

Supported by  日本 THE NIPPON
財団 FOUNDATION

平成 26 年度
熱電発電を利用した
ワイヤレス温度センサシステムの技術開発
成果報告書

平成 27 年 3 月

一般社団法人 日本船用工業会

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、平成 26 年度に一般社団法人日本船用工業会が実施した「熱電発電を利用したワイヤレス温度センサシステムの技術開発」の成果をとりまとめたものである。

近年、熱や振動から電力を得る発電素子と、発生した微弱な電力を昇圧させる回路の技術革新のため、環境発電という技術が発達してきており、平成 24 年度 FS 事業で調査した結果、船用機関で発生する熱を活用して、センサデータを無線送信できる電力が得られそうであることが分った。そこで、安定的に温度差を確保し効率よく発電させ、センサデータを無線送信することにより、配線が不要でメンテナンスフリーのセンサを供給し、配線・コスト削減を可能とする、ワイヤレス温度センサを開発するものである。

本開発は、平成 26 年度の 1 年計画で、ダイハツディーゼル株式会社に委託して実施しており、その成果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る次第である。

平成 27 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	2
3. 事業計画	3
4. 事業内容	3
4.1 平成26年度の実施内容	3
5. 先行技術調査	5
5.1 特許調査	5
5.2 市場にある熱電発電素子を利用した製品例	10
5.3 技術調査の結果	11
6. 熱電発電無線排気温度センサの設計開発	12
6.1 環境発電技術の基本について	12
6.1.1 環境発電とは	12
6.1.2 熱電発電の原理	12
6.2 ディーゼル機関への適用について	13
6.2.1 熱電発電の適用	13
6.2.2 熱伝導の基本法則	15
6.2.3 素材による熱伝導率の違い	18
6.2.4 ヒートパイプについて	21
7. 一次試作と評価	23
7.1 設計思想と基本構造案	23
7.2 伝熱素材の評価	24
7.2.1 伝熱部材	24
7.2.2 各種比較用構造案の説明	25
7.2.3 一次試作比較試験の試験方法と設備	27
7.2.4 試験結果と考察	29
8. 熱電発電無線排気温度センサのシステム設計と無線技術開発	32
8.1 システム設計概要	32
8.2 システム構成	33
8.2.1 基板搭載部について	33
8.2.2 回路構成	34
8.3 無線技術開発	36
8.3.1 無線システム概要	36
8.3.2 無線モジュールの仕様	37
8.3.3 通信プロトコル	38
8.3.4 子機の送信時間の制御	38

8.3.5	子機の起動.....	39
8.3.6	周波数ホッピング.....	40
8.3.7	データ補完機能.....	41
8.3.8	無線モジュールの実力調査.....	42
8.3.9	船内を想定した電波強度(RSSI)の検証.....	43
8.4	熱電発電無線排気温度センサの電力消費.....	44
9.	二次試作と評価.....	46
9.1	設計思想と構造詳細.....	46
9.2	シミュレーションモデル作成との比較.....	48
9.3	ディーゼル機関による実機試験概要.....	51
9.3.1	供試体.....	51
9.3.2	温度計測用センサの構造.....	52
9.3.3	ディーゼル機関への供試体設置状況.....	53
9.3.4	計測システム.....	54
9.4	評価と考察.....	56
9.4.1	熱電発電素子上下面温度差と発電電力の関係.....	56
9.4.2	温度キャリブレーション試験と実機試験の違いについての考察.....	60
9.4.3	センサ上部構造についての考察.....	64
9.4.4	無線に関する考察.....	67
9.4.5	振動に関する考察.....	69
9.5	EMC 試験.....	71
9.5.1	静電気イミュニティ試験.....	71
9.5.2	高周波放射電磁界イミュニティ試験.....	73
9.5.3	放射性エミッション試験.....	76
9.5.4	EMC 試験のまとめ.....	78
10.	まとめ.....	79
10.1	成果について.....	79
10.2	商品化について.....	81
11.	目標達成度.....	81
12.	報告書作成.....	82
13.	謝辞.....	82
14.	参考文献.....	83

1. 事業の目的

近年、熱や振動を直接電力に変換する発電素子の高性能化が進み、かつ発生したエネルギーを効率良く昇圧させる回路などの技術革新もあり、我々の周りに普遍的に存在するこれら微弱な環境エネルギーから電気エネルギーを回収することが可能となってきた。そして、このような技術を表すエネルギーハーベスティングや環境発電という言葉が一般に広く知られるようにもなった。だが、回収できる電力は微弱であり、その製品開発はなかなか進んでおらず、実際の商品となっている事例はまだわずかである。特に、船用分野への展開は行われていない。

当社が開発・製造・販売するディーゼル機関は、その内燃機関という性質上、熱や振動の発生とは切り離せない機械であり、熱や振動からエネルギーを得る環境発電技術とは大変相性が良い。そこで、船舶で使用する場合の問題点や性能を把握し、実用的な製品を生み出すことが可能かを検証するため、平成 24 年度 FS 事業「無線技術や環境発電技術を応用した船舶機関用センサについての調査研究」にて、振動発電素子と熱電発電素子で発電する試作品を作り、ディーゼル機関に搭載して検証を行った結果、条件が良ければ製品として成り立つ発電量が得られることがわかった。

現在のディーゼル機関は、安全運用のために数多くのセンサが備え付けられ、それに伴いセンサ配線数は非常に多くなっており、排気温度センサだけでも 6 気筒ディーゼル機関には、8 本の排気温度センサが設置されている。発電用ディーゼル機関は 1 船あたり 3~4 台搭載されるため、合計 24~32 本の排気温度センサが設置されることになる。他のセンサも合わせれば、ディーゼル機関だけでも非常に多くの配線があることがわかる。さらに、機関室の機器全体で考えればさらに相当量の配線が敷設されていることは容易に推測できる。今日の造船業界においては、コスト削減の要求は非常に強く、当社のようなディーゼル機関メーカーや造船所殿でもセンサ配線の敷設工数やケーブルコストの削減についても大きく望まれているところである。

そこで、今回の事業で商品化を目指す製品は、熱から発電する熱電発電技術を採用し、自己発電した電力で自己完結することで配線を不要にできる排気温度センサを開発し、これらの諸問題を解決することを目指す。

排気温度センサを設置するディーゼル機関の排気系はディーゼル機関の中でも最も温度が高い箇所であり、熱を利用する熱電発電には適した場所である。また、発電が困難となる排気温度が低い場面はちょうどディーゼル機関停止時と重なり、排気温度計測は不要となる点も排気温度センサとしては都合がよい。

製品化するにあたって、信頼性と高温への耐久性を確保しつつ、排気温度センサ

の一般的な大きさに納めることができ、高温部から熱電素子に対して熱を移送し、廃熱部に熱を廃却する効率の良い熱移送機構を新開発することが肝となる。

さらに、発電した微弱な電力で排気温度を計測し、計測データを無線発信する無線回路及び電子回路機構も新規開発になる。センサから無線発信されたデータは一括受信を可能とする無線受信システムにより受信する。全体像としては、多数のセンサと受信システムが協調して動作する配線不要のセンサシステム構築を目標としている。

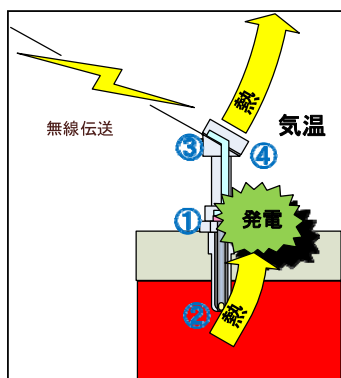
また、メンテナンス不要、電池交換不要とすることも目指す。一般的に無線を採用するセンサは電池を内蔵するものが多いが、自己発電して電池が不要となれば、電池交換も必要ない。従って電池交換困難な場所への設置も可能になり、センサ自身の寿命期間中に一切のメンテナンスが必要なくなることから、大幅にメンテナンスコストを削減することが可能になる。

本開発事業は、環境発電技術（エネルギーハーベスティング技術）の船舶への全く新しい適用となるのみならず、将来的には船内の各種機器の高温箇所、また同様に熱を持つ陸用設備にも広く対応可能な、メンテナンスフリーで使い勝手の良い、熱発電統合無線センサシステムの開発を目指すものである。

2. 事業の目標

2.1 本事業の最終目標

- 1) 熱電発電による自己発電機構を持ち、無線通信機能を内蔵することで、センサ配線を不要とした、船舶用ディーゼル機関の排気温度センサを開発する。
また、協調して動作する、複数の排気温度センサのデータを無線で一括受信する無線受信システムを開発する。



①熱電素子

一方に熱を加え、他方を冷やす事で発電する素子
特に高温に耐えうる、セラミック系の素子を適用する

②温度センサ

測温抵抗体、熱電対、高温対応サーミスタより選定して採用する

③制御部

発電電力の昇圧、温度信号のA/D変換、無線機能を実装する

④冷却部

熱を効率よく雰囲気空気に廃却するためのヒートシンク等

図1 センサ構造の概要

3. 事業計画

本技術開発の平成26年度の事業計画は下記の通りである。

表1 平成26年度の事業計画

実施項目	平成26年度			
	1/4	2/4	3/4	4/4
① 市販品の仕様・先行技術調査・仕様の策定	←→			
② 熱電発電型排気温度用高温センサの設計開発	←→			
③ 受信システムの設計開発	←→			
④ 機能・耐久性試験		←→		
⑤ 評価			←→	
⑥ 報告書作成				←→

4. 事業内容

4.1 平成26年度の実施内容

1) 市販品の仕様・先行技術調査・仕様の策定

現在の市場にある環境発電装置や他社の開発状況を調査し、その仕様やコンセプト、特許等が当社の製品仕様案と重複していないかを確認する。

2) 熱電発電型排気温度用高温センサの設計開発

熱電発電では、熱電発電素子に対し大きな温度差を与えると発電量が増すため、高効率の熱移送構造（熱を高熱部から熱電素子へ、熱電素子から低温部に移送する構造）が必要となる。ヒートパイプ等を応用し、厳しい振動や400℃を超える排気温度に耐える信頼性を担保した熱移送機構を新規開発する。

さらに、温度センサとして必要な温度計測部、計測データのAD変換や補正

等の処理を行う演算部、外部へ無線電送するための省電力無線通信部等の電子回路を検討・設計する。

今回、開発する排気温度センサは、従来の排気温度センサに代わるものとして開発するため、設置面の互換性が重要であり、同等の大きさで有ることが必要である。従来の排気温度センサは、軸部は30～50mm程度、ヘッド部は80～100mm程度の円筒形の端子台ケースとなっているのが普通であるので、同等の寸法に全ての機構と電子回路類を納めるよう設計する。

コンセプト上、センサ自身が使用する電力は、内蔵する熱電素子で発電した電力ですべて賄うことが前提であり、回路や部品を選定して超省電力で駆動する電子回路設計を行う。電池やコンデンサを搭載する場合は主電源として使うのではなく、発電不可能の場合のバックアップや過剰電力の貯蔵用として使うものとする。

搭載する無線通信技術は、数ある無線規格の中でも特に低消費電力となるものを選定し、可能な限り長距離電送と安定運用が可能になるよう通信プロトコル設計を行う。

3) 受信システムの設計開発

受信システムは、新規開発する排気温度センサが使用する無線規格と通信プロトコルに適合させた受発信機能を持ち、複数(32ヶ)の排気温度センサが無線発信する温度データやセンサ状態データを同時受信し、温度データだけでなく、センサ状態や無線状態の監視を行い、不具合箇所の表示や通信の自動リカバリ、センサの各種設定などが出来るようシステムソフトウェアを開発する。外部出力は通信出力(MODBUS や ETHERNET) とアナログ出力の搭載を検討し、適切な出力形態を実装する。また、船内LANへの接続性も考慮する。

4) 機能、耐久性試験

今回開発したセンサと受信システムは、当社が市販するものと同じ研究用ディーゼル機関に搭載し、実際にディーゼル機関を運転させた状態で、各種性能や耐久性等の確認試験を行い、商品として成り立つことを検証する。また開発に必要な振動計測やEMC試験、各種耐久試験を行い、基本性能の実現を目指す。

5) 評価

試作品の総合評価を行う

(発電性能、構造、システム構成、無線性能、実用性、信頼性、コスト等)

6) 報告書作成

事業内容に基づき実施した各種開発や試験、評価により得た知見や成果物をまとめ、報告書の作成を行う。

5. 先行技術調査

5.1 特許調査

熱電発電技術という要素技術を採用した温度センサを開発するにあたって、特許権の存在を調査する必要がある。なぜなら、独自判断で製品開発を行い、知らずとも他社の特許権を侵害してしまった場合には、せつかく開発した製品の販売が出来ないばかりか、特許侵害の訴えにより損害賠償請求の可能性も有るからである。

幸い、熱電発電技術を使ったセンサの概念は、以下の公開特許公報の特許請求の範囲に示されているように、10年以上前から存在することが分かった。また、審査請求が未請求であったり、拒絶査定を受けて特許権取得に至っていない例も多く、熱電発電を利用したセンサ開発に支障が出るような強固な特許権は存在しなかった。

以下に、今回調査した公報から、3つの事例を紹介する。

●特開昭 63-238436「能動型温度センサー」（株式会社日立製作所→拒絶権利化ならず）
特許請求の範囲）

【請求項1】対象物の温度を熱起電力に変換して出力する温度測定部と上記熱起電力を電気信号又は光信号に変換して送信する送信機を有し、温度測定信号をワイヤレスで送信できるようにした事を特徴とした能動型温度センサー

【請求項2】上記温度測定部に半導体の固体素子を用い、発生した熱起電力を温度信号及び送信機の供給電源として用いる事を特徴とする特許請求の範囲第一項記載の能力型温度センサー。

●特開 2008-292318「温度センサシステム」（株式会社神戸製鋼所→拒絶権利化ならず）
特許請求の範囲）

【請求項1】温度センサにより検出された環境温度データを、無線発信手段によって外部装置に送信する温度センサシステムであって、前記温度センサと同じ環境に設置され、前記無線発信手段、前記温度センサ、及び前記制御手段の電力供給源としての熱電素子と前記温度センサにより検出された環境温度の変化に応じて、単位時間あたりの前記温度センサによる温度測定回数、及び前記無線発信手段による環境温度データ送信回数を変化させる制御手段とを具備している事を特徴とする温度センサシステム。

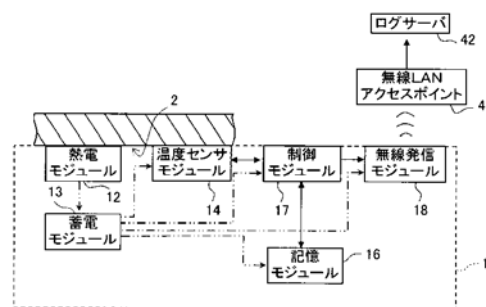


図2 温度センサシステム概要

【請求項 2】前記温度センサにより検出された環境温度に対応する温度測定回数と環境温度データ送信回数を定めたテーブルを備え、前記制御手段が前記テーブルに基づいて単位時間当たりの前記温度センサによる温度測定回数及び前記無線発信手段による環境温度データ送信回数を変化させてなる請求項 1 に記載の温度センサシステム。

【請求項 3】前記温度センサが複数配備され、各温度センサ毎に、前記無線発信手段、前記制御手段、及び前記熱電素子が設けられてなる請求項 1 または請求項 2 の何れかに記載の温度センサシステム。

【請求項 4】前記各温度センサ毎に、当該温度センサにより測定された環境温度データを記憶・蓄積するための記憶手段が設けられてなる請求項 3 に記載の温度センサシステム。

【請求項 5】前記各温度センサ毎に、前記熱電素子により生成された電力を蓄積する蓄電素子が設けられてなる請求項 3 又は請求項 4 の何れかに記載の温度センサシステム。

【請求項 6】前記温度センサが複数配備され、前記温度センサのグループ毎に、1 つの前記無線発信手段、1 つの前記制御手段が設けられており、当該グループ内に、1 つの前記熱電素子が、当該グループ内の少なくとも 1 つの前記温度センサと同じ環境に設置されているか、或いは複数の前記熱電素子が、当該グループ内の各前記温度センサ毎に、当該温度センサと同じ環境に設置されてなる請求項 1 または請求項 2 の何れかに記載の温度センサシステム。

【請求項 7】前記温度センサのグループ毎に、該温度センサにより測定された環境温度データを記憶・蓄積するための記憶手段が設けられてなる請求項 6 に記載の温度センサシステム。

【請求項 8】前記温度センサのグループ毎に、前記熱電素子により生成された電力を蓄積する蓄電素子が設けられてなる請求項 6 または請求項 7 の何れかに記載の温度センサシステム。

【請求項 9】前記温度センサにより測定された環境温度データを記憶・蓄積するための記憶手段が設けられ、前記制御手段が、単位時間当たりの前記温度センサによる温度測定回数と前記無線発信手段による環境温度データ送信回数を、それぞれ独立に設定する請求項 1 乃至請求項 8 の何れかに記載の温度センサシステム。

【請求項 10】前記熱電素子が前記温度センサとして兼用される請求項 1 乃至請求項 9 の何れかに記載の温度センサシステム。

●特開 2002-083389 「温度上昇監視センサ装置および設備監視システム」

(三菱電機株式会社→権利化ならず拒絶)

【特許請求の範囲】

【請求項 1】被監視対象物の温度監視面に密着して設置され前記被監視対象物の温度上昇により起電力を発生する熱電素子と、この熱電素子の出力電圧から一定電圧を取り出す定電圧発生回路と、前記一定電圧が動作電圧として供給され前記熱電素子の出

力電圧が所定値を超えたとき検出出力を発生するコンパレータと、このコンパレータの検出出力により無線信号を発信する第1の無線通信モジュールと、この無線信号を受信して電気信号に変換する第2の無線通信モジュールとを備えたことを特徴とする温度上昇監視センサ装置。

【請求項2】 第1の無線通信モジュールとして赤外線送信モジュールを用い、第2の無線通信モジュールとして赤外線受信モジュールを用い、前記赤外線送信モジュールが、コンパレータの検出出力に応答して個別の周波数信号またはデジタルコード化信号等の識別信号を赤外線信号に変換して発信することを特徴とする請求項1記載の温度上昇監視センサ装置。

【請求項3】 熱電素子の放熱側絶縁板に放熱フィンを有するヒートシンクを固定し、このヒートシンクに定電圧発生回路、コンパレータ、第1の無線通信モジュール等の回路構成部材を取り付けた事を特徴とする請求項1記載の温度上昇監視センサ装置。

【請求項4】 ヒートシンクの側面にこのヒートシンクに送風するための送風ファンを設けたことを特徴とする請求項3に記載の温度上昇監視センサ装置。

【請求項5】 被監視対象物の温度監視面に対向する空間部であって熱電素子を構成する2枚の絶縁板間の周囲に放熱遮蔽板を設置したことを特徴とする請求項3および請求項4のうちいずれか1項記載の温度上昇監視センサ装置。

【請求項6】 第1の無線通信モジュールとして赤外線送信モジュールを用い、第2の無線通信モジュールとして赤外線受信モジュールを用い、所定の領域に設置された複数の被監視対象物のそれぞれに対して熱電素子、定電圧発生回路、コンパレータ、前記赤外線送信モジュールの組み合わせをそれぞれ設け、1個の前記赤外線受信モジュールが前記赤外線送信モジュールのそれぞれから発信される各赤外線信号を受信できる位置に設置されることを特徴とする請求項1記載の温度上昇監視センサ装置。

【請求項7】 赤外線送信モジュールのそれぞれが、コンパレータの検出出力に応答して個別の周波数信号またはデジタルコード化信号等の識別信号を赤外線信号に変換して発信することを特徴とする請求項6記載の温度上昇監視センサ装置。

【請求項8】 所定の領域に複数の被監視対象物が設置された配置において、前記複数の被監視対象物のそれぞれに対して前記被監視対象物の温度監視面に密着して取り付けられ前記被監視対象物の温度上昇により起電力を発生する熱電素子と、この熱電素子の出力電圧から一定電圧を取り出す定電圧発生回路と、前記一定電圧が動作電圧として供給され前記熱電素子の出力電圧が所定値を超えたとき検出出力を発生するコンパレータと、このコンパレータの検出出力に応答して発生する個別の周波数信号またはデジタルコード化信号等の識別信号を赤外線信号に変換して発信する赤外線送信モジュールとからなる組み合わせを設け、前記赤外線送信モジュールのそれぞれから発信される各赤外線信号を受信できる位置に設置される1個の赤外線受信モジュールを備えた温度上昇監視センサ装置を有し、前記赤外線受信モジュールは受信した前記赤外線信号を識別信号に変換しネットワークを介して集中管理するコンピュータに送信し、前記コンピュータは前記識別信号を解読し温度上昇を起こした前記被監視対象物

を特定しその所在を表示することを特徴とする設備監視システム。

【請求項 9】 それぞれが温度上昇監視センサ装置を有する区分けされた複数の所定の領域を設け、各前記温度上昇監視センサの赤外線受信モジュールの出力識別信号を集中管理するコンピュータに送信することを特徴とする請求項 8 記載の設備監視システム。

【請求項 10】 1 個の被監視対象物の異なる温度監視面にそれぞれが密着して設置され前記被監視対象物の温度上昇により起電力を発生する 2 個の熱電素子と、この 2 個の熱電素子の少なくとも一方の出力電圧から一定電圧を取り出す定電圧発生回路と、前記一定電圧が動作電圧として供給され前記 2 個の熱電素子の各出力電圧の差を検出し検出出力を発生するコンパレータと、このコンパレータの検出出力により赤外線信号を発信する赤外線送信モジュールと、この赤外線信号を受信して電気信号に変換する赤外線受信モジュールとを備えたことを特徴とする温度上昇監視センサ装置。

【請求項 11】 1 個の被監視対象物の異なる温度監視面にそれぞれが密着して設置され前記被監視対象物の温度上昇により発生するそれぞれの出力電圧の差電圧を取り出すように直列に接続された 2 個の熱電素子と、前記差電圧から一定電圧を取り出す定電圧発生回路と、前記一定電圧が動作電圧として供給され前記差電圧に応じて検出出力を発生するコンパレータと、このコンパレータの検出出力により赤外線信号を発信する赤外線送信モジュールと、この赤外線信号を受信して電気信号に変換する赤外線受信モジュールとを備えたことを特徴とする温度上昇監視センサ装置。

※また、温度センサとは若干異なるが、火災報知器を熱電発電によって無線化する特許、公報も存在する。

- 特開 2008-046884「火災検出ユニット」（テンパール工業株式会社）（登録）
- 特開 2010-061365「火災警報器及び消火装置」（ホーチキ株式会社）（権利化ならず拒絶）

※無線化した温度センサを複数にしてネットワークを構築することや、それぞれの温度センサに固有番号(IP)を振り当てることなどもこれら公報から公知と言える。

即ち、熱電発電を利用して温度センサを無線化することと、ネットワークシステムを構築することなどの基本的な構成は公知であり、このまま特許出願を行うには新規性・進歩性に乏しいと言わざるを得ない。

したがって、特許出願を推進するのであれば、その熱電発電の効率を上げる構造や無線制御などの詳細の課題解決にフォーカスしていくべきである。当社も、2013 年 7 月 1 日に構造詳細部分にフォーカスした特許出願を行ったが、2015 年 1 月 9 日に特許として登録された。以下に、参考に請求項と参考図を掲載する。

●特許第 5677519 号「温度検出装置」（村田製作所・ダイハツディーゼル共願）

【特許請求の範囲】

【請求項 1】熱源の温度を検出する受温素子を備える検出部と、前記検出部から離隔して配置され、熱電変換素子を備える発電部と、前記熱源の熱または冷熱を前記発電部に伝達する第 1 伝熱部と、前記発電部から離隔して配置され、熱または冷熱を外部に放出する放出部と、前記発電部から熱または冷熱を受け取って前記放出部に伝達する第 2 伝熱部と、前記受温素子から得られた測定結果を出力する出力部とを備え、前記熱電変換素子は、前記熱電変換素子の前記第 1 伝熱部側の面と、前記熱電変換素子の前記第 2 伝熱部側の面との間の温度差によって発電するものであり、前記受温素子および前記出力部が動作するために必要な電力は、前記熱電変換素子によって供給される、温度検出装置。

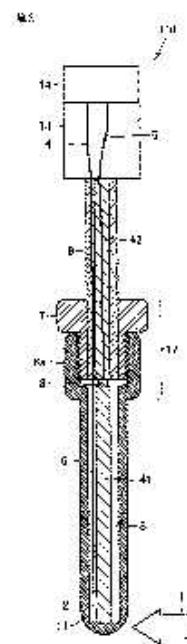


図 3 温度検出装置

【請求項 2】前記第 1 伝熱部は、ヒートパイプまたは金属棒である、請求項 1 に記載の温度検出装置。

【請求項 3】前記第 1 伝熱部の外周面が断熱材または空間で覆われている、請求項 1 または 2 に記載の温度検出装置。

【請求項 4】前記第 2 伝熱部は、ヒートパイプまたは金属棒である、請求項 1 から 3 のいずれかに記載の温度検出装置。

【請求項 5】前記第 2 伝熱部の外周面が断熱材または空間で覆われている、請求項 1 から 4 のいずれかに記載の温度検出装置。

【請求項 6】前記出力部は、無線によって信号を発する無線信号送信装置を備える、請求項 1 から 5 のいずれかに記載の温度検出装置。

【請求項 7】前記出力部は、前記熱源から見て前記放出部よりも遠くに位置する、請求項 1 から 6 のいずれかに記載の温度検出装置。

【請求項 8】前記放出部における熱または冷熱の放出を促進するためのファンを備え、前記ファンが動作するために必要な電力は、前記熱電変換素子によって供給される、請求項 1 から 7 のいずれかに記載の温度検出装置。

【請求項 9】前記熱源が常温より低い温度の冷熱源であり、前記放出部において冷熱を放出することによって前記熱電変換素子の前記第 1 伝熱部側の面と前記熱電変換素子の前記第 2 伝熱部側の面との間に生じる温度差を利用して、前記熱電変換素子が発電する、請求項 1 から 8 のいずれかに記載の温度検出装置。

【請求項 10】少なくとも前記第 1 伝熱部を収容するケースを備える、請求項 1 から 9 のいずれかに記載の温度検出装置。

5.2 市場にある熱電発電素子を利用した製品例

• Micropelt 社/ mNODE Sensor

左：電力盤内のバスバーに取付け、異常加熱を監視して無線で異常を知らせる子機
 右：バルブコントロールモジュール。熱電発電の電力で無線と内部モータを駆動



図4 マイクロペルト社の製品

• Spartan peripheral devices 社/Energy harvesting self-powered ME9430 Globe Thermal unit control valve (熱電発電の電力による無線動作のコントロールバルブ)

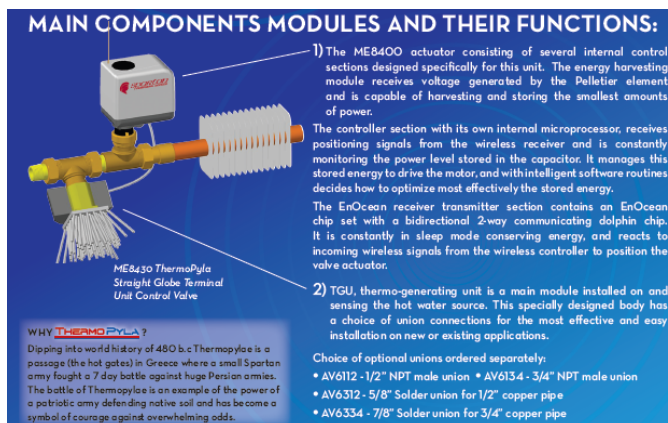


図5 スパルタンペリフェラルデバイス社の製品

• ABB 社/ WiTemp TSP331 energy harvester powered wireless temp. Transmitter 熱電発電による温度センサ。熱電発電は内蔵バッテリーの交換時期を延長するため



図6 ABB 社の製品

5.3 技術調査の結果

以前は、未利用排熱エネルギーを回収する熱電発電技術を普及させていくには、材料・モジュールの高効率化および低コスト化、環境負荷の低い熱電変換材料の開発、モジュール発電効率 15～20%の達成などが必要となることが優先され、熱電発電素子自体の性能指数の向上や新素材開発などの研究案件が多く、熱電発電素子を利用したアプリケーション開発事例はまだまだ少なかった。

日本では、国の推進するエネルギー消費削減の施策「地球温暖化対策推進大綱」に位置づけられ、「革新的エネルギー消費削減技術」の一つに取り上げられる事になり、2002年度から5カ年計画で研究開発が行われて多くの成果が発表された。これらは、省エネに関連するため、熱電素子を利用した電力回収の研究開発が数多く行われた。

現在も、熱電変換技術は2008年に策定された経済産業省の技術戦略マップ「エネルギー分野—総合エネルギー効率の向上」に寄与する技術における「未利用微小エネルギー電力変換」技術として捉えられている。

上記のような電力回収という方向性ではなく、電池を不要にしたい、配線を不要にしたいなどの理由から環境発電した電力だけで動作させる製品を開発する方向性も考えられる。当社が今回行った熱電発電温度センサの開発研究はこちらの方向性である。

こちらは、まだ市場に製品が少ないが、少しずつ広がりつつある分野である。

最近の大きな進歩は、例えばリニアテクノロジー社の LTC3108-1 の様なエナジーハーベスティング向けの超低電圧の昇圧コンバータや超低消費電力マイクロコントローラが複数のメーカーから供給され始めた事である。これにより、一気に環境発電を利用した汎用製品の開発が可能な環境が整い始めた。

しかし、まだまだ商用アプリケーション事例は少なく、特に船用ディーゼル機関に適用した事例は見あたらなかった。

以前のテレビジョンのドキュメンタリー番組にて、当社製ディーゼル機関に圧電式の振動発電モジュールを取り付け、発電した電力で LED が光ること、無線の電波が飛ぶことを確認する事例があった。しかし、どれだけの発電量が有ったかなど技術的な詳細についての開示は行われていない。

これらより、ディーゼル機関に環境発電技術は適用できるが、どの様な問題や課題があるのかは十分に判っていないということが言える。

これらの問題や課題を明確にすることは、環境発電技術の船用分野への適用促進という点で大変意味がある事であり、当該調査研究を進めることとした。

6. 熱電発電無線排気温度センサの設計開発

6.1 環境発電技術の基本について

6.1.1 環境発電とは

環境発電とは、一般的に「エネルギーハーベスティング」や「エネルギーハーベスティング」と呼ばれており、あらゆる場所に存在する「エネルギー」を「収穫（ハーベスティング）」して利用するという意味である。

環境発電技術とは、あらゆる環境に普遍的に存在する、たとえば“熱”、“振動”、“光”、“電波”等の現象を対象とし、これらの現象からエネルギーを取り出し、それを利用する技術の総称である。一般に発生するエネルギーは微弱なものとなるが、発電能力が高い素子が開発され、環境発電用に特化した昇圧 IC 回路技術や僅かな電力で駆動できる無線技術などの周辺技術が充実してきており、実際のアプリケーション開発が行える環境がようやく整ってきた。

近年、環境発電に関する開発事例も数多く発表されており、大きな盛り上がりを見せている。

当社の商品であるディーゼル機関は内燃機関であり、吸入した空気をシリンダ内でピストンにて圧縮し、そこに燃料を噴霧し、着火・爆発燃焼させて発生するエネルギーを運動エネルギーに変換して利用しているが、その副産物としてかなりの「熱」や「振動」も同時に生み出している。

ダイハツディーゼルが、平成 24 年度に実施した FS 事業「無線技術や環境発電技術を応用した船舶機関用センサについての調査研究」では「熱」「振動」に着目して、環境発電技術の可能性を探ったが、今回はよりディーゼル機関に適した「熱」を選定し、本研究開発を計画した。

