



2023年度

舶用無線ひずみ船体構造モニタリングシステムの  
技術開発

成果報告書

2024年3月

一般社団法人 日本舶用工業会

## はしがき

本報告書は、BOAT RACE の交付金による日本財団の助成金を受けて、2022年度及び2023年度に一般社団法人日本船用工業会が実施した「船用無線ひずみモニタリングシステムの技術開発」の成果をとりまとめたものである。

本開発は、2022年度、2023年度の2年計画で、沖電気工業株式会社に委託して実施しており、その2年度分の報告書をここにまとめたものである。

ここに、貴重な開発資金を助成いただいた日本財団、並びに関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

2024年3月  
(一社)日本船用工業会

## 目 次

1. 事業の目的	1
2. 事業の目標	2
2.1 本事業の最終目標（2023年度の目標）	2
2.2 2022年度の目標	2
第1章 2022年度成果報告	3
3. 2022年度の実施内容	4
3.1 システムの検討	4
3.1.1 基本的なシステム仕様の検討	4
3.1.2 システム構成の検討	16
3.1.3 設置場所、設置方法の検討 基本的なシステム仕様の検討	18
3.1.4 運用方法（機器耐久性、メンテナンス方法等）の検討	23
3.2 センサ構成要素の開発	25
3.2.1 ひずみ計測処理部の開発、要素試作及び単体評価	25
3.2.2 無線通信部（データ通信仕様）の開発、要素試作及び単体評価	31
3.2.3 電源部の開発、要素試作及び単体評価	31
3.2.4 無線ひずみセンサ筐体の開発、要素試作及び単体評価	34
3.3 評価システム構成要素の開発	37
3.3.1 データ収集部のハード選定、開発、要素試作及び単体評価	37
3.3.2 データ処理部のデータの仕様決定、要素試作及び単体評価	39
3.4 ラボ内総合試験	43
3.4.1 構成要素を組み合わせた計測及び無線通信試験の実施と総合評価	43
3.4.2 個別要素毎の耐環境試験の実施と総合評価	44
3.5 ES機の設計及び試作	47
3.6 報告書作成	48
4. 目標の達成状況	48
4.1 船体構造モニタリングシステムの要求仕様を満足する	48
4.2 ES機の設計及び試作、評価の完遂	48
5. 2022年度の実施内容の概要	49
6. 今後の予定	50
6.1 ES機実運用環境下での評価試験	50
6.2 商品化設計	51
7. 2022年度まとめ	51
第2章 2023年度成果報告	52
8. 2023年度の実施内容	53
8.1 ES機の性能試験	53

8.1.1	洋上構造物（OKI 実験施設）でのフィールドテスト .....	53
8.1.2	実船における無線通信試験 .....	77
8.2	課題の抽出と対応 .....	80
8.3	製品化設計.....	85
8.4	製品化設計完了 .....	99
8.5	報告書作成.....	109
9.	目標の達成状況.....	110
9.1	評価、確認.....	110
9.2	製品化設計完了 .....	110
10.	2023 年度の実施内容の概要.....	111
10.1	ES 機の性能試験 .....	111
10.2	課題の抽出と対応 .....	111
10.3	製品化設計.....	111
10.4	製品化設計完了 .....	111
10.5	報告書作成.....	111
11.	今後の予定.....	112
11.1	製品評価.....	112
11.2	販売.....	112
12.	まとめ.....	112





## 1. 事業の目的

大型コンテナ船折損事故等の再発防止のためには、設計段階で様々な不確実性要素のばらつきを考慮し、運航中には船体にかかる応力を把握して不確実要素を減らし、結果が閾値を超えない操船等により安全運航に活用することが肝要であり、国際的にも検討がすすめられている。また、将来の自動運航船の実現のためには、構造安全面において「認知-判断-操作」するシステムの開発が不可欠であり、特に「認知-判断」するには船体構造モニタリングが必須である。

一方、国内の船体構造モニタリングは研究段階に留まっており、要因として高コストが挙げられる。特に船体に配置するセンサのケーブル敷設コストが課題となっている。本課題解決の為に無線技術を活用した船用無線ひずみセンサを開発することにより、低コストなシステムで船舶の安全に寄与する。

本事業の目的は以上のとおりであるが、個別の事項について補足すると以下のとおりである。

### (緊急性)

大型コンテナ船を対象に、「波の衝撃で生じる船体振動による力」及び「横方向から船体に加わる力の影響」にも耐えられる船体強度とすることが義務づけられ、国際的にも同様の対策を国際海事機関（IMO）及び検査機関の国際団体を通じて実施するとされている。近年船舶の寿命も延びてきており、長く船舶を使用されることが増えてきているため、既存船にも設置が容易な船体構造モニタリングシステムを至急開発する必要がある。

### (新規性)

無線技術を活用するにあたっては、船舶においては無線通信に対する障害物が多く塩害の影響も受けやすいという課題がある。本技術開発の船用無線ひずみセンサには、弊社が製品化している橋梁、陸上構造物の異常検知システム、斜面・法面崩落予測システムなどで実績がある 920MHz 帯マルチホップ無線技術を活用し、船体での無線通信の実現を可能とする。

また、太陽光発電により電力を得ることで、電力やデータ通信のための配線が不要となる無線ひずみ計センサを実現し、海運業界初となる国産の船用無線ひずみモニタリングシステムを開発するものである。

### (効果)

船体構造モニタリングシステムにより航海中の応力を計測・記録し、船体疲労の評価を行って船体構造の健全性を把握することで、船体の合理的かつ経済的な保守管理に活用することができ、船体の長寿命化、アセットマネージメントにもつながり、次の効果が期待できる。

- ・安全運航と過度な避航操船（減速や迂回）による燃費悪化の防止
- ・船級取得による、差別化、高付加価値化による売船価格の向上
- ・船舶の受けた累積ダメージの証明による中古船舶の価値向上

また、センサのケーブル敷設にはコスト以外に施工期間の課題があり、既存の船体構造モニタリングシステムを導入できるのは実質新造船時に限られている。本技術開発により設置期間短縮が容易になることから既存船へのレトロフィット課題が解消され、船体構造モニタリングの普及促進により様々な船舶の安全運航に寄与する。

## 2. 事業の目標

### 2.1 本事業の最終目標（2023 年度の目標）

- (1) 22 年度に試作を実施する船用無線ひずみモニタリングシステムにより得られるひずみデータから、リアルタイムに構造安全性を評価する。実船によるフィールドテストまたは実運用を模擬した環境下で性能試験を行い、要求仕様及び実際の運用性・保守性についてユーザー視点を含めて評価し確認する。
  - ・10 分以下の間隔で連続して、かつ、遅延時間 1 秒以下でデータ送信を行いリアルタイムな構造安全に資する演算値の表示、許容応力に対するマージンの表示等を行うこと
  - ・3 年以上のメンテナンス間隔で運用が可能であること
- (2) 船用無線ひずみセンサの消費電力をゼロ（太陽光発電パネル＋二次電池）とし、かつ、既存のケーブル敷設が必要な船体構造モニタリングシステム導入コストに対し 50%低減する船用無線ひずみモニタリングシステムの製品化設計を完了する。
  - ・不日照で発電ができない状態でも 2 週間以上バッテリーによる稼働が可能なこと
  - ・製品価格及び設置費用を合わせたコストが、既存の 50%以下を実現する見通しが立っていること

### 2.2 2022 年度の目標

- (1) 船用無線ひずみモニタリングシステムの構成要素の開発、試作を行い船体構造モニタリングシステムの要求仕様を満足することを確認する。
  - ・ひずみ計測精度  $5\mu st$  以下でひずみ計測を行えること
  - ・5Hz 以上のサンプリングレートでひずみ計測を行えること
  - ・10 分以下の間隔で無線でのデータ送信が可能であること
- (2) 2023 年度に行う評価試験に供する船用無線ひずみモニタリングシステムを試作し、ラボ内での評価を完了する。試作した構成要素を組み合わせたシステムにより(1)項の項目が、組み合わせ状態で実現できることを確認する。



# 第 1 章 2022 年度成果報告

### 3. 2022 年度の実施内容

#### 3.1 システムの検討

船用無線ひずみモニタリングシステムの検討を行った。

それぞれの検討内容を以下に示す。

##### 3.1.1 基本的なシステム仕様の検討

船舶甲板上に設置されることから必要となる高温、高湿、塩害、振動、衝撃等の開発目標仕様について 192 件の仕様検討を行った。

構成要素毎の仕様検討数は以下のとおりである。

- ・無線ひずみセンサ : 55 件
- ・無線中継部 : 44 件
- ・データ収集部 : 49 件
- ・データ処理部 : 44 件

また、求められる計測頻度、精度の要求仕様の検討、通信負荷及び省電力を考慮したデータ処理方法の検討を行った。

目標仕様の設定に対しては NK「船用材料・機器等の承認及び認定要領 第 7 編 制御及び計装用機器並びに電気設備」及び「船体構造モニタリングに関するガイドライン」を参照し、仕様を決定した。

主要な仕様の検討結果を以下に示す。

使用温度範囲、湿度：乾燥高温試験+70℃、低温試験-25℃、温湿度試験+55℃ 95%RH が規定されており、目標仕様は使用温度範囲-25℃～+70℃、高温高湿+60℃ 95%RH とし、ひずみ計測部筐体には結露防止のため、通気構造を付与することとした。

耐直射日光：使用温度範囲に対し、直射日光照射時の温度上昇を含めた高温の基準を設定するために、モックアップ筐体にて直射日光による温度上昇の試験評価を実施した結果、約 15℃の内部温度上昇が確認されたが、高温基準+70℃することとした。

塩害対策：筐体はステンレスの中でも特に耐塩性の高い SUS316 を使用することとし、使用実績があり、耐中性塩水噴霧試験（JIS K5600-7-1）で評価を実施済の重耐塩塗装 を行うこととした。

振動：2Hz～13.2Hz までは振幅制御とし 振幅±1.0mm、13.2Hz～100Hz については加速度制御とする 加速度±0.7G という当該ガイドラインの仕様を適用することとした。

衝撃：NK では規定がないため、JIS C 60068-2-27 を参照し、最大加速度  $500\text{m/s}^2$  の衝撃を設置方向及び直角方向に 2 回印加しても耐えられる仕様とした。

傾斜：機器の作動状態で  $22.5^\circ$  という当該ガイドラインの仕様を適用することとした。

計測精度：NK 「船体構造モニタリングに関するガイドライン」の規定では分解能  $10\mu\text{st}$  のみが規定されており、精度に対する規定はないが、この分解能での精度を確実に実現するために精度  $5\mu\text{st}$  を開発目標とすることとした。

サンプリングレート：NK 「船体構造モニタリングに関するガイドライン」の規定では  $5\text{Hz}$  となっているが、種々の要因による変動誤差の低減や船体縦曲げモーメント算出のための統計処理等に供するデータの最適化について既存システムにおけるデータ取得方法、処理方式の確認を行い、既存システムと同等となる  $10\text{Hz}$  以上 ( $15\text{Hz}$  目標) のサンプリングレートとした。

無線送信間隔：既存システムのデータ送信間隔の確認及び、造船所への既存システム及び船体構造モニタリングに関する要望についてヒアリングを行った結果、リアルタイム表示として許容される間隔は 20 分以下ということが確認されたため、よりリアルタイム性を高めるために 5 分間隔以下で送信を行うこととした。

この時に各ひずみ計測部からの計測データは時刻同期精度  $\pm 100\text{msec}$  以下でタイムスタンプ付きのデータを送信することとした。

表-1 にその他の仕様も含めた無線ひずみセンサの開発仕様を示す。

表-1 無線ひずみセンサ開発仕様

大項目	中項目	開発仕様
機能		船舶の甲板、もしくは船内に取付、ひずみの計測を行い、計測データを無線中継器もしくはデータ収集部に送信する
外形	寸法	約 22×36×12cm 程度の鋼製筐体（突起部を除く）に格納し一体型とする 非露光部に設置するものは、軽量化のため樹脂筐体も可
	質量	筐体込みで約 10kg 以下
設置方法	設置場所	甲板上もしくは船内鋼板に設置
	設置方法	筐体ごと船体もしくは船内に接着固定 ひずみゲージは船体に直接溶接にて貼り付け
電源		太陽光発電パネル+バッテリー
消費電流		14 日間以上バッテリーのみで駆動できること
耐環境	防水防塵	保護等級 IP56 以上
	使用温度・湿度	使用温度範囲 -25℃～70℃、+60℃95%RH・結露なきこと
	耐温度性能	乾燥高温試験 +70℃×16 時間、試験方法 IEC 60068-2-2 機器に異常がないこと、正常に動作すること
		温湿度試験 +60℃/95%RH×24 時間 2 サイクル 試験方法 IEC 60068-2-30 機器に異常がないこと、正常に動作すること
		低温試験 -25℃×2 時間、試験方法 IEC60068-2-1 機器に異常がないこと、正常に動作すること
	耐塩害	筐体の材質は SUS316 とし重耐塩塗装を行う
	振動	2Hz～13.2Hz 振幅±1.0mm、13.2Hz～100Hz 加速度±0.7G
	衝撃	500m/s <sup>2</sup> の衝撃を設置方向及び直角方向に 2 回印加
	傾斜	機器の作動状態で 22.5° 傾けて正常動作すること
絶縁性能	絶縁抵抗試験 (AC)DC500V で 100MΩ 以上	

		耐電圧試験 (AC)AC1, 500V・1 分間、電源－大地間 機器に異常がないこと
イミュニティ耐力		静電気放電イミュニティ試験 接触放電 6kV、気中放電 2/4/8kV、試験方法 IEC61000-4-2 試験後に正常に動作すること (性能基準 B)
		高周波放射電磁界イミュニティ試験 80MHz～6GHz、電界強度 10V/m、試験方法 IEC61000-4-3 試験中、試験後に正常に動作すること (性能基準 A)
		伝導低周波妨害イミュニティ試験 60Hz～12kHz、試験電圧は供給電圧の 10% 試験中、試験後に正常に動作すること (性能基準 A)
		伝導高周波妨害イミュニティ試験 150kHz～80MHz、3Vrms、試験方法 IEC61000-4-6 試験中、試験後において正常に動作すること (性能基準 A)
		電氣的ファーストトランジェント ／バーストイミュニティ試験 5ns/50ns、電源－大地 2kV、信号 1kV、5 分間 試験方法 IEC61000-4-4 試験後に運転を継続できること (性能基準 B)
		サージイミュニティ試験 1.2us/50us : ライン－大地 1kV、ライン間 0.5kV 試験方法 IEC61000-4-5 試験後に正常に動作すること (性能基準 B)
	エミッション	
		伝導性エミッション試験 10kHz～30MHz、電源ポート、試験方法 CISPR16-2-1 規定された上限値以下
測定対象	ひずみ値	1 軸方向ひずみ値 (1 アクティブ、3 ダミー温度補正用)
計測	連続稼働時間	3 年以上メンテナンスなしで稼働

	ひずみ計測	ひずみ計測範囲 $\pm 1000 \mu st$ 1軸
		分解能 $1 \mu st$ 以下 ひずみ精度 $5 \mu st$ 以下
	サンプリングレート	10Hz 以上 (15Hz 目標)
測定データ (送信データ)	測定器 ID	受信機側でデータ識別のため ID を付与
	時刻	計測時刻 (yy/mm/dd hh:mm:ss.00)
		時計確度 $\pm 100msec$ 以内
測定値	5 分以下の間隔で区間内全データ送信	
通信仕様	アンテナ	内蔵 or 外付け
	通信周波数	920MHz
	送信間隔	5 分以下の間隔
	通信距離	100m 以上
メンテナンス	メンテナンス性	メンテナンス性を考慮した筐体内配置、材料を使用

表-2 に無線中継器の開発仕様を示す。

表-2 無線中継器開発仕様

大項目	中項目	開発仕様
機能		船舶の甲板、もしくは船内に取付、ひずみ計測部からの計測データを、データ収集部に送信する
外形	寸法	約 22×36×12cm 程度の鋼製筐体（突起部を除く）に格納し一体型とする 非露光部に設置するものは、軽量化のため樹脂筐体も可
	質量	筐体込みで約 10kg 以下
設置方法	設置場所	甲板上もしくは船内鋼板に設置
	設置方法	筐体ごと船体もしくは船内に接着固定
電源		太陽光発電パネル+バッテリー
消費電流		14 日間以上バッテリーのみで駆動できること
耐環境	防水防塵	保護等級 IP56 以上
	使用温度・湿度	使用温度範囲 -25℃~70℃、+60℃95%RH・結露なきこと
	耐温度性能	乾燥高温試験 +70℃×16 時間、試験方法 IEC60068-2-2 機器に異常がないこと、正常に動作すること
		温湿度試験 +60℃/95%RH×24 時間 2 サイクル 試験方法 IEC60068-2-30 機器に異常がないこと、正常に動作すること
		低温試験 -25℃×2 時間、試験方法 IEC60068-2-1 機器に異常がないこと、正常に動作すること
	耐塩害	筐体の材質は SUS316 とし重耐塩塗装を行う
	振動	2Hz~13.2Hz 振幅±1.0mm、13.2Hz~100Hz 加速度±0.7G
	衝撃	500m/s <sup>2</sup> の衝撃を設置方向及び直角方向に 2 回印加
	傾斜	機器の作動状態で 22.5° 傾けて正常動作すること
絶縁性能	絶縁抵抗試験 (AC)DC500V で 100MΩ 以上	

		耐電圧試験 (AC)AC1, 500V・1 分間、電源－大地間 機器に異常がないこと
イミュニティ耐力		静電気放電イミュニティ試験 接触放電 6kV、気中放電 2/4/8kV、試験方法 IEC61000-4-2 試験後に正常に動作すること（性能基準 B）
		高周波放射電磁界イミュニティ試験 80MHz～6GHz、電界強度 10V/m、試験方法 IEC61000-4- 3 試験中、試験後に正常に動作すること（性能基準 A）
		伝導低周波妨害イミュニティ試験 60Hz～12kHz、試験電圧は供給電圧の 10% 試験中、試験後に正常に動作すること（性能基準 A）
		伝導高周波妨害イミュニティ試験 150kHz～80MHz、3Vrms、試験方法 IEC61000-4-6 試験中、試験後において正常に動作すること （性能基準 A）
		電氣的ファーストランジェント／バーストイミュニテ ィ試験 5ns/50ns、電源－大地 2kV、信号 1kV、5 分間 試験方法 IEC61000-4-4 試験後に運転を継続できること（性能基準 B）
		サージイミュニティ試験 1. 2us/50us：ライン－大地 1kV、ライン間 0. 5kV 試験方法 IEC61000-4-5 試験後に正常に動作すること（性能基準 B）
エミッション		放射エミッション試験 150kHz～1GHz、3m 法、試験方法 CISPR16-2-3、 IEC60945 規定された上限値以下
		伝導性エミッション試験 10kHz～30MHz、電源ポート、試験方法 CISPR16-2-1 規定された上限値以下
中継機能	送受信データ	ひずみ計測部からの送信データを劣化がない状態で伝送
	送信タイミング	ひずみ計測部からの送信データを受信後、1sec 以下の 遅延で送信する



通信仕様	アンテナ	内蔵 or 外付け
	通信周波数	920MHz
	通信距離	100m 以上
メンテナンス	メンテナンス性	メンテナンス性を考慮した筐体内配置、材料を使用

表-3 にデータ収集部の開発仕様を示す。

表-3 データ収集部開発仕様

大項目	中項目	開発目標
機能		センサ部もしくは無線中継部から伝送されるデータを受信し、データ処理を行い、データ処理部へデータを LAN (有線 or 無線) にて送出する
外形	寸法	小型化で検討のこと
	質量	軽量化で検討のこと
設置方法	設置場所	居住区内
	設置方法	ブリッジもしくは居住区内の壁面もしくはラックに設置
表示機能		なし (データ処理部で表示を行う)
電源		船内電源
耐環境	使用温度・湿度	使用温度範囲 +5℃~+60℃、90%RH・結露なきこと
	耐温度性能	乾燥高温試験 +60℃×16 時間、試験方法 IEC60068-2-2 機器に異常がないこと、指定されたとおり動作すること
		温湿度試験 +60℃/90%RH×24 時間 2 サイクル、試験方法 IEC 60068-2-30 機器に異常がないこと、指定されてとおり動作すること
	電源変動・瞬断性能	電源変動試験 (AC) 電圧±20%、周波数±10% 機器に異常がないこと、指定されてとおり動作すること
		電源喪失試験 5 分間に 3 回外部電源遮断 (遮断時間は 30 秒) 電源喪失時、復旧後の機器動作に異常のないこと 電子的に保存されたプログラム、データが消滅しないこと
	絶縁性能	絶縁抵抗試験 (AC)DC500V で 100MΩ 以上

		耐電圧試験 (AC) AC1, 500V・1 分間、電源－大地間 機器に異常がないこと
イミュニティ耐力		静電気放電イミュニティ試験 接触放電 6kV、気中放電 2/4/8kV、試験方法 IEC61000-4-2 試験後に運転を継続できること (性能基準 B)
		高周波放射電磁界イミュニティ試験 80MHz～6GHz、電界強度 10V/m、試験方法 IEC61000-4-3 試験中、試験後において運転が継続できること (性能基準 A)
		伝導低周波妨害イミュニティ試験 60Hz～12kHz、試験電圧は供給電圧の 10% 試験中、試験後において運転が継続できること (性能基準 A)
		伝導高周波妨害イミュニティ試験 150kHz～80MHz、3Vrms、試験方法 IEC61000-4-6 試験中、試験後において運転が継続できること (性能基準 A)
		電氣的ファーストトランジェント／バーストイミュニティ試験 5ns/50ns、電源－大地 2kV、信号 1kV、5 分間 試験方法 IEC61000-4-4 試験後に運転を継続できること (性能基準 B)
		サージイミュニティ試験 1.2us/50us : ライン－大地 1kV、ライン間 0.5kV 試験方法 IEC61000-4-5 試験後に運転を継続できること (性能基準 B)
	機器性能	連続稼働時間
データ 受信機能	受信データ	ひずみ計測部 A/D データ
	受信間隔	送信機による
	同時接続台数	10 台
ソフトウェア	処理内容	A/D 値を電圧に変換
		個別データを算出し、データベースに格納
	設定機能	データ処理部の設定機能を実施できること

表-4 にデータ処理部の開発仕様を示す。

表-4 データ処理部開発仕様

大項目	中項目	開発目標
機能		センサ部（ひずみ、加速度）より 920MHz 通信により 伝送されるデータをデータ収集部経由で受信し、データ 処理を行い、外部に LAN（有線 or 無線）にて送出する
外形	寸法	小型化で検討のこと
	質量	軽量化で検討のこと
設置方法	設置場所	ラップトップ PC による可搬（屋外、居住区内）
	設置方法	ブリッジ、居住区内に設置
表示機能		不要（データ収集部）
電源		AC100V、船内電源
耐環境	使用温度・湿度	使用温度範囲 +5℃～+35℃、30%RH～80%RH 結露なきこと
	耐温度性能	保存温度範囲 +5℃～+35℃
		乾燥高温試験 +60℃×16 時間、試験方法 IEC60068-2-2 機器に異常がないこと、試験後、指定されたとおり 動作すること
		温湿度試験 +60℃/90%RH×24 時間 2 サイクル 試験方法 IEC 60068-2-30 機器に異常がないこと、試験後、指定されたとおり 動作すること
	電源変動・瞬断性 能	電源変動試験 (AC) 電圧±20%、周波数±10% 機器に異常がないこと、指定されたとおり動作する こと
電源喪失試験 5 分間に 3 回外部電源遮断(遮断時間は 30 秒) 電源喪失時、復旧後の機器動作に異常のないこと 電子的に保存されたプログラム、データが消滅しない こと		
機器性能	連続稼働時間	常時連続稼働

データ	データ種類	ひずみデータ
受信機能	受信間隔	送信機（データ収集部機能）による
	同時接続台数	2台（データ収集部）
ソフトウェア	処理内容	20分毎 応力値、縦曲げモーメントの最大値、有義値、平均値を算出し、データベースへ格納
	表示内容	リアルタイムの縦曲げモーメント、応力値
		過去から現在までの有義値 時刻歴グラフ
		アラーム機能
	データ格納容量	5年分保存
	設定機能	ゼロ点管理、センサ接続チェック
動作環境	Windows	

### 3.1.2 システム構成の検討

船用無線ひずみセンサ、構造安全評価システム（データ収集部、データ処理部）の各構成の機能と性能の検討を行った。

システムの構成の検討結果を図-1 に示す。

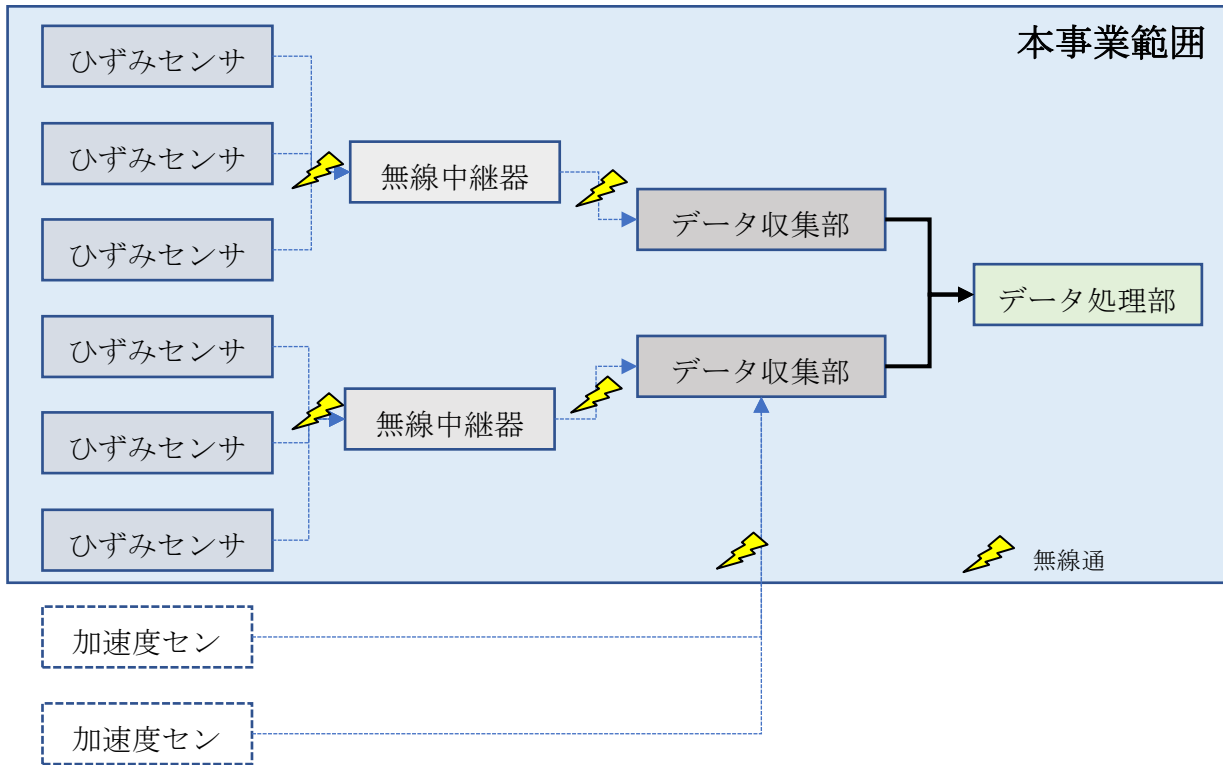


図-1 システム構成

各構成要素の機能、性能を表-5 に示す。

表-5 各構成要素の機能、性能

構成要素	機能	性能
ひずみ センサ部	船体のひずみを計測し、無線中継部もしくはデータ収集部に920MHz 無線通信によりデータを送信する	太陽光発電パネルにより発電した電力をバッテリーに保存し、外部電源なしに駆動する ひずみゲージ出力電圧を A/D 変換し、先頭データにタイムスタンプを付与した複数データを 5 分以下の間隔で送信する
無線中継部	ひずみセンサ部もしくは無線中継部から送信されるデータを受信し、データ収集部にデータを送信する	ひずみセンサ部より送信されたデータを受信し、1 秒以下の遅延でデータ収集部に送信する
データ収集部	ひずみセンサ部もしくは無線中継部から送信されるデータを受信し、電圧値に変換後データ処理部にデータを送出する	ひずみセンサ部最大 10 式からのデータを受信し、個別データにタイムスタンプを付与、A/D データを電圧値に変換後データベースに保存する
データ処理部	データ収集部からのデータを受信し、ひずみ値、応力値に変換 応力値のグラフ表示を行う 計測やデータベースに必要な各種パラメーターの設定機能を持つ 上位装置へのデータ出力を行う	5 分以下の間隔で、最大 2 台のデータ収集部のデータベースからデータを取得する データ収集部から取得した電圧値をひずみ値、応力値に適切な定数を用いて変換する 変換後、ひずみセンサ最大 20 台分、保管期間最低 3 年分のデータを収納可能なデータベースを構築する

### 3.1.3 設置場所、設置方法の検討 基本的なシステム仕様の検討

求められる計測頻度、計測箇所数及び計測位置の検討、また、船体ひずみの正確な計測を可能とする、船体への船用無線ひずみセンサの設置方法の検討を行った。

計測頻度、計測箇所数及び計測位置については、NK「船体構造モニタリングに関するガイドライン」を参照のうえ、従来のモニタリングシステムの性能を確認した結果サンプリングレート 10Hz(目標 15Hz)、計測数 6 か所とし、計測位置については船体中央両舷 2 か所、船首垂線から 1/4L の位置の両舷 2 か所、船尾垂線から 1/4L の位置の両舷 2 か所とした。

