

平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業  
「地滑り・公共インフラ老朽化監視用低コスト・多機能  
・高精度計測システムの研究開発」

研究開発成果等報告書  
【平成24～26年度】

平成27年 3月

委託者 九州経済産業局

委託先 公益財団法人北九州産業学術推進機構



## 目次

第1章 研究開発の概要	4
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	4
1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	9
1-3 成果概要	13
1-4 当該研究開発の連絡窓口	18
第2章 本論	19
【1】多機能変位計測システムの開発	19
【1-1】多機能変位計測機器（システム）の設計・開発・製作	19
【1-2】多機能化のためのパイプ構造・センサ組込み ・防水処理法の開発	20
【1-3】多機能基板組込みの実証試験	21
【2】非接触給電・通信方法の開発	23
【2-1】非接触給電・通信方法のセンサ計測基板への適用技術の製作 設計開発と製作	23
【2-2】非接触給電・通信機能を搭載した基板による常時計測データ の長期性能評価試験実施	24
【3】高信頼・高精度の自動変位計測機器の開発	25
【3-1】高精度水晶 MEMS 傾斜角センサの設計開発（シミュレーション、 MEMS デバイス設計、製作、評価）	25
【3-2】高精度水晶MEMS 傾斜角センサの計測基板への適用方法の 設計・ソフト開発と基板製作	25
【3-3】高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ適用基板による微小角度変位 計測の長期性能評価試験実施	27
【4】プロジェクトの管理・運営	28
最終章 全体総括	28

# 第1章 研究開発の概要

## 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

### 1) 研究開発の背景・研究目的

#### ・地滑り監視

近年増大する自然災害により、地すべり危険地域の効率的監視体制構築の社会的要求が増し、旧来のアナログ計測から、デジタル化による多機能小型計測システムの開発が求められている。

従来技術ではメカ式センサ、或いはアナログ信号の技術で可能なデータ観測が実施されていた。その後、土木事業界では電子・デバイスの革新技术を取り入れることも少なく、現在に至っている。

地滑り監視においては、傾斜・ひずみ・水圧などの計測が必要であるが、一か所(一項目)の計測ごとに1本の観測パイプが必要で、それを設置するためのボーリング工事費が高額のため、複数箇所の計測では多額の費用が必要となる。本研究開発では、最新のセンサーデバイス技術を活用して、複数のセンサを集積したデバイスを作製し、一本の観測パイプで複数(傾斜角・方位・温度・水圧)の計測ができる多機能化を図る。また、地中の計測においては、地下水が浸透してセンサの劣化を来すため、センサの寿命は1.5~3年で、長期観測3~5年というニーズに応えきれないため、本研究開発ではセンサへの給電や信号通信を非接触化することで、センサ部を樹脂に埋め込み、耐水性を向上させて長寿命化を図る。

図1-1に地すべり動態観測において現在用いられている計測・監視手法を示す。この中で主に地中変動を計測・監視する手法は赤枠に示す孔内傾斜計(設置型・挿入型)、地中伸縮計、多層移動量計、パイプ歪計である。

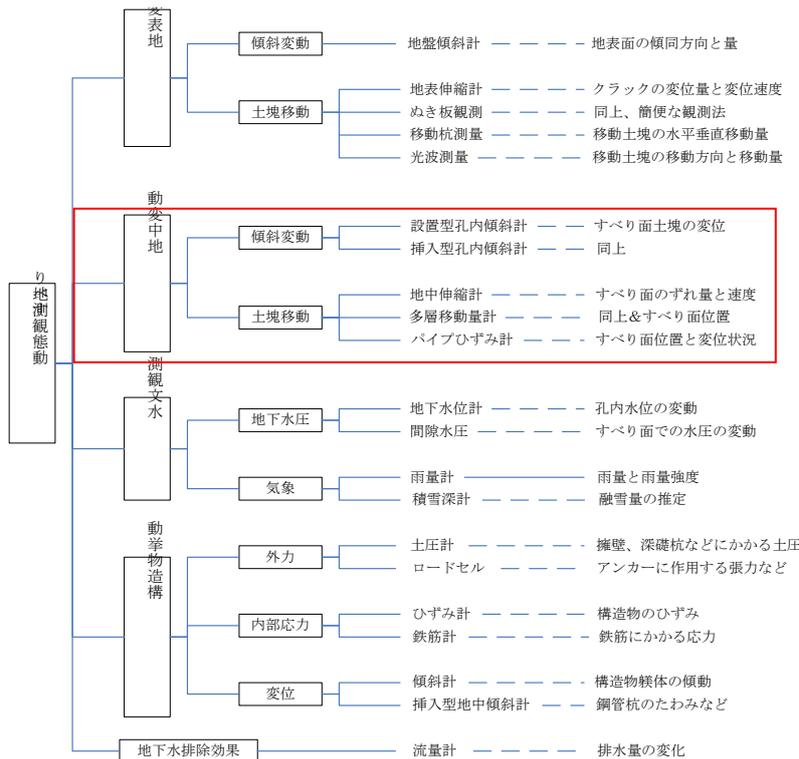


図1-1 地すべり動態観測における計測・監視手法(地すべり観測便覧より引用)

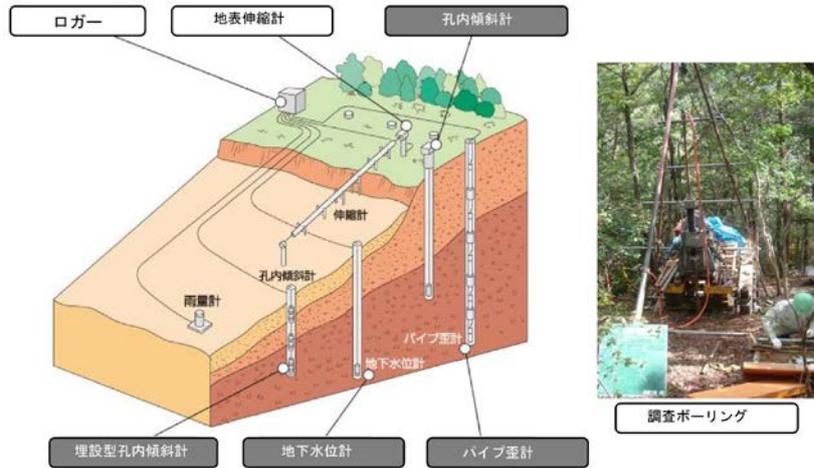


図 1-2 地すべりにおける地中変位計測のイメージ

<多機能地中計測器の開発意義>

地中変動を計測・監視する手法の中で、現在一般的に用いられるのは孔内傾斜計(挿入型)、パイプ歪計の2つである(図 1-2 参照)。

これらの計測器にはそれぞれ長所、短所があり、例えばパイプ歪計は機器が安価で地下水観測が並行で計測可能であるが、計測値が歪値で出力されるため、変位量に換算できなく短寿命であり、孔内傾斜計は高精度で定量的な値が得られるが、機器が高価で地下水観測の為に別孔が必要である。

多くの現場では、高精度で定量的なデータが得られる孔内傾斜計を採用したいが、費用の面からパイプ歪計を採用するケースが多くなっているのが現状であり、パイプ歪計・孔内傾斜計の長所・利点を複合した計測器が求められている。

上記背景から、本研究開発では水位計観測を行うための水位計挿入空間を設けた異型パイプに高精度加速度センサを内蔵した計測器を開発することとした(図 1-3 参照)。さらに方位センサ、圧力センサ、温度センサを加え多機能化し、連続計測することにより、従来の計測器では得られなかった土塊や地下水の挙動が把握でき、より精度の高い地中変動の計測・監視が可能となる。

計測機名	測定目的	長 所	短 所
パイプ歪計	すべり面位置の決定	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓機器が<b>安価</b></li> <li>✓簡便</li> <li>✓自動観測可能</li> <li>✓地下水観測が<b>並行計測可能</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓<b>短寿命</b>(地下水の浸透)</li> <li>✓<b>値=変位量ではない</b></li> <li>✓深度が深くなると孔径が大きくなる</li> </ul>
孔内傾斜計	すべり面位置の決定 土塊変位量の測定	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓高精度</li> <li>✓<b>定量的(角度)なデータが得られる</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓不良データ</li> <li>✓機器が<b>高価</b></li> <li>✓自動観測は非常に<b>高価</b></li> <li>✓地下水観測は<b>別孔必要</b></li> </ul>

パイプ歪計・孔内傾斜計の計測器の長所・利点を複合し、これに傾斜方位、圧力、温度センサを加え多機能化

- ✓加速度センサ=地中の傾斜角度を連続的に自動観測
- ✓方位センサ=傾斜角度の方向を計測
- ✓圧力センサ=地中の間隙水圧を計測
- ✓温度センサ=水温、地温を計測
- ✓パイプ歪計より寿命が長く、長期間の観測が可能
- ✓孔内傾斜計より安価
- ✓既存の水位計により自由水位も計測

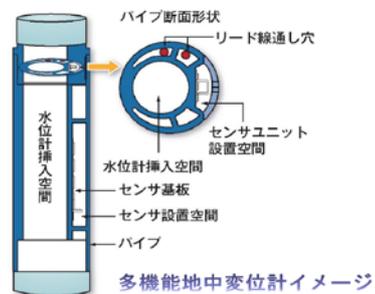


図 1-3 多機能地中変位計の開発意義

## ・公共インフラ老朽化監視

わが国の大型土木構造物を含む公共インフラは60年代から投資が急激に増加し、それから50年を経過し、今後更新が必要な、老朽化インフラの増加が大きな問題となっている。

日本の公共投資は高度成長期に入る60年代から、90年代バブル後の景気対策まで、一貫して増加してきた。その結果、更新時期を迎えた老朽化インフラが急激に増加している。現ストック更新だけで今後50年間で190兆円を必要とする国の試算があり、その全ての老朽化インフラの対策整備を短期的に行うことは困難を伴う。

米国のインフラ崩壊例を見て、今後、国内においても急激に増大する老朽化インフラの監視に手が回らなくなるのは明らかである。限られた予算の中で老朽化インフラから人命や社会経済的被害を防止するには、危険個所の異常状態を人手による感応検査から常時監視の自動化システムへ切替え、早期に危険性を予知することが災害予防コストの低減、被害の最小化のために効果的・効率的であると考えられる。そこで、低コストで多点を常時遠隔監視できる高精度の変位計測システムの開発は将来の社会不安の解消、安全安心に必須のアプローチとなる。

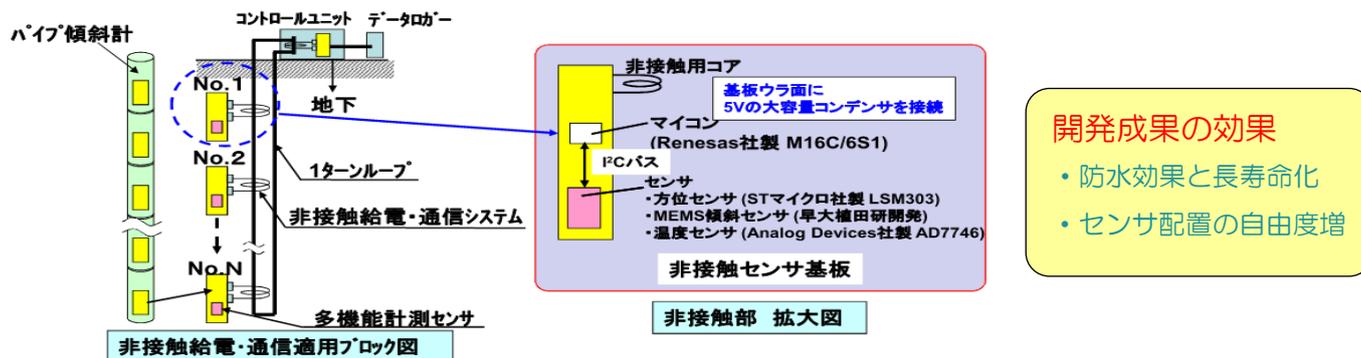
公共インフラ老朽化監視においては、高精度・多点計測の自動化が必要とされており、地滑り監視システムで構築した技術をベースに非接触給電・通信技術の開発とセンサの高精度化を図ってシステムを構築する。

このように、高度な電子・デバイス技術を取り入れ、小型高密度、多機能、高機能を実現し、低コスト、機器の長寿命化を達成し、土木工事業界の各種データ観測技術を飛躍的に向上させる。

非接触給電・通信方法の開発においては、ケーブルとセンサ基板の境界部からの水分浸透防止のため非接触給電・通信方式を開発する。非接触給電・通信方式は電源・通信線を一本のワイヤーを非接触でセンサ近傍に通すことで実現する(図 1-4 参照)。

高信頼・高精度の自動変位計測機器の開発では計測用パイプ断面の狭い空間(約 3.5cm<sup>2</sup> の扇形空間)に設置可能な高精度水晶傾斜角センサ(楕円構造容量型, 精度±0.001°)を開発する。微小変位を掴むことが可能となり、公共インフラ等の老朽化の度合いを数値管理できる。