6.1.2 熱電発電の原理

熱からエネルギーを回収する手法として、ゼーベック効果という物理現象を利用する方法がある。これは 2 種類の導体(又は半導体)を接合して閉回路を作り、接合部分間を異なる温度に保つとその間に起電力が生じるという原理を利用するものであり、1821 年にゼーベック氏により発見された。この技術は、熱電対に使われているものと同じである。

物質が熱により発電できる能力はゼーベック係数(α)と呼ばれ、単位温度差あたり

に発生する起電力の大きさ[V/K]がその単位となっている。金属では、数～10数 μ V/Kが一般的であるが、半導体では数100 μ V/Kになるものがある。このように非常に小さい値であるので、大きな電位差を発生させるために素子を直列に並べて接続する構造とするのが普通である。

熱電変換素子による発電能力は動作温度にも依存するため、性能指数 Z と動作温度 T の積である無次元化性能指数 ZT で表されることが多い。

$$ZT = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \kappa} T$$

(α : ゼーベック係数(V/K), ρ : 電気抵抗率($\Omega \cdot m$), κ : 熱伝導率(W/m \cdot K) T : 絶対温度(K))

この式より、発電性能のよい熱電材料は、高いゼーベック係数 α と低い電気抵抗率 ρ 及び熱伝導率 κ 、の両立が必要なことが判る。現在、一般的に普及しており、最も高い ZT を示す素材はビスマステルル系(Bi₂Te₃)で $ZT=1.2$ 程度である。これらの諸条件を満たし、ビスマステルル系を超える性能を持つ素材の開発研究は日夜行われている。

6.2 ディーゼル機関への適用について

6.2.1 熱電発電の適用

現在、一般的な熱電発電モジュールとして普及しているもので最も発電性能が高いのはビスマステルル系の素材である。この材質は200 $^{\circ}$ C以上では性能指数が低下すること、また熱電材料自体が高温に弱いなどの弱点がある。更に、一般的な熱電素子モジュールの構造では熱電素子のp型、n型半導体と電極の接合にはんだが採用されており、はんだ融点(約180～220 $^{\circ}$ C)以上では使用出来ないものが多い。

上記のような熱電素子をディーゼル機関に適用しようとする場合は、180 $^{\circ}$ C以下となる冷却水配管系や潤滑油配管系、ディーゼル機関本体温度の利用を前提とする必要がある。

しかしながら、ディーゼル機関等の内燃機関には、排気ガスを外部へ導くための排気管があり、その周囲に非常に高温になる部分がある。たとえば、排気管などは負荷にもよるが、300～400 $^{\circ}$ Cの温度となる。また、ターボチャージャー入口などは500 $^{\circ}$ Cまで上昇する場合もある。これらの熱はディーゼル機関の運転中には常に存在するため、高温熱源として非常に魅力的である。

更に、ディーゼル機関には、冷却に使用できる冷却水系や潤滑油系といった低温部が存在しており、かつ高温部と低温部が近くにある。これらの条件から、他の一般的な機器より大きな温度差を確保しやすい機器であると言える。

ディーゼル機関の高温部を利用できる耐熱性の高い熱電素子を用意できれば、400℃といった高温部分の熱を利用する事が可能になり、また、空冷だけでなく、水冷・油冷が出来れば、安定的に熱電素子に大きな温度差 ΔT を確保でき、さらなる大きな発電電力の発生も期待出来る。



図7 熱電発電モジュール試作器 (FS 時)

今回は、株式会社村田製作所の協力により、開発中にも関わらず、稀少元素を主成分として含まない、酸化物材料で作られた高温に強い熱電発電モジュールをFS時に引き続き提供頂き、各種試験を行うことができた。

この素材は、 $ZT=0.35$ 程度の無次元化性能指数を示すチタン酸ストロンチウム ($SrTiO_3$) からなり、先のビスマステルル系の $ZT=1.22$ に比べると性能指数は低いですが、高い温度までなだらかに上昇を描く特性を持つ。

また、安全な素材で製造されていることや、p型半導体とn型半導体の結合がセラミックを製造する方法と同じ焼成により行われたサンドイッチ構造であり、はんだによって直列接続されている他の熱電発電モジュールより信頼性も高い。

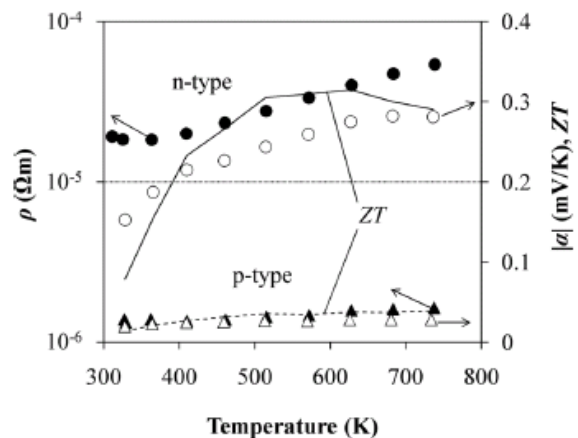


図8 $SrTiO_3$ の性能指数 ZT と温度 K の関係

つまり、性能指数だけで見ると高性能なビスマステルル系のモジュールには若干劣るが、熱電発電素子自体の強度や熱に対する耐久性等、安全な素材を適用などの複数の利点からディーゼル機関の高温・高振動環境下で使用するにあたって最も適した熱電発電素子であると判断した。

なお、素子を提供いただいた村田製作所によると、当該熱電発電素子の製造工程は、コンデンサの製造工程とほぼ同じであるため、将来的には大量生産が可能で、低価格化が望めるとのことである。

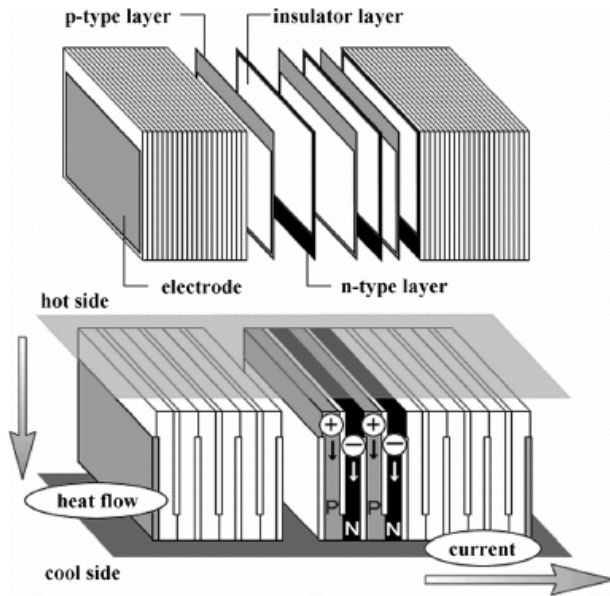


図9 熱電発電素子 (SrTiO₃) の構造

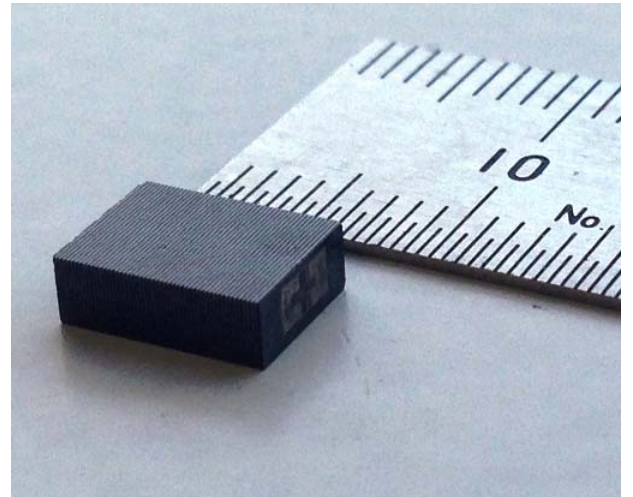


図10 熱電発電素子の外形写真

6.2.2 熱伝導の基本法則

熱電発電素子への熱伝導構造を検討する上で、熱伝導の基本法則を理解しておく必要がある。以下に熱伝導の基本法則を説明する。

物質内に熱の流れがある場合、流れる熱量の大きさは伝熱量 Q で表し、その単位時間1秒あたりの熱の移動量を W (ワット) で表す。 ($1J = 1N \cdot m = 1W \cdot s$)

単位面積 (m^2) あたり単位時間 (秒) に移動する熱量の大きさ q は熱流束とよび、微小面積 dA を単位時間に通過する伝熱量を dQ で表すと、以下の関係がある。

$$q \cdot dA = dQ \quad \text{又は、} \quad q = \frac{dQ}{dA} \quad [W/m^2]$$

この時、単位時間[s]に移動する全熱量 $Q[W]$ は、通過する面積を $A[m^2]$ として次式で表される。

$$Q = q \cdot A \quad [W]$$

固体内部を伝導で伝わる熱量の大きさを定量的に取り扱うためには、フーリエの法則がある。

「材質が一定かつ一様な同一の個体内部の熱伝導においては、一次元の温度場が考えられるとき、伝熱量は温度降下の勾配と熱が流れる方向に直角な断面積とに比例する。」であるから、

$$\begin{aligned} (\text{伝導による伝熱量}) &= (\text{熱の伝わりやすさを示す比例定数}) \times (\text{温度降下の割合}) \\ &\times (\text{断面積}) \end{aligned}$$

すなわち、

$$dQ = -\lambda \frac{d\theta}{dx} dA \quad \text{単位は[W/(m \cdot K)]である。}$$

この式で定められる定数 λ はその物質の種類及び状態によって決まる物性値で、熱伝導率と呼ばれる。つまり、熱伝導率とは、各材料の単位長さあたりに絶対温度で1Kの温度降下を生じているときに、面積 1m^2 あたりに毎秒流れる熱量を示している。

また、熱の伝達経路を考えた場合、熱の流れは伝達経路上の複数の部材を経由することになる。それぞれの部材を通る熱流束は、

q : 熱流束[W/m]、 λ : 熱伝導率[W/m·K]、 δ : 厚さ (長さ) [m]であるとき、

$$q_1 = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (\theta_1 - \theta_2), \quad q_2 = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (\theta_2 - \theta_3) \quad \cdots \quad q_n = \frac{\lambda_n}{\delta_n} (\theta_n - \theta_{n+1})$$

で表される。

定常状態では、それぞれの部材の熱流束 $q_1=q_2=\cdots=q_n=q$ となるため、熱の伝導経路上最も熱流束の少ない部分に縛られることが分かる。

つまり、熱伝達経路に於いて、熱流束 q が少なくなるネック部分を無くせば良い。

また、熱流束が少なくても熱量を増やすために接触面積を大きくしたり、熱流束が少なくなる部材は、なるべく λ が大きい材質を選択すること。また、 λ が小さい場合は、極力厚みが薄くなるようにするのが良いということが分かる。

問題となるのが部材と部材の接触面である。部材と部材の接触面は、双方に表面粗さが有るため、しっかりと面を合わせて接触させたつもりでも、ミクロ的には殆ど接触していない。そして隙間に熱伝導率は $\lambda = 0.03$ と非常に低い空気が入りこむため、

大きな熱伝導経路上のネックになってしまう。

このような隙間は少しでも熱伝導率が高い専用のグリス等を使って空気が入らないように隙間を埋め、熱伝導性能を少しでも上げるように工夫する必要がある。

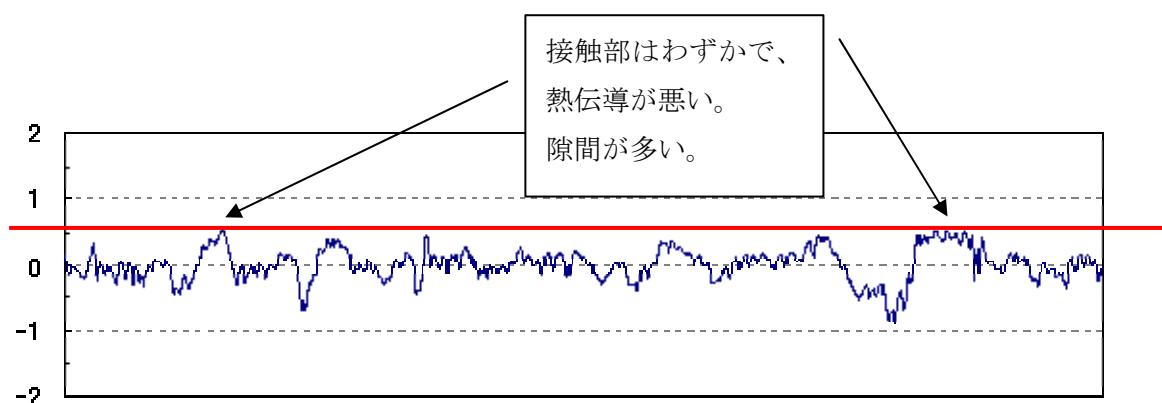


図 1 1 面の粗さの例

もちろん、このような部材の境界部分が複数有れば有るほど、上記のようなネック部分が増えることになり、ますます伝導する総熱量が少なくなるため、熱伝導経路の部品は最小限の数量で構成する様にし、少しでも熱伝導上のネックになる部分を廃して、効率よく熱を流すように計画すべきである。

これらを纏めると、発電量を少しでも増やす設計をするためには、熱伝導部材を流れる熱量を少しでも増加させる必要があり、以下の様な視点が必要になる。

①熱伝導部材の断面積を最大限に増やす

熱流束が一定なら、熱伝導部材の断面積が大きいほど、全熱量 Q を増やせる

課題：限られた形状の中で如何に伝熱部材の断面積を大きく取れるか

②温度差を付ける

温度降下の勾配が大きいほど全熱量 Q を増やせる

課題：温度差を大きくするため、放熱性能を如何に上げられるか

③熱伝導率の高い素材を使う

熱流束を増やすため、熱伝導率 λ が大きい素材を選定する必要がある。

課題：銅より熱伝導率 λ が大きい素材で使えるものを探す必要がある

④熱流束の少ないところを設けない

定常状態であれば熱流束は、最も少ない部分に縛られる。

課題：熱伝導率の小さい部材の使用や隙間を極力設けない、接続部を減らす。

6.2.3 素材による熱伝導率の違い

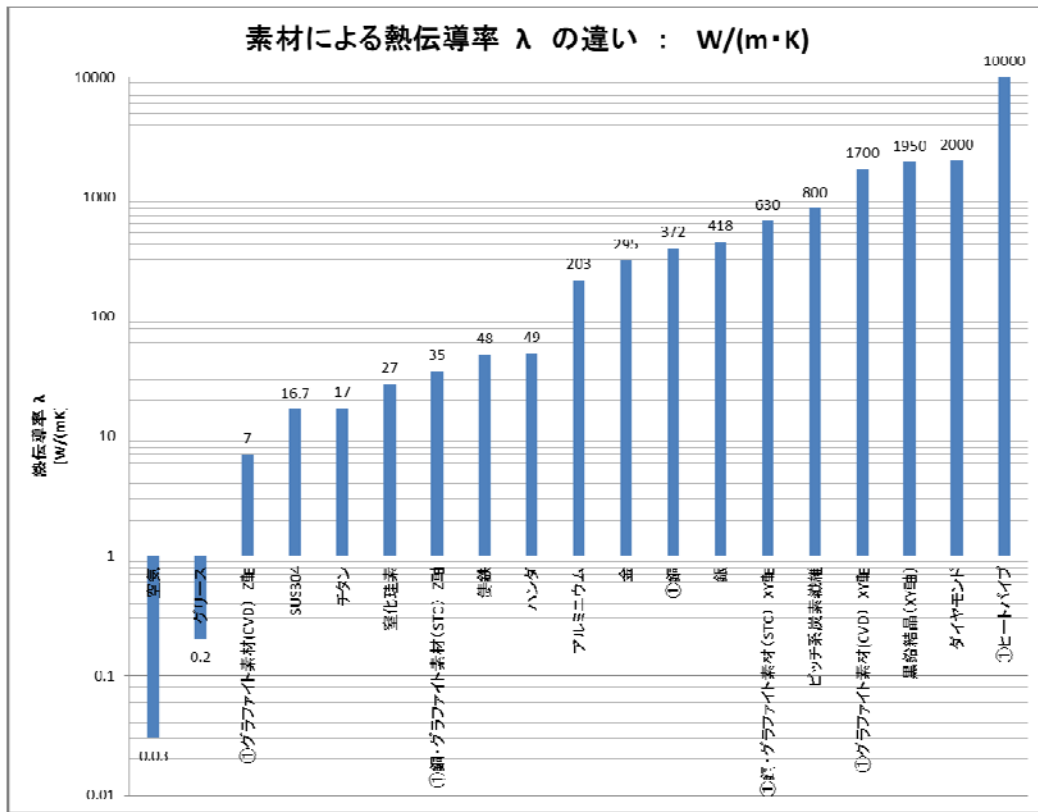


図 1 2 素材による熱伝導率 λ の違い

図 1 2 は素材による熱伝導率の違いを示したものであり、右から大きい順である。

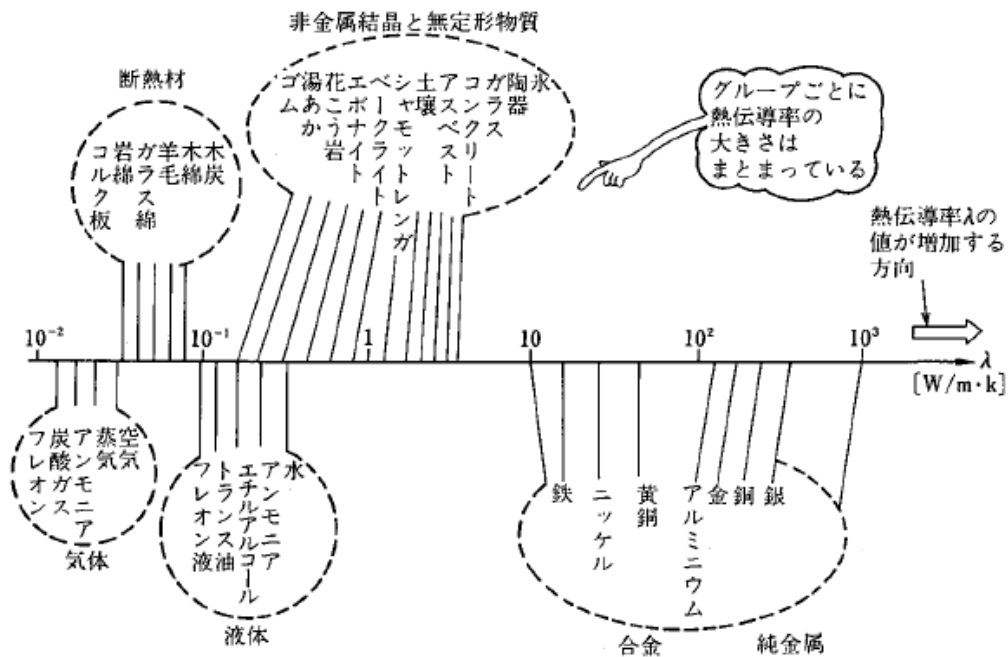


図 1 3 気体、断熱材、液体、非金属、金属の熱伝導率のグループ

各種素材の熱伝導率 λ は、図13のようにグループ毎に纏まっており、金属グループは10~500 W/m・Kまで、セラミックスやガラス、樹脂など非金属が0.1~10 W/m・K、液体が0.1~0.5 W/m・K、気体は0.01~0.2 W/m・K程度となっている。

一番熱伝導率が高いのは右端のヒートパイプだが、詳細は6.2.4章で述べる。

熱伝導率が高い素材としてよく知られるのはダイヤモンド（熱伝導率 $\lambda=2000$ W/m・K）である。金属での熱伝導は主に電子によって担われているが、ダイヤモンドやグラファイトでは格子振動により行われている理由で熱伝導率が金属より良い。

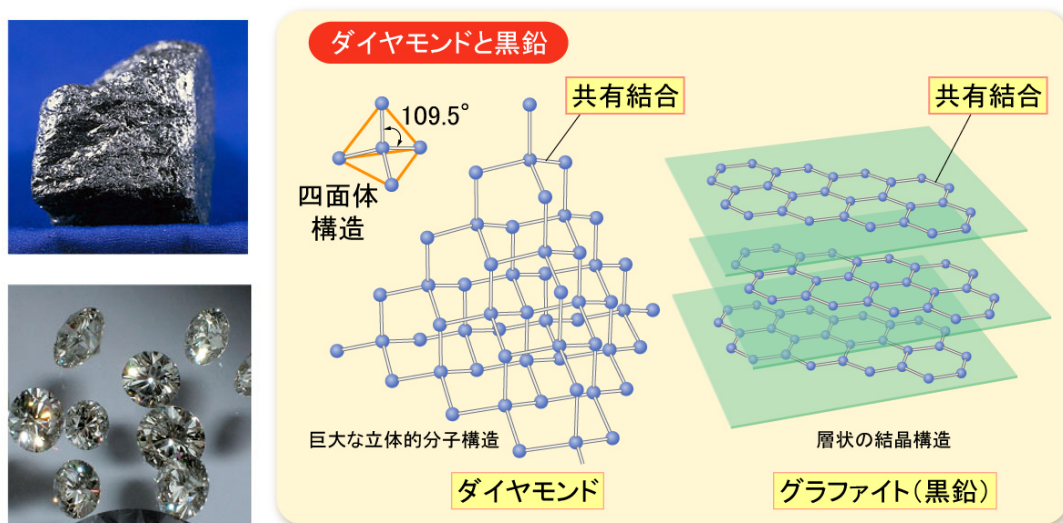


図14 黒鉛（グラファイト）とダイヤモンドの結晶構造（Copyright © JST）

次は、ダイヤモンドと同じ炭素からなる黒鉛結晶である。その熱伝導率は（ $\lambda=1950$ W/m・K）とダイヤモンドに近い値で、銅の約5倍の熱伝導率を持つ。黒鉛結晶は板状の結晶が層状に積み重なった構造をしており、結晶の面方向には熱伝導はよいが、層方向は熱伝導が極端に悪くなる異方向性という特徴をもつ。また、グラファイトの熱伝導の善し悪しは、結晶性の良否にも深く関係している。また、層方向に剥がれやすく脆いため、工業製品として使うには注意が必要である。

カーボングラファイト素材（CVD）は、Chemical Vapor Deposition：化学気相成長法を使って製造する素材である。炭化水素ガスを高温環境で熱分解して、化学変化にて生成した炭素結晶を層状に蒸着して積み上げていき、板状に成長させたものである。面方向に結晶が並び、その結晶性が良いため、面方向には熱伝導率（ $\lambda=1700$ W/m・K）という実力があるが、これも層方向には熱伝導率（ $\lambda=7$ W/m・K）と非常に悪い。十分な固さがあり、剥離も少なく伝熱用部材として優れているが、製造に手間が掛かる分、コストが高い。

ピッチ系炭素繊維（カーボンファイバー）は、黒鉛結晶を繊維方向へ並べたものであり、繊維軸方向には銅の2倍程度の高い熱伝導率（ $\lambda=800 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ）を持つものもある。製造方法は、炭素繊維の原料を糸状にして炭化・黒鉛化して成形する。

銅/グラファイト素材（STC/焼結材）は、銅の中にグラファイト粒子を、配向方向を整列させて加熱し、機械的に圧力を掛けて焼結して製造する。熱伝導率（ $\lambda=600 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ）と銅より高い値を示すが、これもグラファイトの異方向性の特性から、面方向には熱伝導特性が良いが、層方向には熱伝導率（ $\lambda=20 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ）程度という低い値を示す。固さもあり、伝熱部材として優れているが、これも製造に手間が掛かる分、コストが高い。

次に金属素材であるが、銀が最も熱伝導率が高いが（ $\lambda=418 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ）、その素材の価格からも潤沢には使用できない。その為、よく使われるのは次に熱伝導率が高い銅である。銅は熱伝導率が（ $\lambda=372 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ）で銀とほぼ同じでありながら素材の価格も安く、加工性もよく熱伝導素材としては非常に優れている。ただし、高温環境下では機械的強度が落ちる欠点がある。

一般的な排気温度センサの筐体（保護管（シース））の素材はステンレスが用いられている。ステンレスは錆びず、丈夫で使い勝手の良い金属ではあるが、実は熱伝導率が良くない（ $\lambda=16.7 \text{ W/m} \cdot \text{K}$: SUS304）

注意が必要なのは図12の左端の空気である。空気はきわめて低い熱伝導率（ $\lambda=0.03 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ）を持ち、非常に熱を伝えにくい物質である。寒冷地では建築物に2重窓が採用されるが、これは2枚ガラスの間に空気を挟み、得られる断熱効果を利用している。

つまり、熱を伝える構造の途中に空気が入る隙間があると熱抵抗が増し、一気に熱を伝えにくくなるということがわかる。逆に、この熱を伝えにくい特性を利用すれば、特別な断熱材を用いずとも、断熱したい場所に空気層を設けることで効果的に断熱できるということである。空気は、一般的な断熱材より断熱効果は高い。

総合すると熱伝導率が高い素材としては、金属の銅が一番使いやすい素材であることが分かる。カーボン系の素材は、銅より熱伝導率が遙かに高いが、熱伝導の方向に異方向性がある事に注意する必要がある。つまり、熱を流したい方向に素材の向きを揃え、熱伝導する方向を変えるためには素材の向きをずらすなど、組合せを考える必要がある。また、脆い構造のため、本件のような熱伝導のみの用途には適しているが構造部材としては適さない。そして、製造工数や製造設備が大がかりであり、総じてコストが高い素材である。今後の更なる普及による低価格化が望まれる。

6.2.4 ヒートパイプについて

ヒートパイプは、人工衛星に搭載する機器の廃熱処理などの用途から発展し、現在ではパソコンのCPU冷却、金型の冷却や加熱均衡用など、いろいろな場所で使用されている、小さな温度差で大きな熱量を輸送できる高性能な伝熱部材である。

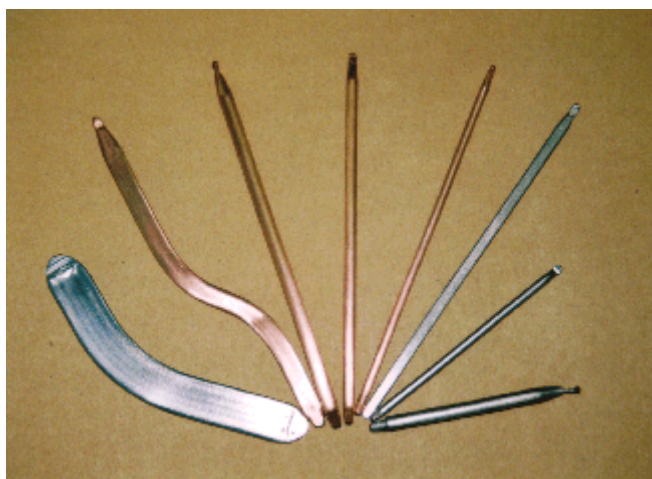


図15 いろいろなヒートパイプ
(参考：日本ヒートパイプ協会 HP)

その構成は非常に単純であり、密閉容器と作動流体とからなる。密閉容器はコンテナと呼ばれ、写真の様な細長い形状や平べったい形状など色々なものがある。

作動流体は密閉容器を真空にした後に封入され、容器内には液の状態と蒸気の状態の作動流体が適当な割合で存在している。

このヒートパイプの一部を加熱し、他の部分を冷却すると作動流体は加熱部から冷却部へ流れる蒸気の流れと冷却部から加熱部への液の還流とからなる液-蒸気のサイクルを構成する。このとき熱は加熱部ではコンテナから作動流体に伝えられ、液が蒸気に変化するためのエネルギー、即ち蒸発潜熱として蒸気に蓄えられる。冷却部では逆に蒸気が凝縮し液になるとき放出されるエネルギー、即ち凝縮潜熱を作動流体からコンテナへ伝える。このように熱は相変化を伴った作動流体の流れにより加熱部から冷却部へ運ばれる。

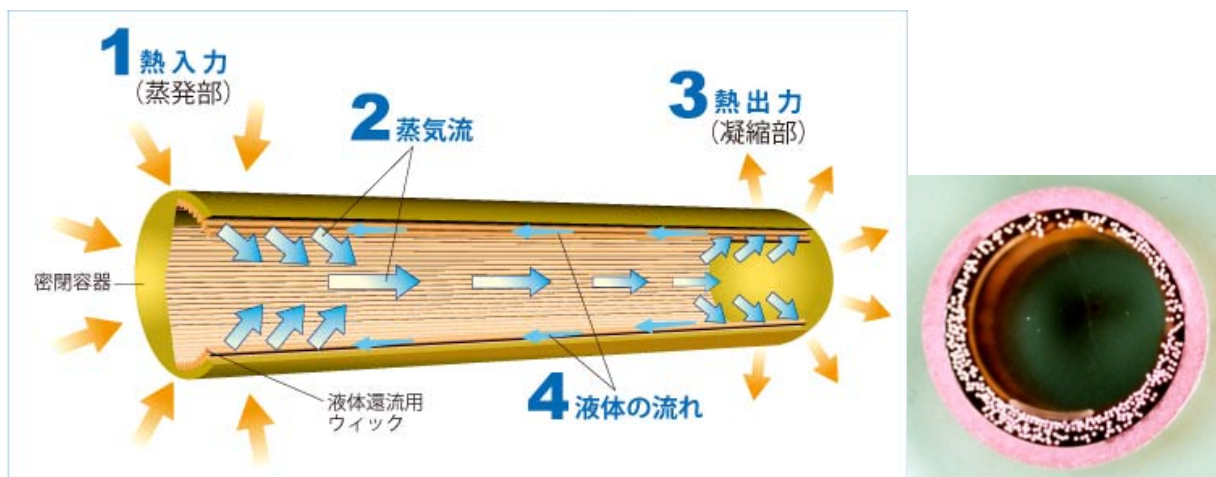


図16 ヒートパイプの構造と断面 (参考：片岡線材株式会社 HP より)

今回使用したヒートパイプは中に毛細管構造（ウイック）が設けられており、凝縮した液を毛細管現象にて加熱部に運んで戻す役割を持たせてある。この構造を持つヒートパイプを一般的にウイック式ヒートパイプと呼ぶ。

ヒートパイプでは、作動流体が潜熱として熱を吸収し、放出するので作動流体自体に温度変化は生じない。このように、作動流体の温度が変化することなく熱の授受が行われる事が小さな温度差で大量の熱輸送を可能にしている。

熱電導率は実に 10000～30000 という数字を持ち、カーボンの 10 倍、銅の 100 倍もの性能を持つため、本開発では、ヒートパイプの採用も考慮に入れて検討を進めた。

ヒートパイプは非常に高性能な熱伝導部材であるが、使用温度範囲を超えて加熱すると内部圧力が高くなって破裂する恐れがある。また、下部を熱し、上部を冷やす方向での使い方が最も効率がよく、水平方向や上部を熱して下部へ熱伝導する場合などは熱伝導性能が落ちる問題もある。したがって、伝熱材料として金属やカーボングラファイト等の単体部材を使うよりリスクが伴う事を理解して、設計しなければならない。

一次試作では、これらの部材のうち、どの素材がより適しているかを判断するため、それぞれ組合せを検討した。そして、加熱時に熱電発電素子の上下面の温度差が大きいほうがより発電条件として良いという点に着眼して各種評価試験を行った。

7. 一次試作と評価

7.1 設計思想と基本構造案

今回、熱電発電無線排気温度センサを新しく開発するにあたって、最も重要視したのは、発電電力を如何に大きくするかである。発電電力が少しでも多ければ、発電した電力をより多くコンデンサに貯めることができ、かつ貯まった電力を使用してより電力消費の多い回路を駆動することが可能となる。つまり、発電電力が多ければ多いほど、回路設計や通信プロトコル設計に裕度が増し、新機能の追加や無線通信のインターバルをより密にするなどの仕様の充実が図れるなど、すべての面に良い影響を与えることになるからである。

