を発信/受信するための各種アンテナ、各種アンテナを取り付けるためのアンテナマスト、ターンテーブル、木製試験用机などが設置されており、船級試験規格以外にも、多種多様な EMC 試験環境を用意することができる。

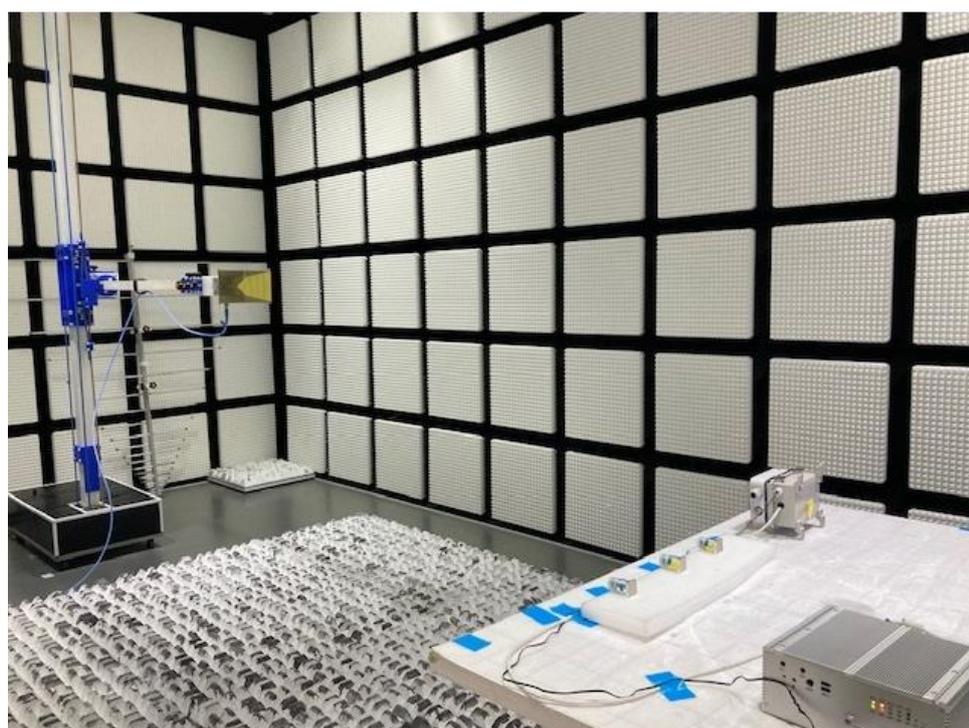


図 170 JQA の電波暗室と放射アンテナ、及び供試体の設置状況

今回の供試体は、図 172 に示す開発品一式、つまり子機（IoT 無線振動・温度センサ）、親機、コントローラを組み合わせたシステムに対して試験を実施した。

供試体の試験時の接続レイアウトは図 171 に示す。

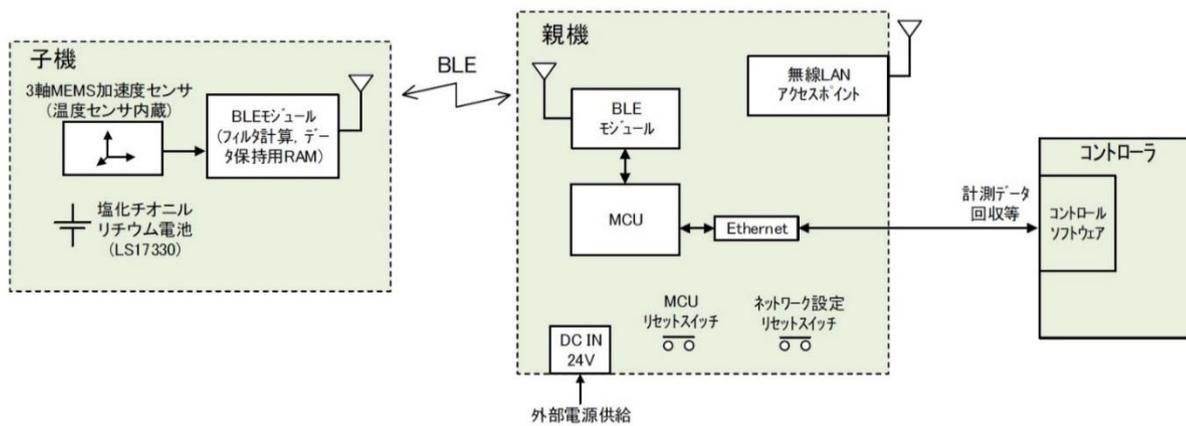


図 171 供試体の接続レイアウト



図 172 供試体（子機、親機、コントローラ）

16.3 EMC イミュニティ試験

(Electromagnetic field/IEC61000-4-3:2020)

イミュニティ試験の評価指標は、子機が定期的に発信する電波を親機が受信する際の、電波強度 R_{si} (dBm) を監視することで行う。特定の周波数の電磁波を受けた際に、子機や親機の機能に問題が生じる場合には、電波強度の低下や電波の送受信が停止することになるため、容易に異常状態の判断が可能である。

正常/異常の判断基準として、供試体が電磁波の影響を受けてデータが欠損したとしても、子機が内部でバックアップするデータを再送することで復旧できた場合（データの欠落を補完した場合は、当該システムの機能には影響が出ない為、正常と判定している。