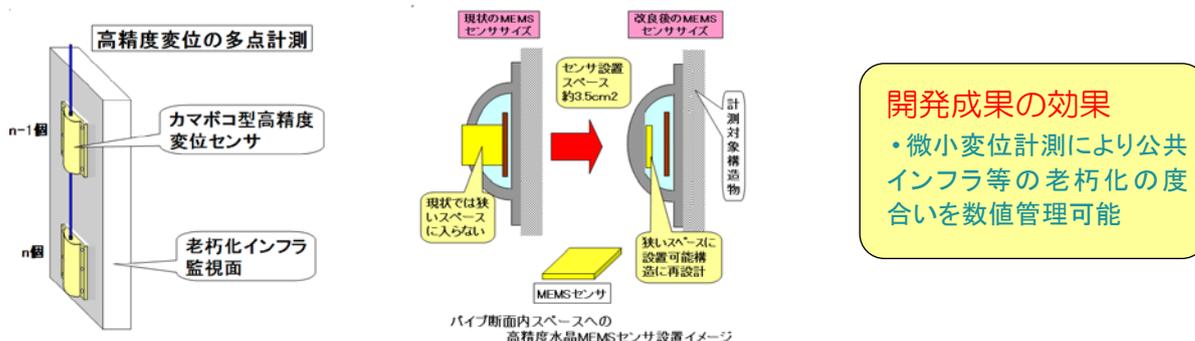
近い将来に予測される社会インフラの急激な老朽化に対して、自動監視を行い個々の計測システムと連携させることで信頼性の高い監視・計測システムを構築し、社会不安を解消することができる。(図 1-5 参照)



**開発成果の効果**

- ・防水効果と長寿命化
- ・センサ配置の自由度増

図 1-4 非接触給電・通信方法の開発 イメージ



**開発成果の効果**

- ・微小変位計測により公共インフラ等の老朽化の度合いを数値管理可能

図 1-5 高信頼・高精度の自動変位計測機器の開発 イメージ

## 2) 研究目標

従来技術ではメカ式センサ、或いはアナログ信号の技術で可能なデータ観測が実施されていた。その後、土木工事業界では電子・デバイスの革新技術を取り入れることも少なく、現在に至っている。そこで、現在の電子・デバイス技術を取り入れ、小型高密度、多機能、高機能を実現し、低コスト、機器の長寿命化を達成し、土木工事業界の各種データ観測技術を飛躍的に向上させる。それで、ア.小型化・高密度集積化、イ.耐環境性、エ.低コスト化を高度化目標に掲げ、以下に示すサブテーマ【1】、【2】、【3】毎に目標を設定して研究開発を実施した。

### 【1】多機能変位計測システムの開発

大目標……『地滑り監視の施工・計測業務コストの革新的削減のため、  
多機能(加速度、方位、温度、圧力)変位計測機器(常時計測システム)を開発する』

#### 1) 多機能変位計測機器(システム)の設計・開発・製作

- 目標……(i) 単機能センシング→4機能センシング集積化と多重化信号変換処理回路の開発・製作
- (ii) 個々のセンサ精度を合わせ持つ多機能変位計測ソフト開発と遠隔地送信機能システム化

センサ精度 ①角度精度…… $0.1^\circ$  (測定範囲 $\pm 30^\circ$ ) ②方位精度  $\pm 2.5^\circ$  以内  
③温度精度  $\pm 0.5^\circ$  以内 ④圧力精度  $10^3$  Pa(0.1m水柱圧)

#### 2) 多機能化のためのパイプ構造・センサ組込み・防水処理法の開発

構造・工法開発……機能・性能の確保と防水と土圧にパイプ一体強度を極力保てる構造及び作業短縮可能な工法を開発する

- 目標……(i) 水位観測孔の確保かつ、センサケース、配線を収納 防水性 IP68 相当以上  
部品(電子部品、樹脂部品)……廉価部品選定評価と成形部品化によるコストダウン  
○コスト目標…… 8,000 円→4,500 円以下(コスト 60%以下)
- (ii) 土圧に対しパイプ一体強度を保つ構造と最適充填剤の評価決定。溶着方式の確立。  
組立・施工工数短縮……組立工数短縮のため樹脂自動溶着化と施工作業時間短縮化の  
部品構造検討  
○組立・施工工数削減目標……46min/m→23min/m(工数 50%以下)

#### 3) 多機能基板組込みの実証試験

地滑り地域を選定し多機能(加速度、方位、温度、圧力)計測データの長期評価の実証試験を実施する。

### 【2】非接触給電・通信方法の開発

大目標……『長寿命達成を目的としたセンサ部と給電・通信ケーブル分離のための非接触給電・通信方法を開発する』

#### 1) 非接触給電・通信方法のセンサ計測基板への適用技術の設計開発と製作

地下水中でケーブルとセンサ制御基板境界部への水分浸透防止のため非接触方式開発  
(非接触給電・通信方式設計、その試作素子の製作とセンサ基板への適用技術の設計開発)

- 目標……非接触で30m、16チャンネルのセンサと給電・通信を達成する
- #### 2) 非接触給電・通信機能を搭載した基板による常時計測データの長期性能評価試験実施
- 目標……長寿命化 5年以上(事業終了後も性能評価試験継続)

### 【3】高信頼・高精度の自動変位計測機器の開発

大目標……『社会不安化する老朽化公共インフラの安全監視のため、高信頼・高精度の自動変位計測機器を開発する』

#### 1) 高精度水晶 MEMS 傾斜角センサの設計開発(シミュレーション、MEMS デバイス設計、製作、評価)

パイプ傾斜計用途の超小型高精度傾斜角センサの開発

●目標…(i)パイプ内配置するセンサ断面積(120mm<sup>2</sup>以下)の実現 (センサ配置空間断面積  
350mm<sup>2</sup>)

(ii)角度変位精度  $\pm 0.001^\circ$  (ダム堤体のたわみ観測のプラムラインの変位 $\pm 0.1\text{mm}$ 相当)

2)高精度水晶 MEMS 傾斜角センサの計測基板への適用方法の設計・ソフト開発と基板製作

高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ計測機能を追加したセンサ計測基板の開発

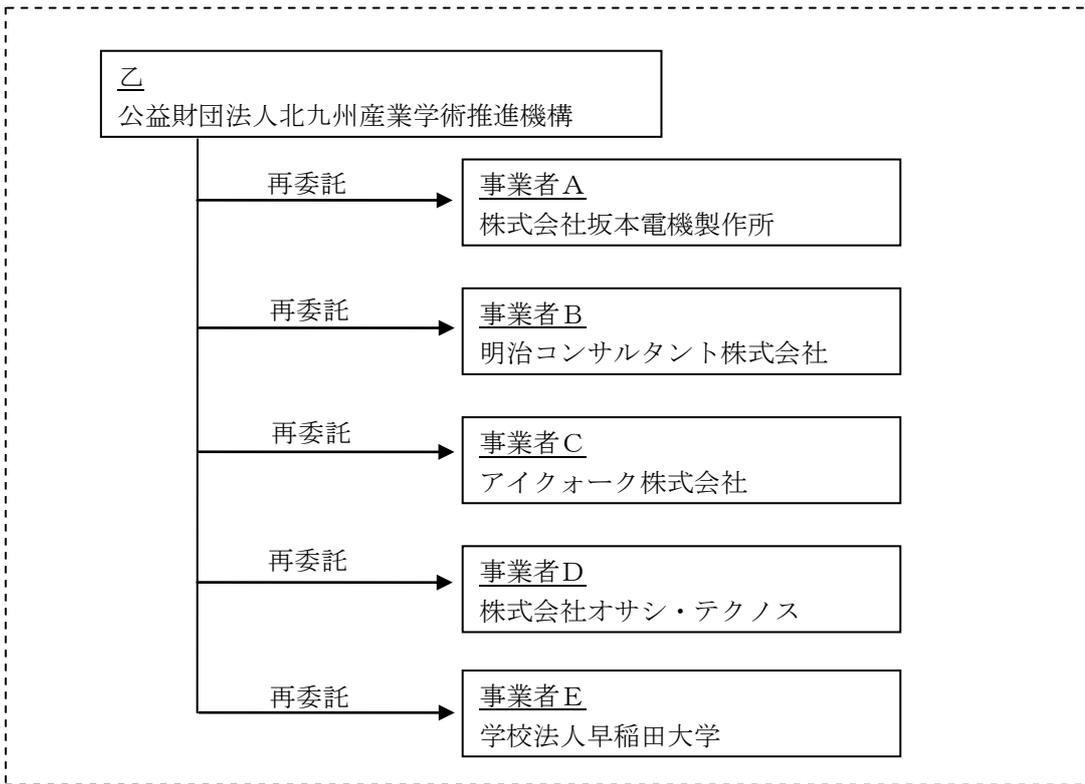
●目標…高精度水晶 MEMS 傾斜角センサのデータの多重化信号変換処理へ組み込みソフト・回路の完  
成

3)高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ適用基板による微小角度変位計測の長期性能評価試験実施

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織(全体)



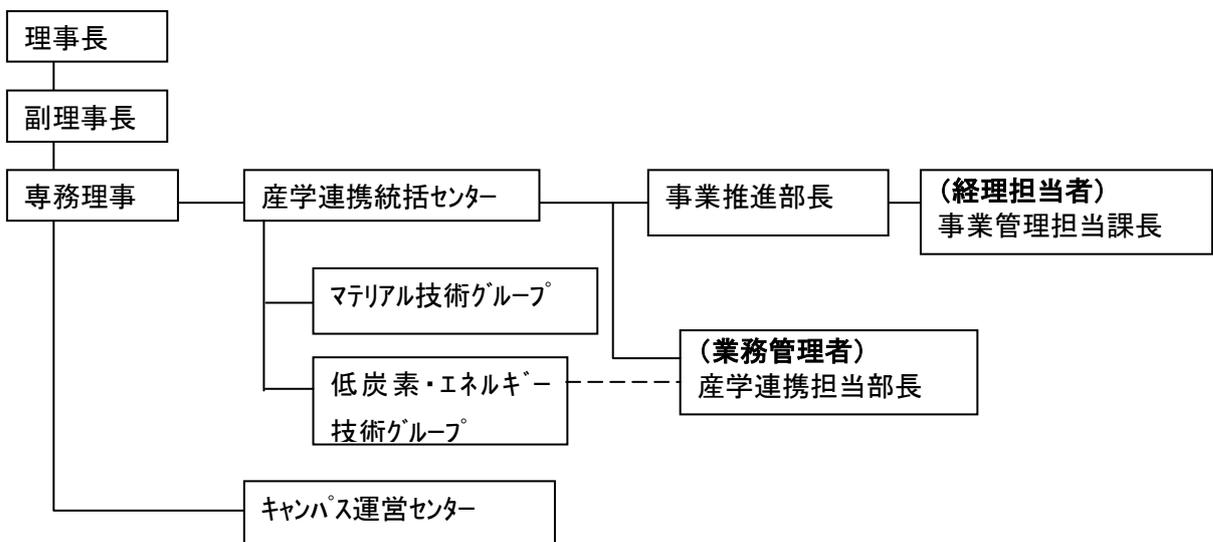
総括研究代表者（PL）  
株式会社坂本電機製作所  
開発部長  
國友 建

副総括研究代表者（SL）  
明治コンサルタント株式会社  
事業開発室技師長/新技術担当部長/  
本店防災部長(兼務) 納谷 宏

2) 管理体制

① 事業管理機関

[公益財団法人北九州産業学術推進機構]

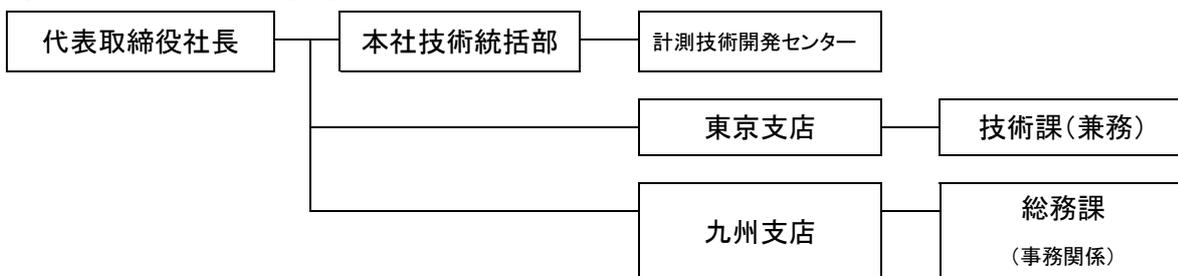


②(再委託先)

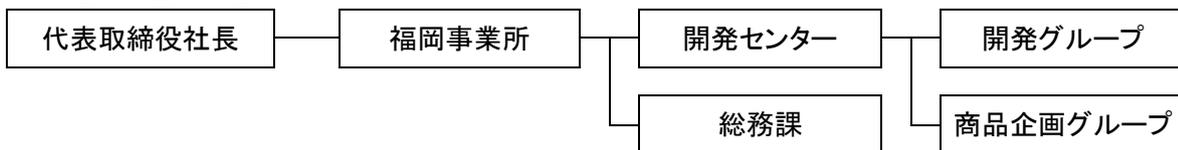
株式会社坂本電機製作所



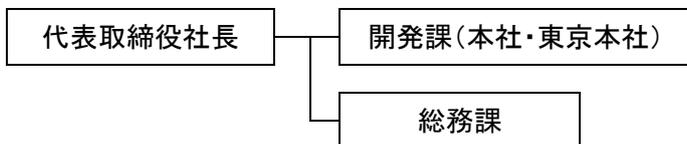
明治コンサルタント株式会社



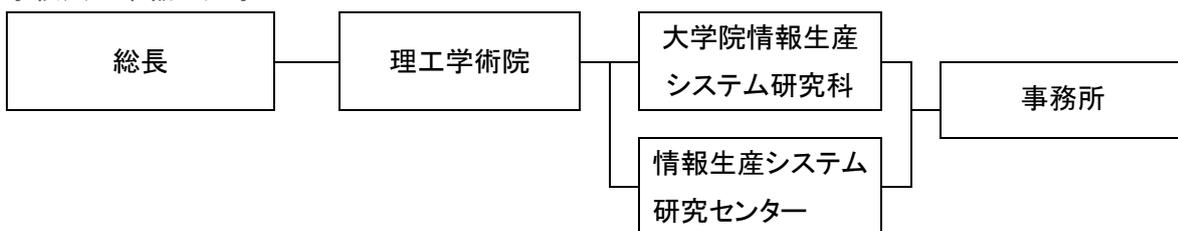
アイクオーク株式会社



株式会社オサシ・テクノス



学校法人早稲田大学



(2) 管理員及び研究者

【事業管理機関】 公益財団法人北九州産業学術推進機構

①管理員

氏名	所属・役職	備考
野田 松平	産学連携統括センター低炭素・エネルギー技術グループ長	
貝田 博英	産学連携統括センター 産学連携担当部長	
牛島 雄二	産学連携統括センター 産学連携担当部長	
湯村 隆史	産学連携統括センター 事業推進部事業管理担当課長	
白橋 可奈子	産学連携統括センター 事業推進部事業管理担当	