熱電発電素子は、片側を低温に、反対側を高温にすることで発電する。発電電力をより多く稼ぐためには、この温度差をより大きくする必要がある。つまり、センサの温度計測素子周辺の排気温度によって熱せられた保護管（シース）から伝わる熱を効率よく熱電発電素子の高温側に持ってくるのが重要である。また、熱電発電素子の低温側から熱を運びだして冷やすと同時に、効率よく雰囲気中に捨てる必要がある。この2面が成り立つように熱電発電素子に繋がる伝熱構造を考える必要がある。

今回、基本構造として特許出願した以下の構造を元に、新しく得られた知見を加味して開発を行った。（特許第 5677519 号 「温度検出装置」）

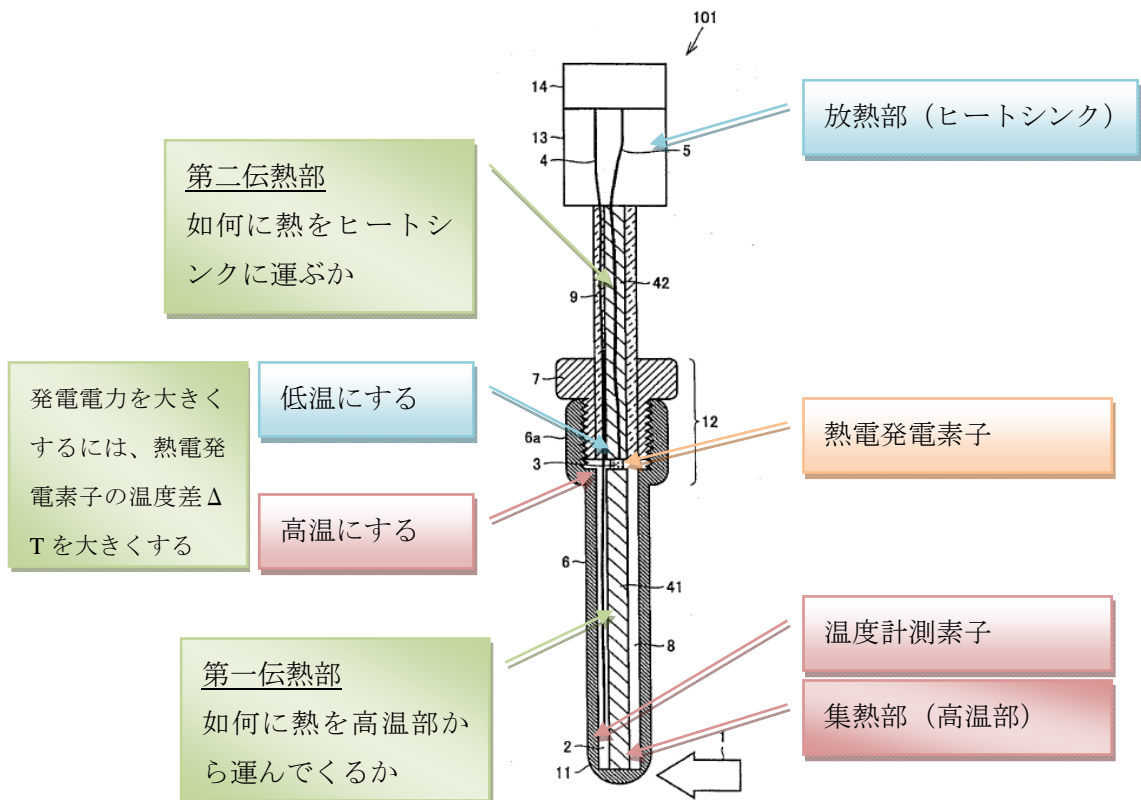


図 1 7 熱電発電温度センサの基本的な構造案

7.2 伝熱素材の評価

7.2.1 伝熱部材

一次試作は、基本的な構造案を具体化して、組み込む部材や試験を通じて問題点を洗い出すために行う試作である。一次試作品を使った試験では、目標を熱電素子上面、下面の温度差を如何に大きくするかに注目し、熱の伝熱部材の選定及び、構造の決定を行っている。

試作品の仕様は首長さ 20mm、50mm、100mm を各 3 本ずつ試作した。

またデータ取得用のセンサ（センサ各部に計測用熱電対が仕込んであるもの）を用意して、内部温度の上昇を確認している。主に 50mm を使って評価している。

比較する部材は

集熱部～熱電素子（第一伝導部）：	銅と銅/グラファイト焼結材
熱電素子～放熱部（第二伝熱部）：	銅とグラファイト（CVD）とヒートパイプ 直付け銅（熱電素子冷却側に直接接続） 直付けグラファイト(CVD) （熱電素子冷却側に直接接続）

それぞれの熱伝導率は、

- ・銅 $\lambda = 372\text{W/m}\cdot\text{K}$
- ・銅/グラファイト材 面方向： $\lambda = 630\text{W/m}\cdot\text{K}$, 層方向： $35\text{W/m}\cdot\text{K}$
- ・グラファイト(CVD) 面方向： $\lambda = 1700\text{W/m}\cdot\text{K}$, 層方向： $7\text{W/m}\cdot\text{K}$
- ・ヒートパイプ $\lambda = 10000\text{W/m}\cdot\text{K}$ （参考値）



図 1 8 集熱側（第一伝熱部部品）銅/グラファイト焼結材（熱伝導率 $\lambda = 630$ ）



図 1 9 放熱側（第二伝熱部部品）銅/グラファイト焼結材（熱伝導率 $\lambda = 630$ ）



図 2 0 放熱側（第二伝熱部部品） グラファイト（CVD）（熱伝導率 $\lambda = 1700$ ）



図 2 1 放熱側（第二伝熱部部品） ヒートパイプ（熱伝導率 $\lambda =$ 約 10000）

7. 2. 2 各種比較用構造案の説明

一次試作では構造案 1 から始め、複数の構造案を設計・製造し、試行錯誤を含めた基礎試験を行った。最終的に、評価のために以下の 5 つの構造案を対象とした比較試験を行っている。

なお、第一伝導部（集熱部）の使用する素材が銅と銅/グラファイト焼結材の 2 種類しかない理由は、図 1 9 で判るように、つばが有る複雑な形状をしているため、グラファイト（CVD）素材やヒートパイプでは製作が不可能だった事による。

・構造案 3.1

第一伝導部（集熱部）：銅、

第二伝導部（放熱部）：銅+ヒートパイプ+ヒートシンク

※集熱部は一般的な銅材。放熱部はヒートパイプでその下端を銅材でサンドイッチして、銅の部品で熱電温度素子に当てている。

・構造案 4

第一伝導部（集熱部）：銅/グラファイト焼結、

第二伝導部（放熱部）：銅+グラファイト+ヒートシンク

※放熱部はグラファイト（CVD）の棒材を使用。

下端部は銅材でサンドイッチして、銅の部品で熱電温度素子に接している。

・構造案 5

第一伝導部（集熱部）：銅、

第二伝導部（放熱部）：銅+グラファイト+ヒートシンク

※集熱部は一般的な銅材。放熱部はグラファイト（CVD）の棒材を使用。

下端を銅材でサンドイッチして、銅の部品で熱電温度素子に接している。

・構造案 6

第一伝導部（集熱部）：銅、

第二伝導部（放熱部）：直付けグラファイト+ヒートシンク

※集熱部は一般的な銅材。放熱部はグラファイト（CVD）の棒材を使用。

下端を銅材でサンドイッチせず、直接熱電温度素子に接している。

・構造案 7

第一伝導部（集熱部）：銅、

第二伝導部（放熱部）：直付け銅+ヒートシンク

※集熱部は一般的な銅材。放熱部は銅の棒材を使用。

下端を銅材でサンドイッチせず、直接熱電温度素子に接している。

直付けと通常の構造の違いを以下に示す。直付けを採用した構造案は、部品と部品の接触面が少なくなるため、より熱抵抗を減らす事を狙っているものである。

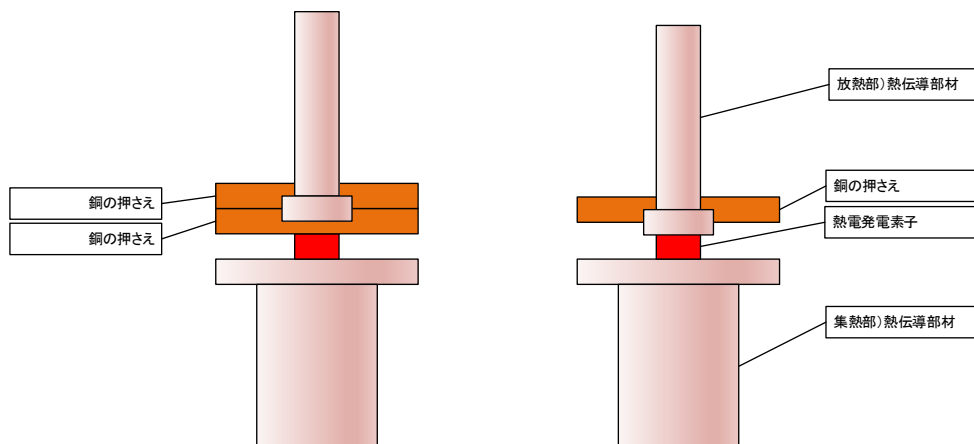


図 2 2 第二伝導部（放熱部）の銅板による押さえ構造（通常と直付けの違い）

7.2.3 一次試作比較試験の試験方法と設備

温度校正器により、構造案 3.1 と 4 と 6 の違いを 200℃、400℃、600℃に加熱して比較した。以下の部分に熱電対を仕込んだ全く同じ構造の各部温度計測用センサを用意し温度計測を行った。熱電対による計測部分は以下のように定義する。

表 2 計測箇所の名称

名称	計測箇所
PE 下部	熱電発電素子下面温度（高温側）
PE 上部	熱電発電素子上面温度（低温側）
ヒートシンク	ヒートシンク温度
ΔT	熱電発電素子下面温度－上面温度
PE 上・ヒートシンク	熱電発電素子上面温度－ヒートシンク温度



図 2.3 左：各部温度計測用センサ、右：首長さ 50mm の熱電発電無線温度センサ

以下に、温度を供試体である各部温度計測用センサに与えるための設備を示す。

200℃まではオイルバスを用い、それ以上の温度はヒータとキャリブレータを用意して行った。最大で 600℃までの領域で試験をしている。これは一般的な排気温度センサが最大 600℃を仕様上の上限としているためである。

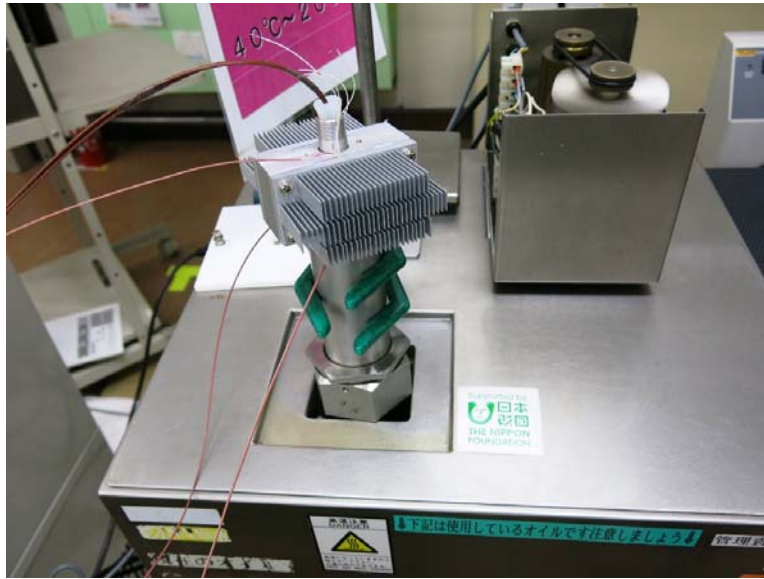


図 2.4 オイルバス（200℃まで）加熱温度試験設備



図 2.5 リボンヒータによる（200℃超）加熱試験設備



温度校正器TP17650M



保護管内温度分布
測定用シース熱電対

被試験センサ

記録計KR3000

図 2.6 温度校正器（温度キャリブレータ）による加熱温度試験設備

7.2.4 試験結果と考察

当初、オイルバスにより評価試験を行っていたが、オイルバスの仕様上、最大 200℃までの計測しか出来ず、素材の違いによる明確な違いが得られなかった。

そこで新たに 600℃まで加熱できる温度校正器を用意し、試作品を取り付けられるように改造したうえで、200℃での計測で目処付けした以下の3仕様に絞って評価を行っている。200℃、400℃と 600℃に加熱時の各部温度の測定結果を以下に示す。

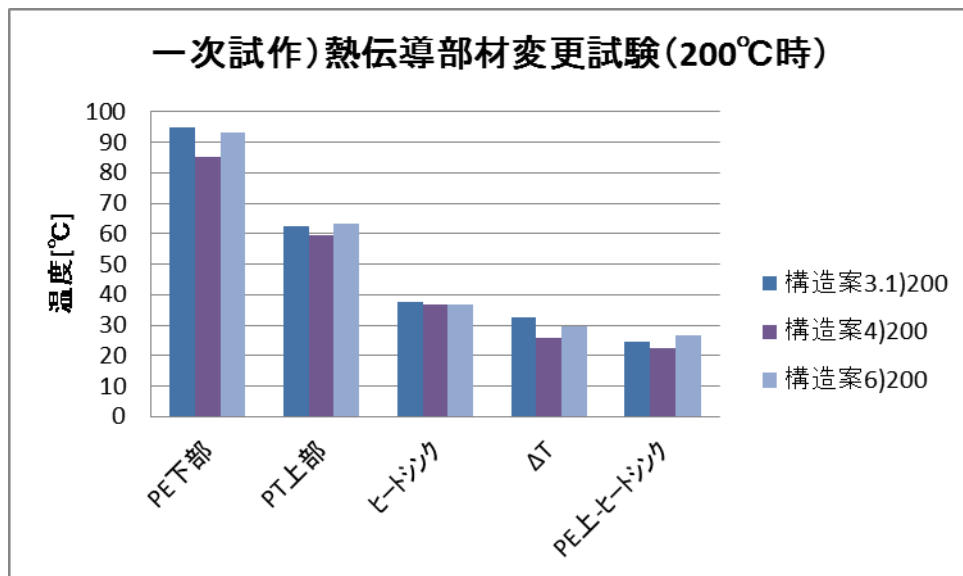


図 27-1 一次試作) 熱伝導部材評価試験 (200℃時)

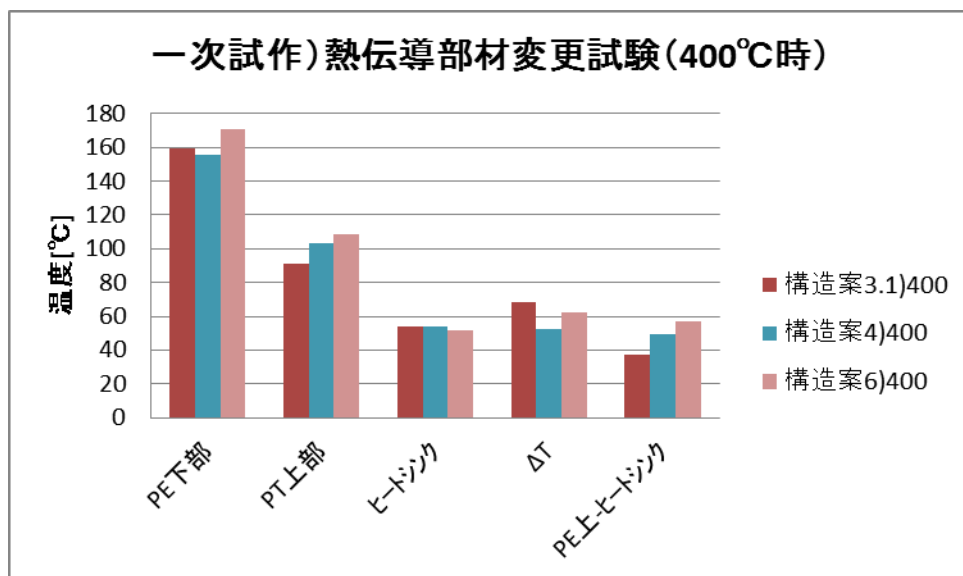


図 27-2 一次試作) 熱伝導部材評価試験 (400℃時)

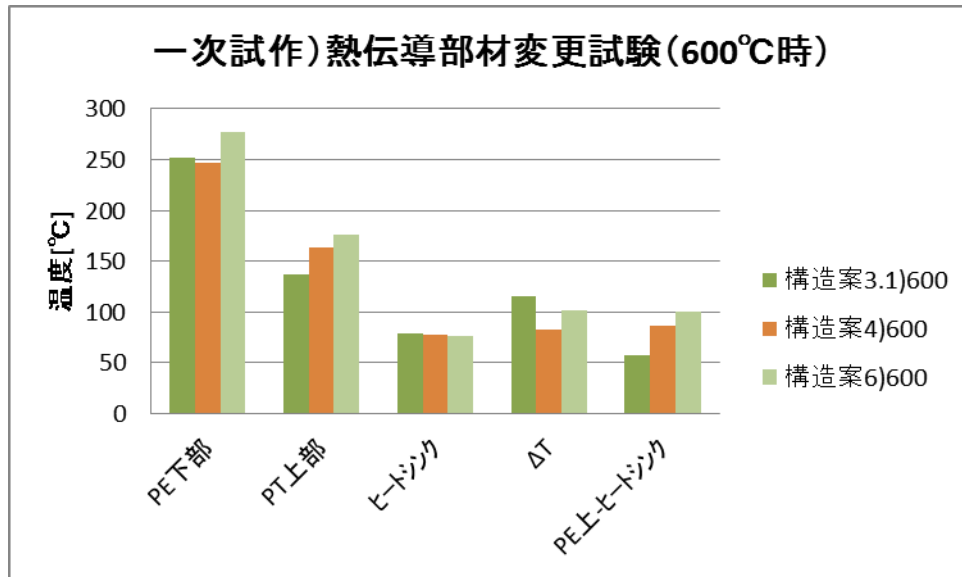


図 2 7 - 3 一次試作)熱伝導部材評価試験 (600°C時)

- 構造案 3.1 第一伝導部 (集熱部) : 銅、
第二伝導部 (放熱部) : 銅+ヒートパイプ+ヒートシンク
- 構造案 4 第一伝導部 (集熱部) : 銅/グラファイト焼結、
第二伝導部 (放熱部) : 銅+グラファイト+ヒートシンク
- 構造案 6 第一伝導部 (集熱部) : 銅、
第二伝導部 (放熱部) : 直付けグラファイト+ヒートシンク

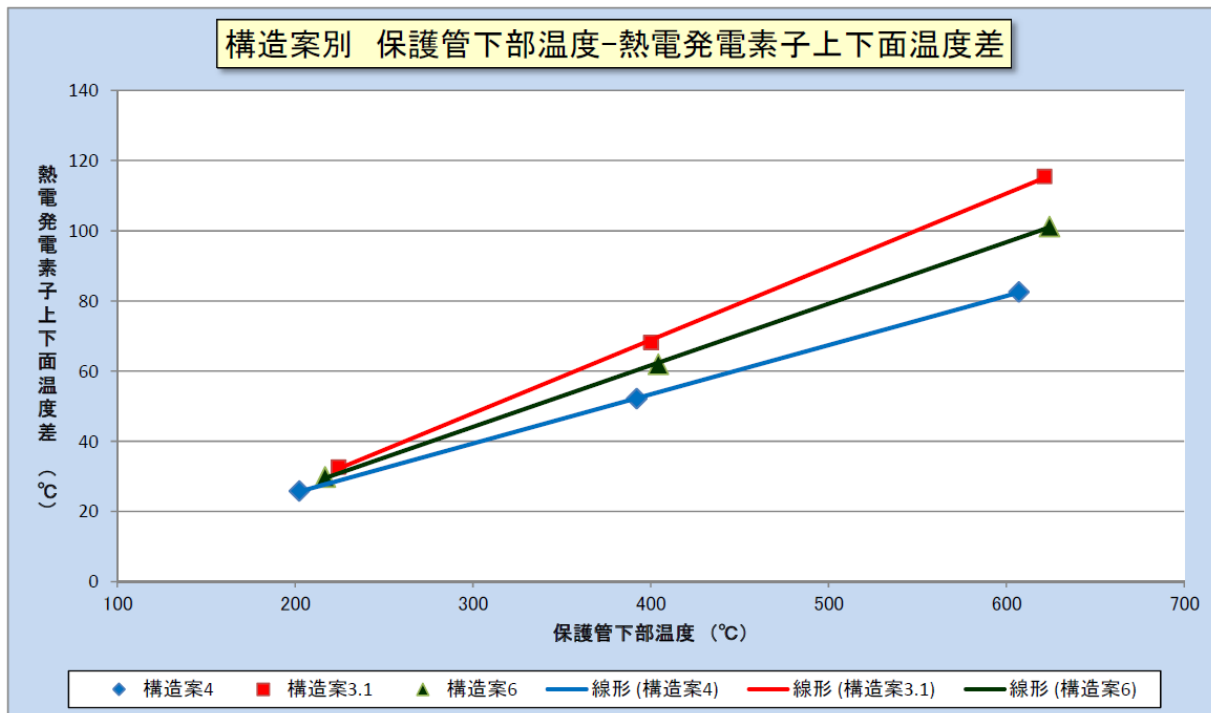


図 2 8 一次試作)熱伝導部材評価試験のグラフ
(構造案別：保護管下部－熱電温度素子上下面温度差)

計測を行った 3 種類のセンサの第一伝導部（集熱部）の構造は全て同である。素材は構造案 4 だけ、銅/グラファイト焼結材（熱伝導率 $\lambda = 630 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ）を使用しているが、他は一般的な銅（熱伝導率 $\lambda = 372 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ）である。

第一伝導部では受熱部から得た熱をなるべく潤沢に熱電素子の高温側に運びたいことから、より熱伝導率の高い銅/グラファイト材にて試験をしたが加熱温度が 200、400、600°C と全てに於いて計測箇所が銅材より低めの温度となる結果を得た。即ち、銅/グラファイト焼結材は銅を代替するほど熱を伝える能力がないということである。

これは銅/グラファイト焼結材には、熱の伝導方向に異方向性を持つ特徴があることが原因であると推測する。第一伝導部の熱伝導部材は、図 1 8 のようなつばが有る構造をしており、つばの部分で熱電発電素子と接合する構造となっている。この素材は長手方向（上下方向）には熱を良く伝えるが、つばの横方向（水平方向）への熱伝導性は悪い。しかし、銅は全方向に対して同じ伝導率である。この違いで熱伝導に大きな違いが生じたと考えられる。

熱電発電素子の下面温度を最大限に上昇させるために、第一伝導部に、さらに熱伝導率が高いヒートパイプの採用検討を行ったが、最終的には見送った。銅の部品でも 600°C の熱を集熱部に加えた時に熱電発電素子の高温側が 250°C 程度まで上昇してしまい、これ以上の温度を掛かけてしまうと熱電発電素子の配線接続部の高温半田が持たなくなることや、このような温度に耐える絶縁用の熱伝導率の高いフィルムや隙間を埋めるコンパウンド等が市場に存在しないため、設計が非常に困難になってしまうからである。従って 600°C 仕様のセンサの場合は、銅の伝熱部材を適用するのが最適であると判断した。

次に、熱電発電素子より上部、第二伝熱部の構造を検討した。まず、熱電発電素子上面（低温側）の温度を最大限に下げる場合には、熱電素子上面の熱を大量にヒートシンクに移送すればよい。熱電発電素子上面の温度は、600°C 加熱時の試験結果より、構造案 3.1（ヒートパイプ）で 136.7°C、構造案 4（銅/グラファイト焼結材）で 164.0°C 及び、構造案 6（直付けグラファイト）で 176.2°C となっており、ヒートパイプを使用した構造案 3.1 が最も優れていると判断できる。

結論として、図 2 8 のグラフ「構造案別：保護管下部－熱電温度素子上下面温度差」が示すように、構造案 3.1 の第一伝導部は銅、第二伝熱部はヒートパイプの組合せが最も良い結果を示し、二次試作ではこの組合せを基本として構造検討を進める事となった。

8. 熱電発電無線排気温度センサのシステム設計と無線技術開発

8.1 システム設計概要

熱電発電無線排気温度センサとしての基本的な発電性能向上のため、熱移送に注目した機構開発を一次試作では重点的に行ったが、それと並行してシステム開発として、温度測定や発電電力の蓄積を行う回路設計及び、無線プロトコル開発も行った。

繰り返しになるが、エネルギーハーベスティングでは、環境に存在するわずかなエネルギーをかき集めて有効活用する技術であることから色々と制約が多く、システム設計には通常と異なった設計上の配慮が必要となる。一般的な、外部からの電力供給を必要としない無線機器の殆どは電池を内蔵しており、その電池が消耗するまでは、ほぼ一定の電圧と電力が供給できるため、エネルギーハーベスティングと比べて開発上の負担は少ない。

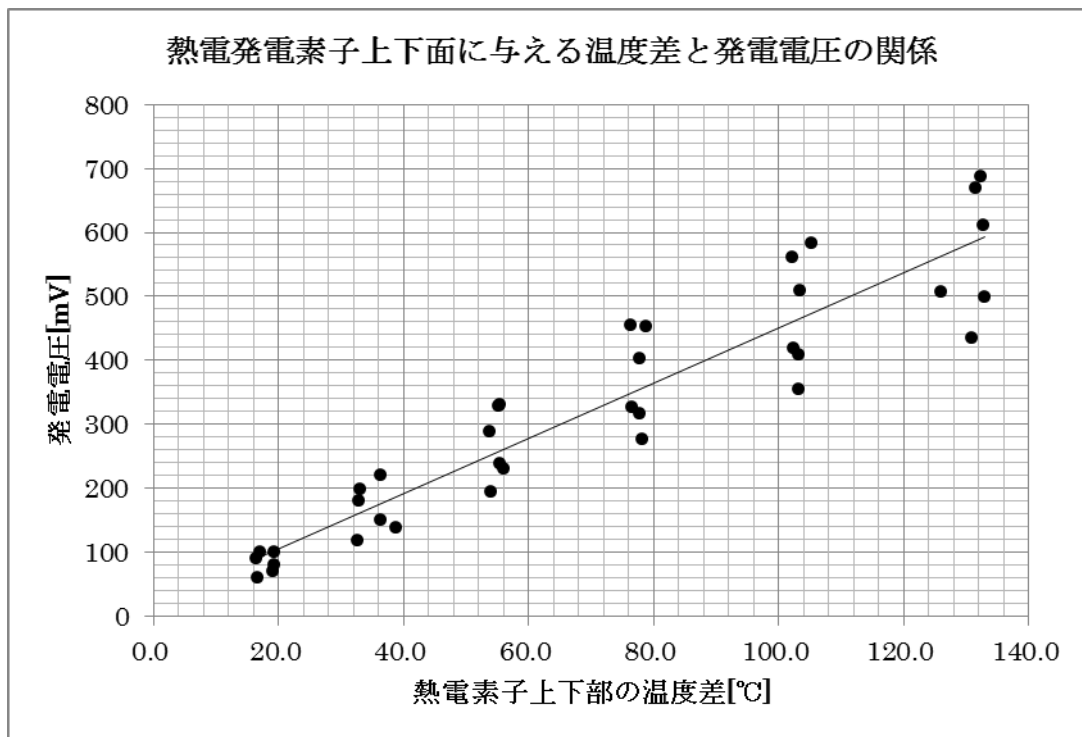


図 29 熱電発電素子上下面に与える温度差と発電電圧の関係

図 29 のグラフで示すように、熱電発電素子が発電するエネルギーは非常に小さいものである。それらを利用するためにはわずかな発電電力を効率よく昇圧し、コンデンサに貯める必要がある。そして、コンデンサに貯まった電力のみで、CPU を起動して、温度計測と A/D 変換を行い、続いて温度データを所定のプロトコルに従って無線送受信処理を行って、親機へ確実にデータ転送するという作業を行う必要がある。

それぞれの処理はそれぞれに電力を消費するが、電力的な余裕は殆どなく、コンデンサが供給する電力が CPU 駆動に少しでも足りなければ容赦なく CPU はシャットダウンし、処理が滞ってしまう。シャットダウンした CPU が問題なく再起動できる事も大事ではあるが、これらの処理が入ったとしても運用に問題が生じないようにシステム設計しないと最終的な商品にはならない。

この様な多くの制限が存在するため、製品として成り立たせるための難しさがあり、また、電池を持つ製品と競合する事などが、市場にエナジーハーベスティングを利用した商品が少ない理由ではないかと考える。

8.2 システム構成

8.2.1 基板搭載部について

今回製作した熱電発電温度センサでは、基板への熱の影響を少しでも避けるために、最上部に基板が入ったケースを設けて、ヒートシンクから若干離して設置している。

ディーゼル機関に搭載しての試験において、基板ケース下面に温度センサを貼り、最大負荷時のケース表面温度を計測したが、最大で 50°C まで上昇した。試験時は冬であり、夏など室温が高い場合やベンチレーションが良くない場合を想定するとこの温度はさらに上昇する事が考えられる。

基板温度の上昇で、微弱電流を扱う回路では電流リークが増え、電源効率の悪化も考えられる事から、基板のヒートシンク側は断熱を考慮した方が良い。



図 3 0 最上部にある基板収納ケース（直径 130mm×高さ 38mm）

※なお、試験時の写真には角形汎用ケースで試験している場合もある

8.2.2 回路構成

以下に、今回採用した回路構成のブロック図を示す。

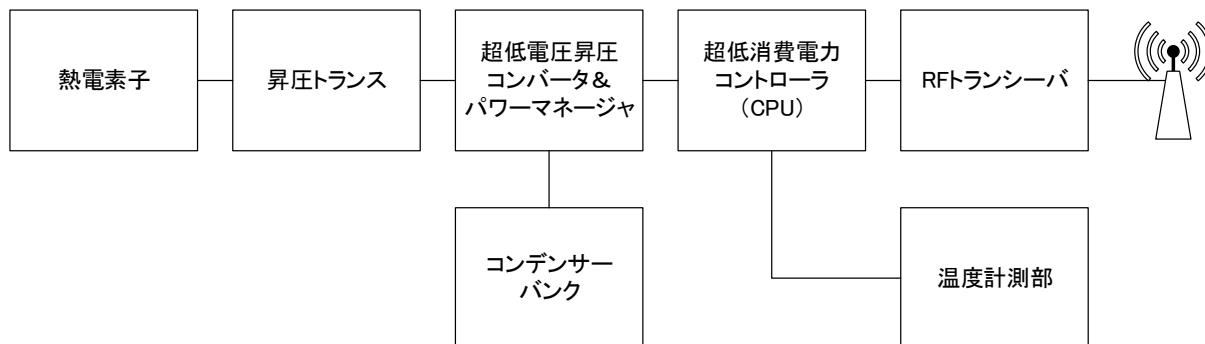


図 3 1 回路構成のブロック図

熱電発電を使った温度センサとして必要な機能は、まずはシステムの駆動電力を作り出す熱電発電素子からなる発電部である。熱電発電素子が発電した電力は、昇圧トランスと超低電圧昇圧コンバータ及びパワーマネージャによって、二次側の CPU や温度計測部、RF トランシーバ等の回路が動作するための電源を安定供給する。

