

共同研究報告書

整理番号第393号

厳しい条件下での使用に耐えうる地すべり観測装置の開発

共同研究報告書

平成21年6月

独立行政法人土木研究所
川崎地質株式会社
曙ブレーキ工業株式会社
坂田電機株式会社
株式会社共和電業

Copyright © (2009) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

厳しい条件下での使用に耐えうる地すべり観測装置の開発
共同研究報告書 執筆者名簿

独立行政法人土木研究所	土砂管理研究グループ	上席研究員	藤澤 和範		
		総括主任研究員	千田 容嗣		
		元 総括主任研究員 ¹	永田 雅一		
		主任研究員	石田 孝司		
		交流研究員	坂本 孝之		
		元 交流研究員 ²	池田 学		
		元 交流研究員 ³	樋口 佳意		
		支社長	坂上 敏彦		
		部長	黛 廣志		
川崎地質株式会社	西日本支社	技術本部 技術統括部	部長	山本 高司	
	事業本部	ジオ技術部	部長	菅野 孝美	
	事業本部	防災設計部	部長	山邊 晋	
	技術本部	技術企画部	課長代理	国見 敬	
曙ブレーキ工業株式会社	開発部門	新商品開発部	部長	安齋 真	
		" "	" 1 課	課長	西條 敦志
		" "	" 2 課	主査	根津 正弘
				主査	金子 稔
				主査	大久保智美
				主査	増子 実
				主査	関根 透
				主査	後藤 知英
				主査	和田 博治
坂田電機株式会社	企画室	課長	金子 綾一		
		課長	永江 祐		
		係長	館野 稔		
株式会社共和電業	技術本部	計測工事部 計測技術課	係長	大原 寿昭	
		技術本部	特機部	次長	立野 恵一
				副本部長	竹内 勝美

株式会社共和電業

技術本部 特機部

副主査

徳富 啓二

係長

川原 和幸

営業本部インフラ営業部

部長

苛原 晃

【要 旨】

本報告書は、土木研究所地すべりチームと民間企業4社が、平成18年度から平成20年度にかけて実施した共同研究「厳しい条件下での使用に耐えうる地すべり観測装置の開発」について、その成果をとりまとめたものである。

本共同研究では、これまでは設置や計測の継続が困難であった地すべり災害現場においても、安定的かつ信頼性の高い計測データを取得し、危機管理対応の要求に十分応えられる観測機器とその設置方法の開発を行った。

キーワード：地すべり、厳しい条件、観測装置、設置方法、危機管理

1：現、愛媛県 土木部 砂防課

2：現、株式会社エイト日本技術開発 ジオ・エンジニア事業部

3：現、坂田電機株式会社 計測工事部

厳しい条件下での使用に耐えうる地すべり観測装置の開発

【 目 次 】

	頁
1 . はじめに-----	1-1
1.1. 研究背景-----	1-1
1.2. 研究目的-----	1-1
1.3. 研究内容と分担-----	1-2
2 . 従来の地すべり観測-----	2-1
2.1 地盤伸縮計-----	2-2
2.2 地盤傾斜計-----	2-3
2.3 測量による計測-----	2-4
2.4 めき板による計測-----	2-5
2.5 縦型伸縮計-----	2-6
2.6 地中傾斜計-----	2-6
2.7 パイプひずみ計-----	2-8
3 . 従来の観測機器による計測が難しい地すべり-----	3-1
3.1 地すべり災害事例-----	3-1
3.2 各地すべりタイプの特徴-----	3-5
3.3 従来の観測機器による計測が難しい現場で期待される計測技術-----	3-7
3.4 従来の観測機器では計測が難しい地すべりで使用可能な観測機器-----	3-10
4 . 厳しい現場条件に耐えうる地すべり観測装置の開発-----	4-1
4.1 加速度センサを応用した地表傾斜計-----	4-1
4.2 振動デバイスを応用した土砂感知センサ-----	4-30
4.3 音響を応用した移動量計-----	4-67
4.4 地盤伸縮計の改良による大变位伸縮計-----	4-112
4.5 地中無線通信技術を応用した変位計-----	4-125
4.6 接点信号発信器を応用した崩壊検知センサ-----	4-143
5 . まとめ-----	5-1

【参考資料】

従来の観測機器では計測が難しい地すべり災害事例

- ・ 資料- 1. 代表的な 8 事例の詳細調査結果 ----- 参考- 1
- ・ 資料- 2. アンケート調査結果----- 参考-16

1. はじめに

1.1. 研究背景

地すべり災害では、警戒避難基準値を設定するなど、観測機器を用いた計測データによる判断が重要視されている。しかし、移動量の大きい地すべり^{例えば1)}、表層崩壊や落石を伴う地すべりでは、その危険性が大きい状況であるにも関わらずデータが取得できなくなる場合がある。また、二次災害の危険性により観測機器を設置できない場合、地すべり移動土塊が泥濘化・流動化^{例えば2)}により足場やトラフィカビリティが確保できないために観測機器が設置できない場合、影響範囲の予測が難しく適切な計器配置が行えない場合もある。これらの要因には、地すべりの動きが観測機器の測定範囲を越える大きさ・速さであること、それに伴い観測機器が脱落したり流出したりすることが挙げられる。また、地すべり移動土塊が泥濘化・流動化するような事例が少なく、それらに対する計測方法が確立されていないことも要因のひとつである。このように計測が困難な厳しい条件下においても、危機管理対応を求められる地すべり災害現場では、信頼性の高い計測データを安定して取得し、警戒避難の判断に役立つ客観的な情報を提示する必要がある。そこで、本研究では、これまでは計測が困難であった現場条件でも設置・計測が可能な計測技術の開発を行った。

1.2. 研究目的

本研究では、これまでは設置や計測の継続が困難であった地すべり災害現場においても、安定的かつ信頼性の高い計測データを取得し、危機管理対応の要求に十分応えられる客観的な情報を提供することを目的に、以下の(1)～(6)の観測機器とその設置方法の開発を行った。

- (1) 地すべり背後斜面への崩壊の拡大や影響範囲(派生的な地すべりの検出)を監視する観測機器とその設置方法の開発。
- (2) 泥濘化・流動化した地すべり移動土塊の到達範囲を検知する観測機器とその設置方法の開発。
- (3) 立ち入りが困難な地すべり地でも安全に設置でき、地すべり移動量(距離)を計測する観測機器とその設置方法の開発。
- (4) 通常の地すべりより移動量や移動速度が大きな地すべりを計測する観測機器とその設置方法の開発。
- (5) 観測機器が土中や水中に埋まった条件下でも地すべり移動量(距離)を計測する観測機器とその設置方法の開発。
- (6) 立ち入りが困難な地すべり地でも安全かつ面的に多数の配置ができる、簡便で安価な警報装置とその設置方法の開発。

<参考文献>

- 1) 藤澤和範,池田学,樋口佳意,水野秀明:岐阜県揖斐川町東横山地区で発生した地すべり,土木技術資料,第48巻,第7号,pp.4-5,2006.
- 2) 藤澤和範:沖縄県中城村北上原地先で発生した地すべり災害の概要,土と基礎,Vol.54, No.9, Ser.No.584, pp.46-48, 2006.

1.3. 研究内容と分担

本研究は、独立行政法人土木研究所、川崎地質株式会社、曙ブレーキ工業株式会社、坂田電機株式会社、株式会社共和電業による共同研究である。

本研究の分担および全体工程表を表 1.3.1 に示す。

2. 従来の地すべり観測

地すべり発生の主な誘因は、降雨などによる地下水位上昇に伴う間隙水圧の増大と考えられており、降雨量・地下水位の観測は重要である。さらに、地すべり地内の地表・地中変位量計測との相関を見出すことによって、精度の高い変動監視が可能となる。よって、地すべり観測では、地表面の変位量観測、地中変位量観測、地下水位観測、降雨量観測が行われている。

降雨量は、地すべり地内もしくは近接した場所の計測データを用い、地下水位は地すべりブロック内で計測することが必要である。地表変位量の計測では、地盤伸縮計や地盤傾斜計により地すべり土塊の移動による地表面の変動を計測・監視する。地中変位量の計測は、すべり面でのすべり土塊の移動を計測する孔内伸縮計や、ボーリング孔内に挿入したパイプの曲げ変化を計測するパイプ歪計、及びその角度を計測する孔内傾斜計によって行われる。

表 2.1 に地すべり観測に用いる観測機器と計測項目の一覧を示し、各観測機器の概要を以下に示す。

表 2.1 地すべり観測に用いる観測機器と計測項目

	観測機器	計測対象	計測項目	計測の目的
変動量調査	地盤伸縮計	伸縮変動	地表面の変位	地すべりの変動把握
	地盤傾斜計	傾斜変動	地表面傾斜	
	測量による計測	土塊移動量	地表面(杭等)の変位	
	ぬき板観測	土塊移動量	クラックの変位量 (緊急時の簡易計測)	
すべり面調査	地中伸縮計	すべり面変位	孔内の鉛直変位	すべり面の確定 すべり面変位の把握
	地中傾斜計	すべり面変位	孔内の角度	
	パイプひずみ計	すべり面変位	パイプの曲げ歪	

2.1 地盤伸縮計

(1) 概要

地盤伸縮計は、地すべり地と不動地の間の変動状況や、地すべりの活動の活性化により発生したクラック・段差等の発達状況を把握することを目的として設置する。設置は測線に沿って地すべりの運動方向に設置することが望ましい。

2点間の伸縮の経時的変化を測定・記録することにより、地すべり土塊の移動状況を調べるものである。また、大規模な切土、盛土などの土工事の際に地盤変動の監視や地すべりの移動方向を明らかにする目的で使用される場合もある。

(2) 計測原理

伸縮計は、計測対象の両端に杭を打設し、一方の杭に伸縮計を設置し、反対側の杭からインバー線を張り、計測対象を挟んで伸縮計に接続して設置する(図2.1.1参照)。記録は、伸縮計のドラムに巻き付けた記録用紙にインバー線の動きを機械的に記録する方法と、データロガーと組み合わせて自動計測する方法がある。

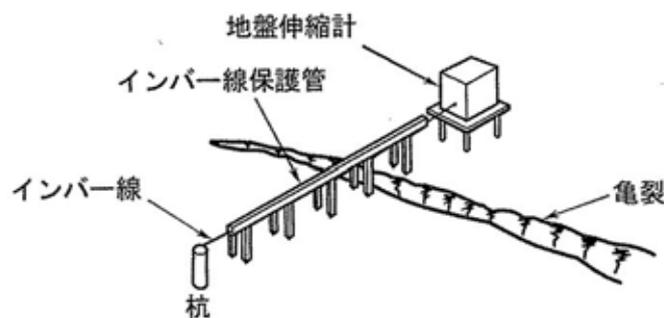


図 2.1.1 伸縮計設置概略図

(3) 適用限界

測定感度上の限界があり、潜在的な地すべり活動を検出することは困難と考えられる。

インバー線の伸び方向に対して直角方向への移動にはほとんど感度がない。

大きい沈下が生じる場合は、インバー線が保護管等と接触し計測困難となる。

表 2.1.2 地盤変動種別一覧

変動種別	日変位量 (mm)	累積変位量 (mm/月)	一定方向への 累積傾向	総合判定	
				変動判定	活動性ほか
変動 A	1 以上	10 以上	顕 著	確 定	活発に運動中 表層・深層地すべり
変動 B	0.1~1	2~10	やや顕著	準確定	緩慢に運動中 粘質土・崩積土すべり
変動 C	0.02~0.1	0.5~2	ややあり	潜 在	継続観測が必要
変動 D	0.1 以上	なし(断続変動)	なし	異 常	局所的な地盤変動 その他

2.2 地盤傾斜計

(1) 概要

地盤傾斜計の計測は、すべり面に沿って地すべり土塊が移動しようとする時、地表面での伸縮変動とともに傾斜変動が生じることを利用して、微小な傾斜変動量を把握することで地すべり発生の早期検知や地すべり発生範囲の予測を行うことを目的とする。

(2) 計測原理

地盤傾斜計のセンサは、水管式地盤傾斜計・サーボ式加速度計・差動トランス式・ひずみゲージ式の4種類が代表的である。水管式地盤傾斜計では、高感度の2本の気泡管を直交方向に固定したセンサであり、手動計測に用いられる(図2.2.1参照)。その他のセンサは電気式センサであり、自動計測に用いられる。

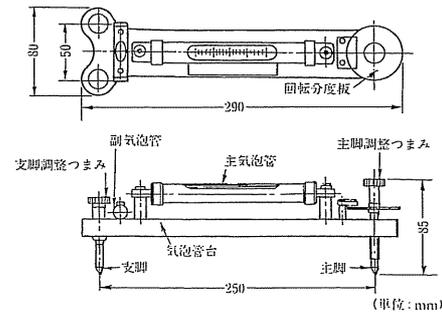


図 2.2.1 水管式地盤傾斜計の例

(3) 適用限界

非常に高感度という特性がある。そのため変動量が多い場合は、早い時期に測定範囲を超過し、継続的な変動把握は困難である。

地すべりの種類や設置位置により、地すべりに対しての感度が悪くなる(図2.2.2参照)。地盤傾斜計により計測された傾斜変動量の大小や方向性だけから地すべり変動を判定することは困難であり、他の調査結果を踏まえて総合的な判断が必要である。

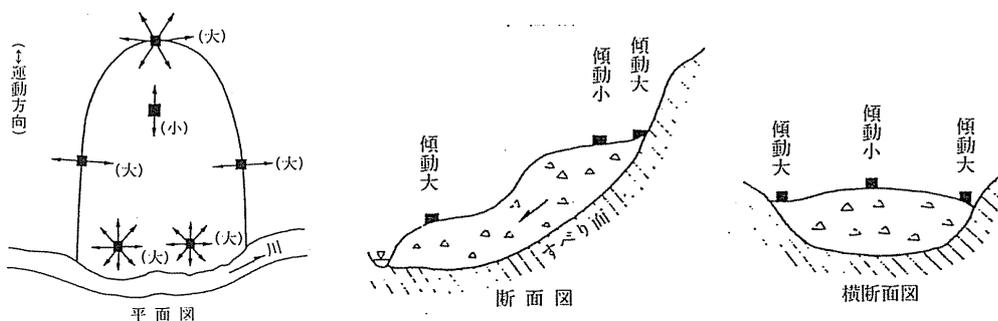


図 2.2.2 地すべり地の傾斜運動傾向

表 2.2.1 傾斜変動種別一覧

変動種別	日平均変動量 (秒)	累積変動値 (秒/月)	傾斜量の集積 傾向の有無	傾斜運動方向と 地形との相関性	総合判定	
					変動判定	活動性ほか
変動 A	1 以上	100 以上	顕著	あり	確定	活発に運動中
変動 B	0.1~1	20~100	やや顕著	あり	準確定	緩慢に運動中
変動 C	0.02~0.1	20 以下	ややあり	あり	潜在	継続観測が必要
変動 D	0.1 以上	なし (断続変動)	なし	なし	異常	局所的な地盤変動 その他

2.3 測量による計測

測量による地すべり観測は、広範囲にわたる地すべり地全体の地表面移動量が測定できる特徴があり、主として地すべりの運動方向が不明瞭な場合や移動量が激しい場合に用いる。

2.3.1 地上測量

(1) 概要

地表に設置した観測点の座標を、経時的に測定することにより地すべりの安定性の確認や地すべり活動の特徴を把握することを目的とする。地上測量による計測は、測定用具の設置（移動杭）が容易で、比較的安価に測定でき大きな変位に対しても対応できる特徴がある。

(2) 計測原理

地すべり運動地域外の固定点を設け、この固定点を基準とする横断見通し測量や三角測量などがある。地区外の基準点から座標計算により絶対位置を求め移動量を計算することもある。測量に使用する測量機器は、測定精度に対応した精度が要求される（表 2.3.1 参照）。

表 2.3.1 測量機器の精度

測量機器	要求される精度
測角儀（トランシット）	1 秒読み、0.1 秒読み
測距儀（光波距離計）	±5mm 以内
測距測角儀（トータルステーション）	1 秒読み、±5mm 以内
水準儀（レベル）	0.01mm

(3) 適用限界

地すべりの変位が微小の場合は、測量誤差も含まれる可能性があり、他の測定機器の結果を踏まえて測量結果を吟味する必要がある。また、測量機器固有の誤差以上の変位が発生しないと測定値は不明瞭なものになってしまう。

2.3.2 GPS 測量

(1) 概要

GPS 測量は、複数の人工衛星から電波を受信し、観測点の 3 次元座標を自動的に測量するシステムである。地すべり地の規模が大きい場合や地すべり多発地帯で確実な固定点が確保できない場合に用いられる（図 2.3.1 参照）。GPS 測量では、観測点間の見通しの必要がなく、気象条件の影響を受け難く、夜間計測が可能であり、長時間の連続計測が可能である。

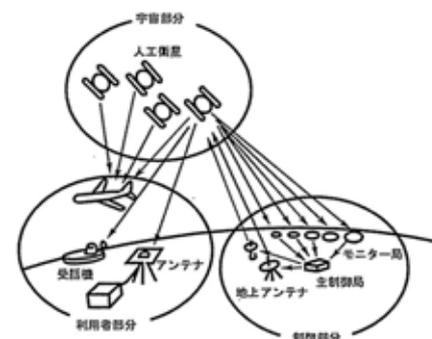


図 2.3.1 GPS 測量概念図

(2) 計測原理

衛星から発信される電波信号を任意の受信点において受信機で捉え、各衛星の空間座標を既知として受信点の位置を高精度で測量する。地表面の変位は測量された位置の 2 時期の差として求めら

れる。

(3) 適用限界

測定の誤差は、人工衛星の個数等も影響するが、約 $\pm 5 \sim 10$ mm 程度である。

衛星の数が少ない場合や天空の見通し状況が悪い樹林帯や谷底等の場合は、計測精度の低下や計測できない場合がある。

2.3.3 3Dレーザースキャナー測量

(1) 概要

レーザースキャナーによる計測は、ターゲットに向かってレーザーパルスを照射して反射走時を計測し、座標データを取得する方法であり、測定効率が高く、一度に広範囲の座標データを取得できる。地すべり発生時に地形図を取得したい場合や、地すべり地内への立入りが困難な場合での動態観測で用いられる。

(2) 計測原理

スキャナー内部に設置されたプリズムおよびスキャナー自体が回転することにより、1パルス1データとして地表面や構造体表面の座標を、スキャナーを中心とした極座標系に高密度の点群座標データとして取得する。

(3) 適用限界

スキャナー設置位置から計測位置までの距離が長くなるほど変位の計測精度が悪くなる。

2.4 ぬき板による計測

(1) 概要

ぬき板による計測は、地盤に変状が認められ、早期にその運動を把握しなければならない時に、応急対応として設置が容易で安価な方法として利用され、亀裂発生部等の変位を計測する。

(2) 計測原理

亀裂を挟んでその両側に木杭を打ち込み、これにぬき板と呼ぶ変位板を設置し、このぬき板にあらかじめ切れ目を入れておき、その拡大や縮みの量を測定する(図2.4.1参照)。

(3) 適用限界

この方法は、応急対応のため測定誤差が大きく、詳細な移動量の把握は困難である。継続的な計測が必要な地点は、速やかに地盤伸縮計などによる方法へ変更することが望ましい。

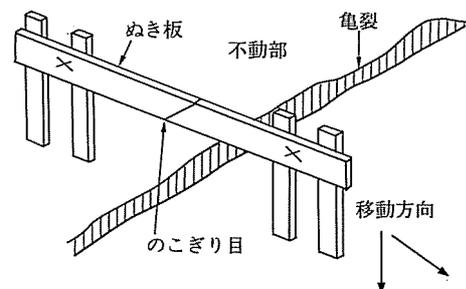


図2.4.1 ぬき板を用いた計測例

2.5 縦型伸縮計

(1) 概要

ボーリング孔を利用して設置する計測器である。すべり面を貫通して鉛直方向へ測定ワイヤーを設置し、すべり面での変位量を測定して地すべりの移動状況を把握することを目的としており、地すべりの変動が活発でパイプひずみ計や地中傾斜計の測定範囲を早い時期に越える場合や、シャフト杭工などの対策工施工時の安全管理に併用される。

(2) 測定原理

測定ワイヤーの先端をすべり面より下位の不動層に固定し、他端を地上部の測定器へ接続する(図 2.5.1 参照)。記録方法は、地盤伸縮計と同様である。

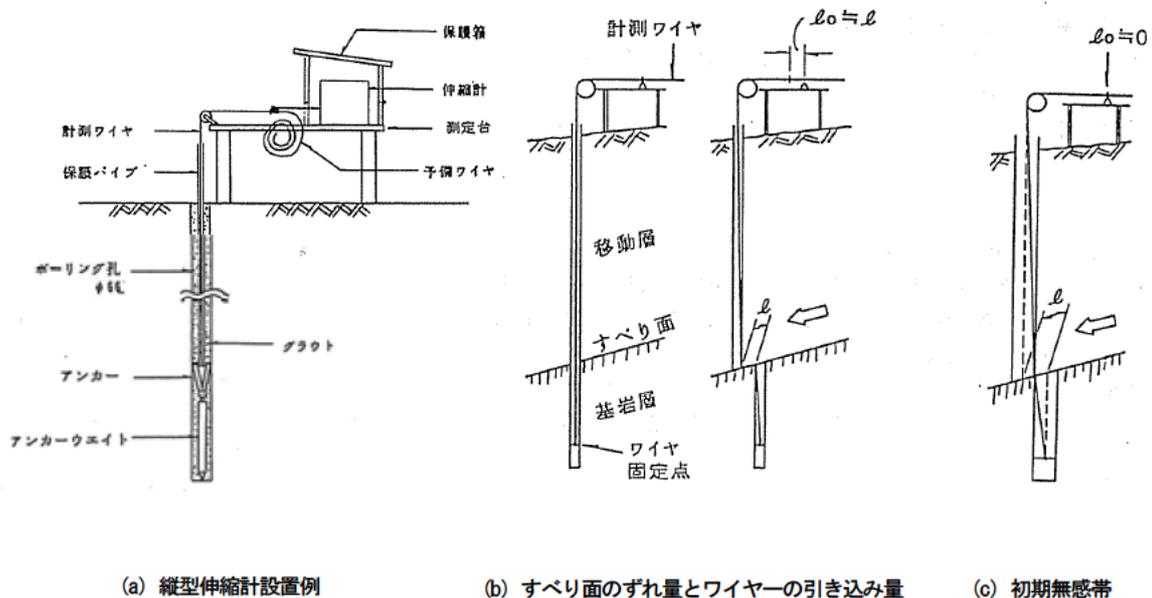


図 2.5.1 縦型伸縮計の設置例と原理

(3) 適用限界

測定感度に限界があり、潜在的な地すべり活動の検出は困難である。また、移動が検出され始めた時点では、すでに地すべりが進行している可能性もある。縦型伸縮計では、すべり面の位置を調べることができず、複数のすべり面が存在する場合は、複数のすべり面の変位の累積量となる。

地盤が沈下する場合は、移動量が相殺されるため正しい移動量が把握できない。

2.6 地中傾斜計

地すべりによる孔内ガイドパイプのたわみに伴う屈曲を傾斜角の変化として計測し、地すべり面および地すべりの変動量や変動方向(変位ベクトル)といった変動形態や変動速度を把握することを目的に使用される。