船種毎の設置位置の考え方を表-6 に示す。

表-6 各構成要素の船種毎の設置箇所

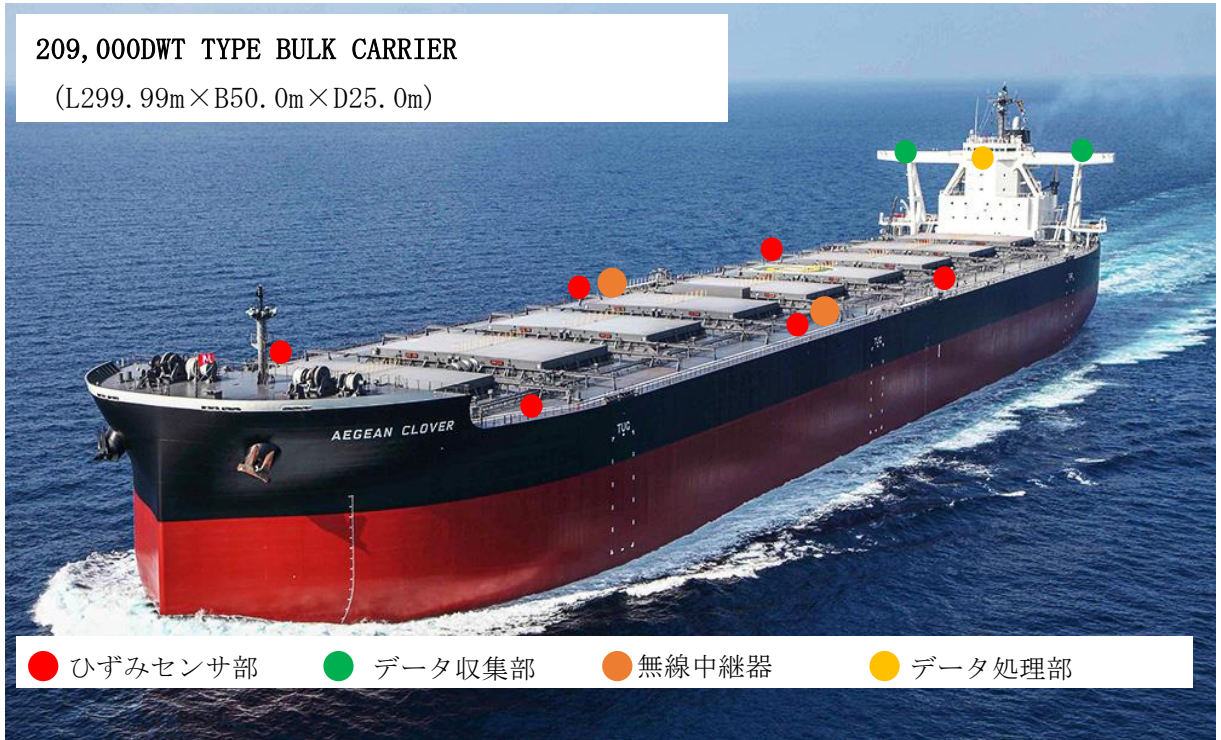
船種	鉱石専用船(ORE) ばら積み船(BULK)	コンテナ船(CONTAINER)
ひずみセンサ部	甲板に設置	甲板下通路に設置 (太陽光発電不可のため船内電源にて駆動する)
無線中継器	甲板に設置	甲板下通路に設置 (太陽光発電不可のため船内電源にて駆動する)
データ収集部	ブリッジ上部左右にアンテナ設置、本体はブリッジ内に設置	甲板下通路に設置 もしくは、居住区の下階層に設置
データ処理部	ブリッジ内、 もしくは居住区の機器室等に設置	ブリッジ内、 もしくは居住区の機器室等に設置



バルクキャリアでの設置位置についての概要を図-2 に示す。

**209,000DWT TYPE BULK CARRIER**

(L299.99m×B50.0m×D25.0m)



画像：日本シップヤード様 Web より

図-2 バルクキャリアへの設置概要

鉱石専用船での設置位置についての概要を図-3 に示す。

**241,000DWT TYPE ORE CARRIER**



画像：日本シップヤード様 Web より

図-3 バルクキャリアへの設置概要

コンテナ船での設置位置についての概要を図-4に示す。



画像：日本シップヤード様 Web より

図-4 コンテナ船への設置概要

センサの設置については、溶接やボルト接合よりも施工が容易で、設置による残留応力等の影響が発生しない接着による施工とすることとし、接着剤よりもさらに施工が容易な構造用接合テープを採用することとした。

構造用接合テープの採用に当たっては、事前検討の結果、アクリルフォーム構造用接合テープが最適と判断し、局部振動による繰り返し荷重試験を行い、耐久性を評価した結果問題ないことが確認された。

試験条件は、

- ・周波数 16Hz
- ・振幅  $\pm 0.2\text{mm}$
- ・速度 20.1mm/sec
- ・接合面温度 80℃
- ・繰り返し回数 300万回

とした。

図-5に試験概要、図-6に耐久試験による接合面の隙間、ズレの評価結果を示す。

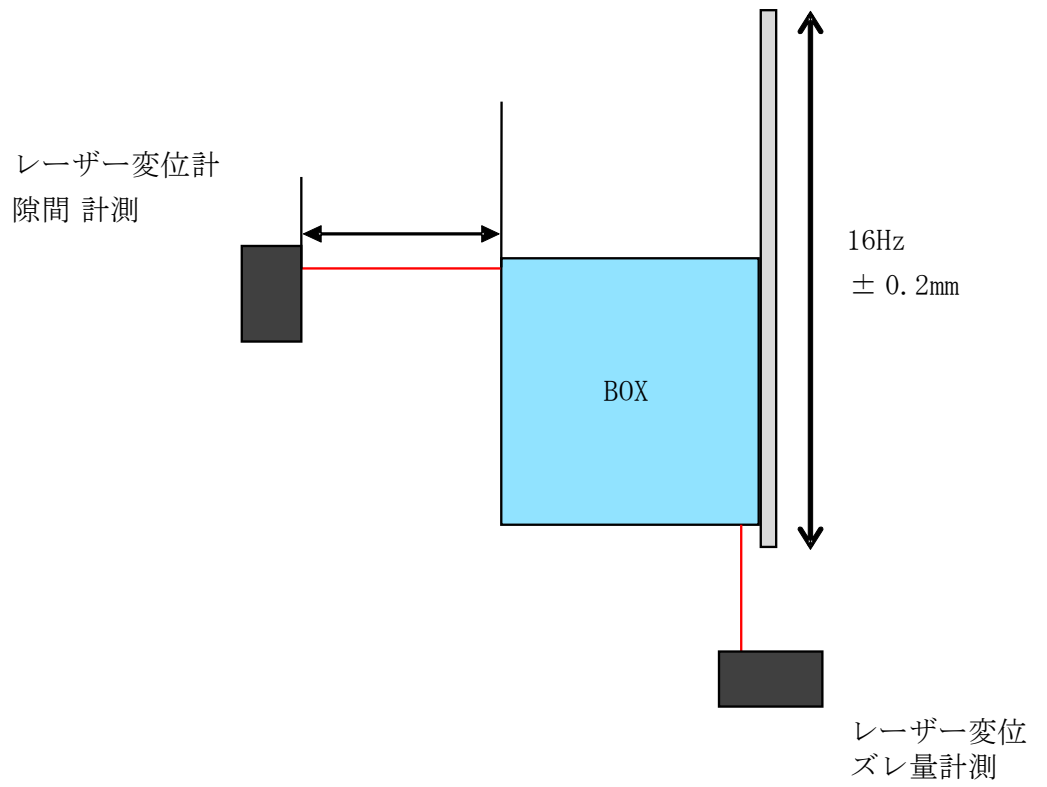


図-5 試験概要

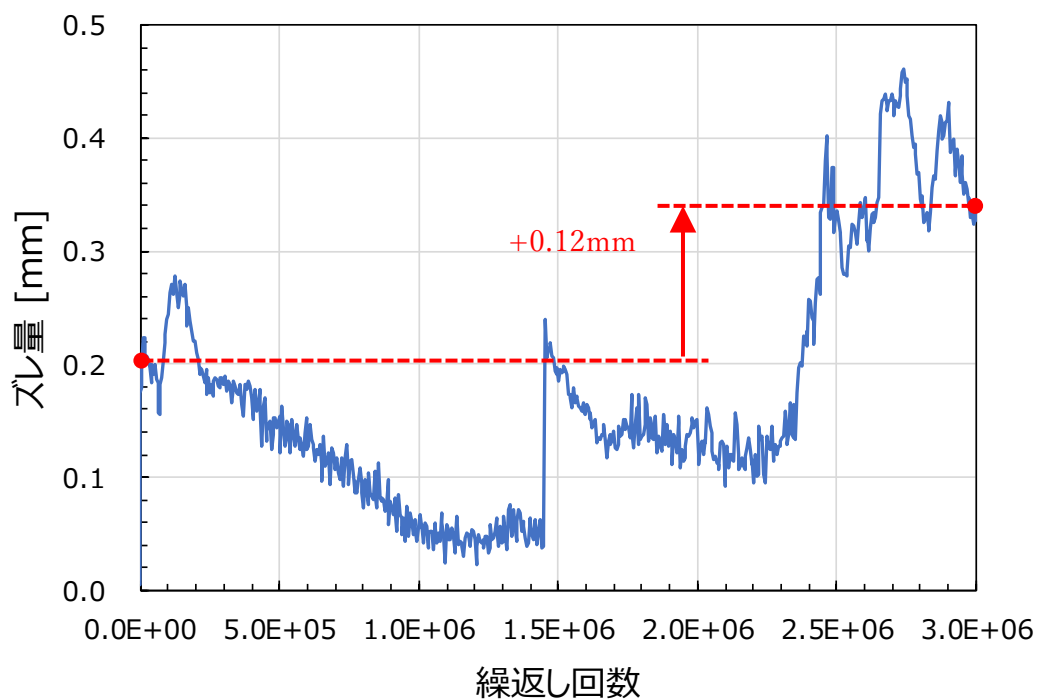
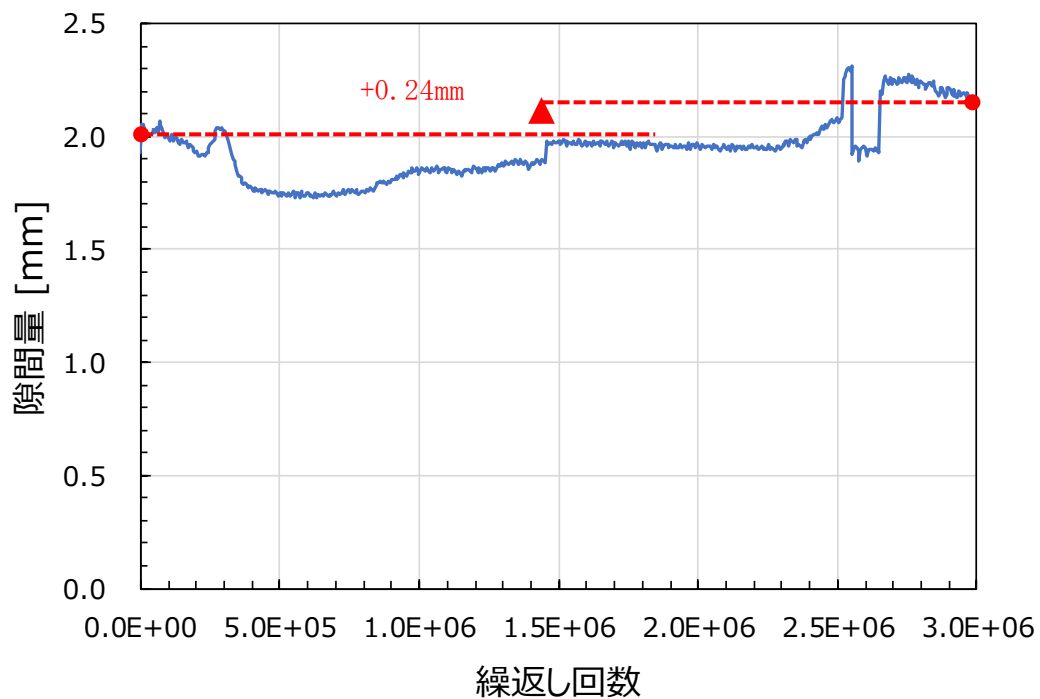
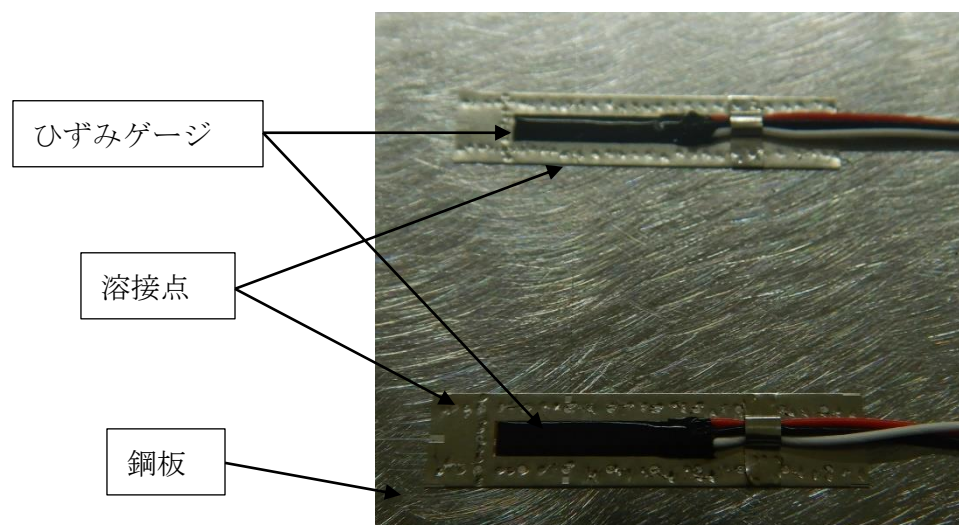


図-6 耐久試験による接合面のズレ、隙間の変動

ひずみゲージについては、ヒステリシスロスやドリフトの影響を排除するために、従来から採用されている多点溶接設置とした。

図-7 にひずみゲージ設置方法を示す。





図一七 ひずみゲージ設置方法

#### 3.1.4 運用方法（機器耐久性、メンテナンス方法等）の検討

船舶設置環境での各機器の耐久性の実現方法の検討、ドック入渠を必要としない寄港地でのメンテナンスが可能となる機器構成、仕様の検討及びメンテナンス方法の検討を行った。

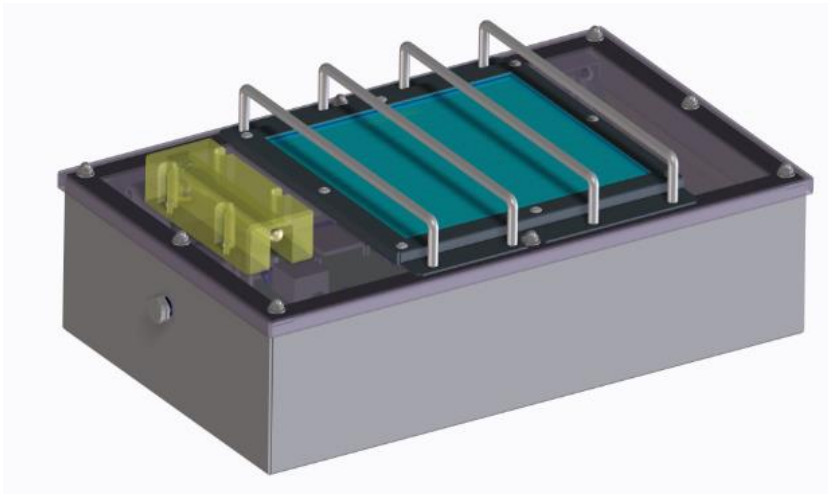
検討の結果、筐体は塩害対策で検討した通り、材質を SUS316 とし、重耐塩塗装を施すこととした。

メンテナンス性の向上のため、筐体上部には開口部を設け、内部基板をユニット化し、一体で取り出せる構造を採用した。

また、船体に設置した状態でも容易に筐体内部のひずみゲージの設置、交換を可能とするため、ハンドリングスペースを有する構造とした。

構造の概要を図一八に示す。

筐体外観図



内部基板ユニットを取り外した状態

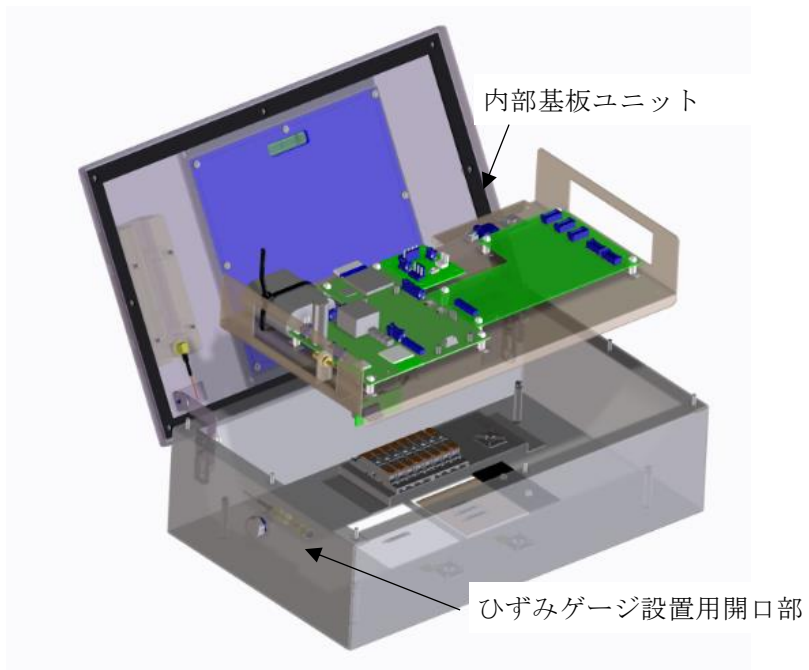


図-8 センサ部構造

### 3.2 センサ構成要素の開発

船用無線ひずみセンサ構成要素の開発、試作及び単体評価を行った。

#### 3.2.1 ひずみ計測処理部の開発、要素試作及び単体評価

太陽光発電パネル及びバッテリーの小型化を目的とした省電力稼働を実現するために、2.5Vを目標とした低電圧駆動、間欠データ通信による低消費電力化が可能な回路設計、試作評価を行った。

ひずみ計測処理部の基板化にあたり、小型化、省電力化のために、3.2.2項無線通信部回路、3.2.3項電源部回路についてもアナログ入力部以外の機能を1枚の基板上に実装することとした。

図-9に試作した基板の写真を示す。

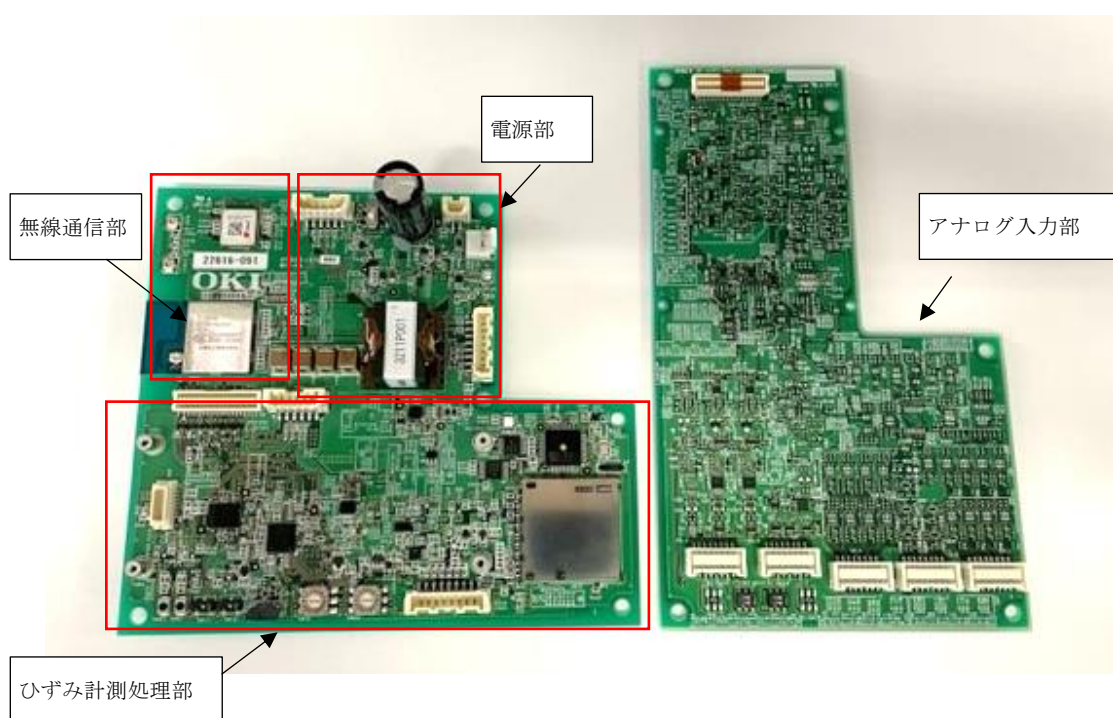


図-9 ひずみ計測処理部、無線通信部基板写真

このため、駆動電圧、消費電流については組み合わせた状態で確認を行った。駆動電圧については2.1V～3Vで正常に動作するかの確認を行った結果、2.1Vでも問題なく動作することが確認されたため、目標2.5Vの低電圧駆動とすることができた。

消費電流については2.7mAの消費が確認された。

また、無発電状態における2週間の電池駆動を可能とする消費電流上限値5.54mA以下であることを確認した。

ひずみ計測処理部の確認として、試験用の鋼板にひずみゲージを設置し、 $\pm 450\text{kN}$  の荷重による繰り返し荷重印加試験を行った結果、0 点オフセットを除く各荷重での平均値ではばらつきが最大  $2.49\ \mu\text{st}$  (0 荷重時が最大) であることが確認され、目標仕様の  $5\ \mu\text{st}$  以下であることを確認した。

この試験時に合わせて計測範囲の確認を行った結果、目標仕様の  $\pm 1000\ \mu\text{st}$  に対し  $\pm 1080\ \mu\text{st}$  の計測範囲が確保されていることを確認した。

図-10 に繰り返し荷重印加試験状況を示す。

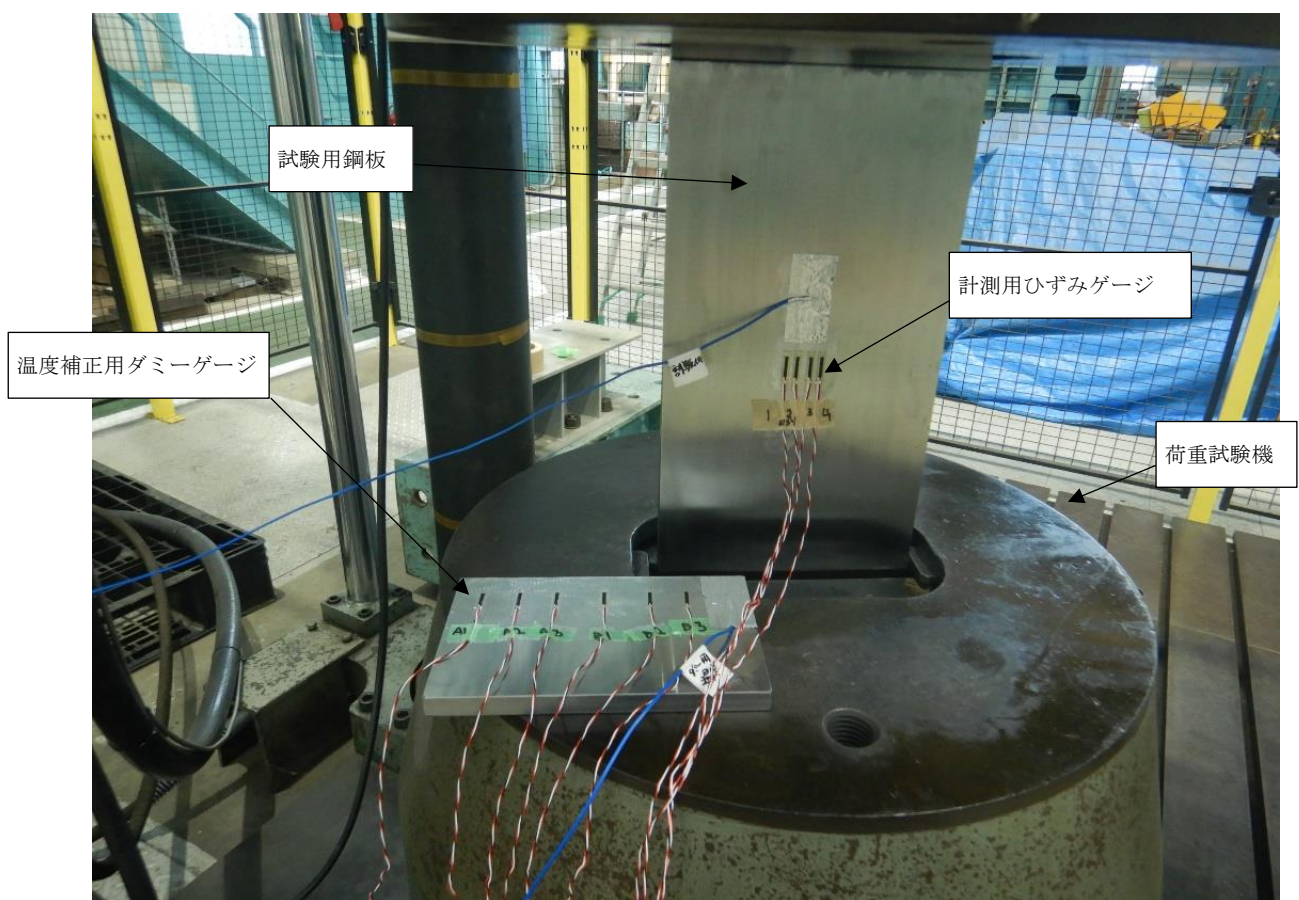


図-10 繰り返し荷重印加試験状況写真



図-11 に測定結果を示す。

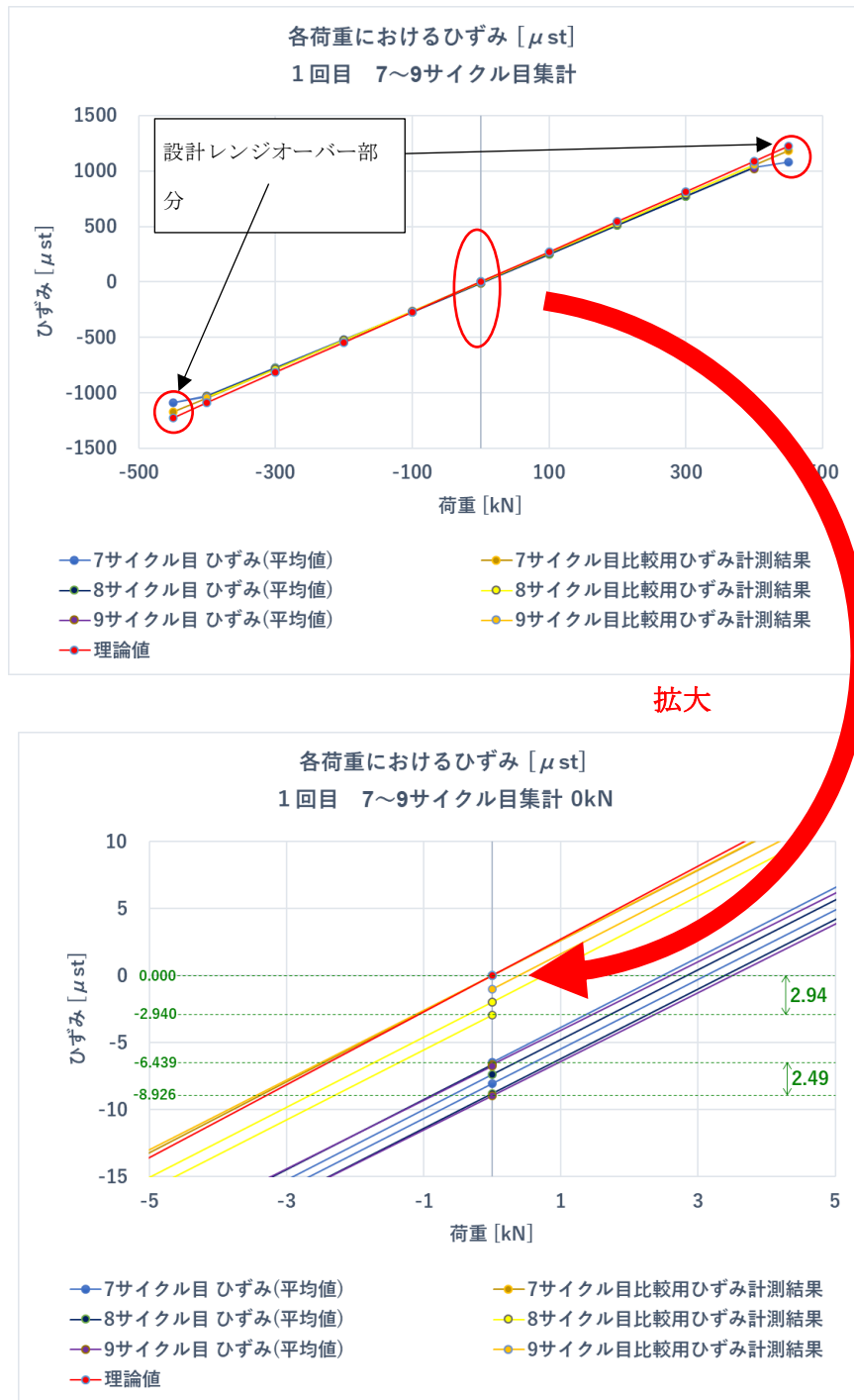


図-11 繰り返し荷重印加試験結果

さらに、荷重毎の素データのばらつきを解析した結果、最大約±11 $\mu$ st のばらつきが確認され、改良が必要と判断した。

ばらつきの大きかった 400kN 時のデータ変動状況を図-12 に示す。

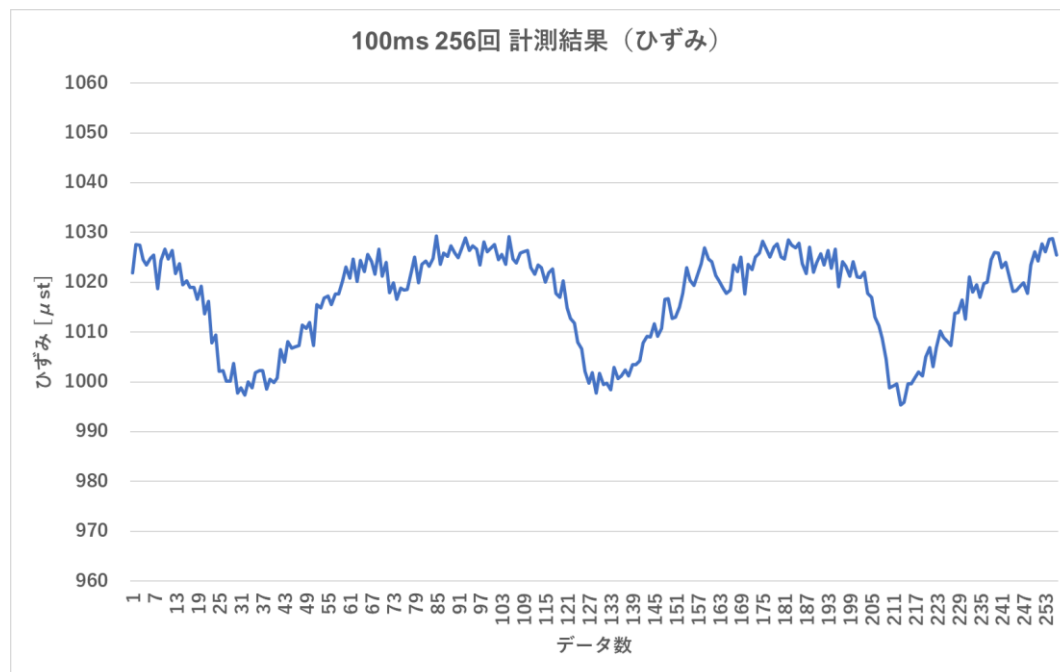


図-12 400kN 時の素データばらつき解析結果

このばらつきは、サンプリングレート 10Hz 以上のノイズの混入により、エイリアシング(折り返し雑音)が発生し低周波のばらつきとして見えていることが想定されたため、オーバーサンプリング回数の増加によるノイズ除去の検討を行った結果、MAX 1MHz サンプリングで 4096 回の平均値を素データとする方法が有効であることが試験の結果確認された。