また、熱電発電素子の発電量によって、コンデンサバンクに電力を貯めたり、放出したりといった電力マネジメントも行っている。以下に各ブロックの説明を記す。

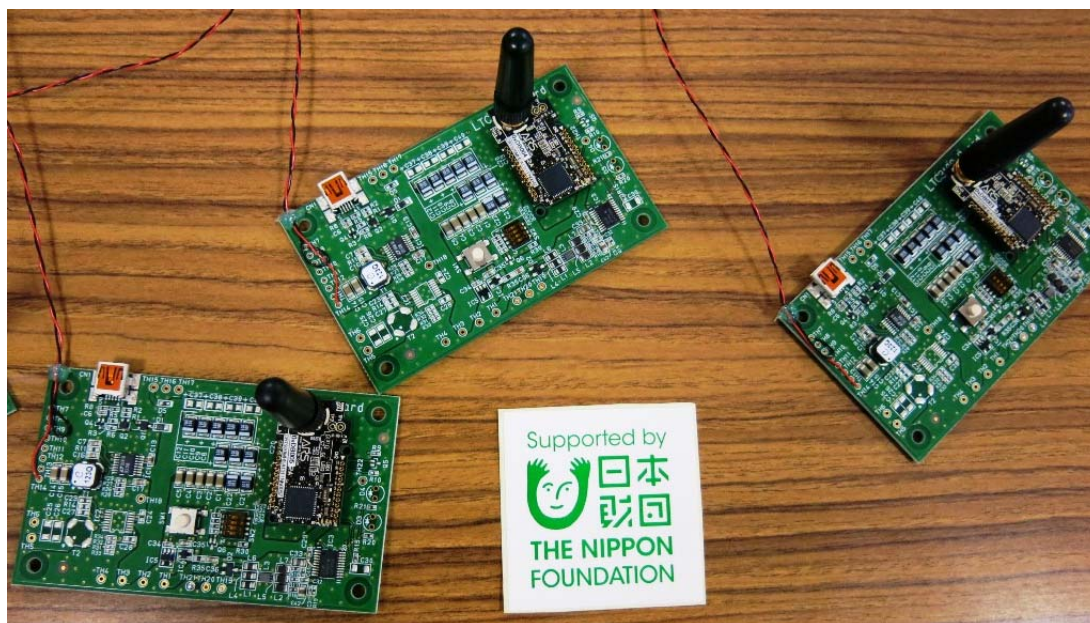


図 3 2 搭載される熱電発電温度センサのセンサ回路及び無線回路

- 熱電発電素子
耐熱性のあるテフロン系配線材を高温ハンダで接続し、その配線は回路基板に接続している。熱電発電素子を 2 個使う場合は直列に接続する。
- 昇圧トランス
熱電発電素子が発生するわずかな電圧を 1 : 100 や 1 : 50 等の巻線比で昇圧するためのトランスである。巻線比が小さい方が効率は良くなる。
- 超低電圧昇圧コンバータ及びパワーマネージャー
熱電発電素子から供給される電力を二次側の機器が安定駆動可能な一定電圧に昇圧して給電する高効率な DC/DC コンバータであり、かつ外部コンデンサバンクの充放電を電力状況に合わせて制御する高機能な電源コントローラである。
- 超低消費電力コントローラ
低電圧 (1.8V~3.6V) で駆動し、駆動時消費電力 $290 \mu\text{A}/\text{MHz}$ at 8MHz, 3V、スタンバイ時消費電力 $2.2 \mu\text{A}$ at 3V、起動時間が $3.5 \mu\text{Sec}$ の超低消費電力というエネルギーハーベスティングに適した CPU を採用している。
- RF トランシーバ
920MHz 帯をサポートする超低電力消費の無線通信用トランシーバである。パワーダウン時には、わずか $0.12 \mu\text{A}$ しか消費しない。
- コンデンサバンク
電力の貯蔵用として $100 \mu\text{F}$ のコンデンサを 5 個並列に並べ、複数の組合せ試験が出来るよう 4 バンク用意している。
- 温度計測部
測温抵抗体素子 (PT100) は白金の抵抗値が温度で比例的に変化することを利用した温度検出用素子であり、保護管内部の最下部に設置される。測温抵抗体素子から配線が引き出されており、24bitAD コンバータに接続されている。CPU から計測指示が出たタイミングで、測温抵抗体に一定電流を流して電圧を計測し、値をデジタル変換した後、シリアル通信で CPU に温度データ転送を行う。
- 基板
基板は $89 \times 54\text{mm}$ の片面実装基板とすることで、基盤裏面のハンダ側にはヒートシンクやディーゼル機関本体からの輻射熱の伝導を防ぐための断熱材を入れるように配慮している。

8.3 無線技術開発

8.3.1 無線システム概要

熱電発電無線排気温度センサ（ここでは、子機と呼ぶ）は、それぞれが同じ機能を持つ独立した装置であるが、一つの送受信装置（ここでは、親機と呼ぶ）が、それぞれの子機をコントロールして協調動作を行う司令塔になる。

つまり、親機は決められた通信プロトコルに基づいて、それぞれの子機からの定期的なデータ転送の指示を行うだけでなく、システム運用に付随する各種設定、異常状態の伝送等の様々な処理を行っている。

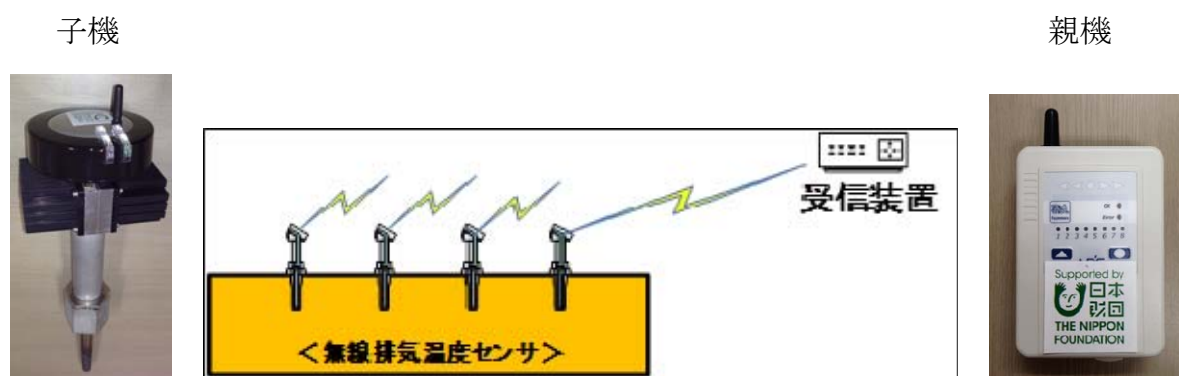


図 3 3 子機（熱電発電無線排気温度センサ）と親機（受信装置）の関係

船舶用の発電用機関として、8cyl のディーゼル機関が 4 台搭載される場合を想定し、ディーゼル機関 1 台に排気温度センサ 8 台あるとし、合計 32 台を一つのシステムで運用できるようにし、かつ 1 秒ごとにデータ計測出来ることを目標として熱電発電無線排気温度センサシステム用の通信プロトコル仕様を新しく開発した。

当仕様では 1 システムで子機（熱電発電無線排気温度センサ）を 32 台接続出来るが、さらに監視対象を増やしたい場合は、使用する周波数帯域が重ならないよう設定することで、それぞれが干渉なく独立して動作するため、64 台やそれ以上の運用も可能である。

親機は出力に RS485 シリアル通信出力を持ち、子機から送られてくる温度データを、RS485 シリアル通信を通じて PC ヘデータを転送が可能である。今回、PC には、試験用に作成したアプリケーションを搭載し、通信状態やデータのモニタリングを行いながら各種試験を実施した。

8.3.2 無線モジュールの仕様

無線モジュールは、“技適”（電波法令で定めている技術基準に適合している無線機であること）を取得していなければ、電波を発信する事は出来ない。即ち、技適を取得していない無線機を使用した場合は電波法違反になる場合がある。

従って、今回は無線モジュールの一からの開発までは含まず、技適取得済のモジュールを採用している。無線モジュールは様々な無線帯域に適合したものが既に市場には存在しており、920MHz 帯、2.4GHz 帯の双方を検討した。2.4GHz 帯はモジュールサイズが大きくなり、かつ出力が小さい為、今回は 920MHz 帯のモジュールを採用した。

なお、平成 24 年度 FS 事業「無線技術や環境発電技術を応用した船舶機関用センサについての調査研究」を行った際には、315MHz 帯の特定省電力無線を利用し、プロトコルは EnOcean を採用していた。しかし、315MHz 帯は日本の電波法の規定により、今回目標とした 1 秒に一回といった頻度の送受信を行う事は認められていないことから、当方が考えるセンサネットワークには適していないと判断し、日本で普及が始まり、省電力と電波の到達距離と回り込みのバランスが良いとされる 920MHz 帯を新しく採用する事になった。

通信プロトコルは前回の EnOcean のような標準化されたものだと、通信手順の改良が出来ないため、今回はオリジナルの通信プロトコルを採用している。

今回使用した無線モジュールに関する仕様一覧を示す。

表 3 使用する無線モジュールの仕様一覧

Property	Details
周波数帯	920MHz
チャンネル数	35 x 200kHz チャンネル
適用電波法	TELEC (ARIB STD-T108 互換性)
通信シークス 1cycle 最大通信時間	1sec
MCU	MSP430 5 シリーズ
無線チップ	CC1120
内部容量	10kb RAM, 128kb FLASH
外付けストレージ	256kb FRAM (Non-volatile)

8.3.3 通信プロトコル

今回、子機 32 台を協調制御し、温度データを確実に取得できるよう以下の様なプロトコルを作成した。

特に、各センサの無線が輻輳しないように、タイムスロットを設けた通信手法の導入やノイズ耐性の強化のために送受信に使用する周波数帯を変更する周波数ホッピング機能を採用した。さらに、それでもノイズの影響等で受けられなかった場合の為に、センサ自体に過去 10 件 (10 秒間) のデータを蓄積しておき、通信した際に貯めたデータを送信してデータ欠落を補完する仕組みを設けている。

次に今回採用した具体的な通信プロトコルの詳細について解説する。

8.3.4 子機の送信時間の制御

本システムは子機 (熱電発電無線排気温度センサ) を 32 台まで同時に利用出来る。電波送信がお互いに混信しないように通信するタイミングを分けて、各子機が送信する時間を厳しく制御している。親機 (受信機) は 200ms の通信ウィンドウ (自分が発信しても良い持ち時間) を持ち、各子機は 25ms の通信ウィンドウを持つ。
(合計で $200\text{ms} + 32 \times 25\text{ms} = 1000\text{ms} = 1 \text{ 秒}$)

親機、子機共に自分が許可された通信ウィンドウ以外では送信は行わないが、受信のタイミングに関しての制限はない。

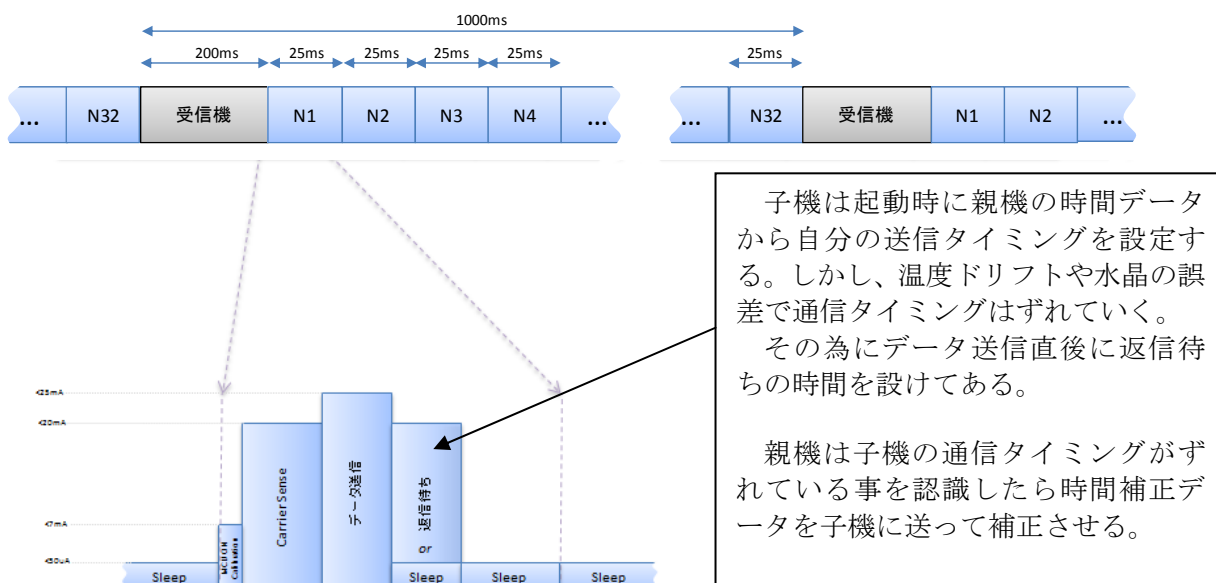


図 3 4 通信プロトコル概要

それぞれの通信ウィンドウはタイムスロットと呼んでおり、親機にて設定する。

親機に接続している PC アプリケーションにて、子機が利用するタイムスロットを登録出来るようになっている。

なお、全ての子機（熱電発電無線排気温度センサ）本体に、個別に識別できる ID を設定する必要はなく、子機が一意に付けているコードを親機に登録すれば、自動的にタイムスロットを割り振るため、故障時には子機を交換して、子機のコードを親機に登録してしばらく待てば動作を始める。このように、設定作業も非常に簡単である。

8.3.5 子機の起動

親機は、登録されている子機あてに、1秒に1回のビーコンを発信する。

それぞれの子機は起動する際に自分が発信を許可されている、登録されているタイムスロットを検出する必要があるため、まず自動的に親機のビーコンを探し始める。

親機のビーコンを見つけた場合は、自分の通信可能なタイムスロットを把握できるので、そのタイミングで計測したデータを親機へ送信をおこなう。

他の子機用のビーコンを受信した際には、親機のビーコンが次にくるタイミングを計算できるので、次の自分宛の親機のビーコンを待つ。親機のビーコンを受信するまでは、自分のタイムスロットが分からない状態が続くので、暫く受信状態で次のビーコンの受信を待つことになる。この時、子機は自身の電力制限内で親機との同期を取らなければならない為、タイムスロットを確認するのに最大32秒かかる場合がある。

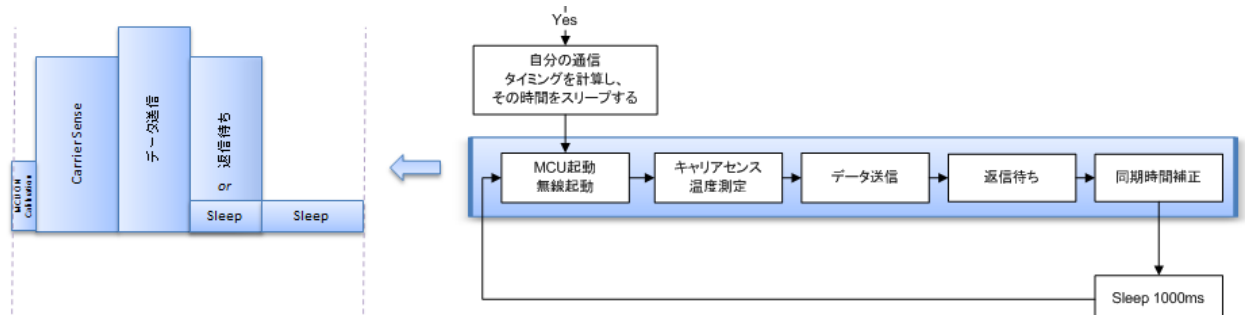


図 3 5 子機の通信内容

子機は自分が通信出来るタイムスロットの時間が来ると自動的に MCU (CPU) と無線機能をスリープ状態から起動し、通信のキャリアセンスと温度測定を行う。キャリアセンスとは使用できるチャンネルの周波数を走査し、他の通信に使われていないか確認してから送信する通信の衝突回避手段である。子機はキャリアセンスが済み、通信可能となれば得られた温度データを親機に発信して、時間補正を行い、次の1秒後まで機能をスリープさせて無駄な電源消費をしないようにしている。

8.3.6 周波数ホッピング

本システムでは周波数ホッピングの考え方を使い、4チャンネルの異なる周波数を利用してデータ伝送を行う。親機のビーコンは別の固定の周波数で必ず送信される

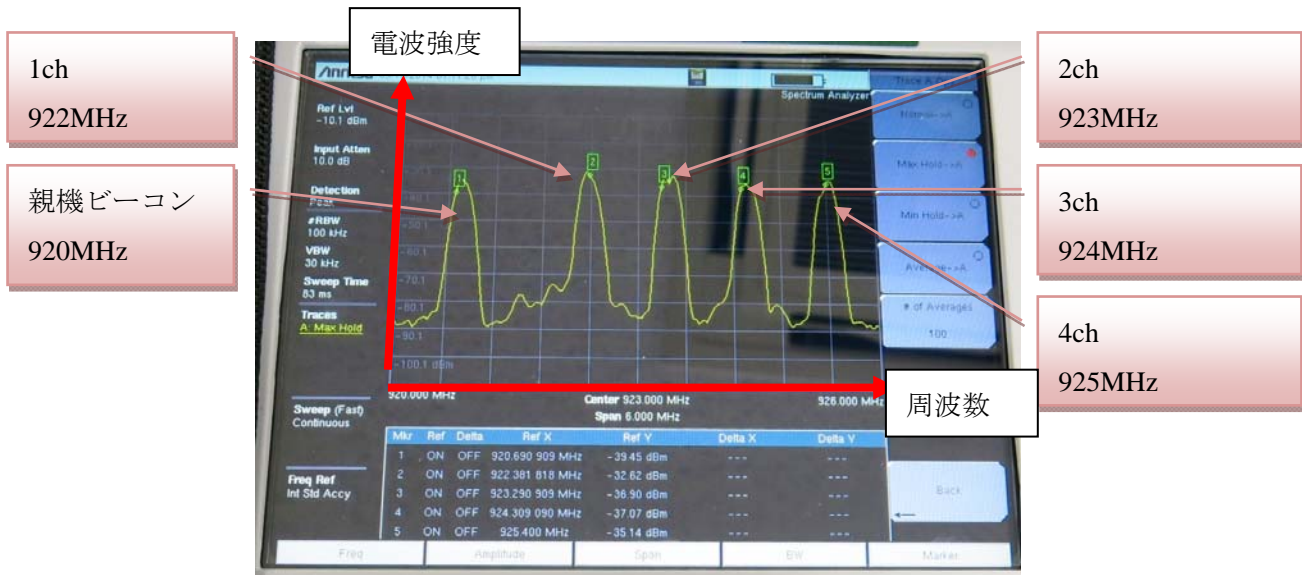


図 3 6 スペクトラムアナライザで見た送受信周波数の状態 (Max Hold 設定)

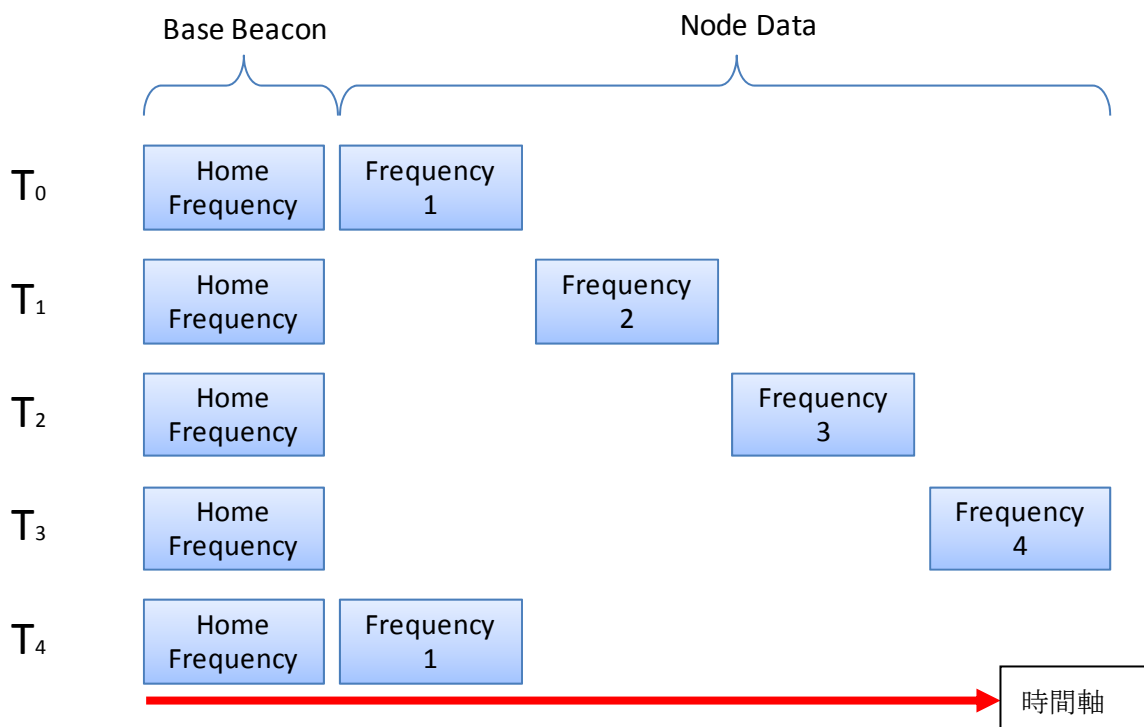


図 3 7 周波数ホッピングの概要

例えば、あるチャンネルが使用する周波数がノイズで占拠された場合、そのチャンネルは全く通信出来なくなるが、別のチャンネルは周波数が異なるので、ノイズの影響がない可能性が高い。

つまり、子機の送信周波数のチャンネルを毎回切替えて通信する「周波数ホッピング」を行えば、データ送信の冗長化を図る事が可能である。

図38は、スペクトラムアナライザ（スペクトログラム表示）で計測した、周波数ホッピングを行っている様子である。子機の通信が、周波数を切替えながら繰り返し行われていることがよくわかる。

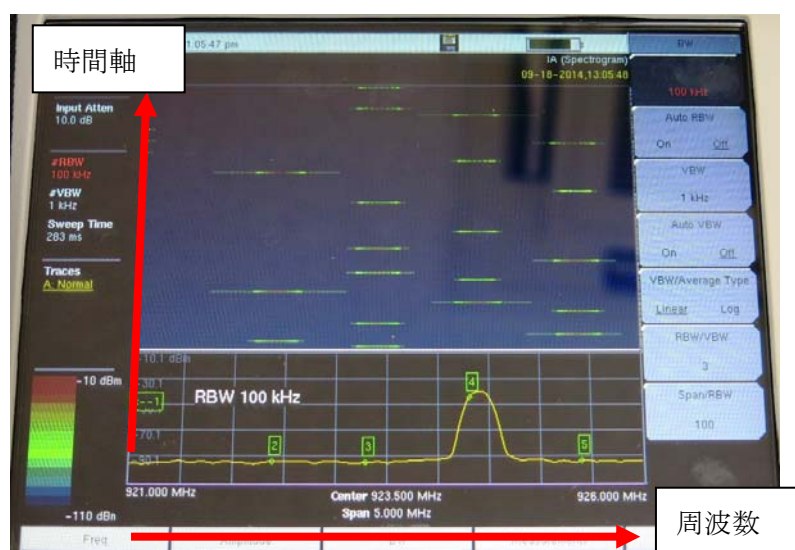


図38 スペクトラムアナライザで計測した周波数ホッピングの様子
(参考：スペアナの処理速度が十分でなく、欠落有り)

8.3.7 データ補完機能

周波数ホッピング等の冗長化策を利用しても、通信品質が特に悪い場合など、パケットが欠落する場合がある。そのような場合に備えて、親機にデータが到達しなかった場合にも、子機自体は計測できる状況であれば毎秒温度を計測し、過去10点分（10秒分）を内部に蓄積するようにしている。そして、次に親機に転送できた時に、過去の10点も一緒に送信し、データに付属するタイムスタンプを元に親機側でデータの抜けを補完し、補助的にデータ抜けをなくす機能を持つ。

この機能の実装により、親機側でリアルタイムに温度表示を見る場合は、通信不可の際には表示が欠落するが、データ蓄積の場合は10秒間の範囲の無線通信不良であればデータの欠落が補完され、通信不良の計測への影響を少なくする事が可能である。

8.3.8 無線モジュールの実力調査

今回使用する 920MHz 帯の無線通信の実力を見るために、実際に野外（横浜、みなとみらい線新高島北とちのき通り）の直線ルートを利用し、無線通信距離とパケットエラー率（%）、電波強度（RSSI）の確認試験を行った。



図 3 9 送信側、受信側の試験装置と試験風景

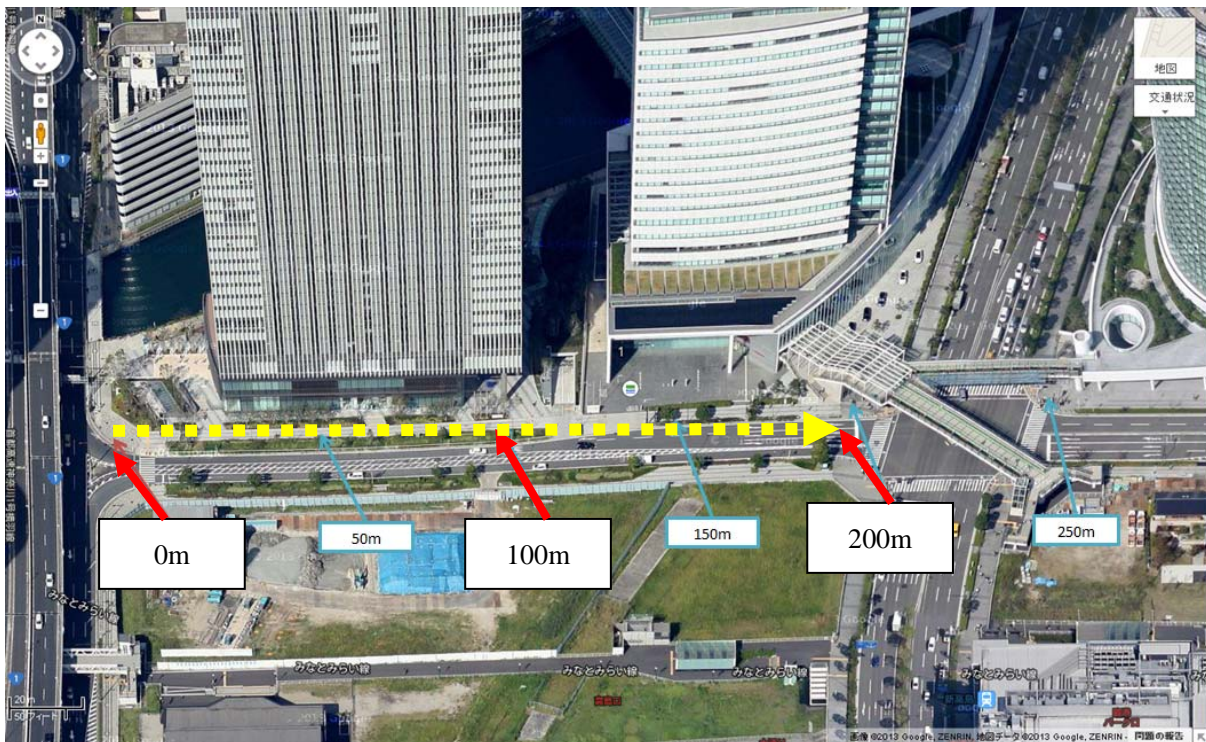


図 4 0 試験場所（横浜みなとみらい線新高島北とちのき通り）の直線ルート

今回の通信プロトコル仕様では、10回分のデータをセンサ側で保持し、送信不能時のデータを補完する仕様を盛り込んでおり、最悪で10%の packets エラーを許容する。マージンを入れて、2%以下の packets エラー率は許容すると仮定すれば、表4「距離と packets エラー率及び電界強度の関係」より、見通し200m程度の通信能力が有ることが判る。また、安定した通信環境を維持するためには、電波強度(RSSI)は、-70dBm以上とする必要があることが判明した。

表4 距離と packets エラー率及び電波強度の関係

距離(m)	PER(%)	RSSI(dBm)
50	0	-56.4
100	0	-62.3
150	0.391	-72.9
200	1.172	-73.8
250	80.469	-80.3

8.3.9 船内を想定した電波強度(RSSI)の検証

次に、当社のディーゼル機関運転定盤の建屋にて、電波強度(RSSI)の確認を行った。ディーゼル機関定盤には、様々な大きさのディーゼル機関が複数台並び、関連する補機類も多く存在するため、本船の機関室と同様の環境と仮定して検証した。

無線通信試験の結果は、様々な機器や遮蔽物が混在する中でも $RSSI \geq -70dBm$ を確保しており、 packets エラー率は0%である。図36の①~⑦の全ての場所は安定した通信ができる事が確認できた。