図 173 に供試体の機器設置状況、図 174～176 は試験テーブルに設置した供試体と電界照射面を写真で示す。

次に試験の前提について整理する。

- ・ 供試体は、子機 3 台、親機 1 台、コントローラ 1 台とする。
- ・ 供試体は、電波暗室内の試験テーブルに配置する。
- ・ 子機と親機の通信は、BLE で行う。通信のインターバルは、30 秒とする。
- ・ 親機とコントローラの通信は、有線 LAN で行う。
- ・ 子機は、内蔵バッテリー駆動とする。親機は、外部から DC24V を供給する。
- ・ コントローラは、外部から AC100V を供給する。
- ・ コントローラのモニタ画面に表示される子機データは、30 秒のインターバルで更新される。
- ・ 子機データに文字化けや異常数値が現れないことを確認する。

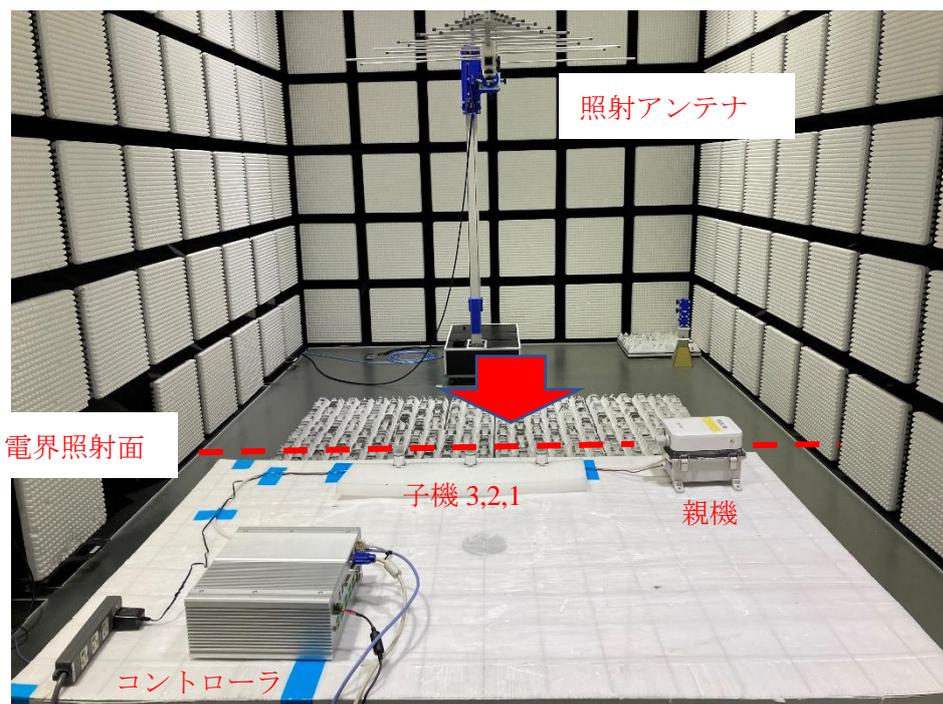


図 173 EMC イミュニティ試験の機器設置状況

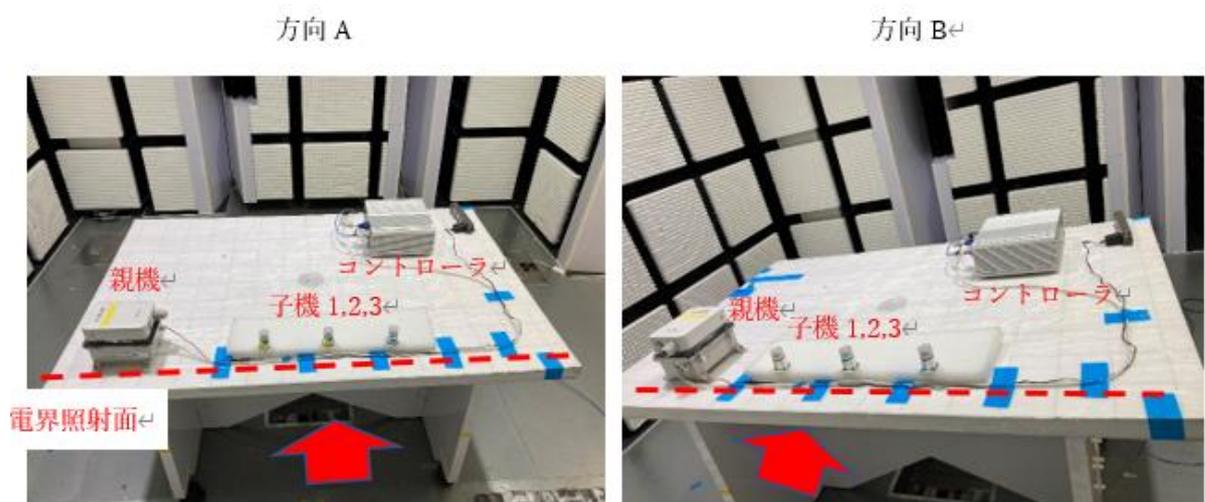


図 174 電界照射面 (方向 A) (方向 B)