オーバーサンプリング処理の追加を行った結果、消費電流の増加がみられたが、計測の結果 5.2mA でシステム設計上の上限目標値 5.54mA 以下を満足することが確認された。

オーバーサンプリングの回数増加による素データ変動の比較試験結果を図-13 に示す。

試験はノイズ影響確認のため定電圧 0.01mV を入力し比較評価を行った。

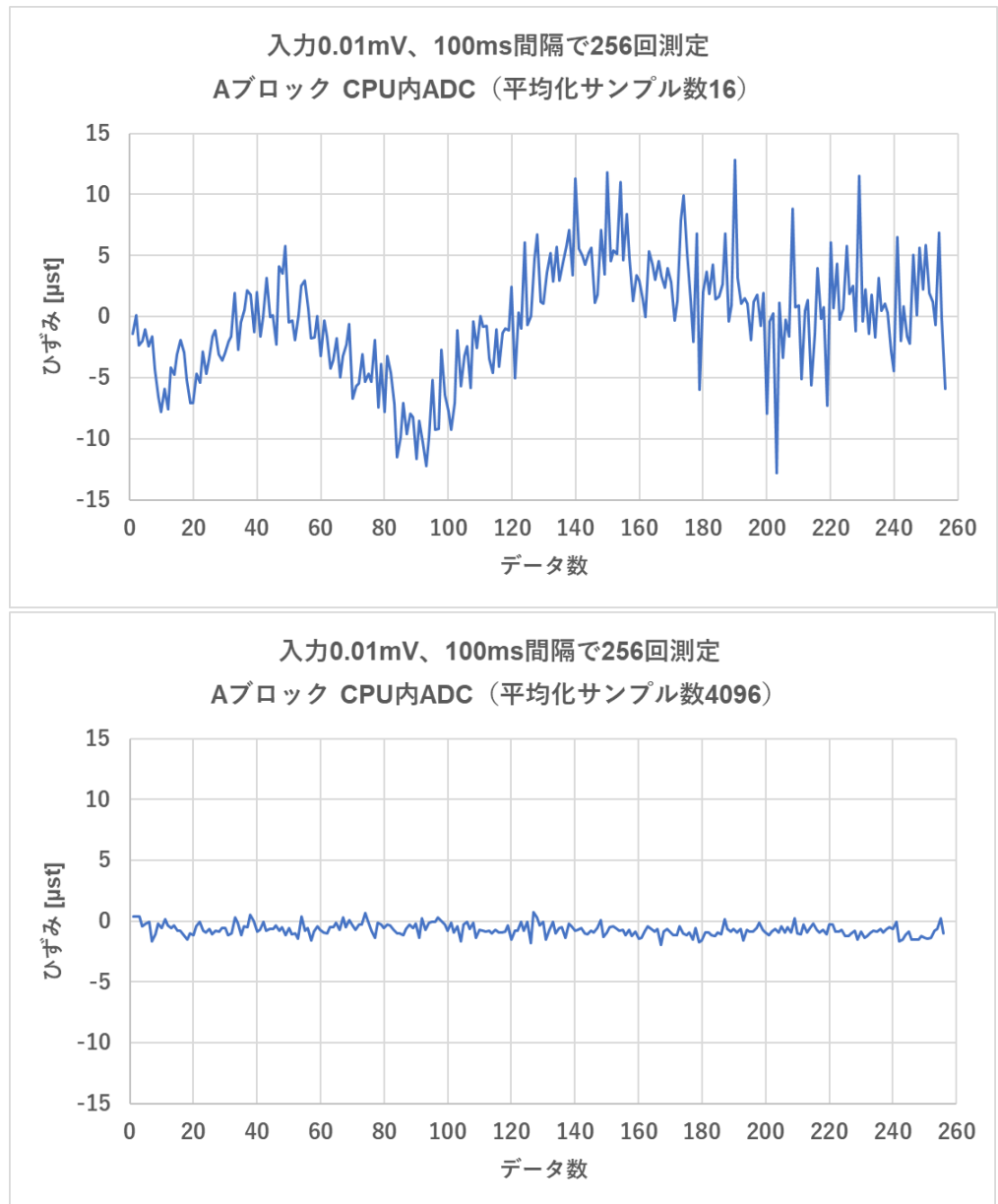


図-13 オーバーサンプリング（16回、4096回）素データばらつき評価結果

また、アナログ入力部において、ローパスフィルターの追加、専用 A/D コンバーターの採用（現状では、CPU 内部の A/D 機能を使用）によっても改善可能であることが確認された。

図-14 に改良回路概要を示す。

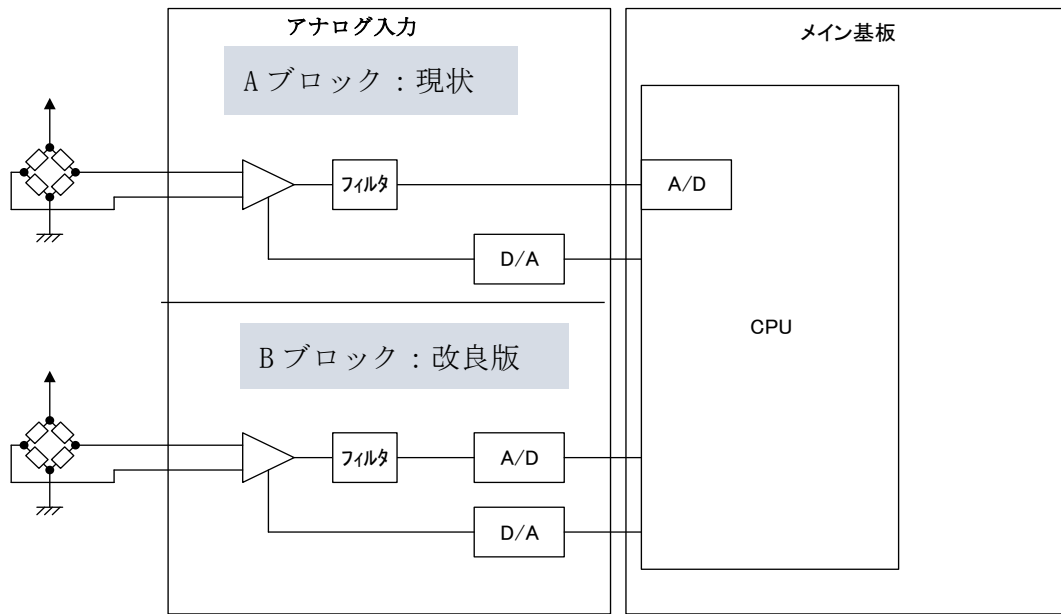


図-14 回路概要図

改良回路の評価結果を図-15 に示す。

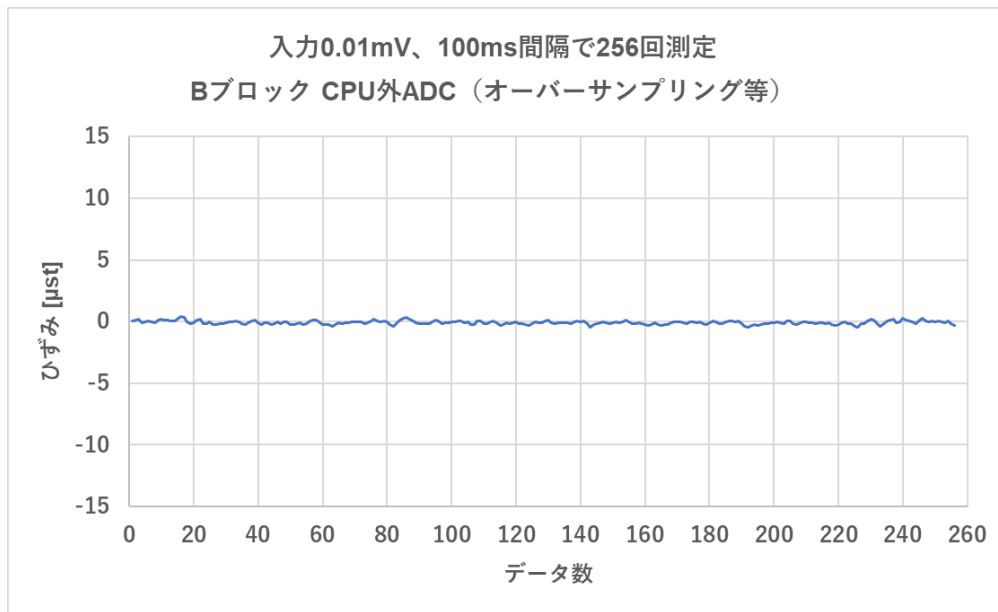


図-15 改良回路 (Bブロック) 素データばらつき評価結果

試験評価結果のまとめを表-7 に示す。

表-7 ひずみ素データばらつきの改善

回路	処理内容	ばらつき幅
A (現状)	オーバーサンプリング MAX 1MHz 16回	11.0 $\mu$ st
	オーバーサンプリング MAX 1MHz 4096回	2.3 $\mu$ st
B (改良)	ローパスフィルター回路追加 専用 A/D コンバーターの採用	0.8 $\mu$ st

表-7に示したように素データそのものでばらつきを目標の5 $\mu$ st以下とするために、素データばらつき幅2.3 $\mu$ stを実現したオーバーサンプリングMAX 1MHz 4096回を採用することにより目標仕様を達成した。

また、回路Bについては、消費電流が大きいという課題はあるが、高精度での計測の可能性があるため、引き続き評価を行うこととした。

### 3.2.2 無線通信部（データ通信仕様）の開発、要素試作及び単体評価

計測データの無線通信を低消費電力で実現するために、最適な通信プロトコル及び通信方式を実現する通信基板の回路設計、試作評価を行った。

通信プロトコルとしては、河川監視、橋梁監視などで使用実績のある920MHz通信を採用した。

3.2.1項記載の通り、小型化、省電力化のために、無線通信部については電源回路、データ計測処理部と合わせ1枚の基板上に実装することとし、低電圧駆動、低消費電流については、組み合わせた状態で評価を実施した。

無線通信間隔については、メモリー容量の最適化、メモリー、CPU使用量の最適化を検討した結果、無線通信間隔9秒間隔での通信が最適であることが確認され、9秒間隔での通信試験を実施し、問題なく通信ができることを確認した。

試作した基板は3.2.1項 図-9に示したものである。

### 3.2.3 電源部開発、要素試作及び単体評価

船舶設置環境で必要な耐久性を満たす太陽光発電パネル保護構造の試作及び評価、無日照時（無発電時）で2週間稼働可能な二次電池の選択及び試作評価、太陽光発電パネルの小型化のための高効率充放電回路開発及び試作評価を行った。

太陽光発電パネルは曇天の場合においても発電が可能な可視光型太陽光発電パネル（アモルファスSi）を採用した。

図-16に評価用樹脂筐体に取り付けた太陽光発電パネルの図を示す。



図-16 太陽光発電パネル外観

また、充電回路にキャパシタを追加し、発電量が小さい場合にはキャパシタに低い発電を貯めてから二次電池の充電を行う方法とすることで、低発電電圧時にも充電が可能な回路を採用した。

3.2.1 項記載の通り、小型化、省電力化のために、電源部については無線通信回路と合わせ1枚の基板上に実装することとし、低電圧駆動、低消費電流については、組み合わせた状態で評価を実施した。

試作した基板は3.2.1 項 図-9 に示したものである。

二次電池については充電回路への最適化を検討し、定格容量 3100mAh、公称電圧 2.4V の専用電池を採用した。

図-17 に試作した電池の外観を示す。

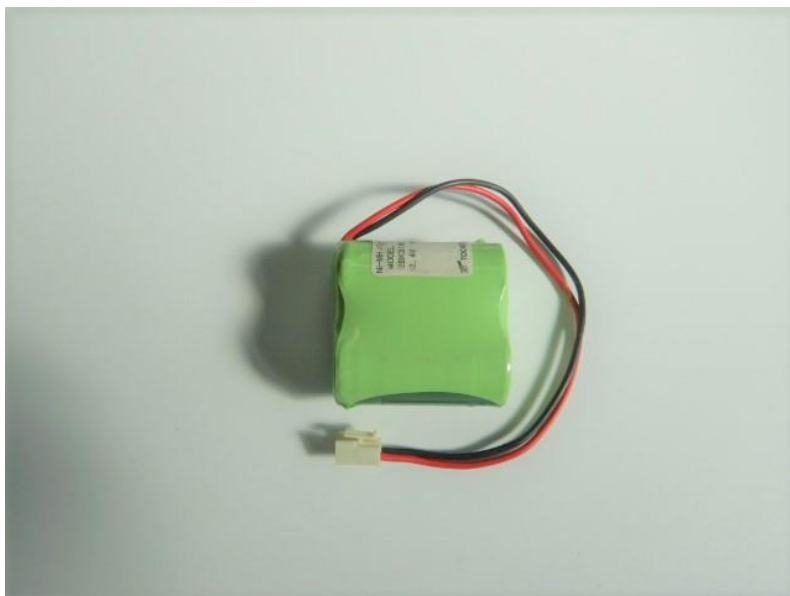


図-17 試作電池

定格容量については、電池の経年変化による容量低下で容量が 60% (1860mAh) となった場合でも、無日照時（無発電時）で平均消費電流が 5.54mA 以下であれば無日照時（無発電時）で 2 週間以上稼働可能であることとした。

保護構造は、光パネルの表面側にポリカーボネートの保護板を設置し、甲板上に設置することから人が装置に乗っても耐えられるよう保護枠を設置した。

保護枠については、太陽光発電パネル素子配列と直角方向に設置することにより、太陽光発電への影響を極力小さくする構造とした。

保護枠 1 本に上部から 100kg の荷重が加わった場合に太陽光発電パネル部分に応力が発生するかシミュレーションにより確認を行った結果、問題なきことが確認された。

図-18 に太陽光発電パネル保護構造、図-19 に上部から 100kg の荷重が加わった場合のシミュレーション結果を示す。

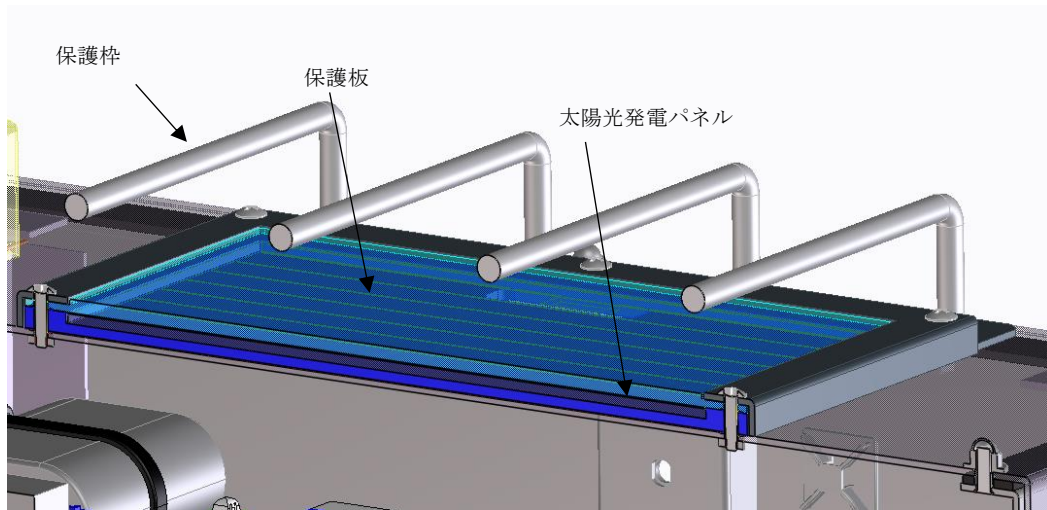


図-18 太陽光発電パネル保護構造断面

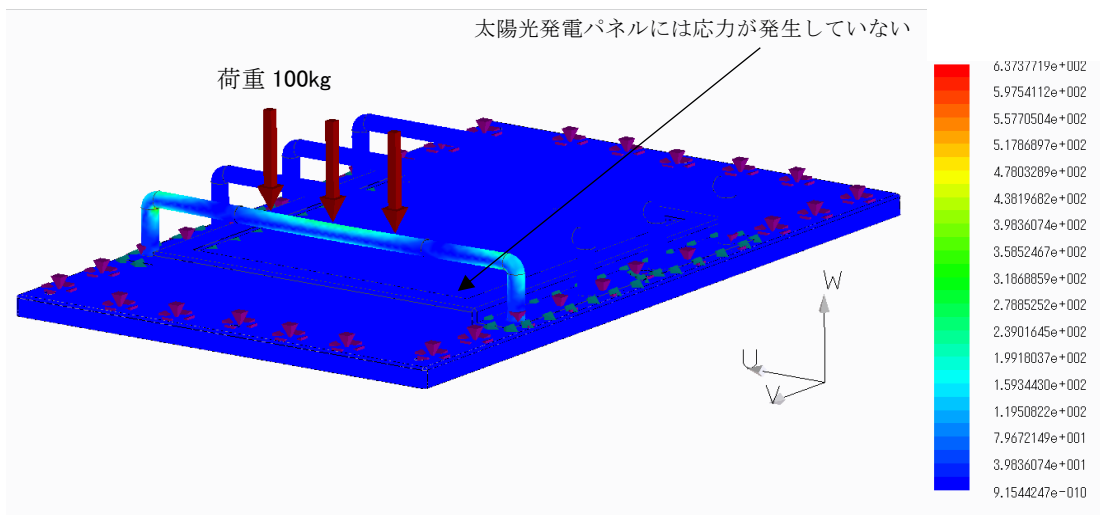


図-19 荷重シミュレーション結果

### 3.2.4 無線ひずみセンサ筐体の開発、要素試作及び単体評価

船舶設置環境に必要な耐久性を満たす無線ひずみセンサ筐体の開発、試作評価を行った。

筐体材質は耐食性に優れた SUS316 とした。

また、構造解析シミュレーションにおいて筐体板厚 1.5mm と 3mm の比較を行った結果、いずれの場合も、内部のひずみ計測に影響を与えないことを確認できたため、より軽量化が可能な板厚 1.5mm を採用することとした。

図-20 にシミュレーションモデル、図-21 に変形の解析結果、図-22 にひずみの解析結果を示す。



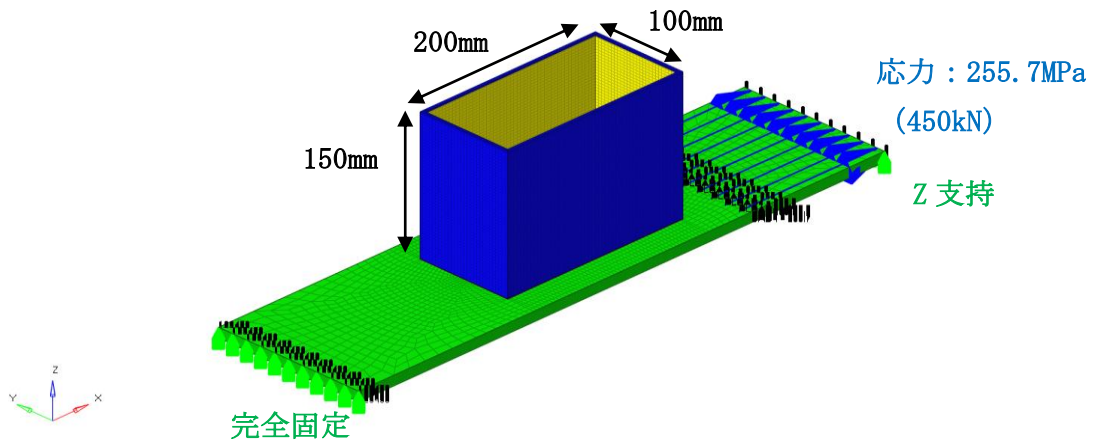
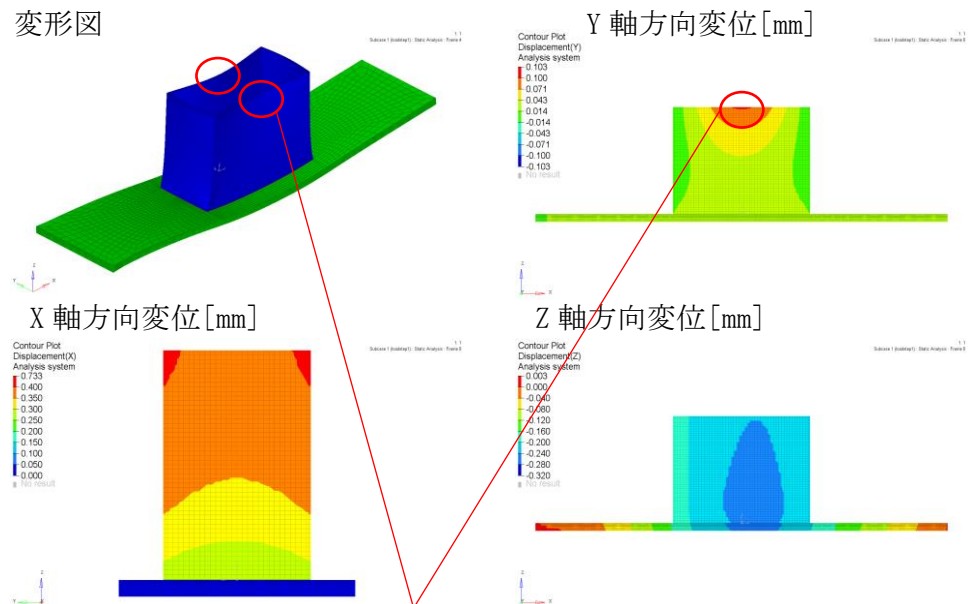


図-20 シミュレーションモデル

変形図



側壁の上部が内側へ0.1mm程度凹むように変形するが、造船所に確認した結果、船体に設置する場合はモデルのような曲げ変形はほとんど生じないということが確認されたため問題ないと考えられる。

図-21 変形解析結果

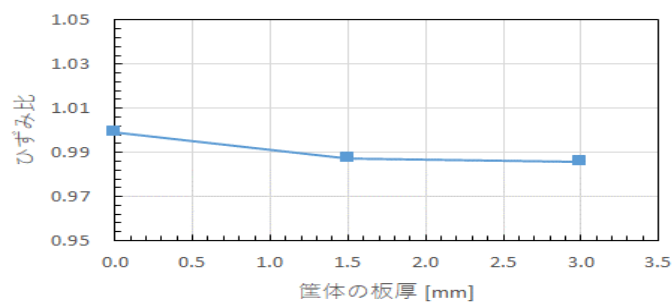


図-22 中央部表裏の長手方向ひずみ比解析結果

筐体の耐食性を高めるため、表面には海洋機器で実績のある、重耐塩塗装を施すこととした。

1次試作として、2種類の筐体を製作し取扱いの容易さ、メンテナンス作業の容易さを検証した。検証の結果、3.1.4項 図-8 センサ部構造の筐体外観図に示す構造とすることとした。図-23 に試作した筐体を示す。



図-23 試作筐体 2 種

### 3.3 評価システム構成要素の開発

構造安全評価システム構成要素の開発、試作及び単体評価を行った。

#### 3.3.1 データ収集部のハード選定、開発、要素試作及び単体評価

無線ひずみセンサからのデータ受信及びデータ変換、保存、表示を行うデータ処理部との役割分担の検討、役割分担に基づく必要機能を実現する機器の選定及び各試作の統合試験を実施するためのソフトウェアの開発、試作評価を行った。

データ収集部のハードには、920MHz 通信機能と LAN 出力機能を有する、OKI 製エッジコンピューターAE-2100 を採用することとした。

図-24 に AE-2100 の外観、表-8 に諸元を示す



図-24 AE-2100

表-8 AE-2100 諸元

LAN ポート	規格	1000Base-T/100Base-TX Auto-Negotiation Auto MDI/MDI-X		
	コネクタ形状	8 ピンモジュラージャック (RJ45)	ポート数	2 ポート
USB ポート 1	規格	USB2.0		
USB ポート 2	コネクタ形状	タイプ A コネクタ	ポート数	2 ポート
SD カードポ ート	規格	SD/SDHC/SDXC		
	コネクタ形状	SD カードスロット	ポート数	1 ポート
SIM カードポ ート	コネクタ形状	Micro SIM		
	ポート数	1 ポート		
COM ポート	コネクタ形状	D-sub 9 ピンコネクタ (オス)		
	ボーレート	115200 固定	ポート数	1 ポート
RS485 ポート	コネクタ形状	端子台		
	ポート数	1 ポート (2 線式/半二重通信)		
接点端子	コネクタ形状	端子台		
	ポート数	入力 : 1 ポート (給電/無給電用のポートがそれぞれあり、同時に使用不可) 出力 : 1 ポート		
動作保証環境		周囲環境温度 : -20~60℃ (※2) 周囲環境湿度 : 10~90% (結露しないこと)		
外形寸法		250.0 (W) × 156.0 (D) × 47.5 (H) mm ※突起物含まず		
電源		DC12V : DC-IN コネクタ	消費電力	最大 30W
本体質量		約 1.5kg		

AE-2100 で上記機能を達成するために必要な 8 アプリケーションの開発、インストールを行い、無線ひずみセンサからの、920MHz の無線受信および A/D データの電圧値への変換、全データにタイムスタンプを付与し、データベースを構築、データを LAN により出力することが可能なことを確認した。

各アプリケーションの機能を表-9 に示す。

表-9 各アプリケーションの機能

アプリ名称	機能
sr-util	SmartHop から受信したデータを sagent へ送信する また、sagent から受信したデータを SmartHop でセンサへ送信する
sagent	sr-util から受信したデータを mosquitto へ送信する また、mosquitto から受信したデータを sr-util へ送信する
mosquitto	MQTT ブローカー
mrec	mosquitto から受信したひずみデータを電圧値に変換し、 influxdb へ書き込む
influxdb	電圧値のデータベース
webapps	センサ部の設定を mosquitto へ送信
postgresql	センサ部の設定を保存するデータベース
grafana	グラフ表示 Web アプリ