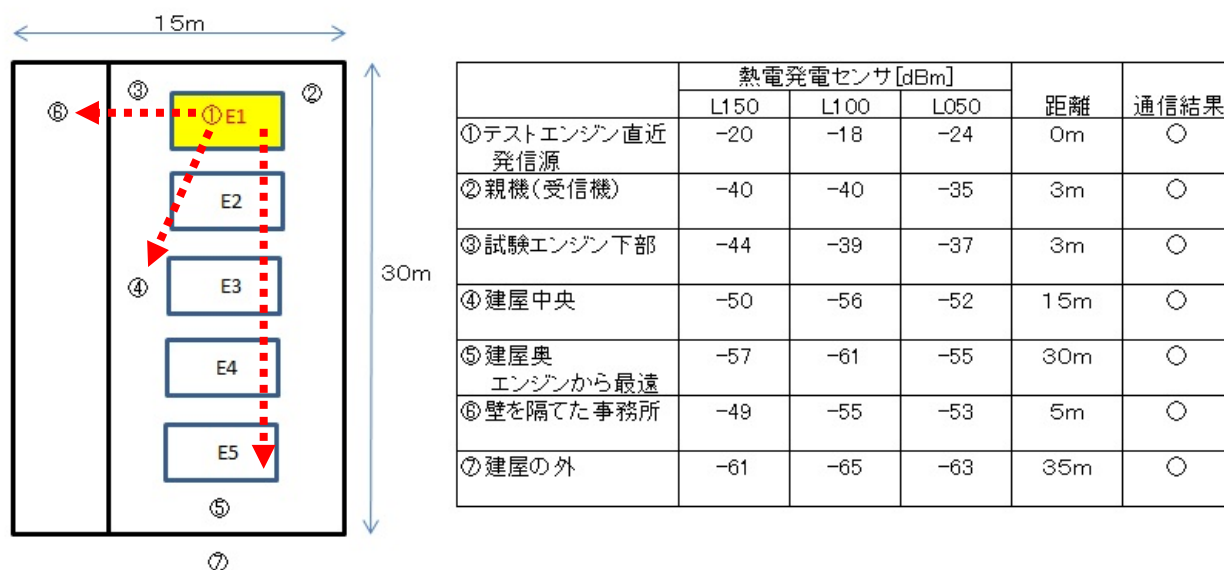


図4.1 建屋の平面図、及び電波強度と通信結果の表

8.4 熱電発電無線排気温度センサの電力消費

熱電発電無線排気温度センサは、熱電発電素子で発電した電力をコンデンサに蓄積し、その電力のみを使って動作を行う。以下に、各処理時の消費電流を示す。

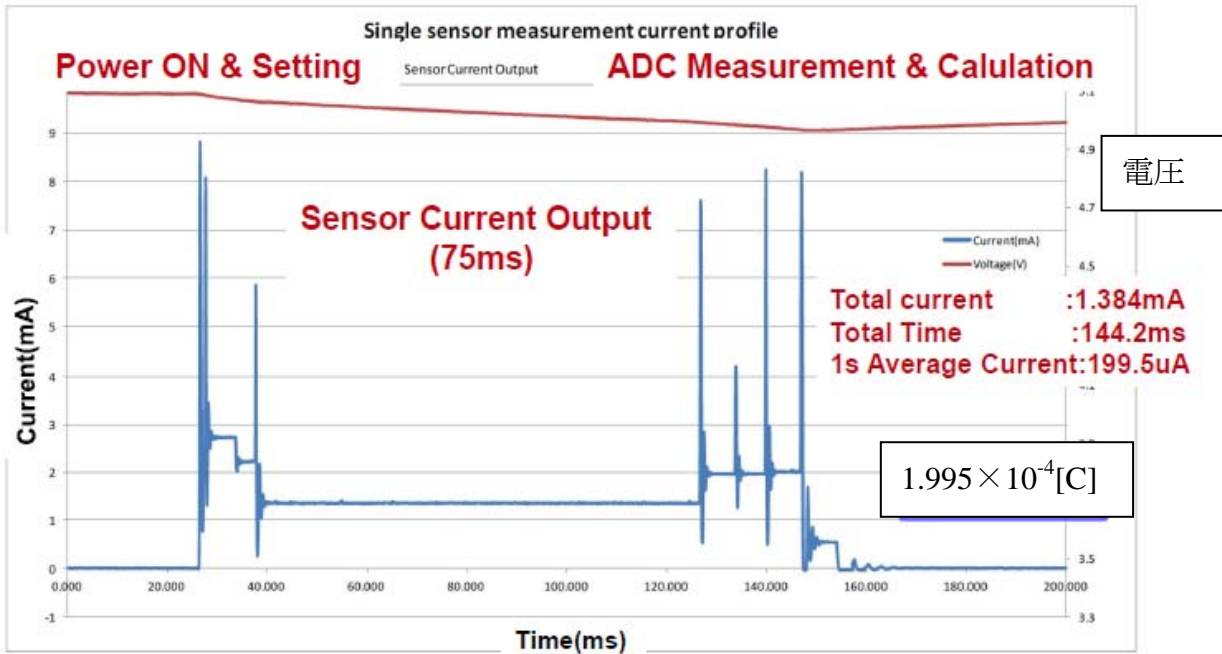


図 4 2 温度計測時の電流計測プロフィール

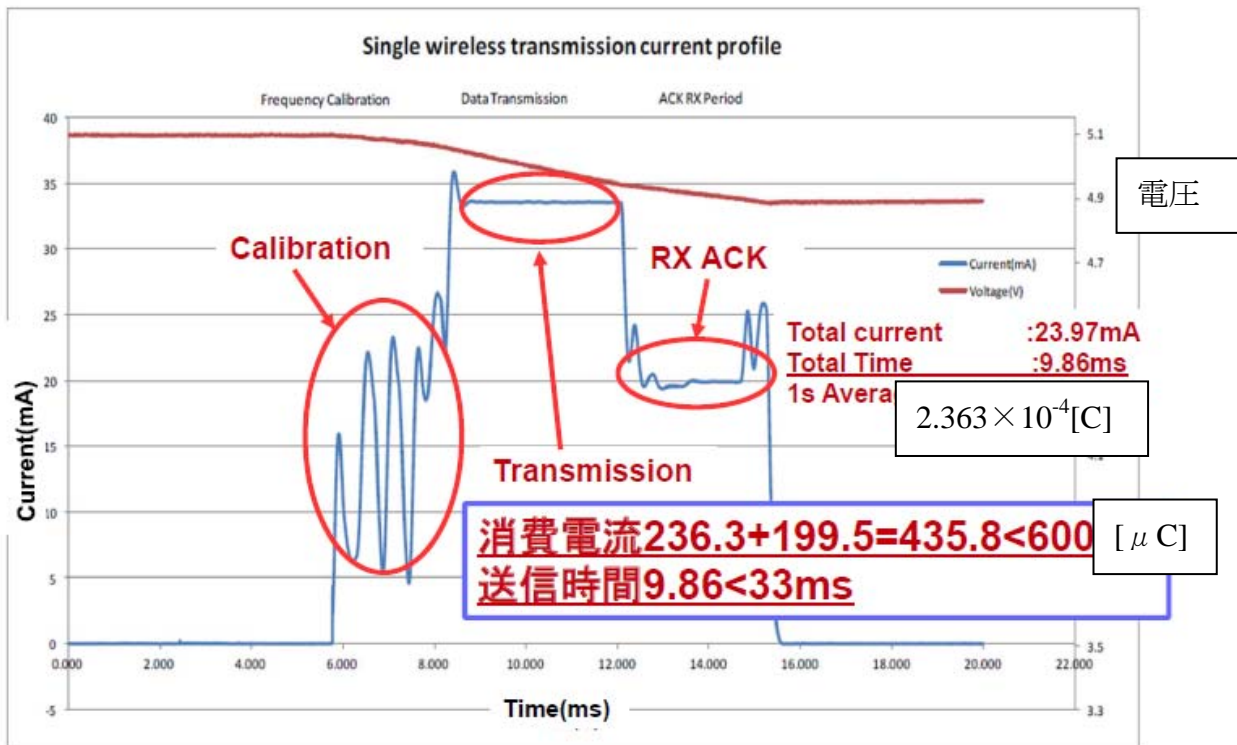


図 4 3 無線通信時の電流プロフィール

熱電発電無線排気温度センサが温度計測する際には、消費電力がほぼ0のスリープ状態から CPU を立ちあげ、計測部のセッティングが済んだ後、測温抵抗体の抵抗を計測するための一定電流を短い時間流し、電圧を計測し、その値を A/D 変換して CPU へシリアル電送し、メモリに書き込んで再度スリープする。

温度計測時の消費電流のピークは 9mA であり、平均では 1.384mA である。

処理時間は 144.2mSec であるので、

電力量は、 $W=P \cdot t=1.384\text{mA} \times 5\text{V} \times 144.2\text{msec}=9.9786 \times 10^{-4}[\text{W} \cdot \text{s}=\text{J}]$

電荷は $C=A \times s=1.384\text{mA} \times 144.2\text{msec}=1.9957 \times 10^{-4}[\text{C}]$

同様に、無線送信時はスリープ状態から立ち上がり、キャリアセンス等のキャリブレーションを行って送信可能かどうかを判断した後にデータ送信し、親機からの受信を待った後、再度スリープする。

通信時の消費電流ピークは 35mA であり、平均では 23.97mA である。

通信に関する処理時間は 9.86msec であるので、

電力量は、 $W=P \cdot t=23.97\text{mA} \times 5\text{V} \times 9.86\text{msec}=1.1817 \times 10^{-3}[\text{W} \cdot \text{s}=\text{J}]$

電荷は、 $C=A \times s=23.97\text{mA} \times 9.86\text{msec}=2.3634 \times 10^{-4}[\text{C}]$

この両方を足して、毎秒の電力消費は

消費電力量は $9.9786 \times 10^{-4}[\text{J}] + 1.1817 \times 10^{-3}[\text{J}] = 2.1795 \times 10^{-3}[\text{J}]$

電荷でみると $1.9957 \times 10^{-4}[\text{C}] + 2.3634 \times 10^{-4}[\text{C}] = 4.3591 \times 10^{-4}[\text{C}]$

これらの処理は、1 秒ごとに 1 サイクル行われるので、

1 秒間に必要な電力は、 $2.1795 \times 10^{-3}[\text{W}]$ (5V 時)

1 秒間に必要な電荷は、 $4.3591 \times 10^{-4}[\text{C}]$

なお、無線送受信時に実測値では 1.6mW あれば、1 秒毎に無線を発信できている。

温度計測や電波の送受信等の処理を行わないときは、システムはスリープし、殆ど電力を使用しない状態になる。その間に熱電発電素子が発電した電力はコンデンサバンクに貯められ、次の起動に備える。

ただし、温度が低過ぎる場合など発電電力が少なく、かつコンデンサバンクにも電力が貯まっていない場合には、システムが起動しようとしても電力が足りずに起動できないため、温度計測や親機への送信ができずに、再度すぐにスリープしてしまう。

即ち、電力が貯まって起動できるまで待つ事になる。

9. 二次試作と評価

9.1 設計思想と構造詳細

二次試作では、特に発電電力量の向上を図るため、熱電発電素子の高温側をより高温に、低温側をより冷やすことができる構造を、一次試作にて試行錯誤して選定した素材や構造を盛り込んで決定した。以下に、特徴的な部分について説明する。

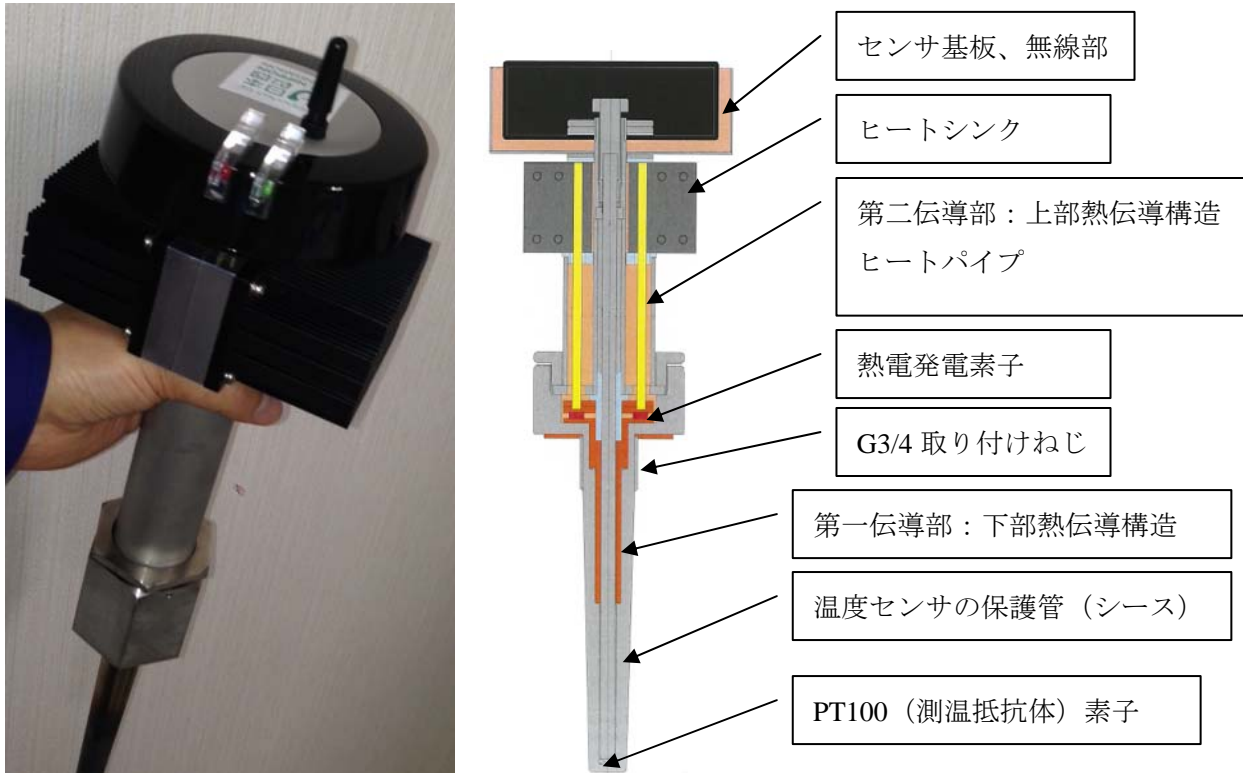


図 4 4 熱電発電無線排気温度センサの外観と内部構造

・センサ測温部

ディーゼル機関内部の排気管に入る保護管（シース）の一番奥の壁面に接する形で白金測温抵抗体（PT100）が設置されている。測温抵抗体とは、温度変化に対し一定の割合で抵抗値が変化する感熱素子であり、一定電流を流して電圧を計測することで温度に換算できる。PT100は0℃の時に100Ωを示し、温度上昇と共に抵抗値が上がる特性を持つ。測温抵抗体には3本の配線があり、配線抵抗がキャンセルできる。これらについては、通常の排気温度センサと同等である。

・第一伝導部）下部熱伝導構造

熱電発電素子の高温側に熱を潤沢に供給するための熱伝導構造である。

保護管（シース）のステンレス材は熱伝導率が $\lambda = 16.7$ と銅の $\lambda = 372$ に比べて桁違いに小さいため、熱伝導能力は低い。実際、保護管（シース）先端部分を加熱しても保護管（シース）上部の温度はあまり上昇しない。その対策として保護管内部に銅の

伝熱構造を設けた。熱伝導部の下面は保護管（シース）中央部に設け、熱電素子の高温側まで熱を伝熱する計画である。熱伝導構造の下面はなるべく先端部に近づける方がよいが、近づけすぎると計測温度に影響が出たため、保護管（シース）中間までとしている。この熱伝導構造の部材は、さらに熱伝導率の高い銅－グラファイト材やヒートパイプなどの適用も検討したが、性能に大きな差が生じなかった事と部材コストが高いことから採用を見送った。また、保護管（シース）先端部に 600°C の温度を掛けたとき、熱電発電素子の高温側が 250°C を超えると配線接続の高温半田の融点を超え、破損してしまう恐れがある。一次試作で得られた知見で銅材を使用することでちょうどその温度に到達しないことから、二次試作では銅材を採用している。

- ・熱電発電素子

今回使用する熱電発電素子は絶縁が必要である。市販の絶縁シート等には 250°C を超える耐熱性能をもつものではなく、熱伝導率が低いものが多い。今回は絶縁と高熱伝導を図るため、銅の熱伝導部材と熱電発電素子が接する部分に、高耐熱の絶縁材料で比較的高熱伝導率（ $\lambda = 27$ ）窒化珪素の薄板を溶着し、直接熱電発電素子に当てている。

これは部品の接合部をなるべく少なくするための工夫である。

- ・第二伝導部）上部熱伝導構造

下部熱伝導構造と同様の構造をもつ銅板で熱電発電素子を挟んでおり、熱電発電素子の低温側の熱を銅板に拡散するようにしている。この銅板は厚みを持たせており、ヒートパイプの受けとして、なるべく長い距離でヒートパイプと接続するようにしている。ヒートパイプと銅熱伝導部材の境界でも熱伝導の境界があるため、高熱伝導グリスとハンダによる接合を比較し、より性能の良かったハンダによる接合を行っている。使用するヒートパイプは太い方が熱伝導率は高いため、一次試作時より太いものを選定し、数も 2 本から 4 本に倍増させている。このように、熱電発電素子の低温側の熱をヒートシンクへ排出するために最大限に配慮している。

- ・ヒートシンク

ヒートシンクは一般的なアルミ材（熱伝導率 $\lambda = 203$ ）である。熱電発電素子の低温側の冷却側能力を少しでも大きくするため、一次試作品より一回り大きく放熱性能が高いヒートシンクを採用した。ヒートシンクには直接ヒートパイプ 4 本を挟みこみ、高熱伝導性のグリスを隙間に挟んで熱伝導上の障害を減らす配慮をしている。

- ・センサ基板、無線部

センサ基板や無線が入る部分は、ヒートシンクからの輻射熱、及び機本体からの輻射熱の影響を減らしたいため、熱電発電温度センサの最上部とし、かつヒートシンクから少し離して設置する。基板が入るケースと基板下面との間には、ヒートシンクからの輻射熱の影響を断熱するための断熱材を入れられるように隙間を設けてある。

9.2 シミュレーションモデル作成との比較

設計を行う上で、コンピュータシミュレーションは重要である。シミュレーションがなければ、数多くの試行錯誤を繰り返し、試験して結果を一つ一つ比較検証する必要がある。その過程は試験の準備から実施、検討までと多くの時間を費やす事になる。

今回は初めての試作品であるので、一次試作から多くの試行錯誤を繰り返して機構を決定してきたが、得られたデータをシミュレーションモデルに反映することでモデル精度が上がり、シミュレーションだけである程度の評価ができるようになることを期待してシミュレーションモデルの作成を行った。

以下に、二次試作品の熱伝導に関するシミュレーションモデルを作成し、解析した結果と実試験で得られたデータとの比較を行った

なお、今回の熱伝導シミュレーションのモデリング及び伝熱解析はムラタソフトウェア株式会社の FEMTET を使用している。

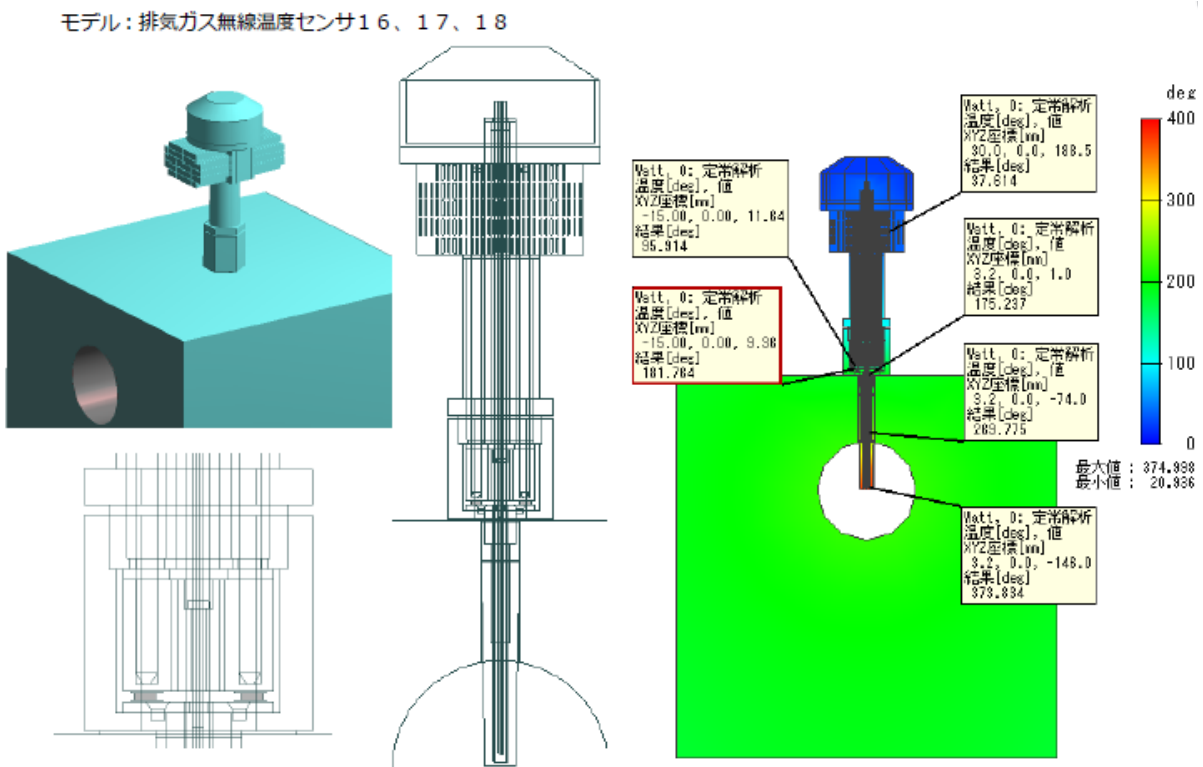


図45 二次試作のシミュレーションモデルと解析結果

表5 シミュレーションモデルの解析結果

モデル：排気ガス無線温度センサ16、17、18
 ヒートパイプの熱伝導率を1000→3000に変更

50mmタイプ (集熱部：銅，放熱部：銅+ヒートパイプ+ヒートシンク，接続部：[熱伝導率10W/mK])

単位：℃

温度	保護管			熱電発電素子			放熱フィン部
	下部	中部	上部	下面	上面	温度差	
200℃	188.0	139.6	93.9	98.5	42.3	56.2	32.8
400℃	373.1	265.0	166.3	174.2	61.4	112.7	42.4
600℃	557.6	387.5	235.3	245.5	78.8	166.7	50.6

100mmタイプ (集熱部：銅，放熱部：銅+ヒートパイプ+ヒートシンク，接続部：[熱伝導率10W/mK])

単位：℃

温度	保護管			熱電発電素子			放熱フィン部
	下部	中部	上部	下面	上面	温度差	
200℃	188.1	140.6	95.7	99.2	45.9	53.3	32.2
400℃	373.4	267.2	169.8	175.5	68.7	106.8	41.4
600℃	558.0	390.9	240.2	247.5	89.4	158.0	49.3

150mmタイプ (集熱部：銅，放熱部：銅+ヒートパイプ+ヒートシンク，接続部：[熱伝導率10W/mK])

単位：℃

温度	保護管			熱電発電素子			放熱フィン部
	下部	中部	上部	下面	上面	温度差	
200℃	188.4	141.0	96.5	100.3	48.5	51.9	31.5
400℃	373.9	268.1	171.3	177.8	73.8	104.0	40.0
600℃	558.8	392.4	242.4	250.9	97.0	153.9	47.4

表6 二次試作品 ディーゼル機関設置 運転時の各部温度計測データ

単位：℃

50mmタイプ 温度	保護管			熱電発電素子			放熱フィン ヒートシンク
	TC下部	TC中部	TC上部	PE下面	PT上面	温度差	
200℃	195.4	69.7	53.6	58.0	42.4	15.7	39.3
400℃	381.1	144.3	99.9	103.0	71.5	31.6	64.7

100mmタイプ 温度	保護管			熱電発電素子			放熱フィン ヒートシンク
	TC下部	TC中部	TC上部	PE下面	PT上面	温度差	
200℃	213.3	74.4	52.6	59.6	37.4	22.2	44.0
400℃	401.5	159.2	91.7	113.8	59.1	54.7	71.4

150mmタイプ 温度	保護管			熱電発電素子			放熱フィン ヒートシンク
	TC下部	TC中部	TC上部	PE下面	PT上面	温度差	
200℃	186.7	69.2	52.5	55.3	35.7	19.6	39.7
400℃	398.3	163.8	94.5	98.4	51.8	46.6	60.4

モデルではヒートパイプの熱伝導率は、3000w/m・K、ヒートパイプの接合部は10w/m・Kと設定している。シミュレーション結果からは、最も首長さが短い(50mm)タイプが温度差を得られる結果がでていいる。熱電発電素子の上面の温度が放熱フィンへ熱伝導できているからということがわかる。首長さが短いタイプのヒートシンクの方が、温度が高くなっている事からも熱が多く移送されている事が分かる。

次に、二次試作品を実機に設置したデータと解析結果を比較する。

モデルにはシリンダヘッドの実測による温度勾配を入れており、200℃加熱の際に保護管上面が100℃であるが、400℃、600℃では排気温度の熱伝導で高い値を示している。実際にはシリンダヘッドを循環する冷却水による冷却効果が大きく、実機測定データでは200℃時で保護管上部が52.9℃、400℃の時にも95.4℃しか上がらない。このネジ部から冷却水へ熱の流出がかなり大きい事がここからも明確に分かっている。

上記のような、ディーゼル機関独特の構造による温度低下があるが、保護管上部の温度を合わせてデータを比較する事により、以下のように解析と実測の温度比較ができ、モデルの妥当性を評価できる。

表7 解析・実測データの比較（保護管上部温度で温度を合わせた）

単位:℃							
50mmタイプ 温度	保護管			熱電発電素子			放熱フィン
	TC下部	TC中部	TC上部	PE下面	PT上面	温度差	ヒートシンク
200℃(解析)	188.0	139.6	93.9	98.5	42.3	56.2	32.8
400℃(実測)	381.1	144.3	99.9	103.0	71.5	31.6	64.7

100mmタイプ 温度	保護管			熱電発電素子			放熱フィン
	TC下部	TC中部	TC上部	PE下面	PT上面	温度差	ヒートシンク
200℃(解析)	188.1	140.6	95.7	99.2	45.9	53.3	32.2
400℃(実測)	401.5	159.2	91.7	113.8	59.1	54.7	71.4

150mmタイプ 温度	保護管			熱電発電素子			放熱フィン
	TC下部	TC中部	TC上部	PE下面	PT上面	温度差	ヒートシンク
200℃(解析)	188.4	141.0	96.5	100.3	48.5	51.9	31.5
400℃(実測)	398.3	163.8	94.5	98.4	51.8	46.6	60.4

表7の黄色で示している部分は、保護管上部の温度を揃えて比較しやすいように並べたものである。首長さ50mmタイプで比較すると熱電素子上面で29.2℃の差、温度差で24.6℃の差が生じているが、100mmタイプは熱電素子上面で13.2℃の差、温度差で1.4℃の差、150mmタイプは熱電素子上面で3.3℃の差、温度差で5.3℃の差と良く合っている。ただし、ヒートシンク温度は大きく異なっており、これはヒートシンクのモデル精度、放熱モデルの精度、周囲温度の違い、ディーゼル機関からの輻射熱の影響等による誤差が考えられる。

結論を出すにはまだ実測データが少ないが、傾向は比較的合っており、これらの結果から熱電発電温度センサのモデルは精度良く作り込む事ができたと判断できる。

さらに、シミュレーションモデルの精度を高める事により、更なる改良の際にセンサの伝熱構造決定の試行錯誤が可能となり、かつ実機試験数の削減も可能であるため、製品性能の向上と開発機関の短縮に大きく寄与できると考える。

9.3 ディーゼル機関による実機試験概要

9.3.1 供試体

熱電発電無線温度センサ（供試体）は、一次試験にて要素試験等を繰り返して選定した部品を使用し、得られた知見より構造を改善して製作した二次試作品である。この供試体を使用し、当社のディーゼル機関を使用して性能評価及び無線試験を行った。

試験ディーゼル機関： ダイハツディーゼル製 6DC-32 機関 (750min⁻¹: 2800kWm)

試験条件： 無負荷→50%→100%負荷

供試体： 二次試作品、首長さ 50mm、100mm、150mm の 3 種類

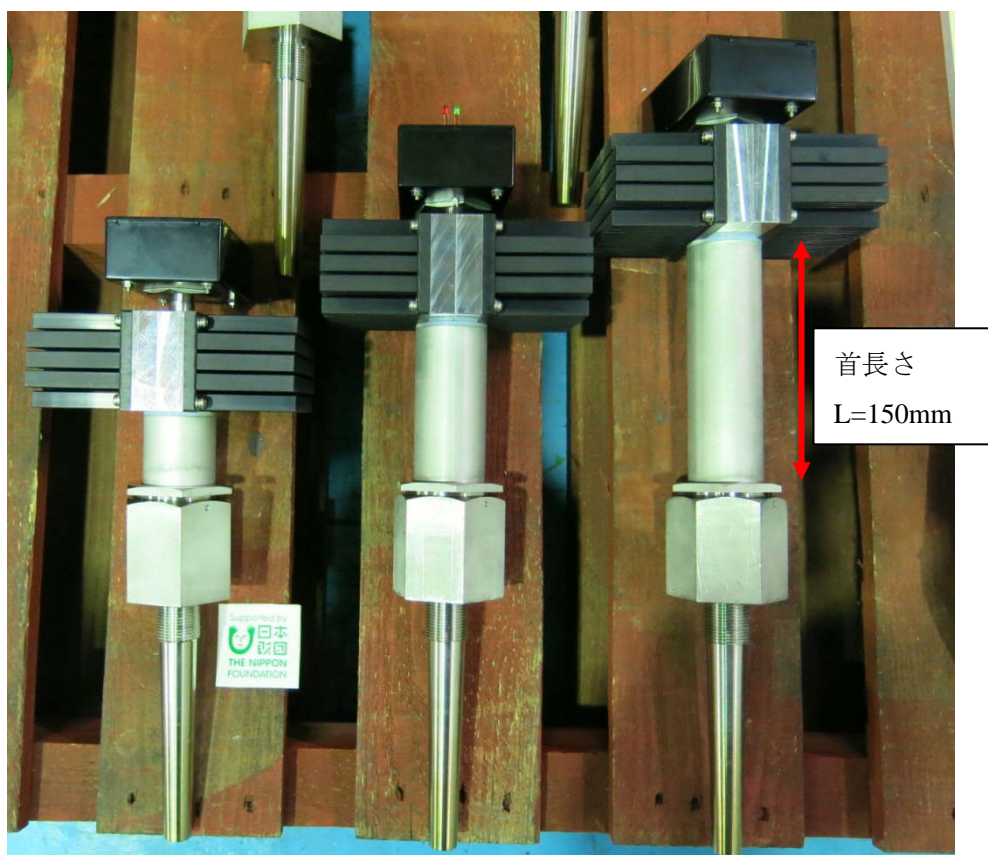


図 4.6 供試体 左から L 寸法（首長さ）50mm、100mm、150mm の 3 種類

供試体は、熱電素子を最大 2 個搭載可能な構造を持つ。本試験では発電性能の比較のために熱電素子 1 個搭載と 2 個直列接続したモデル使って試験を実施した。

また、ディーゼル機関の輻射熱の影響を確認するために、首長さが 50mm、100mm、150mm の 3 種類の首長さの供試体、合わせて合計 6 種類のタイプを用意した。

なお、機関への取付部ネジサイズは G3/4、保護管（シース）長さ 150mm、先端部が $\phi 17$ の一般的なディーゼル機関用測温抵抗体式排気温度センサと同じ寸法であり、ダイハツ製 6DC-32 機関に合わせたサイズとしている。

9.3.2 温度計測用センサの構造

計測用センサとは、供試体と同等の構造を持ち、内部に熱電対を設置して、供試体内部の熱の状態を監視するためのものである。

この計測用センサに設置した熱電対や計測センサの計測箇所は以下の通りである。

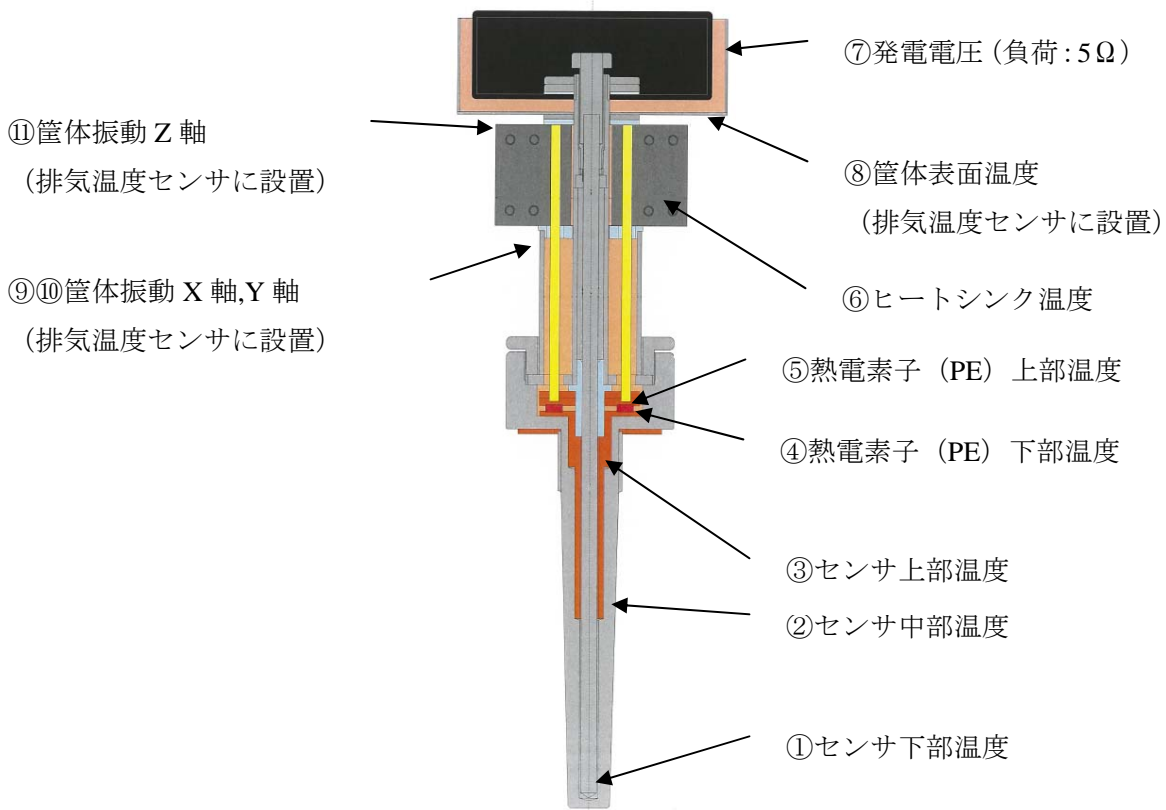


図 4 7 計測用センサへの熱電対や計測センサ設置箇所

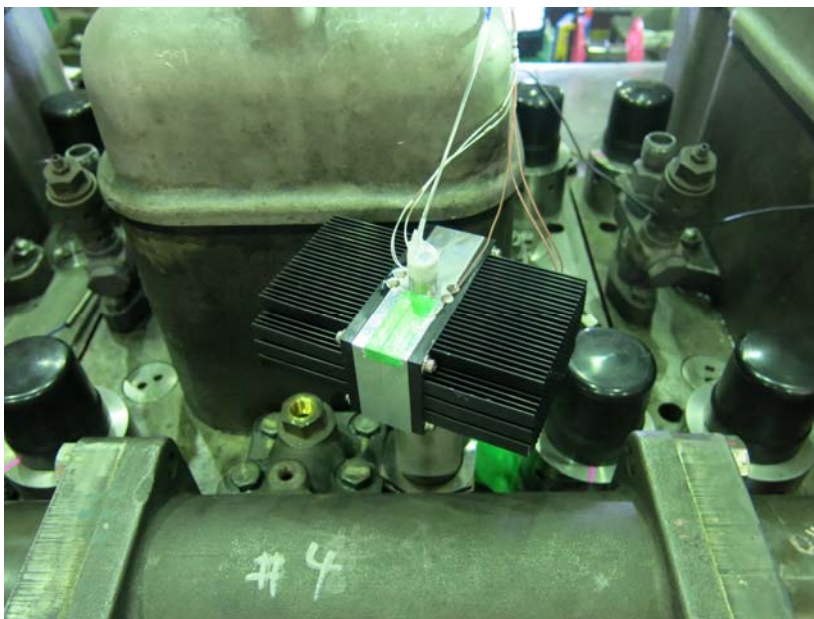


図 4 8 計測用センサ (首下長さ 100mm) の 4 番シリンダへ搭載状況

9.3.3 ディーゼル機関への供試体設置状況

ディーゼル機関には、熱電素子 1 個搭載モデルと 2 個搭載モデルの供試体を試験に合わせて設置した。ディーゼル機関への供試体と計測用センサの設置箇所は以下の通りである。