【再委託先】

株式会社坂本電機製作所

氏名	所属・役職	備考
國友 建	開発部長	
山本 保則	開発部部長(品質保証部長兼任)	
宮地 優	生産統括部設計グループ課長	
高森 政聡	開発部 研究員	
播磨 幸一	開発部 研究員	

明治コンサルタント株式会社

氏名	所属・役職	備考
納谷 宏	技術統括部計測技術開発センター所長/事業開発室技師長/本店防災部長(兼務)	
林田 昇	技術統括部計測技術開発センター主任/事業開発室主任(兼務)	
松門 祐二	東京支店技術課主任/事業開発室主任(兼務)	

アイクオーク株式会社

氏名	所属・役職	備考
立石 憲治	代表取締役社長	
進藤 春男	開発センター 主任技師	
手塚 辰雄	開発センター 電子開発部長	
下台 菊乃	開発センター 課長	
見戸 理	開発センター ソフト開発部長	
甲斐 裕敏	開発センター 課長	
佐々木 秀之	開発センター 担当課長	
沖田 康範	開発センター 開発推進室長	
森田 博彦	開発センター 担当課長	
桑木野 賢一	開発センター	

株式会社オサシ・テクノス

氏名	所属・役職	備考
古島 広明	開発課 課長(東京本社)	
須崎 貴広	開発課 係長(本社)	
近藤 功二	開発課 係長(本社)	
青木 寛明	開発課(本社)	
國澤 千寿	開発課(本社)	

学校法人早稲田大学

氏名	所属・役職	備考
植田 敏嗣	大学院情報生産システム研究科 教授 研究科長	

(3)協力者

推進委員会委員

(外部推進委員)

氏名	所属・役職	備考
浅野 端政	鹿島建設株式会社 九州支店 支店直轄(土木)工事長	アドバイザー
小田 尚生	梅林建設株式会社 福岡支店 土木部長	アドバイザー
清水 則一	国立大学法人山口大学 工学部 社会建設工学科 教授	アドバイザー
栗林 義久	北九州市 技術監理室 技術企画課長	アドバイザー
下川 恵	福岡北九州高速道路公社 北九州事務所 保全課 課長	アドバイザー

(内部推進委員)

氏名	所属・役職	備考
國友 建 納谷 宏	株式会社坂本電機製作所 開発部長 明治コンサルタント株式会社 技術統括部計測技術開発センター所長/事業開発室技師長/本店防災部長(兼務)	
立石 憲治	アイクオーク株式会社 代表取締役社長	
見戸 理	アイクオーク株式会社 ソフト開発部長	
森田 博彦	アイクオーク株式会社 開発センター	
古島 広明	株式会社オサシ・テクノス 開発課 課長	
植田 敏嗣	学校法人早稲田大学 大学院情報生産システム研究科 教授・研究科長	
野田 松平	公益財団法人北九州産業学術推進機構 産学連携統括センター 低炭素・エネルギー技術グループ長	
貝田 博英	公益財団法人北九州産業学術推進機構 産学連携統括センター 産学連携担当部長	
牛島 雄二	公益財団法人北九州産業学術推進機構 産学連携統括センター 産学連携担当部長	

## 1-3 成果概要

### 【1】多機能変位計測システムの開発

#### 【1-1】多機能変位計測機器(システム)の設計・開発・製作

(1)小型、低消費電力、低コストの要求を満足する4センサ(角度、方位、温度、圧力)を選定し、多機能基板ならびにセンサ信号処理用のCPUソフトを設計・開発・製作を実施し、実証実験用基板を製作し、多機能変位計測基板単体の機能評価、多数個直列接続された多機能変位計測基板での機能評価を行った。データのバラツキ、応答性等を考慮しながらノイズフィルタ、サンプリング周波数を信号処理ソフトで調整して、センサ精度の目標

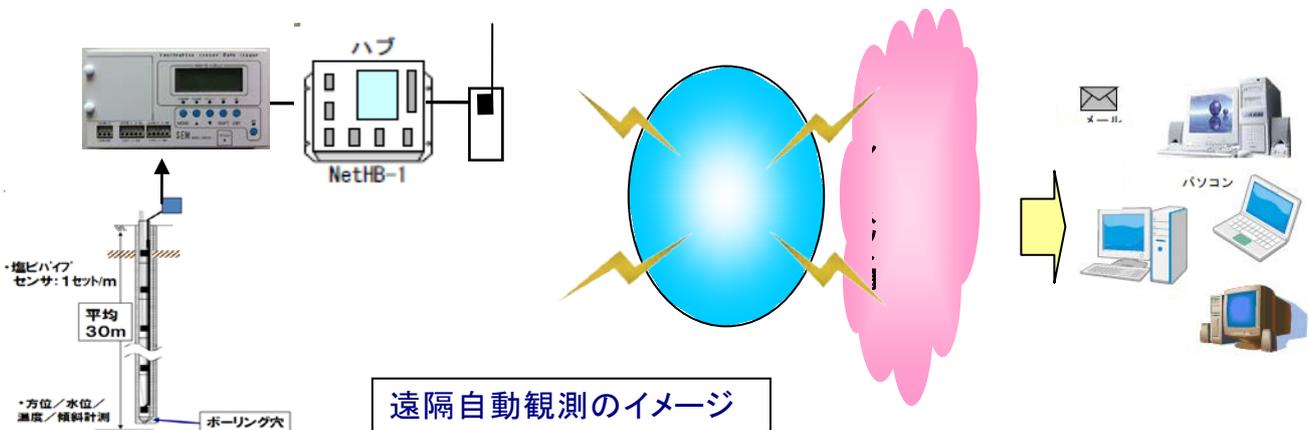
- ① 角度精度… $0.1^{\circ}$  (測定範囲 $\pm 30^{\circ}$ )
- ② 方位精度… $\pm 5.0^{\circ}$  以内
- ③ 温度精度… $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$  以内
- ④ 圧力精度… $5 \times 10^3 \text{ Pa}$  (0.5m水柱圧)

について地上での評価において確認し、全て達成している。しかし、地中での実証試験においてドリフトが発生しており対策を行っているところである。

また、「小型高密度実装対応型多機能基板評価装置」を使って、多機能基板上でのセンシング性能の評価を実施し、4センサのセンシング集積化、及び多重化信号処理できていることを確認した。

(2)開発された多重化データ通信ソフトと地上のデータ収集装置の処理ソフトを使って、30個直列接続された多機能変位計測基板と地上のデータ収集装置間のデータ通信について評価、デバックを行いシステム用ソフトとして開発した。

(3)データ収集装置からパケット通信により無線送信し、遠隔自動観測を実現するためのシステム(集積したデータの変換・送信装置と処理ソフト)を完成させた。多種のセンサデータのロギングフォーマット、パケット通信での送信フォーマット、自動観測ソフトでのグラフの表示方法を検討し、センサデータが自動観測ソフトで正しくグラフ化されることを確認した。



併せて、(1)~(3)それぞれでデータ取得、通信の安定化を図り、計測システムとして正確にデータが取得できていることを確認した。

また、H25年度に開始した3ヶ所の実証試験の長期データからセンサのデータドリフトが発生していることが判明し、その対策としてセンサの見直しを実施し、実用化に耐えうる多機能変位計測システムを完成させた。

#### 【1-2】多機能化のためのパイプ構造・センサ組み込み・防水処理法の開発

##### ①センサ基板・保護ケースの開発

・最適溶着条件で製作したPVC樹脂の多機能変位計測基板容器を評価(ひずみ試験、剥離試験、圧力試験)し、強度を確認し、PVC容器の短時間均一溶着のための超音波周波数と時間の最適プロファイルの設定条件

を確定した。そして、超音波溶着した PVC 樹脂容器の気密度評価を実施し、防水性 IP68 相当以上を維持できる容器構造を開発した。

・各部品(電子部品、樹脂部品)について、原価分析を行い、VE(Value Engineering)手法を用いて回路毎の機能分析を行うとともに半導体や一般電子部品の信頼性とコストの両立評価を行った。その結果に基づき、部品の置き換え、回路構成の修正、センサ部の気密容器の成形部品化でコストダウンを図り、コスト目標を達成した。

○コスト目標・・・ 8,000 円→4,500 円以下(コスト 60%以下)

・樹脂部品の組立作業性・施工作業性を構造及び作業改善で短時間接着を可能とする超音波溶着構造化、リベットによる計測パイプの簡単接続構造化、センサケーブルのパイプ挿入処理短縮化のための異型パイプスリット構造化、及び作業簡素化などについて実証試験の施工状況を踏まえ、組立・施工工数削減目標を達成した。

○組立・施工工数削減目標・・・46min/m→23min/m(工数 50%以下)

## ②圧力センサ固定法と防水処理法の開発

・計測用パイプ構造の開発を行い、センサ基板への充填材・ポッティング法・パイプへの接着法の開発、及びセンサケースの計測パイプへの一体強度を保った短時間固定法を開発した。

・圧力センサと信号リード線の固定・保護法、及び圧力センサと多機能センサ基板間の防水処理構造を完成させた。

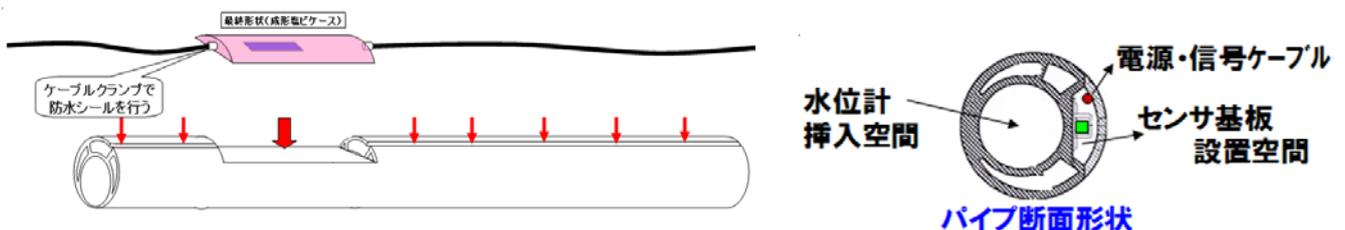
しかし、実証試験により時間経過と共に、センサデータが取れなくなる不具合が発生した。圧力センサと信号リード線の固定・保護法に問題ありと判断し、当該部分の強化対策を実施した。その対策機での 3 年目の追加実証試験により効果ありと判断した。現在も実証試験を継続している。

## ③長期評価試験の実施

実証試験の予備試験として、多機能センシング試作評価用回路基板を封止した試作評価用密閉容器(計測ユニット)を複数個、深さ 20~30m の既設の水位観測孔内(VP40~50 の塩ビパイプ挿入済)に挿入し、継続的にデータを取得して計測ユニットの耐久性、及び計測データの妥当性を評価した。

実施日時:平成25年10月17日から平成26年10月16日まで1年間実施し異常なし。

実施場所:札幌市内



多機能パイプ傾斜計 最終イメージ

## 【1-3】多機能基板組込みの実証試験

2年目の研究開発事業で多機能変位計測システムを実証実験地(地すべり地域)で、地すべり面下(不動層)までボーリングして挿入し、多機能(加速度、方位、温度、圧力)計測データを継続的に収集するための実証試験を開始した。

試験地は、北海道・東北・九州にてそれぞれ 1 現場を選定し、各試験地での目的は次表のとおりとした。

表 実証試験

試験地	実施状況	目的	数量
九州	2013/12/26 開始	既存の地すべり計測機器との比較検証 ※1	30m × 1 本
北海道	2014/ 1/30 開始	寒冷地における施工性や耐久性等の検証	30m × 1 本
東北	2014/ 2/25 開始	地震災害により発生した斜面崩壊地での有効性の検証 ※2	30m × 1 本

以上のようにして、多機能変位計測システムを平成25年度に上記3か所に設置し、データ取得を開始した。実証試験により、長期間経過しても、地下水中に暴露されたセンサ部への地下水浸透が原因とされる異常データの発生の有無、安定的に計測データが地上のデータロガーへ通信記録されることなど多機能(加速度、方位、温度、圧力)計測システムとしての長期安定性と耐久性(長期信頼性)を評価した。

H25年度からの実証試験データを観察していたところ、年間を通した地下水温度について変動と地域差があること、また、センサの温度ドリフトで計測データに影響を及ぼすことが判明した。

そこで、H26年度はセンサのドリフト対策を行った機器を開発し、H25年度実証試験で得られたデータを基に改善確認試験を行い、その上で改善したシステムを用いて追加の実証試験を1ヶ所、九州福岡で実施した。追加実証試験では、次の項目についてデータドリフト対策を実施する前後のデータを重点に比較評価した。

追加実証試験データ比較評価項目【試験地：九州福岡】

1	深度毎の地中温度の年間変動
2	センサのドリフト評価
3	システムの経時変化
4	耐久性

このようにして定期的なモニタリングとデータの有効性を確認し、実証試験で H26年11月から H27年2月まで長期間所定の性能を確保していることを実証し、その後も追加評価継続中である。