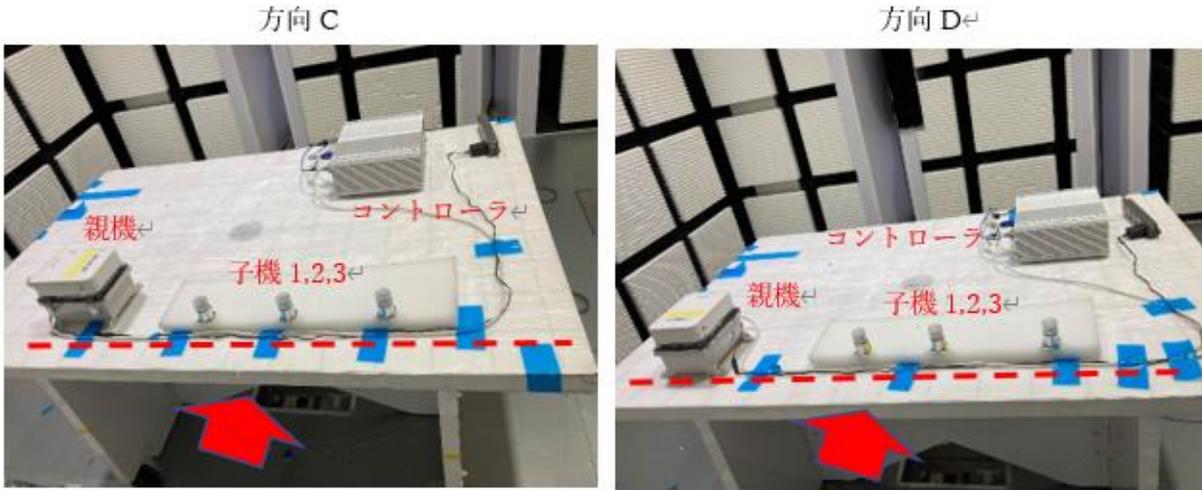


図 175 電界照射面 (方向 C) (方向 D)

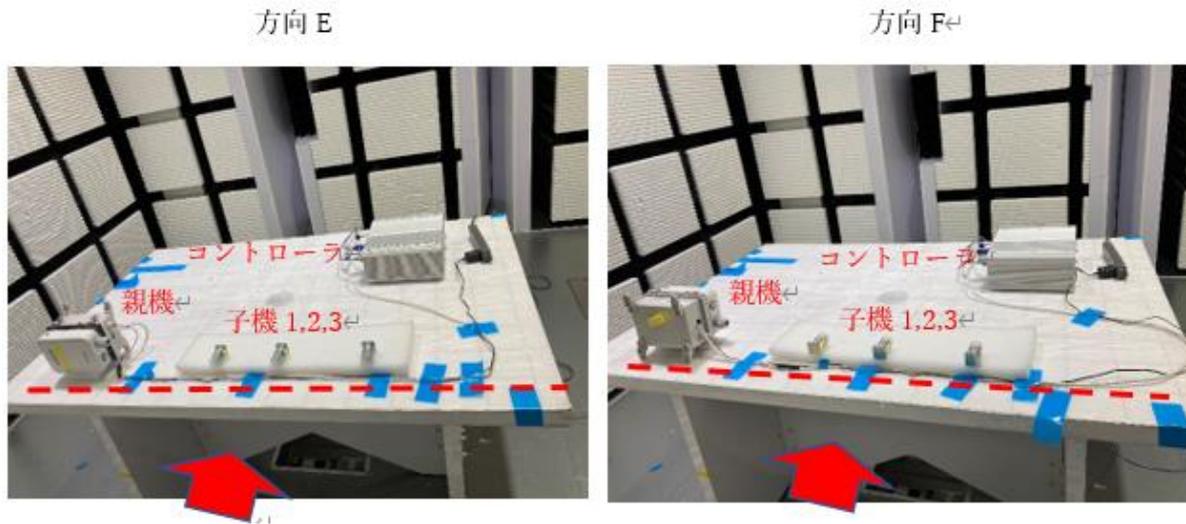


図 176 電界照射面 (方向 E) (方向 F)

・試験結果

【子機 1 (DDTB0005)】の通信結果 (図 177)

電界照射時、電波強度は、表示 0219 (-36 [dB]) → 0181 (-74 [dB]) まで低下するが、子機のデータリカバリ機能が働き、データ欠損することはなかった。 判定：問題なし



図 177 子機 1 の通信データ例

【子機 2 (DDTB0006)】の通信結果 (図 178)

電界照射時、電波強度は、表示 0215(-40[dB])→0200(-55[dB])まで低下するが、受信限界(-80[dB])には達しておらず、データ欠落する事は無かった。 判定：問題なし

RSI

No.	種	Time	10(Hz)	12.5(Hz)	16(Hz)	20(Hz)	25(Hz)	31.5(Hz)	40(Hz)	50(Hz)	63(Hz)	80(Hz)	100(Hz)	125(Hz)	160(Hz)	200(Hz)	315(Hz)	630(Hz)	1250(Hz)	T(°C)	電圧(V)	Rs	
2841	X輸	2022/01/07 16:16:30	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.8	357	0215
2842	Y輸	2022/01/07 16:16:30	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.8	357	0215
2843	Z輸	2022/01/07 16:16:30	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.8	357	0215
2838	X輸	2022/01/07 16:16:00	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.8	358	0200
2839	Y輸	2022/01/07 16:16:00	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.8	358	0200
2840	Z輸	2022/01/07 16:16:00	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.8	358	0200
2835	X輸	2022/01/07 16:15:30	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.8	357	0215
2836	Y輸	2022/01/07 16:15:30	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.8	357	0215
2837	Z輸	2022/01/07 16:15:30	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.8	357	0215

図 178 子機 2 の通信データ例

【子機 3 (DDTB0007)】の通信結果 (図 179)

電界照射時、電波強度は、表示 0211(-44[dB])→0149(-106[dB])まで低下、受信限界(-80[dB])を超えたため一時的に通信不良となったが、子機のリカバリ機能が働き、データ欠落する事は無かった。 判定：問題なし