2.6.1 設置型孔内傾斜計

(1) 概要

一般的に、すべり面が判明しているすべり面付近に設置して、その変動を測定する場合に用いられることが多い。しかし近年では、高性能・高耐久性かつ安価な傾斜センサが開発され、孔内に多数設置することで挿入型孔内傾斜計やパイプひずみ計のように連続した変動観測ができるようになってきている。また、半自動もしくは自動計測が可能であり、保孔管のたわみ量を自動計算し警報装置と連動させることで管理基準値に基づいた監視装置としても使用が可能である。

(2) 測定原理

ボーリング孔内に設置した硬質塩ビ管(VP管)やアルミケーシングの特定の深度に傾斜センサを固定し、その設置箇所におけるパイプの傾斜を計測するものである(図2.6.1参照)。ケーシングは、十分なグラウトを行い地盤と一体化を図る必要がある。

傾斜センサには、ひずみゲージ式・サーボ式加速度計・差動トランス式・静電容量式・振子式などの方式があり、測定範囲および感度にはかなりの幅がある。また、複数センサを1本のケーブルに直列接続できるものもあり、傾斜センサの選択においては、測定目的や測定規模・地すべりの活動度などを考慮する必要がある。

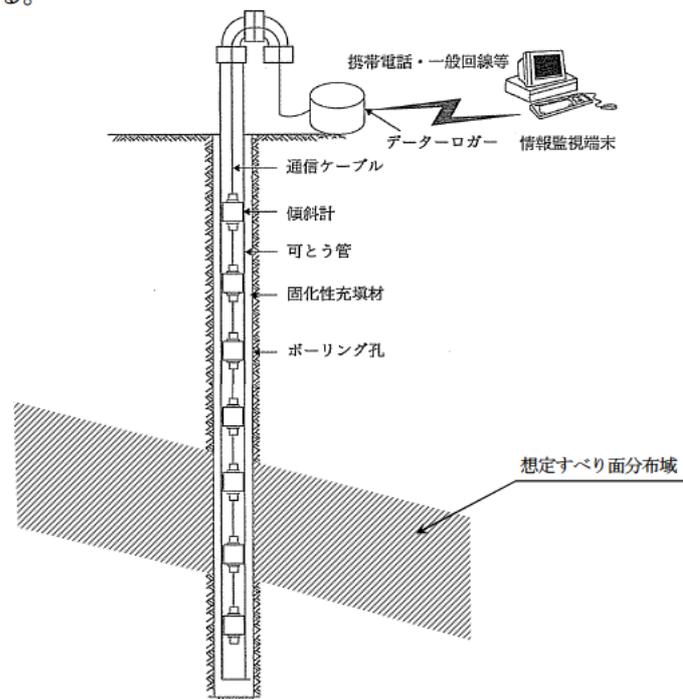


図 2.6.1 設置型孔内傾斜計の設置概念図

(3) 適用限界

多数の設置型孔内傾斜計を連続的に設置するのは、費用対効果の面で限界があり、通常地すべり面を含めて数箇所を設置する程度である。ガイドパイプの変形が大きくなっても、挿入型孔内傾斜計と異なりプローブを回収する必要がない。ただし、傾斜計の測定範囲を上回る傾斜では計測不能となるため、あらかじめ測定範囲を選定することが必要となる。

2.6.2 挿入型孔内傾斜計

(1) 概要

地盤の動きに追従する可とう管を地盤中に設置し、地上より傾斜計を挿入して深さごとの傾斜量と方向を測定し、その測定結果からすべり面の位置判定や地すべり移動層の変位を求めることを目的とする。傾斜計が高感度であるため、断続的かつ移動量の小さい地すべりや対策工施工後の長期間にわたる効果判定確認などに用いられる。

(2) 測定原理

86～116mm で削孔したボーリング孔に 90°毎に 4 方向の車輪溝のついたガイドパイプを挿入する。ガイドパイプと孔壁の間は十分にグラウトを行い、地盤とガイドパイプの一体化を図ることが重要である。その後、挿入型の傾斜センサの入った車輪付きプローブをガイドパイプ内へ挿入して、ガイドパイプ内の一定方向の傾斜を任意の間隔で連続計測するものである（図 2.6.2 参照）。

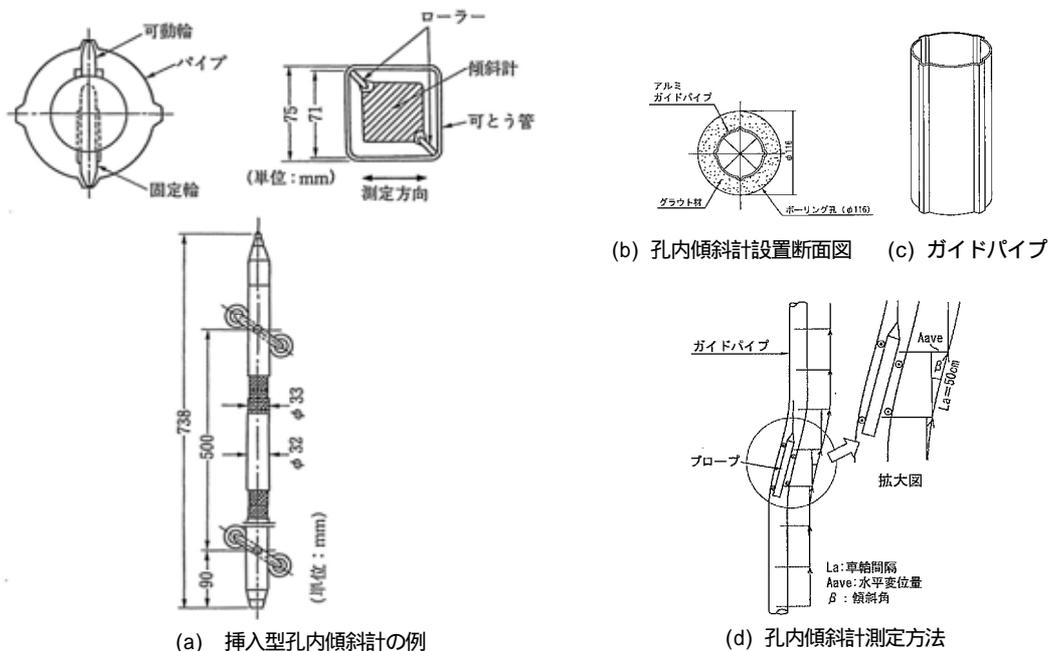


図 2.6.2 挿入型孔内傾斜計の概要図

(3) 適用限界

孔曲がりが増えると計器を挿入できなくなり測定不能となる。移動量の大きい地すべりでは、移動の初期あるいは設置直後の測定に限られるので、すべり面の位置判定までしかできない。

ガイドパイプ挿入とグラウトによる埋め戻しの確実性から、深度 50m 程度が限度と考えられる。

2.7 パイプひずみ計

(1) 概要

ボーリング孔内に設置した硬質塩化ビニルパイプの地すべりによるたわみに伴う屈曲から、地すべり面および地すべりの変動量や変動方向（変位ベクトル）といった変動形態や変動速度を把握す

ることを目的に使用される。主として変動の可能性のある地すべり斜面や切土法面において、変状が顕著化する前の地すべりの検出や変状が出た後の安定性の評価に用いられる（表 2.7.1 参照）

(2) 測定原理

硬質塩化ビニルパイプの外周に軸方向で直交する 2 方向もしくは 1 方向にひずみゲージを 0.5～2m 間隔で貼付してボーリング孔に挿入し、電気抵抗が地すべりの変位に伴い変化することを利用して、地すべり面位置やその累積ひずみの程度を測定する（図 2.7.1 参照）

表 2.7.1 パイプ歪計計測結果による地すべり判定基準

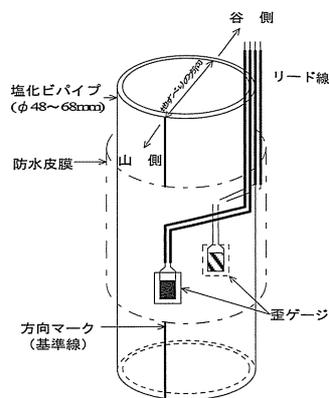


図 2.7.1
パイプ歪計の概要図

変動種別	累積変動値 (μ /月)	変動形態		すべり面存 在の地形・地 質的可能性	総合判定	
		累積傾向	変動 状態		変動 判定	活動性ほか
変動 A	5000 以上	顕著	累積	あり	確定	顕著に活動して いる岩盤～崩積 土すべり
変動 B	1000 以上	やや顕著	累積	あり	準確 定	緩慢に活動して いるクリープ型 地すべり
変動 C	100 以上	ややあり	累積 断続 攪乱 回帰	あり	潜在	すべり面存在有 無を断定できな いため、継続観 測が必要
変動 D	1000 以上 (短期間)	なし	断続 攪乱 回帰	なし	異常	すべり面なし 地すべり以外の 要因

(3) 適用限界

パイプひずみ計は高感度で、測定範囲は $\pm 30000 \mu\text{strain}$ 程度であり、大きな移動量の測定はできない。また、ひずみ計の点数およびリード線の本数が増えることや、パイプ自身の重量によりたわみを生じることもあるため、パイプひずみ計による深い地すべりの測定は適さない。

リード線の劣化や絶縁低下などによりひずみ計の性能は大きく低下するため、長期間の測定は困難でありその寿命は 1～2 年程度である。

また測定値による変動形態の判定は、一般に「顕著」・「やや顕著」・「ややあり」・「なし」などの定性的な判断にとどまる。

<参考文献>

- 1) 地すべり観測便覧 平成 8 年 社団法人地すべり対策技術協会 地すべり観測便覧編集委員会
- 2) 地盤調査の方法と解説 平成 16 年 6 月 社団法人 地盤工学会
- 3) 現場技術者のための地質調査技術マニュアル 平成 17 年 11 月 関東地質調査業協会
- 4) 長野県地すべり技術指針(案) 長野県土木部砂防課 平成 17 年 3 月
- 5) 地すべり防止技術指針及び解説(案) 国土交通省河川局砂防部 平成 19 年 11 月 19 日

3. 従来の観測機器による計測が難しい地すべり

従来の観測機器による計測が難しい地すべり事例を踏まえ、今後期待される計測技術を整理¹⁾する。

3.1 地すべり災害事例

3.1.1 調査方法

1) 調査対象とする地すべり災害

昭和 55 年以降に発生した地すべり災害のうち、従来の観測機器では計測が難しかったことが想定されるものを対象とした。但し、地震に起因するものは含まない。

2) 事例調査を行った資料

事例調査に使用した資料は、土木研究所災害報告資料、日本地すべり学会誌、砂防学会誌、日本応用地質学会誌、土木技術資料、土砂災害の実態（財団法人 砂防・地すべり技術センター、毎年発行）、日本の地すべり - 災害事例写真集 - （砂防広報センター、2000）、その他とした。

3.1.2 概要調査結果

既存資料より上記定義に該当すると推定される 35 災害事例を抽出した（表 3.1.1～3.1.2）。

3.1.3 地すべり災害の分類

上記で抽出された 35 災害事例を地質条件及び発生規模により、下記 4 つのタイプに分類した。なお、変成岩、花崗岩類、第四紀堆積層分布域での特殊地すべり災害については事例が少ないため、ここでは省略した。また、沖縄泥岩地すべりは、1 事例しかないが、泥濁化（土塊中の水分が多く、移動土塊が非常に乱された状態）する特殊な地すべりであるため、新第三紀層地すべりと区別した。

新第三紀泥岩地すべりタイプ(写真 3.1.1)

新第三紀層の泥岩を主体とした地すべりと新第三紀泥岩・火山岩複合地すべりを合せたタイプとした。

沖縄泥岩地すべりタイプ(写真 3.1.2)

沖縄県に分布する島尻泥岩層分布域で見られる泥濁化する地すべりのタイプとした。なお、このタイプは、と同じ新第三紀泥岩を主体とするものであるが、島尻泥岩の特殊性を考慮し別のタイプとした。

岩盤崩壊性地すべりタイプ(写真 3.1.3)

古生層、中生層、古第三紀層の堆積岩類を主体とした急峻斜面での地すべりに多いタイプとした。

第四紀火山岩類地すべりタイプ(写真 3.1.4)

未固結堆積物を多く含む、第四紀火山岩類を主体とした地すべりのタイプとした。

なお、新第三紀層の火山岩類地すべりについては、地層の構成や風化などの状況により泥岩を主体とする 新第三紀層地すべりのような動態を示したり、第四紀火山岩類地すべりのタイプのような動態を示したりすることがあるため、ここでは独立したタイプとしては分類していない。



写真 3.1.1 新第三紀層泥岩地すべりタイプ（石倉地区）²⁾



写真 3.1.2 沖縄泥岩地すべりタイプ（北上原地区）³⁾



写真 3.1.3 岩盤崩壊性地すべりタイプ（宇井地区）



写真 3.1.4 第四紀火山岩類地すべりタイプ（八幡平澄川地区）⁴⁾

表 3.1.1 従来の観測機器では計測が難しい地すべり災害事例 (1/2)

整理番号	発生年	発生時期	発生場所		発生規模	被害の状況	気象の状況	想定される地質状況	その他	備考
			市町村名	地区名						
1	1980	4月8日	山形県大蔵村	藤田沢	幅170m、長さ600m、約45万㎡	村道・農道	融雪	新第三紀泥岩		日本雪工学会論文集(1999)
2	1982	8月4日	静岡県春野町	中羽根	幅100～120m、長さ200m、約5万㎡	熊切川を閉塞	台風10号による集中豪雨	中生代四十累層群	避難有	日本の地すべり(砂防広報センター、2000)
3	1982	8月4日	奈良県西吉野村	屋那瀬	幅230m、長さ225m、約50万㎡	全壊8戸、半壊7戸、床上浸水26戸、床下浸水8戸、一級河川丹生川を埋塞	集中豪雨	中生代頁岩・砂岩・凝灰岩	避難有	日本の地すべり(砂防広報センター、2000)
4	1983	7月23日	島根県浜田市穂出町	中場	幅100m、長さ150m	死者15名、全壊8戸、半壊一部損壊4戸	梅雨豪雨、最大時間雨量80mm、連続雨量524mm	三郡変成岩・泥質片岩		日本の地すべり(砂防広報センター、2000)
5	1985	2月15日	新潟県青海町	玉の木	幅70m、長さ110m	死者10名、負傷者4名、全壊5戸、半壊2戸	融雪	新第三紀中新世火山岩類		日本の地すべり(砂防広報センター、2000)
6	1985	7月26日	長野県長野市	地附山	幅400m、長さ700m、約350万㎡	全半壊64戸、死者26名	降雨	新第三紀中新世火山岩類		砂防学会誌・地すべり学会誌など
7	1989	3月7日	新潟県松之山町	藤倉	幅100m、長さ500m		融雪	新第三紀泥岩	一級河川東川に流入。高さ30mの滑落崖が形成された。	日本の地すべり(砂防広報センター、2000)、土砂災害の実態(1994)土砂災害の実態(1989)
8	1990	2月19日	新潟県蒲川原村	沢口	幅100m、長さ400m、80万㎡	耕地1.6ha、山林3.3ha、1級河川保倉川を埋塞等	融雪	新第三紀泥岩		土砂災害の実態(1990)
9	1990	7月4日	長崎県松浦市今福町	石倉	幅100m、活動面積11.67ha	水田および森林約5ha	時間最大雨量45.5mm、連続雨量386.5mm(6/28～7/3)	新第三紀砂岩・頁岩・玄武岩	避難有。末端部が土石流化し5方向に分かれて流下。	地すべり学会誌 111号
10	1993	6月4日	山形県立川町	立谷沢川(濁沢)	幅350m、約576万㎡	直接の被害はなし	融雪、降雨	第四紀火山岩類		山形県の土砂災害(山形県土木部河川砂防課他2003)
11	1993	9月20日	鹿児島県日吉町	毘沙門	幅300m、長さ250m、約100万㎡	死者2名、負傷者3名、全壊2戸、二級河川大川埋塞		花崗閃緑岩(マサ土)	移動土塊の流動性が高く、土砂のほとんどが滑落斜面外に流出。流出土砂延長200m以上で、土塊の到達距離が、地すべりの長さおよび幅の約2倍。堆積土砂は強い攪乱は受けておらず、土石流形態を成していない。	日本の地すべり(砂防広報センター、2000)、土砂災害の実態(1993)
12	1994	10月11日	北海道礼文町	元地	幅100m、長さ550m	全壊1戸、半壊1戸		第四紀火山岩類	土塊が400～500m移動	日本の地すべり(砂防広報センター、2000)、土砂災害の実態(1994)
13	1995	7月12日	長野県小川村	大崩	幅70m、長さ400m	被害2戸、土尻川左支川小川川埋塞、砂防ダム(H12m)袖部破壊	7月1～12日累積降雨293mm、最大日雨量(12日)85mm	新第三紀泥岩	天然ダム発生。対岸(奈良尾地すべり)も同時に滑動。地すべりの一部が泥流化。過去に大きく滑動した地すべりの中央部において、地すべりが活発化し滑り落ちた。	土砂災害の実態(1995)
14	1996	4月15日	新潟県大島村	蓮野	幅150m、長さ700m、約150万㎡	水田流出、河川閉塞	融雪	新第三紀泥岩		地すべり学会誌133号
15	1996	5月6日	新潟県安塚町上船倉	木入場	幅150m、長さ350m、約90万㎡	一級河川船倉川を900m流下し、河川を埋塞	融雪	新第三紀泥岩	8月12日に大きく再移動	日本の地すべり(日本地すべり学会他2002)
16	1996	5月12日	福島県三島町浅岐	大清水	幅200m、長さ100m	水田2.4ha、道路8ヶ所	降雨	新第三紀火山岩類		社団法人地盤工学会(1998)
17	1997	5月8日	秋田県田沢湖町	黒湯	幅70m、長さ250m、約6万㎡		融雪+降雨	第四紀火山岩類	避難有	湯沢工務事務所パンフレット
18	1997	5月11日	秋田県鹿角市	八幡平澄川	幅380m、長さ800m、約250万㎡	温泉宿16棟流出	融雪+降雨	第四紀火山岩類	避難有	地すべり学会誌134号

表 3.1.2 従来の観測機器では計測が難しい地すべりの災害事例(2/2)

整理番号	発生年	発生時期	発生場所		発生規模	被害の状況	気象の状況	想定される地質状況	その他	備考
			市町村名	地区名						
19	1997	5月4日頃	長野県鬼無里村	濁沢	幅300m、長さ600m、 約540万㎡	河川閉塞	融雪	新第三紀中新世火山 岩類・泥岩		砂防学会誌211号・土研報告書
20	1998	8月17日	新潟県上越市虫生岩戸	岩戸川	約20万㎡		集中豪雨	新第三紀泥岩		新潟県土木部砂防課パンフレット(1998)
21	1998	9月16日	山形県米沢市板谷	蟹ヶ沢	約30万㎡		台風5号豪雨	第四紀火山岩類	平成9年の1年間で最大15m移動し、平成10年2月初旬に滑動が活発化	福島工務事務所パンフレット
22	1999	1月7日	岩手県江刺市	山館		一級河川伊手川16日間にわたり埋塞	融雪	新第三紀中新世火山 岩類	H.10に発生した地すべりが融雪によって拡大	日本の地すべり(砂防広報センタ-、2000)
23	1999	3月10日	青森県十和田湖町			国道102号埋塞		第四紀火山岩類		日本の地すべり(砂防広報センタ-、2000)
24	2001	4月28日	新潟県松之山町(現十日町市)	東川	幅80m、長さ200m	事業所一部破損、県道約60m	融雪	新第三紀泥岩	県道に泥流状の土砂が堆積。地すべり末端部が泥流化しアースフローへ変化。	土砂災害の実態(2001)地すべり学会誌157号
25	2004	10月9日	長野県信更町	安庭	幅110m、長さ170m、 約15万㎡	住宅・店舗各1戸流出、国道19号等道路流出	24時間雨量82mm	新第三紀砂岩・礫岩・ 泥岩	地すべり土塊は犀川に達する	土研報告書
26	2004	3月1日	新潟県栃尾市北荷頃	陣ヶ峰	幅250m、長さ450m、 約165万㎡	一級河川西谷川完全埋塞、市道埋没	融雪	新第三紀泥岩		土研報告書
27	2004	7月13日	新潟県栃尾市	土ヶ谷		床上浸水1戸、市道閉塞1ヶ所	栃尾24時間最大雨量422mm	新第三紀泥岩	7.13新潟豪雨	新潟県土木部砂防課パンフレット(2005)
28	2004	7月13日	新潟県三島町	逆谷		神社全壊1棟、県道埋塞、河川埋塞	与板24時間最大雨量344mm	第四紀砂質シルト岩	7.13新潟豪雨	新潟県土木部砂防課パンフレット(2005)
29	2004	7月13日	新潟県和島村	日野浦		人家一部損壊1戸	与板24時間最大雨量344mm	第四紀礫・砂・泥	7.13新潟豪雨	新潟県土木部砂防課パンフレット(2005)
30	2004	8月10日	奈良県五條市	大塔町宇井	幅120m、長さ120m、 約20万㎡	国道165号埋没	台風による降雨	中生代砂岩・頁岩・ チャート		土木技術資料46-10号・土研報告書
31	2005	4月7日	新潟県糸魚川市(旧能町)	下倉		農地1ha	融雪	新第三紀泥岩	移動土塊は、道路を横断し、能生川支流高倉川まで達し、高倉川に沿って流下した。	土砂災害の実態(2005)
32	2005	9月4～6日	宮崎県田野町	別府田野川	幅200m、長さ250m	キャンプ場建物1階完全埋没	台風14号豪雨、9月4日～6日で979mmに達する	古第三紀砂岩・頁岩	地すべり土塊は土石流化	土木技術資料48-1号
33	2006	3月8日	滋賀県高島市	朽木村井	幅100m、長さ130m	国道367号埋没	融雪	中生代～古生代砂岩・ 粘板岩・頁岩		土研報告書
34	2006	5月12日	岐阜県揖斐川町	東横山	幅150m、長さ90m、 約5万㎡	町道を分断し河川に流入		中生代頁岩		土木技術資料48-7号・土研報告書
35	2006	6月10日	沖縄県中城村	北上原	幅200m、長さ150m	県道・村道通行止め	梅雨/6月10日被害発生直前の5月1日～6月9日までの累積雨量533mm	新第三紀島尻泥岩	斜面上・下部で避難有	宜保清一他(2006)

3.2 各地すべりタイプの特徴

従来の観測機器では計測が難しい地すべり災害 35 事例の概略調査及びそのうち代表的な 8 事例の詳細調査（参考資料-1）を基に各地すべりタイプの特徴（規模、滑動、発生前後の状況）を整理した（表 3.2.1）。

(1) 地すべり規模(推定)

a. 地すべり幅

地すべり幅の平均値は、各地すべりタイプとも 130～230m であるが、第四紀火山岩類地すべり(70～380m)は、他の地すべりタイプ(80～250m)と比較して地すべり幅の大きな事例が発生している。

b. 地すべり長さ

地すべり長の平均値は、新第三紀層地すべり及び第四紀火山岩類地すべりがそれぞれ 420m、530m であるのに対して、沖縄泥岩地すべり及び岩盤崩壊性地すべりはそれぞれ 150m、170m であり、地すべり長が短い。

c. 地すべり土量

地すべり土量の平均値は、第四紀火山岩類地すべりを除いて概ね同程度(平均 20～65 万 m³)であるのに対して、第四紀火山岩類地すべり(平均 220 万 m³)は、他と比較して規模の大きな地すべりとなり易い。