データ処理部とのデータ通信は LAN を使用し、データ処理部から AE-2100 のデータを読み込む形でデータ通信を行うこととした。

### 3.3.2 データ処理部のデータの仕様決定、要素試作及び単体評価

ひずみデータを応力に変換する演算方法、表示方法等ソフトウェアの仕様を検討し、評価用ソフトウェアの開発及び試作評価を行った。

データ処理部は Windows PC を採用し、Windows の Microsoft.NET Framework 上で動作するものとした。

データ収集部のハードは、Panasonic 製ノート PC CF-SV1RDLVS を採用することとした。

図-25 に PC の外観、表-10 に諸元を示す



図-25 PC の外観

表-10 Panasonic 製ノート PC CF-SV1RDLVS 諸元

OS	Windows 10 Pro※32 64 ビット	
CPU	インテル®vPro® テクノロジー採用	
	インテル® Core™ i5-1145G7 プロセッサ (インテル® ターボ・ブースト・テクノロジー2.0 利用時は最大 4.40 GHz)	
コア数	4 コア	
チップセット	CPU に内蔵	
メインメモリー	16 GB LPDDR4x SDRAM (拡張スロットなし)	
ビデオメモリー	最大 8110MB (メインメモリーと共用)	
グラフィックアクセラレーター	インテル® Iris® Xe グラフィックス (CPU に内蔵)	
ストレージ	SSD:256GB (PCIe)	
表示方式	12.1 型 (16:10) WUXGA TFT カラー液晶 (1920×1200 ドット) アンチグレア	
	外部ディスプレイ表示	最大 1920 × 1200 : 約 1677 万色 (以下 HDMI 出力/USB3.1 Type-C ポートのみ) 最大 4096 × 2160 (30 Hz/60 Hz)
	本体+外部ディスプレイ同時表示	最大 1920 × 1200 : 約 1677 万色
無線 LAN	Intel® Wi-Fi 6 AX201	
	IEEE802.11a/b/g/n/ac/ax 準拠 (5GHz チャンネル帯 : W52/W53/W56※8) WPA3、WPA2-AES/TKIP 対応、Wi-Fi 準拠	
LAN	1000BASE-T/100BASE-TX/10BASE-T	
Bluetooth	Bluetooth v5.1	
サウンド機能	PCM 音源 (24 ビットステレオ)、インテル®) High Definition Audio 準拠、ステレオスピーカー	
セキュリティチップ	TPM (TCG V2.0 準拠)	
カードスロット	SD メモリーカードスロット×1 スロット (SDHC メモリーカード/SDXC メモリーカード対応/著作権保護技術対応/UHS-I・UHS-II 高速転送対応)	
インターフェース	USB3.1 Type-C ポート (Thunderbolt™ 4 対応、USB Power Delivery 対応)、USB3.0 Type-A ポート×3、LAN コネクター (RJ-45)、外部ディスプレイコネクター (アナログ RGB ミニ D-sub 15 ピン)、HDMI 出力端子 (4K60p 出力対応※14)、ヘッドセット端子 (マイク入力+オーディオ出力) (ヘッドセットミニジャック 3.5mm (M3)、CTIA 準拠)	
キーボード	OADG 準拠キーボード (86 キー)、キーピッチ:19 mm (横)/16 mm (縦) (一部キーを除く)	

ポインティングデバイス		ホイールパッド
カメラ		顔認証対応カメラ、解像度:Full HD 1080p、有効画素数:最大 1920×1080 ピクセル (約 207 万画素)、アレイマイク搭載
センサ		照度 (明るさ)
電源	AC アダプター	入力: AC 100 V ~ 240 V、50 Hz/60 Hz 出力: DC 16 V、5.3 A、電源コードは 100 V 専用
バッテリー	駆動時間	付属のバッテリーパック (S) 装着時:約 12.5 時間 別売のバッテリーパック (L) 装着時:約 19.5 時間
	充電時間	約 3 時間 (電源オフ時) / 約 3 時間 (電源オン時)
外形寸法		幅 283.5mm×奥行 203.8mm×高さ 24.5mm (突起部除く)
使用環境条件		温度:5°C~35°C、湿度:30%RH~80%RH (結露なきこと)
付属品		AC アダプター、バッテリーパック (S)、取扱説明書 等

データ処理部ではデータ収集部で変換された電圧データ  $e$  を取得し、ひずみデータ  $\varepsilon$  へ変換する。

変換は以下の計算式により変換する。

$$e = \frac{1}{4} K_S \cdot \varepsilon \cdot E_B \cdot G$$

$$\varepsilon = \frac{4e}{K_S \cdot E_B \cdot G}$$

$K_S$  : ゲージ率

$E_B$  : ブリッジ電圧

$G$  : アンプのゲイン

ひずみデータ  $\varepsilon$  は、以下の計算式により応力  $\sigma$  に変換する。

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$E$  : 弾性係数

ひずみデータの算出、ひずみデータから応力への変換に必要な定数 ( $K_S$ 、 $E_B$ 、 $G$ 、 $E$ ) については任意に設定を可能とする、設定機能をデータ処理部のソフトウェアに持たせることとした。

上記機能を有するソフトウェアの開発を完了し、無線ひずみセンサからの A/D データがデータ収集部で電圧値に変換され、データ処理部で応力に変換され、表示できることを確認した。

図-26 にパラメーター設定画面、図-27 に計測画面を示す。

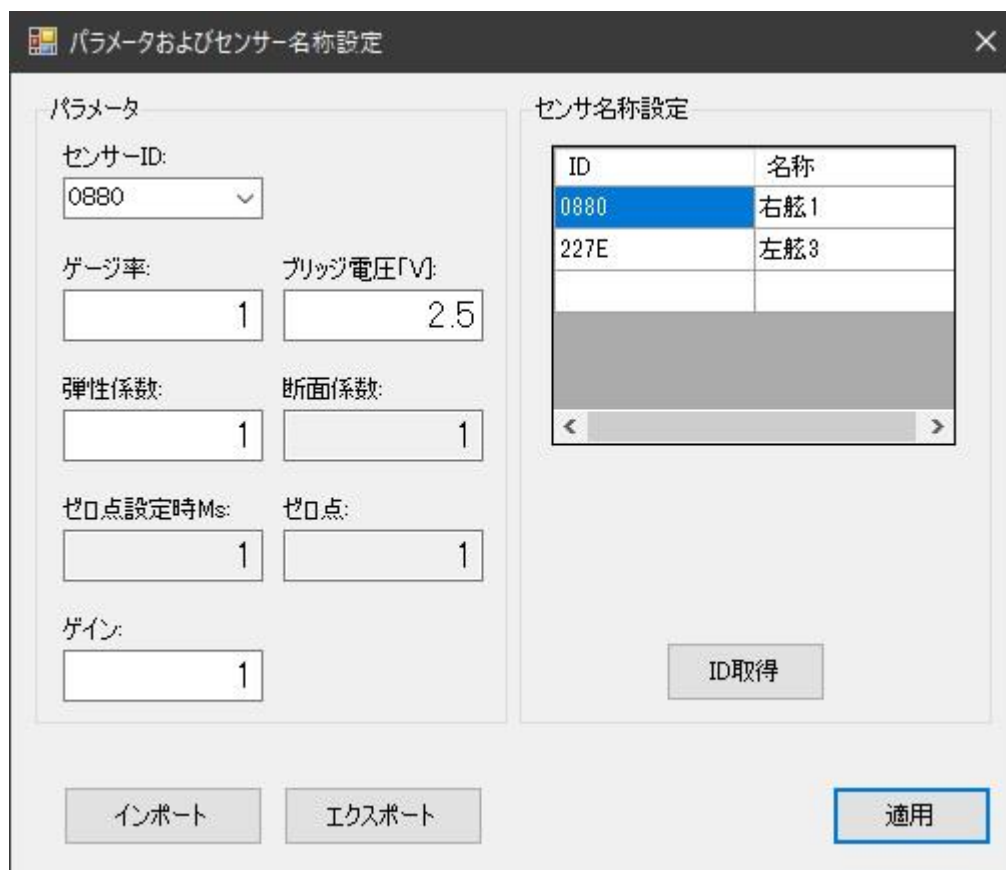


図-26 パラメーター設定画面



図-27 計測画面



### 3.4 ラボ内総合試験

ラボ内での総合試験実施及び総合評価を行った。

#### 3.4.1 構成要素を組み合わせた計測及び無線通信試験の実施と総合評価

3.2 項で試作した構成要素を組み合わせた計測及び無線通信試験の実施と総合評価を行った。

試験は図-28 に示すように、データ収集部に対し、無線ひずみセンサの最適な向きを確認するために、3 方向で評価を実施した。

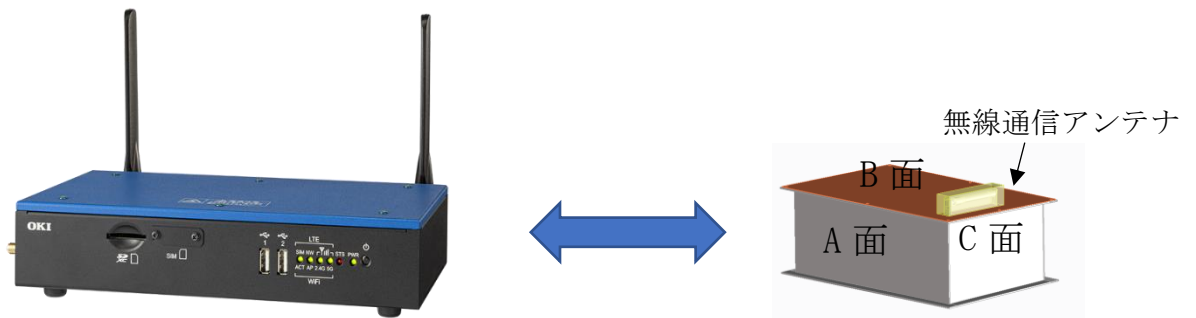


図-28 無線通信試験方法

試験結果を表-11 に示す。

無線通信の判定基準は、運用時に安定したデータ通信が可能となる値とした。

無線平均受信レベル平均値 (RSSI 値) : -93dBm 以上

エラー率 (PER 率) : 10%以下

表-11 無線ひずみセンサとデータ収集部との距離、向きの影響

A 面						
距離	データ収集部⇒無線ひずみ計			無線ひずみ計⇒データ収集部		
	RSSI (dBm)	PER (%)	判定	RSSI (dBm)	PER (%)	判定
50m	-83.00	0	OK	-80.47	0	OK
100m	-91.17	8	OK	-89.60	1	OK
150m	計測不可	100	NG	-92.55	0	OK
B 面						
距離	データ収集部⇒無線ひずみ計			無線ひずみ計⇒データ収集部		
	RSSI (dBm)	PER (%)	判定	RSSI (dBm)	PER (%)	判定
50m	-82.55	0	OK	-81.03	2	OK
100m	-87.17	1	OK	-85.00	1	OK
150m	計測不可	74	NG	-89.00	0	OK
C 面						
距離	データ収集部⇒無線ひずみ計			無線ひずみ計⇒データ収集部		
	RSSI (dBm)	PER (%)	判定	RSSI (dBm)	PER (%)	判定
50m	-77.88	0	OK	-76.45	0	OK
100m	-86.05	0	OK	-83.63	0	OK
150m	計測不可	98	NG	-93.58	2	NG

評価の結果、いずれの向きであっても 100m までの通信は可能であることが確認された。

また、無線受信強度から C 面の向きが最適と判断し、設置時には C 面をデータ収集部方向に向ける設置方法とすることとした。

### 3.4.2 個別要素毎の耐環境試験の実施と総合評価

3.1.1 項で検討した要求仕様に基づき、3.2 項で試作した構成要素毎に温度サイクル試験、温湿度試験、屋外暴露試験、振動衝撃試験を行った。

試験条件は、開発目標仕様に対し、より厳しい条件で試験を実施した。

図-29 に試験状況、表-12 に試験項目及び試験結果を示す。

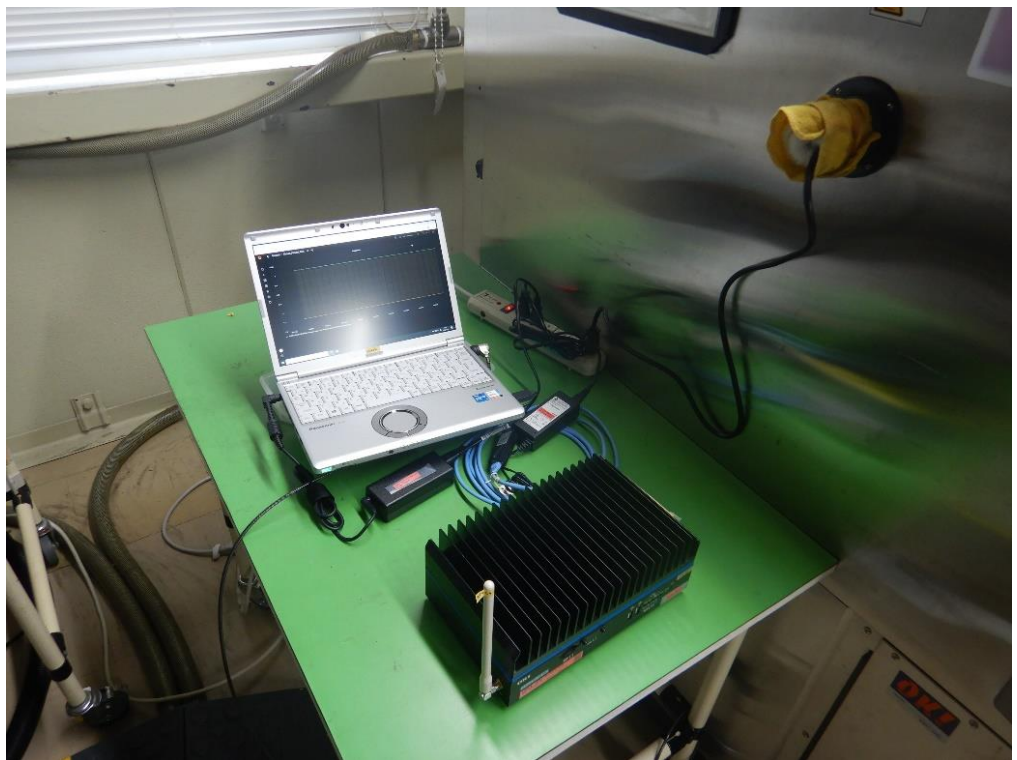
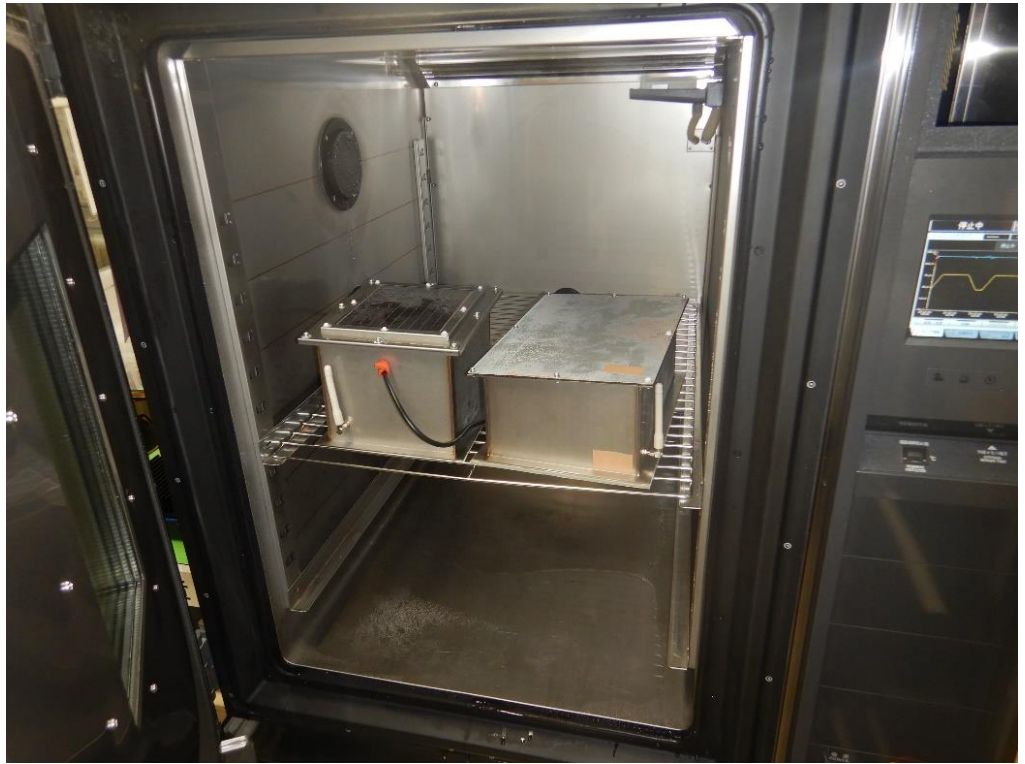


図-29 耐環境試験状況

表-12 耐環境試験結果

No.	試験項目	試験条件	判定
1	高温高湿動作試験	高温+70℃/ 95%RH、96H 判定：機器に異常がないこと 試験中及び試験後に正常に動作すること	良
2	低温動作試験	低温-25℃、96H 判定：機器に異常がないこと 試験中及び試験後に正常に動作すること	良
3	温湿度サイクル試験	温湿度条件 高温高湿 +70℃ 93±3%RH 常温常湿 25℃ 93±3%RH 低温 -25℃ 湿度制御無し サイクル条件： 常温⇒1.5H⇒高温(4H)⇒1.5H⇒常温(1H)⇒ 1.5H⇒高温(4H)⇒1.5H⇒常温(2.5H) ⇒0.5H⇒低温(3H)⇒1.5H⇒常温(1.5H) 合計24Hを1サイクルとし、 合計10サイクル実施 判定：機器に異常がないこと 試験中及び試験後に正常に動作すること	良
4	振動試験	5～9Hz：振幅3.0mm or 9～200Hz：加速度10m/s <sup>2</sup> (1G) 方向：X、Y、Z軸方向（加振順序は任意） 判定：機器に異常がないこと 試験中及び試験後に正常に動作すること	良
5	衝撃試験	設置方向およびこれと直角の方向に、最大加速度500m/s <sup>2</sup> の衝撃をそれぞれ2回加える 判定：機器に異常がないこと 試験試験後に正常に動作すること	良
6	屋外暴露試験	晴天時に弊社社屋屋上に設置（24H） 計測：筐体内温度上昇を計測する 判定：機器に異常がないこと 試験中及び試験後に正常に動作すること	温度 上昇 15.7℃ 良

### 3.5 ES 機的设计及び試作

主体者自らの開発費を以て、3.4 項での試験結果を反映した、実船での評価が可能な ES 機 (Engineering Sample : システム一式) の設計及び試作を行った。

図-30 に試作を行った ES 機の写真を示す。



図-30 ES 機センサ部写真



### 3.6 報告書作成

事業内容に基づき、本成果報告書を作成した。

## 4. 目標の達成状況

### 4.1 船体構造モニタリングシステムの要求仕様を満足する

開発目標仕様を設定し、これに基づき、「船用無線ひずみモニタリングシステム」の構成要素の開発、試作を完了した。

設定された開発目標仕様に対し、構成要素試作品を用いて評価を実施し、要求仕様を満足することを確認した。

- ・ひずみ精度確認試験を行った結果、ひずみ計測精度を  $2.3\mu\text{st}$  で計測できることを確認したため、 $5\mu\text{st}$  以下でひずみ計測を行うという目標を達成することができた。
- ・構成要素を組み合わせて試験を行った結果、10Hz サンプルングレートでひずみ計測およびデータ転送をできることを確認したため、5Hz 以上のサンプルングレートでひずみ計測を行うという目標を達成することができた。
- ・構成要素を組み合わせて試験を行った結果、9 秒間隔で無線データの送信、データ収集部でのデータ受信を確認したため、10 分以下の間隔で無線でのデータ送信が可能にするという目標を達成できた。

### 4.2 ES 機の設計及び試作、評価の完遂

2023 年度に行う評価試験に供する船用無線ひずみモニタリングシステムの設計を完了し、評価試験用システムの試作を完了した。試作した構成要素を組み合わせたシステムにより 4.1 項の項目が、組み合わせ状態で実現できることをラボ内評価にて確認した。

## 5. 2022 年度の実施内容の概要

### (1) システムの検討

船用無線ひずみ船体構造モニタリングシステムについて、システム仕様と構成、設置場所や設置方法、機器耐久性やメンテナンス方法等の検討を行った。

### (2) センサ構成要素の開発

船用無線ひずみセンサ構成要素として、ひずみ計測処理部、無線通信部、電源部、筐体の開発及び試作並びに単体評価を行い、ひずみ計測精度を  $2.3\mu st$  で計測できることを確認したため、 $5\mu st$  以下でひずみ計測を行うという目標を達成することができた。また、10Hz サンプルングレートでひずみ計測およびデータ転送をできることを確認したため、5Hz 以上のサンプルングレートでひずみ計測を行うという目標も達成することができた。更に、9 秒間隔で無線データの送信、データ収集部でのデータ受信を確認したため、10 分以下の間隔で無線でのデータ送信が可能にするという目標も達成することができた。

### (3) 評価システム構成要素の開発

構造安全評価システム構成要素として、データ収集部のハード選定、データ処理部のデータの処理方法等の開発及び試作並びに単体評価を行った。

### (4) ラボ内総合試験

試作したセンサ構成要素と評価システム構成要素を組み合わせ、ラボ内での総合試験を実施し総合評価を行ったところ、各構成要素が仕様通りに正常に動作し、100m まで通信が可能なことを確認した。

### (5) ES 機的设计及び試作

船用無線ひずみモニタリングシステムの技術試作機的设计及び試作を行い、構成要素を組み合わせたシステムにおいても要求仕様を満足できることをラボ内評価にて確認した。

### (6) 報告書作成

- ・事業内容に基づき、成果報告書を作成した。

## 6. 今後の予定

### 6.1 ES機実運用環境下での評価試験

次年度に計画されている、ES機の実環境下で約9カ月の屋外暴露動作試験の実施及び、実船舶内での通信試験を実施する。

屋外暴露試験はOKI所有の洋上バージを使用する、試験の概要を図-31に示す。



図-31 試験概要



## 6.2 商品化設計

5.1 項で実施する試験の結果から課題を抽出し、改良設計を行うことにより商品化設計を完了する。

## 7. 2022 年度まとめ

今年度の本開発により、太陽光発電パネル駆動、無線データ通信による船体ひずみ計測の実現可能性が確認でき、実運用環境下での評価に供することができる ES 機的设计、製作を完了することができた。

これにより、次年度に評価、改良を加えることによって、商品化設計を行うことが可能となった。

本システムに対しては、船舶の安全確保を目的とした国産システムの商品化に対する各所からの期待も大きく、次年度の商品化の完遂を目指したい。

最後に、本開発事業は公益財団法人日本財団の助成金を受けて実施しており、ここに記して厚く感謝申し上げます。

## 第 2 章 2023 年度成果報告

## 8. 2023 年度の実施内容

### 8.1 ES 機の性能試験

#### 8.1.1 洋上構造物（OKI 実験施設）でのフィールドテスト

船用無線ひずみ船体構造モニタリングシステム ES 機のフィールドテストを行った。フィールドテストは洋上に係留されたバージ（沼津市三津シーテック事業所）屋上に 22 年度製作した ES 機を実際の設置方法で施工設置した。

（OKI 実験施設は 23 年 9 月末に更新を行った、耐環境信頼性は更新施設への移設により継続して実施した）

図-32 にバージの洋上配置を示す。



図-32 バージ洋上配置（静岡県沼津市三津 内浦湾）

図-33 にフィールドテスト試験構成を示す。

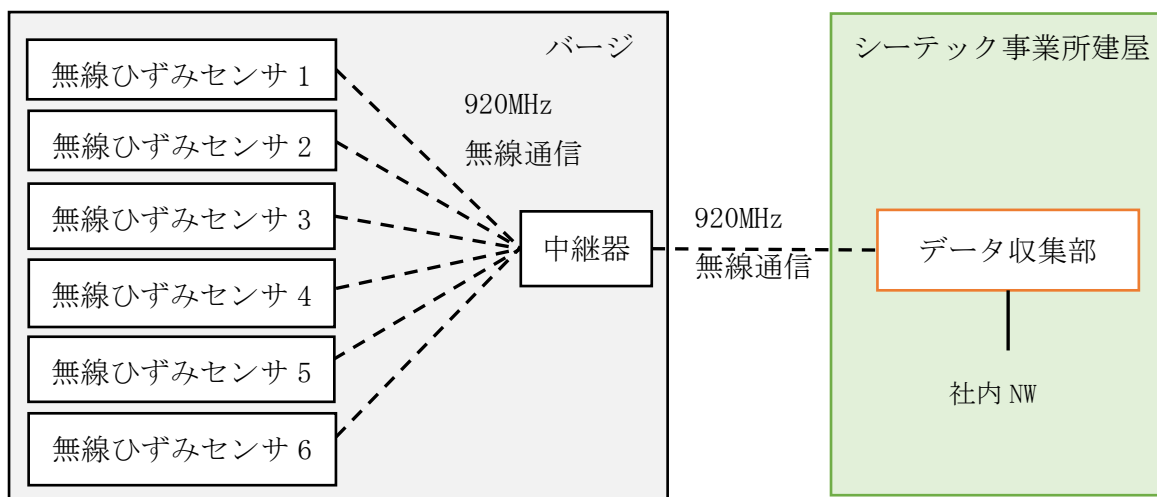


図-33 フィールドテスト試験構成

#### 8.1.1.1 旧バージでのフィールドテスト

2023年5月から9月の間、更新前の旧バージでフィールドテストを実施した。  
図-34に各部の概要を示す。

バージ



無線ひずみセンサ



中継器



シーテック事業所



データ収集部



図-34 フィールドテスト各部概要

#### 1) 無線ひずみセンサバージ設置作業

##### ① 塗装はがし範囲の設定

構造用接着両面テープにより、無線ひずみセンサを屋上甲板（鉄板）に強固に固定するために、塗装の除去を行った。

塗装はがし範囲は 400mm×250mm とし、範囲をマスキングテープにてマーキングした。

図-35 にマーキング状態を示す。

本バージは 30 年間使用しており塗装も重ね塗りしているため、塗装が厚く、塗膜にひび割れも発生している。



図-35 マーキング状態

##### ② 塗装はがし、表面仕上げ

設定範囲の塗装をサンダーにて除去後、#100にて仕上げ研磨を行った。

図-36 に塗装除去、図-37 に#100仕上げ状態を示す。

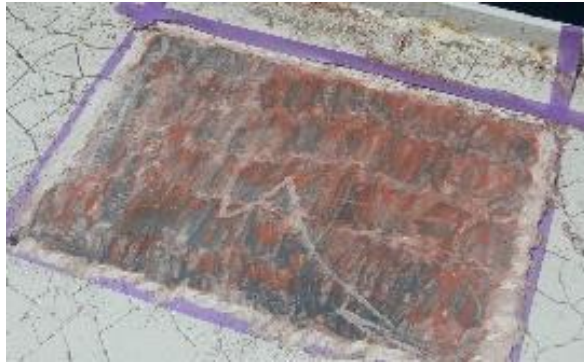


図-36 塗装除去



図-37 #100 仕上げ後

場所により錆が深くまで進行している場所（センサ No. 3）もあったが、錆の影響の確認も含め、除去しきれない場合はそのままとした。

③ 脱脂

塗装除去面をアルコール（イソプロピルアルコール）にて脱脂した。

図-38 に脱脂状態を示す。



図-38 アルコール脱脂

④ 無線ひずみセンサ筐体の接着

構造用接着両面テープ VHB テープにて筐体を甲板に接着した。

甲板の変形等により隙間のできる部分には VHB テープを重ね張りし、厚みを確保することにより、隙間なく全周が接合できるようにした。

VHB テープの剥離紙をはがし、甲板に押し当てるように（体重をかけ）貼り



付けを行った。

図-39 に筐体への VHB テープ貼り付け状態を示す。



図-39 筐体への VHB テープ貼り付け状態

⑤ ひずみゲージの溶接設置

計測用ひずみゲージを筐体底面の開口部甲板に点溶接で溶接設置した。温度補償用のダミーゲージについては、あらかじめ鋼板に溶接を実施しておき、ダミーゲージ鋼板と甲板の間に熱伝導グリスを介して甲板のひずみの影響を受けないように固定した。