追加実証試験により、多機能変位計測システムの長期的評価は上記表の項目を何れも満足する結果となっている。今後、研究を継続して製品化に向けて完成度を高め、信頼性を評価・確保して行く。

## 【2】非接触給電・通信方法の開発

### 【2-1】非接触給電・通信方法のセンサ計測基板への適用技術の設計開発と製作

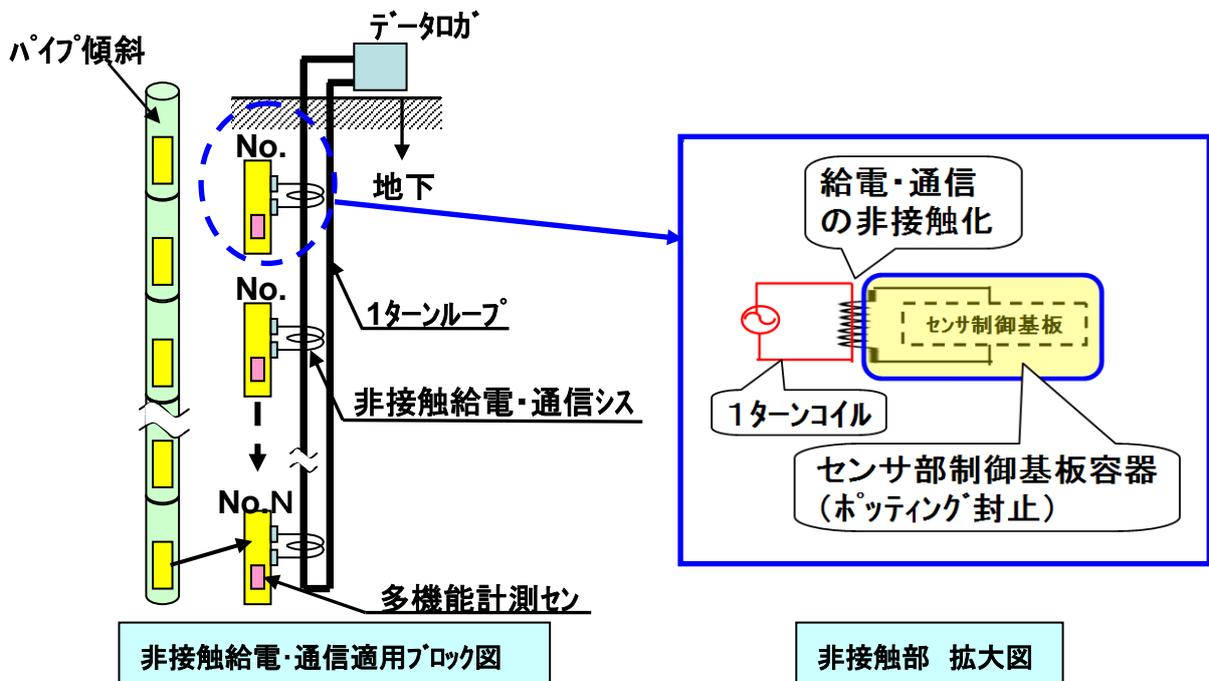
初年度は、非接触給電・通信方法として独自の給電・通信方式である1線式電力・信号伝送方式のシミュレーションを進め、技術的問題解決に目処をつけた。コア材の選定、伝送線路の選択、駆動方式の選択、線式トランスの実験、1線式トランスのコア数と駆動電圧の関係、1線式データ伝送方式の検討、データ伝送用IC、PLC通信での送信データの容量、PLCのデータ伝送特性の試験、等について研究開発を実施した。

次年度は、電源回路、電源装置と非接触による受電・通信できるセンサ計測基板の開発設計を継続し、非接触給電による損失を最小に抑えられるようなコア材、コイルの選定を行い、システム全体について、

シミュレーション等を通じて最適な回路を設計して非接触給電・通信機能を搭載した基板を試作した。

また、非接触給電・通信のコア、コイル部の防水構造を設計・開発した。

最終年度は電源回路、電源装置と非接触による受電・通信できるセンサ計測基板について、計測パイプへの組込みや全体システムでの評価・調整を行いながら非接触給電・通信方法の30m、16チャンネル(最大センサ基板配列個数)の直列配置されたセンサ計測基板を完成させた。



## 【2-2】非接触給電・通信機能を搭載した基板による常時計測データの長期性能評価試験実施

非接触給電・通信機能を搭載した基板を実用化環境に近い状態で電力供給と信号通信について【2-1】で試作したシステムを用いて最終年度に長期性能評価を行い、次の事項を確認した。

- 1) 地下評価で、地下水への浸漬でデータ通信に異常なし。
- 2) 地上評価で、屋外暴露環境にて機能保持すること。

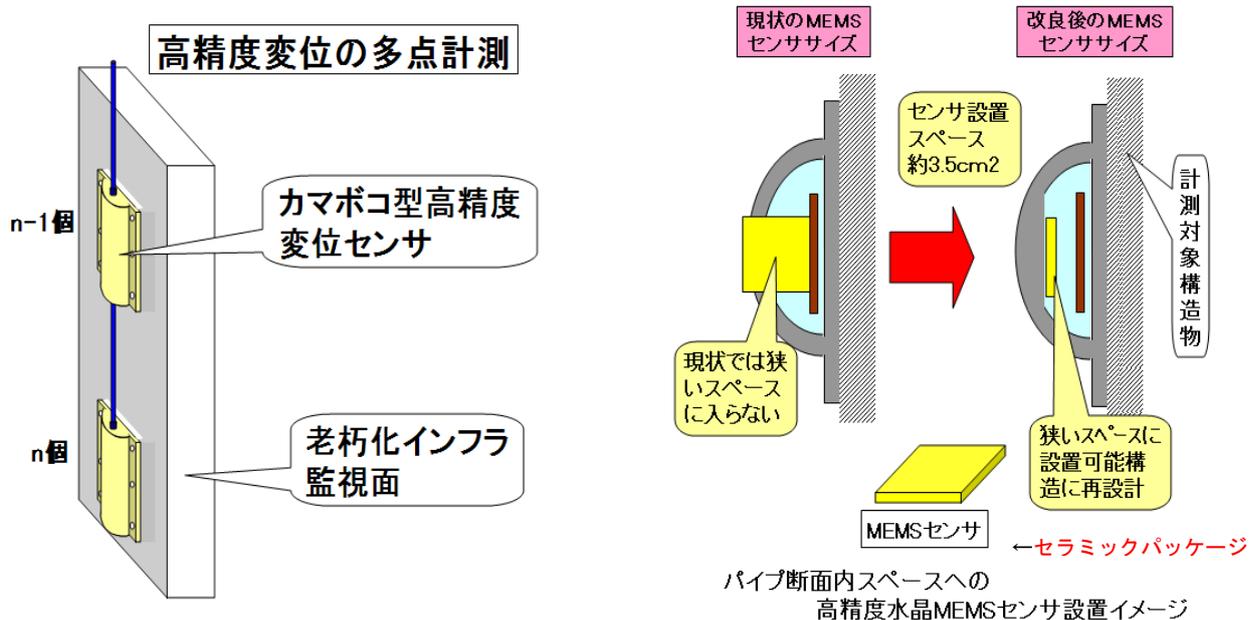
上記順番で長期性能評価試験を実施する予定であったが、基板、センサの開発、製作遅れにより、地上評価を行いながら、基板、ソフトのデバックを実施した。地上評価の屋外暴露試験は北九州市の早稲田大屋外コンクリート壁面にセンサを装着し、H26年11月より長期性能評価を開始した。

当初のソフト修正を繰り返し実施し、H27年1月末に、完成。H27年2月より地下評価を札幌市で開始し、事業終了後も長期性能評価は継続中である。

長期性能評価では、16台のセンサユニットとコントロールユニットとの非接触による給電・通信も順調であり電源供給、データ通信不良によるデータ欠損も最終的に解消し、目標を達成した。

### 【3】高信頼・高精度の自動変位計測機器の開発

#### 【3-1】高精度水晶 MEMS 傾斜角センサの設計開発(シミュレーション、MEMS デバイス設計、製作、評価)



初年度は、計測用パイプ断面の狭空間(約 350mm<sup>2</sup> の扇形空間)に入る高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ(櫛歯構造容量型、精度±0.001°)を実現のため小型化・高密度集積化と、高精度化を実現する素子形 の最適化設計を実施した。また、プロセス開発のため既存のマスク、LSI、パッケージ(LTCC)で試作を行った。

次年度は、高精度水晶 MEMS 傾斜角センサのプロセス技術の検討を行った。また、熱変形の少ないセラミックパッケージへの高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ素子のマウント法の開発し、公共インフラ等の計測対象構造物への設置時に高精度水晶 MEMS 傾斜角センサの高信頼・高精度を維持可能なセンサ基板容器材質の検討とその構造を開発した。

多機能変位計測機器用のパイプ構造を含めたセンサ基板容器断面の狭い空間へ設置する高精度水晶傾斜角センサをパッケージングして、センサ基板密閉容器内の狭い空間に設置可能な縦型の高精度水晶 MEMS 傾斜角センサを試作し、機能評価を行い、センサ単体で角度変位精度±0.001°を確認した。

最終年度は、小型化・高密度集積化と高精度化を実現する素子形状の最適化設計を完了し、併せて、高精度水晶 MEMS 傾斜角センサのプロセス技術を確立した。

熱変形の少ないセラミックパッケージへの高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ素子のマウント法、及び公共インフラ等の計測対象構造物への設置時に高精度水晶 MEMS 傾斜角センサの高信頼・高精度を維持可能なパッケージ容器材質とその構造の改良を行い、当初の目標断面積 120mm<sup>2</sup>を下回る 64mm<sup>2</sup>を達成した。センサ容器となるケース全体としても、断面形状を半円にすることで断面積を小さくしている。基板を搭載するケースであるため、基板の上方の空間は本来必要がないが、今回は一線式のワイヤーを通すためのチューブを貫通させているため基板上部に空間を確保した。半円とすることで端部の空間を小さく抑えている。また、センサと基板を結線する配線は基板の下を通すことで空間の節約に貢献している。一線式のワイヤーの戻り線はケースの外部を通すことで内部空間を小さくした。またケース外側の面に溝を形成し、溝の中に戻り線のワイヤーを通すことで収納性、作業性、測定の再現性などを向上させた。

### 【3-2】高精度水晶 MEMS 傾斜角センサの計測基板への適用方法の設計・ソフト開発と基板製作

高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ計測機能を追加したセンサ計測基板の設計・試作、及び他センサデータに高精度水晶 MEMS 傾斜角センサのデータを含めた多重化信号処理回路とソフトの設計・試作を行った。

また、複数種類、多数のセンサを一括に制御し、データの送受信を行い、データを管理する組み込みソフトウェアの設計・試作を行った。なお、センサ計測基板は、市販の容器に収納して実働させた。

最終年度は高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ計測機能を追加したセンサ計測基板を改良し、他センサデータに高精度水晶 MEMS 傾斜角センサのデータを含めた多重化信号処理回路とソフトを試作・改良完成した。

また、公共インフラ計測用の高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ計測基板を収納する容器(カマボコ状容器)を開発試作し、高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ、センサ計測基板、コア・コイルを配置してセンサ側システムを完成させた。

### 【3-3】高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ適用基板による微小角度変位計測の長期性能評価試験実施

最終年度に前記【3-1】【3-2】で完成させたシステムを使い、高精度水晶 MEMS 傾斜角センサを搭載した基板の防水性を確認するために実用化環境に近い状態で、微小角度変位を長期間にわたり正確に検出、通信可能かどうか評価した。

なお、実用化環境に近い状態での長期評価試験は以下の通りであり、【2-2】と共通評価項目である。

- ① **地下評価** 防水構造の耐水性を確認するため地下水中に浸漬し、正常にデータを取得できることを確認する。
- ② **地上評価** ①により耐水性確認後、構造物外壁面に固定し暴露試験を行い、正常にデータを取得継続できることを確認する。

上記順番で長期性能評価試験を実施する予定であったが、基板、センサの開発、製作遅れにより、

②**地上評価**を行いながら、基板、ソフトのデバックを実施した。**地上評価**の屋外暴露試験は北九州市の早稲田大屋外コンクリート壁面にセンサを装着し、H26年11月より長期性能評価を開始した。

高精度傾斜角センサ評価においては暴露試験により当初のソフト修正を繰り返し実施し H27年1月末に完成。データ評価では前年度の室内実験では高精度水晶 MEMS 傾斜角センサの精度評価で $\pm 0.001^\circ$ を達成したが、屋外暴露試験では1か月の間に約 $\pm 0.2^\circ$ の変動が記録されている。しかしながら、取り付け壁の変動を検討すると、壁の材料はコンクリートであり、また建物の昼夜の温度差による歪みを考慮すると、昼夜の温度差により壁が $0.2^\circ$ 変動しているとは考えにくい。

データを吟味すると、温度と角度の相関を見ると明らかに相関があることが分かった。そこで新たにドリフトを含めた温度による影響を除外する補正をかけたところ、 $\pm 0.005^\circ$ 以内に抑えることができた。

このことから今後の課題として、温度補正の精度を上げる方法や、より精度の高い補正方法の検討など継続して研究する予定である。

H27年2月より**地下評価**を札幌市で開始し、事業終了後も長期性能評価は継続中である。

長期性能評価では、**地上評価** **地下評価**共に16台のセンサユニットとコントロールユニットとの非接触による給電・通信も順調であり電源供給、データ通信不良によるデータ欠損も最終的に解消し、【3-3】の目標は達成した。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人北九州産業学術推進機構 産学連携統括センター