RSI

No.	種	Time	10(Hz)	12.5(Hz)	16(Hz)	20(Hz)	25(Hz)	31.5(Hz)	40(Hz)	50(Hz)	63(Hz)	80(Hz)	100(Hz)	125(Hz)	160(Hz)	200(Hz)	315(Hz)	630(Hz)	1250(Hz)	T(°C)	電圧(V)	Rs	
2553	X輸	2022/01/07 15:40:20	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.7	354	0149
2554	Y輸	2022/01/07 15:40:20	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.7	354	0149
2555	Z輸	2022/01/07 15:40:20	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.7	354	0149
2550	X輸	2022/01/07 15:39:50	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.7	354	0149
2551	Y輸	2022/01/07 15:39:50	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.7	354	0149
2552	Z輸	2022/01/07 15:39:50	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.7	354	0149
2547	X輸	2022/01/07 15:39:20	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.8	355	0211
2548	Y輸	2022/01/07 15:39:20	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.8	355	0211
2549	Z輸	2022/01/07 15:39:20	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	17.8	355	0211

図 179 子機 3 の通信データ例

・結論

EMC イミュニティ試験では、規定される強度の電磁波を供試体に対し、スイープさせながら照射していくが、特定の周波数で電波強度が下落する場面があった。センサと親機の通信は、-80dBm まで問題なくできることを事前に確認しているが、この通信可能な電波強度を下回り通信ができない事例が 1 回発生した。

ただし、子機に実装しているリカバリ機能により、子機内部に留保するデータを次の通信確立時に自動再送して、データ欠落を自動補完することから、システムとして影響がでないことを確認できた。今回の試験により、子機のデータ欠損のリカバリ機能が、たいへん有効に働くことを確認できた。

16.4 EMC エミッション試験

(Radiated Emission/CISPR 16-2-3:2016, IEC60945:2002 for 156-165MHz)

エミッション試験の評価方法は、電波暗室内に供試体を稼働した状態で設置し、供試体が発する電磁波を受信アンテナで受信し、その値を横軸周波数、縦軸電磁波強度のグラフにプロットする。グラフには、IACS E10 に規定されている規制値を重ねて、マージンをもって規制値内に収まるかを確認する。

なお、マージンがない場合、または超えてしまう場合は、供試体側に EMC 対策を施す必要が生じる。今回の試作品を供試体として計測することで、その電磁的な弱点を把握し、改善が必要な個所を特定することを目的とした。