(2) 地すべりの滑動

岩盤崩壊性地すべりは他のタイプとは全く違い、ミリ単位の小さな挙動からメートル単位の大きな挙動を示す。

(3) 地すべり発生前後の状況

第四紀火山岩類地すべりは、地質構造的にすべり面が深く、規模が大きくなり易い。

表 3.2.1 各地すべりタイプの特徴

地すべりタイプ	発生域の 斜面勾配 (度)	35事例の概要調査から推定される発生の規模						詳細事例調査から推定される滑動の特徴			地すべり発生前後の状況		
		幅 (m)		長さ (m)		土量 (10 ⁴ × m ³)		移動体の推定移動 速度	大きなすべり(破壊) に至るまでのクリープ 時間	急速に破壊が進行 するまでの変位量	すべり発生前	すべり発生後	
		範囲	平均	範囲	平均	範囲	平均					後背地の状況	移動体の状況
新第三紀層地すべり	5～30	80-250	130	170-700	420	10-165	65	1m/時	1～3日程度	-	滑落崖の形成(亀裂の形成と拡大)	滑落崖の後背地への拡大	・長い移動距離 ・面的広がる
沖縄泥岩地すべり	10～30	200	200	150	150	34	34	5m/時	1日+?	-	滑落崖の形成(亀裂の形成と拡大)	滑落崖の後背地への拡大	・すべり後に急速に泥濁化が進む ・移動体の質的变化が大きい ・面的広がる
岩盤崩壊性地すべり	30以上	100-230	150	90-250	170	5-50	20	0.5～22mm/日(二次クリープ) 3～12m/秒(主部崩壊時)	1～数ヶ月	1m程度	・滑落崖の形成(亀裂の形成と拡大) - 長期にわたる観測 ・平均30度以上の斜面での計測	・滑落崖の後背地への拡大 ・平均30度以上の斜面での計測	変位量蓄積後、急速に高速移動する
第四紀火山岩類地すべり	5～30	70-380	230	250-800	530	6-576	220	1m/時	数日～10日程度	-	・滑落崖の形成(亀裂の形成と拡大) - 規模が大きい ・すべり面が深くなり易く破壊が進むのにやや時間がかかるのに対応した観測	滑落崖の後背地への拡大	・規模の大きい移動体の長い移動量 ・面的広がる

- ・表中地すべり移動体の推定速度は、収集資料に明記されている場合にはその数値を採用し(東川、北上原)、具体的な数値はないが計測資料のある東横山、宇井については計測資料から読み取った。
- ・八幡平澄川の場合には、地すべり発生経緯から移動速度を推定した
- ・大きなすべり(破壊)に至るまでのクリープ時間及び急速に破壊が進行するまでの変位量は、収集資料からの推定値である。

3.3 従来の観測機器による計測が難しい現場で期待される計測技術

3.3.1 観測機器の要件

各地すべりタイプの特徴(3.2 項)の結果を踏まえ、従来の観測機器では計測が難しい地すべりでの観測機器の機能及び設置に要求される要件を下記に示す。なお、大崩地すべり、東川地すべり、陣ヶ峰地すべり、宇井地すべり、東横山地すべり、北上原地すべりの6事例については、県の担当者を対象に観測機器に関するアンケート調査(参考資料-2)を実施したのでその意見も反映させた。

(1) 観測機器の機能に関する要件

泥濘化した地すべり現場での計測

- ・土塊中の水分が多く、乱れた土塊に埋没しやすく、外力が働く状況下でも対応できること
- ・長期間にわたる継続計測(数日~数ヶ月)

- ・電源の確保ができること

急変する変位量の連続計測

- ・速い変化量1~5(m/h)に対応した計測ができること
- ・変位量の急速な変化(変位量mmオーダー mオーダー)に対応できること

大変位量(mオーダー)の計測

- ・メートル単位の大変位での対応ができること

地すべり現象の面的把握

- ・広範囲の測定あるいは多数の観測機器が設置できること(小型化で安価)

(2) 観測機器の設置に関する要件

泥濘化した状況での設置性

- ・地すべり地外からの投入ができること
- ・あるいは地すべり地に立ち入りした場合、短時間で容易に設置ができること
- ・急峻な斜面(斜面傾斜30°以上)での設置性

- ・急峻な斜面でも測定ができること

- ・資機材は、人力で運搬できる大きさ・重さであること

遠隔地での設置性

- ・電気消費量が少ないことあるいは電源が確保できること

- ・観測対象地へのアクセスが困難でも計測ができること

植生の被覆や積雪地での設置性

- ・融雪期、積雪初期への対応ができること

- ・植生が被覆した環境でも計測できること

特に、、とは、岩盤崩壊性地すべりに特化できる要件であり、他の要件は各地すべりタイプに共通した要件である。

3.3.2 観測機器のタイプ

(1)前提条件

計測項目

地すべり挙動の計測項目は、挙動の察知、変動量の観測の2種類とし、計測方法を考察した。

計測方法

地すべり挙動の計測方法を大きく分類すると、a) 地表面での直接的計測、b) 地表面の間接的計測、c) ボーリング孔などを利用した地中計測などがある。本研究では、これまでは設置や計測の継続が困難であった地すべり災害現場における危機管理対応の要求に応えられる観測機器を想定しているため、c) のボーリング孔を掘削するような観測機器は対象としない。

(2)計測項目と計測方法

従来の観測機器では計測が困難であった現場での適用が期待される計測方法を記述する。

【挙動の察知】

- ・地表面等に配置したセンサの傾きから地すべり挙動を検知し、その情報を地すべり地外の観測局に発信する方法
- ・センサに接触した地すべり土塊(水・土砂)の周波数特性から地すべり土塊の到達を検知する方法

【変動量の計測】

- ・通常の地すべりより移動速度や移動量が大きな地すべりの移動量を計測する方法
- ・立入りが困難な地すべり現場での地すべり移動量を計測する方法
- ・観測機器が土砂に埋まった条件下でも地すべり移動量を計測する方法

3.3.3 従来の観測機器では計測が難しい現場で必要とされる観測機器の機能のまとめ

従来の観測機器では、計測が難しい地すべりの条件から、観測機器に要求される機能と対応する観測機器タイプ(仕様)を整理した(表3.3.1)。

表 3.3.1 従来の観測機器では計測が難しい地すべりで必要とされる観測機器の仕様

考慮すべき項目	対象とする地すべりの特徴		計測機器に求められる要件		計測項目及び計測方式					
	項目	詳細	必要な能力	事例調査による目安	挙動の察知		距離計測			移動量計測 (変位量の変化に対応)
					直接計測	待受け式	直接計測	間接計測 (光波)	間接計測 (その他)	
機能面	泥濘化	土塊中の水分が多い	防水性能							
		乱れた土塊に埋没する	埋没時においても計測可能							
		外力が働く	耐圧、耐衝撃							
	長期連続計測		機器の電源確保	1~1.5ヶ月持続						
	移動体の速い速度	移動速度に対応出来る	急激な移動を計測	1~5m/h						
		変位量の急速な変化に対応できる	微細な変位から大きな変位を計測	mmオーダー - cm、mオーダー						
	大きな移動量	変位量が大さい	メートル単位の移動量の計測が可能	1m程度						
すべり範囲の把握	想定が困難	広範囲の計測が可能								
		計測点を多数設置可能								
設置条件	泥濘化	計測機器の設置が困難	基礎が不要で設置が簡便							
		外部からの間接的な機器の設置	耐衝撃							
			小型・軽量	ラジコンヘリで総量30kg程度						
		立ち入り短時間で設置可能	設置が簡便	現地で数分~数時間程度で設置						
	急峻な斜面	機器の固定や正常な測定が可能	固定可能、または固定具が利用可能							
		機器の大きさ・重さに制限	小型・軽量							
		地形条件により電波の受信に大きな影響を受ける立地	地形条件により影響を受けない送受信が可能							
	遠隔地	機器の電源確保	電源の小型化、省電力	1~1.5ヶ月持続						
		道路条件が悪く現地へのアクセスが困難	投下・投げ入れが可能							
	積雪下等地表条件	融雪期、積雪初期への対応	積雪下でも計測可能	0.5m程度						
植生が音波等の障害物となる		植生に影響を受けない送受信が可能								

3.4 従来の観測機器では計測が難しい地すべりで使用可能な観測機器

従来の観測機器では計測が難しい地すべりにおける観測機器の開発目標を下記に提案する。

1) 加速度センサを応用した地表傾斜計

概略：地盤の傾きの変化を計測することにより、地すべり背後斜面への崩壊の拡大や影響範囲を監視すること。

特徴：例えば、数 10 c m 程度の深度への杭の打ち込み、あるいは、小型電動オーガを用いた削孔によりセンサを容易に多数設置できること。

条件：地すべりの範囲や地すべりの方向を把握でき、センサの設置後、地すべり地外でデータを取得できること。

2) 振動デバイスを応用した土砂感知センサ

概略：泥濘化・流動化した移動土塊の到達範囲を検知すること。

特徴：センサに接触する物体の周波数特性から地すべり土塊の到達を検知する。センサより数 100m 程度離れた場所に観測機器を設置し、警報機で地すべりの到達を周知できること。

条件：地すべりの範囲を把握でき、センサ設置後、地すべり地外でデータを取得できること。

3) 音響を応用した移動量計

概略：音源センサが発する音波の到達時間から 2 点間の距離（または音源センサの位置）を測定すること。

特徴：ラジコンヘリからの投下によるセンサの設置を目指し、音源より 100m 以上の離れた場所で計測が可能であること。

条件：センサは、バッテリーで駆動し、大きな地すべりの移動量を把握できること。また、センサの設置後は地すべり地外でデータを取得できること。

4) 地盤伸縮計の改良による大変位伸縮計

概略：従来の地盤伸縮計の測定範囲を大きくすること。

特徴：5m 程度の大きな変位まで連続して計測できること。

条件：通常の地すべりより移動量や移動速度が大きな地すべりにおいても、インバー線を張替えることなく連続的に測定することが可能なこと。

5) 地中無線通信技術を応用した変位計

概略：媒質による反射や減衰の少ない低周波数の電磁波の特徴を生かして、センサから発する電磁波から2点間の距離（座標の変位）を計測すること。

特徴：インバー線の設置が難しい箇所あるいは計測器が土中や水中に埋まった条件下でも地すべり移動量（距離）を計測すること。

条件：センサは、バッテリーで駆動し、センサの設置後は地すべり地外でデータを取得できること。

6) 接点信号発信器を応用した崩壊検知センサ

概略：センサが傾くと電波を発信し、地表面の変動を検知すること。

特徴：センサの容器は、耐圧・耐衝撃性を有しており、投げ入れて設置できること。

条件：センサは、バッテリーで駆動し、センサから数100m程度離れた地すべり地外で長期間の計測ができること。

上記で提案した観測機器が有する機能を表3.4.1に示す。

表 3.4.1 提案した観測機器が有している機能

計測機器タイプ	容易に設置（現地で数時間）	容易に設置（1～数日間）	埋没時に計測可能	傾斜に対応可能	地すべりの移動速度	地すべりの移動方向	地すべりの面的範囲の想定	備考
振動デバイスを応用した土砂感知センサ								
加速度センサを応用した地表傾斜計								傾斜地での運搬が困難
音響を応用した移動量計								面的想定の場合、広い範囲に設置する必要あり
地中無線通信技術を応用した変位計								面的想定の場合、広い範囲に設置する必要あり
地盤伸縮計の改良による大変位伸縮計								
接点信号を応用した崩壊検知センサ								面的想定の場合、広い範囲に設置する必要あり

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所、株式会社パスコ:特殊環境下における地すべり活動に関する検討業務 報告書 平成20年2月
- 2) 長崎県農林部林務課:石倉地すべり 平成4年10月
- 3) 沖縄県中部土木事務所:安里地区災害関連緊急地すべり対策測量調査設計業務委託 報告書(調査編) 平成19年3月
- 4) 建設省土木研究所:八幡平(澄川)地すべり・土石流微地形判読業務 報告書 平成9年8月

4. 厳しい現場条件に耐える地すべり観測装置の開発

4.1 加速度センサを応用した地表傾斜計

4.1.1 目的

本傾斜計は、既存の技術を利用して、地表の変状を把握し、また、面的な配置が可能で、地すべり災害現場後方での滑落等の派生的な地すべりを監視する、新たな観測装置を開発するものである。

ただし、本開発を行うにあたり、本共同開発期間は2年間という時間的な制約があり、加速度センサの仕様、電気回路の仕様等基本構成の変更は困難なため、既存の一部を改造して開発を行うことを前提とした。このため、必ずしも全ての現場条件を網羅するものではない。

4.1.2 システムの概要

本傾斜計は、角度の検出にマイクロマシニング技術を利用した加速度センサを用いており、重力加速度（鉛直方向の静加速度）との比較から角度を算出している。振動成分（動加速度）は角度に依存しないノイズ成分なのでフィルタで取り除いており、通常範囲内の振動は影響を受けない。傾斜計センサ部は、斜面方向と斜面と直交する方向を検出するための2軸方向に取り付けられた加速度センサと、機器内部の温度を測定して温度補正を行う温度センサからなる。

(1) 加速度センサの作動原理

加速度センサの作動原理について図4.1.1をもとに説明する。

- ・ 加速度により可動電極に力が発生し可動電極が動く。
- ・ 可動電極と固定電極間の距離が変化し、静電容量が変化する。
- ・ CV変換回路により、静電容量を電圧に変換する。
- ・ 信号増幅回路により、電圧を実用的な値まで増幅する。

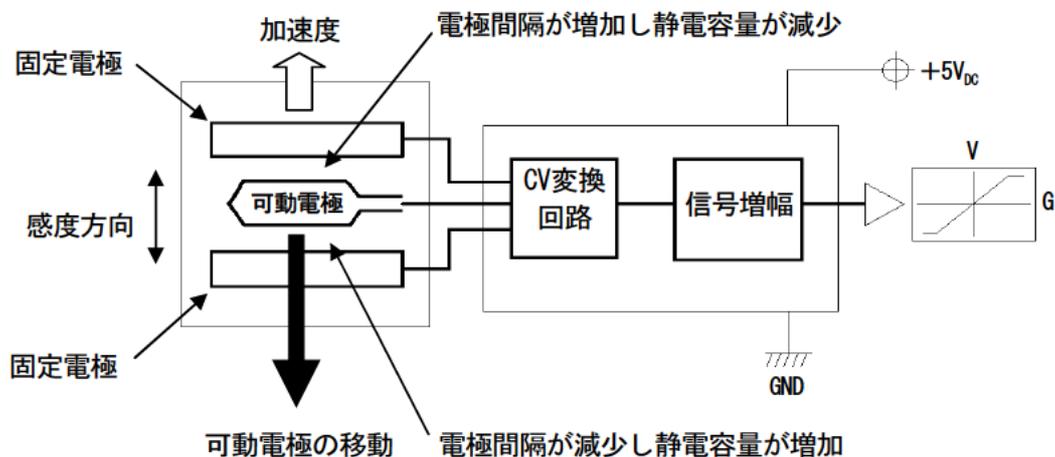


図4.1.1 加速度センサ作動原理

(2) 加速度センサによる傾斜角検知方法

傾斜計の角度検知は、加速度センサに対して作用する重力加速度方向を検知することで行われる。傾斜角の検知方法について図 4.1.2 をもとに説明する。

- ・ 加速度センサで重力加速度を検知。(初期設置時は、重力加速度方向が加速度センサ感度方向に直交 ($\theta = 0^\circ$) しており、加速度センサの出力は 0。)
- ・ 加速度センサが角度 θ 傾いた時は、加速度センサの感度方向の分力は、 $\sin \theta$ であり、これが加速度センサの出力となる。
- ・ 加速度センサの出力電圧 $V = a \cdot \sin \theta$ (a : 加速度センサの感度) より、傾斜角度 $\theta = \sin^{-1}(V/a)$ で求められる。

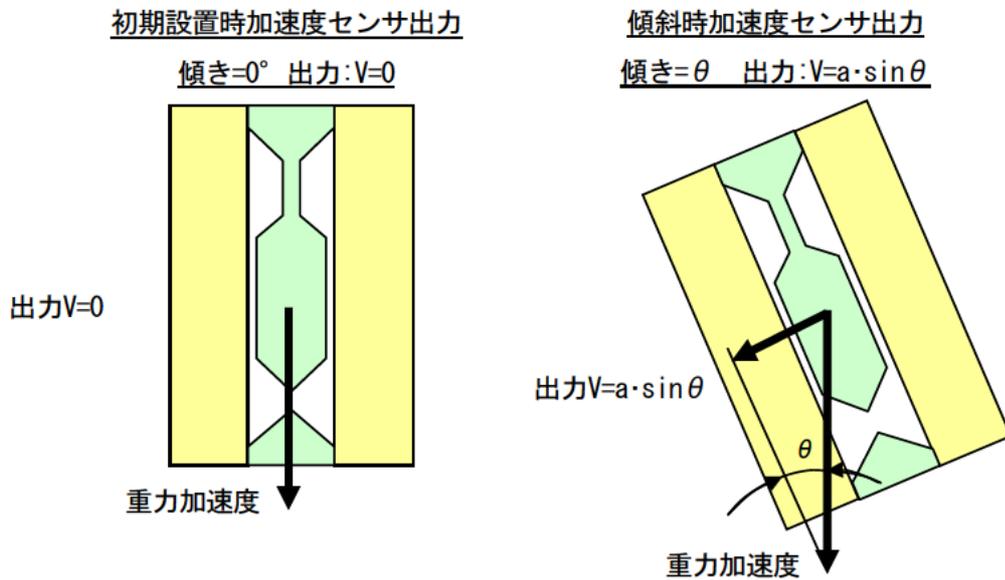


図 4.1.2 加速度センサによる傾斜角検知概要図

(3) 既往の研究・実績

既往の研究

- ・ 加速度センサを用いた新しい斜面計測機器の開発：日本道路公団試験研究所土工研究室
平成 13 年度（論文：マイクロマシニング技術を利用した加速度センサーによる斜面の相対観測 土と基礎 50-6(533) 加速度センサを使用した新しい設置型孔内傾斜計の開発 第 36 回地盤工学研究発表会(徳島)平成 13 年 6 月)
- ・ 高精度加速度計を用いた斜面崩壊予知警報器の開発：独立行政法人労働安全衛生総合研究所(旧(独)産業安全研究所)平成 17 年度～平成 18 年度（論文：Development of Tilt-sensor and possibility of measurement of failure trend just before the failure 第 41 回地盤工学研究発表会(鹿児島)平成 18 年 7 月)

実績

- ・ 地表傾斜計として使用した実績を下記に示す。
 - 引佐第 2 トンネル付近地すべり計測(静岡県浜松市、平成 13 年 6 月)
 - 京奈和自動車道のり面点検計測(京都府、平成 14 年 2 月)
 - 山陽自動車道切土法面変位計測(兵庫県神戸市、平成 14 年 10 月)
 - 山陽自動車道盛土法面変位計測(兵庫県神戸市、平成 14 年 11 月)
 - 横浜横須賀道路のり面動態観測(神奈川県横須賀市、平成 16 年 1 月)

4.1.3 基本仕様の検討結果

(1) 基本仕様の検討

加速度センサを用いた傾斜計(以下、IT 傾斜計と呼ぶ)は、地中設置型傾斜計として確立したセンサである。通常であれば、地中内の温度は安定しており、温度変化による誤差の影響は加味しなくても良いが、本開発では、センサ(1 ユニット)を埋設もしくは単管を打設し取付けることにより地表傾斜計として利用するため、温度変化に対する測定誤差の影響を検証する必要がある。

また、地すべり災害地に立ち入るため、設置の迅速性、運搬時の重量を考慮する必要があり、基本形状は以下の様な2種類とした。また、基本仕様は、表4.1.1の通りとした。

- ・埋設型(写真4.1.1参照)

温度に起因する誤差の軽減を目的として、傾斜計を埋設するため、全長を短く設定し直した。

埋設には、オーガーボーリングが必要となる。

- ・単管打設型(写真4.1.2参照)

設置の迅速性、運搬時の重量を考慮し、足場用パイプを打設後、足場パイプに取付け可能となるよう、傾斜計本体ユニットを改造した。

設置には、足場パイプの打設が必要となる。また、地上設置もしくは地表近くの地中に設置するため、埋設型より温度に起因する誤差が大きくなる。



外観形状： 60×L380(mm)

写真4.1.1 埋設型



センサ本体部

外観形状： 60×L1020(L600)(mm)

写真4.1.2 単管打設型

表 4.1.1 基本仕様一覧

目的	地すべり地の拡大監視（滑落等の派生的な地すべりの検出）	
設置位置	立入禁止地区周辺（比較的安全な地域） （地すべり土塊の側～背面）	
設置方法	埋設型（オーガーボーリングによる） 単管打設型（足場用鉄パイプ打ち込みによる）	
計測期間	2 週間	
計測頻度	1 回/時間	
センサ概要	システム	対象：地表面の傾斜角度 測定点数：最大 100 点（ケーブル 2～3 本使用時。CAN 通信 ¹ で 1 本のケーブルに最大 50 台の接続が可能） ケーブル総延長 100m（ケーブル 1 本あたり） 周辺設備：データロガー、データ通信装置、収納 BOX
	センサ	軸数：2 軸 角度測定範囲：±20° 精度：±0.01° 温度特性：±0.008°/（使用温度範囲：-30～60） 長期安定性 ² ：±0.001°/day
	データロガー	使用温度範囲：-20～60 ケーブル接続数：3 本まで可 記録：内蔵メモリ
	電源	DC12V 350mA（傾斜計 10 台＋ロガー 1 台の場合）：大型トラック用バッテリー相当（重量 41kg） または家庭用電源 AC100V
	外観寸法	・センサ（1 ユニット） 埋設型：60×L380（mm）ケーブル除く 単管打設型（パイプ装着時）：60×L1020（mm） ：60×L620（mm） ・データロガー：270W×220D×75H（mm）突起部除く ・データ通信装置：42W×84D×26H（mm）ケーブル除く ・収納 BOX：440W×210D×573H（mm）

1: CAN 通信:自動車産業で採用されている耐ノイズ性が高いデジタル通信。2 本の通信ラインと電源線・アース線で、多数のセンサを直列に接続できるため電線が少なくすむ。

2: 長期安定性とは、傾斜計の姿勢が安定しているのに関わらず、出力がゆっくり変動する現象で、加速度センサ本体に起因する。通常は設置後数ヶ月間から数年間緩慢に変化し、次第に減少・収束する傾向にある。

(2) 基礎実験

実験項目として、以下の3項目を実施。

傾斜応答実験

目的：傾斜に対する反応状況を確認する。天候の影響を受ける状態で実施する。

傾斜計屋外ランニング実験

目的：埋設型と単管打設型の現場を想定した屋外実験を行い、計測されたデータを比較検証し、設置方法・機構の異なる仕様の選定を実施する。

地すべり実証実験

目的：移動観測中の地すべり現場に設置することにより、実現場での設置方法・データの応答状態、施工性等の実用性に関する基礎資料を得る。

傾斜応答実験

実験目的

傾斜に対する反応状況を確認する。天候の影響を受ける状態で実施する。

実験概要

傾斜角変更時の反応状況の確認、傾斜角保持時の出力値の振れの確認および設定傾斜角と出力値の相関を確認する。

実験条件

設定傾斜角 (狙い値): 0、1、3、6、10(°)