図-40 にひずみゲージ溶接作業、図-41 にダミーゲージ貼り付け状態を示す。

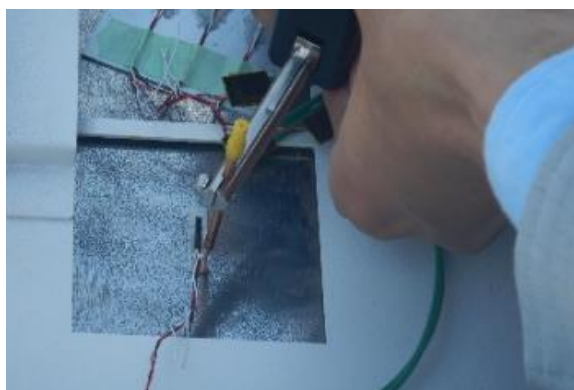


図-40 ひずみゲージ溶接作業



図-41 ダミーゲージ貼り付け状態

⑥ 防水コーキング

接合面から筐体内部への水の侵入を防止するため、筐体周辺部のコーキング（コーキング幅は5mm）を実施した。

図-42 にコーキング状態を示す。

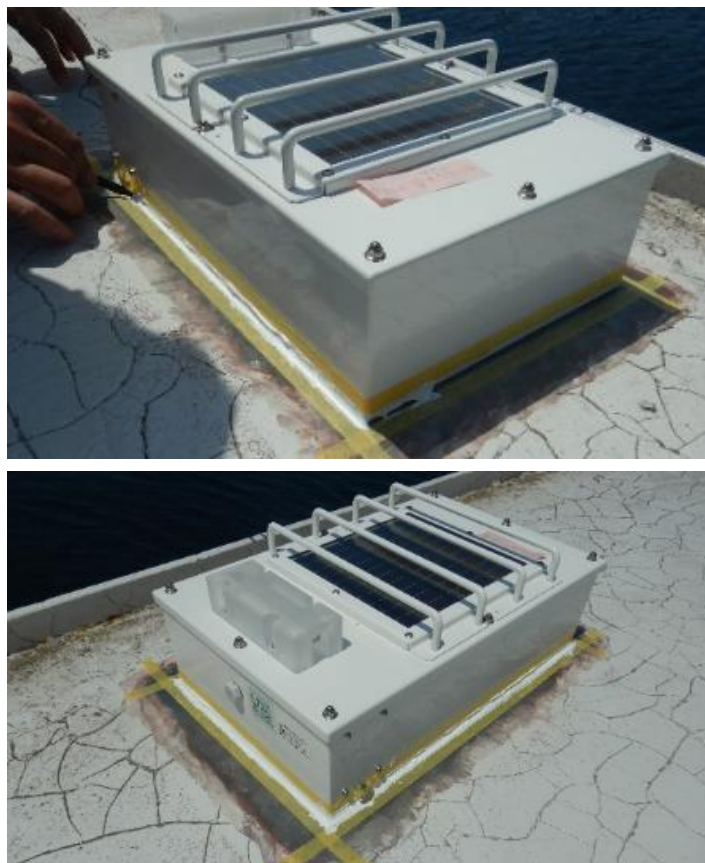


図-42 筐体周囲のコーキング

⑦ 塗装はがし面の再塗装

塗装はがし面で筐体の範囲の外側について再塗装を実施した。

図-43 に再塗装作業を示す。



図-43 再塗装作業



⑧ 内部基板の設置、配線

筐体内部に基板を設置し、配線作業を行った。

図-44 に基板設置、配線完了状態を示す。



図-44 基板設置、配線完了

⑨ 設置完了

図-45 に設置した無線ひずみセンサの配置、図-46 に設置完了状態を示す。

中継器については、伝送を有利にするため、周囲に障害物がない位置に設置した。

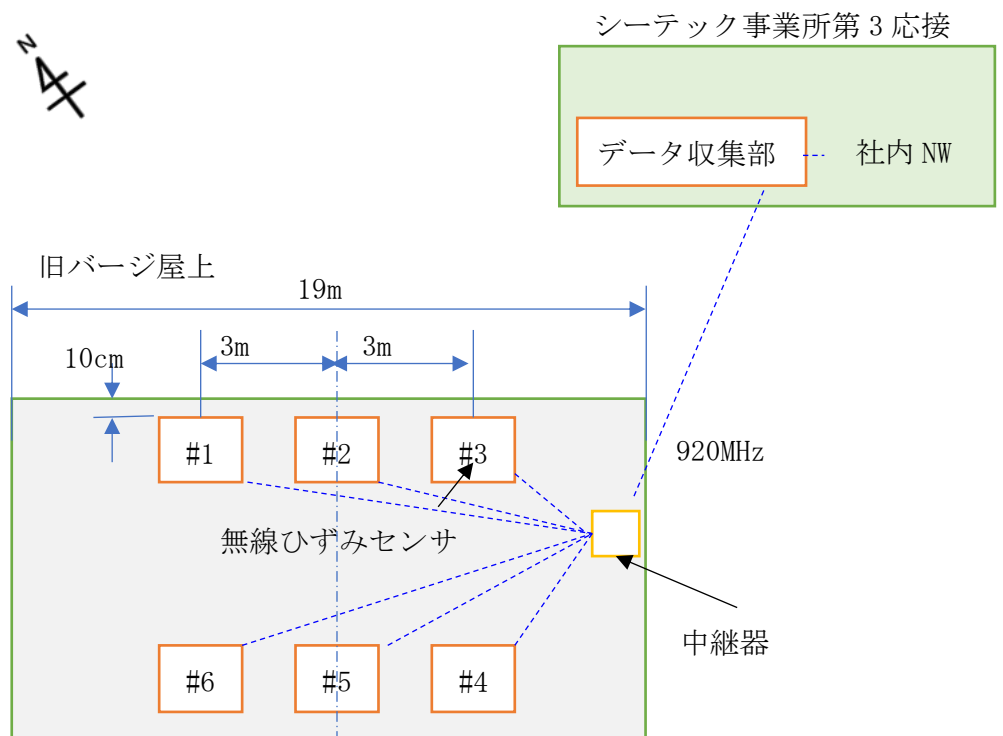


図-45 旧バージ無線ひずみセンサ配置

# 1



# 2



#3



#4





#5



#6



## 中継器



図-46 設置完了状態

### 2) シーテック事業所建屋内へのデータ収集部設置

シーテック事業所3階の応接室にデータ収集部を設置した。

データ収集部のアンテナは壁部分で送受信感度が低下することが確認されたため、電波透過性が高く920MHz通信に影響のない窓のガラス部分の高さとなるように調整し設置した。

図-47にデータ収集部設置状況を示す。

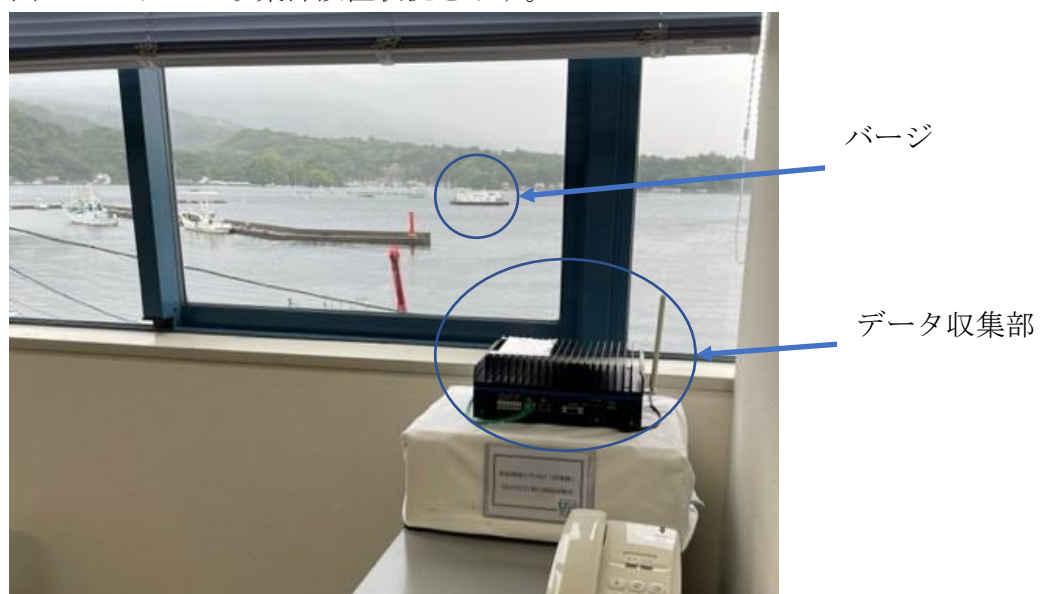


図-47 データ収集部設置状況

### 3) 設置後動作検証結果

旧バージョンに設置後のひずみの測定結果を図-48 に示す。

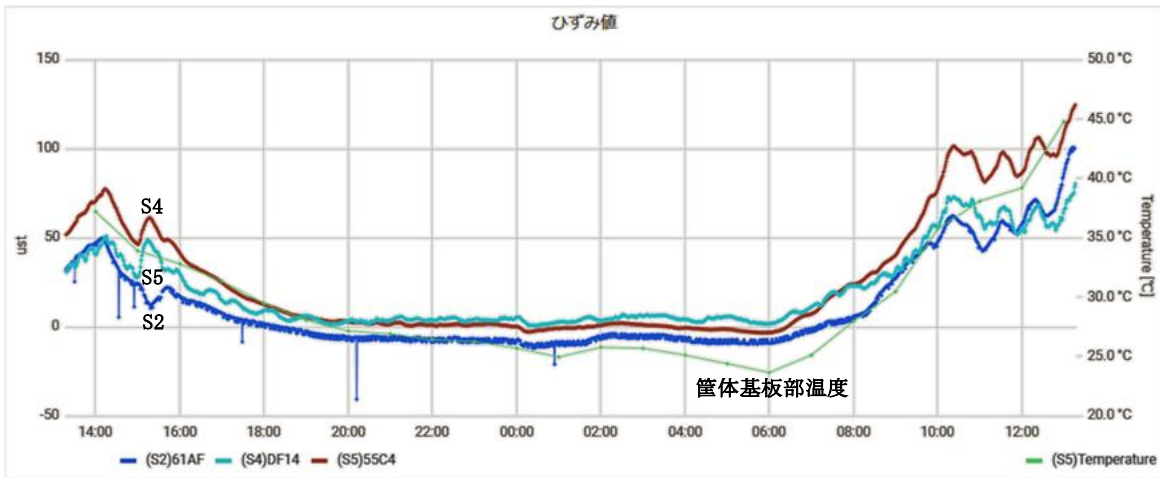


図-48 旧バージョン設置後ひずみ値測定結果

- ・データ変動は日中の温度変化や日照に伴う熱膨張を反映しており、正常に計測できている。
- ・S2 で急な変動が見られるが、これは後日ファームウェアのバグであることが分かり、改修している (8.2 項 1) 参照)。

センサ部 6 式のうち 1 式については加速度計 2 軸 (Z 軸：鉛直方向、Y 軸 (前後方向)) での計測確認を行った。

加速度についても正常に計測が実施できていることを確認した。

消費電力については (8.4 項 2) 消費電流の検証) に後述する。

設置後の加速度 2 軸 (Z 軸：鉛直方向、Y 軸 (前後方向)) の測定結果を図-49 に示す。

- ・Z 軸のデータ変動は日中の温度変化や日照に伴う熱膨張を反映しており、Y 軸のデータ変動はバージが受ける波浪の動きであると思われる。

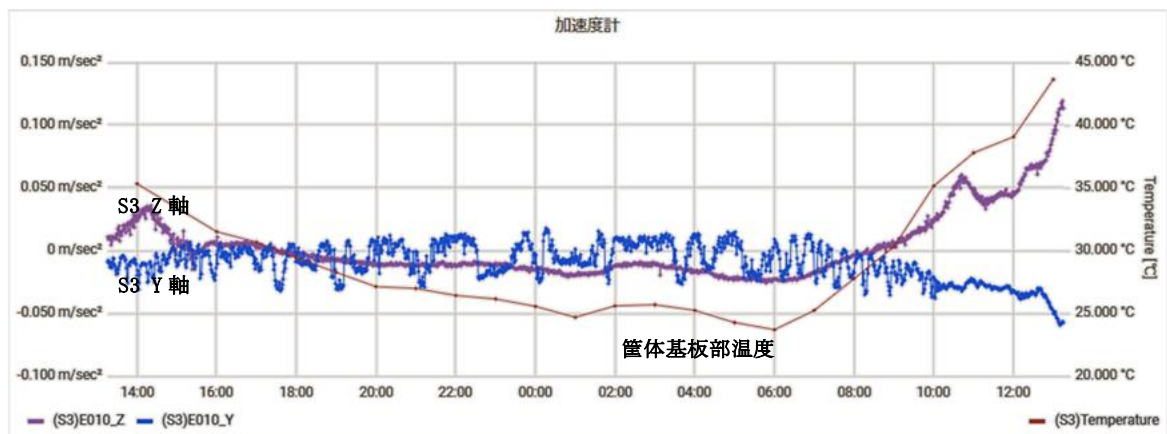


図-49 旧バージョン設置後加速度測定結果

#### 8.1.1.2 新バージョンでのフィールドテスト

2023 年 9 月に旧バージョンの老朽更新による撤去、新バージョン SEATECNEO への更新に伴い、センサ部の撤去移設を行い、10 月より新バージョンにてフィールドテストを実施した。



新バージは旧バージの設置場所に入れ替えの形で設置され、構造的には一部変更されているが、洋上での外囲環境は旧バージと同等で差異はない。

図-50 に新バージの外観を示す。



図-50 新バージ：SEATECNEO

1) 旧バージからの撤去時状態確認

① 撤去前外観

外観上は6式すべてにおいて異常は確認されなかった。

図-51 に撤去前の外観を示す。



図-51 撤去前外観

## ② 基板等内部状況

筐体の蓋を開け、内部の基板に異常がないか確認を行った。

6式すべてにおいて内部及び基板類、配線等において腐食、変色、損傷は認められず異常は確認されなかった。

図-52 に筐体内部状態を示す



図-52 筐体内部状態

## ③ ひずみゲージ設置部

内部の基板を撤去し、底面に設置されたひずみゲージ及びダミーゲージに異常がないか確認した。

6式すべてにおいて、ひずみゲージ、ダミーゲージとも腐食、変色、損傷は認められず異常は確認されなかった。

図-53 に基板撤去後の状態を示す。



図-53 基板撤去後の内部状態

## ④ 筐体撤去後の甲板

筐体を撤去し、底面の甲板の状態、筐体底面の状態に異常がないか確認した。



6式すべてにおいて筐体底部の甲板には腐食、変色、損傷は認められず異常は確認されなかった。

筐体については接着強度が十分に保持されており、強固に接着されている状態が維持されていた。

このため、撤去時の応力により筐体下部に1-2mmの変形が発生、更新においては再利用不可と判断し、筐体については更新することとした。

図-54に筐体撤去後の甲板の状態を示す。



図-54 筐体撤去後の状態

## 2) 旧バージからの撤去時状態確認

### ① 塗装はがし範囲の設定

旧バージと同様に構造用接着両面テープにより、無線ひずみセンサを屋上甲板（鉄板）に強固に固定するために、塗装の除去を行った。

塗装はがし範囲は400mm×250mmとし、範囲をマーキングした。

図-55にマーキング状態を示す。

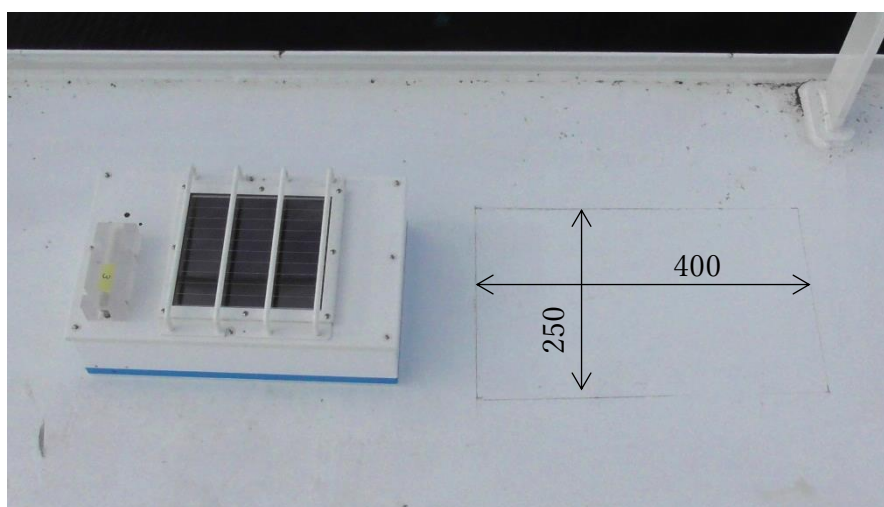


図-55 マーキング状態

② 塗装はがし、表面仕上げ

設定範囲の塗装をサンダーにて除去後、#100にて仕上げ研磨を行い、塗装除去面をアルコール（イソプロピルアルコール）にて脱脂した。

図-56に塗装除去、#100仕上げ状態を示す。



図-56 塗装除去、#100仕上げ後

③ 筐体への構造用両面テープの貼り付け

構造用接着両面テープ VHB テープを筐体に貼り付けた。

甲板の変形等は見られないため、VHB テープは1重のみとする。

図-57に VHB テープ貼り付け状態を示す。

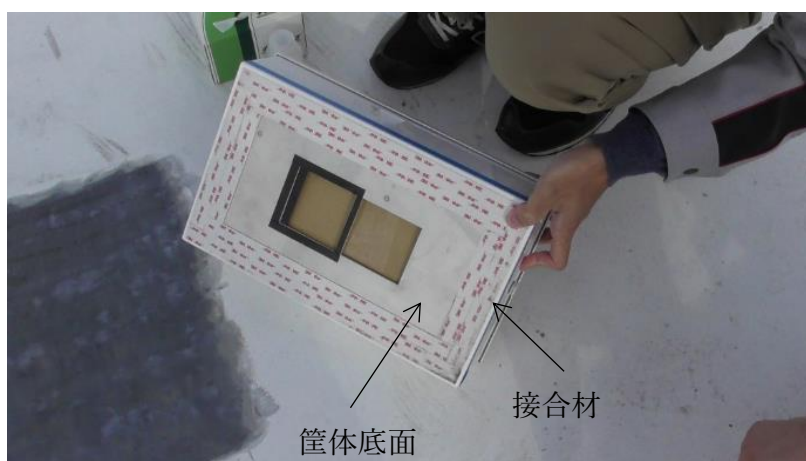


図-57 VHB テープ貼り付け状態

④ 筐体の甲板への貼り付け

VHB テープの剥離紙をはがし、甲板に押し当てるように

(体重をかけ) 貼り付けを行った。  
図-58 に甲板への貼り付け状態を示す。



図-58 甲板への貼り付け状態

#### ⑤ ひずみゲージの溶接設置

計測用ひずみゲージを筐体底面の開口部甲板に点溶接で溶接設置した。  
ひずみゲージの保護は旧バージョンではシリコン塗布で保護したが、新バージョンでは検討の結果、ひずみゲージメーカー推奨の方法で保護することとし、ひずみゲージ上にSBテープ貼り付け、さらにVMテープで保護を行った。  
図-59 にひずみゲージの溶接状態、図-60 にSBテープ貼り付け状態、図-61 にVMテープ貼り付け状態を示す。



図-59 ひずみゲージ溶接状態

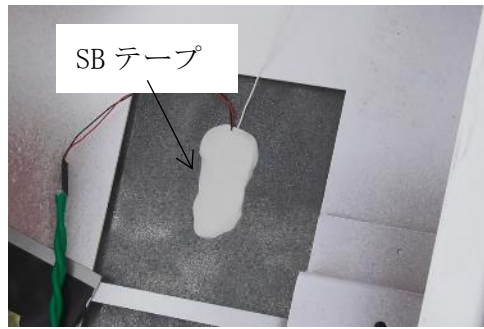


図-60 SB テープ貼り付け状態

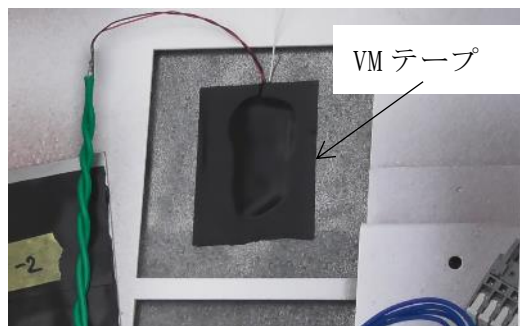


図-61 VM テープ貼り付け状態

温度補償用のダミーゲージについては、あらかじめ鋼板に溶接を実施しておき、ダミーゲージ鋼板と甲板の間に熱伝導グリスを介して甲板のひずみの影響を受けないように固定した。

図-62 にひずみゲージ、ダミーゲージ貼り付け状態を示す。

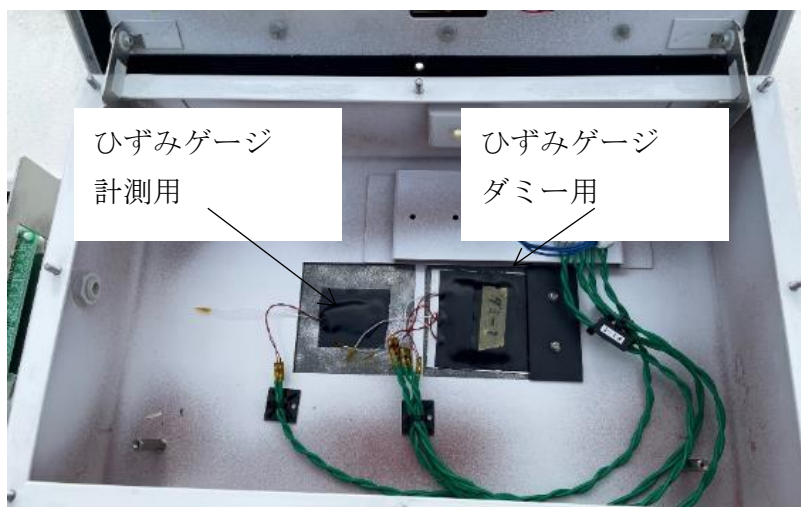


図-62 ひずみゲージ、ダミーゲージ貼り付け状態

⑥ 内部基板の設置、配線

筐体内部に基板を設置し、配線作業を行った。

図-63 に基板設置、配線完了状態を示す。

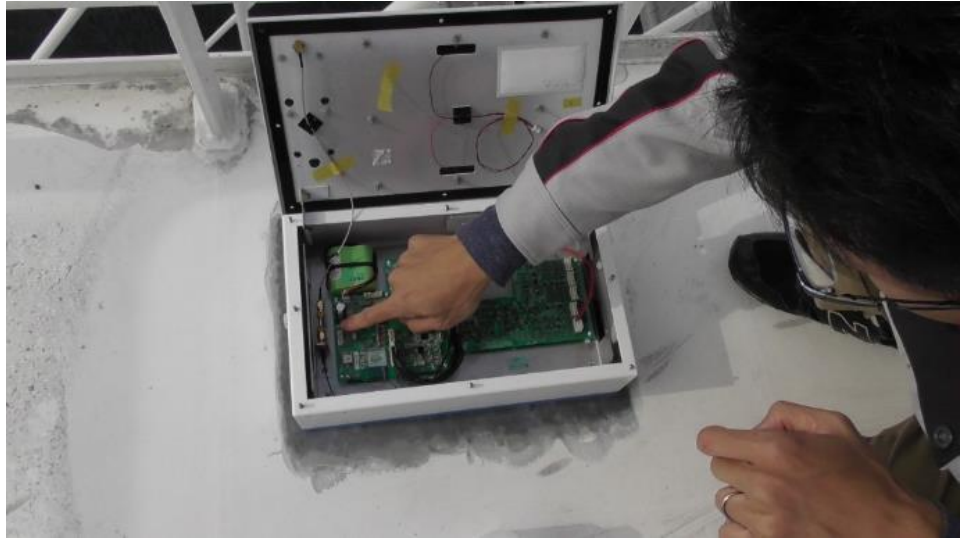


図-63 基板設置、配線完了状態

⑦ 設置完了

図-64 に設置した無線ひずみセンサ配置、図-65 に設置完了状態を示す。

中継器については、旧バージョンと同様に、伝送を有利にするため、周囲に障害物がない位置に設置した。なお、旧バージョンからの移設に伴い位置の影響の確認を含め、設置位置を変更した。旧バージョンと新バージョンでは屋上の構造物の配置や手すりが周囲に付いているなどの差異があり、同じ位置関係で無線ひずみセンサを設置できなかったため位置関係変わったことの影響も含めて確認を行った。

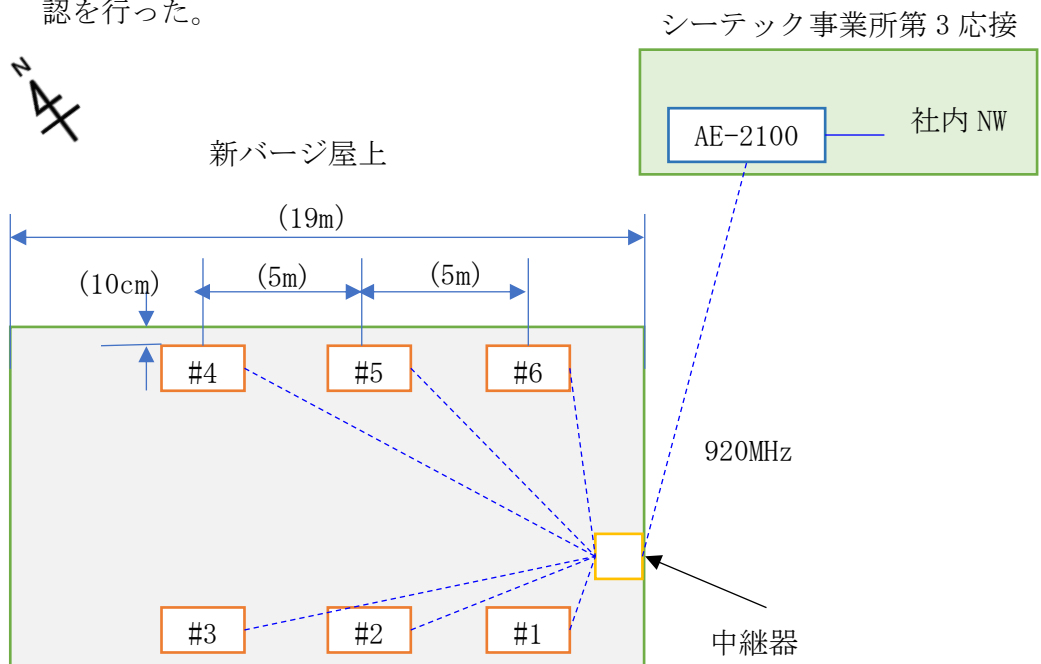


図-64 新バージョン無線ひずみセンサ配置



#1



#2



#3



#4





#5



#6





## 中継器



図-65 設置完了状態

### 3) 設置後動作検証結果

設置後の測定結果を図-66 に示す。

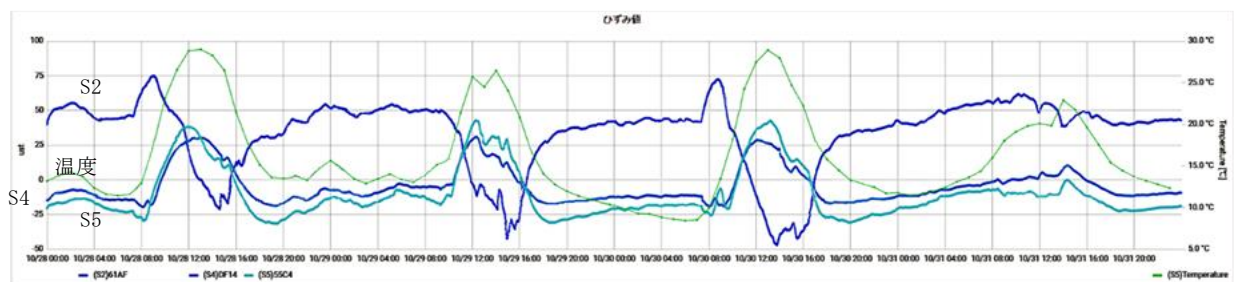


図-66 新バージ設置後測定結果

- ・データ変動は日中の温度変化や日照に伴う熱膨張を反映しており、正常に計測できている。
- ・オフセットについては、初期からの変動を見るため、0点調整は実施していないためベースラインはセンサ毎に異なる。

無線通信強度の状況を図-67 に示す。

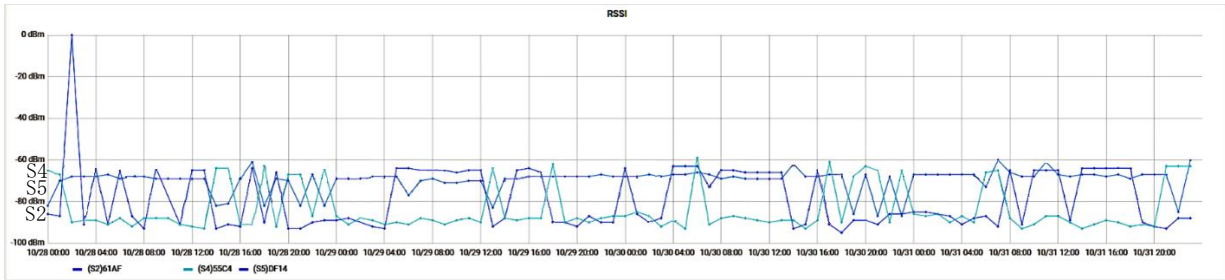


図-67 無線通信強度状況

- ・旧バージ設置時からセンサ部アンテナの位置を中央から端部に変更することで感度を向上させたため、（詳細は後述 8.2 3）項）中継器なしでも、シーテック事業所との間で（約 400m）で十分な無線通信強度であることが確認できた。
- ・無線通信のデータ送信間隔 9 秒、遅延時間 0.1 秒以下でデータ送信、データ処理ができることを洋上構造物で実運用を模擬した環境下及び実船舶で性能試験を行い確認した。

#### 4) 劣化状況の確認

10 月より開始した新バージでのフィールド試験の確認を 2 月に実施した。外観の損傷状況から 5 年間の劣化状態を推定し、3 年以上のメンテナンス間隔での運用が、可能であり、問題ないと判断した。

なお、設置評価は今後も継続して実施する。

確認結果を表-13 に示す。

表-13 新バージフィールド試験結果

No.	筐体外観		内部（筐体内部、基板、配線等）			判定
	腐食	傷、損傷	水の浸入	腐食	傷、損傷	
1	なし	なし	なし	なし	なし	良
2	なし	なし	なし	なし	なし	良
3	なし	なし	なし	なし	なし	良
4	なし	なし	なし	なし	なし	良
5	なし	なし	なし	なし	なし	良
6	なし	なし	なし	なし	なし	良

### 8.1.2 実船における無線通信試験

日本シッパード株式会社様のご協力により、実船にて無線通信試験を実施した。  
船種としては、バルクキャリアとコンテナ船の2種で実施した。

#### 8.1.2.1 バルクキャリア

全長約300mのバルクキャリアで、岸壁に接岸状態で艀装作業中の船舶にて試験を実施した。

##### 1) 機器の設置位置

データ収集部をブリッジ張り出し部分に設置し、無線ひずみセンサを約240m離れた船首部舷側、約170m離れた中間部舷側及び中央、ブリッジ直下舷側、船尾中央舷側に設置し無線通信のレベルを測定した。