- | | | |
|-----------|------|-----------------------------|
| 1 番シリンダ : | L50 | 熱電発電無線排気温度センサ (供試体 : 二次試作品) |
| 2 番シリンダ : | L50 | 計測用センサ |
| 3 番シリンダ : | L100 | 熱電発電無線排気温度センサ (供試体 : 二次試作品) |
| 4 番シリンダ : | L100 | 計測用センサ |
| 5 番シリンダ : | L150 | 熱電発電無線排気温度センサ (供試体 : 二次試作品) |
| 6 番シリンダ : | L150 | 計測用センサ |



図 4 9 6DC-32 機関へのセンサー一式搭載状況

9.3.4 計測システム

供試体（子機）が計測する排気温度は無線を介して、受信機（親機）へ逐次転送される。受信機側では接続する PC 上に設けられた専用アプリケーションで電波強度や送信インターバルの確認をおこなっている。

3 種類の供試体の上部には X、Y、Z 軸方向に圧電型振動ピックアップを設置しての振動計測とディーゼル機関本体のセンサ設置部の振動計測を合わせて行う。

供試体の基板収納ケースの底面には別途温度センサを設置し、ディーゼル機関とヒートシンクからの輻射熱の測定を行う。

供試体と同等構造で、熱電発電温度センサの内部温度を計測する熱電対を設置した計測用センサを用意し、各熱電対はグラフィックデータレコーダーに接続して温度計測する。熱電発電素子の発電電圧は 5 Ω の抵抗負荷を挟んでグラフィックデータレコーダーに接続して計測する。

今回の計測システムの概要を以下に示す。

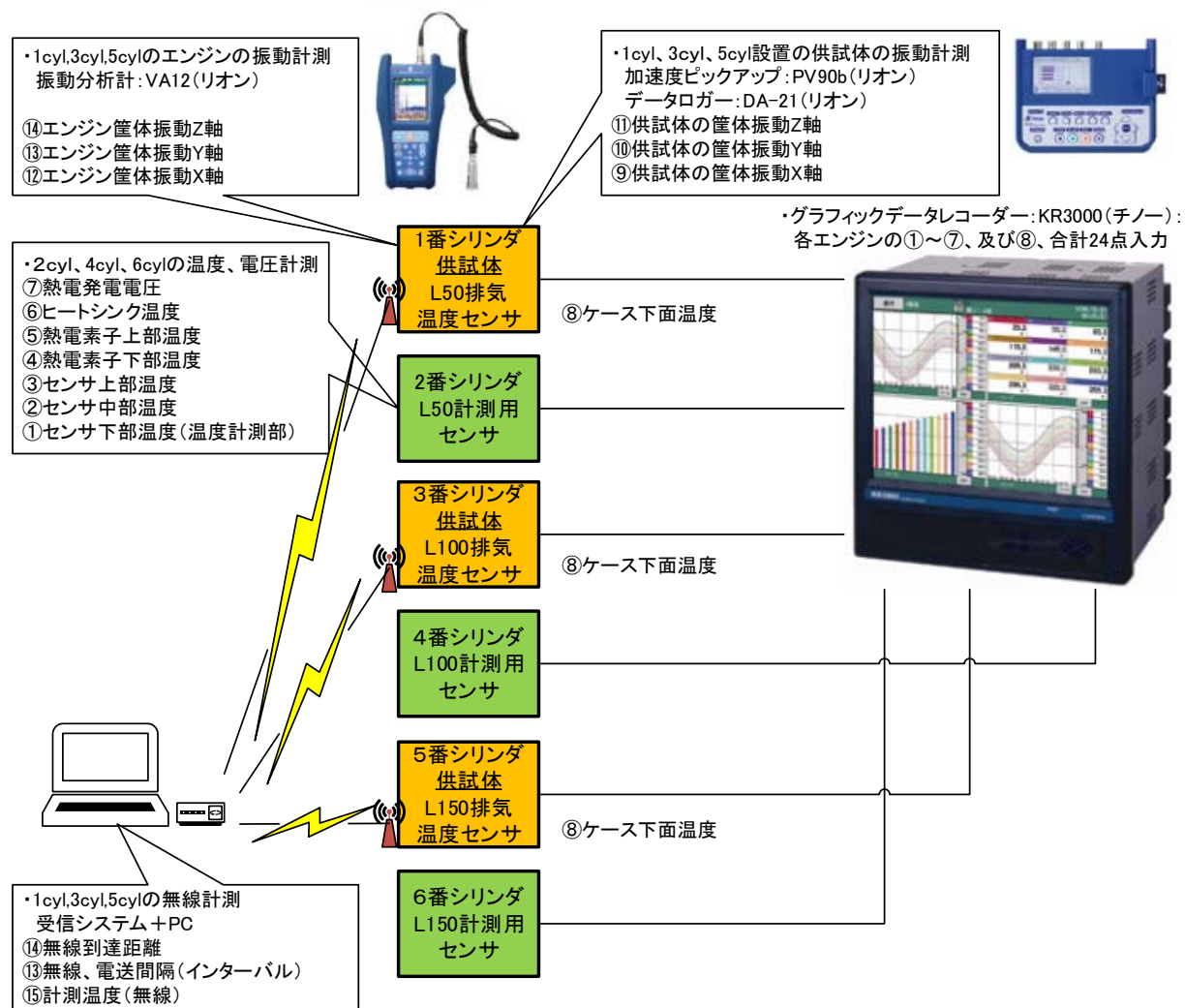


図 5 0 供試体、計測器等の試験環境



図 5 1 親機による無線状況と温度計測の状況



図 5 2 左：4cyl 設置の計測用センサ（L100）、右：5cyl 設置の供試体(L150)

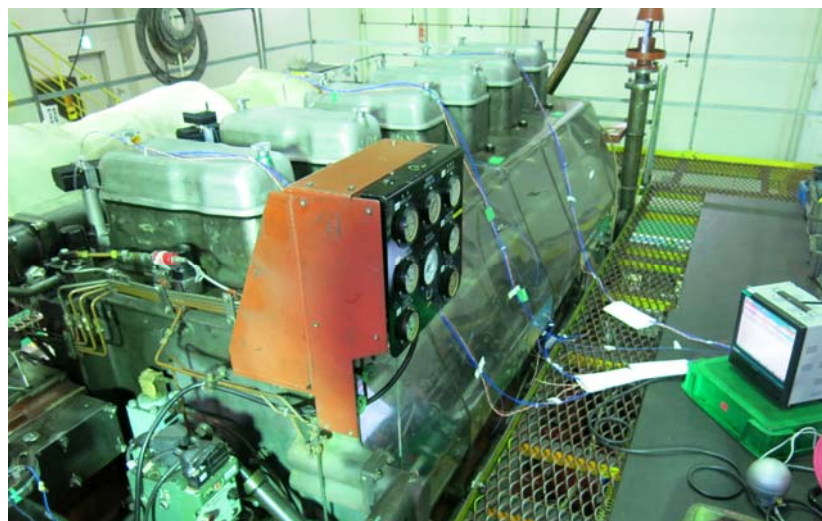


図 5 3 計測システムとデータロガーの配線の状況

9.4 評価と考察

9.4.1 熱電発電素子上下面温度差と発電電力の関係

熱電発電素子は上面、下面の温度差が大きいほど発電電圧が大きくなる。その為、熱源の熱を如何に熱電発電素子の高温側へ伝え加熱し、かつ熱電発電素子の低温側から如何に熱を移動させて冷却するかがセンサ構造の肝となる。以下のグラフは、熱電素子1個搭載時の供試体と2個搭載の供試体を用意して計測した結果である。

加熱は温度キャリブレータで100℃から600℃まで100℃毎に加熱し、計測している。

なお、温度キャリブレータを使用しての加熱試験は、ヒートシンクの周囲温度はほぼ同じ、輻射熱がほとんど無い状況で試験が実施できることから、第二伝導部（放熱部）分の条件及び、加熱部分の条件を揃える事が可能であり、基礎性能の確認には適している。

なお、実際のディーゼル機関の排気温度が推移する領域は約450℃まで、ターボチャージャー入口では約550℃迄である。また、無負荷状態で200℃程度の温度を示すため、200℃以下は実質的には計測する必要が無いと判断できる。

まず、排気温度として熱が加わる保護管下部温度と熱電発電素子の上下面温度差を示す。

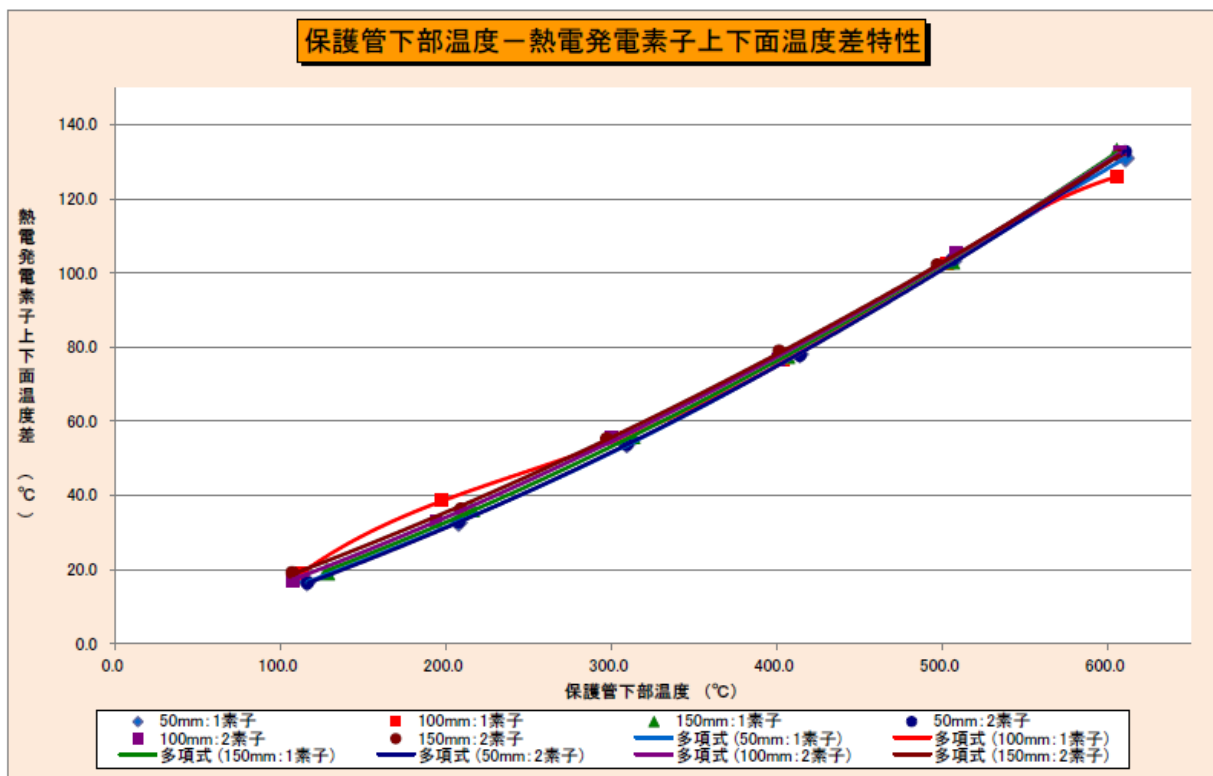


図5.4 保護管下部温度－熱電発電素子上下面温度差特性

図5.4のデータにより、二次試作品の構造では、首長さL=50、100、150の全てに於いて、100℃で加熱すると $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ ほど、400℃の加熱で $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$ ほどの温度差を実

現できている。600℃まで加熱すると $\Delta T=130^{\circ}\text{C}$ ほどと大きな温度差を得られる。現実的には正常なディーゼル機関において、ここまで排気温度が上昇する場合はないが、市販の排気温度センサは600℃まで保証するため、参考データとして計測を行った。

この結果から、計測に使用した6本の供試体は、ほぼ同一の線上に載っている。つまり、センサの首長さの違いは殆ど関係がないことが分かる。

センサ構造の中で、首長さが異なる時に変更となる部材はヒートパイプである。このデータから分かる事は、ヒートパイプの長さによる熱電素子の低温側の冷却能力の違いは殆ど生じず、首長さの違いが有っても大量の熱をヒートシンクへ効率よく運んでいるということが分かる。やはり、採用したヒートパイプは距離の離れた場所の熱を大量に熱移送するためには欠かせない重要なキーパーツであることが判断できる。

次に、このときの発電電力をプロットする。

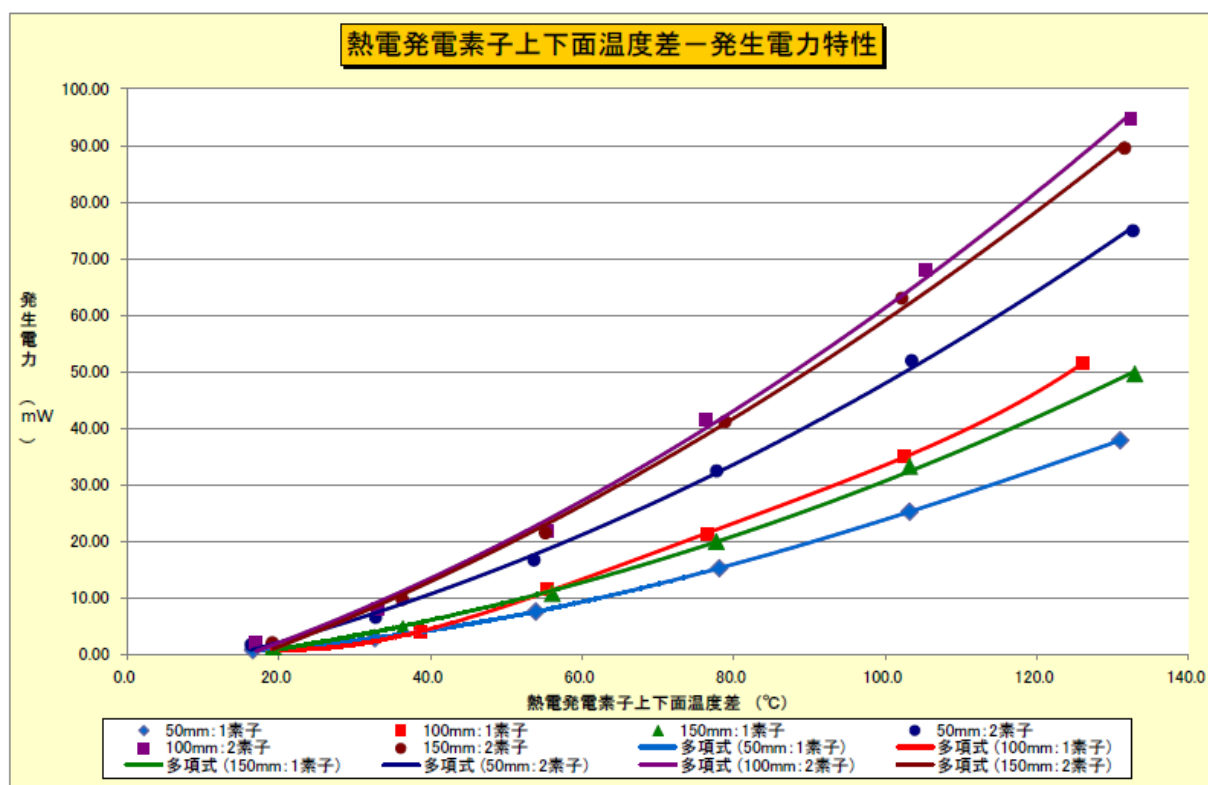


図 5 5 熱電発電素子上下面の温度差－発生電力特性

図 5 5 は、横軸に熱電発電素子の上下面の温度差を、縦軸に発生電力をプロットしたものである。

熱電発電素子は1個搭載及び、2個搭載する計測用センサを使用した。熱電発電素子が2個の場合は直列に接続している。それぞれ負荷として5Ωの抵抗を接続して電圧を計測、発生電力[mW]に換算してプロットしている。

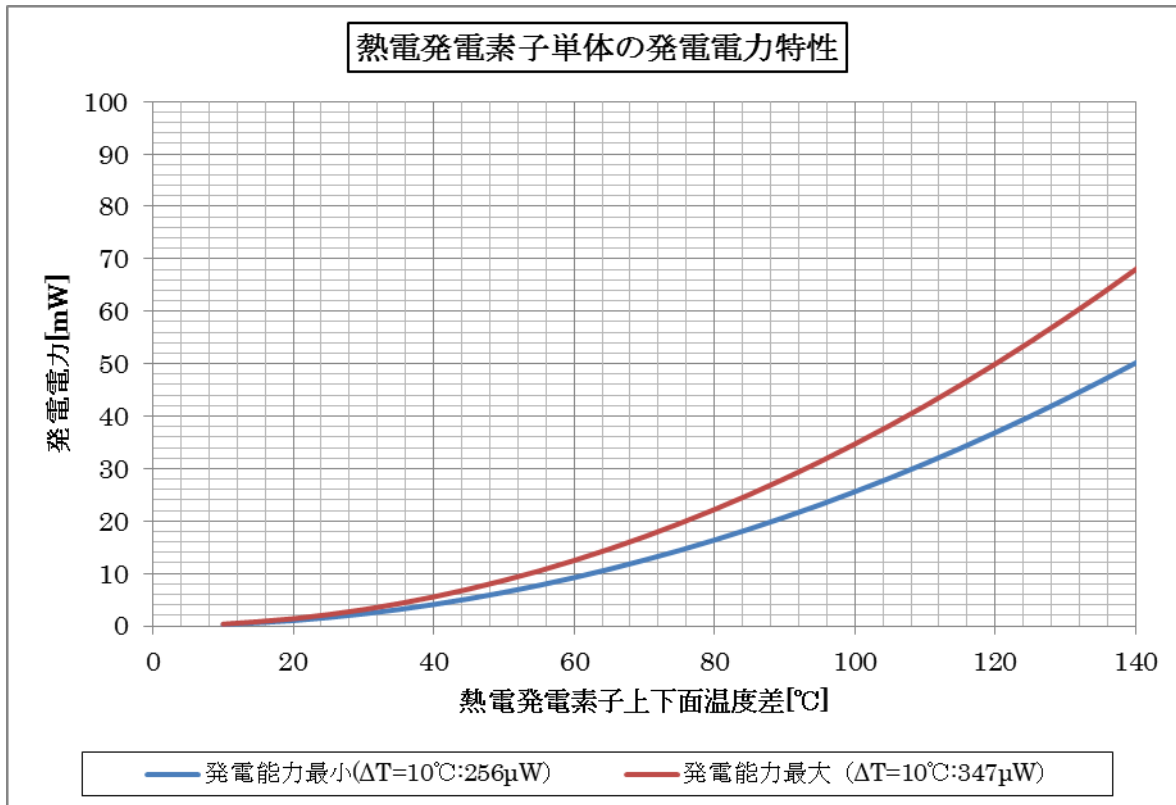


図 5 6 熱電発電素子単体の発電電力特性

今回の試験全般に使用した熱電発電素子は、温度差 $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ の時に $256\mu\text{W}\sim 347\mu\text{W}$ の性能を持つものを選択して使用している。最も発電能力が低い素子と高い素子の上下面に温度差を与えたときの発電電力をプロットしたグラフが図 5 6 である。

図 5 5 だけを見ると発電電力は大きくばらついているように見えるが、図 5 7 の発電素子単体の発電電力特性と比較すると、実測値は素子単体の発電電力特性の上下範囲内にほぼ入っている事が判る。即ち、実測値の発電電力のばらつきは、素子自体の発電特性の差であるということである。

発電電力が最小の素子の発電特性よりも若干低いデータがあるのは、熱電発電素子と接する部材間の熱抵抗の誤差等が原因で少し低めの発電量になったと判断する。

熱電発電素子を 2 個直列に繋いだ場合は、1 個の時の倍の発電電力となるが、その時のばらつきが大きくなるのは上記理由からである。また、首下 100mm の供試体が他に比べて発電電力が高くなっているが、これも素子単体の発電特性のばらつきより生じた差ということが判断できる。

次に、実際に排気ガスにより加熱される保護管下部と熱電発電素子の発電電力の実測での関係データを示す。

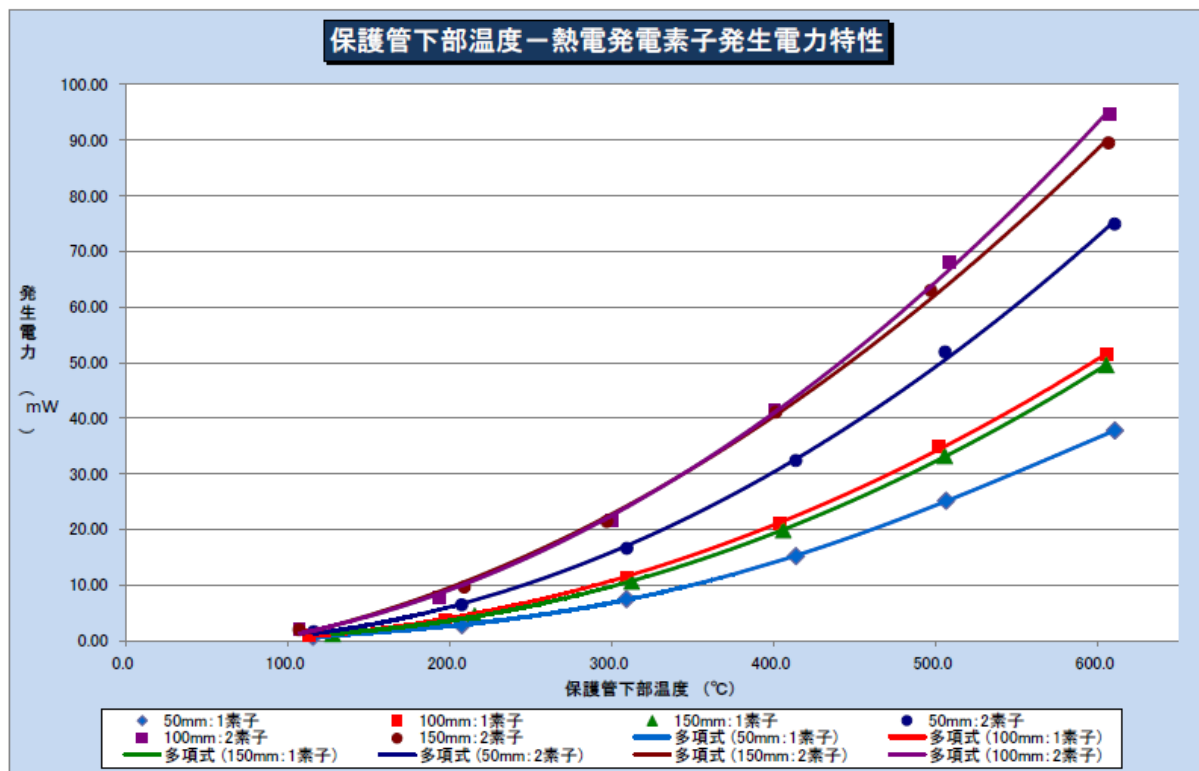


図 5 7 保護管下部温度－熱電発電素子発生電力の特性

保護管下部へ加わる熱はディーゼル機関の排気温度から与えられるものである。

ディーゼル機関の正常運転時の排気温度の変動範囲は約 200°C～450°Cである。このグラフより、ディーゼル機関に搭載した際の熱電発電素子の発電電力が推測できる。

200°C時に、5mW 程度、300°C時に 10mW 程度、400°Cで 20mW となる。温度が 600°Cまで上昇すれば、30mW～50mW を発生する能力を持つ。

つまり、ディーゼル機関の無負荷運転時 (200°C) の時は 5mW 程度、100%負荷時には 20～30mW 程度。熱電発電素子を二個直結した時には、その倍程度の発電電力が得られることが判った。

9.4.2 温度キャリブレーション試験と実機試験の違いについての考察

温度キャリブレーションによる特性把握のための試験とディーゼル機関による実機計測のデータを比較してみると、実機試験の方が熱電発電素子の温度差を得るための条件が悪い事がわかった。その点について考察を行う。

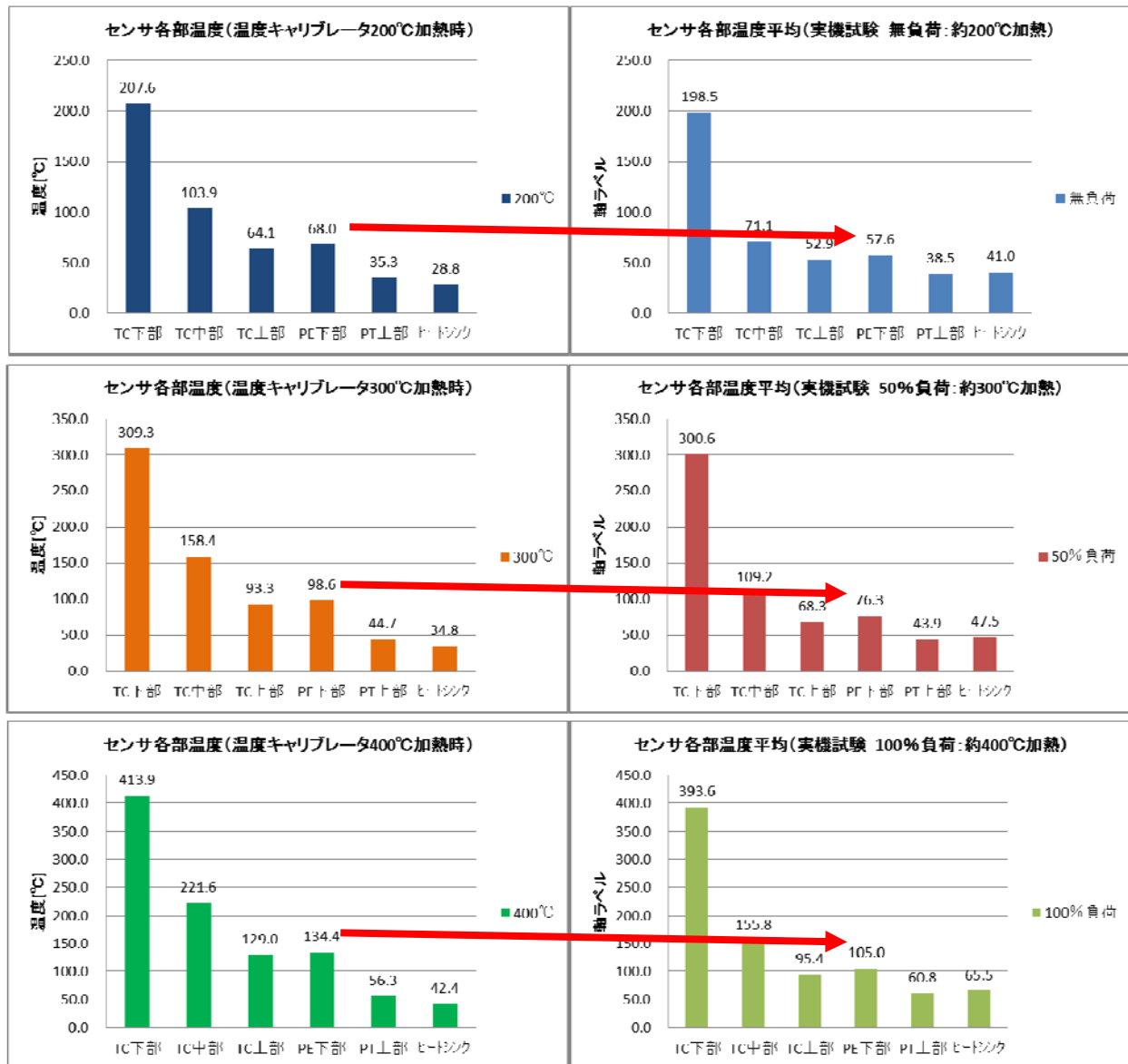


図58 左：温度キャリブレーションによる加熱時、右：実機試験での加熱時のデータ

繰り返しになるが、熱電発電では発電能力を上げるためには、熱電発電素子の上下面の温度差を如何に大きくするかが重要である。

左側のグラフ（温度キャリブレーションによる加熱）の温度データから分かるように、供試体では保護管下部（TC下部）200°C加熱時に、熱電素子下面（PE下部）が68°C、

300℃加熱で 98.6℃、400℃加熱で 134.4℃となっている。またヒートシンク温度も室温環境下で輻射熱の影響も少ないことから、28.8℃～42.4℃に抑えられており、ヒートシンクがよく冷えるので、熱電発電素子の上面温度も 35.3～56.3℃と低く保てることになる。つまり、熱電素子の下面側の温度を大きく上昇させることで、熱電素子の下面と上面の温度差を拡大する事に成功している。

対して右側のグラフ、ディーゼル機関に搭載した供試体の各部温度計測データは、熱源からの入力としてほぼ同じ 198.5℃、300.6℃、393.6℃を加えた場合に、熱電発電素子下面の温度は、それぞれ 57.6℃、76.3℃、105.0℃と温度キャリブレーションによる試験時と比べて、10.4℃～29.4℃も低くなっている。

次に、この差がどこから生じているか、それぞれの供試体の設置場所の構造上の違いを検証する。

温度キャリブレーションを利用した加熱では、供試体の保護管部分をスッポリと納める部品をヒータで加熱し、熱を保護管部分に掛ける構造であり、実際は保護管の TC 下部と TC 中部の部分くらいまでがヒータ内部にはった状態になり、かつ TC 上部があるネジ固定部は使われずに空中に浮いているような状態となる。つまり、広い部分に均等に熱を加える事ができ、伝熱経路上で熱が逃げる部分が少ない。

対して、ディーゼル機関に設置する供試体は、シリンダヘッドにセンサ取付け用穴があり、G3/4 のネジにて機関本体に固定される。供試体の保護管（シース）先端の感温部には PT100（白金測温抵抗体）のエレメントが搭載されており、その部分だけ温度を計測するようになっている。TC 下部の部分は最も排気ガスの流速が早く、高温になる管の中心部分に位置するよう保護管（シース）長さを決めて設置されている。