角度保持時間: 1日 (1昼夜)

データサンプリングタイム: 約10分

装置概要および実験状況

写真 4.1.3、写真 4.1.4、写真 4.1.5 および写真 4.1.6 参照

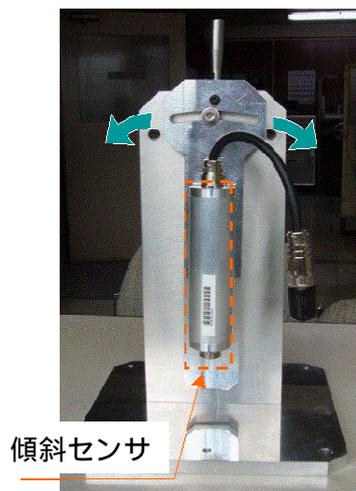


写真 4.1.3 実験装置概観

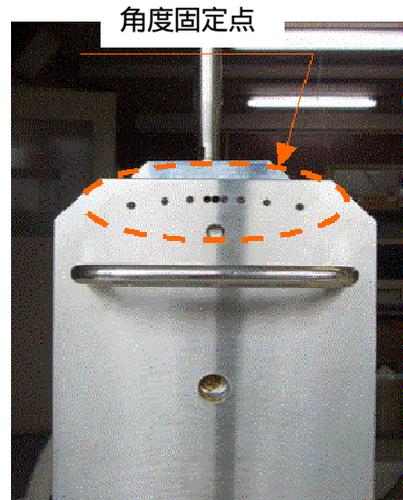


写真 4.1.4 実験装置 裏面



写真 4.1.5 屋外実験場状況

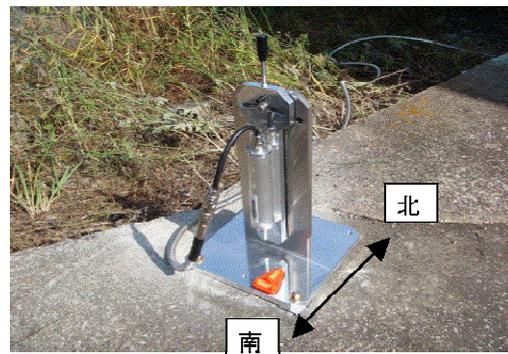


写真 4.1.6 センサ及び実験装置設置状況

実験結果

設定傾斜角（狙い値）に対する最大変動幅を表 4.1.2 に示す。

また、計測結果を図 4.1.3 に、各設定傾斜角変更時の詳細を図 4.1.4～図 4.1.7 に、各設定傾斜角の計測結果を図 4.1.8～図 4.1.12 に、設定傾斜角と応答の相関図を図 4.1.13 に示す。

以上の結果から、以下のことが確認できた。

傾斜角反応時間：10 分以下（データサンプリングタイム以下）

一定角度での最大変動幅：0.06° 以下（設定傾斜角 0° 時）

設定傾斜角に対する出力応答の相関があることが分かった。

表 4.1.2 設定傾斜角別最大変動幅

設定傾斜角 (狙い値)	最大変動幅 (°)	備考 (天候)
0°	0.06	晴れ
1°	0.05	晴れ
3°	0.05	雨・曇
6°	0.03	雨・曇
10°	0.03	雨・曇

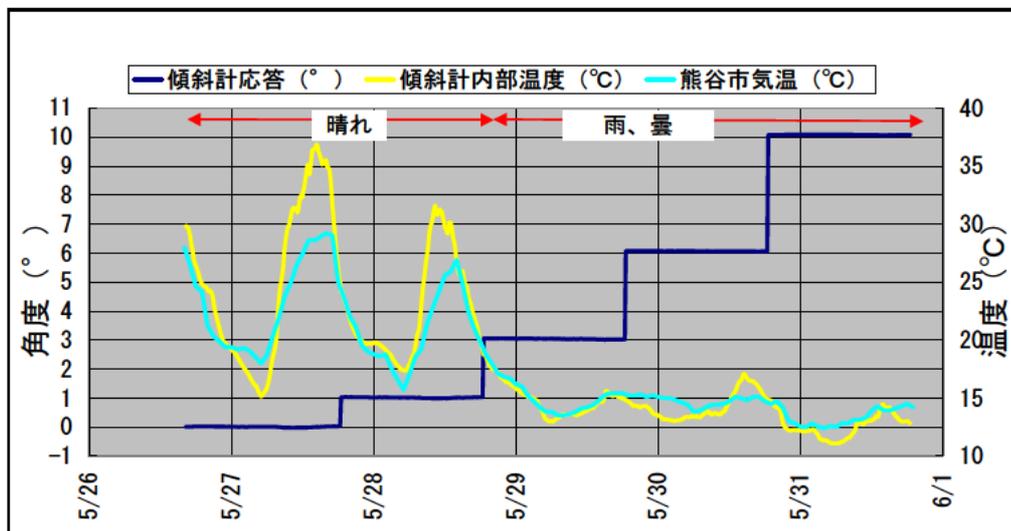


図 4.1.3 計測結果 期間：平成 20 年 5 月 26 日～平成 20 年 5 月 31 日

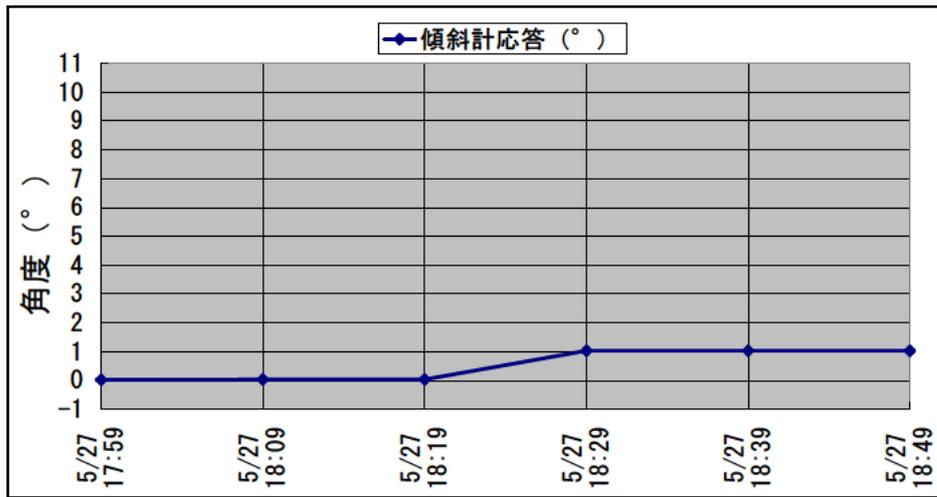


図 4.1.4 傾斜角反応計測結果 設定傾斜角 0° ⇒ 1°

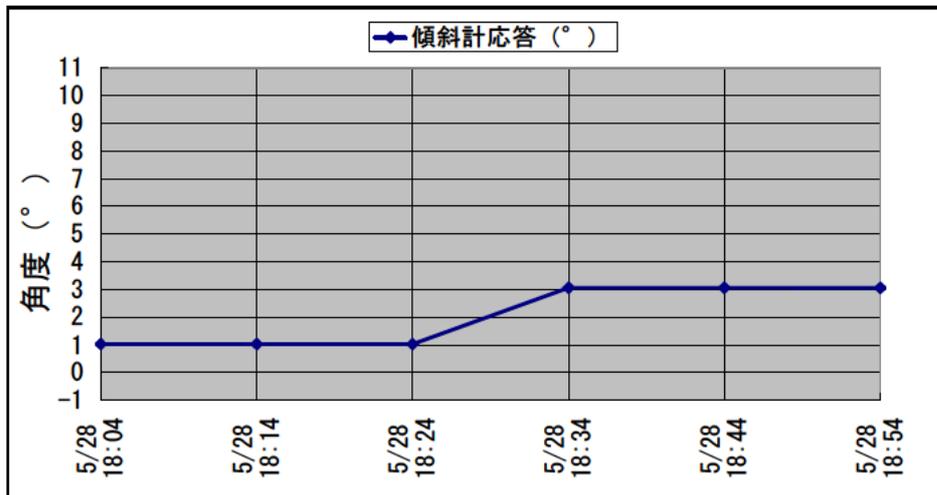


図 4.1.5 傾斜角反応計測結果 設定傾斜角 1° ⇒ 3°

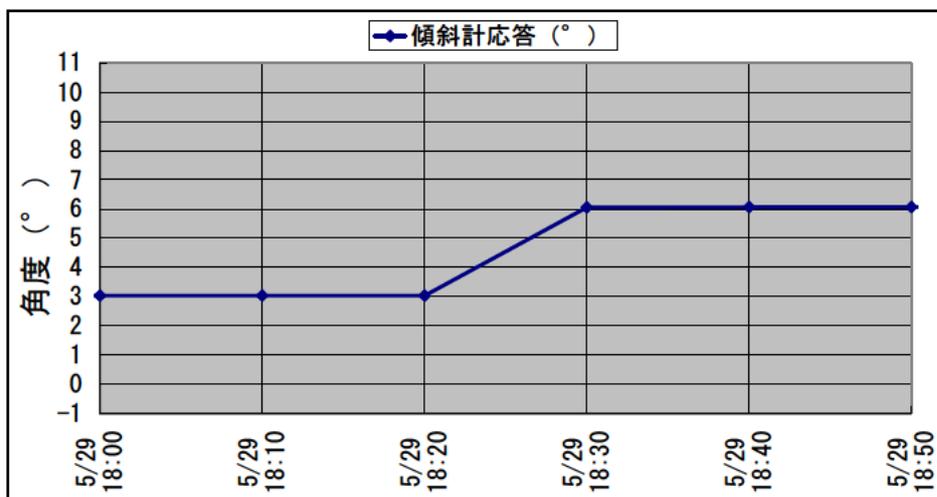


図 4.1.6 傾斜角反応計測結果 設定傾斜角 3° ⇒ 6°

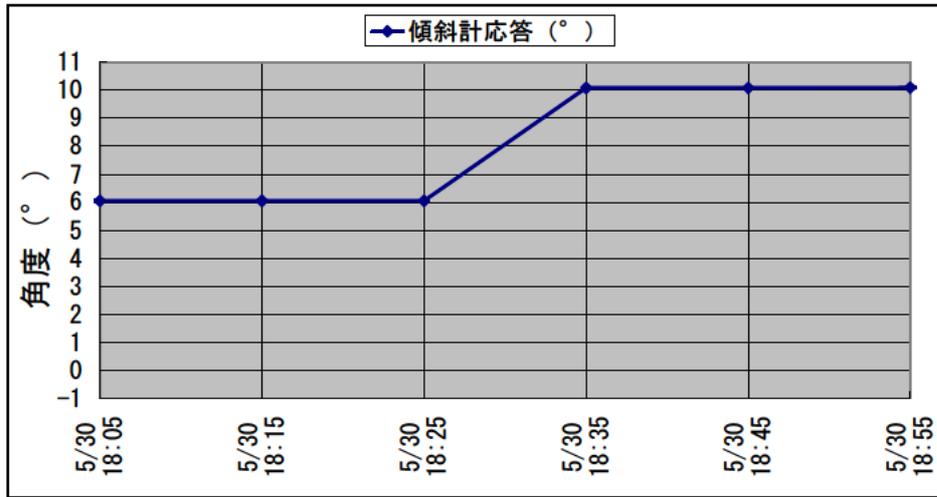


図 4.1.7 傾斜角反応計測結果 設定傾斜角 6° ⇒ 10°

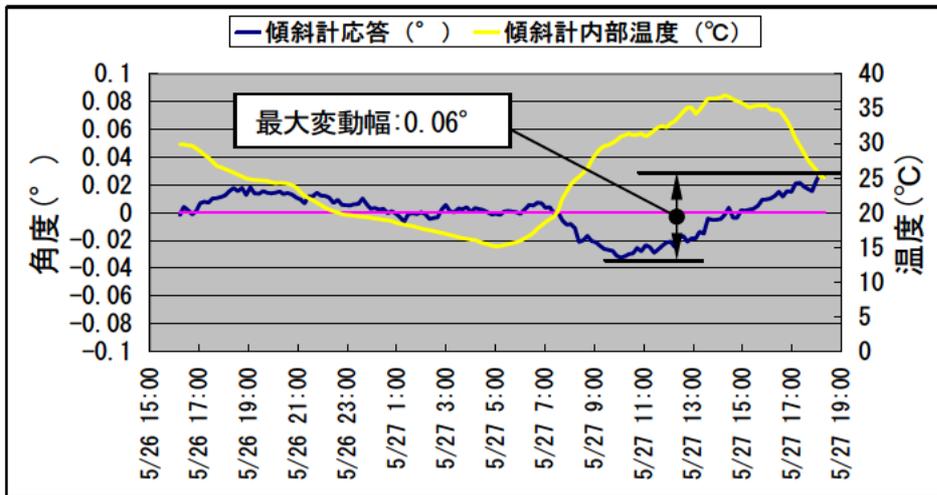


図 4.1.8 計測データ : 設定傾斜角 0°

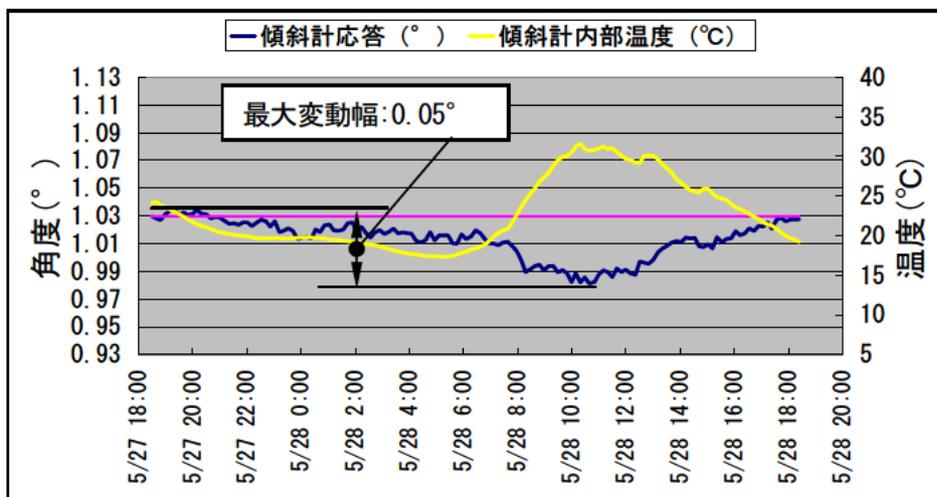


図 4.1.9 計測データ : 設定傾斜角 1°

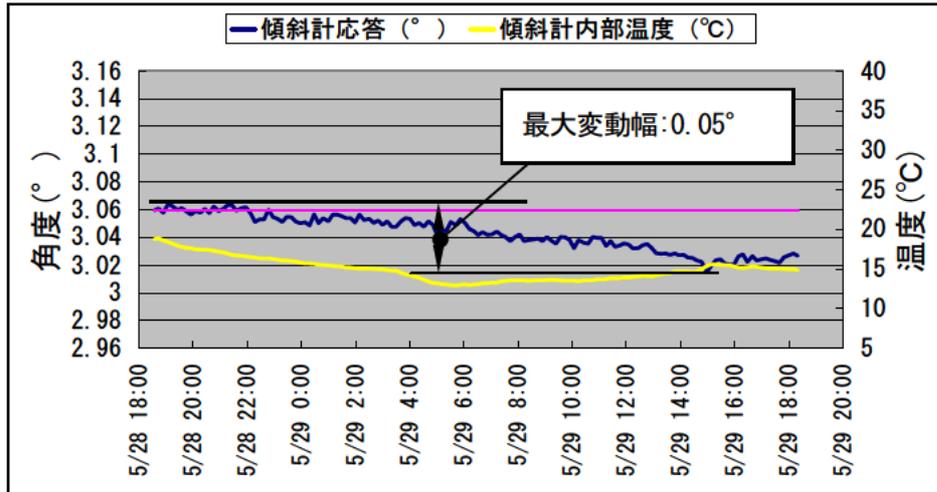


図 4.1.10 計測データ : 設定傾斜角 3°

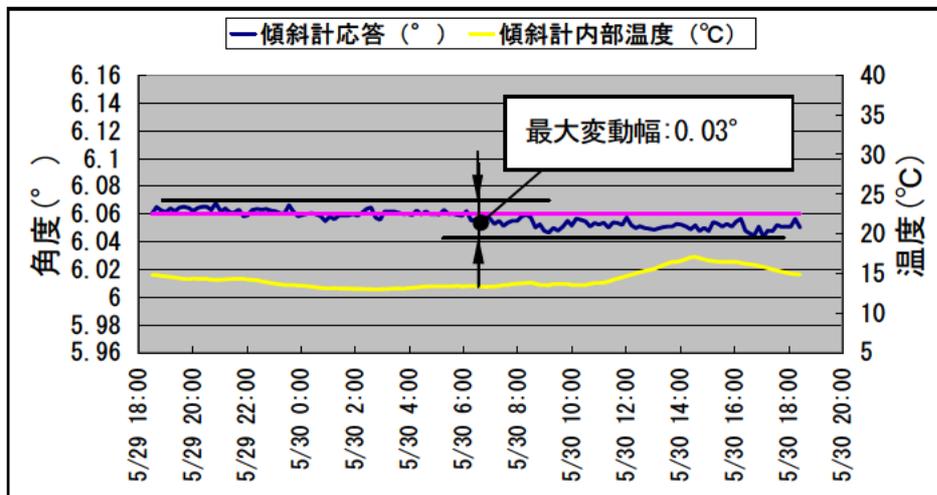


図 4.1.11 計測データ : 設定傾斜角 6°

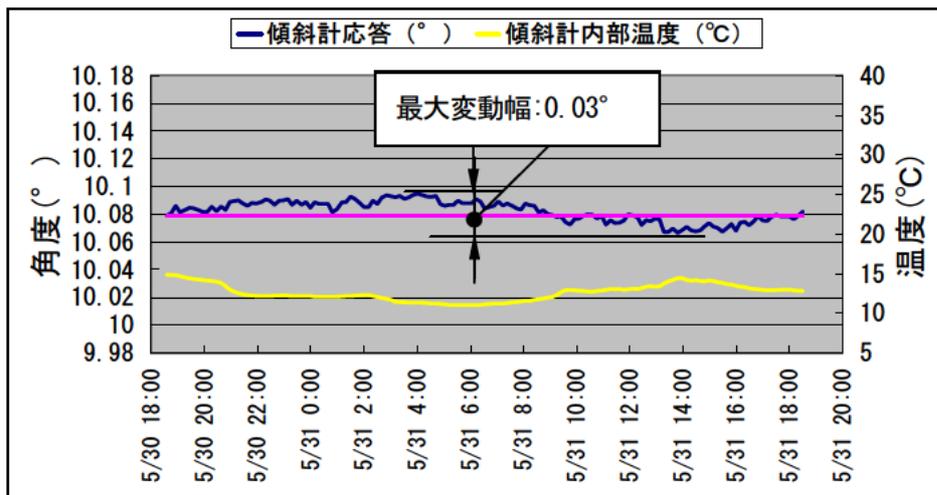


図 4.1.12 計測データ : 設定傾斜角 10°

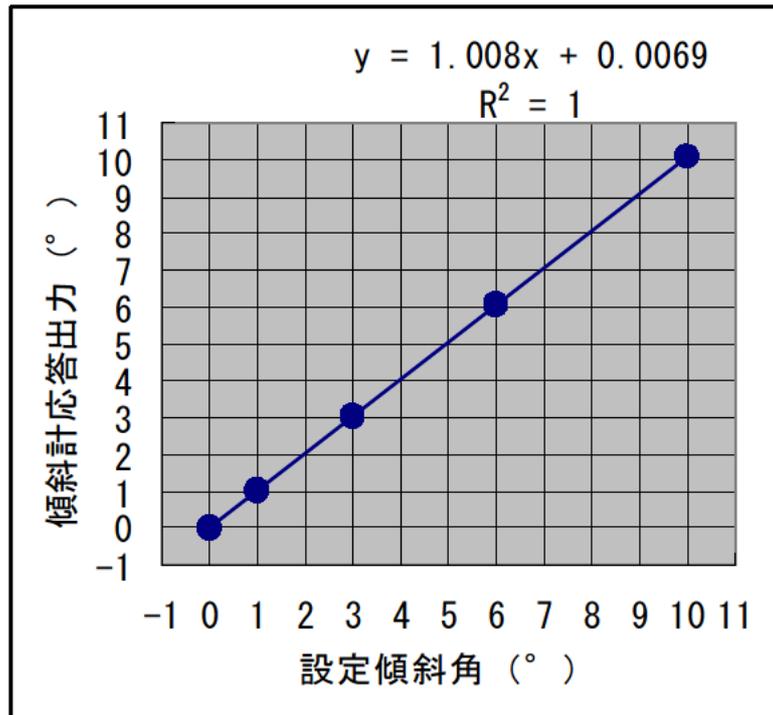


図 4. 1. 13 設定傾斜角—傾斜計応答出力相関図

②傾斜計屋外ランニング実験：

実験目的

埋設型と単管打設型の現場を想定した屋外実験を行い、計測されたデータを比較検証し、設置方法・機構の異なる仕様の選定を実施する。

実験概要

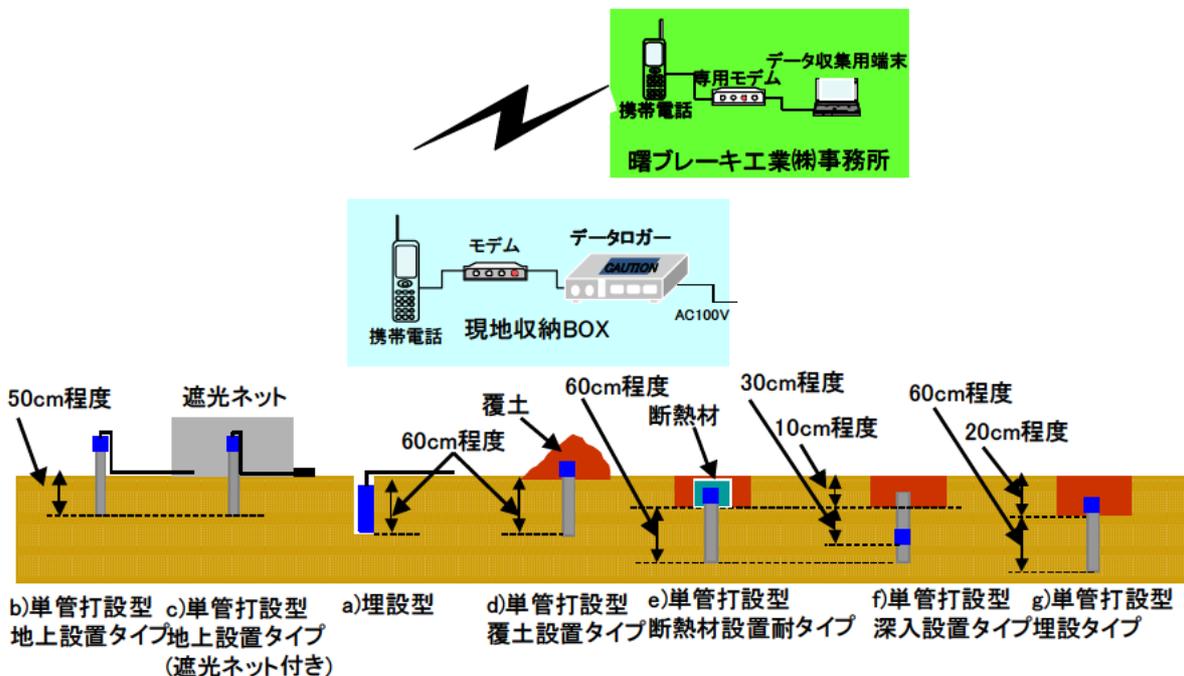
下記 a)~c)の3種類の仕様を基準として実験を開始し、ある期間データを収録後、計測データの比較検討を行い、適時改良を加え仕様の追加を行う。