判定基準は、通信強度平均RSSI値：-93dBm以上、エラー率PER：10%以下を基準とした。

図-68に機器の配置、図-69に設置状態を示す

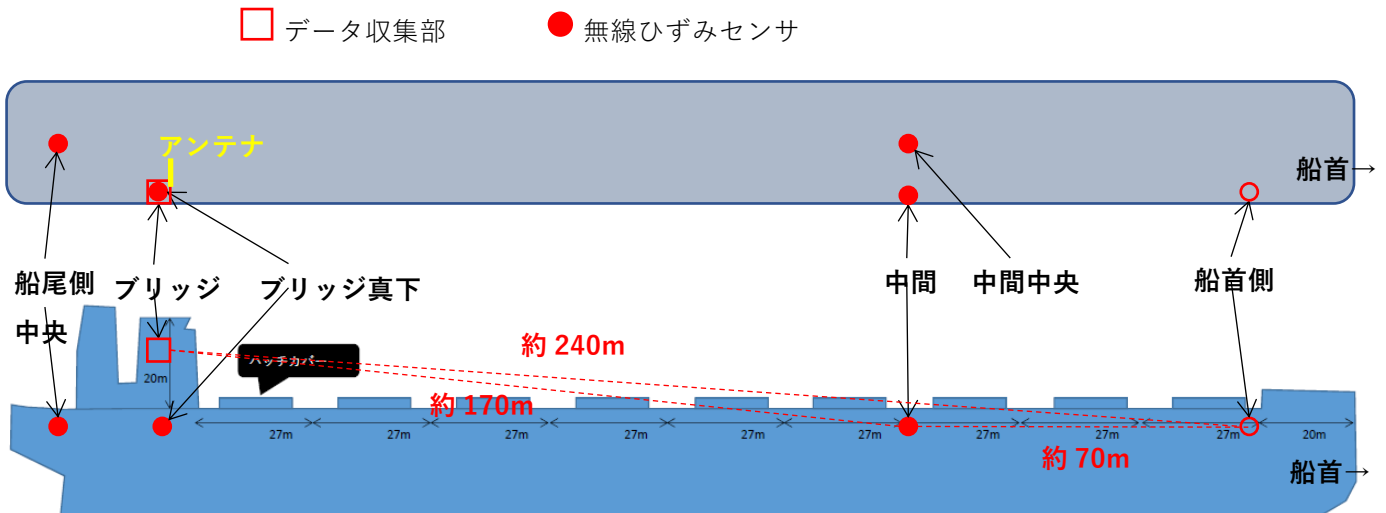


図-68 バルクキャリア 機器設置位置



データ収集部のアンテナ  
甲板に対して並行かつ  
進行方向に対して垂直方向  
高さ約180cm

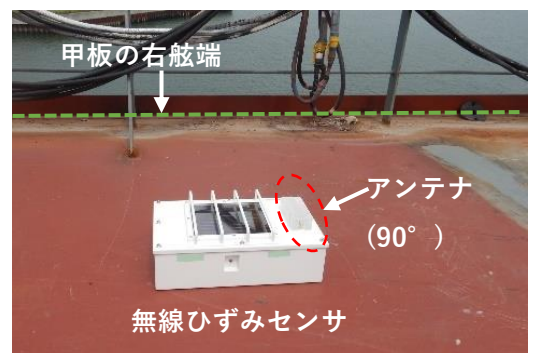


図-69 機器設置状態

## 2) 通信試験結果

測定結果を表-14に示す。

表-14 バルクキャリア無線通信結果

No	無線ひずみセンサ		ブリッジ との 直線距離	平均 RSSI [dBm] Down/Up※	エラー率 PER [%] Down/Up※	判定
	位置	アンテナ 向き				
1	船首	90°	約 240m	-89.28/-90.50	2/0	良
2	船首	0°	約 240m	-90.43/-90.89	10/0	良
3	中間	90°	約 170m	-89.63/-90.01	0/0	良
4	中間中央	90°	約 170m	-89.81/-89.53	4/0	良
5	ブリッジ 直下	90°	約 18m	-82.10/-79.53	1/0	良
6	船尾中央	90°	約 20m	-85.85/-84.04	1/0	良

※ Down はデータ収集部から無線ひずみセンサへの通信、Up は無線ひずみセンサからデータ収集部への通信

測定結果より、

- ・ブリッジ-甲板間で直線距離約 240m まで試験基準『平均 RSSI : -93dBm 以上、PER : 10%以下』を満たすことが確認された。
- ・見通しできないブリッジ直下、船尾についても試験基準『平均 RSSI : -93dBm 以上、PER : 10%以下』を満たすことが確認された。

### 8.1.2.2 コンテナ船

全長約 300m のコンテナ船で、岸壁に接岸状態で艀装作業中の船舶にて試験を実施した。

コンテナ船の場合は、甲板下通路内に無線ひずみセンサを設置するため、金属筐体は不要となるため、樹脂筐体を用いて試験を行った。

#### 1) 機器の設置位置

データ収集部を居住区真下の甲板下通路部分に設置し、無線ひずみセンサを左舷甲板下通路内の水密扉直前及び船首部に設置し無線通信のレベルを測定した  
判定基準は、通信強度平均 RSSI 値 : -93dBm 以上、エラー率 PER : 10%以下を基準とした。

図-70 に機器の配置、図-71 に設置状態を示す。

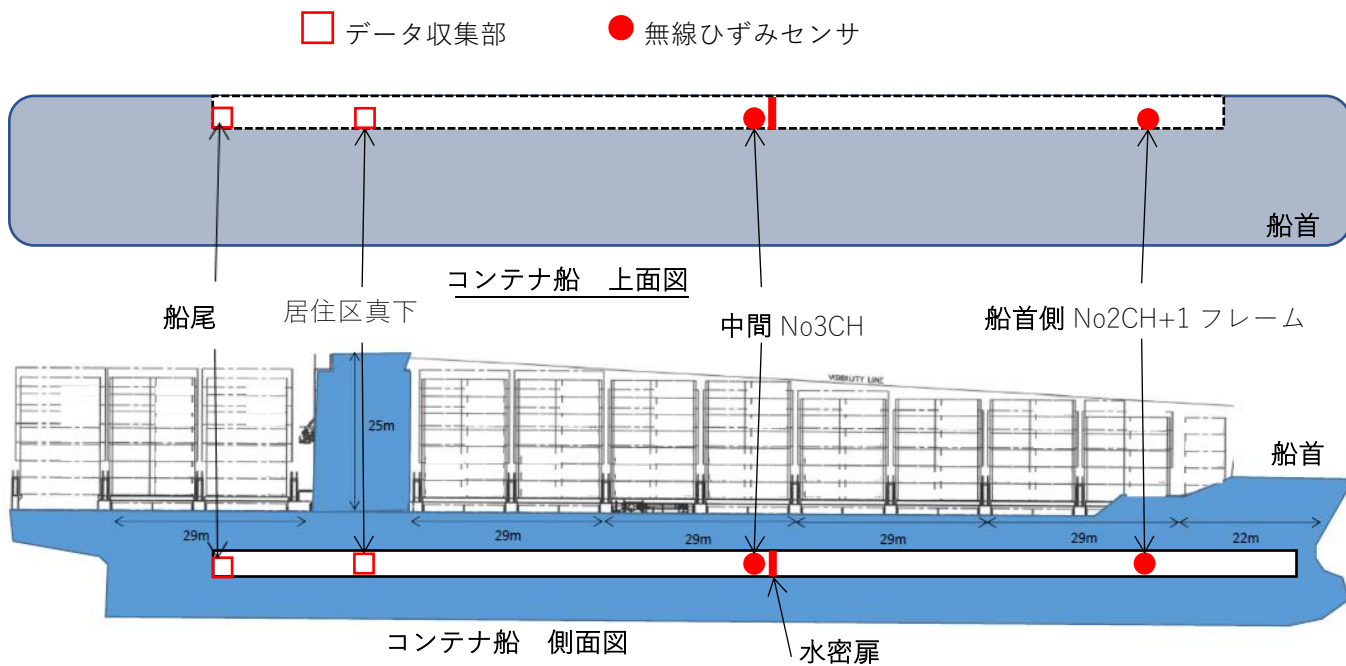


図-70 コンテナ船 機器設置位置



図-71 機器設置状態

## 2) 通信試験結果

測定結果を表-15 に示す。

表-15 コンテナ船 無線通信結果

No	計測区間		水密扉	平均 RSSI [dBm] Down/Up※	エラー率 PER [%] Down/Up※	判定
	データ収集部	無線ひずみセンサ				
1	居住区真下	船首	開	-83.53/-80.00	2/3	良
2	居住区真下	船首	閉	-/-	100/97	不可
3	船尾	船首	開	-90.39/-89.35	7/1	良
4	中間	船首	開	-59.00/-63.93	4/9	良
5	中間	船首	閉	-67.44/-66.20	1/1	良

※ Down はデータ収集部から無線ひずみセンサへの通信、Up は無線ひずみセンサからデータ収集部への通信

測定結果より、

- No. 1 の結果より、見通しの良い通路内において水密扉が開いている場合は、データ収集部の設置が想定される居住区真下と船首部間で試験基準『平均 RSSI : -93dBm 以上、PER : 10%以下』を満たすことが確認された。
- No. 2、5 の結果より、水密扉が閉じている場合は、水密扉の直近に無線ひずみセンサまたは中継器を設置することにより上記試験基準を満たすことが確認された。
- No. 4、5 の比較の結果、水密扉の開閉により閉じている場合は約-9dBm の通信強度劣化が確認された。

## 8.2 課題の抽出と対応

8.1.1 項「洋上構造物 (OKI 実験施設) でのフィールドテスト」及び 8.1.2 項「実船における無線通信試験」において表-16 に示す 5 つの課題を抽出し対応を行った。

表-16 抽出課題一覧

No.	課題	内容
1	オフセット変動	0 点ベースラインの急激に変動
2	センサ部データ受信エラー	データ収集部データ表示不良
3	無線通信強度改善	無線ひずみセンサからの送信強度改善
4	システム構成変更	OKI 製 AE-2100 代替え検討
5	データ処理フィルターの検討	計測データへのローパスフィルターの検討

### 1) オフセット変動

フィールドテストにおいて測定波形の 0 点ベースラインにオフセットがかかったように急激に変動する現象が発生した。

図-72 に変動したデータを示す。

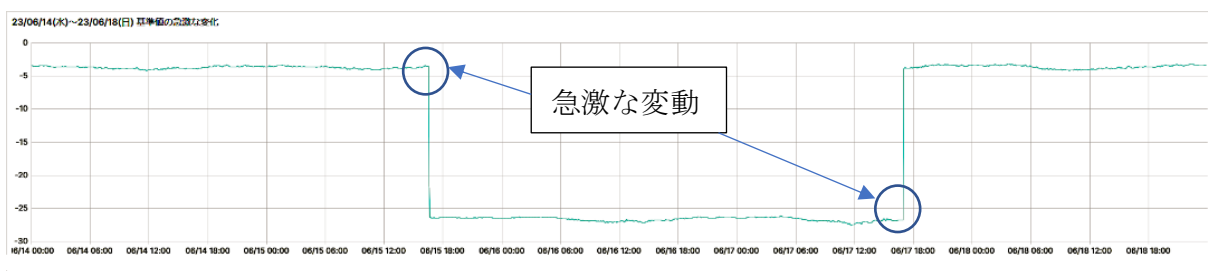


図-72 0点ベースライン変動

データの解析及び実験室にて再現試験を行った結果、センサ部のファームウェアにバグがあることが確認された。

バグの内容は、消費電流低減のため電源不要時には休止モードに移行させているが、休止状態から再起動したときの基準電源 ON と測定タイミングのズレにより、オフセット値が変動することが再現できた。

図-73 に再現試験結果を示す。



図-73 0点ベースライン変動再現試験結果

新ファームウェアにおいては基準電源 ON と測定タイミングが常に一定の間隔で実施されるように変更を行った。

変更の結果をフィールドテストのセンサ部に適用し、急激な0点ベースラインの変動が改善されていることを確認した。

図-74 に示すように、急激なデータ変動は発生せず、滑らかにデータが推移していることが確認された。



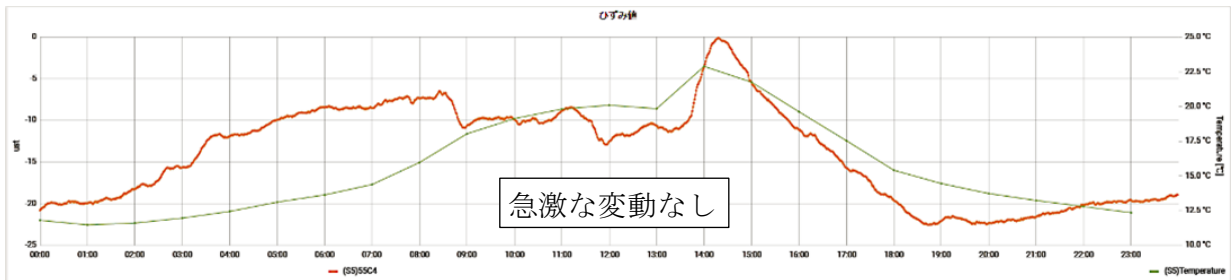


図-74 0点ベースライン変動改善確認

## 2) センサ部データ受信エラー

フィールドテスト稼働開始5月から開始後約2か月の時点でデータ収集部のデータが表示されなくなる現象が発生した。

調査の結果、データ収集部のストレージの空き容量が不足し、受信データの保存ができなくなったことが原因だった。

図-75 にデータ表示停止状態を示す。

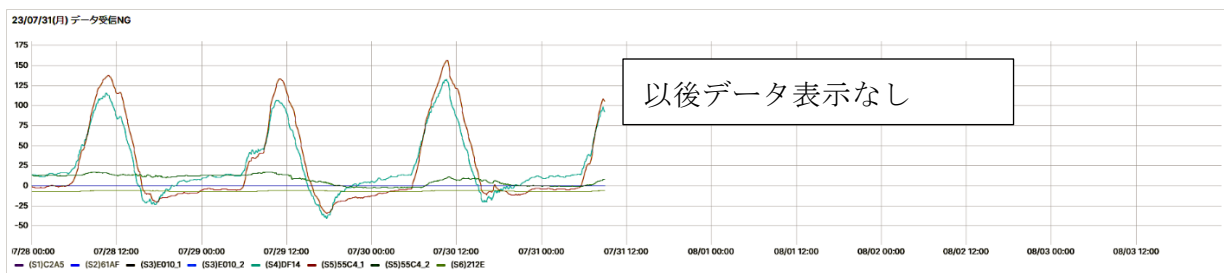


図-75 データ表示停止状況

ストレージ容量不足の原因は

- ・社内での動作確認時のデータがストレージ内に残っており、1か月分の容量を使用していた。
- ・データ収集部でのデータ保存期間（データ自動上書きまでの期間）が、ソフト上1年間の設定となっていたが、容量的に3か月分が限界であった。

確認のため、データ収集部の古いデータをバックアップ/削除しストレージ容量に空きを作成し、通信試験を行ったところ設定通り3か月分のデータが正常に取得でき、装置に異常がないことを確認した。

対応として、製品設計時にデータ収集部とデータ処理部のデータ保管等の機能分担を見直し、5年以上のデータ保存が可能なシステムとするよう設計に反映することとした。



### 3) 無線通信強度改善

実船における無線通信試験において、バルクキャリア甲板ーブリッジ間通信でセンサ部からの送信強度（データ収集部受信強度）が仕様-93dBm 以上に対し-90dBm 前後となっており、通信は可能であるが通信環境が変化しても、より安定した通信の確保を目的として、アンテナ配置の検討を行った。

検討の結果、図-76 に示すように、センサ部アンテナの位置を中央から端部に変更することにより、電波強度が約 6dB（強度換算で 2 倍）改善されることが確認された。

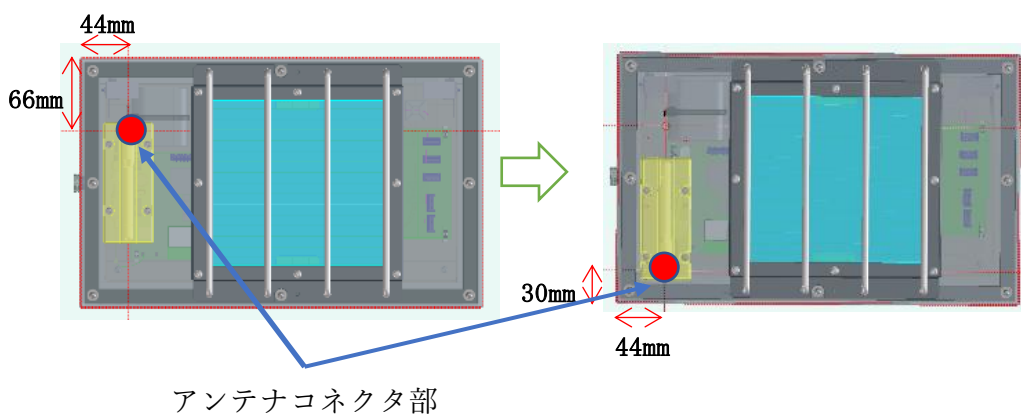


図-76 アンテナ位置変更

### 4) システム構成変更

データ収集部として採用している、OKI 製 AE-2100 について、部品等のひっ迫などにより、入手が困難であることが確認された。

製品化に向け、データ収集部を専用装置とし、汎用部品の組み合わせにより開発を行うこととした。

図-77 にシステム構成変更内容を示す。

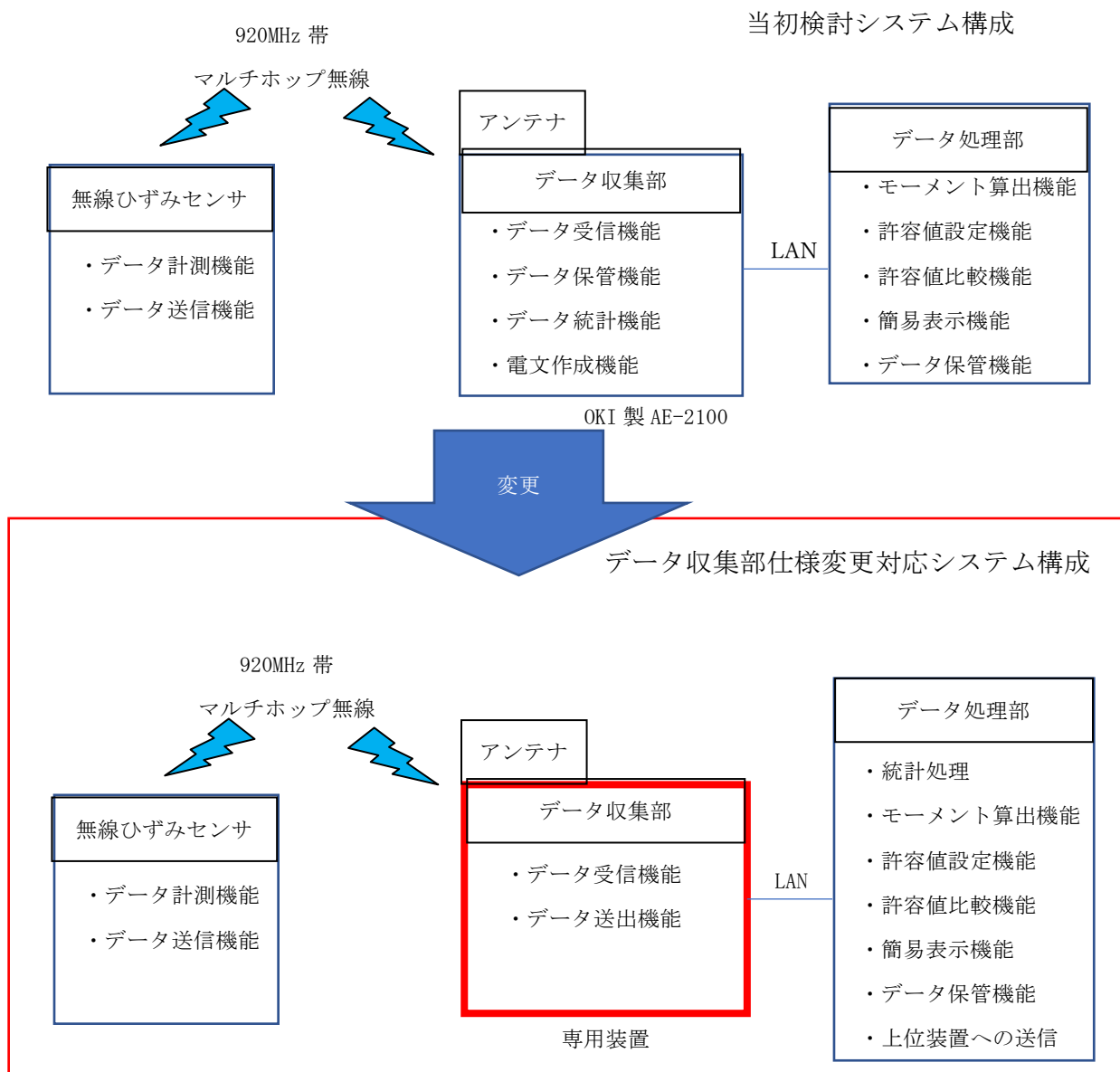


図-77 システム構成変更

#### 5) データ処理フィルターの検討

フィールドテストにより収集したデータの解析により、計測ひずみの生データからノイズ成分を除去し、波浪応答成分を抽出するための、フィルターの検討を行った。

フィルターは造船所等からの情報をもとに、1次フィルターを3Hzのローパスフィルターにより3Hz以上の周波数成分の除去を行い、2次フィルターにより船体の弾性振動成分を除去するため、0.3/0.4/0.5Hz（船舶の構造により変動）のいずれかのローパスフィルターを適用することとした。

フィルターはFIRフィルター（Finite Impulse Response「有限インパルス応答」）を採用した。

図-78 に生データおよび 3Hz、0.3Hz のフィルターにより処理した結果を示す。  
図-78 に示すように、不要なノイズ成分（船体の弾性振動成分）が除去され、  
波浪応答成分の抽出が可能となった。

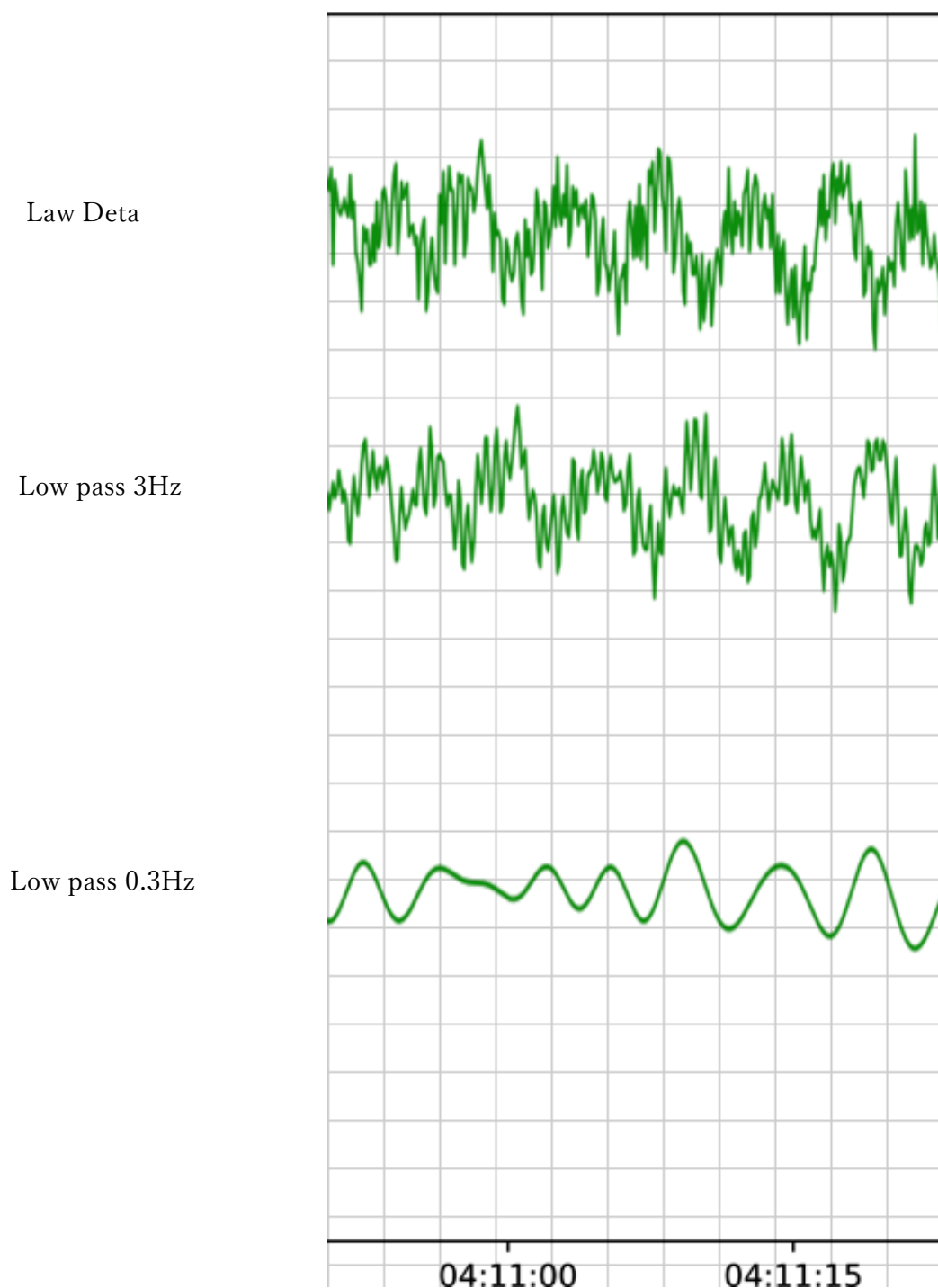


図-78 ローパスフィルター性能

### 8.3 製品化設計

8.2 項「課題の抽出と対応」結果に基づき製品化設計を実施した。  
以下に構成毎の製品仕様を表-17~20 に示す。

表-17 ひずみセンサ部製品仕様

大項目	中項目	開発仕様
機能		船舶の甲板に取り付け、ひずみの計測を行い、計測データを送信する
外形	寸法	約 226×364×128mm 鋼製筐体（突起部を除く）
	質量	筐体込みで約 10kg 以下
設置方法	設置場所	甲板
	設置方法	筐体は接着固定 ひずみゲージは直接溶接にて貼り付け
電源		太陽光発電パネル+バッテリー
消費電流		14 日間以上バッテリーのみで駆動できること
耐環境	防水防塵	保護等級 IP56 以上
	使用温度・湿度	使用温度範囲 -25℃～70℃、95%RH・結露なきこと
	耐温度性能	乾燥高温試験 +70℃×16 時間、試験方法 IEC 60068-2-2 機器に異常がないこと、試験後に正常に動作すること
		温湿度試験 +55℃/95%RH×24 時間 2 サイクル（試験開始条件 +25℃/95%RH） 試験方法 IEC 60068-2-30 機器に異常がないこと、試験後に正常に動作すること
		低温試験 -25℃×2 時間、試験方法 IEC60068-2-1 機器に異常がないこと、試験後に正常に動作すること
	耐塩害	筐体の材質は SUS316 とし重耐塩塗装を行う
	振動	2Hz～13.2Hz 振幅±1.0mm、13.2Hz～100Hz 加速度±0.7G
	衝撃	500m/s <sup>2</sup> の衝撃を設置方向及び直角方向に 2 回印加
	傾斜	機器の作動状態で 22.5° 傾けて正常動作すること
	イミュニティ 耐力	静電気放電イミュニティ試験 接触放電 6kV、気中放電 2/4/8kV、試験方法 IEC61000-4-2 試験後に正常に動作すること（性能基準 B）

		高周波放射電磁界イミュニティ試験 80MHz～6GHz、電界強度 10V/m、試験方法 IEC61000-4-3 試験中、試験後に正常に動作すること（性能基準 A）
	エミッション	放射エミッション試験 150kHz～1GHz、3m 法、試験方法 CISPR16-2-3、 IEC60945 規定された上限値以下
		伝導性エミッション試験 10kHz～30MHz、電源ポート、試験方法 CISPR16-2-1 規定された上限値以下
測定対象	ひずみ値	1 軸方向ひずみ値（1 アクティブ、3 ダミー温度補正用）
計測	連続稼働時間	3 年以上メンテナンスなしで連続稼働
	ひずみ計測	ひずみ計測範囲 ±1000 $\mu$ st 1 軸
		分解能 1 $\mu$ st 以下 ひずみ精度 ±5 $\mu$ st 以下
サンプリングレ ート	10Hz 以上（15Hz 目標）	
測定データ （送信データ）	測定器 ID	受信機側でデータ識別のため ID を付与
	時刻	計測時刻（yy/mm/dd hh:mm:ss.00）
		時計確度 ±100msec 以内
測定値	5 分以下の間隔で区間内全データ送信	
通信仕様	アンテナ	内蔵 or 外付け
	通信周波数	920MHz
	送信間隔	5 分以下の間隔
	通信距離	100m 以下（通信環境による）
メンテナンス	メンテナンス性	メンテナンス性を考慮した筐体内配置、材料を使用

表-18 無線中継器製品仕様

大項目	中項目	開発仕様
機能		船舶の甲板に取り付け、ひずみセンサ部とデータ収集部間のデータ転送を行う
外形	寸法	約 226×364×128mm 鋼製筐体（突起部を除く）
	質量	筐体込みで約 10kg 以下
設置方法	設置場所	甲板
	設置方法	筐体は接着固定
電源		太陽光発電パネル+バッテリー
消費電流		14 日間以上バッテリーのみで駆動できること
耐環境	防水防塵	保護等級 IP56 以上
	使用温度・湿度	使用温度範囲 -25℃～70℃、95%RH・結露なきこと
	耐温度性能	乾燥高温試験 +70℃×16 時間、試験方法 IEC 60068-2-2 機器に異常がないこと、試験後に正常に動作すること
		温湿度試験 +55℃/95%RH×24 時間 2 サイクル（試験開始条件 +25℃/95%RH） 試験方法 IEC 60068-2-30 機器に異常がないこと、試験後に正常に動作すること
		低温試験 -25℃×2 時間、試験方法 IEC60068-2-1 機器に異常がないこと、試験後に正常に動作すること
	耐塩害	筐体の材質は SUS316 とし重耐塩塗装を行う
	振動	2Hz～13.2Hz 振幅±1.0mm、13.2Hz～100Hz 加速度±0.7G
	衝撃	500m/s <sup>2</sup> の衝撃を設置方向及び直角方向に 2 回印加
	傾斜	機器の作動状態で 22.5° 傾けて正常動作すること
	イミュニティ 耐力	静電気放電イミュニティ試験 接触放電 6kV、気中放電 2/4/8kV、試験方法 IEC61000-4-2 試験後に正常に動作すること（性能基準 B）
高周波放射電磁界イミュニティ試験 80MHz～6GHz、電界強度 10V/m、試験方法 IEC61000-4-3 試験中、試験後に正常に動作すること（性能基準 A）		