産学連携担当部長 貝田 博英

連絡先 tel : 093-695-3006 fax : 093-695-3018

e-mail : h-kaida@ksrp.or.jp

## 第2章 本論

### 【1】多機能変位計測システムの開発

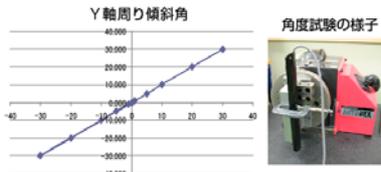
#### 【1-1】多機能変位計測機器(システム)の設計・開発・製作

(担当:アイクオーク㈱、㈱坂本電機製作所)

1) 小型、低消費電力、低コストの要求を満足する4センサ(角度、方位、温度、圧力)を選定し、多機能基板ならびにセンサ信号処理用のCPUソフトを設計・開発・製作を実施し実証実験用基板を製作し、多機能変位計測基板単体の機能評価、多数個直列接続された多機能変位計測基板での機能評価を行った。データのバラツキ、応答性等を考慮しながらノイズフィルタ、サンプリング周波数を信号処理ソフトで調整して、センサ精度の目標を達成した。なお、センサ精度については全て達成した。

① 角度精度… $0.1^\circ$   
(測定範囲 $\pm 30^\circ$ )

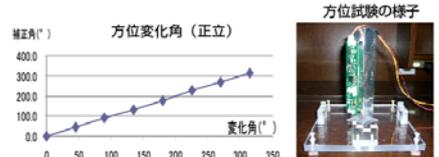
①角度精度



精度目標  $0.1^\circ$  (測定範囲  $\pm 30^\circ$ ) 達成

② 方位精度… $\pm 5.0^\circ$  以内

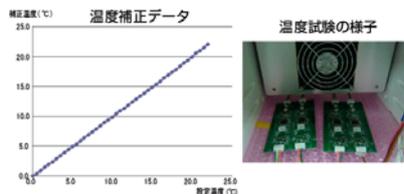
②方位精度



精度目標  $\pm 2.5^\circ$  以内 達成

③ 温度精度… $\pm 1.0^\circ\text{C}$  以内

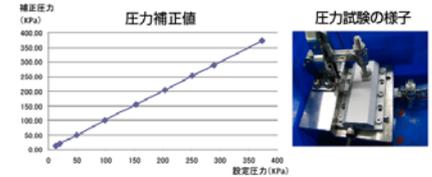
③温度精度



精度目標  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  以内 達成

④ 圧力精度… $5 \times 10^3 \text{ Pa}$   
(0.5m水柱圧)

④圧力精度



精度目標  $10^3\text{Pa}$ (0.1m水柱圧) 達成

図 2-1 各センサ精度評価グラフ

また、「小型高密度実装対応型多機能基板評価装置」を使って、多機能基板上でのセンシング性能の評価を実施し、4センサのセンシング集積化、及び多重化信号処理できていることを確認した。(図 2-1 参照)

2) 開発された多重化データ通信ソフトと地上のデータ収集装置の処理ソフトを使って、30 個直列接続された多機能変位計測基板と地上のデータ収集装置間のデータ通信について評価、デバックを行いシステム用ソフトとして開発した。

3) データ収集装置からパケット通信により無線送信し、遠隔自動観測を実現するためのシステム(集積したデータの変換・送信装置と処理ソフト)を完成させた。多種のセンサデータのロギングフォーマット、パケット通信での送信フォーマット、自動観測ソフトでのグラフの表示方法を検討し、センサデータが自動観測ソフトで正しくグラフ化されることを確認した。(図 2-2 参照)

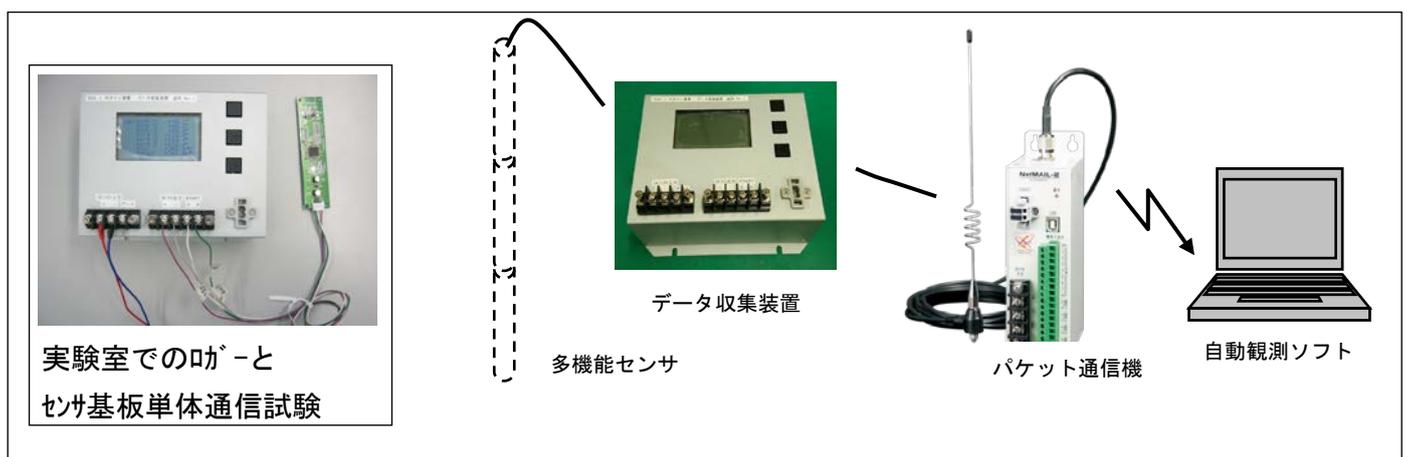


図 2-2 計測システムの構成

併せて、①,②,③それぞれでデータ取得、通信の安定化を図り、計測システムとして正確にデータが取得できていることを確認した。

H25年度に開始した3ヶ所の実証試験の長期データからセンサのデータドリフトが発生していることが判明し、その対策としてセンサの見直しを実施し、実用化に耐えうる多機能変位計測システムを完成させた。

## 【1-2】多機能化のためのパイプ構造・センサ組込み・防水処理法の開発

(担当: 明治コンサルタント(株)、(株)坂本電機製作所)

### ① センサ基板・保護ケースの開発

・最適溶着条件で製作した PVC 樹脂の多機能変位計測基板容器を評価(ひずみ試験、剥離試験、圧力試験)し、強度を確認し、PVC 容器の短時間均一溶着のための超音波周波数と時間の最適プロファイルの設定条件を確定した。そして、超音波溶着した PVC 樹脂容器の気密度評価を実施し、防水性 IP68 相当以上を維持できる容器構造を開発した。

・各部品(電子部品、樹脂部品)について、原価分析を行い、VE(手法を用いて回路毎の機能分析を行うとともに半導体や一般電子部品の信頼性とコストの両立評価を行った。その結果に基づき、部品の置き換え、回路構成の修正、センサ部の気密容器の成形部品化でコストダウンを図り、コスト目標を達成した。(図 2-3 参照)

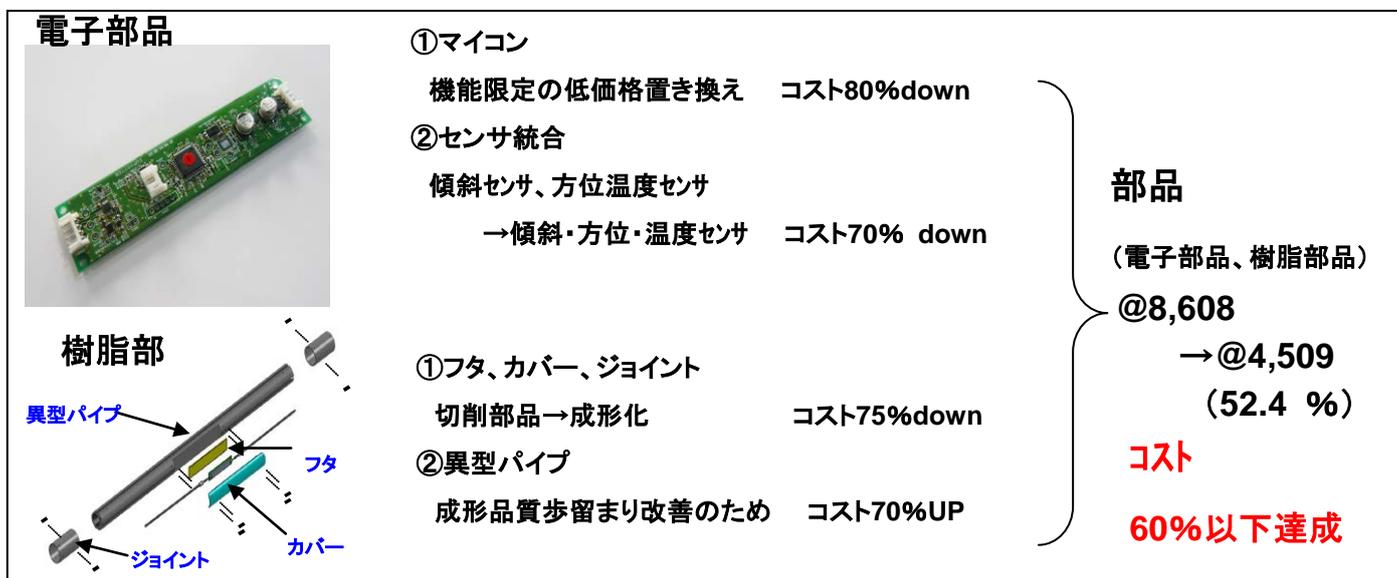


図 2-3 部品コストダウン

・樹脂部品の組立作業性・施工作业性を構造及び作業改善で短時間接着を可能とする超音波溶着構造化、リベットによる計測パイプの簡単接続構造化、センサケーブルのパイプ挿入処理短縮化のための異型パイプスリット構造化、及び作業簡素化などについて実証試験の施工状況を踏まえ、組立・施工工数削減目標を達成した。

(図 2-4 参照)

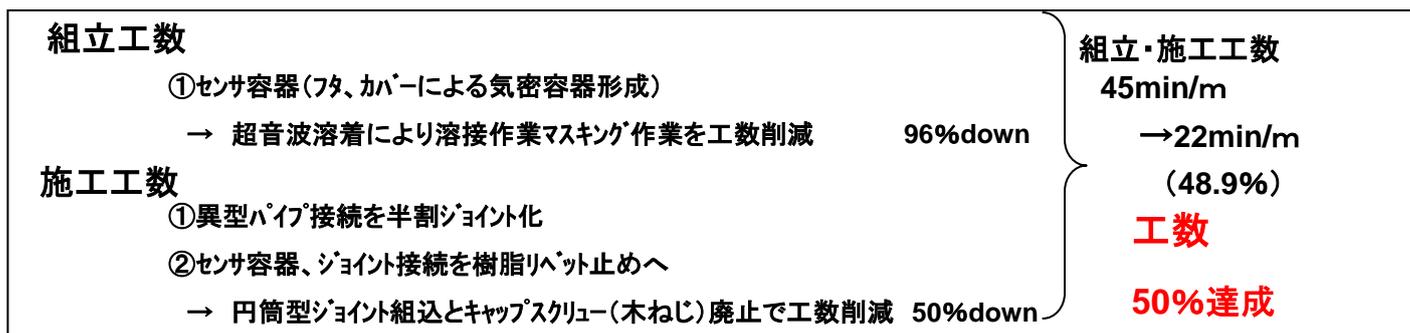


図 2-4 組立工数、施工工数削減

② 圧力センサ固定法と防水処理法の開発

- ・計測用パイプ構造の開発を行い、センサ基板への充填材・ポッティング法・パイプへの接着法の開発、及びセンサケースの計測パイプへの一体強度を保った短時間固定法を開発した。(図 2-5 参照)
- ・圧力センサと信号リード線の固定・保護法、及び圧力センサと多機能センサ基板間の防水処理構造を完成させた。しかし、実証試験により時間経過と共に、センサデータが取れなくなる不具合が発生した。圧力センサと信号リード線の固定・保護法に問題ありと判断し、当該部分の強化対策を実施した。その対策機での3年目の追加実証試験により効果ありと判断した。現在も実証試験を継続している。

③ 長期評価試験の実施

実証試験の予備試験として、多機能センシング試作評価用回路基板を封止した試作評価用密閉容器(計測ユニット)を複数個、深さ 20~30m の既設の水位観測孔内(VP40~50 の塩ビパイプ挿入済)に挿入し、継続的にデータを取得して計測ユニットの耐久性、及び計測データの妥当性を評価した。

実施日時:平成25年10月17日から平成26年10月16日まで1年間実施し異常なし。

実施場所:札幌市内

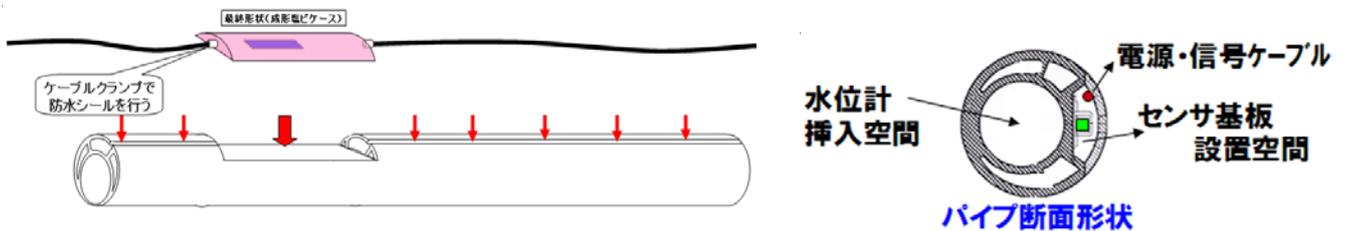


図 2-5 多機能パイプ傾斜計 最終イメージ

【1-3】多機能基板組込みの実証試験

(担当:明治コンサルタント(株))