設置場所：独立行政法人 土木研究所 土工実験場 テールアルメ実験盛土小段

計測間隔：1時間間隔（現地より携帯電話で曙ブレーキ工業(株)事務所へ1日1回データ転送）

設置仕様：以下に示す。（図4.1.14参照）

- a)埋設型
 - b)単管打設型 地上設置タイプ
 - c)単管打設型 地上設置タイプ（遮光ネット付き）
 - d)単管打設型 覆土タイプ
 - e)単管打設型 断熱材設置タイプ
 - f)単管打設型 深入設置タイプ
 - g)単管打設型 埋設タイプ
- 追加設置日：平成20年10月10日
追加設置日：平成20年11月11日
仕様e)より変更：平成20年11月28日



施工状況

施工日 平成20年3月4日

施工仕様

- a)埋設型
- b)単管打設型地上設置タイプ
- c)単管打設型地上設置タイプ(遮光ネット付き)



写真 4.1.7 設置資材一式



写真 4.1.8 オーガーボーリング状況



写真 4.1.9 埋設型設置状況



写真 4.1.10 単管打設状況



写真 4.1.11 単管打設型設置状況



写真 4.1.12 IT地表面傾斜計設置状況



写真 4.1.13 設置盛土全景

施工日 平成 20 年 10 月 10 日

施工仕様

d)単管打設型覆土タイプ



写真 4.1.14 単管打設状況



写真 4.1.15 設置状況



写真 4.1.16 覆土状況

施工日 平成 20 年 11 月 11 日

施工仕様

e)単管打設型断熱材設置タイプ :1 台

f)単管打設型深入設置タイプ :1 台



写真 4.1.17 単管打設型断熱材設置タイプ設置状況



写真 4.1.18 単管打設型深入設置タイプ設置状況

実験結果

a)埋設型、b)単管打設型地上設置タイプ及び c)単管打設型地上設置タイプ（遮光ネット付き）の計測結果を、図 4. 1. 15 南北方向傾斜計出力線図、図 4. 1. 16 山谷方向傾斜計出力線図及び図 4. 1. 17 傾斜計内部温度線図に示す。

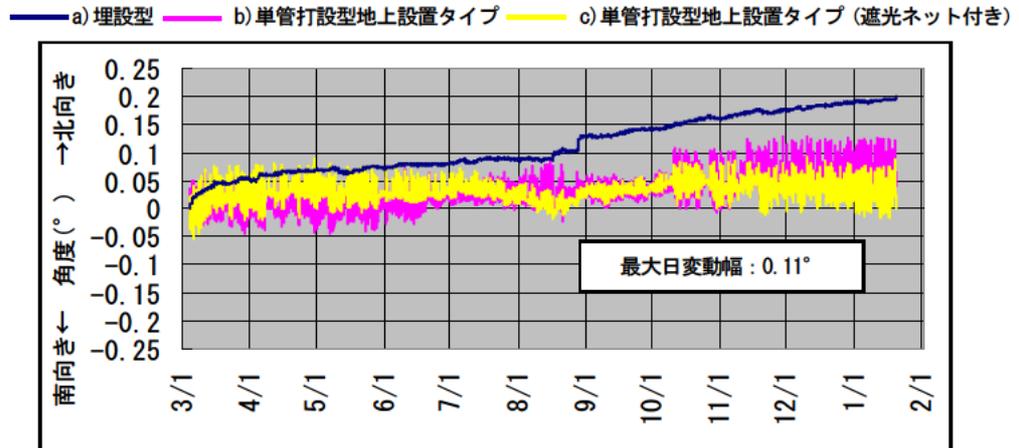


図 4. 1. 15 南北方向出力線図 期間：平成 20 年 3 月 4 日～平成 21 年 1 月 20 日

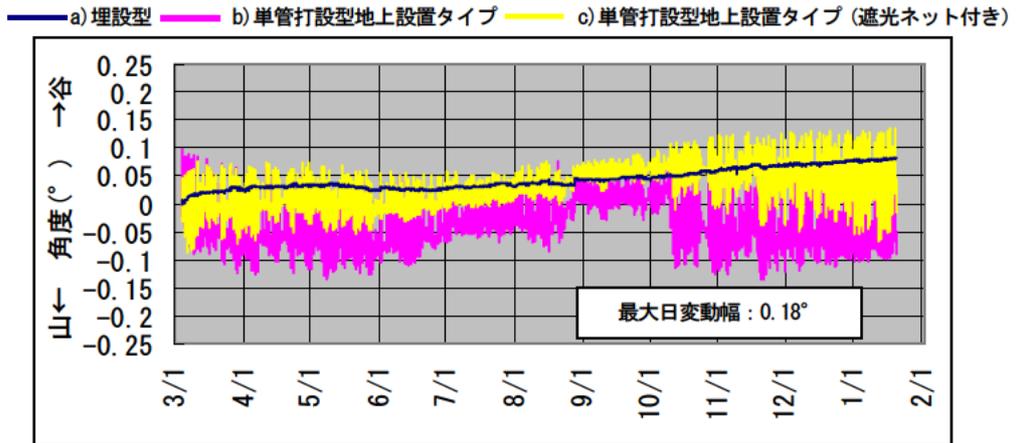


図 4. 1. 16 山谷方向出力線図 期間：平成 20 年 3 月 4 日～平成 21 年 1 月 20 日

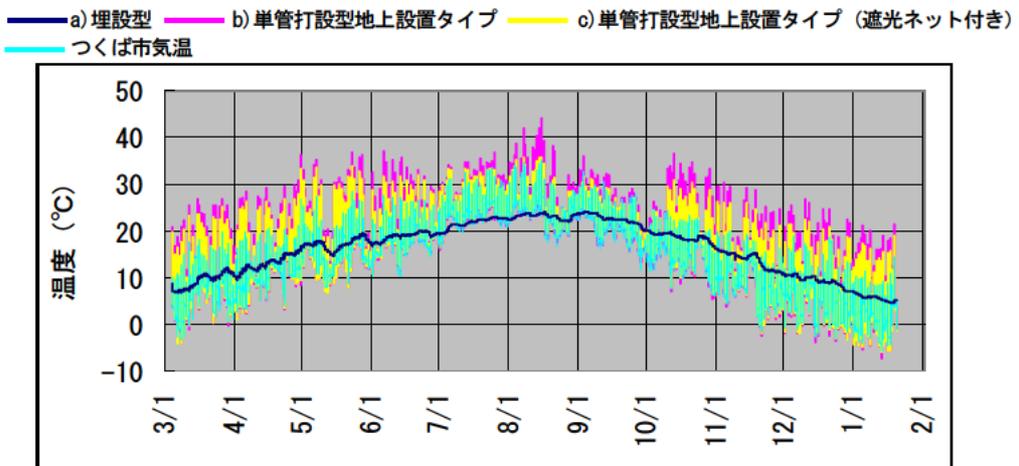


図 4. 1. 17 傾斜計内部温度線図 期間：平成 20 年 3 月 4 日～平成 21 年 1 月 20 日

図 4.1.15 南北方向傾斜計出力線図及び図 4.1.16 山谷方向傾斜計出力線図から、a)埋設型に比べb)単管打設型地上設置タイプ及びc)単管打設型の計測データの日変動が大きい。

(図 4.1.16 山谷方向傾斜計出力線図より最大日変動幅 0.18°) 日変動が大きくなる原因は、図 4.1.17 傾斜計内部温度線図から、外気温による温度の影響によるものと推定できた。この温度の影響を改善するため、以下の仕様を追加設置した。

d)単管打設型覆土タイプ：地表面まで単管を打設し、傾斜計を設置後覆土する。(計測期間：平成 20 年 10 月 10 日～平成 21 年 1 月 20 日)

d)単管打設型覆土タイプの計測結果を、図 4.1.18 南北方向傾斜計出力線図、図 4.1.19 山谷方向傾斜計出力線図及び図 4.1.20 傾斜計内部温度線図に示す。

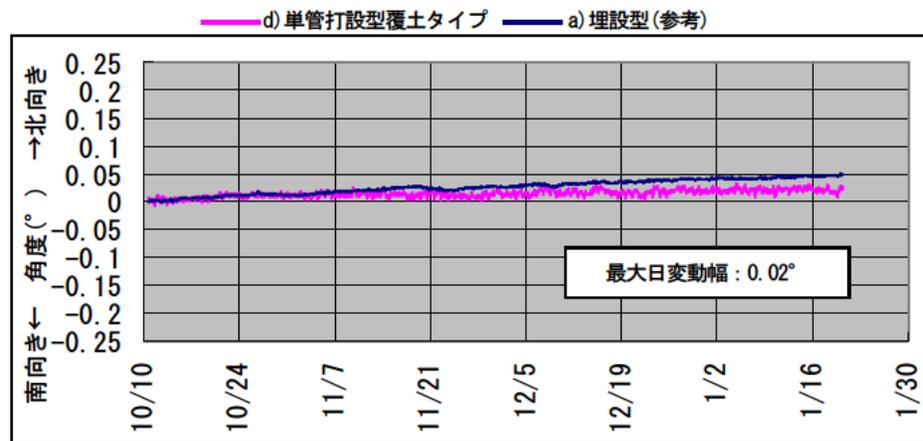


図 4.1.18 南北方向出力線図 期間：平成 20 年 10 月 10 日～平成 21 年 1 月 20 日

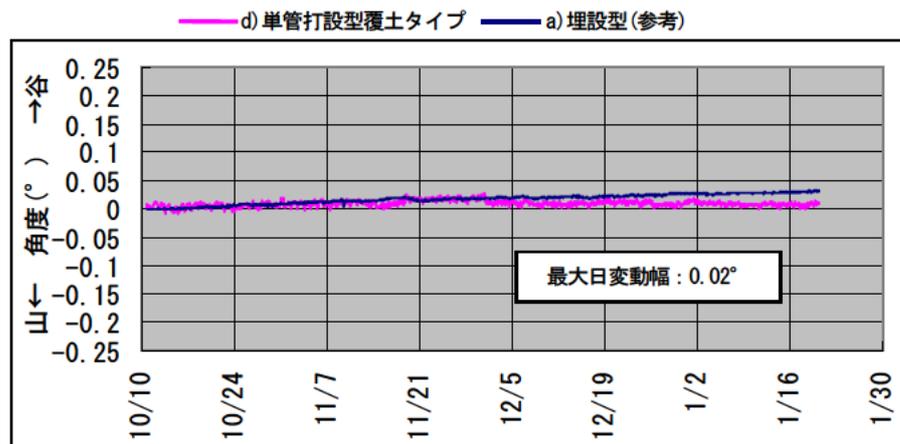


図 4.1.19 山谷方向出力線図 期間：平成 20 年 10 月 10 日～平成 21 年 1 月 20 日

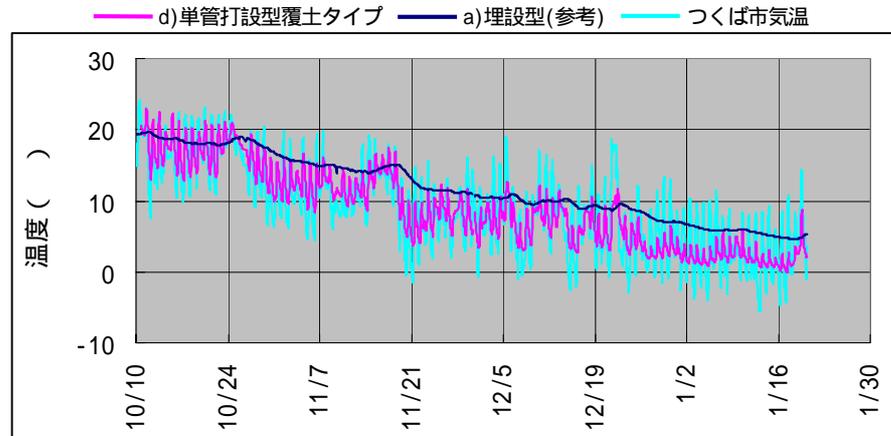


図 4.1.20 傾斜計内部温度線図 期間：平成 20 年 10 月 10 日～平成 21 年 1 月 20 日

図 4.1.18 南北方向傾斜計出力線図及び図 4.1.19 山谷方向傾斜計出力線図から、日変動の改善が見られた。(最大日変動幅 0.02°) また、図 4.1.20 傾斜計内部温度線図から気温による温度変化の影響が見られるので、更なる改善が可能なかを調査するため、次の 2 仕様を追加した。

e) 単管打設型断熱材設置タイプ：地表面を 10cm 程度掘り、掘削面まで単管を打設し傾斜計を設置し、設置した傾斜計を断熱材で被い覆土する。(計測期間：平成 20 年 11 月 11 日～平成 20 年 11 月 28 日)

f) 単管打設型深入設置タイプ：地表面を 10cm 程度掘り、掘削面まで単管を打設し延長治具を取付けた傾斜計を設置し覆土する。(計測期間：平成 20 年 11 月 11 日～平成 20 年 1 月 20 日)

e) 単管打設型断熱材設置タイプ及び f) 単管打設型深入タイプの計測結果を、図 4.1.21 南北方向傾斜計出力線図、図 4.1.22 山谷方向傾斜計出力線図及び図 4.1.23 傾斜計内部温度線図に示す。

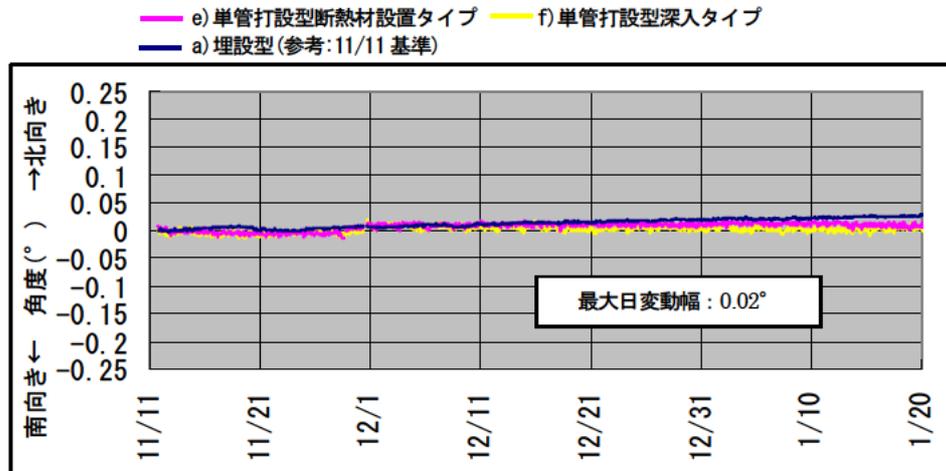


図 4.1.21 南北方向出力線図 期間：平成 20 年 11 月 11 日～平成 21 年 1 月 20 日

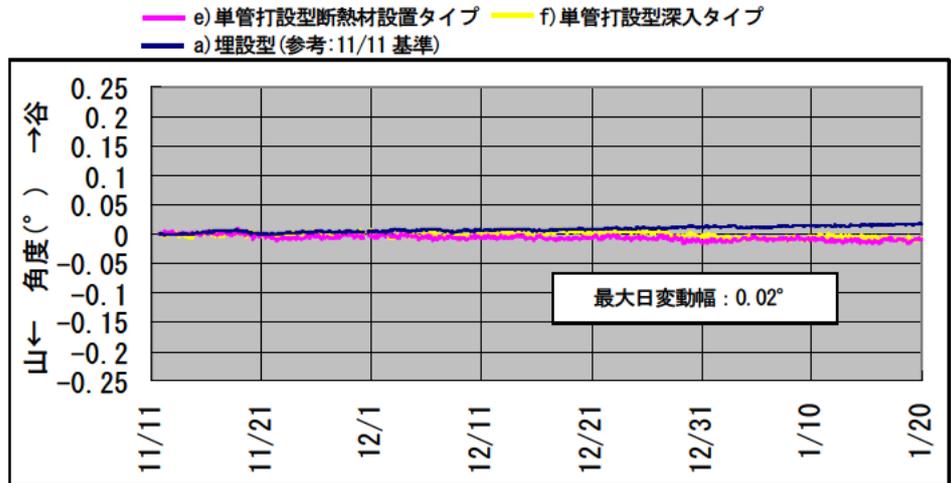


図 4.1.22 山谷方向出力線図 期間：平成 20 年 11 月 11 日～平成 21 年 1 月 20 日

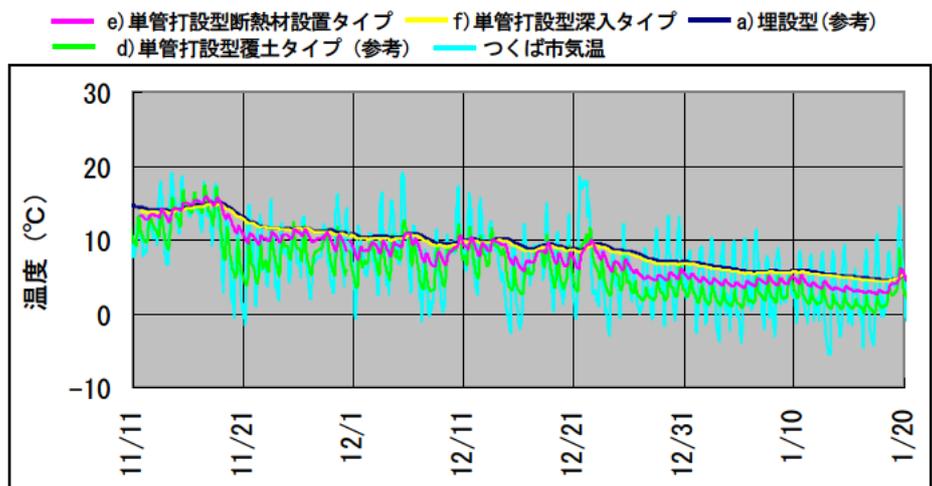


図 4.1.23 傾斜計内部温度線図 期間：平成 20 年 11 月 11 日～平成 21 年 1 月 20 日

図 4.1.21 南北方向傾斜計出力線図及び図 4.1.22 山谷方向傾斜計出力線図から、日変動は、最大変動幅 0.02° であり、d)単管打設型覆土タイプと同等レベルであった。また、図 4.1.23 傾斜計内部温度線図から、d)単管打設型覆土タイプに対し改善の効果があり、f)単管打設型深入設置タイプは、a)埋設型とほぼ同じレベルであった。しかし、e)単管打設型断熱材設置タイプ及び f)単管打設型深入設置タイプは、改善に伴う部品の増加により現場への搬入部品増加で、設置に対し優位ではないため、追加部品を排除し設置深度を深くした次の仕様を検証した。

g)単管打設型埋設タイプ：地表面を 20cm 程度掘り、掘削面まで単管を打設し傾斜計を設置後、覆土する。尚、既設の e)単管打設型断熱材設置タイプを改造した(計測期間：平成 20 年 11 月 28 日～平成 21 年 1 月 20 日)。

g)単管打設型埋設タイプの計測結果を、図 4.1.24 南北方向傾斜計出力線図、図 4.1.25 山谷方向傾斜計出力線図及び図 4.1.26 傾斜計内部温度線図に示す。

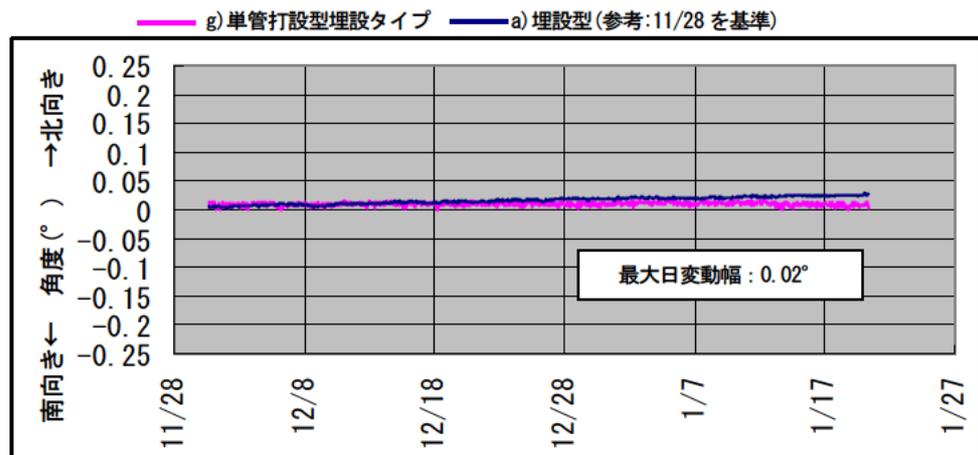


図 4.1.24 南北方向出力線図 期間：平成 20 年 11 月 28 日～平成 21 年 1 月 20 日

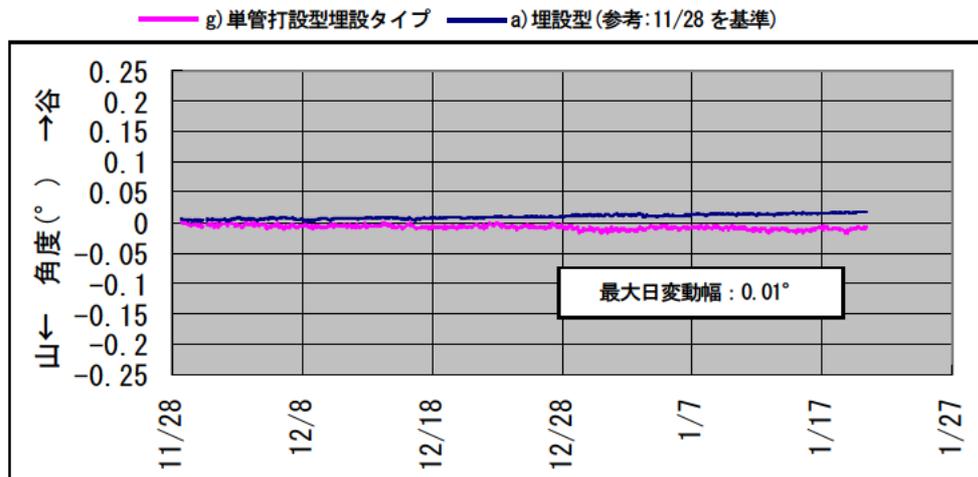


図 4.1.25 山谷方向出力線図 期間：平成 20 年 11 月 28 日～平成 21 年 1 月 20 日

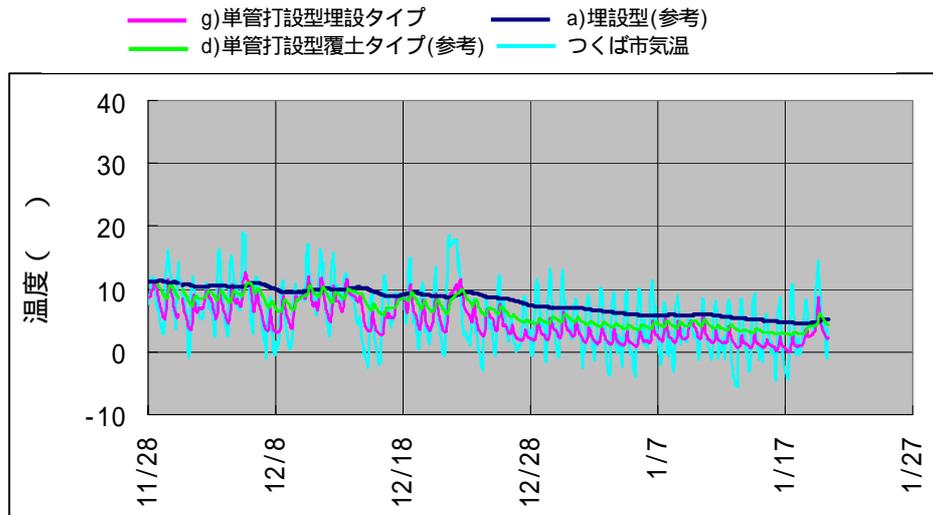


図 4.1.26 傾斜計内部温度線図 期間：平成 20 年 11 月 28 日～平成 21 年 1 月 20 日

日変動のレベルは、図 4.1.24 南北方向傾斜計出力線図から最大変動幅 0.02° 、図 4.1.25 山谷方向傾斜計出力線図から最大変動幅 0.01° であり、d)単管打設型覆土タイプと同等以上のレベルであった。また、図 4.1.26 傾斜計内部温度線図から、d)単管打設型覆土タイプの日変動に対し改善の効果があることが分かった。