さらに、シリンダヘッドのセンサ取付け部について、実際に図 6 0 に示す場所の温度計測を行った。排気の通路の中央部を①、周囲部に向かうにつれて②、③となる。④から⑦は供試体の保護管部が通る穴であり、⑧はシリンダヘッドの上面の温度である。これらは、①～⑦の位置に熱電対を付けた特殊な排気温度センサを用意し、計測している。

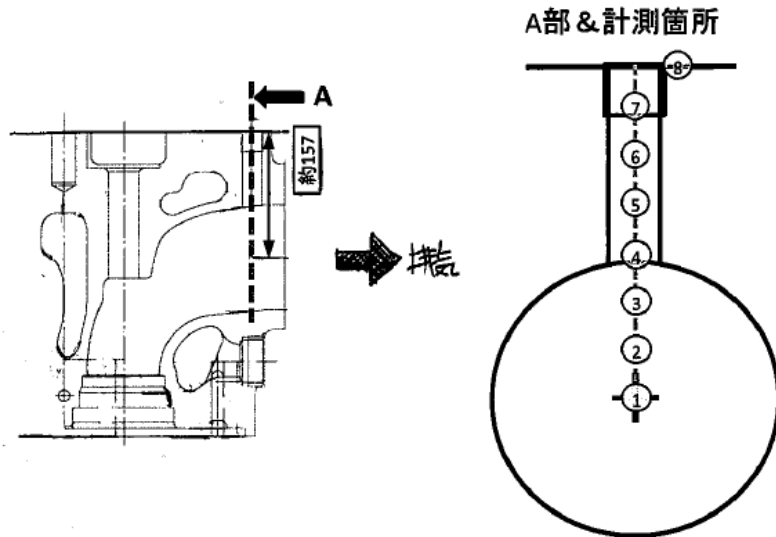


図 5 9 排気温度センサの取り付け部のシリンダヘッド温度計測場所

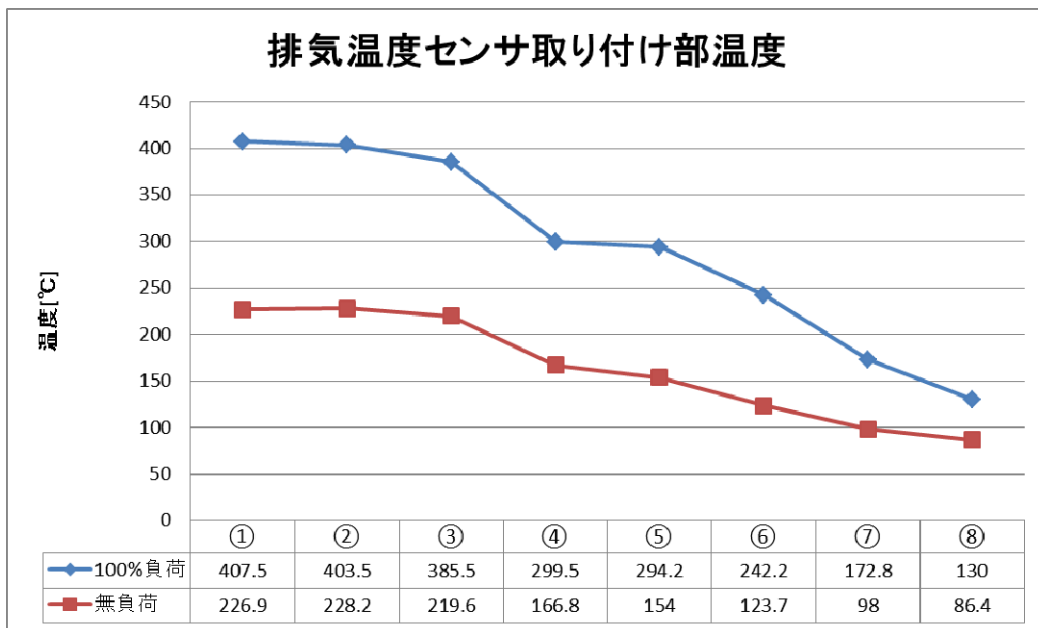


図 6 0 排気温度センサ取り付け部のシリンダヘッド温度計測データ

ディーゼル機関での加熱が温度キャリブレーションでの加熱と大きく異なる点は、保護管の先端 (TC 下部) が最も温度が高い部分となり、配管の外周に行くほどなだらかに温度が下がる事、そしてシリンダヘッド内の排気ガス通路と上面の間 (TC 中部～TC 上部) は冷却水によって冷却されており、シリンダヘッドの熱を積極的に冷却水に逃がす構造となっているため、急激に下がる事である。

上記グラフより排気管内①②③とセンサの保護管が入る穴部分④⑤⑥を比較すると、③から④の間は 50～100℃程度の著しい温度降下が見られる。例えば、①の部分が

無負荷時に 226.9℃、100%負荷時は 407.5℃に加熱されるが、その時⑦のネジ部はそれぞれ 98.0℃、172.8℃と大きく下がってしまう。温度差で見ると、①→⑦間で無負荷時に 128.9℃、100%負荷時に 234.7℃も下がってしまうのである。

この⑦の部分にはシリンダヘッドと熱電発電温度センサがネジ部で締結されている部分であり、供試体に与えられた熱がここからシリンダヘッド側へ大量に逃げてしまうと考えられる。即ち、⑦にあるネジ部より上部に搭載されている熱電発電素子の下面側に熱が伝わりにくいということである。

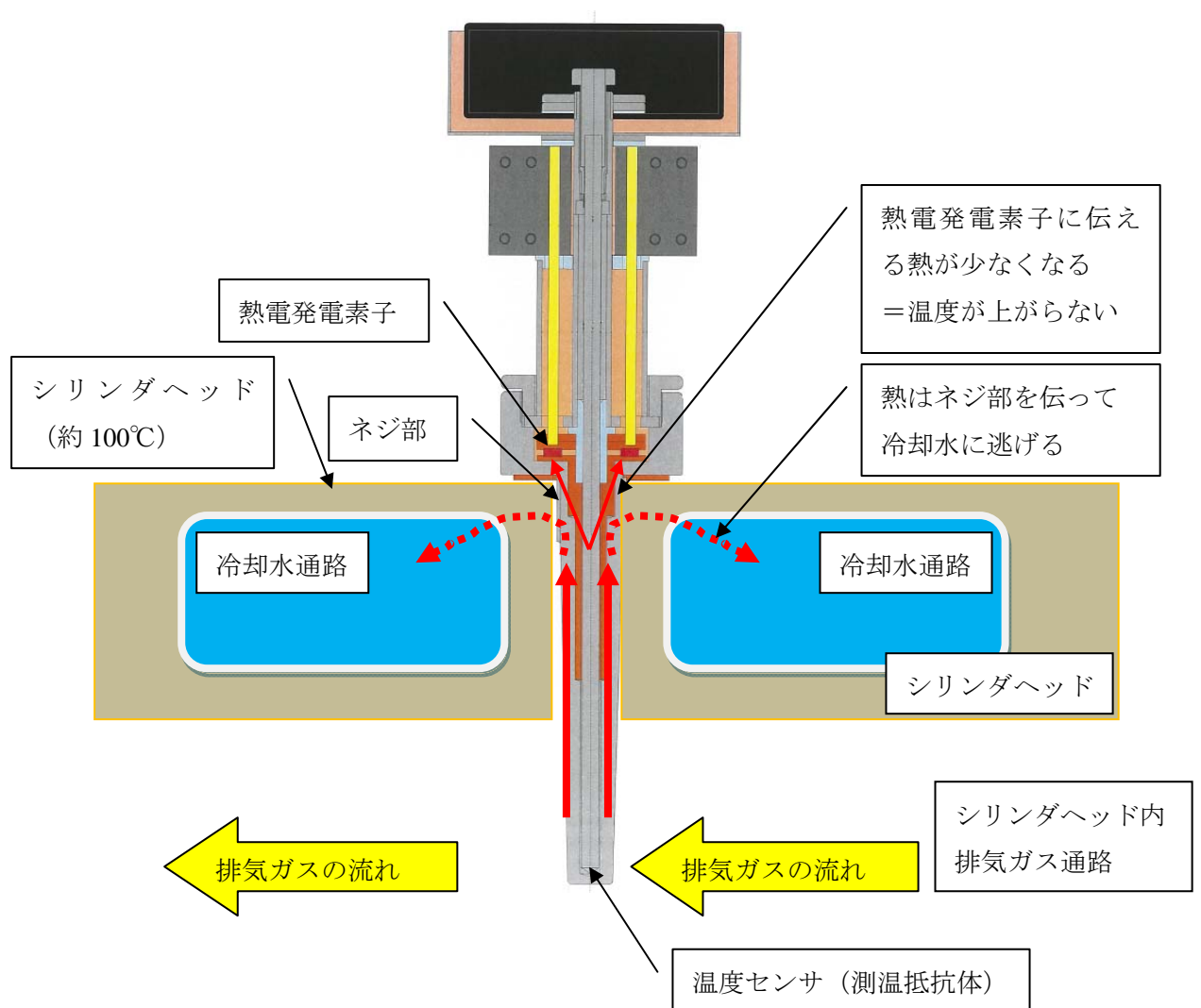


図 6 1 ディーゼル機関に設置した場合の熱の流れ

このような構造を持つディーゼル機関に設置する場合、排気ガスの潤沢な温度エネルギーがあったとしても熱電発電素子下面に運ぶには支障があり、構造の見直しが必要である事、つまり、ネジ部分から熱を外部へ逃がさないようにして、熱電発電素子へ無駄なく伝導する構造となるような伝熱構造の改良が必要であることが判った。

9.4.3 センサ上部構造についての考察

ディーゼル機関は燃焼を伴い、高温の排気ガスを排出する内燃機関であるため、構造上シリンダヘッドや排気管等が高温になる。特に供試体が設置される周辺は、これらの高温部分があるため 100℃以上の部分も少なくない。そして、供試体は、空気中に廃熱を行う空冷であるため、輻射熱の大小によりヒートシンクの冷却性能に大きく影響を与える可能性がある。そこで、ヒートシンクや供試体の基板収納ケース下面の温度計測を行って冷却性能や輻射熱の影響を考察した。

以下の図 6 2 の 4 つのグラフは、左上から時計回りに、「保護管下部とヒートシンクの温度の関係」、右上が「保護管下部と熱電発電素子上面温度の関係」、右下が「保護管下部と熱電素子下面温度の関係」、左下が「保護管下部と熱電素子上下面温度差」である。

それぞれ、凡例中の 1cyl は首長さ 50mm、3cyl は首長さ 100mm、5cyl は首長さ 150mm のモデルである。①と②は別の試験でのデータであることを示し、それぞれのデータを一つにグラフにまとめたものである。供試体は同じである。横軸は保護管下部 (TC 下部) に加えた温度(排気ガス温度)である。

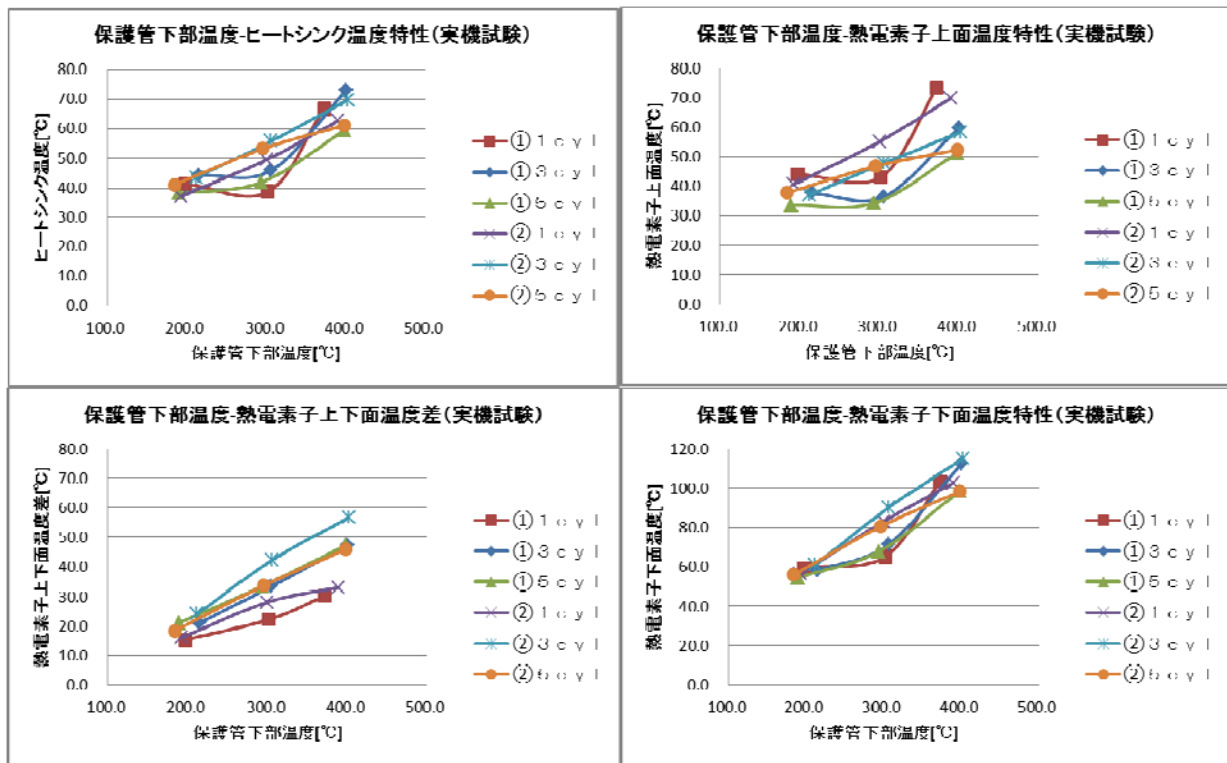


図 6 2 実機試験で使用した計測センサの結果

左下のグラフより、熱電発電素子の温度差（熱電素子下面温度－熱電素子上面温度）は、保護管下部を 400℃で加熱した際に、②3cyl（2 回目の 3 番シリンダ設置（L100））が 56.7℃となり、次点が①の 3cyl、5cyl、②5cyl の順でこの三つは 48℃程度となっている。①1cyl、②1cyl はさらに小さく、30℃少々である。

つまり、①1cyl、②1cyl（首長さ L50）の供試体は熱電発電素子の上下面に生じる温度差が他より少ないということである。熱電素子下面～保護管下部温度まではセンサ全てで同じ構造であり、ほぼ同じ伝熱能力を持つと考ええると、温度差が取れない理由の一つは、熱電素子上部の熱を効率よくヒートシンクを介して空気へ廃却出来ていないという事が考えられる。

実際、右上の「保護管下部と熱電発電素子上面温度の関係」のグラフを見ると、①1cyl、②1cyl（首長さ L50）は温度が高く、左上の「保護管下部とヒートシンクの温度の関係」のグラフからも、①1cyl、②1cyl（首長さ L50）は温度が高い。

逆に①5cyl、②5cyl（首長さ L150）は低い値を示しており、熱をヒートシンクから雰囲気中へ効率よく廃却出来ている様子が分かる。これは「保護管下部とヒートシンクの温度の関係」グラフのヒートシンク温度でも①5cyl②5cyl が低い事からも判る。

即ち、ヒートシンクとシリンダヘッドまでの距離が 50mm しかない短い首長さの供試体では、ディーゼル機関のシリンダヘッドからの輻射熱が大きく伝わり、ヒートシンクが暖まってしまうため、熱電発電素子の上面の熱を、ヒートパイプ等を使って大量にヒートシンクに伝えたとしても、効率よくその熱を雰囲気気体へ廃棄出来ないことから、熱電素子上面温度を下げる事ができず、温度差を確保するのが難しいという事が判る。

これらのデータから、首長さが L50、L100、L150 の 3 種類では、首長さ L50 では輻射熱の影響が強くなるため、L100 以上、出来れば L150 と首長さが長い方が熱電発電無線排気温度センサとして性能が高くなるという事が言える。

次に基板収納部のケースに対する輻射熱に関する考察を行った。

高温部からの輻射熱を電子基板部分が受けると電子基板には微弱電流を扱う回路があり、温度上昇にて回路のリーク電流が増える事や電子部品の仕様上の上限温度を超える可能性がある。輻射熱について、ケース下面温度とヒートシンクの温度で考察する。

表8 負荷、首長さの違いとケース下面の表面温度の関係

ケース下面温度	無負荷	50%負荷	100%負荷
1cyl) 50mm タイプ	29.5℃	38.9℃	44.4℃
3cyl) 100mm タイプ	30.6℃	39.8℃	47.1℃
5cyl) 150mm タイプ	31.8℃	41.2℃	48.2℃

表9 負荷、首長さの違いとヒートシンクの温度

ヒートシンク温度	無負荷	50%負荷	100%負荷
1cyl) 50mm タイプ	37.2℃	49.6℃	62.7℃
3cyl) 100mm タイプ	43.6℃	55.8℃	69.8℃
5cyl) 150mm タイプ	41.1℃	53.3℃	61.2℃

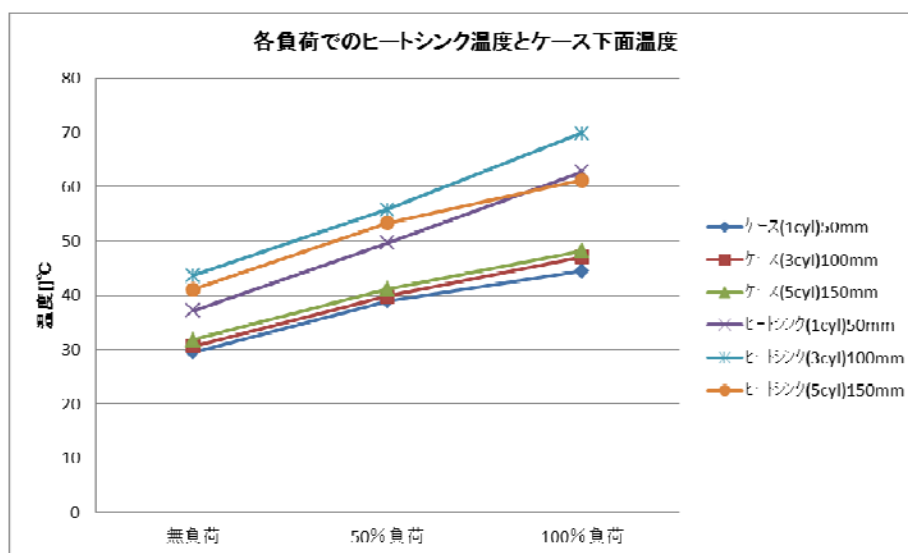


図63 各負荷でのヒートシンク温度とケース下面温度

グラフより、ヒートシンク温度の上昇に伴い、ケース下面温度が上昇する。熱電温度センサの首長さの違いによるケース下面の温度差はわずかである。従って、ヒートシンクの熱の影響を受けないよう、ケース下面は断熱を行うべきであることが分かった。

9.4.4 無線に関する考察

供試体をディーゼル機関に搭載し、排気温度約 300°C（負荷 50%）にて加熱した際の、無線送信インターバルと計測温度を、親機で取得する通信ログデータから得た。

この時の発電電力量は、

- #0（1cyl：首下 50mm）：2.0mW、
- #1（3cyl：首下 100mm）：3.5mW、
- #2（5cyl：首下 150mm）：3.0mW であった。

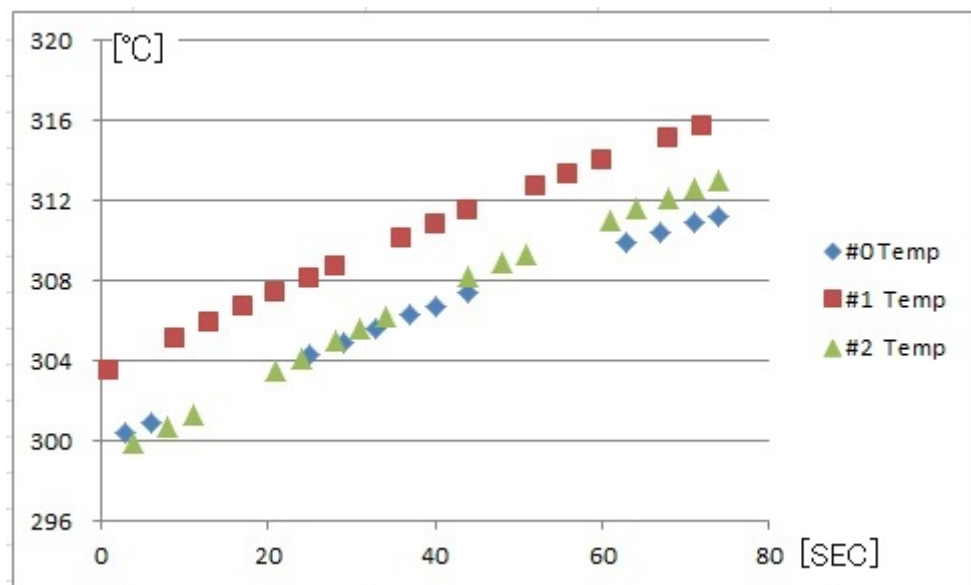


図 6 4 供試体の送信インターバルと計測温度

若干の抜けがあるが、ほぼ 3～5 秒間隔でデータ送信を行っている。

今回使用する無線モジュールは 1.6mW を供給すれば 1 秒毎の無線送信が可能であることが事前に分かっている。上記の場合は、約 3 秒毎の転送であり、この時の給電電力は $1.6\text{mW} \div 3\text{sec}$ として、0.5mW/1sec 程度と推測される。

しかし、これは電源回路の二次側、つまり無線モジュール供給側の必要電力であり、熱電発電素子の発電電力と同じではない。

つまり、熱電発電素子の発電電力は電源回路で 5V まで昇圧されて二次側に供給されており、そこには変換効率が存在する。

次に、この変換効率を試算する。

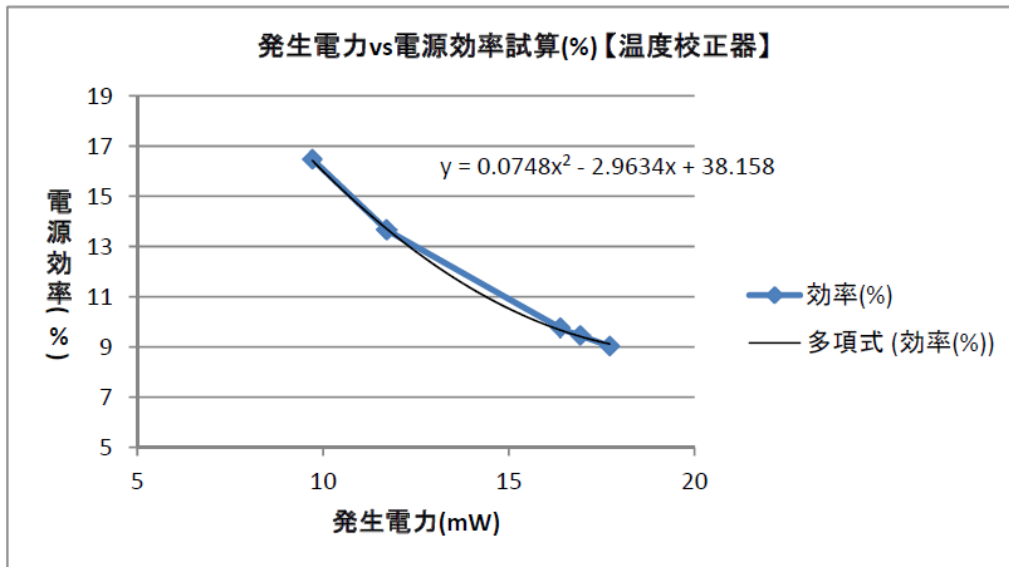


図 6 5 熱電発電素子の発電電力と電源効率の関係

表 1 0 温度キャリブレーション使用による電源回路の効率試算結果

①50mmタイプ

	1sec通信 開始温度(°C) [°C]	⇒温度差 [°C]	⇒発生電力 [mW]	電源回路 推定効率 [%]
素子1個使用	315°C	67.04	11.70	13.67
素子2個使用	270°C	42.35	11.72	13.65

②100mmタイプ

	1sec通信 開始温度(°C) [°C]	⇒温度差 [°C]	⇒発生電力 [mW]	電源回路 推定効率 [%]
素子1個使用	320°C	53.33	16.39	9.76
素子2個使用	270°C	46.80	17.72	9.03

③150mmタイプ

	1sec通信 開始温度(°C) [°C]	⇒温度差 [°C]	⇒発生電力 [mW]	電源回路 推定効率 [%]
素子1個使用	310°C	51.87	9.71	16.47
素子2個使用	260°C	46.43	16.92	9.45

(1回/1秒の通信で使用する電力を1.6mWとして計算)

これらのデータより、電源効率は10%台と良くない事がわかった。残念ながら熱電発電素子が発電した電力をうまく生かせていない。変換効率が悪い理由は、熱電発電素子と電源回路のインピーダンスマッチングが合っていない可能性がある。ここに、大きな改善の余地があることは、素子1個と素子2個直列接続時における無線インターバルの大きな向上がなかった事からも分かる。

9.4.5 振動に関する考察

供試体に掛かる振動条件を調査し、どの程度の振動状況下で運用する必要があるのかを判断するために、供試体の筐体とその設置部（ディーゼル機関本体）の振動計測を行った。

供試体は首長さ 50mm モデル、100mm モデル、150mm モデルの 3 種類の本体に、X、Y、Z 方向の 3 軸に振動ピックアップを取り付けた。クランク軸の出力軸方向に X 軸、燃料ポンプ-排気管側の方向に Y 軸、上下方向に Z 軸として、振動ピックアップを取り付けている。振動計測を行った条件は、無負荷時、50%負荷時、100%負荷時である。計測レンジは～1kHz までの計測とした。なお、ディーゼル機関は定盤に直接設置されており、防振設置ではない。

計測装置

供試体本体計測用

- ・ 加速度ピックアップ：PV90B（リオン）
- ・ データロガー：DA-21（リオン）
- ・ チャージアンプ（リオン）

ディーゼル機関本体計測用

- ・ 振動分析計：VA12（リオン）



図 6 6 使用した振動計測装置

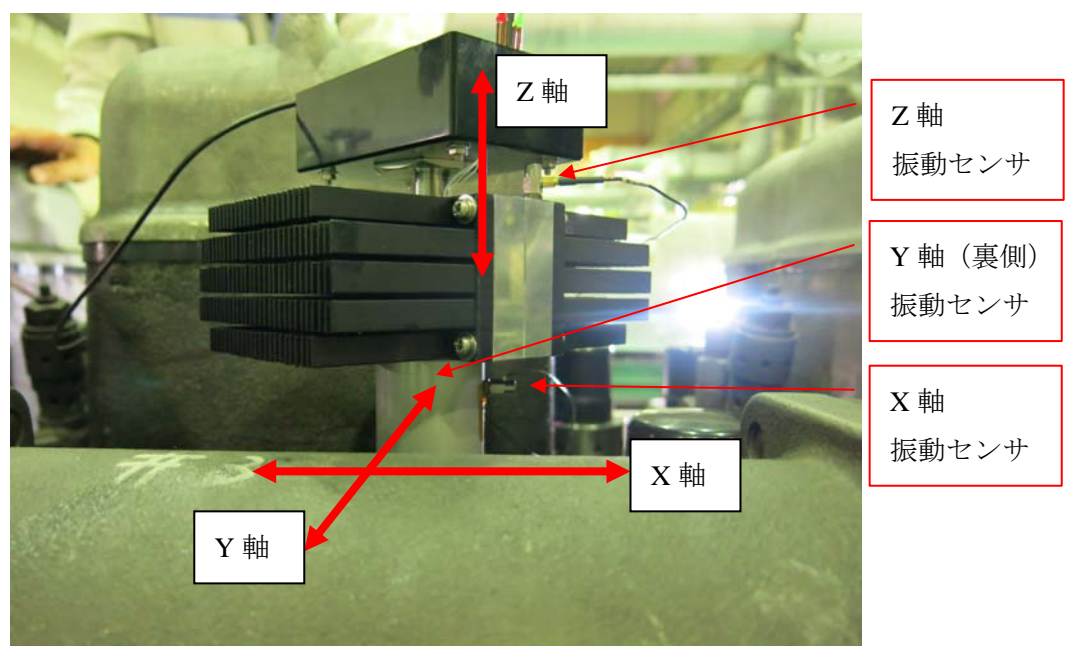


図 6 7 振動ピックアップの取り付け

表 1 1 振動計測 (0-1kHz: Overall)

0-1kHz(オーバーオール) 振動計測			センサ 本体	センサ 設置場所
	設置場所 センサタイプ	方向	加速度 G	加速度 G
無負荷	1cyl 50mmタイプ	X	1.5	0.6
		Y	1.0	0.4
		Z	2.1	0.6
	3cyl 100mmタイプ	X	5.2	0.5
		Y	1.8	0.4
		Z	2.2	0.5
	5cyl 150mmタイプ	X	1.9	0.5
		Y	1.5	0.4
		Z	2.9	0.6
50%負荷	1cyl 50mmタイプ	X	1.1	0.6
		Y	1.4	0.7
		Z	1.4	0.5
	3cyl 100mmタイプ	X	11.7	0.6
		Y	2.1	0.5
		Z	2.1	0.5
	5cyl 150mmタイプ	X	2.6	0.7
		Y	3.4	0.6
		Z	3.8	0.6
100%負荷	1cyl 50mmタイプ	X	1.4	0.8
		Y	1.6	0.7
		Z	1.7	0.5
	3cyl 100mmタイプ	X	14.4	0.8
		Y	3.7	0.7
		Z	2.9	0.6
	5cyl 150mmタイプ	X	3.1	1.1
		Y	4.8	0.6
		Z	4.0	0.7

※黄色部分は振動センサ不具合により計測値が異常である

0-1kHz のオーバーオールで見た場合、表 1 1 の右側、センサ設置場所となるディーゼル機関本体において、振動の加速度はほぼ 1G 以下である。対して左側のセンサ本体は 100%負荷時の振動が一番大きくなっていることがわかる。そして首下 50mm < 100mm < 150mm という順に振動も大きくなり、特に 150mm タイプの 100%負荷時が 3.1~4.8G で最も大きい。つまり、設置部よりセンサ上部は揺れが増大し、それは首長さが長い方が大きくなるという傾向が分かる。

熱電発電温度センサでは、基板の設置場所がセンサの最上部になる。これは熱電発電部と高温側・低温側の熱伝導構造を内部に持つため、ヒートシンク位置より外側に基板等を設置せざると得ない事と、ディーゼル機関の輻射熱の影響を減らしたいことから、熱電発電温度センサの最上部に設置するのが望ましい。一般的に、このような構造物は上部へ行くほど振動は大きくなり、基板部分への耐振対策が重要になる。なお、一般に販売される無線モジュールでは耐震対策が徹底されているものではなく、振動対策された無線モジュール等の開発は一つの課題である。

9.5 EMC 試験

二次試作品について、電磁環境下での挙動や耐性、及び無線送受信への影響を見るため、一般財団法人 日本品質保証機構の安全電磁センターの電波暗室にて船級協会の型式承認時に要求される EMC 試験を実施した。今回行った EMC 試験は IACS E10 に準拠するものとする。

試験条件

適用規格： IACS Req.1991/Rev.6 2014, E10 Test Specification for Type Approval Test No.13,14,19

試験品名 (EUT) 熱電発電無線排気温度センサ

型名 DCM-100 サンプル番号 1 試作品

区分 デッキ/ブリッジ以外

9.5.1 静電気イミュニティ試験

Test No.13 静電気イミュニティ試験 IEC61000-4-2

Electrostatic discharge IEC 61000-4-2	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.	<ul style="list-style-type: none"> •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).
---	--	---