図 180 に供試体の機器設置状況を写真で示す。

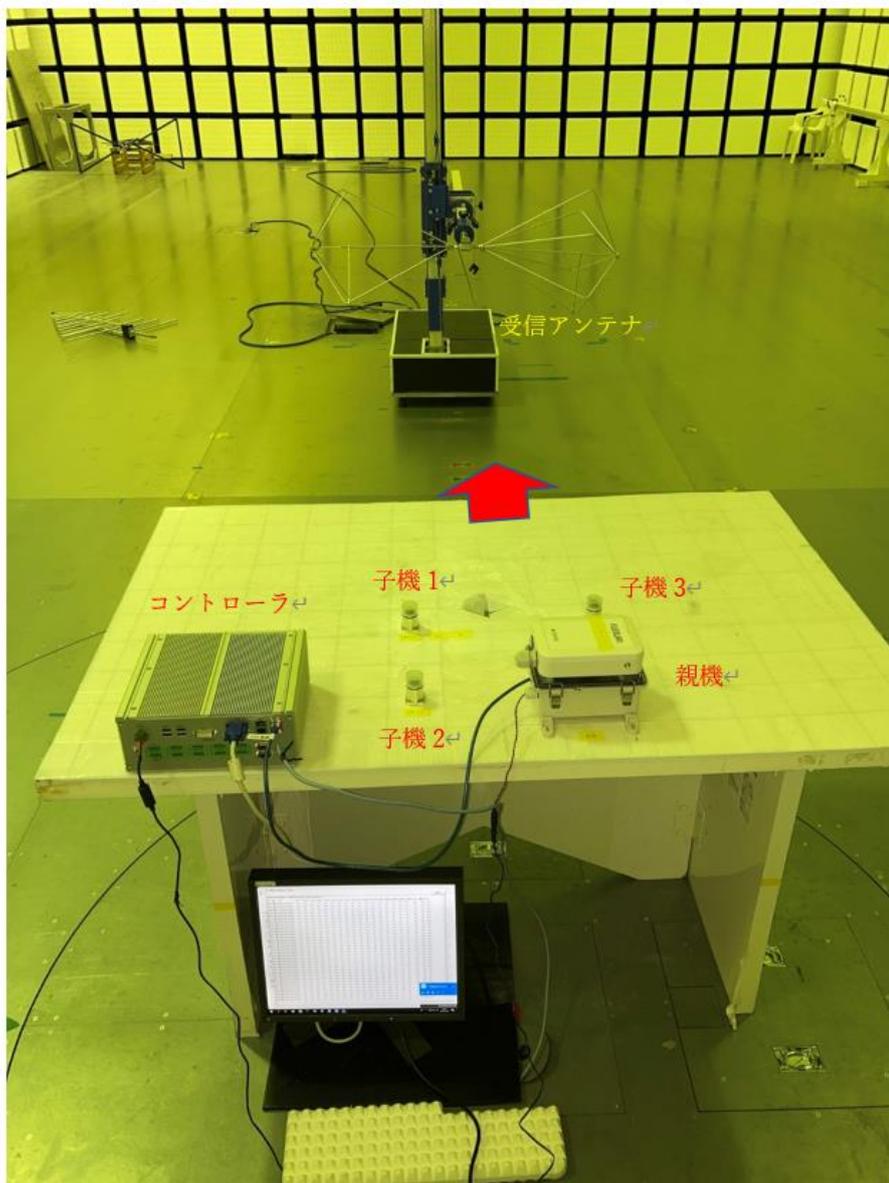


図 180 EMC エミッション試験での機器設置状況

・JQA より入手した、エミッション試験結果を図 181、図 182 に示す。

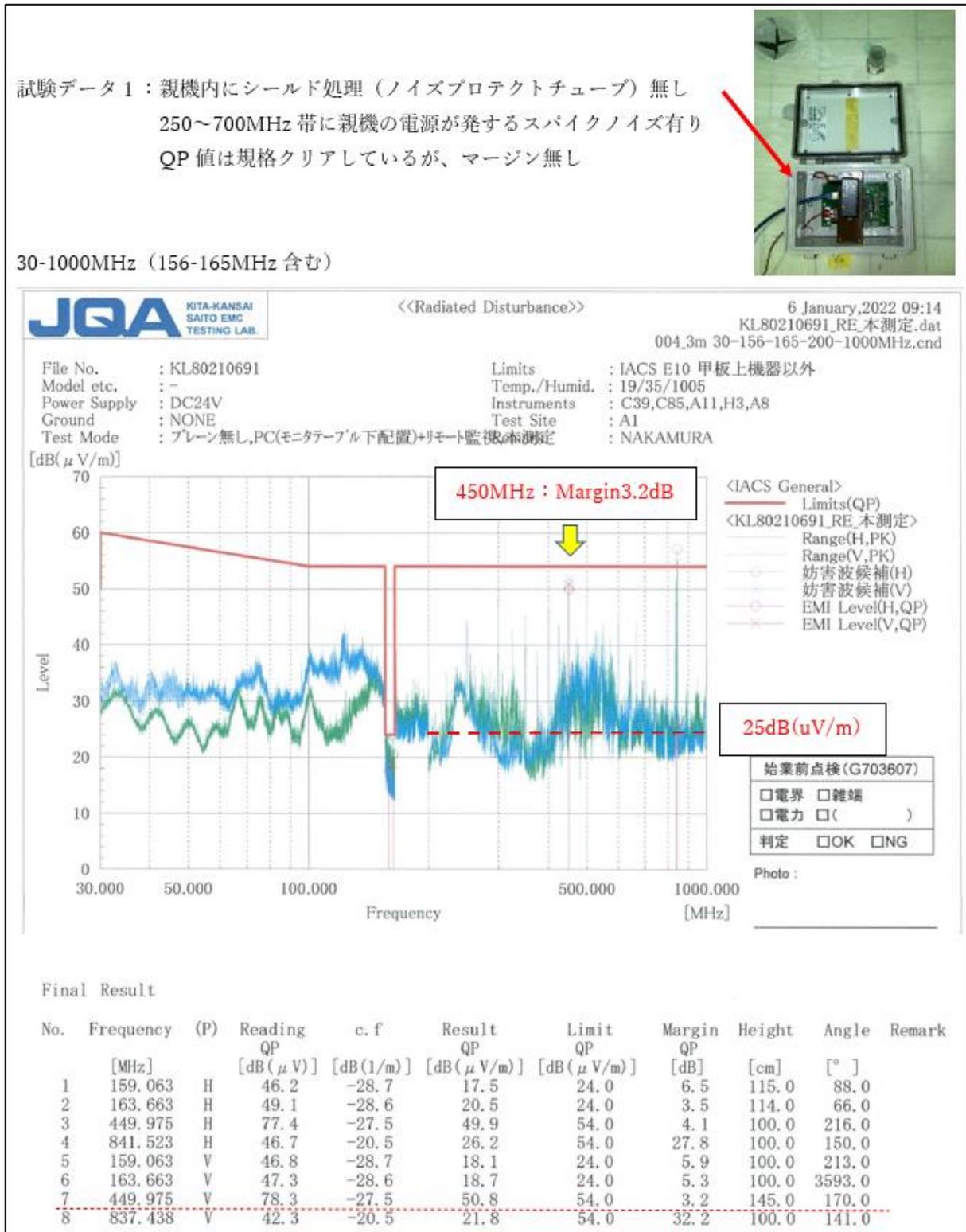


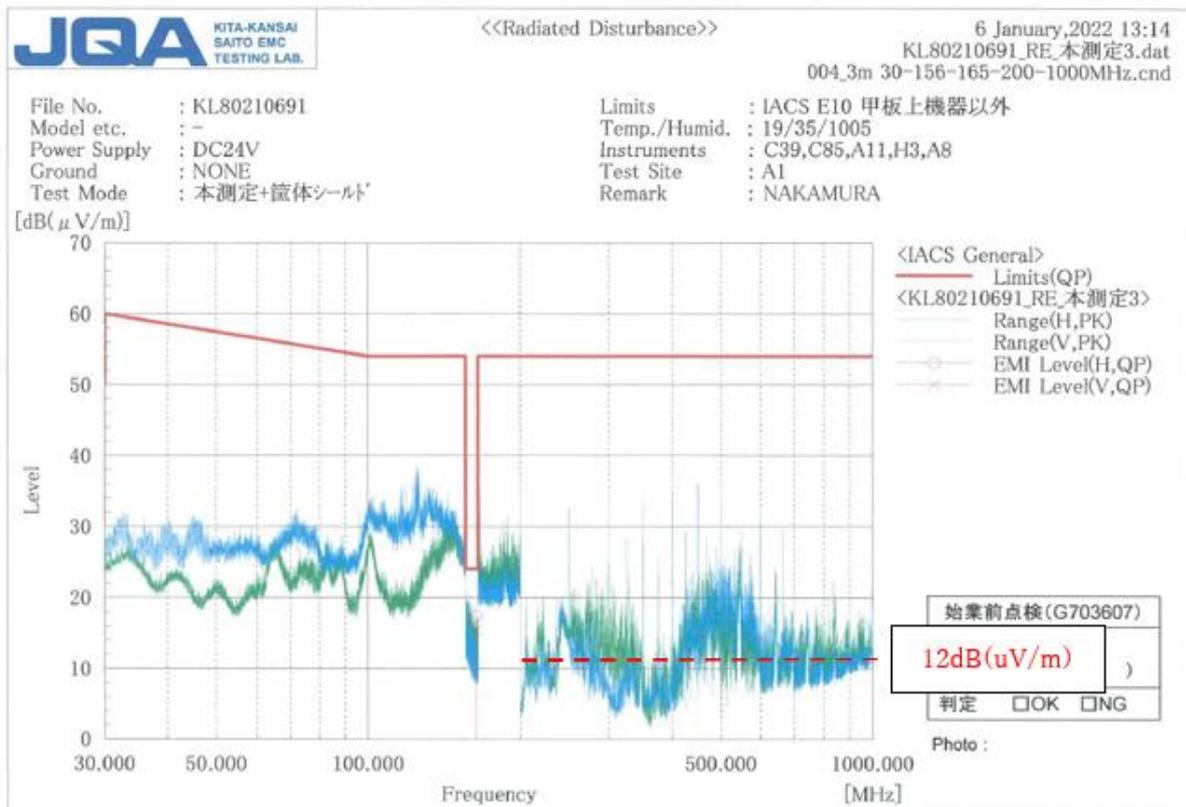
図 181 エミッション試験の結果

グラフ上の赤い線が IACS E10 で規定される規制値である。船級試験では、この規制値を超えないことが要求される。規制値までのマージンが少ないと本受験の際にも超過するリスクがあるため、その対策を本試験中に追加検討した。

試験データ 2：親機内にシールド処理（ノイズプロテクトチューブ）有り
 250～700MHz 帯に親機の電源が発するスパイクパルスが
 低減、約 10dBm の減衰効果が認められた。
 但し、シールド処理をし過ぎると、通信に使用する電波も
 低減してしまうため、商用設計にて最適化検討が必要。
 QP 値は規格クリアしており、十分なマージン有り。



30-1000MHz (156-165MHz 含む)



Final Result

No.	Frequency [MHz]	(P)	Reading QP [dB(μ V)]	c. f [dB(1/m)]	Result QP [dB(μ V/m)]	Limit QP [dB(μ V/m)]	Margin QP [dB]	Height [cm]	Angle [°]	Remark
1	163.663	H	45.9	-28.6	17.3	24.0	6.7	114.0	232.0	
2	163.663	V	43.9	-28.6	15.3	24.0	8.7	100.0	355.0	

図 182 エミッション試験の結果

図 181 のデータから、450Hz の周波数でマージンが 3.2dB しかないことから、供試体から何らかのノイズが発生していることが分かる。

調査の結果、親機に搭載する電源モジュール（市販品）が発するスパイクノイズが起因しているということが判明した。