傾斜計屋外ランニング実験から、以下のことが確認できた。

- ・日変動幅について

単管打設型地上設置タイプが最も変動幅が大きく、その他の仕様は差が無いことから、センサ本体部分を埋設することで日変動幅を減らせることが分かった。

- ・施工性について

各仕様とも問題なく施工可能であった。

- ・設置仕様について

コストは、埋設型 < 単管打設型地上設置タイプ < 単管打設型覆土タイプ < 単管打設型埋設タイプ < 単管打設型断熱設置タイプ < 単管打設型深入設置タイプの順に高い。

今後、地すべり実証実験で設置方法や施工性を考慮し、仕様を決定する。

③地すべり実証実験：

実験目的

移動観測中の地すべり現場に設置することにより、実現場での設置方法・データの応答状態、施工性等の実用性に関する基礎資料を得る。

実験概要

実験の目的を考慮し、埋設型と単管打設型地上設置タイプの2種類を設置し、施工性の確認を行い、計測結果を既設伸縮計の計測データと気象庁雨量データ（静岡県土肥地点）を用いて検証を行った。また、電源供給の無い現場でのデータ収集状況の確認を行うためバッテリー駆動（2週間駆動）とし、基本仕様に対する設置方法の確認を実施した。

尚、同時並行で実施した傾斜計屋外ランニング実験の改善結果をフィードバックし、平成20年10月2日に単管打設型地上設置タイプを単管打設型覆土タイプへ仕様変更した。

実証実験場所の概要

静岡県伊豆市土肥地区(図4.1.27参照)



図 4. 1. 27 Yahoo 地図情報（伊豆市）より転載（一部編集）

設置位置

実証実験を計画している地区は、平成 19 年 7 月 23 日の地すべりによって発生した国道 136 号線下方斜面の滑落崖である。

IT 地表面傾斜計を設置する位置は、同研究にて観測中である大変位伸縮計 S-1 付近とする。(図 4.1.28 参照)

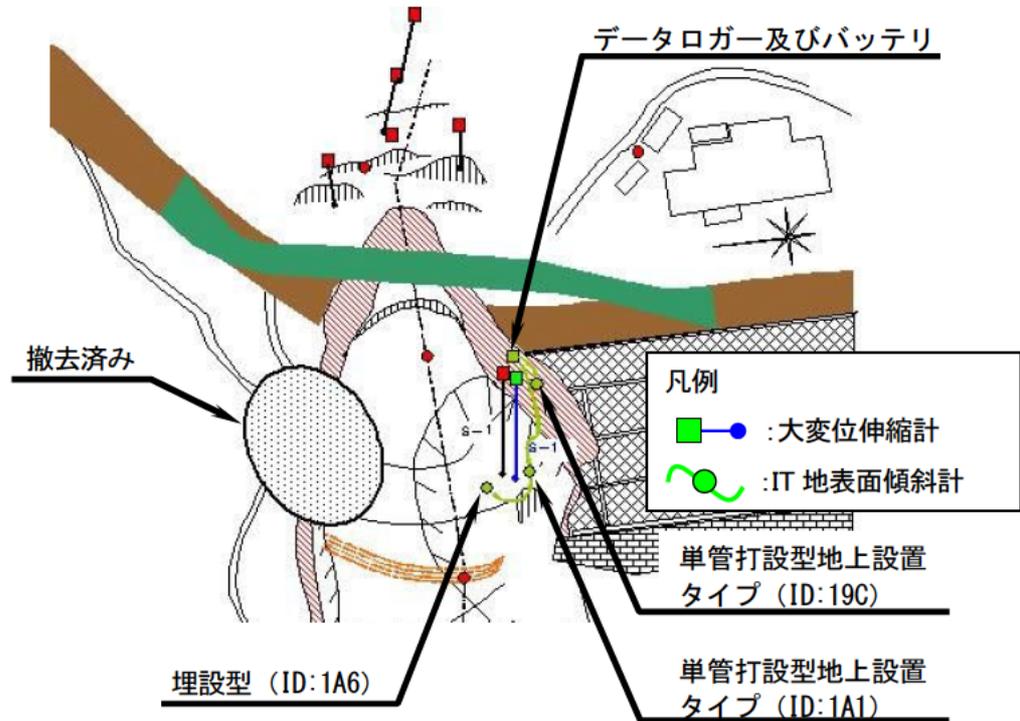


図 4.1.28 IT 地表面傾斜計設置位置図¹⁾



写真 4.1.18 データロガー及びバッテリー設置状況



写真 4.1.19 単管打設型地上設置タイプ (ID:1A1) 設置状況



写真 4.1.20 単管打設型地上設置タイプ (ID:19C) 設置状況



写真 4.1.21 埋設型 (ID:1A6) 設置状況

設置方法

本実験においては、不動点と移動点の2ヶ所にて地表面傾斜の観測を実施する。(図 4.1.29 参照) 以下に設置方法を示す。

- ① 観測地点は、不動点として地すべり移動土塊の頭部付近の山側、移動点としては、不動点より 15m 程度離れた地点(既設伸縮計の移動杭設置付近)とする。不動点側には、単管打設型地上設置タイプの IT 地表面傾斜計(ID:19C)を設置し、移動点側には、単管打設型地上設置タイプ(ID:1A1)と埋設型(ID:1A6)の2種類の IT 地表面傾斜計とする。
- ② 埋設型の IT 地表面傾斜計を設置する位置にて、ハンドオーガーにより掘削する。
- ③ 埋設型の IT 地表面傾斜計を設置する。
- ④ 移動側の単管打設型地上設置タイプを設置する位置に単管パイプを打設し傾斜計本体を設置する。
- ⑤ 不動点側の単管打設型地上設置タイプを設置する位置についても同様の作業を行い、傾斜計本体を設置する。
- ⑥ 不動点付近にデータロガー格納箱を設置し、ケーブルおよびバッテリーの接続を行う。
- ⑦ データロガーの設定を行い、センサの作動を確認する。

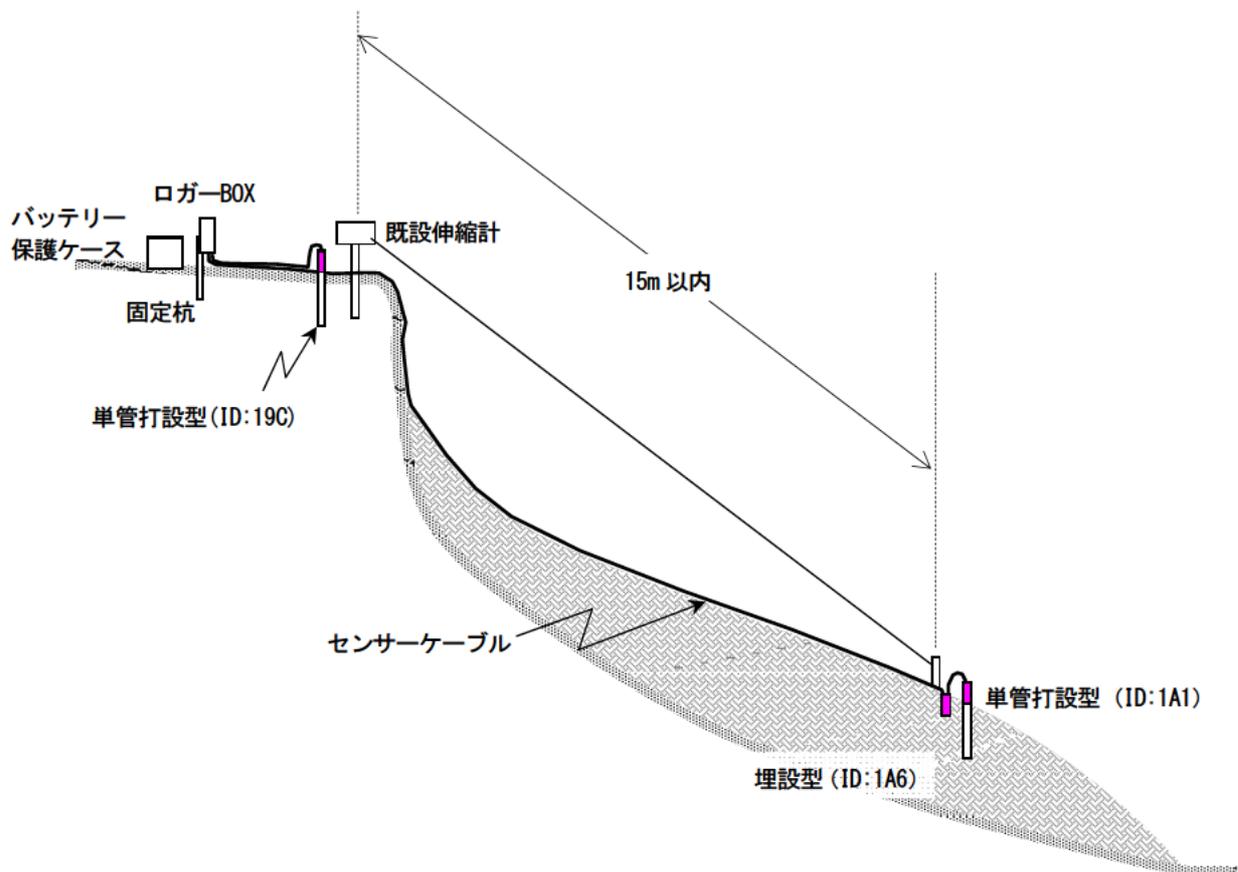


図 4.1.29 IT 地表面傾斜計設置状態図

実験結果

計測データについて

不動点に設置した単管打設型の計測結果を図 4. 1. 30 に、移動点に設置した単管打設型の計測結果を図 4. 1. 31 に、移動点に設置した埋設型の計測結果を図 4. 1. 32 に示す。

尚、伸縮計の計測データは、坂田電機株式会社製作の大変位伸縮計計測データを使用し、平成 20 年 8 月 19 日時点の計測データを基準とした。

計測期間：平成 20 年 8 月 19 日～平成 20 年 11 月 1 日

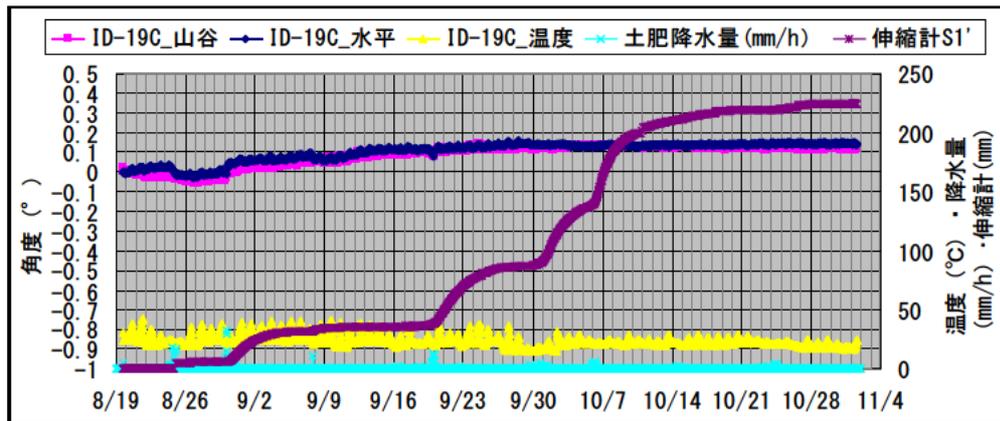


図 4. 1. 30 計測結果 単管打設型 不動点設置

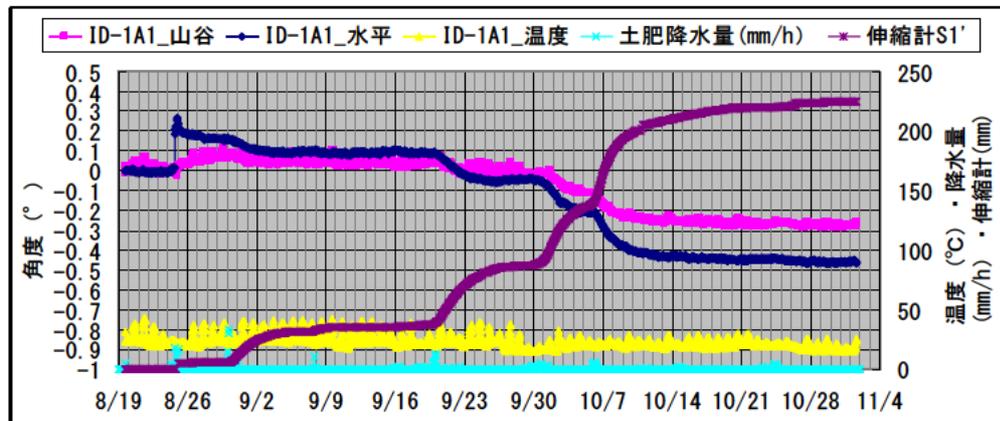


図 4. 1. 31 計測結果 単管打設型 移動点設置

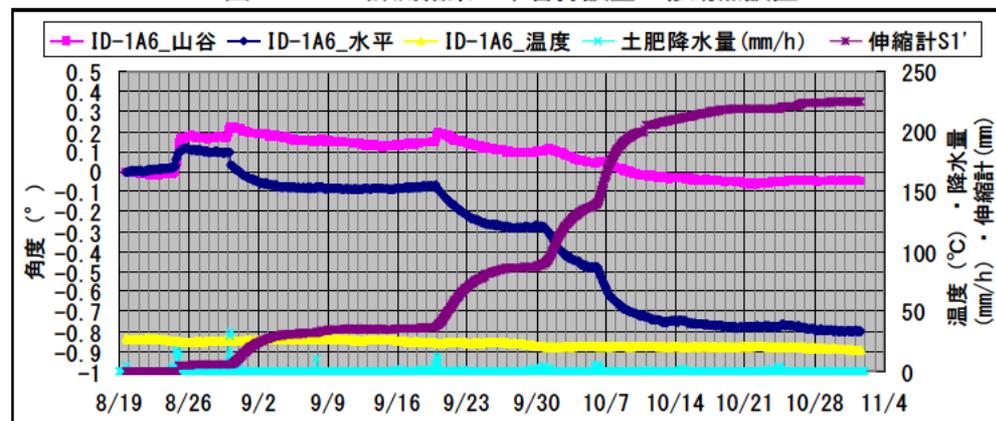


図 4. 1. 32 計測結果 埋設型 移動点設置

図 4. 1. 31 及び図 4. 1. 32 より、移動点側の計測データと伸縮計の計測データは、降雨の後に反応が現れており、IT 地表面傾斜計は、動きを捉えていると考えられる。

図 4. 1. 30 より、不動点側は、当初は降雨後に反応が見られたが、時間がたつにつれ降雨後の反応は見られなくなった。

日変動について、移動点側は地盤の移動が含まれるため検討から除外し、不動点側で検討した。図 4. 1. 33 に水平方向出力線図、図 4. 1. 34 に山谷方向出力線図および図 4. 1. 35 に傾斜計内部温度線図を示す。

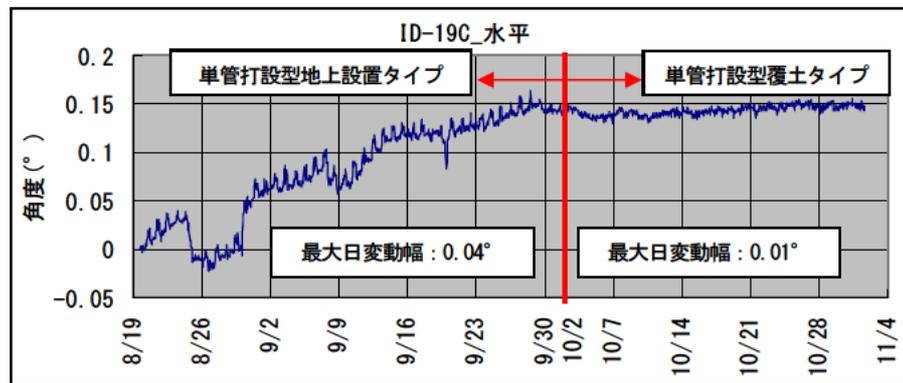


図 4. 1. 33 水平出力線図 不動点設置

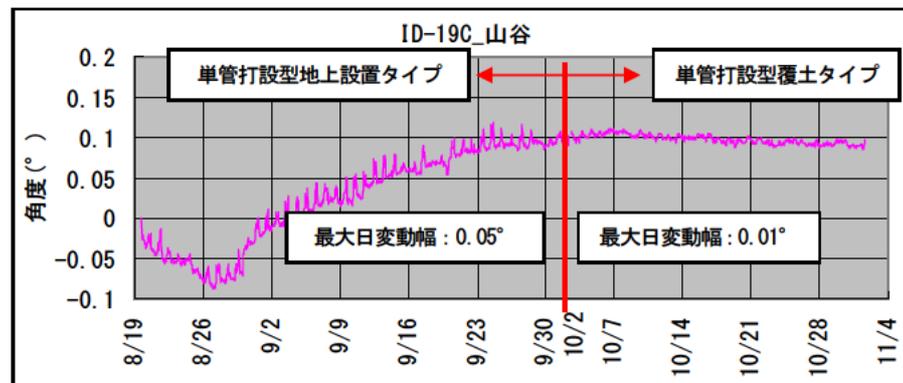


図 4. 1. 34 山谷出力線図 不動点設置

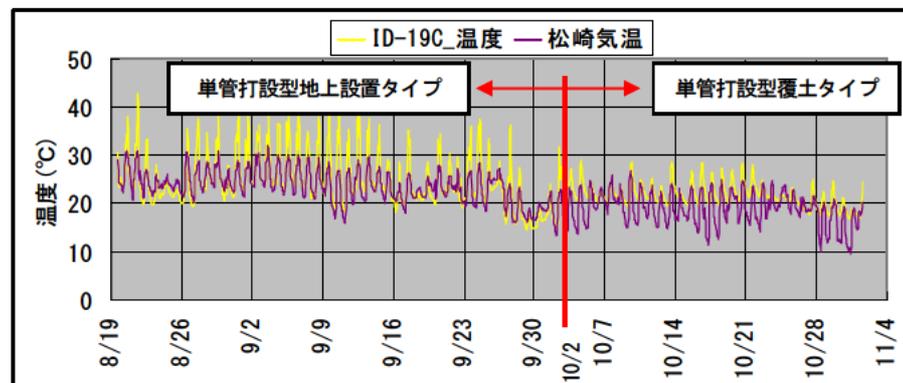


図 4. 1. 35 傾斜計内部温度線図 不動点設置

図 4.1.33 水平方向出力線図及び図 4.1.34 山谷方向出力線図から、仕様変更後、日変動が小さくなっていることがわかる。単管打設型覆土タイプの効果が確認できた。

地すべり実証実験から、以下のことが確認できた。

- ・計測データについて

移動点側の計測データと伸縮計の計測データは、降雨の後に反応が現れており、IT 地表面傾斜計は、動きを捉えていることが分かった。

- ・日変動について

単管打設型覆土タイプが単管打設型地上設置タイプよりも小さいことが分かった。

- ・施工性について

埋設型 礫等の混入によりオーガ掘削に時間を要することが分かった。

単管打設型地上設置タイプ 打設に問題なく、優位である。

単管打設型覆土タイプ 打設・覆土に問題なく、優位である。

- ・設置方法について

基本仕様である計測期間 2 週間、計測間隔 1 回/時間に対し、バッテリー駆動で対応可能であることが確認できた。本実験では最長 18 日間駆動。バッテリー交換日程 初回設置 8 月 19 日、9 月 3 日、9 月 18 日、10 月 2 日、10 月 20 日、回収 11 月 1 日

4.1.4 厳しい現場条件の地すべり地での活用方法

傾斜変動量が秒単位の変動を計測する場合は、水管式傾斜計のような高精度な計測器で計測する必要があるが、地すべりの傾斜変動量が数十秒、数百秒単位の変動を継続的に計測するには、すぐに許容値に達してしまい、傾斜変動の継続的な計測が困難である。このような地すべり地には、高精度の計測器よりも傾斜変動の測定範囲が広い傾斜計で計測することが有効であると考えられる。

本傾斜計は、計測範囲が $\pm 20^\circ$ と広く、地すべり傾斜変動量が大きい所に適していると考えられる。

本傾斜計のデータ収集は有線で行うこと、また、地すべり土塊内には立ち入りができないことから、活用範囲は、地すべり災害現場の後方に設置し、地すべり災害現場後方での滑落等の派生的な地すべりの客観的なデータを提供することを目的とする。