2年目の研究開発事業で多機能変位計測システムを実証実験地(地すべり地域)で、地すべり面下(不動層)までボーリングして挿入し、多機能(加速度、方位、温度、圧力)計測データを継続的に収集するための実証試験を開始した。

試験地は、北海道・東北・九州にてそれぞれ1現場を選定し、各試験地での目的は表 2-1 のとおりとした。

表 2-1 実証試験の実施状況と目的

試験地	実施状況	目的	数量
九州	2013/12/26 開始	既存の地すべり計測機器との比較検証 ※1	30m×1本
北海道	2014/ 1/30 開始	寒冷地における施工性や耐久性等の検証	30m×1本
東北	2014/ 2/25 開始	地震災害により発生した斜面崩壊地での有効性の検証 ※2	30m×1本

以上のようにして、多機能変位計測システムを平成25年度に上記3か所に設置し、データ取得を開始した。実証試験により、長期間経過しても、地下水中に暴露されたセンサ部への地下水浸透が原因とされる異常データの発生の有無、安定的に計測データが地上のデータロガーへ通信記録されることなど多機能(加速度、方位、温度、圧力)計測システムとしての長期安定性と耐久性(長期信頼性)を評価した。

H25年度からの実証試験データを観察していたところ、年間を通した地下水温度について変動と地域差があること、また、センサの温度ドリフトで計測データに影響を及ぼすことが判明した。

そこで、H26年度はセンサのドリフト対策を行った機器を開発し、H25年度実証試験で得られたデータを基に改善

確認試験を行い、その上で改善したシステムを用いて追加の実証試験を1ヶ所、九州福岡で実施した。  
追加実証試験は、表 2-2 の項目についてデータドリフト対策を実施する前後のデータを重点に比較評価した。

表 2-2 追加実証試験データ比較評価項目

1	深度毎の地中温度の年間変動
2	センサのドリフト評価
3	システムの経時変化
4	耐久性



写真 2-1 追加実証実験個所全景



写真 2-2 多機能変位計測システム設置完了状況

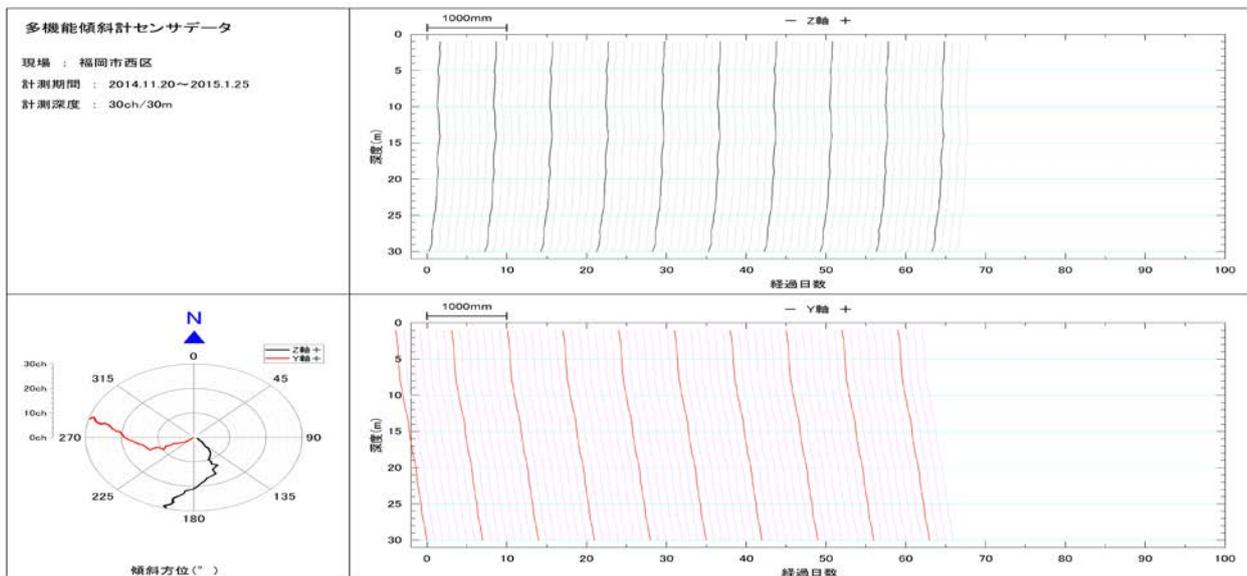


図 2-6 追加九州地区多機能変位計測システム 傾斜センサ取得データ

このようにして定期的なモニタリングとデータの有効性を確認し、実証試験で H26 年 11 月から H27 年 2 月まで長期間所定の性能を確保していることを実証し、その後も追加評価継続中である。

追加実証試験により、得られたデータ(図 2-6)から多機能変位計測システムの長期的評価は表 2-2 の項目を満足する結果となっている。今後、研究開発を継続して製品化に向けて完成度を高め信頼性を評価して行く。

## 【2】非接触給電・通信方法の開発

### 【2-1】非接触給電・通信方法のセンサ計測基板への適用技術の設計開発と製作

(担当:早稲田大学、(株)坂本電機製作所)

初年度は、非接触給電・通信方法として独自の給電・通信方式である1線式電力・信号伝送方式のシミュレーションを進め、技術的問題解決に目処をつけた。コア材の選定、伝送線路の選択、駆動方式の選択、線式トランスの実験、1線式トランスのコア数と駆動電圧の関係、1線式データ伝送方式の検討、データ伝送用IC、PLC通信での送信データの容量、PLCのデータ伝送特性の試験、等について研究開発を実施した。

次年度は、電源回路、電源装置と非接触による受電・通信できるセンサ計測基板の開発設計を継続し、非接触給電による損失を最小に抑えられるようなコア材、コイルの選定を行い、システム全体について、

シミュレーション等を通じて最適な回路を設計して非接触給電・通信機能を搭載した基板を試作した。

また、非接触給電・通信のコア、コイル部の防水構造を設計・開発した。

最終年度は電源回路、電源装置と非接触による受電・通信できるセンサ計測基板について、計測パイプへの組込みや全体システムでの評価・調整を行いながら非接触給電・通信方法の30m、16チャンネル(最大センサ基板配列個数)の直列配置されたセンサ計測基板を完成させた。(図 2-7、写真 2-3 参照)

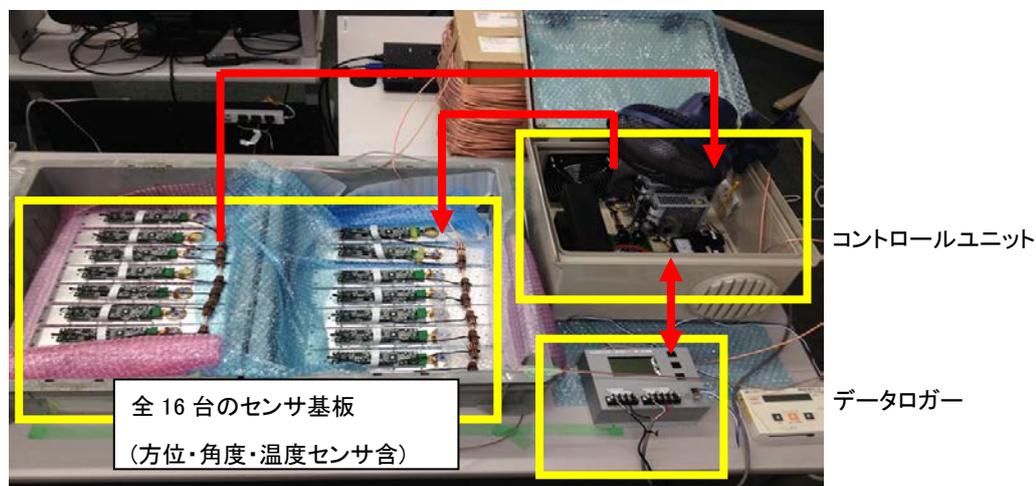
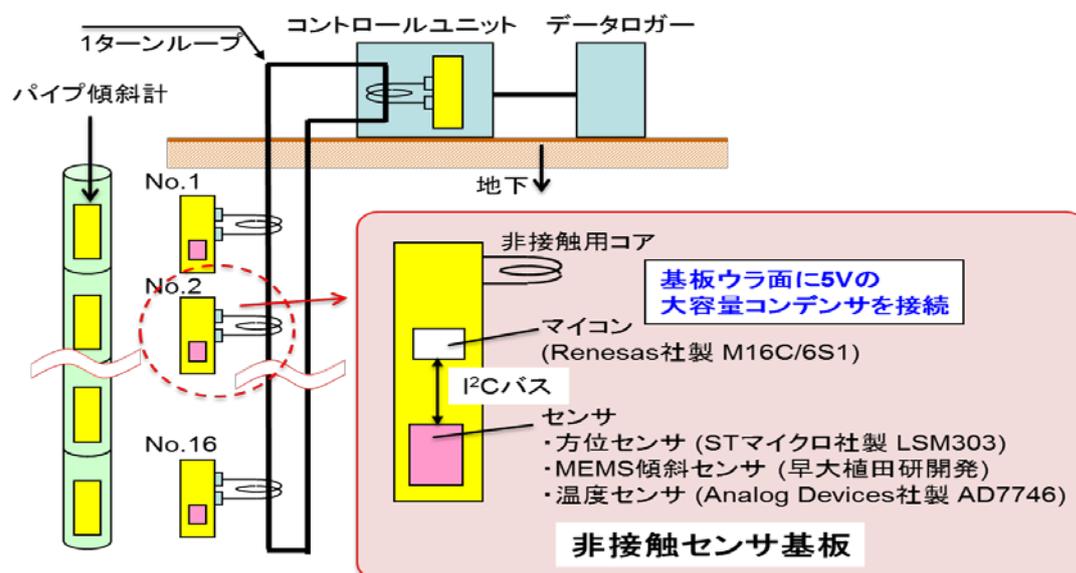


写真 2-3. 室内環境で非接触給電・通信システムの確認試験中の画像

## 【2-2】非接触給電・通信機能を搭載した基板による常時計測データの長期性能評価試験実施

(担当: 株坂本電機製作所)

非接触給電・通信機能を搭載した基板を実用化環境に近い状態で電力供給と信号通信について【2-1】で試作したシステムを用いて最終年度に長期性能評価を行い、次の事項を確認した。

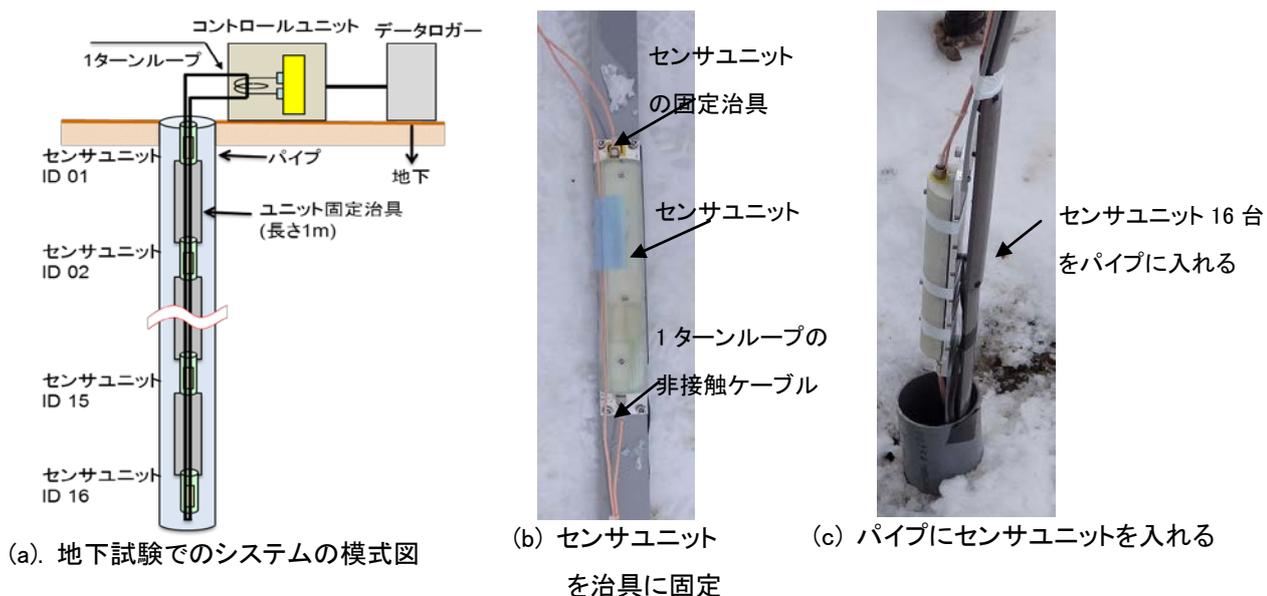
- 1) 地下評価で、地下水への浸漬でデータ通信に異常なし。
- 2) 地上評価で、屋外暴露環境にて機能保持すること。

上記順番で長期性能評価試験を実施する予定であったが、基板、センサの開発、製作遅れにより、



地上評価を行いながら、基板、ソフトのデバックを実施した。地上評価の屋外暴露試験は北九州市の早稲田大屋外コンクリート壁面にセンサを装着し、H26年11月より長期性能評価を開始した。(写真 2-4 参照)

当初のソフト修正を繰り返し実施し、H27年1月末に、完成。H27年2月より地下評価を札幌市で開始し、事業終了後も長期性能評価は継続中である。(写真 2-5 参照)