対策として図 182 に示す、親機内にノイズプロテクトチューブによるシールド処理を追加することで、250MHz～700MHz 帯で電源モジュールが発するスパイクノイズを低減し、3.2dB しかなかったマージンを 10dB 以上に改善することができた。

ただし、親機は通信機器であるため、ノイズを押しえすぎると電波の送受信に影響が生じる可能性がある。無線通信能力とノイズ抑止のバランスを考えた改善が必要であることが分かった。それ以外の部分では大きな問題は発生せず、上記課題の解決により本受験はクリアできるであろうと判断している。

なお、船級の型式承認試験で特徴的な部分として QP 値と言われる 156-165MHz 帯(非常用無線帯域であり、この周波数帯域は発信する電波強度を厳しく制限される)の帯域も、十分なマージンをもって規格値をクリアできていることが分かった。

17. 成果について

令和3年度に実施した当該、新製品開発に関する研究開発では、令和2年度の製品開発により把握した課題を追加した製品開発と試験を実施することで、より船舶の機関室で利用することを前提としたIoT無線振動・温度センサ及び機器状態監視システムの技術開発を行うことができた。

17.1 令和3年度の実施内容

2021年度(令和3年度)の実施内容

事業内容

1. 事業内容：IoT無線振動・温度センサ及び機器状態監視診断システムの技術開発

(1) IoT無線振動・温度センサ及び機器状態監視診断システムの調査

令和2年度に行った開発では、提示したすべての目標を達成することができた。

その達成にあたり、小型軽量のIoT無線振動・温度センサの開発を完了できたが、そのセンサの稼働時間に関する課題が見えた。

一般に電池で駆動する機器は、電池容量が大きければ大きいほど機器の稼働時間を延ばすことができる。当該センサも同様であり、電池容量とセンサの計測寿命はトレードオフであるが、令和2年度の開発内容として小型化を優先した結果、電池も小型を採用せざるを得ず、連続で長時間運用が難しいという新しい課題が見えた。

具体的には、30分間隔の計測で2.3年という推定連続駆動時間となった。

計測間隔を1時間、2時間と延ばすことで連続駆動時間を延ばすことは可能であるが、機器監視の観点からはなるべく短周期でのデータ収集が望まれるため、30分間隔で使用した場合の連続駆動時間を延長する必要があると判断した。