図 4.1.36 に設置の概念図を示す。

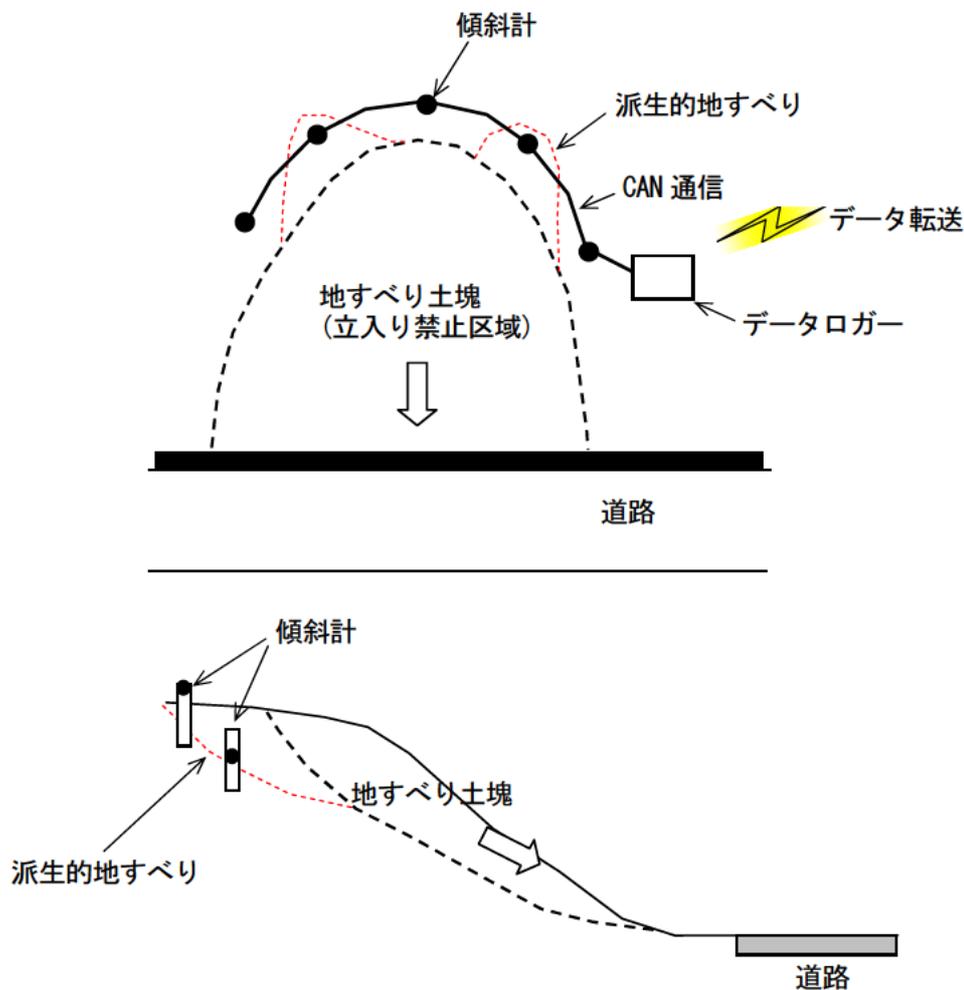


図 4.1.36 傾斜計設置概念図

4.1.5 まとめ

- (1) 本研究では、基本となる IT 傾斜計の加速度センサの仕様、電気回路の仕様、ソフトの仕様に関わる構成は変えずに、活動している地すべり地に迅速に適用するため、施工方法に関わる取付け部位の変更により開発を行った。量産仕様と本研究開発仕様の差異は、以下の通りである。

構成

量産仕様 : 埋設型

本研究開発仕様: 埋設型(量産仕様)、単管打設型(単管パイプ取付け用部品追加)

施工方法

量産仕様 : オーガー等でボーリング後、グラウトで固める。

本研究仕様: 埋設型: オーガー等でボーリング後、残土で埋め戻す。

単管打設型: 単管パイプを打設後、センサ本体をパイプへ設置する。

- (2) 基礎実験から以下のことが得られた。

地すべり実証実験計測データ: 伸縮計との比較より、IT 地表面傾斜計は地盤の動きを捉えられることが分かった。

施工性: 地すべり実証実験より、埋設型は、単管打設型に比べ、礫等の混入によりオーガ掘削に時間を要することが分かった。

日変動: 傾斜計屋外ランニング実験より、単管打設型地上設置タイプが最も変動が大きく、その他の仕様は差が無いことから、センサ本体部分を埋設することで日変動を減らせることが分かった。

以上から、今後の施工仕様は、g)単管打設型埋設タイプで進めていくが、現場によっては十分に単管を打設できない場合を踏まえ、d)単管打設型覆土タイプを並行で検討していくことにする。

- (3) 今後は、観測数を増やし、計測データの解釈や活用方法の検討を行い、実用化を図る。

<参考文献>

緒方健治、松山浩幸、佐藤亜樹男、三嶋信雄、田山聡、竹本将、三宅勝也、国見敬、伊東三郎、根津正弘、熊田裕治、芳賀博文、寺島信一:平成 13 年度 加速度センサを用いた新しい斜面計測機器の開発 共同研究報告書、平成 13 年度:解説編 p(5-3)~p(5-5)

- 1) 2007 年 11 月 6 日 現地踏査説明資料(静岡県沼津土木事務所作成資料)

4.2 振動デバイスを応用した土砂感知センサ

4.2.1 目的

土砂感知センサは、既存の技術（振動デバイス）の利用により土砂を感知するセンサである。本センサは面的な配置が可能で、地すべり現場の災害把握（位置、範囲）や地すべり土塊の広がり監視することを目的として開発する観測装置である。

ただし、本開発を行うにあたり、本共同開発期間は2年間という時間的な制約があり、振動デバイスのセンサ仕様、電気回路の仕様等基本構成の変更は困難なため、既存技術の一部を改造して開発を行うことを前提とした。このため、必ずしも全ての現場条件を網羅するものではない。

4.2.2 システムの概要

本装置は、圧電セラミックスで製作された振動デバイスと、振動デバイスを能動的に振動させ、その周波数特性を検出する検知装置本体からなる。

(1) 計測原理

本振動デバイスの計測原理は、写真4.2.1に示す圧電セラミックスで製作した小型の振動デバイスを可聴域の周波数で振動させ、この周波数特性を検出することによって、接触対象（空気、水、コンクリート）を検知するものである。図4.2.1にシステム概念図を示す。

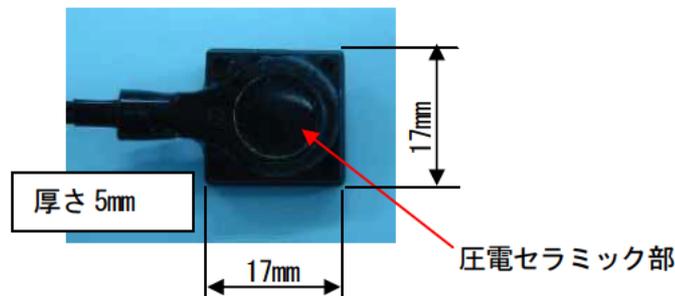


写真4.2.1 振動デバイス

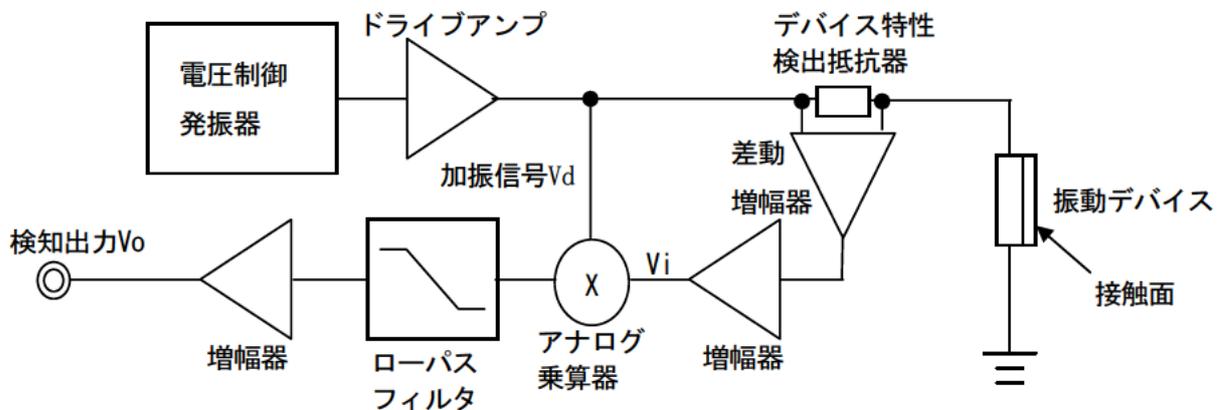


図4.2.1 システム概念図

(2) 既往の研究・実績

既往の研究

- ・コンクリートの充填性確認検知システムの研究開発：東洋建設株式会社 平成 13 年度
(論文：振動を利用したコンクリート充填検知システムに関する基礎実験 コンクリート
工学年次論文集，Vol.24，No.1，2002)

実績

- ・コンクリートの充填確認を行った実績を、表 4.2.1 に示す。

表 4.2.1 コンクリート充填検知実績

利用者	充填検知箇所	充填管理目的
ゼネコン	RC マンションの壁、梁	窓枠下のジャンカ
ゼネコン	RC ビルの柱、フーチン	過密配筋の充填
トンネル補修会社	トンネル裏込め	エアームタルの充填管理
PC メーカー	橋梁ストラット	新設計の橋梁ストラットの 施工管理
PC メーカー	PC 橋梁シース管	シース管のグラウト充填確 認
ゼネコン	CFT	CFT の天端部の充填確認
ゼネコン	覆工トンネル	覆工シートのコンクリート 充填
マリコン	ケーソン	ハンチ部の充填管理
マリコン	栈橋	栈橋の天端部の充填管理
ゼネコン	ベースプレート	ベースプレート下部のモル タル充填管理

4.2.3 基本仕様の検討結果

(1) 基本仕様の検討

本装置は、コンクリート充填検知システムとして確立したものである。通常であれば、振動デバイスは単体で対象構造物に取付け、コンクリート充填の検知を行うが、本開発では、地すべり土塊等の検知に利用するため、土砂流出を確実に検知することや、土砂の湿潤および乾燥の影響の確認を検証する必要がある。

地すべり災害地に立ち入るため、設置の迅速性、運搬時の重量等を考慮し、復旧作業等への支障を避けるため、基本形状は以下の様な構成とした。また、基本仕様は、表 4.2.2 の通りとした。

・シート設置タイプ (写真 4.2.2 参照)

ビニールシート等のシート状のものに、振動デバイスを貼付け、面状に設置が可能になるようにし、検知時には警報表示を行うものとした。



表 4.2.2 基本仕様一覧

センサ	振動デバイス	
センサ種別	ON/OFF センサ (3 段階検知)	
目的	災害把握 (位置・範囲) 地すべり土塊の広がり	
設置位置	地すべり進行方向 (地すべり土塊の前面の道路等)	
設置方法	地面への敷設 構造物への敷設	
計測期間	2 週間	
計測頻度	1 回/16sec(0.6sec/ch)	
センサ概要	検知方式	振動デバイスによる周波数特性検出方式
	識別能力	空気、水、土
	測定チャンネル	16ch
	表示	LCD モニタによるカラー表示(赤、黄、緑)
	計測時間	0.6sec/ch
	ケーブル長	標準 5m、専用延長ケーブル 50m まで可
	センサ耐圧	0.3MPa(水圧)
	日付機能	内蔵時計による 年/月/日/時/分/秒
	記録イベント数	約 5000 イベント
	出力データ形式	テキスト形式
	電源	AC90V ~ 110V
	PC との接続	シリアルポート D-sub(9 ピン)
	使用温湿度範囲	0 ~ 40 5 ~ 85%(結露なきこと)
	周辺設備	測定器本体 ターミナルボックス
寸法	本体 (300W × 220D × 85H (mm)) ターミナルボックス (240W × 120D × 60H (mm)) センサ (17W × 17D × 5 (mm))	
電源	家庭用電源 AC100V	

(2) 基礎実験

実験項目として、以下を実施。

覆土応答実験（その1，その2，その3）

目的：振動デバイスの土砂検知仕様を決定するため、土砂の覆土状態における反応の確認を行う。

泥水応答実験

目的：フィルター付き改良型振動デバイスに想定される泥水を流入させ、応答性能を確認する。

耐圧実験 その1

目的：改良型振動デバイスの荷重に対する耐圧強度を調査し、性能を把握する。

耐圧実験 その2

目的：自動車の往来を想定し、耐圧性能の確認を実施し、性能を把握する。

振動デバイス延長実験

目的：ケーブル延長の要求があり、50m以上の延長についての検証を行う。

覆土応答模型実験

目的：地すべり現場を模擬した模型でセンサの設置を行い、覆土応答および湧き水応答を確認するとともに、センサの設置性を確認する。

覆土応答実験（その1）

実験目的

振動デバイスの土砂検知仕様を決定するため、3種類の材料を用いた覆土状態における反応の確認を行う。

実験概要

振動デバイスを容器の底部及び側面に設置し、材質の異なる地盤材料で覆土を行い、覆土厚さ別に検知装置本体の反応状況の確認を行う。また、反応時の検知装置本体の収録状況を確認する。

地盤材料の種類：ベントナイト、川砂、礫（写真4.2.3～写真4.2.5参照）

覆土厚さ：5cm、10cm、15cm、20cm、25cm

振動デバイス設置位置：底部2箇所、側面2箇所（写真4.2.6参照）



写真4.2.3 礫



写真4.2.4 ベントナイト



写真4.2.5 川砂



写真4.2.6 振動デバイス設置位置



写真4.2.7 ロガー及び警報用パトランプ

実験結果

自然乾燥状態における応答状況を、表 4.2.3～表 4.2.6 に示す。また、含水状態における応答状況を、表 4.2.7～表 4.2.8 に示す。

表 4.2.3 自然乾燥状態における応答状況(礫)

	覆土種類	礫			
	応答位置	底	底	横	横
覆 土 厚 さ	5cm	空気	空気	空気	空気
	10cm	空気	空気	空気	空気
	15cm	空気	空気	空気	空気
	20cm	空気	空気	空気	空気
	25cm	空気	空気	土砂	空気

表 4.2.4 自然乾燥状態における応答状況(川砂)

	覆土種類	川砂			
	応答位置	底	底	横	横
覆 土 厚 さ	5cm	空気	空気	空気	空気
	10cm	空気	空気	空気	空気
	15cm	土砂	土砂	空気	空気
	20cm	土砂	土砂	空気	空気
	25cm	土砂	土砂	空気	空気

表 4.2.5 自然乾燥状態における応答状況(ベントナイト)

	覆土種類	ベントナイト			
	応答位置	底	底	横	横
覆 土 厚 さ	5cm	水	水	土砂	土砂
	10cm				
	15cm				
	20cm				
	25cm				

表 4.2.6 自然乾燥状態における応答状況（中間土(ベントナイト+川砂)）

	覆土種類	中間土(ベントナイト+川砂)			
	応答位置	底	底	横	横
覆 土 厚 さ	5cm	水	水	土砂	水
	10cm	水	水	土砂	水
	15cm	水	水	土砂	水
	20cm				
	25cm				

表 4.2.7 含水状態における応答状況（礫）

	覆土種類	礫			
	応答位置	底	底	横	横
覆 土 厚 さ	5cm	水	水	水	水
	10cm	水	水	水	水
	15cm	土砂	土砂	土砂	水
	20cm	土砂	土砂	土砂	水
	25cm	土砂	土砂	土砂	水

表 4.2.8 含水状態における応答状況（川砂）

	覆土種類	川砂			
	応答位置	底	底	横	横
覆 土 厚 さ	5cm	空気	水	空気	空気
	10cm	空気	空気	空気	空気
	15cm	空気	土砂	空気	空気
	20cm	空気	土砂	空気	空気
	25cm	土砂	土砂	空気	空気

以上の結果から、以下の課題が分かった。

- ・現状の判定しきい値では土砂検出は不十分であり、判定しきい値の再設定が必要である。
- ・粗い粒子（礫、砂など）は、振動デバイスへの接触の仕方によって反応が異なるため、しきい値以外の方法を検討する必要がある。

まずは、判定しきい値の変更を検討し、再度覆土応答実験を行った。

しきい値検討結果：3.5V（現行） ⇒ 5.5V

礫や川砂のように粗い粒子が10cm～15cm程度覆土した場合（側面は検討から除外している）に土砂判定となるようにしきい値の変更を検討した。

現行の土砂判定を行うしきい値は、図4.2.2に示す3.5Vのラインであり、このラインをピーク電圧値が下回る場合に土砂と判定する。一方、粗い粒子である礫と川砂のピーク電圧と覆土厚さの関係線図を図4.2.3及び図4.2.4に示す。

図4.2.3及び図4.2.4から、10cm～15cm程度覆土した場合を考慮すると、しきい値を5.5V以上に設定するのが望ましいが、ケーブルを延長した場合ピーク電圧が減少することが分かっており、また、振動デバイス自体のばらつきも考慮に入れて、しきい値は5.5Vへ変更することにした。

本しきい値を持って、再度、覆土応答実験を行った。

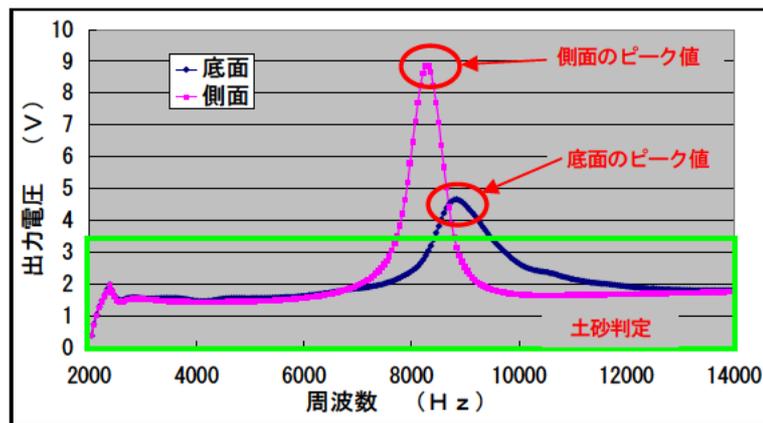


図 4.2.2 出力電圧と周波数の関係線図

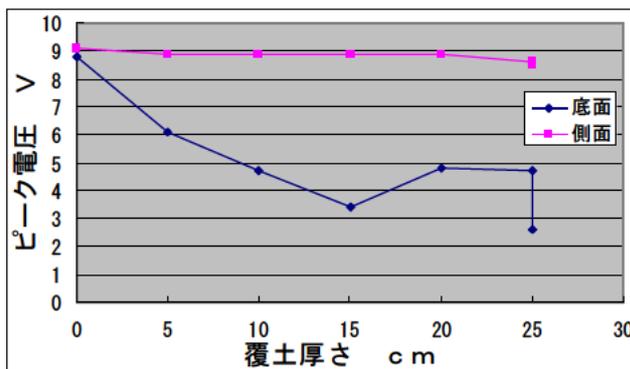


図 4.2.3 ピーク電圧と覆土厚さの関係線図 礫

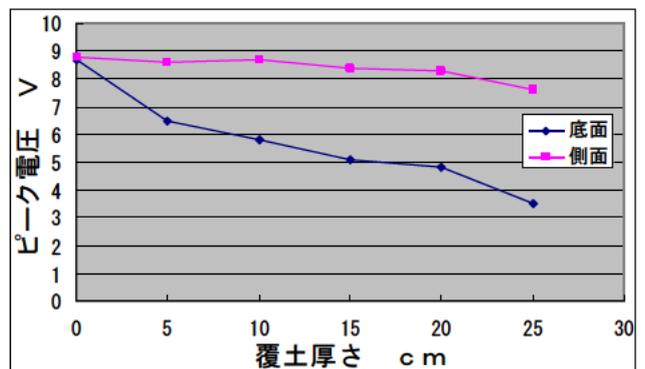


図 4.2.4 ピーク電圧と覆土厚さの関係線図 砂

覆土応答実験（その2）

実験目的

覆土応答実験その1の実験結果より振動デバイスのしきい値を変更し、2種類の材料を用いて覆土状態における反応の確認を行う。

地盤材料の種類：川砂、れき（写真4.2.8～写真4.2.9参照）

覆土厚さ：5cm、10cm、15cm、20cm、25cm

振動デバイス設置位置：底部1箇所、側面1箇所（写真4.2.10参照）



写真4.2.8 川砂



写真4.2.9 礫

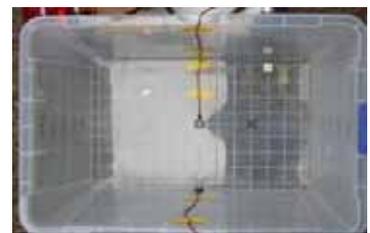


写真4.2.10 振動デバイス設置位置

実験結果

しきい値変更前後の応答状態を表4.2.9～表4.2.11に示す。また、実験状況を写真4.2.11～写真4.2.22に、収録データを図4.2.5～図4.2.16に示す。

表4.2.9 しきい値3.5V(現行)

	覆土種類	礫	
	応答位置	底部	側面
覆 土 厚 さ	5cm	空気	空気
	10cm	空気	空気
	15cm	土砂	空気
	20cm	空気	空気
	25cm	土砂	空気

表4.2.10 しきい値3.5V(現行)

	覆土種類	川砂	
	応答位置	底部	側面
覆 土 厚 さ	5cm	空気	空気
	10cm	空気	空気
	15cm	空気	空気
	20cm	空気	空気
	25cm	土砂	空気

表4.2.11 しきい値5.5V(変更後)

	覆土種類	礫	
	応答位置	底部	側面
覆 土 厚 さ	5cm	空気	空気
	10cm	土砂	空気
	15cm	土砂	空気
	20cm	土砂	空気
	25cm	土砂	空気

表4.2.12 しきい値5.5V(変更後)

	覆土種類	川砂	
	応答位置	底部	側面
覆 土 厚 さ	5cm	空気	空気
	10cm	空気	空気
	15cm	土砂	空気
	20cm	土砂	空気
	25cm	土砂	空気