長期性能評価では、16台のセンサユニットとコントロールユニットとの非接触による給電・通信も順調であり電源供給、データ通信不良によるデータ欠損も最終的に解消し、目標を達成した。

### 【3】高信頼・高精度の自動変位計測機器の開発

#### 【3-1】高精度水晶 MEMS 傾斜角センサの設計開発(シミュレーション、MEMS デバイス設計、製作、評価) (担当: 早稲田大学)

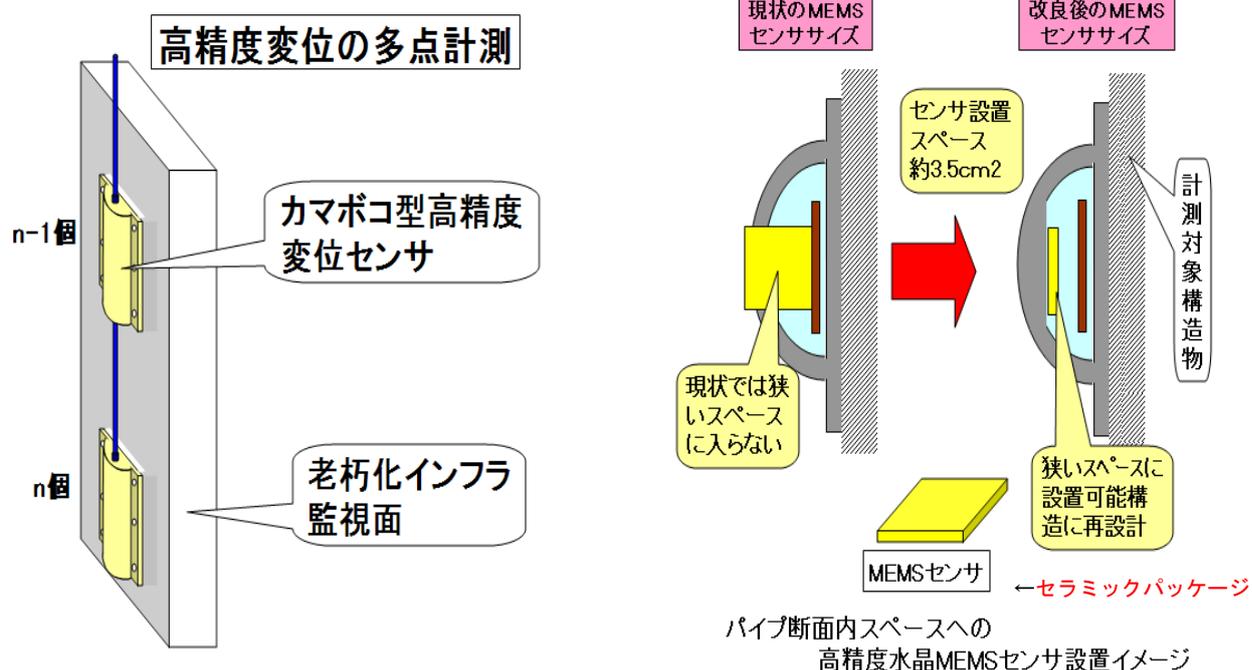


図 2-8 高信頼高精度の自動変位計測機器の開発のイメージ



写真 2-6 微小断面積セラミックパッケージの  
パッケージ断面積について

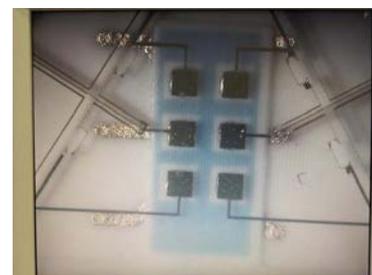
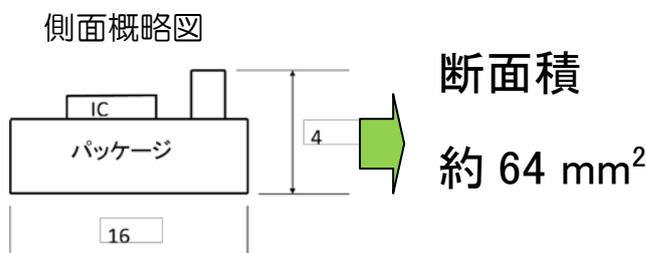


写真 2-7. 実装後の様子  
(パッド部拡大)

初年度は、計測用パイプ断面の狭空間(約 350mm<sup>2</sup>の扇形空間)に入る高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ(楕円構造容量型, 精度±0.001°)を実現のため小型化・高密度集積化と、高精度化を実現する素子形状の最適化設計を実施した。また、プロセス開発のため既存のマスク、LSI、パッケージ(LTCC)で試作を行った。

次年度は、高精度水晶 MEMS 傾斜角センサのプロセス技術の検討を行った。また、熱変形の少ないセラミックパッケージへの高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ素子のマウント法の開発し、公共インフラ等の計測対象構造物への設置時に高精度水晶 MEMS 傾斜角センサの高信頼・高精度を維持可能なセンサ基板容器材質の検討とその構造を開発した。

多機能変位計測機器用のパイプ構造を含めたセンサ基板容器断面の狭い空間へ設置する高精度水晶傾斜角センサをパッケージングして、センサ基板密閉容器内の狭い空間に設置可能な縦型の高精度水晶 MEMS 傾斜角センサを試作し、機能評価を行い、センサ単体で角度変位精度±0.001°を確認した。

最終年度は、小型化・高密度集積化と高精度化を実現する素子形状の最適化設計を完了し、併せて、高精度水晶 MEMS 傾斜角センサのプロセス技術を確立した。

熱変形の少ないセラミックパッケージへの高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ素子のマウント法、及び公共インフ

ラ等の計測対象構造物への設置時に高精度水晶 MEMS 傾斜角センサの高信頼・高精度を維持可能なパッケージ容器材質とその構造の改良を行い、当初の目標断面積 120mm<sup>2</sup>を下回る 64mm<sup>2</sup>を達成した。(写真 2-6 参照)

センサ容器となるケース全体としても、断面形状を半円にすることで断面積を小さくしている。基板を搭載するケースであるため、基板の上方の空間は本来必要がないが、今回は一線式のワイヤーを通すためのチューブを貫通させているため基板上部に空間を確保した。半円とすることで端部の空間を小さく抑えている。また、センサと基板を結線する配線は基板の下を通すことで空間の節約に貢献している。一線式のワイヤーの戻り線はケースの外部を通すことで内部空間を小さくした。またケース外側の面に溝を形成し、溝の中に戻り線のワイヤーを通すことで収納性、作業性、測定の再現性などを向上させた。

### 【3-2】高精度水晶 MEMS 傾斜角センサの計測基板への適用方法の設計・ソフト開発と基板製作(担当:早稲田大学)

高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ計測機能を追加したセンサ計測基板の設計・試作、及び他センサデータに高精度水晶 MEMS 傾斜角センサのデータを含めた多重化信号処理回路とソフトの設計・試作を行った。また、複数種類、多数のセンサを一括に制御し、データの送受信を行い、データを管理する組み込みソフトウェアの設計・試作を行った。なお、センサ計測基板は、市販の容器に収納して実働させた。

最終年度は高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ計測機能を追加したセンサ計測基板を改良し、他センサデータに高精度水晶 MEMS 傾斜角センサのデータを含めた多重化信号処理回路とソフトを試作・改良完成。また、公共インフラ計測用の高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ計測基板を収納する容器(カマボコ状容器)を開発し、試作を行って高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ、センサ計測基板、コア・コイルを配置し、センサ側システムを完成させた。(図 2-8、写真 2-9 参照)

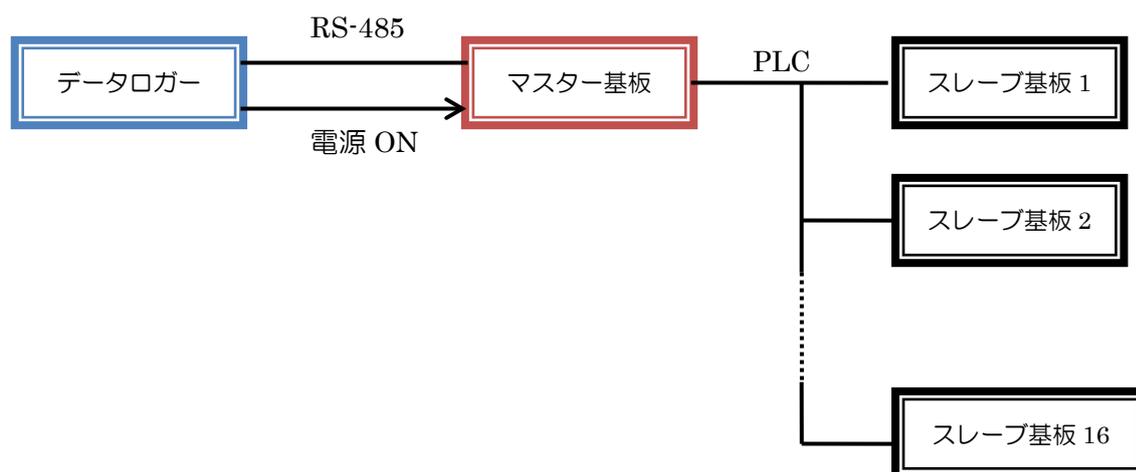
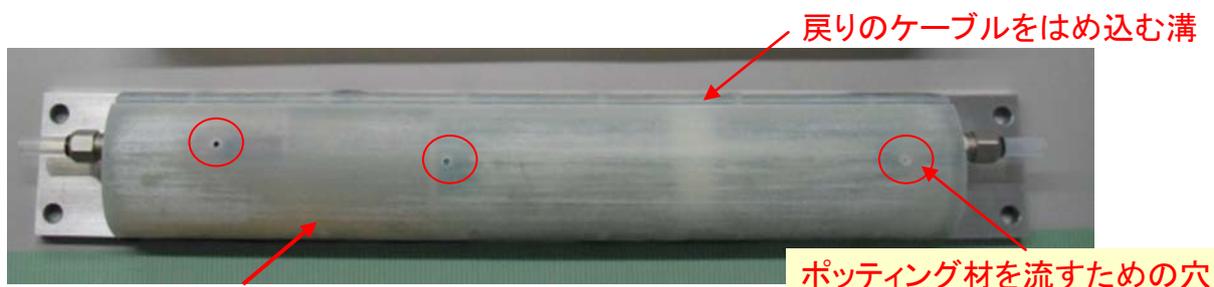
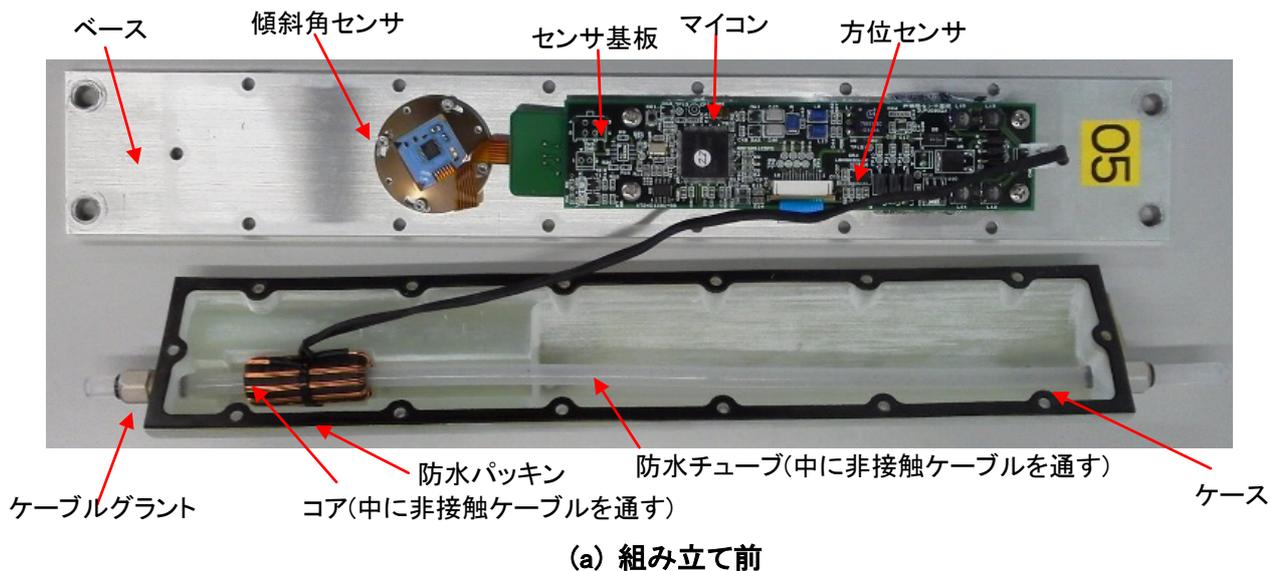


図 2-8 非接触センサシステム構成図



防水用部品を使用して防滴構造

(b) 組み立て後

写真 2-9 防水仕様のケースの組み立て前後

### 【3-3】高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ適用基板による微小角度変位計測の長期性能評価試験実施 (担当: ㈱坂本電機製作所)

最終年度に前記【3-1】【3-2】で完成させたシステムを使い、高精度水晶 MEMS 傾斜角センサを搭載した基板の防水性を確認するために実用化環境に近い状態で、微小角度変位を長期間にわたり正確に検出、通信可能かどうか評価した。

なお、実用化環境に近い状態での長期評価試験は以下の通りであり、【2-2】と共通評価項目である。

- ③ **地下評価** 防水構造の耐水性を確認するため地下水中に浸漬し、正常にデータを取得できることを確認する。
- ④ **地上評価** ①により耐水性確認後、構造物外壁面に固定し暴露試験を行い、正常にデータを取得継続できることを確認する。