	エミッション	放射エミッション試験 150kHz～1GHz、3m 法、試験方法 CISPR16-2-3、 IEC60945 規定された上限値以下
		伝導性エミッション試験 10kHz～30MHz、電源ポート、試験方法 CISPR16-2-1 規定された上限値以下
中継機能	送受信データ	ひずみ計測部からの送信データを劣化がない状態で伝送
	送信タイミング	ひずみ計測部からの送信データを受信後、1sec 以下の遅延で送信する
通信仕様	アンテナ	内蔵 or 外付け
	通信周波数	920MHz
	送信間隔	5 分以下の間隔
	通信距離	100m 以下（通信環境による）
メンテナンス	メンテナンス性	メンテナンス性を考慮した筐体内配置、材料を使用

表-19 データ収集部製品仕様

大項目	中項目	開発目標
機能		ひずみセンサ部もしくは無線中継部から伝送されるデータを受信し、データ処理部へデータを LAN (有線) にて送出する
外形	寸法	約 288×214×103mm 樹脂筐体 (突起部を除く)
	質量	筐体込みで約 10kg 以下
設置方法	設置場所	船内
	設置方法	船内の壁面もしくはラックに設置
電源		船内電源 (AC100~200V) + バッテリー
耐環境	使用温度・湿度	使用温度範囲 +5°C~+55°C、95%RH・結露なきこと
	耐温度性能	乾燥高温試験 +55°C×16 時間、試験方法 IEC60068-2-2 機器に異常がないこと、試験後に正常に動作すること
		温湿度試験 +55°C/95%RH×24 時間 2 サイクル (試験開始条件 +25°C/95%RH) 試験方法 IEC 60068-2-30 機器に異常がないこと、試験後に正常に動作すること
		低温試験 +5°C×2 時間、試験方法 IEC60068-2-1 機器に異常がないこと、試験後に正常に動作すること
	振動	2Hz~13.2Hz 振幅±1.0mm、13.2Hz~100Hz 加速度±0.7G
	衝撃	500m/s <sup>2</sup> の衝撃を設置方向及び直角方向に 2 回印加
	傾斜	機器の作動状態で 22.5° 傾けて正常動作すること
	電源変動・瞬断性能	電源変動試験 (AC) 電圧±20%、周波数±10% 機器に異常がないこと、指定されたとおり動作すること
		電源喪失試験 5 分間に 3 回外部電源遮断 (遮断時間は 30 秒) 電源喪失時、復旧後の機器動作に異常のないこと 電子的に保存されたプログラム、データが消滅しないこと
絶縁性能	絶縁抵抗試験 (AC) DC500V で 100MΩ 以上	

		耐電圧試験 (AC)AC1, 500V・1 分間、電源－大地間 機器に異常がないこと
イミュニティ 耐力		静電気放電イミュニティ試験 接触放電 6kV、気中放電 2/4/8kV、試験方法 IEC61000-4-2 試験後に正常に動作すること（性能基準 B）
		高周波放射電磁界イミュニティ試験 80MHz～6GHz、電界強度 10V/m、試験方法 IEC61000-4-3 試験中、試験後に正常に動作すること（性能基準 A）
		伝導低周波妨害イミュニティ試験 60Hz～12kHz、試験電圧は供給電圧の 10% 試験中、試験後に正常に動作すること（性能基準 A）
		伝導高周波妨害イミュニティ試験 150kHz～80MHz、3Vrms、試験方法 IEC61000-4-6 試験中、試験後に正常に動作すること（性能基準 A）
		電氣的ファーストトランジェント／バーストイミュニテ ィ試験 5ns/50ns、電源－大地 2kV、信号 1kV、5 分間 試験方法 IEC61000-4-4 試験後に正常に動作すること（性能基準 B）
		サージイミュニティ試験 1. 2us/50us : ライン－大地 1kV、ライン間 0. 5kV 試験方法 IEC61000-4-5 試験後に正常に動作すること（性能基準 B）
	エミッション	
		伝導性エミッション試験 10kHz～30MHz、電源ポート、試験方法 CISPR16-2-1 規定された上限値以下
機器性能	稼働時間	3 年以上メンテナンスなしで連続稼働
データ 受信機能	受信データ	ひずみセンサ部 A/D データ
	受信間隔	ひずみセンサ部または無線中継器による
	同時接続台数	10 台（システム最大 6 台）
ソフトウェア	処理内容	無線データを有線(Ethernet)のデータに変換する

表-20 データ処理部製品仕様

大項目	中項目	開発目標
機能		ひずみセンサ部より 920MHz 通信により伝送されるデータをデータ収集部経由で受信し、データ処理を行い、外部に LAN（有線）にて送化する
外形	寸法	約 437×320×87mm 鋼製筐体（突起部を除く）
	質量	筐体込みで約 10kg 以下
設置方法	設置場所	船内
	設置方法	船内の机もしくはラックに設置
表示機能		なし（ポータブル端末からアクセスしてブラウザにてデータ表示）
電源		船内電源（AC100～200V）＋バッテリー
耐環境	使用温度・湿度	使用温度範囲 +5℃～+55℃、95%RH・結露なきこと
	耐温度性能	乾燥高温試験 +55℃×16 時間、試験方法 IEC60068-2-2 機器に異常がないこと、試験後に正常に動作すること
		温湿度試験 +55℃/90%RH×24 時間 2 サイクル（試験開始条件 +25℃/95%RH） 試験方法 IEC 60068-2-30 機器に異常がないこと、試験後に正常に動作すること
		低温試験 +5℃×2 時間、試験方法 IEC60068-2-1 機器に異常がないこと、試験後に正常に動作すること
	電源変動・瞬断性能	電源変動試験 （AC）電圧±20%、周波数±10% 機器に異常がないこと、指定されたとおり動作すること
電源喪失試験 5 分間に 3 回外部電源遮断（遮断時間は 30 秒） 電源喪失時、復旧後の機器動作に異常のないこと 電子的に保存されたプログラム、データが消滅しないこと		
	絶縁性能	絶縁抵抗試験 （AC）DC500V で 100MΩ 以上

		耐電圧試験 (AC)AC1, 500V・1 分間、電源－大地間 機器に異常がないこと
イミュニティ 耐力		静電気放電イミュニティ試験 接触放電 6kV、気中放電 2/4/8kV、試験方法 IEC61000-4-2 試験後に正常に動作すること（性能基準 B）
		高周波放射電磁界イミュニティ試験 80MHz～6GHz、電界強度 10V/m、試験方法 IEC61000-4-3 試験中、試験後に正常に動作すること（性能基準 A）
		伝導低周波妨害イミュニティ試験 60Hz～12kHz、試験電圧は供給電圧の 10% 試験中、試験後に正常に動作すること（性能基準 A）
		伝導高周波妨害イミュニティ試験 150kHz～80MHz、3Vrms、試験方法 IEC61000-4-6 試験中、試験後に正常に動作すること（性能基準 A）
		電氣的ファーストトランジェント／バーストイミュニティ試験 5ns/50ns、電源－大地 2kV、信号 1kV、5 分間 試験方法 IEC61000-4-4 試験後に正常に動作すること（性能基準 B）
		サージイミュニティ試験 1.2us/50us：電源－大地 1kV、電源間 0.5kV 試験方法 IEC61000-4-5 試験後に正常に動作すること（性能基準 B）
	エミッション	
		伝導性エミッション試験 10kHz～30MHz、電源ポート、試験方法 CISPR16-2-1 規定された上限値以下
計測	稼働時間	3 年以上メンテナンスなしで連続稼働
データ	データ種類	ひずみデータ
受信機能	受信間隔	ひずみセンサ部による
	同時接続台数	2 台（データ収集部）
ソフトウェア	処理内容	20 分毎 応力値、統計解析（標準偏差、極値カウン ト）、レインフロー頻度解析、スペクトル解析

	統計解析、レインフロー頻度解析、スペクトル解析結果をデータベースに保存
表示内容	縦曲げモーメント、応力値
	過去から現在までのモーメントの時系列グラフ
	アラーム機能
データ格納容量	5年分保存 ※保存するデータ数・種類による
設定機能	センサ名称、ゼロ点等各種パラメータ
動作環境	Linux

データ処理部ソフトウェア仕様を示す。

### 1) 処理内容

ローパスフィルター

データ抽出用

種類:FIR フィルター

通過帯域:3Hz

阻止帯域:3.6Hz

タップ数:39

弾性振動成分除去用

種類:FIR フィルター

通過帯域:0.3Hz, 0.4Hz, 0.5Hz から選択

阻止帯域:0.4Hz (通過帯域:0.3Hz の場合)

タップ数:225 (通過帯域:0.3Hz の場合)

応力および縦曲げモーメント算出

電圧データ  $e$  からひずみデータ  $\varepsilon$  へ変換する。

$$\varepsilon = \frac{4(e - e_0)}{K_S \cdot E_B \cdot G} \cdot 10^6 \text{ } [\mu ST]$$

$K_S$ :ゲージ率,  $E_B$ :ブリッジ電圧,  $G$ :電圧ゲイン,  $e_0$ :ゼロ点電圧  
ひずみデータ  $\varepsilon$  に、弾性係数  $E$  を乗じて応力  $\sigma$  [MPa]を算出する。

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ } [MPa]$$

応力より縦曲げモーメント  $M_W$  を算出する。

$$M_W = \sigma_{X-LF} \cdot Z$$

統計解析

①求めた応力 20 分間の時系列データから、3Hz 以上の周波数成分をローパスフィルターにてカットする。これを生データとする。

生データから平均  $x_{mean}$  を求める。



生データから  $x_{mean}$  を差し引くことによりドリフト影響を除去する。この時系列データを  $x_{RAW}(t)$  とする。

弾性振動成分を分離するため、 $x_{RAW}(t)$  について 0.3Hz 以上の周波数成分をローパスフィルターにてカットする。この時系列データを  $x_{LF}(t)$  とする。

② 各出力点の  $x_{RAW}(t)$  と  $x_{LF}(t)$  について、標準偏差  $\sigma_{X-RAW}$ ,  $\sigma_{X-LF}$  を求める。

$$\sigma_{X-RAW} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_{RAW}(t_n))^2}$$

$$\sigma_{X-LF} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_{LF}(t_n))^2}$$

③  $x_{LF}(t)$  についてゼロアップクロスカウントを行う。ゼロアップクロスの時刻  $t_n^{zero-up}$  をカウントし、ゼロアップクロス周期の平均  $T_{z0}$  を求める。

$$T_{z0} = \frac{1}{N_T} \sum_{n=1}^{N_T} (t_{n+1}^{zero-up} - t_n^{zero-up})$$

$N_T$  : ゼロアップクロス時刻のカウント回数合計値

④ ③のゼロアップクロスカウントに対し、カウント間の  $x_{LF}(t)$  の正と負の極値  $x_n^{PkLF+}$ ,  $x_n^{PkLF-}$  をカウントする。正と負の極値について、それぞれの絶対値の最大値を  $q_{max-LF}^+$ ,  $q_{max-LF}^-$  とする。

また、正と負の極値を絶対値の大きい方から順に並べ上位 1/10 の平均値を求め、1/10 最大値  $q_{1/10-LF}^+$ ,  $q_{1/10-LF}^-$  とする。

$$q_{1/10-LF}^+ = \frac{1}{N_{Pk}^+/10} \sum_{n=1}^{N_{Pk}^+/10} x_n^{PkLF+}$$

$$q_{1/10-LF}^- = \frac{1}{N_{Pk}^-/10} \sum_{n=1}^{N_{Pk}^-/10} x_n^{PkLF-}$$

$N_{Pk}^+$  : ゼロアップクロスカウントの正の極値の個数

$N_{Pk}^-$  : ゼロアップクロスカウントの負の極値の個数

⑤ ③のゼロアップクロスカウントに対し、カウント間の  $x_{RAW}(t)$  の正と負の極値  $x_n^{PkRAW+}$ ,  $x_n^{PkRAW-}$  をカウントする。正と負の極値について、それぞれの絶対値の最大値を  $q_{max-RAW}^+$ ,  $q_{max-RAW}^-$  とする。

また、正と負の極値を絶対値の大きい方から順に並べ、上位 1/10 の平均値を求め、1/10 最大値  $q_{1/10-RAW}^+$ ,  $q_{1/10-RAW}^-$  とする。

$$q_{1/10-RAW}^+ = \frac{1}{N_{Pk}^+/10} \sum_{n=1}^{N_{Pk}^+/10} x_n^{PkRAW+}$$

$$q_{1/10-RAW}^- = \frac{1}{N_{Pk}^-/10} \sum_{n=1}^{N_{Pk}^-/10} x_n^{PkRAW-}$$

### レインフロー頻度解析

$x_{RAW}(t)$  と  $x_{LF}(t)$  についてレインフローカウント法を適用し、各応力レンジにおける頻度を求める。

応力：0～300[MPa]、刻み 5[MPa]（全 60Step）、無効振幅 0.1[MPa]以下

### スペクトル解析

出力データ（最大センサー6個）を選び、各成分についてスペクトル解析する。

表－21 スペクトル解析に使用する成分と組み合わせ例

成分 No.	センサ ID
1	001
2	003
3	005
4	008
5	010
6	999

No.	識別コード	センサ 1	センサ 2	説明
1	1-1 re	001	---	成分 1 のパワースペクトル（実部）
2	1-2 re	001	003	成分 1 と成分 2 のクロススペクトル（実部）
3	1-2 im	001	003	成分 1 と成分 2 のクロススペクトル（虚部）
4	1-3 re	001	005	成分 1 と成分 3 のクロススペクトル（実部）
5	1-3 im	001	005	成分 1 と成分 3 のクロススペクトル（虚部）
6	1-4 re	001	008	成分 1 と成分 4 のクロススペクトル（実部）
7	1-4 im	001	008	成分 1 と成分 4 のクロススペクトル（虚部）
8	1-5 re	001	010	成分 1 と成分 5 のクロススペクトル（実部）
9	1-5 im	001	010	成分 1 と成分 5 のクロススペクトル（虚部）
10	1-6 re	001	999	
11	1-6 im	001	999	
12	2-2 re	003	---	成分 2 のパワースペクトル（実部）
13	2-3 re	003	005	成分 2 と成分 3 のクロススペクトル（実部）
14	2-3 im	003	005	成分 2 と成分 3 のクロススペクトル（虚部）
15	2-4 re	003	008	成分 2 と成分 4 のクロススペクトル（実部）
16	2-4 im	003	008	成分 2 と成分 4 のクロススペクトル（虚部）
17	2-5 re	003	010	成分 2 と成分 5 のクロススペクトル（実部）
18	2-5 im	003	010	成分 2 と成分 5 のクロススペクトル（虚部）
19	2-6 re	003	999	
20	2-6 im	003	999	
21	3-3 re	005	---	成分 3 のパワースペクトル（実部）
22	3-4 re	005	008	成分 3 と成分 4 のクロススペクトル（実部）
23	3-4 im	005	008	成分 3 と成分 4 のクロススペクトル（虚部）
24	3-5 re	005	010	成分 3 と成分 5 のクロススペクトル（実部）

25	3-5 im	005	010	成分3と成分5のクロススペクトル (虚部)
26	3-6 re	005	999	
27	3-6 im	005	999	
28	4-4 re	008	---	成分4のパワースペクトル (実部)
29	4-5 re	008	010	成分4と成分5のクロススペクトル (実部)
30	4-5 im	008	010	成分4と成分5のクロススペクトル (虚部)
31	4-6 re	008	999	
32	4-6 im	008	999	
33	5-5 re	010	---	成分5のパワースペクトル (実部)
34	5-6 re	010	999	
35	5-6 im	010	999	
36	6-6 re	999	999	

## データ出力

各解析結果をバイナリファイルまたはCSVファイル形式で出力する。

表-22 統計解析値データフォーマット

Timestamp	処理 ID	センサ ID 001	002	003	004	..	..	012
2023-04-14T07:20:00Z	1	2.2222						999
2023-04-14T07:20:00Z	2	3.3333						999
2023-04-14T07:20:00Z	3	2.2222						999
2023-04-14T07:20:00Z	4	3.3333						999
2023-04-14T07:20:00Z	5	2.2222						999
2023-04-14T07:20:00Z	6	3.3333						999
2023-04-14T07:20:00Z	7	2.2222						999
2023-04-14T07:20:00Z	8	3.3333						999
2023-04-14T07:20:00Z	9	2.2222						999
2023-04-14T07:20:00Z	10	3.3333						999
2023-04-14T07:20:00Z	11	2.2222						999
2023-04-14T07:20:00Z	12	3.3333						999

表-23 頻度解析データフォーマット

Timestamp	処理 ID	センサ ID 001	002	003	004	..	..	012
2023-04-14T07:20:00Z	1	222						555
2023-04-14T07:20:00Z	1	222						555
2023-04-14T07:20:00Z	1	222						555
:								
:								
2023-04-14T07:20:00Z	1	222						555
2023-04-14T07:20:00Z	1	222						555
2023-04-14T07:20:00Z	2	222						555
2023-04-14T07:20:00Z	2	222						555
2023-04-14T07:20:00Z	2	222						555
:								
:								
2023-04-14T07:20:00Z	2	222						555
2023-04-14T07:20:00Z	2	222						555

表-24 クロススペクトル解析データフォーマット

$\omega$ [rad/s]	識別コード 1-1 re	1-2 re	1-2 im	1-3 re	1-3 im	...	...	6-6 im
2.00000	222	222	333	444	555	666	111	555
1.96128	222	222	333	444	555	666	111	555
1.90256	222	222	333	444	555	666	111	555
1.85385	222	222	333	444	555	666	111	555
1.75641	222	222	333	444	555	666	111	555
1.70769	222	222	333	444	555	666	111	555
1.65897	222	222	333	444	555	666	111	555
1.61026	222	222	333	444	555	666	111	555
1.56154	222	222	333	444	555	666	111	555
1.51282	222	222	333	444	555	666	111	555
:								
:								
0.24615	222	222	333	444	555	666	111	555
0.19744	222	222	333	444	555	666	111	555
0.14872	222	222	333	444	555	666	111	555
0.10000	222	222	333	444	555	666	111	555

2) 表示内容

折れ線グラフ

算出した  $M_w$  を時系列の折れ線グラフに表示する。

グラフの更新は、統計処理のタイミングで行う。

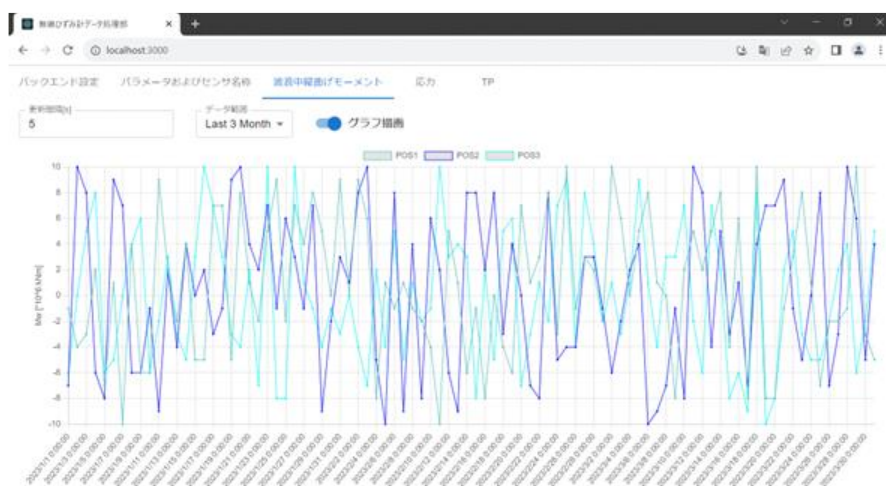


図-79 折れ線グラフイメージ

## 棒グラフ

算出した応力および  $M_w$  を棒グラフで表示する。  
グラフの更新は、統計処理のタイミングで行う。

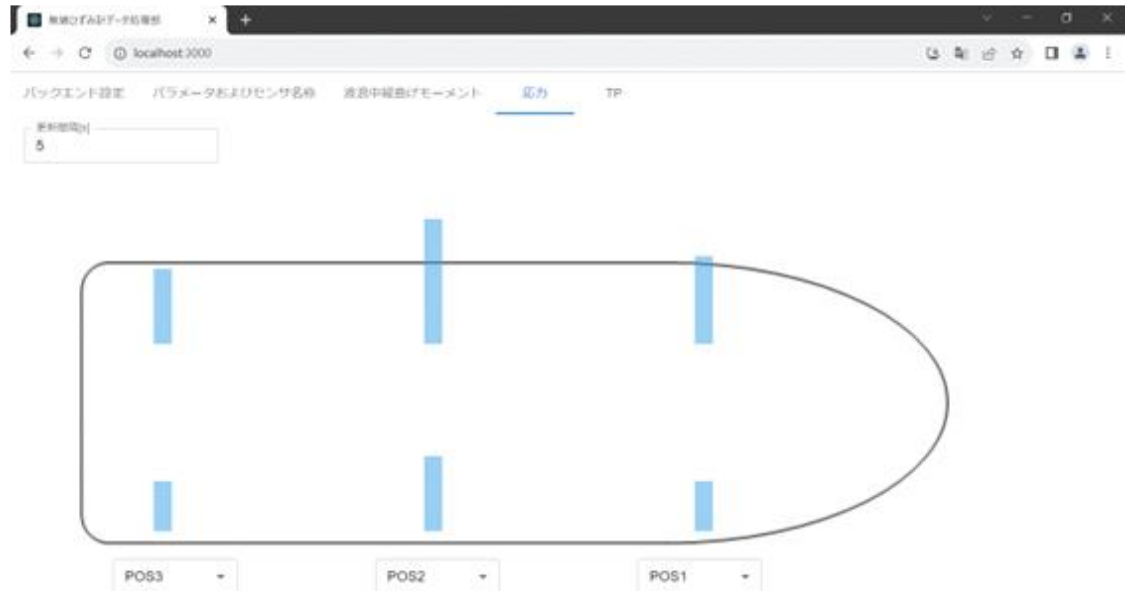


図-80 棒グラフイメージ

## アラート表示

許容値を超えた場合に、棒グラフの色を赤に変えて表示することにより、アラート表示を行う。

## 8.4 製品化設計完了

### 1) 製品図面の作成

製品化仕様に基づき、製品図面を作成した。

作成した製品図面は、部品図 56 枚、回路図 57 枚、組立図 15 枚、検査仕様書（調整手順書）83 枚を作成した。

以下に製品図面（外形図）を示す。

なお、センサ部筐体、無線中継部は金属（SUS）と樹脂筐体の両方を設計した。

データ収集部とデータ処理部については、それぞれ単独筐体のものと 2 つを一体化したものを設計した。

図面番号、図面一覧を表-25 に示す。

表-25 図面番号、図面一覧

図面番号	名称	内容	図番号
BAF202-2022A2	ひずみセンサ部	金属筐体	図-65 #1~#6
BAF202-2022A1	ひずみセンサ部	樹脂筐体	—
BAF202-2012A2	無線中継部	金属筐体	—
BAF202-2012A1	無線中継部	樹脂筐体	図-65 中継器
BAF202-2015A1	データ収集部	樹脂筐体	図-34
BAF202-2006A1	データ処理部	単独金属筐体	図-25
BAF202-2006A2	データ処理部	データ収集部一体化 筐体	—