そこで、令和3年度の開発では、顧客のもとで3年程度は稼働すること、いわゆるドック間隔での交換対応が可能であることを最低限必要とする要件を追加し、見直すこととした。

(2) IoT無線振動・温度センサ及び状態監視診断システムの商用設計/試作

1) IoT無線振動・温度センサの設計

今回、当該開発品を製品化した際に、顧客のもとで3年程度は稼働すること、いわゆるドック間隔での交換対応が可能であることを最低限必要とし、商用製品を見越した仕様要件に見直した。

新しい要件を実現するためには、大きく電力消費を下げる必要があり、かつ可能な限り電池容量を増加させる両面での対応が必要となることが分かった。

前者の対応には、令和 2 年度開発の回路構成のままではこれ以上の低電力化は図れないため、新しい振動センサ／処理回路を再設計し、抜本的に電力消費を大きく下げることが必要となった。また、電池容量を小型化の思想からずれない程度に大型化し、容量を増加し、この両者を改善することによりバランスのよい製品を開発することとした。

今回、低消費電力を最優先にして、すべての設計を見直し、MEMS 振動センサ、CPU、駆動回路、BLE 通信、ソフトウェア等の再選定を行い、基板やソフトウェアの再設計の開発を行い、評価を行った結果、試験結果で示すように今期の目標である、

- ・センサ 1 個で 55 点のアナログ出力（1 方向 18 点×3 軸+温度）
- ・電池で一年以上の運用が可能
- ・無線電送距離 30m 以上を実現できるセンサの設計を行う

という目標は全て達成することができた。

加えて低消費電力の目標として設定した連続駆動時間 3 年以上という目標も、推定であるが 16.2 年と大幅過達で達成することができた。

つまり、目標をすべて達成し、かつ電池交換無しに運用時間が 10 年を超えるセンサの開発の可能性を示すことができた。

2) IoT 無線振動・温度センサの試作

令和 3 年度の設計に基づき試作品を製造手配し、計画数（40 個）の試作品を製造した。センサは性能検証を行ったあと、実船調査や船級予備試験にも利用した。

3) 機器状態監視診断システム/コントローラの設計

今回、IoT 無線振動・温度センサの信号を無線で親機を介してコントローラに至る通信システムの設計及び、機器状態監視診断コントローラを開発した。

今回、コントローラの必要要件を再検討した際に、機関室の監視対象機器数を考えると今後は大幅に接続できるセンサ数を増加させる必要があること、多数のセンサのデータ処理に加え、異常診断技術を採用すると計算処理負荷が増大すること、ユーザビリティを考えた様々な表示を行うための多彩な表示能力を必要とする等から、性能と拡張性とコストを考えて、Windows ベースの工業用小型 PC を採用した。

コントローラに組み込むソフトウェア開発では、センサデータの確実な取得や蓄積ができることは勿論のこと、異常診断ロジックを組み込める仕組みを搭載した。今後、開発されるさらに精度の良い異常診断ロジックも簡単に組み込めるよう配慮した構成でソフトウェア設計を行った。

これらの改善を加え、かつ令和3年度の目標を組み込んだ設計を行った結果、センサの同時接続数20センサ以上、システムはDC24Vで駆動を満足できるシステムとコントローラの開発を完了した。また、異常診断機能を採用し、コントローラに組みこんだ。

以上より、目標は達成することができた。

4) 機器状態監視診断システム/コントローラの試作

システムとコントローラは、計画に合わせて3式の製作を完了しており、目標を達成している。

同じく40個製作したセンサと組み合わせて各種試験の実施を行った。

そのうち、1セットは現在もシステムを本船に搭載して振動計測を継続している。

(3) 実船調査

試作したIoT無線振動・温度センサと機器状態監視診断システム/コントローラは、実船調査として株式会社商船三井、商船三井ドライバルク株式会社の協力を得て、商船三井ドライバルクの運航船であるMV. ALAHASに搭載した。実際の機関室を調査し、監視対象機器を船主と相談のうえ選定した。

各種機器への子機搭載の際には、電磁波環境や通信に関する様々な、実船でしかできない調査を行った。

2022年2月に計測データを一旦回収し、今回の報告書用に利用することで当初の目標を達成した。

なお、現在も本船に設置しており、継続して本船のデータを取得中である。今後得られるデータは異常診断等の開発に資する有効なデータとして、継続的な計測をお願いしている。

(4) 船級試験対応

製品の船級試験に必要な予備試験（環境試験、振動試験、EMC試験）を行う。

試作したIoT無線振動・温度センサと機器状態監視診断システム/コントローラの試作品を、一般社団法人日本品質保証機構（JQA）の彩都EMCテストサイトにて、船級試験の中でも対応が難しいEMC試験のエミッション及び、イミュニティに関する予備試験を実施した。

エミッション及び、イミュニティの試験では、開発した試作品が電磁波の影響をどのように受けるか、どのような電波を発しているかを客観的に調査した。

この試験の目的は、商品化する前に、今回検証したデータを元に事前にEMC対策を行うことで、製品の品質を担保することにつなげる意図がある。

試験の結果、製品設計にかかわる部分として、子機は問題ないこと、親機のノイズ対策の必要性が見えたことにより、今後の対策の方向性が把握できた。

(5) 報告書作成

令和2年度(2020年度)及び、令和3年度(2021年度)の事業内容を取りまとめ、報告書を作成した。

18. 事業目標の達成状況

18.1 2021年度の目標(最終目標)