上記順番で長期性能評価試験を実施する予定であったが、基板、センサの開発、製作遅れにより、

- ⑤ **地上評価** を行いながら、基板、ソフトのデバックを実施した。**地上評価**の屋外暴露試験は北九州市の早稲田大屋外コンクリート壁面にセンサを装着し、H26年11月より長期性能評価を開始した。

高精度傾斜角センサ評価においては暴露試験により当初のソフト修正を繰り返し実施し、H27年1月末に完成した。データ評価では前年度の室内実験では高精度水晶 MEMS 傾斜角センサの精度評価で $\pm 0.001^\circ$ を達成したが、屋外暴露試験では1か月の間に約 $\pm 0.2^\circ$ の変動が記録されている。しかしながら、取り付けられた壁の変動を検討すると、壁の材料はコンクリートであり、また建物の昼夜の温度差による歪みを考慮すると、昼夜の温度差により壁が $0.2^\circ$ 変動しているとは考えにくい。

データを吟味すると、温度と角度の相関を見ると明らかに相関があることが分かった。そこで新たにドリフトを

含めた温度による影響を除外する補正をかけたところ、 $\pm 0.005^{\circ}$  以内に抑えることができた。

このことから今後の課題として、温度補正の精度を上げる方法や、より精度の高い補正方法の検討など研究を継続する予定である。

H27年2月より地下評価を札幌市で開始し、事業終了後も長期性能評価は継続中である。

長期性能評価では、地上評価 地下評価 共に16台のセンサユニットとコントロールユニットとの非接触による給電・通信も順調であり電源供給、データ通信不良によるデータ欠損も最終的に解消し、【3-3】の目標は達成した。

#### 【4】プロジェクトの管理・運営（担当：(公財)北九州産業学術推進機構）

##### （1）推進委員会の構成

外部推進委員5名（p.7 参照）を含めて、管理法人（(公財)北九州産業学術推進機構）、再委託先（株式会社坂本電機製作所、明治コンサルタント株式会社、アイクオーク株式会社、株式会社オサシ・テクノス、学校法人早稲田大学）で推進委員会を構成し、推進委員会を開催して事業を円滑に推進した。

##### （2）推進委員会の開催

###### ①第1回（平成26年11月27日）

本年度の進捗報告（全体と各機関）と今後の予定について討議した。

###### ②第2回（平成27年2月10日）

本年度の進捗・成果報告（全体と各機関）と今後の予定について討議した。

### 第3章 全体総括

近年増大する地震、風水害等の自然災害により地滑り危険地域の効率的監視体制構築の社会要求が増し、旧来のアナログ計測から、デジタル化による多機能小型計測システムの開発が求められている。

一方、1960年代に投資拡大した公共インフラ（ダム、橋梁、高速道路等）の老朽化が急速に進んでいる。アメリカで近年まで起きてきた米国のインフラ崩壊例を見て、今後、国内においても急激に増大する老朽化インフラの監視に手が回らなくなるのは明らかである。そのインフラ延命のため、微小劣化を監視する低コスト、高信頼性、高精度計測システム技術を研究開発し、安全安心に寄与する事業化を目指す。

この2つの切り口から当該研究開発事業において前述のとおり3つのサブテーマの実現に3年間取り組んだ。

#### （1）成果と課題

##### 【1】多機能変位計測システムの開発

多機能変位計測器の長期評価用試作機1セットと実証実験用試作機3セットを開発・製作し、計画通り評価まで実施して来た。その開発した多機能変位計測器の長期評価では計測データの地下センサユニットと地上データロガー間の通信、データ保存、遠隔地通信、防水性が確認でき当初の目標は達成できた。

また、コストにおいても、実用化を前提に、廉価部品の選定、組立て施工性を観点にコストダウンを進め、目標は達成できたと判断する。

しかし、実証試験用試作機3セットについては、九州（八女）の実証実験を除き、北海道（小樽）、東北（釜石）では時間経過と共に、通信不具合を引き起こすセンサユニットが2年目の事業終了時期に発生し、試験室での開発評価に比べて実証試験の実施評価では影響を及ぼす要因の多さに戸惑いながらその原因推定、調査を行った。原因として、センサ或いはケーブルの防水性が損なわれ、絶縁不良を起こしたものと推定した。また、3ヶ所の実証試験の長期データから傾斜センサで長期のデータドリフトが発生していることが確認できた。

ため、センサの選定見直しが必要だと判断した。

H25 年度に開始した3ヶ所の実証試験の問題点を含む長期データから、傾斜センサのデータドリフト対策、センサ容器、ケーブルの損傷からの防水保護のため傾斜センサの再選定と圧力センサ容器と異型パイプ保護構造を見直し、H26 年度の追加実証試験用試作機にその対策を反映させ 11 月に追加実証試験を開始した。その結果、H26 年度事業終了までデータ値に異常も無く、またドリフト問題も許容範囲で推移している。

圧力センサについては、現行のセンサではドリフトを完全に解消できていない。長期のスパンで別の水位計と併用で校正を行いながら、連続したデータを採取するように運用上で対策を検討したい。

温度データは地中30mまでの温度挙動を連続データとして捕らえており、満足するものであった。

方位データでは30mのセンサユニット挿入で、地上の方位と最深部の方位にズレが生じて回転していることが判明した。また、その施工作业毎にその回転ズレ量が異なることが解り、地すべりの傾斜データの解析に方位データが重要な要素になることがわかった。

多機能の圧力センサ部分の精度、ドリフト対策については今後の研究開発で継続するが、概ね、当初の目標は達成した。今後は多機能変位計測システムの実用化に向けメンバーの機関と開発を進める。

## 【2】 非接触給電・通信方法の開発

初年度は非接触給電・通信方法の検討と決定、次年度は非接触給電・通信方法の試作センサと電源装置を完成させた。また、センサユニットへの非接触による給電とセンサユニットからの伝送信号の方式を開発し、非接触給電・通信方法(1線式電力・信号伝送方式非接触給電方式)を確立した。また、地下水中に挿入することを想定し、センサユニット部の防水構造を設計して試作センサユニット容器を開発した。

その後、前記の1線式電力・信号伝送方式非接触給電方式のセンサ計測基板の開発を完了し、試作基板を作成した。非接触で30m、16チャンネル(最大センサ基板配列個数)の直列配置されたセンサと給電・通信を完成させ当初の目標を達成した。また、長期評価試験も地上評価で、屋外暴露環境にて機能保持することを目標に早稲田大のコンクリート壁面に設置し、11 月末より評価を繰り返し、データ異常が発生しないところまでソフトを改善した。その後、2 月より地下評価として、北海道札幌市の地下30mの井戸で、地下水への浸漬試験を実施した。コントロールユニットの基板低温異常対策後は、データ通信に異常は発生せず、3 月も試験継続中である。これらの開発成果により、目標である長寿命化はもとより、センサ配置の自由度、測定対象物の点計測(1次元評価)から線、或いは面計測(2次元評価)へ進めることが可能となり、今後の自動監視におけるデータ蓄積が格段に増加し、よりきめ細かな状態監視・評価を可能とする技術の扉を開いたと感じている。今後、16ch以上の多チャンネル、ケーブル長の制限、給電・通信装置のコントロールユニットの改良開発が必要であり、来年度以降検討して行く。

## 【3】高信頼・高精度の自動変位計測機器の開発

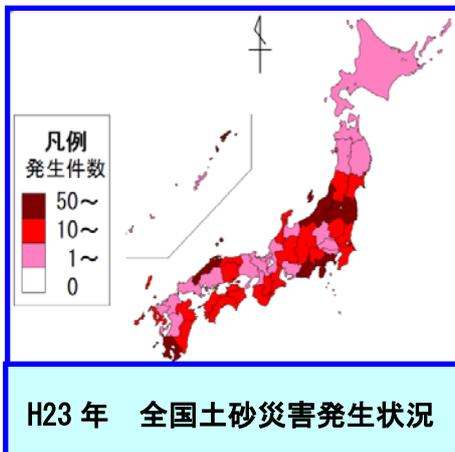
センサ基板密閉容器内の狭い空間に設置可能な縦型の高精度水晶 MEMS 傾斜角センサを試作して、機能評価を行い、角度変位精度 $\pm 0.001^\circ$ を確認した。また、高精度水晶 MEMS 傾斜角センサ計測基板、及び多重化信号処理回路とソフトを試作して当初の目標は達成した。計測システム収納容器内に配置するセンサ(セラミックパッケージ)断面積を約  $60\text{mm}^2$  で実現し  $120\text{mm}^2$  以下の小型化を達成した(センサ配置空間断面積  $226\text{mm}^2$ )。これにより、今後、高信頼高精度の傾斜角センサを使った新しいコンセプトの超小型計測システムが設計可能となった。角度変位精度  $\pm 0.001^\circ$  (ダム堤体のたわみ観測のプラムラインの変位 $\pm 0.1\text{mm}$ 相当)については、長期評価試験による地上評価のコンクリート壁面屋外暴露試験では温度ドリフトの影響を受けており、現時点では温度ドリフト補正後で  $0.005$  度の変位精度までしか達成できていない。サブテーマ【1】同様に試験室での開発評価に比べ実使用環境に近い長期性能評価試験の実施評価では影響を及ぼす要因の多さに戸惑っている。地下水への浸漬試験(地下評価)では、高信頼・高精度の傾斜角センサ他のデータ通信に異常は発生せず、防水効果と通信機能についての良好な評価データが蓄積されており、3 月以降についても試験継続中である。今後、温度特性、ドリフト対策について、更に開発を継続して行く。

## (2) 事業化展開

### 1) 現在の社会ニーズ

本章 全体総括の冒頭で述べたとおり、社会での自然災害の脅威から身を守るための地すべり監視体制（自動監視）、或いは、老朽化公共インフラの崩壊に至るまでの予防診断監視体制（自動監視）のニーズは益々高まっている。

#### 1 土砂災害発生状況



平成 23 年度土砂災害発生 1,422

土石流等：419件、地すべり：222件、がけ崩れ：781件

国民の生命・財産を守るため**正確な現状把握**に基づいた**災害予防が不可欠!!**

#### 2 公共インフラの老朽化状況



日本に迫り来る **インフラ・クライシス !!**



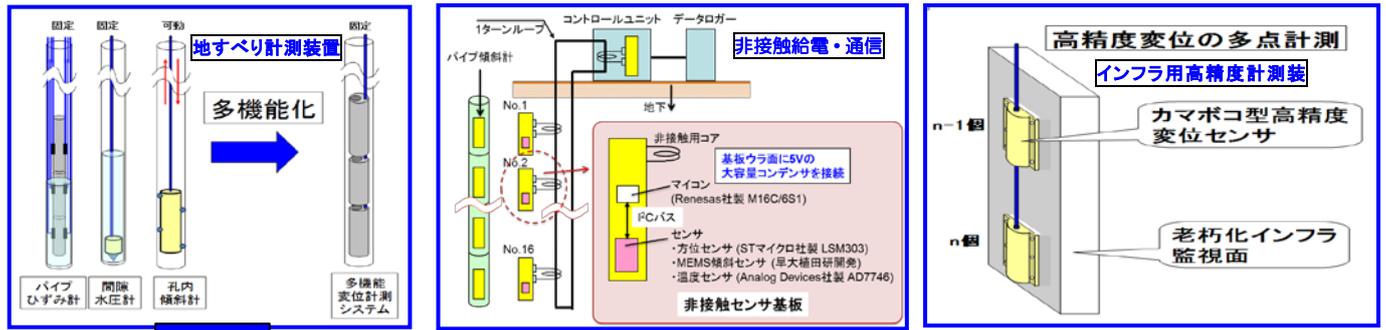
国民の生命・財産を守るため**老朽化する公共インフラの革新的な維持・管理システムの構築が必要!!**

国の施策として 2013 年 12 月 25 日社会資本の維持管理・更新のあり方について答申があり、今後、インフラ更新費 10年後最大 5.1 兆円 と予測し、予防保全と維持管理・更新のための技術開発の推進の提言が出されている。また、2014 年 1 月 3 日には橋・トンネル点検、自治体に義務づけ指示が出されている。

このようなことから、総合的に判断すると常時変位を点ではなく、線・面で自動監視可能な技術、施工性の良い低コスト、高精度変位計測法の開発が求められている。

## 2) 社会ニーズに応える製品化

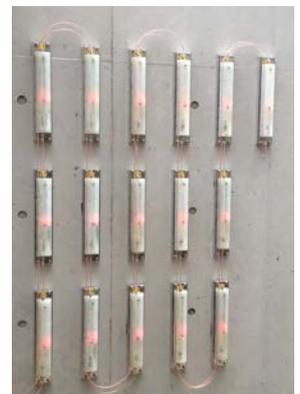
当該事業で研究開発した地すべり計測装置、非接触給電、インフラ用高精度計測装置の製品イメージを示す。



地すべり計測



非接触給電・通信地下変位計測



非接触給電・通信インフラコンクリート壁面高精度変位計測

多機能変位計測システムの完成により製品化に向けて、具体的ニーズを川下ユーザー様(ゼネコン、国、地方公共団体等)でリサーチし、ニーズに基づいた装置の最適仕様を決定し、信頼性、長期安定性の確立を図る。

また、コストを再検討し、ユーザー様が要求希望する価格へのコストダウンアプローチ検討を実施する。

## 3) PR 活動

川下ユーザー様(ゼネコン、国、地方公共団体等)への PR のため、展示会への出展、NETIS(新技術情報提供システム(国交省))への登録、土木・地質調査の全国標準積算資料への掲載認定等によりユーザー様の認知度向上を図り営業活動を展開して行く。

上記の事項を実施して、事業化を目指して取り組む



この印刷物は、印刷用の紙へ  
リサイクルできます。