この規格は、帯電した操作者からの直接あるいは近接した物体を介しての静電気放電にさらされる電気・電子機器に対するイミュニティ必要条件や試験法について規定している。

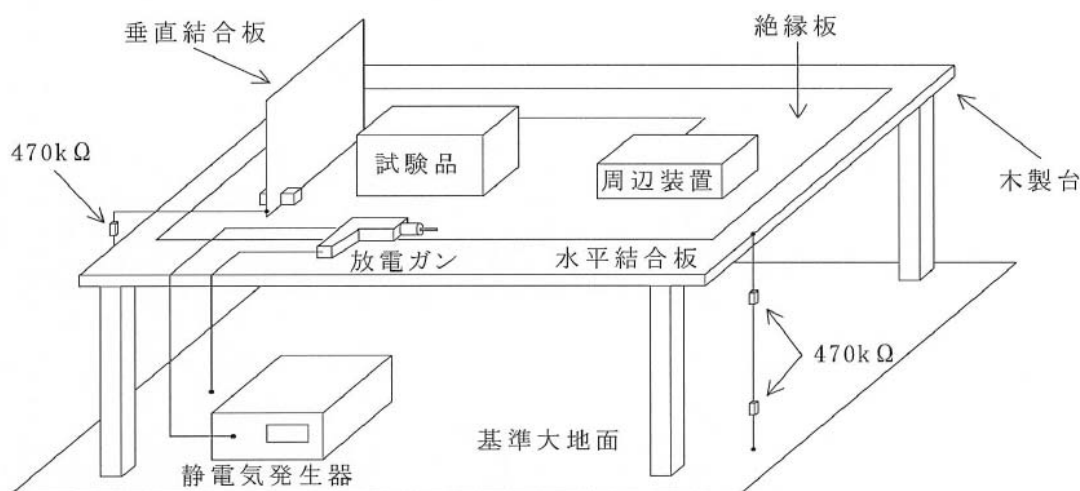


図 6 8 静電気イミュニティ試験の機器設置例



図 6 9 静電気発生器にて、供試体へ静電気を掛けているところ

表 1 2 試験結果

接触放電(間接放電)

放電箇所	試験レベル(kV)	試験結果
水平結合板(HCP)	± 2.0	適合
	± 4.0	適合
	± 6.0	適合
垂直結合板(VCP)	± 2.0	適合
	± 4.0	適合
	± 6.0	適合

接触放電(直接放電)

放電箇所	試験レベル(kV)	試験結果
接触放電試験 (被試験装置の金属表面)	± 2.0	適合
	± 4.0	適合
	± 6.0	適合

気中放電

放電箇所	試験レベル(kV)	試験結果
気中放電試験 (被試験装置の非金属表面)	± 2.0	適合
	± 4.0	適合
	± 8.0	適合

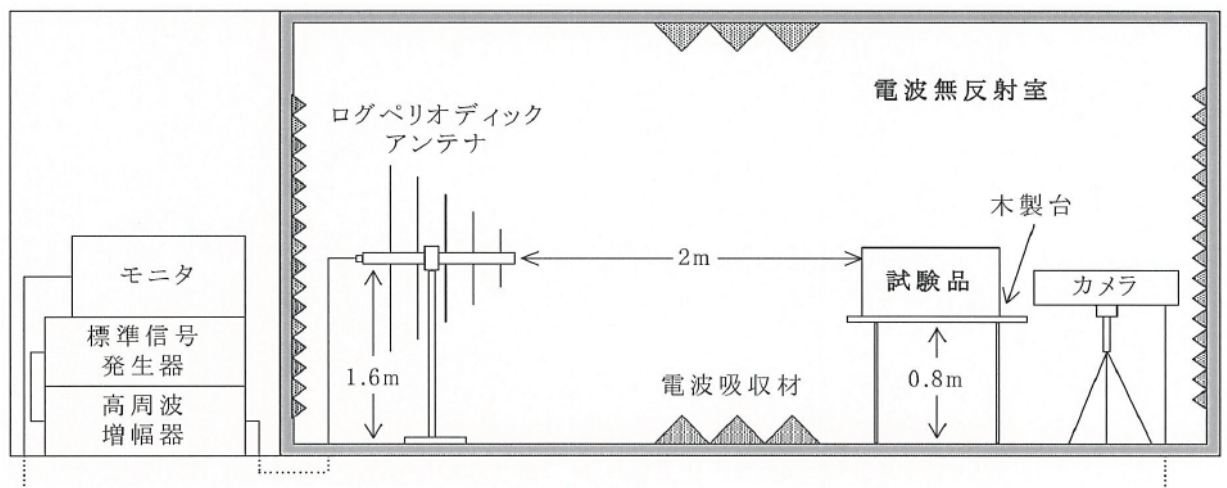
熱電発電温度センサには、実際に加熱し、動作状態で静電気イミュニティ試験を行った。静電気を掛けても通信や動作に影響なく、上記試験結果のように全ての条件において適合する事が証明された。

9.5.2 高周波放射電磁界イミュニティ試験

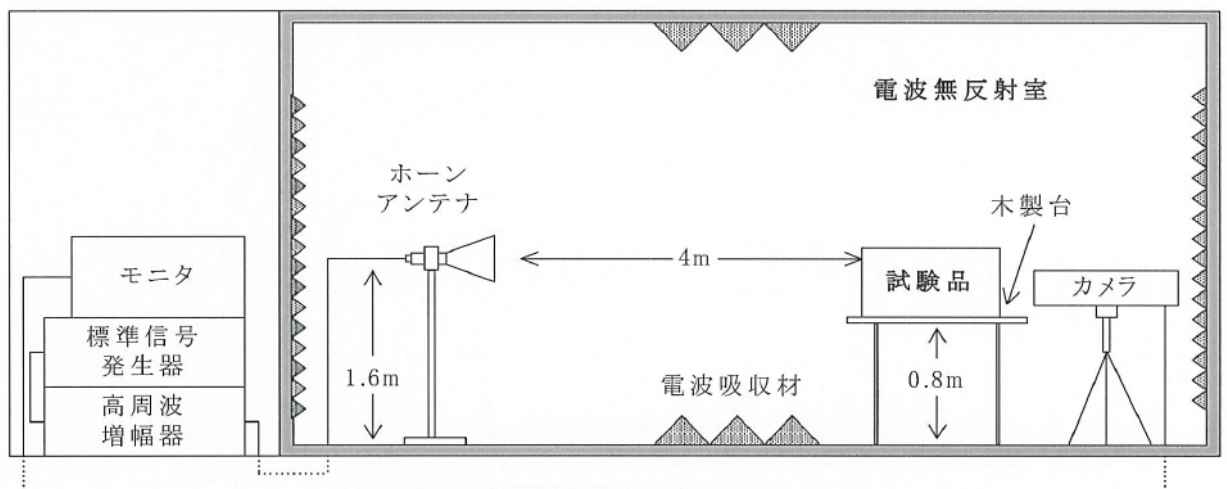
Test No.14 高周波放射電磁界イミュニティ試験 IEC61000-4-3

Electromagnetic field IEC 61000-4-3	Frequency range: 80 MHz to 2 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.
---	---	---

この規格は、電気及び電子機器の放射電磁エネルギーに対するイミュニティについて適用される。試験レベルと試験方法を定め、無線周波数電磁界下における電気及び電子機器の性能評価の共通標準を目的として規定される。



周波数範囲: 80MHz-1000MHz



周波数範囲: 1000MHz-2000MHz

図70 高周波放射電磁界イミュニティ試験の機器設置例



図 7 1 80MHz-1000MHz 帯にて電磁波を与えている様子

表 1 3 試験結果

試験方向	偏波面	試験レベル(V/m)	試験判定	試験結果
前面	水平	10	B	不適合(注)
	垂直	10	B	不適合(注)
背面	水平	10	B	不適合(注)
	垂直	10	B	不適合(注)
左側面	水平	10	B	不適合(注)
	垂直	10	B	不適合(注)
右側面	水平	10	B	不適合(注)
	垂直	10	B	不適合(注)

上記試験結果の表のように、実際に電磁波を掛けると殆どの帯域で何らかの無線通信に支障が出た。特に実際に送受信に使う 900MHz 帯は大きな影響が出た。

上記試験時は、熱電発電温度センサの基板が入るケースは樹脂製であり、電磁波シールドに関して全く考慮されていない条件で試験をしている。

次に、影響を避ける方法としては何が効くかについて、条件を変えて試験を行った。試した試験条件は、

- ・ ケースを導電体で覆う、導電体を厚くする
- ・ 基板を導電体で覆ってシールドを行う
- ・ 基板と本体とを合わせて 2 重、3 重にシールドを行う
- ・ アンテナ位置の移動や有り無しで影響を確認する
- ・ アンテナまで導電体で覆う
- ・ 各部アースの有り無し

等である。

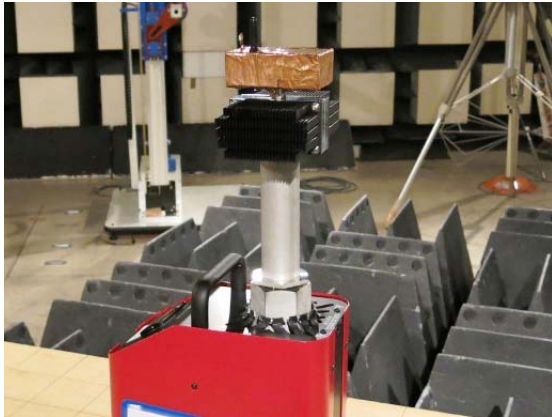


図 7 2 ケースを銅箔で包む

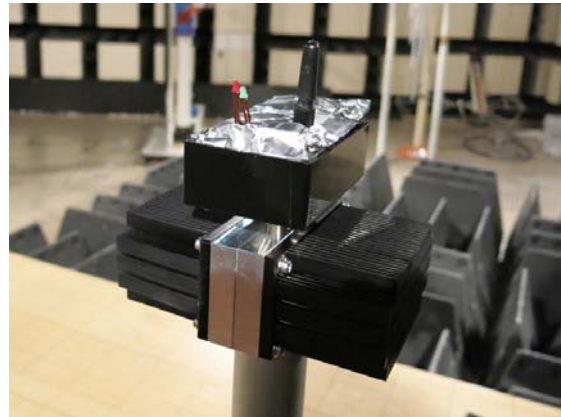


図 7 3 基板をアルミ箔で包む



図 7 4 ケースを厚い箔で包む



図 7 5 アンテナまで包む、アースする

銅箔のシールテープを巻くと、80-300MHz は良化したが、それ以上は状況変わらず。銅箔を巻くだけではあまり効果がなかった。

次に、熱電発電温度センサのヒートシンク、首部、キャリブレータの全てを接地したが、少し良化したが、大きくは改善せずあまり効果がなかった。

電界強度を 10V/m から CE マーキングの要求レベルである 3V/m で試験すると、著しく良化した。

基板シールドは効果があった。さらにケースのシールドを追加することで良くなる。

アンテナに掛かるように外部のシールドを上げると著しく良化した。しかし受送信に影響があり、電波強度は 5-10dbm 低下する。同時にアースの有り無しを確認したが全く影響はなかった。

やはり、垂直ダイポールアンテナから入る電磁波の影響が大きい事が判った。シールドケース内アンテナを収納し、900MHz 帯だけ通す電磁的な窓や、回路的に効果的なバンドパスフィルタが構成できれば回避できる可能性がある。また、受信送信帯域で除外しても良い領域以外の電磁波の影響を受けないように確実なシールド処理を行う必要がある。

9.5.3 放射性エミッション試験

Test No.19 放射性エミッション試験 CISPR16-1,16-2

Radiated Emission CISPR 16-2-3	For equipment installed in the bridge and deck zone. 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 – 2000 MHz : 54 dB μ V/m except for: 156 –165 MHz : 24 dB μ V/m For equipment installed in the general power distribution zone. 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 – 2000 MHz : 54 dB μ V/m except for: 156 –165 MHz : 24 dB μ V/m	•procedure in accordance with the standard but distance 3 m between equipment and antenna •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.
--	--	---

この規格は、供試体から外部へ放射される電磁波を規制する事で、他の製品への電磁的な影響を防ぐものである。特に 156-165MHz 帯に於いて、24dB μ V/m と非常に厳しい制限がある。この周波数帯は船舶通信（国際 VHF、船舶自動識別装置、捜索救助用位置指示送信装置）が使われる帯域である。

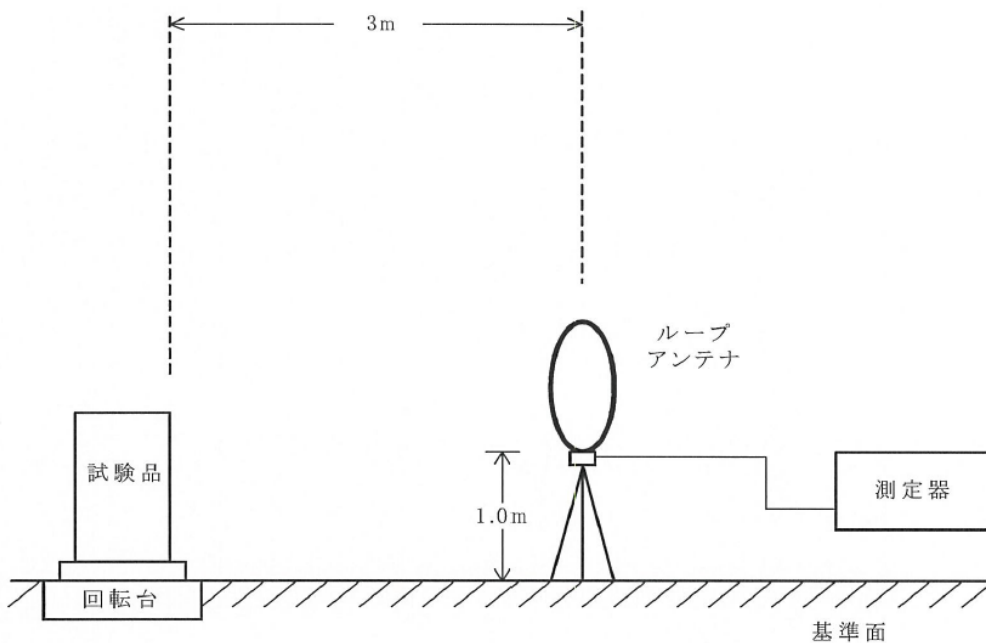


図 7 6 0.15MHz-30MHz 帯の計測例 (ループアンテナ)

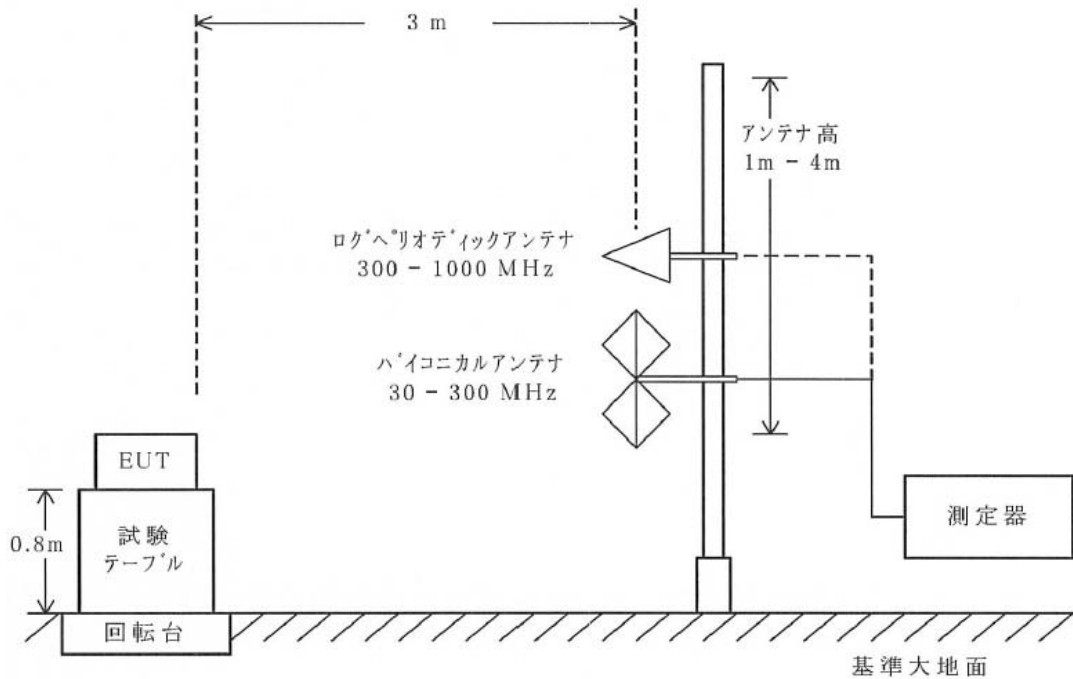


図 7 7 30MHz-1000MHz 帯の計測例 (バイコニカル、ログペリオディックアンテナ)

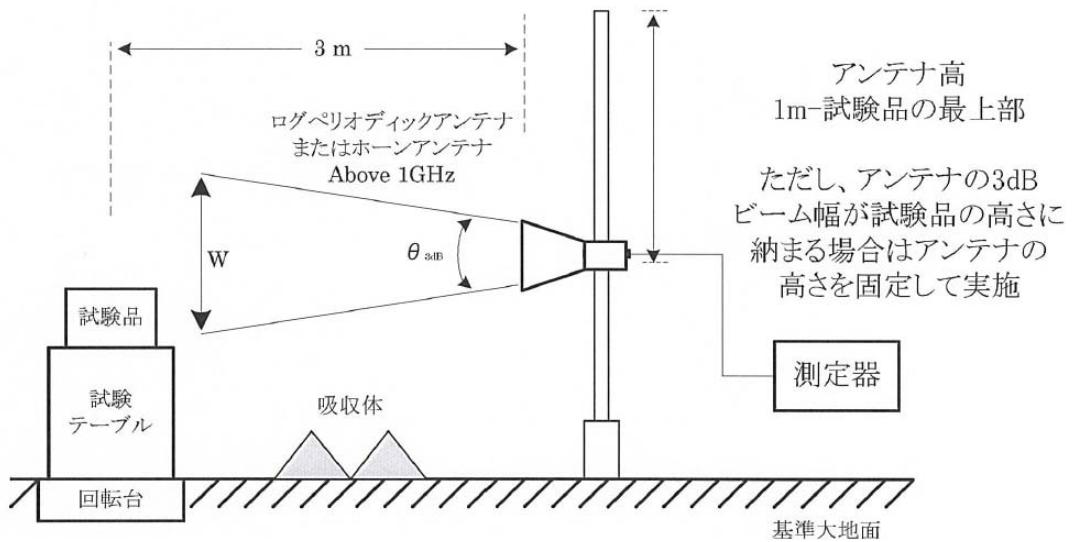


図 7 8 1GHz-3.0GHz 帯の計測例 (ホーンアンテナ)

●試験結果) 測定周波数範囲 : 0.15-30MHz 適合

許容値に対するマージン(準尖頭値) > 8.8 dB at 30.0 MHz

許容値に対する超過値 N/A dB at N/A MHz

測定値の不確かさ ±2.5 dB(2σ)

●試験結果) 測定周波数範囲：30-1000MHz 適合

許容値に対するマージン	<u>> 24.8</u> dB	at	<u>208.2</u> MHz
許容値に対する超過値	<u>N/A</u> dB	at	<u>N/A</u> MHz
測定値の不確かさ	30-300 MHz	<u>± 4.6</u> dB(2σ)	
	300-1000 MHz	<u>± 4.5</u> dB(2σ)	

●試験結果) 測定周波数範囲：1-2GHz 適合

許容値に対するマージン(尖頭値)	<u>> 24.6</u> dB	at	<u>2000</u> MHz
測定値の不確かさ	測定周波数範囲 <u>1-6</u> GHz	測定距離：3m <u>± 5.0</u> dB(2σ)	
測定距離	<u>3</u> m		

上記のように、全ての帯域にて規制値を下回り、適合している事が証明された。

9.5.4 EMC 試験のまとめ

供試体は計測した値を無線電送し、電力は自己発電で供給する機器であるため、外部配線は存在しない。その為、通常 EMC 試験として行われる、伝導低周波妨害イミュニティ試験、伝導高周波妨害イミュニティ試験、ファストトランジェントバーストイミュニティ試験、サージイミュニティ試験、伝導性エミッション試験が適用除外になることから、適用できる3つの試験のみを行った。

今回行った3つの試験の内、静電気イミュニティ試験と放射エミッション試験は問題なく適合した。

高周波放射電磁界イミュニティ試験では問題が生じた。当該供試体は無線機が実装されていることもあり、高周波放射電磁界イミュニティ試験で問題が生じる事は予想していた。そして、どの程度のシールドが効果有るのかを探るため、まず全くシールド保護無しで試験を行ったため、試験結果としては不合格という判定となっている。

船用規格では、ハンドヘルドの無線機等を近くで操作するような場面が考えられるため、電磁放射の強度が10V/mという一般的なレベルより強力に電磁波が掛かる環境が想定されている。供試体を受ける影響もかなり大きく、シールド無しでは多くの帯域で通信不能となり、本体のシールドを強化するにつれて影響が減った事からも、基

板自体のシールドと筐体シールドを徹底して行う必要があることが明確になった。

なお、高周波放射電磁界イミュニティ試験では供試体が使用する 900MHz 帯では、大きな影響が出たが、IEC60945 (JIS F0812) では、供試体が無線受信機を含んでいる場合、狭帯域受信機応答 (スプリアスレスポンス) と共に除外帯域内の周波数は、伝導干渉及び放射干渉に対するイミュニティ試験から除外する。受信機の除外帯域は製造業者が申告する受信機の動作周波数の両端で、帯域周波数の端の 5% だけ延長した帯域で定義する。となっており、除外できる規定が有る。

10. まとめ

10.1 成果について

平成 24 年度に実施した FS 事業での研究開発では、エネルギーハーベスティング技術のうち、熱電発電技術と振動発電技術の船用ディーゼル機関への適用可能性の調査・研究を行った。平成 26 年度に実施した当該研究開発において、船用ディーゼル機関への適用は“熱”が最も適していると判断できた。今回、ディーゼル機関が発生する熱のうち“排気温度”をターゲットに、熱電発電で発電した電力を使い無線通信を行う熱電発電無線排気温度センサの製品化を目指した。一次試作、二次試作を完成し、供試体を使用して各種試験を実施し、本年度の事業計画は全て終了し、以下の成果が得られた。

1) 開発前事前調査 (市販品の仕様、先行技術調査、仕様の策定)

市場の製品について調査を行った。熱電発電技術を利用した船舶用の排気温度センサとして開発されたものはなく、プラント用や一般用でも温度計測するセンサとして市販されているものはほとんどなかった。ABB 製で同等形状の製品が合ったが、それは電池を内蔵しており、熱電発電は電池寿命の延長用に使われているものであった。また、特許公報調査により、広く一般的な技術として公知であり、製品化や販売ができなくなるような強固な特許権は存在しない事が判った。即ち、市場に無い製品として製品化を目指す意味がある事が判った。

2) 熱電発電型排気温度用高温センサの設計開発

熱電発電の発電電力量が大きければ大きいほど、回路構成や機能の実装、無線通信等の全てに余裕ができることから、発電電力量を大きくするための基本である熱電発電素子の上下面に与える温度差を拡大すべく、金属系からカーボン、ヒートパイプに至る色々な素材の比較実験を、一次試作品を利用して行い、最適な組合せを見つけた。

また、コンピュータシミュレーションの為に熱電発電無線排気温度センサの解析モデルを作成し、得られた試験結果と合わせ込む事で、伝熱シミュレーションを行える

環境が整った。これは製品化段階で機構や性能の解析、評価及び目処付けが可能となる技術である。これらの一次試作の知見を元に、さらに性能拡大を目指した二次試作品を完成させた。

二次試作品は、一次試験でのウイークポイントを改善改良し、より製品に近いものとして構成する事ができた。二次試作品は首長さ 50mm タイプ、100mm タイプ、150mm タイプの 3 種類を開発した。



図 7.9 二次試作の成果物 熱電発電無線排気温度センサ(子機)、無線親機端末

3) 受信システムの設計開発

同時に 32 台の熱電発電無線排気温度センサ (子機) と 1 台の無線端末 (親機) で協調動作する 920MHz 帯無線の通信プロトコルを開発した。通信手順は 1 秒間隔での通信が可能であり、熱電発電温度センサは、自分自身が通信するわずか 25mSec 以外は全てスリープ状態とすることで省電力通信を実現した。また、周波数を定期的にホッピングする事や 10 件の温度計測データを補完する機能を設け、外部無線妨害やノイズ等によるパケット欠落を補完する技術を盛り込むことができた。無線通信は 15×30m のディーゼル機関が複数台ある定盤に於いて問題なく端まで到達することが確認でき、機関室程度大きさの閉鎖空間では問題なく使用できる事が分かった。

4) 機能、耐久性試験

2 次試作品は、当社製 6DC-32 ディーゼル機関に搭載し、各部の温度計測や発電電力計測、振動計測、無線通信計測等を行った。温度キャリブレーションを使用した試験と比べ、ディーゼル機関搭載時はシリンダヘッドの冷却構造により熱が予想以上に逃げるため、熱電発電素子に与える温度差が少なくなり、発電電力も少ないことがわかった。その結果、ディーゼル機関に搭載した状態では約 3 秒ごとの通信速度となり、予定していた 1 秒ごとに連続通信を行うことが出来なかった。なお、温度キャリブレーションに

て熱を加えれば予定通りの 1 秒間隔での通信は可能であるため、内部の伝熱構造の改良にて対応が可能である。また、船級の型式承認時に要求される IACS UR E10 に準拠した EMC 試験を実施した。静電気イミュニティ試験と放射性エミッション試験は問題なく完了したが、高周波放射電磁界イミュニティ試験は電波を受けると誤動作が生じるため、その対応策を含めて詳細調査を行った。なお、外部配線が全くない製品であるため、他の多くの EMC 試験の項目は適用除外とすることができた。耐久試験は、二次試験に於いてディーゼル機関に設置し、無負荷から 100%負荷までの間で運転しているが、特に不具合は発生することなく、センサとして問題なく動作する事を確認できた。

10.2 商品化について

本開発の実施により、商品化開発時の問題点や改良点が把握できた。

形状や伝熱構造に関しては相応の進歩を得られたが、特に発電電力を有効活用するための電源効率向上の問題が浮き彫りとなった。また、発電性能を重視したため、商品として適正コストとなるための改良等も必要となる。

従って、今回の開発結果を基に更なる開発や改良が必要であり、今後の開発と商品化は以下のように進める予定である。

2015 年度 熱伝導構造の改善と電源回路改善と発電効率向上の開発研究
2016 年度 試作品及び実機試験等による改善、及びコストダウン改良
2017 年度 最終製品試作及び検証等、サンプル出荷
2018 年度 長期テスト運用
2019 年度 通常出荷

11. 目標達成度

1 年間の技術開発成果を、当初目標からの達成度で自己評価すると以下の様になる。

1) 市販品の仕様・先行技術調査・仕様の策定

市場調査、特許公報の調査を実施し、プロセス機器の供給電源や、温度計の様なものは幾つか存在するが、舶用分野に提供しようとする同等のコンセプトの製品は無く、製品化を目指す意義がある製品ということが判断でき、製品仕様策定を完了できた。

2) 熱電発電型排気温度用高温センサの設計開発

一次試作、二次試作を経て、熱電発電素子が発電する電力のみで自立的に動作する

排気温度センサを開発できた。また、目標としたコンスタントな 1 秒ごとのデータ送信が実現できた。ただし、ディーゼル機関に搭載しての試験ではエンジン側の冷却構造が原因で 3 秒毎のデータ通信となることがわかり、更なるセンサ側での伝熱構造や断熱構造の改良が必要なことが分かった。

3) 受信システムの設計開発

子機となる熱電発電無線排気温度センサと親機となる受信システムのプロトコルを完成させ、最大 32 台の協調制御が行われ、滞りなく運用できる事が確認出来た。

通信プロトコルには更なるノイズ耐性の強化や子機起動時の処理などの改良の余地がある。

4) 機能、耐久性試験

当社ディーゼル機関に設置しての機能試験を行った。無線に関しては 32 台の熱電発電無線排気温度センサをディーゼル機関に設置するのは現実的でないため、単体モジュールを使って動作確認している。また、外部検査機関による EMC 試験や通信距離、回り込み、建屋内の電波状況なども総合的に計測した。機能は全て実現できた。

二次試作品は当社製ディーゼル機関に設置し、実運用状況での確認を行ったが、現時点では耐久性に問題はなかった。

1 2. 報告書作成

平成 26 年度の委託契約書に則り、本報告書を作成した。

1 3. 謝辞

本研究開発は、日本舶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、研究開発の過程に於いて、株式会社村田製作所には素子供給や回路設計、シミュレーション解析等について、株式会社チノーには試作品の製造、各種試験について、アーズ株式会社には無線装置の回路、プロトコル設計、製造及び、各種試験等に数多くのご協力を頂いた。ここに感謝の意を表する。

1 4. 参考文献

- ・竹内「エネルギーハーベスティングのアプリケーション/市場動向：電気通信情報学会 信学技報 IEICE Technical Report SDM2011-81, ICD2011-49(2011-8)
- ・竹内「エネルギーハーベスティング技術」：静電気学会誌 35, 5(2011)192-196
- ・T. Armstrong「エネルギーハーベスティング電源回路の効率向上がカギ」日経エレクトロニクス 2011. 1. 10 p83-90
- ・竹内「エネルギーハーベスティングの現状」：伝熱 Journal of the Heat Transfer Society of Japan ISSN 1344-8692 Vol. 52, No. 218 2013. 1 p1-6
- ・中寺「エネルギーハーベスティングを利用したワイヤレスセンサネットワーク」：伝熱 Journal of the Heat Transfer Society of Japan ISSN 1344-8692 Vol. 52, No. 218 2013. 1 p13-20
- ・甲斐田「環境発電のワイヤレスセンサーネットワークへの応用」：伝熱 Journal of the Heat Transfer Society of Japan ISSN 1344-8692 Vol. 52, No. 218 2013. 1 p21-29
- ・梶川「熱あるところに“熱電”あり！前編、中編、後編」：SAWS 2003 spring
- ・小貫「マイクロ熱発電」：静電気学会誌, 35, 5(2011)208-213
- ・舟橋「Monolithic oxide-metal composite thermoelectric generators for energy harvesting」 JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 109, 124509(2011)
- ・河本「排熱回収用高効率熱電変換材料の研究開発動向」 科学技術動向 2008. 9
- ・川本他「熱電変換材料-ビスマステルルを超える熱電セラミックスの開発」セラミックス 45(2010)NO. 7
- ・阿部「エネルギーハーベスティング用熱電変換デバイス：技術と応用」：伝熱 Journal of the Heat Transfer Society of Japan ISSN 1344-8692 Vol. 52, No. 218 2013. 1 p7-12
- ・IEC61000-4-2 静電気放電イミュニティ試験規格関連資料：菊水電子工業
- ・IEC61000-4-3 放射無線周波電磁界イミュニティ試験規格関連資料：菊水電子工業
- ・RF ワールド No.21 船舶と無線システム：CQ 出版社
- ・図解伝熱工学の学び方：オーム社：西川兼康
- ・実用ヒートパイプ第2版：日刊工業新聞社：日本ヒートパイプ協会
- ・梶川「高効率熱電変換システムの開発」プロジェクトについて：財団法人エンジニアリング振興協会 熱電発電フォーラム 2005.10.31
- ・河本「科学技術動向：廃熱回収用高効率熱電変換材料の研究開発動向」：文部科学省科学技術政策研究所科学技術動向研究センターNo.90



「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)日本舶用工業会

〒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>