IoT無線振動・温度センサ及び状態監視診断システムとしてのコントローラの商用試作品を開発する。

(1) IoT無線振動・温度センサの開発

- 1) センサ1個で55点のアナログ出力(1方向18点×3軸+温度)
- 2) 省電力無線と節電回路を改良し、電池駆動期間1年以上とする。
- 3) 無線電送距離は30m以上とする。

(2) 状態監視診断システムの開発

- 1) システムへのセンサ同時接続数は20センサ以上とする。
- 2) システムは20センサ×55点=1100点以上の同時処理能力を維持する。

18.2 目標の達成状況

(1) IoT無線振動・温度センサの開発

- 1) 3軸及び、温度が計測できるMEMS振動・温度センサを新たに設けた仕様要件に基づき再選定し、周辺回路とシステム部品を含めてIoT無線振動・温度センサを新規開発した。計測した振動計測データはソフトウェア処理により、各軸で周波数ごとに18分割し、合計55点のアナログ信号として計測利用できることを確認した。試作品は開発完了し、当初の仕様の目標を達成できた。

- 2) 令和2年度の開発により省電力の要件を見直し、3年以上の電池駆動時間を掲げて開発を行った結果、推定で16.2年/30分毎という電池寿命を実現できることを確認した。当初の電池駆動の1年という目標を達成し、かつ大きく上回ることができた。

- 3) 無線伝送距離は、令和3年度にさらなる低消費電力の無線回路に変更したにもかかわらず、60mまでは安定的に通信ができることが確認できた。当初の目的である30mの約2倍の距離を実現できた。当初の無線伝送距離の目標を達成し、かつ大きく上回ることができた。

(2) 状態監視診断システムの開発

1) 計測システムとして、1 台のコントローラ、親機と 20 台のセンサで同時接続試験を行い、データの欠落がなく、システム動作に問題ないことを検証できた。当初の同時接続数の目標を達成できた。

2) 計測システムとして 20 個のセンサの接続を問題なくこなし、センサが生成する 1100 点の信号をコントローラで計測値の受信からデータ蓄積処理、データ診断処理機能が行えることを確認した。よって、当初の同時処理能力の目標を達成できた。

18.3 事業実施によって得られた成果

本事業実施に於いて、IoT 無線振動・温度センサと機器状態監視診断システムの試作品を、目標を達成した形で試作品開発を完了することができた。

特にセンサの開発は令和 2 年度事業の試作品開発と検証で生まれた新たな課題認識から、さらなる省電力化についての突き詰めた設計を行った結果、10 年以上の電池交換不要なセンサを開発できる見込みができた。

システムとして BLE 通信と Wi-Fi 無線を活用し、電池駆動できるセンサとなったため、設置工事が容易となり、就航後の船にも後付け設置が非常に容易という大きなメリットがあることも船主から確認することができた。

また、コントローラは、センサデータを取得、蓄積する機能に加え、異常診断の仕組みを持たせることでデータから異常検出する機能を搭載することができた。

これらの成果により、船用分野で、特に機関室に適用できる、後付けで簡単設置可能な、振動と温度変化による新しい機器状態監視装置の開発が実現できた。

19. 本技術開発における自己評価

令和2年度から令和3年度にわたる「IoT無線振動・温度センサと機器状態監視診断システムの技術開発」を自己評価すると、当初の目標を大きく上回る成果を得ることができた。

本事業で目的としていた、「ベテラン機関士の日常監視業務に着目し、あらゆる機器をタッチングし、振動と温度変化による異常を五感にて判断していたワッチ業務を、当該IoT無線振動・温度センサ及び機器状態監視診断システムにより代替し、諸課題を解決するための技術開発を行う。」に沿う形での技術開発とその試作品を完成させること、各種試験を実現できた。

特に、機関室のあらゆる機器に設置できる、振動と温度変化による状態監視システム製品に関しては、その目的と設置性の良さから、就航後の船舶にも搭載しやすいとレトロフィットでの活用可能性が船主から示されたことは大きな成果と評価と考える。

20. 今後の取り組みについて

本事業により商用試作品を完成できたことで、製品コンセプトにマッチした性能、機能を実現できることが把握できた。そして、今後の長期間の運用試験や様々な環境下での確認検証が進められるようになった。引き続き、性能と品質を向上させるための追加試験や改善を行う予定である。

また、機器異常を把握するための異常診断ロジックの開発も、検出性能を向上させるため、引き続き継続する。そして、診断性能を向上させるための必要となる大量の機器データ/異常時データの収集を図る予定である。

ベテラン機関士が行うワッチ業務を代替し、船舶の安全運航をサポートする、先進的な振動による機器状態監視システムとして、さらなる完成度を上げるべく開発を継続し、令和6年度頃の商品化を目指す予定である。

21. 謝辞

本事業における研究開発は、一般社団法人日本船用工業会並びに、日本財団の助成事業による受託開発である。

また、本研究開発に於いて、株式会社商船三井、商船三井ドライバルク株式会社には、数多くのご助言とサポートを頂いた。特に、商船三井ドライバルク株式会社の運航船であるMV. ALAHASでは、試作品を搭載しての試験協力も頂いた。ここに深く感謝の意を表す。

「この報告書は BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました」

(一社)日本船用工業会

〒105-0001

東京都港区虎ノ門一丁目 1 3 番 3 号 (虎ノ門東洋共同ビル)

電話 : 03-3502-2041 FAX:03-3591-2206

<http://www.jsmea.or.jp>