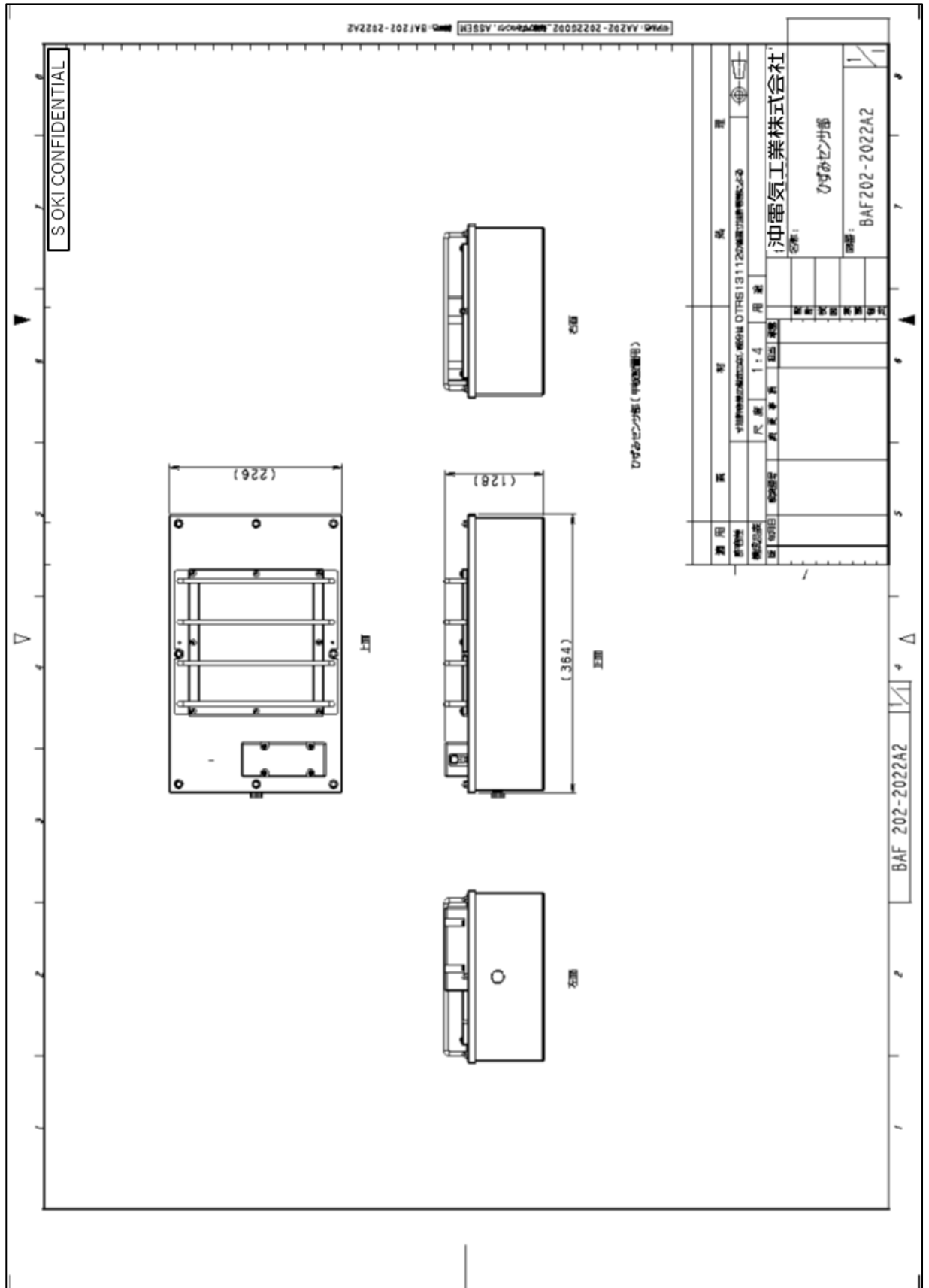


図-81 ひずみセンサ部 金属管体



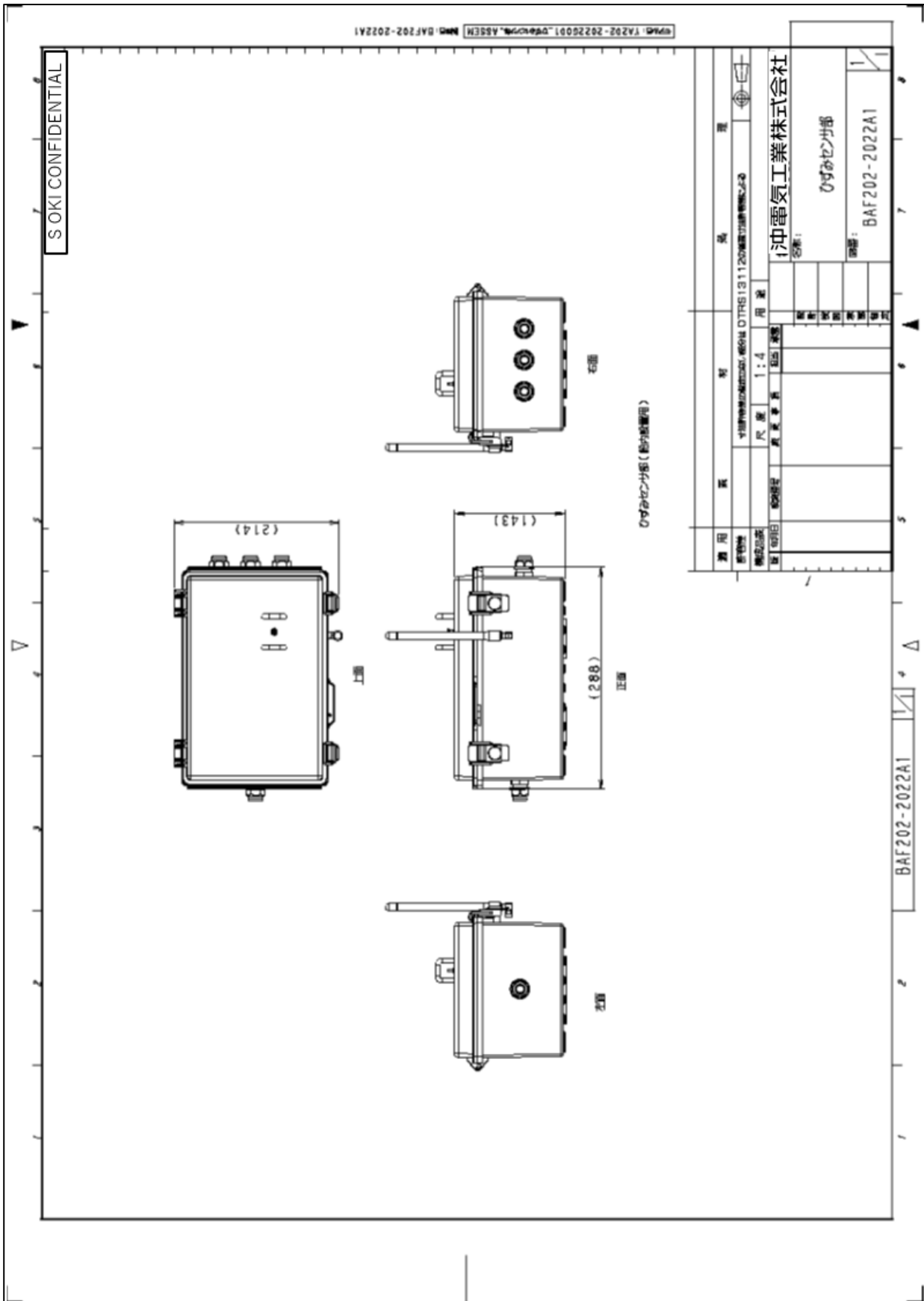


図-82 ひずみセンサ部 樹脂筐体

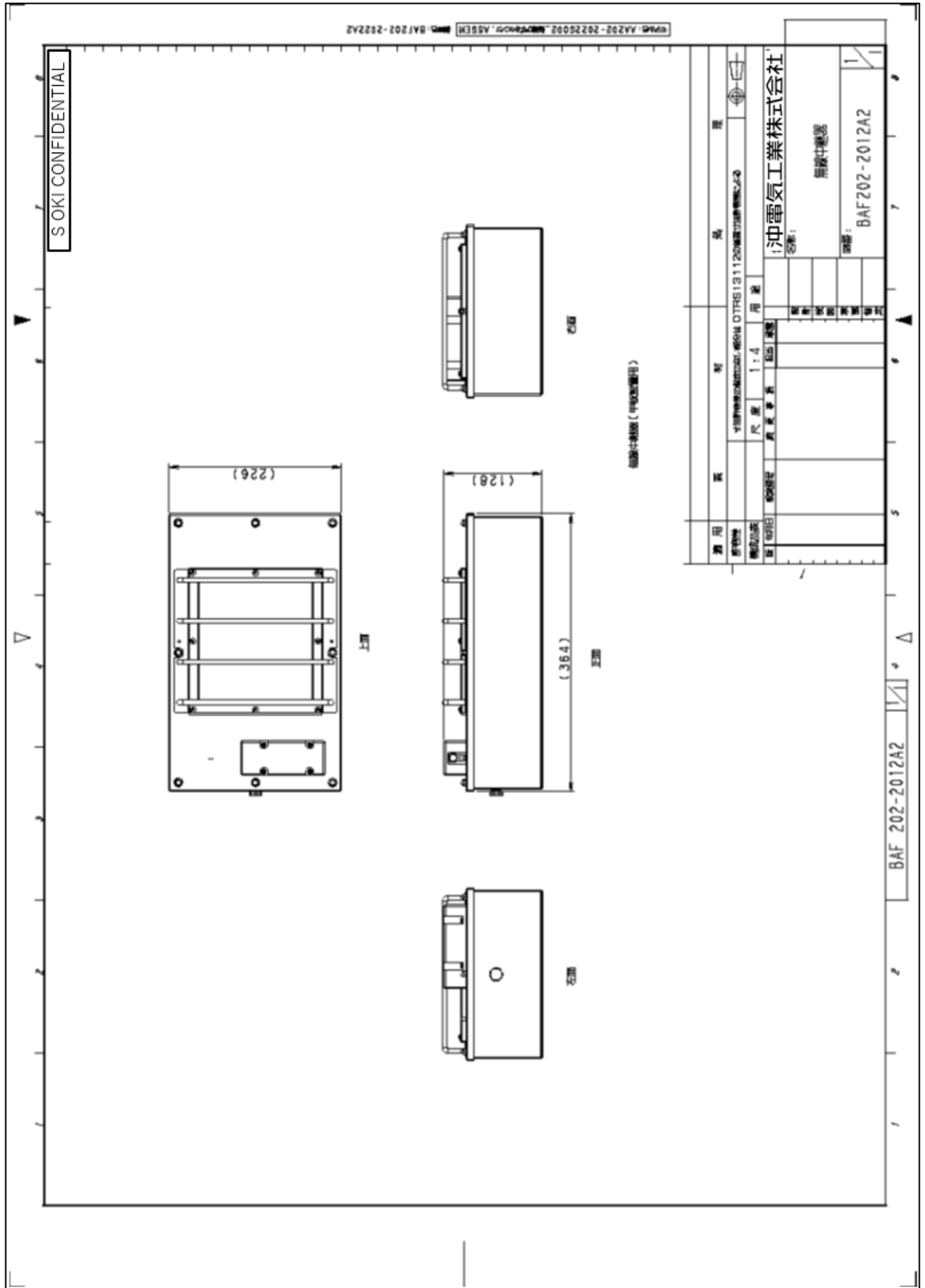
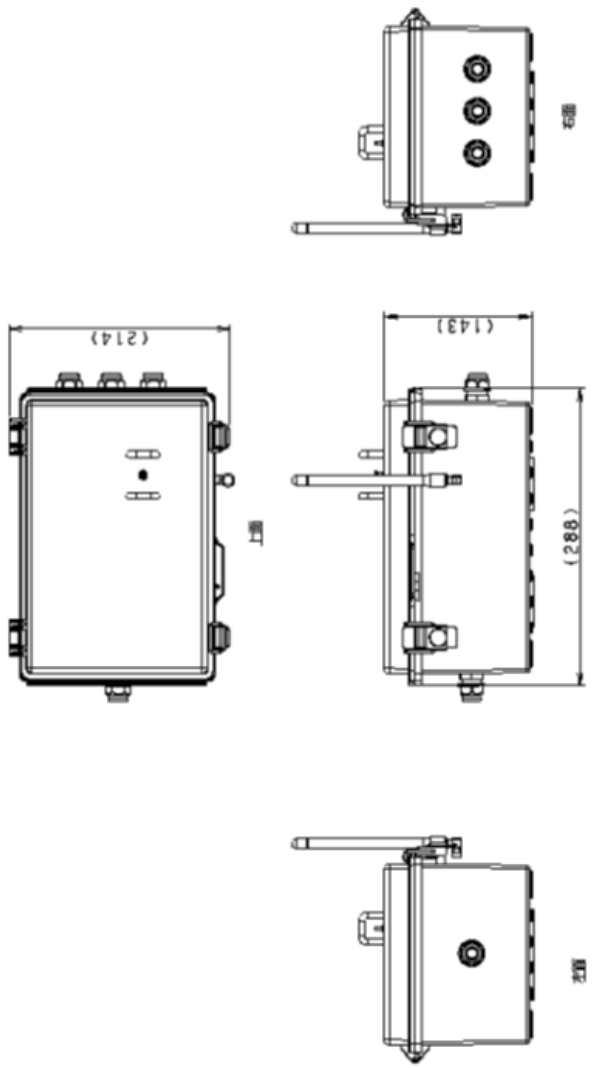


図-83 無線中継部 金属筐体

SOKI CONFIDENTIAL

FORM IASZ-202-2022001, 04/07/98, ASSEN No. BAF202-2012A1



無線中継部 (樹脂筐体用)

用途	系	種	名	理
新製品			無線中継部	
機体分類				
品名	品番	仕入	用途	
無線中継部			無線中継部	
			品名:	
			品番:	BAF202-2012A1

BAF202-2012A1

図-84 無線中継部 樹脂筐体

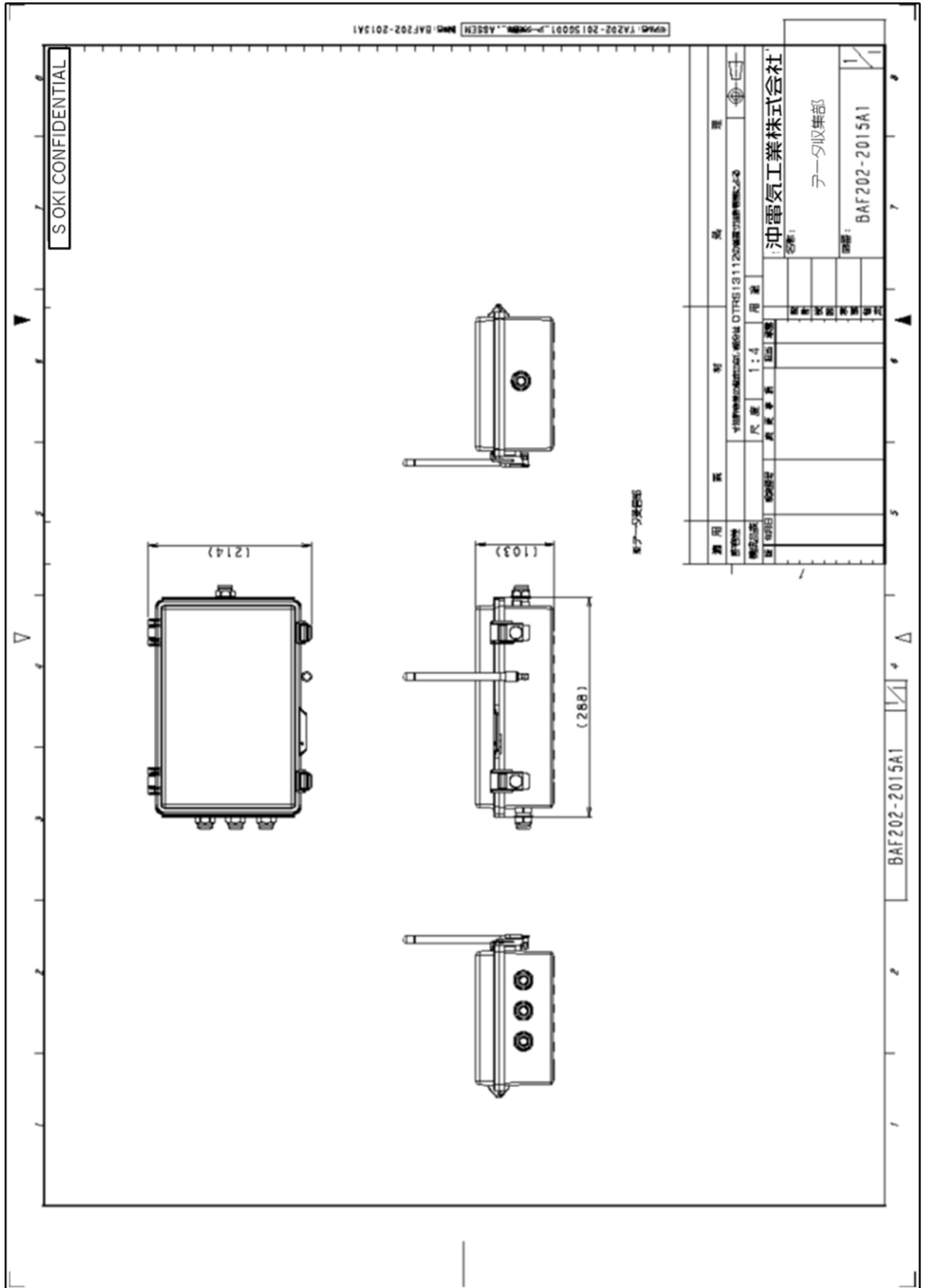


図-85 データ収集部 樹脂筐体

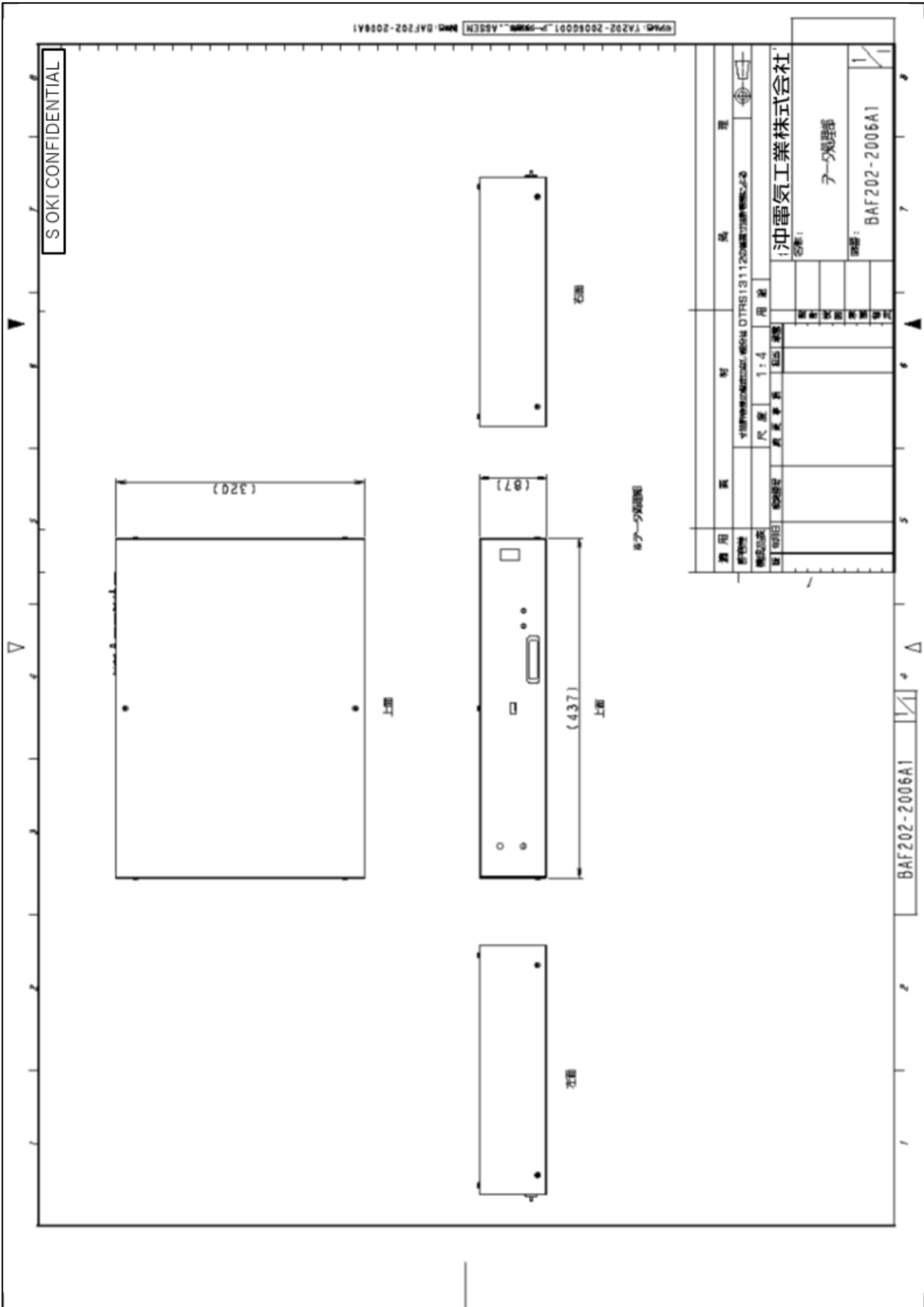


図-86 データ処理部 単独金属筐体

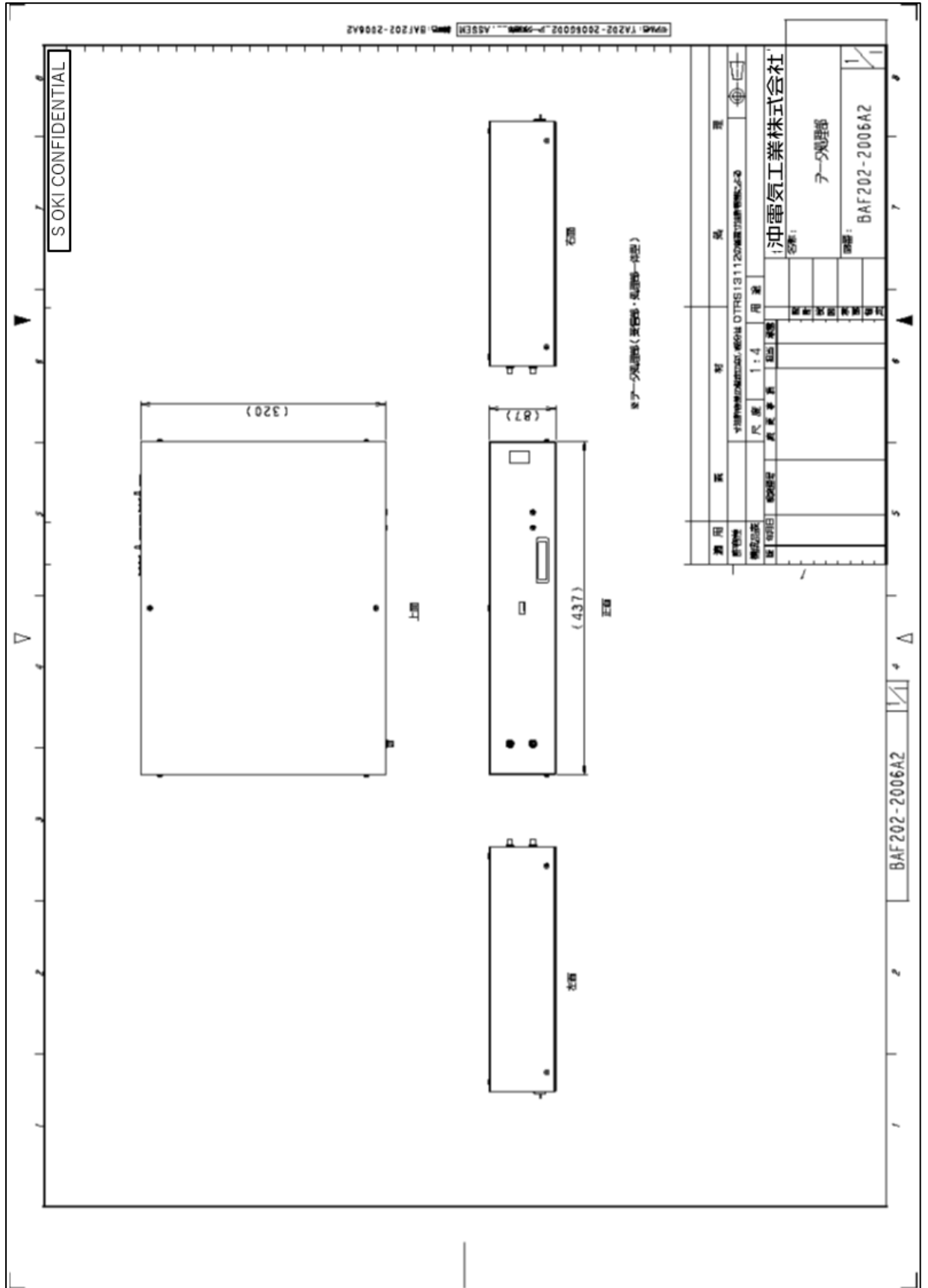


図-87 データ処理部 データ収集部一体化筐体

## 2) 消費電流の検証

無線ひずみセンサの平均消費電流を測定した結果、供給電圧が 3.0V 時は 5.7mA であり、平均消費電力は 17mW であることがわかった。測定結果の波形を図-88 に示す。

無線ひずみセンサに使用されるバッテリーの定格電流容量は公称電圧 2.4V、定格電流容量 3100mAh なので電力容量は 7440mWh である。

これより、無日照時の稼働時間は、 $7440\text{mWh} \div 17\text{mW} \approx 436.5\text{h} \approx 18$  日となる。

仮にバッテリーの劣化により電力容量が 2 割減の 5952mWh になったとしても、 $5952\text{mWh} \div 17\text{mW} \approx 349.2\text{h} \approx 14.5$  日であり、無日照時の稼働時間は 2 週間以上バッテリーによる稼働が可能であると判断した。

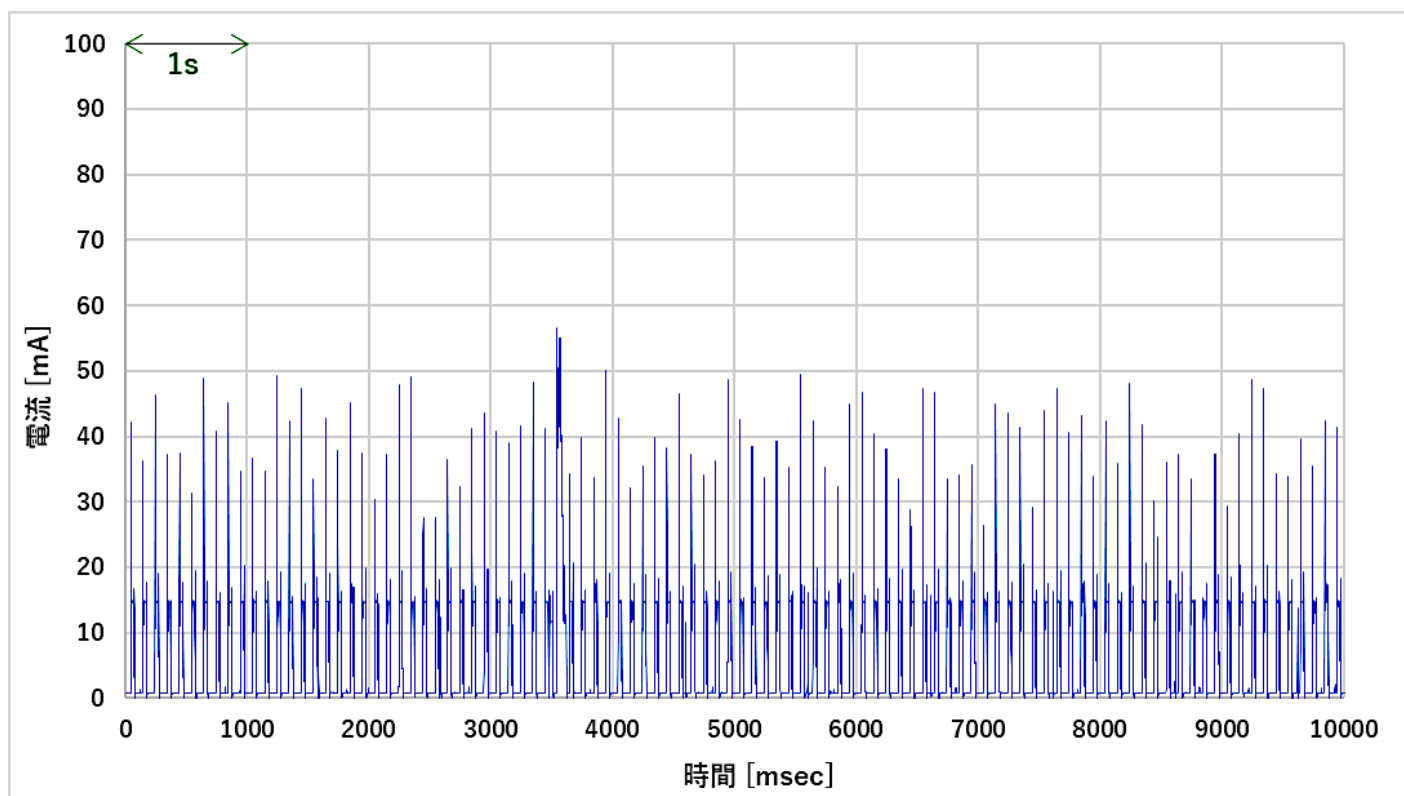


図-88 消費電流の測定結果の波形

## 3) 導入コストの試算

現行光ファイバセンサ (FBG) を用いたモニタリングシステムの設置コストを含む費用の 1/2 を目標とする。

現行品 (海外製) の導入コストは、製品価格 約 10,000,000 円、設置調整費用 約 5,000,000 円 で合計 15,000,000 円 (2023 年 5 月調査結果)

今回開発した「船用無線ひずみ船体構造モニタリングシステム」の試算結果を表-26 に示す。

1 式の構成数量は無線ひずみセンサ 6 式 (左右舷、前中後) データ収集部 2 式 (左右舷各 1 式)、データ処理部 1 式で試算を行った。



2024年2月現在の導入コストは合計で7,500,000円となり、現行品導入コストの1/2を達成した。

なお当初計画では、機器費で約5,000,000円を目標としていたが、データ処理部1,000,000円が含まれておらず、データ収集部についても構成が異なっている。これら要因を除外すると、約5,600,000円となり、目標を上回るが、部品価格の高騰や人件費の高騰も含めると目標を達成した。

表-26 導入コスト試算

	構成品名称	単価	数量	小計
1	無線ひずみセンサ	850,000円	6式	5,100,000円
2	データ収集部	450,000円	2式	900,000円
3	データ処理部	1,000,000円	1式	1,000,000円
小計				7,000,000円
設置費用				500,000円
合計				7,500,000円

なお、本価格は試算結果であり実際の販売価格を保証するものではない。

#### 8.5 報告書作成

事業内容に基づき、本成果報告書を作成した。

## 9. 目標の達成状況

### 9.1 評価、確認

2022年度に試作を実施した船用無線ひずみモニタリングシステムにより得られるひずみデータから、リアルタイムに構造安全性を評価した。

実船によるフィールドテストまたは実運用を模擬した環境下で性能試験を行い、要求仕様及び実際の運用性・保守性についてユーザー視点を含めて評価し確認するという目標に対し、一般財団法人 日本海事協会様のご指導の下、株式会社 MTI 様のご協力をいただき、また、共同研究メンバーとして日本シップヤード株式会社様にもご参加いただきプロジェクトを立ち上げ、開発状況の確認、ご指摘を受け評価を行った。

性能目標として以下の2項目の達成を確認した。

- ・10分以下の間隔で連続して、かつ、遅延時間1秒以下でデータ送信を行いリアルタイムな構造安全に資する演算値の表示、許容応力に対するマージンの表示等を行うという目標に対し、データ送信間隔9秒、遅延時間0.1秒以下でデータ送信、データ処理ができることを洋上構造物で実運用を模擬した環境下及び実船舶で性能試験を行い確認し目標を達成した。
- ・3年以上のメンテナンス間隔で運用が可能であることについて、洋上構造物で実運用を模擬した環境下における、約1年間の劣化状況、損傷状況の把握からの5年間の劣化状態の推定、及びデータ処理部のデータ保管期間5年の確保により、3年以上のメンテナンス間隔での運用を可能とし、目標を達成した。

### 9.2 製品化設計完了

船用無線ひずみセンサへのAC給電をゼロ(太陽光発電パネル+二次電池)とし、かつ、既存のケーブル敷設が必要な船体構造モニタリングシステム導入コストに対し50%低減する船用無線ひずみモニタリングシステムの製品化設計を完了するという目標に対し、製品システム構成の検討、製品仕様の制定を行い、部品図56枚、回路図57枚、組立図15枚、検査仕様書(調整手順書)83枚を作成し設計を完了した。

性能目標として、

- ・不日照で発電ができない状態でも2週間以上バッテリーによる稼働が可能なことという目標に対し、平均消費電力は17mWの達成により、無日照時の稼働時間は約18日となり、目標を達成した。
- ・製品価格及び設置費用を合わせたコストが、既存の50%以下を実現する見通しが立っていることという目標については、現行品導入コスト約15,000,000円に対し、7,500,000円での導入が可能という試算結果を得て、目標を達成した。

## 10. 2023 年度の実施内容の概要

### 10.1 ES 機の性能試験

2022 年度に試作を行った、ES 機を洋上構造物に設置し約 1 年間フィールドを模擬した環境下でのデータ取得、劣化損傷状態の確認を実施し、劣化損傷がないことを確認した。

洋上構造物については、就航後 30 年を経過した旧バージ及び更新した新バージの 2 種類で実施した。

無線通信については、全長約 300m のバルクキャリア、コンテナ船の 2 種類の実船舶で、設置予定位置での無線通信試験を実施し、無線通信が可能であることを確認した。

### 10.2 課題の抽出と対応

8.1.1 項「洋上構造物 (OKI 実験施設) でのフィールドテスト」及び 8.1.2 項「実船における無線通信試験」において下記 5 件の課題を抽出し対応を行った。

- 1) オフセット変動：ソフトウェアのバグ修正を行った。
- 2) センサ部データ受信エラー：データ保管容量の見直しを行った。
- 3) 無線通信強度改善：アンテナ位置の検討を行い最適な場所に変更した。
- 4) システム構成変更：入手性に問題がるデータ収集部を専用装置に変更した。
- 5) データ処理フィルターの検討：船舶の波浪応答が把握できるよう

ローパスフィルター 3Hz と 0.3/0.4/0.5Hz のローパスフィルターを設計した。

### 10.3 製品化設計

8.2 項「課題の抽出と対応」結果に基づき製品化設計を実施し、構成品毎に製品仕様を制定した。

### 10.4 製品化設計完了

製品化仕様に基づき、製品図面を作成した。

作成した製品図面は、部品図 56 枚、回路図 57 枚、組立図 15 枚、検査仕様書 (調整手順書) 83 枚を作成した。

### 10.5 報告書作成

事業内容に基づき、本成果報告書を作成した。

## 11. 今後の予定

### 11.1 製品評価

2024年6月までに設計を完了した製品図面により製品試作および最終の性能評価を行い、製品仕様に合致しているか確認を行う。

### 11.2 販売

2024年度に販売を開始し、造船会社からの受注を目指す。

販売数は2024年度に新造船、既存船各4台の計8台、翌年以後は合計16台以上の販売を目標とする。

## 12. まとめ

今年度の本開発により、太陽光発電パネル駆動、無線データ通信による船体ひずみ計測の実現可能性が確認でき、実運用環境下での評価、課題の抽出、対応により製品化設計を完了することができた。

本システムに対しては、船舶の安全確保を目的とした国産システムの商品化に対する各所からの期待も大きく、次年度の商品化販売開始を目指したい。

また、本開発にあたりプロジェクトメンバーとして一般財団法人 日本海事協会様のご指導の下、株式会社MTI様のご協力をいただき、また、共同研究メンバーとして日本シップヤード株式会社様にもご参加いただきユーザー視点からのご評価により、実用的な開発を行うことができた。

最後に、本開発事業は公益財団法人日本財団の助成金を受けて実施しており、ここに記して厚く感謝申し上げます。

「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 13 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>