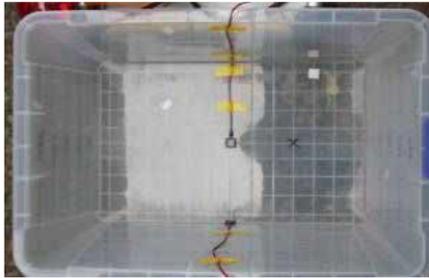


写真 4. 2. 11 実験状況 磔 0cm

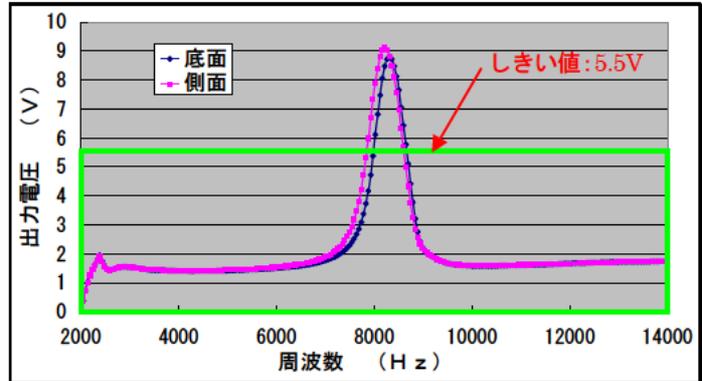


図 4. 2. 5 収録データ 磔 0cm

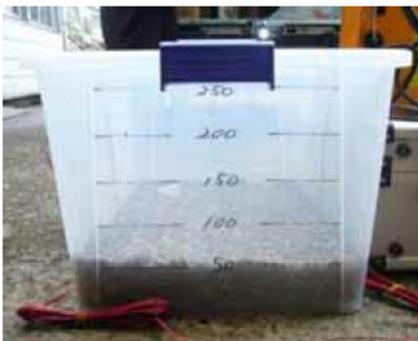


写真 4. 2. 12 実験状況 磔 5cm

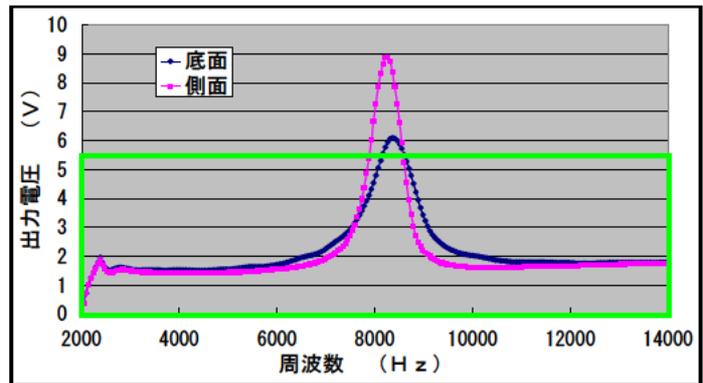


図 4. 2. 6 収録データ 磔 5cm



写真 4. 2. 13 実験状況 磔 10cm

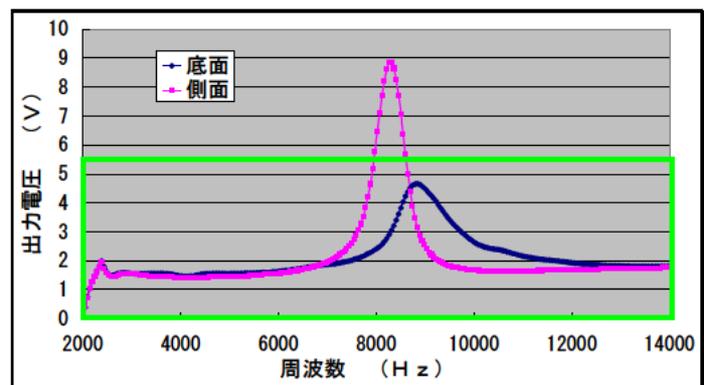


図 4. 2. 7 収録データ 磔 10cm



写真 4. 2. 14 実験状況 礫 15cm

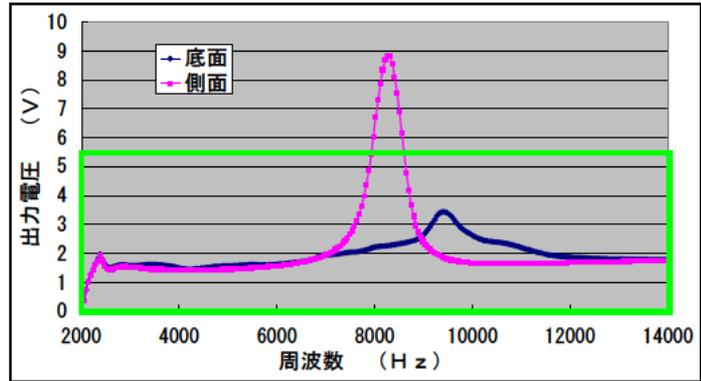


図 4. 2. 8 収録データ 礫 15cm



写真 4. 2. 15 実験状況 礫 20cm

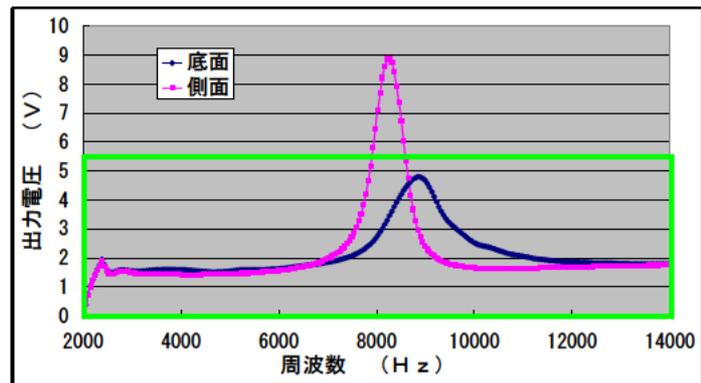


図 4. 2. 9 収録データ 礫 20cm



写真 4. 2. 16 実験状況 礫 25cm

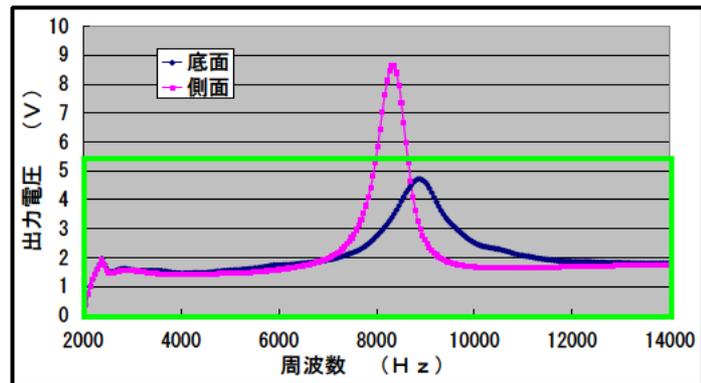


図 4. 2. 10 収録データ 礫 25cm

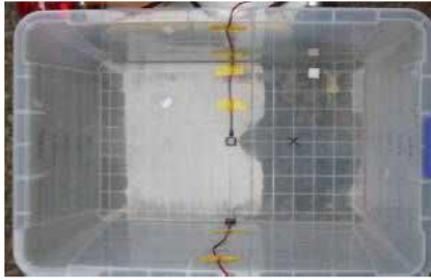


写真 4. 2. 17 実験状況 川砂 0cm

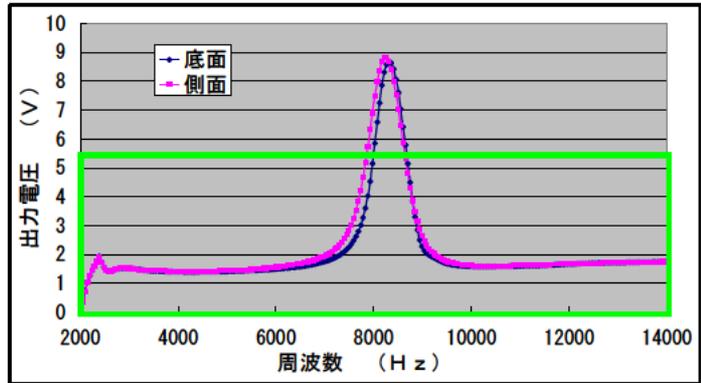


図 4. 2. 11 収録データ 川砂 0cm



写真 4. 2. 18 実験状況 川砂 5cm

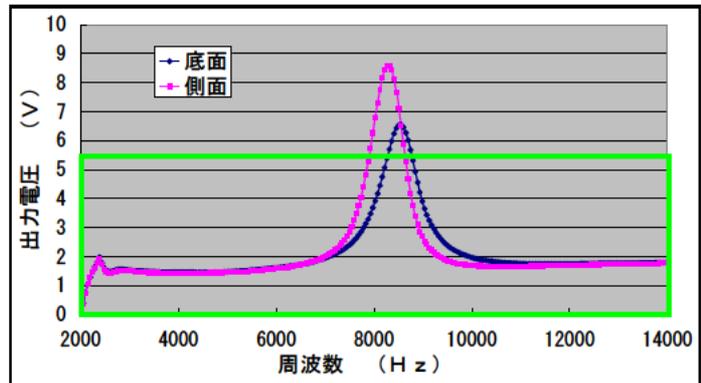


図 4. 2. 12 収録データ 川砂 5cm



写真 4. 2. 19 実験状況 川砂 10cm

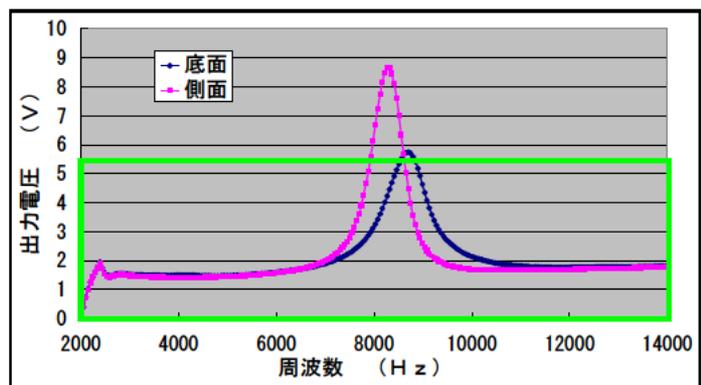


図 4. 2. 13 収録データ 川砂 10cm



写真 4. 2. 20 実験状況 川砂 15cm

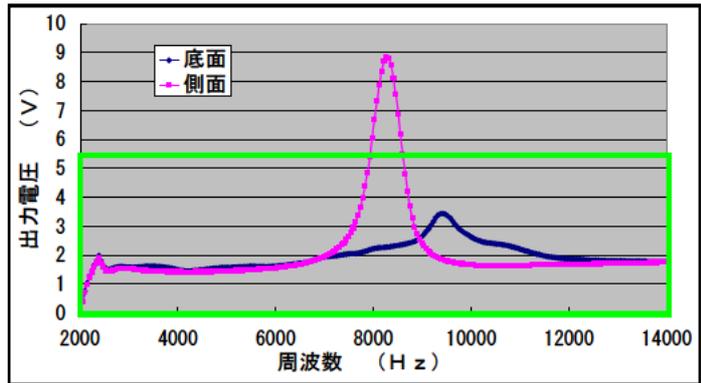


図 4. 2. 14 収録データ 川砂 15cm



写真 4. 2. 21 実験状況 川砂 20cm

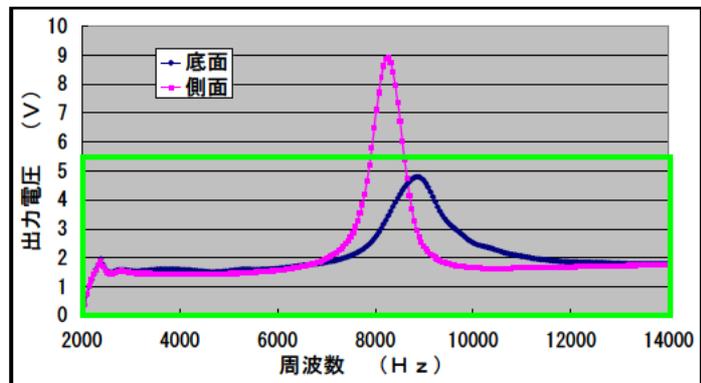


図 4. 2. 15 収録データ 川砂 20cm



写真 4. 2. 22 実験状況 川砂 25cm

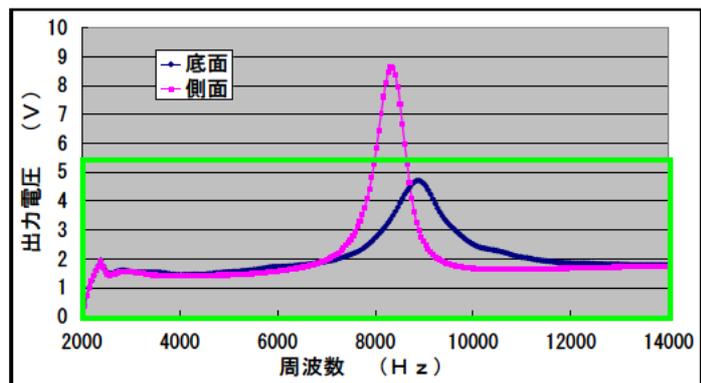


図 4. 2. 16 収録データ 川砂 25cm

覆土応答実験の結果から、しきい値を変更しても土砂判定ができない下記課題があり、しきい値変更での対応は、困難であることが分かった。

- ・側面は、覆土厚を増してもピーク電圧の変化が少ない。
- ・覆土厚を増しても粗粒子同士が干渉し、振動デバイスの検知部が小さいため、振動デバイスの検知部に接触しないことにより反応しない。

以上を鑑み、振動デバイスのハード的な変更を行うこととし、検討を実施した。

振動デバイスの検知部に触るものを取り付け、反応性能を向上させた改良型振動デバイスを2種類設定し、覆土応答実験を実施した。

仕様は、以下の通りである。

- ・カンチレバーが土砂によって傾き振動デバイスの検知面を押す。(図 4.2.17 カンチレバーtype 参照)
- ・スポンジが土砂によって潰れて振動デバイスの検知面を押す。(図 4.2.18 面受け type 参照)

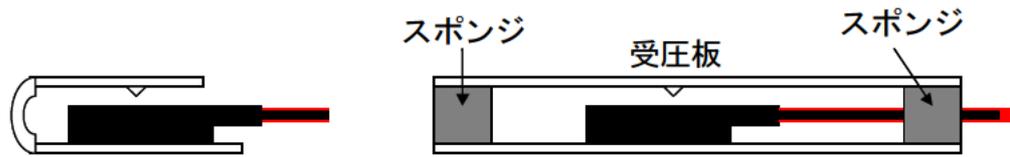


図 4.2.17 カンチレバーtype

図 4.2.18 面受け type

覆土応答実験（その3）

実験目的：振動デバイスのハード的な変更を行い、反応性能を向上させた改良型振動デバイスを2種類設定し、2種類の材料を用いて覆土状態における反応の確認を行う。

改良型振動デバイス：2種類（写真4.2.23 カンチレバーtype 及び写真4.2.24 面受け type 参照）

地盤材料の種類：川砂、礫

覆土厚さ：5cm、10cm、15cm、20cm、25cm

振動デバイス設置位置：底部各1箇所、側面各1箇所（写真4.2.25 参照）

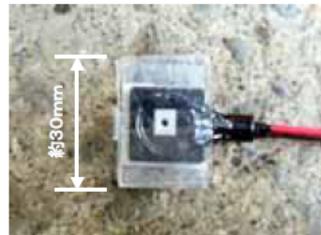


写真 4.2.23 カンチレバーtype
土砂流入防止不織布付き

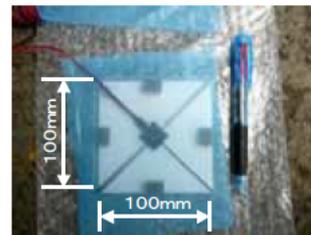


写真 4.2.24 面受け type
土砂流入防止ネット付き



写真 4.2.25 振動デバイス設置位置

実験結果：改良型振動デバイスの応答状態を表4.2.13・表4.2.14に示す。また、実験状況を写真4.2.26～写真4.2.35に、収録データを図4.2.19～図4.2.28に示す。

表 4.2.13 改良型振動デバイス 礫

	覆土種類	礫			
	仕様	カンチレバーtype		面受け type	
	応答位置	底①	側②	底①	側②
覆 土 厚 さ	0cm	空気	空気	空気	空気
	5cm	土砂	空気	土砂	空気
	10cm	土砂	土砂	土砂	土砂
	15cm	土砂	土砂	土砂	土砂
	20cm				
	25cm				

表 4.2.14 改良型振動デバイス 川砂

	覆土種類	川砂			
	仕様	カンチレバー-type		面受け type	
	応答位置	底①	側②	底①	側②
覆土厚さ	0cm	空気	空気	空気	空気
	5cm	土砂	空気	土砂	空気
	10cm	土砂	土砂	土砂	空気
	15cm	土砂	土砂	土砂	土砂
	20cm	土砂	土砂	土砂	土砂
	25cm	土砂	土砂	土砂	土砂

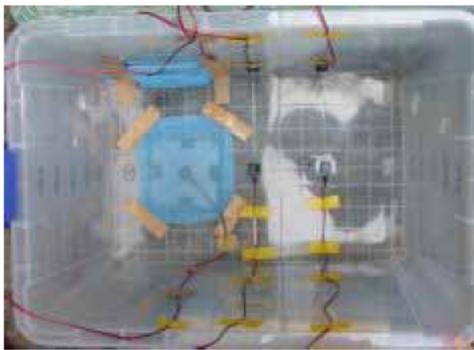


写真 4.2.26 実験状況 礫 0cm

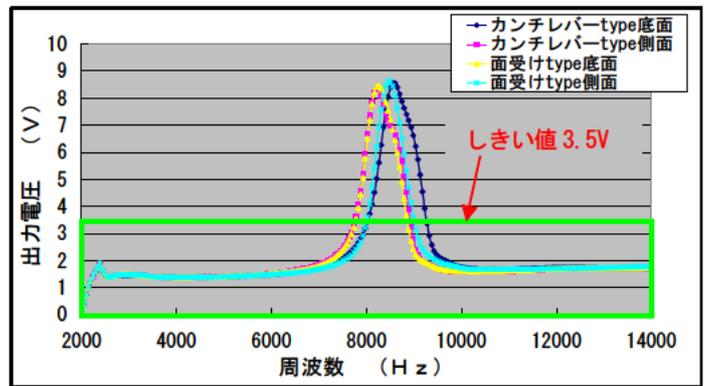


図 4.2.19 収録データ 礫 0cm

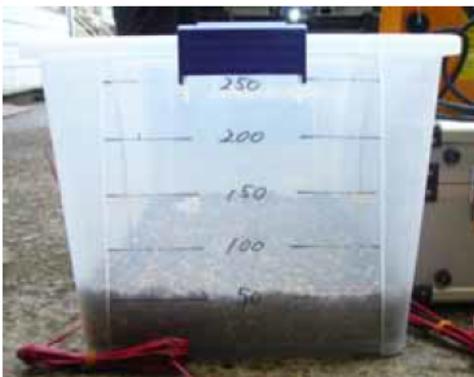


写真 4.2.27 実験状況 礫 5cm

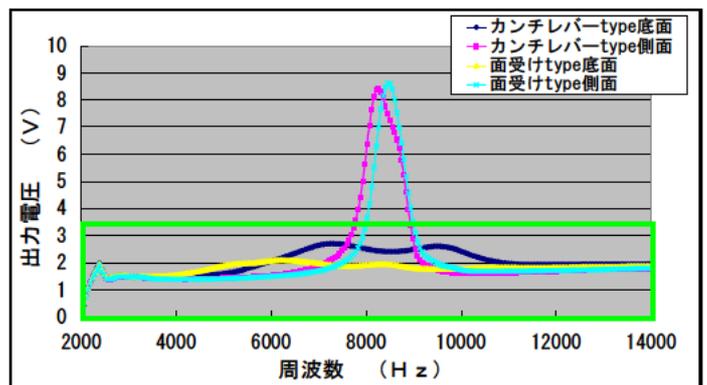


図 4.2.20 収録データ 礫 5cm



写真 4. 2. 28 実験状況 礫 10cm

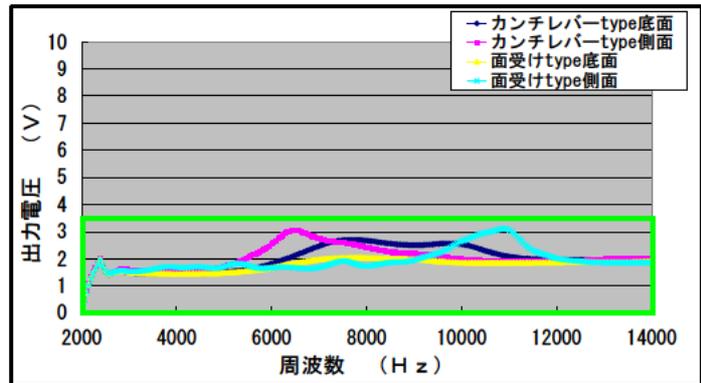


図 4. 2. 21 収録データ 礫 10cm



写真 4. 2. 29 実験状況 礫 15cm

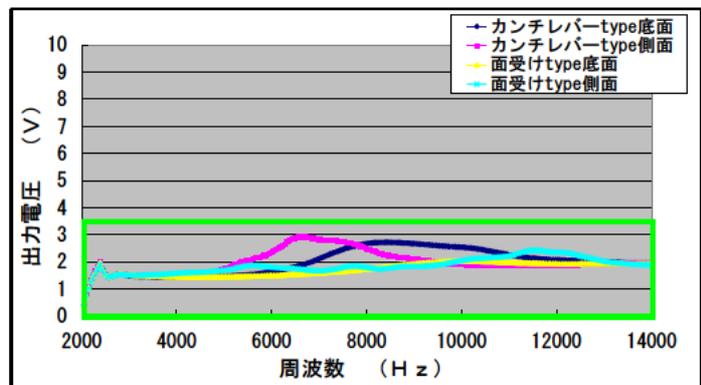


図 4. 2. 22 収録データ 礫 15cm

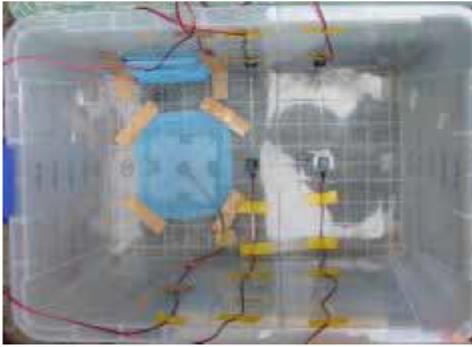


写真 4. 2. 30 実験状況 川砂 0cm

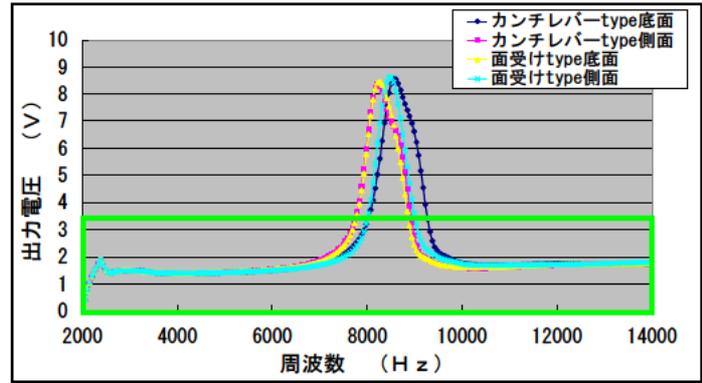


図 4. 2. 23 収録データ 川砂 0cm



写真 4. 2. 31 実験状況 川砂 5cm

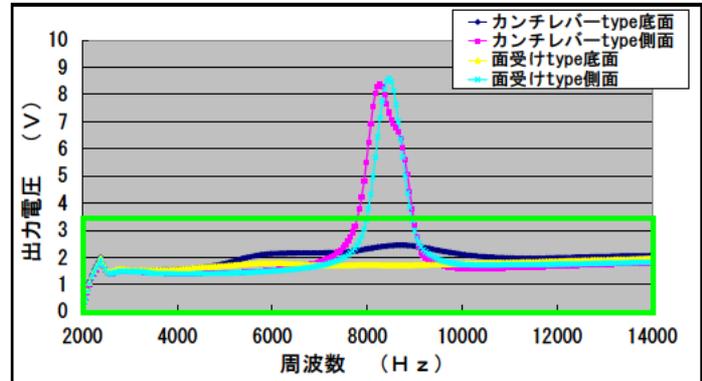


図 4. 2. 24 収録データ 川砂 5cm



写真 4. 2. 32 実験状況 川砂 10cm

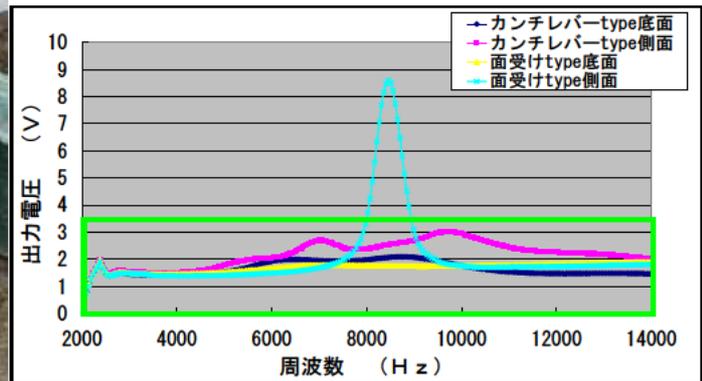


図 4. 2. 25 収録データ 川砂 10cm



写真 4. 2. 33 実験状況 川砂 15cm

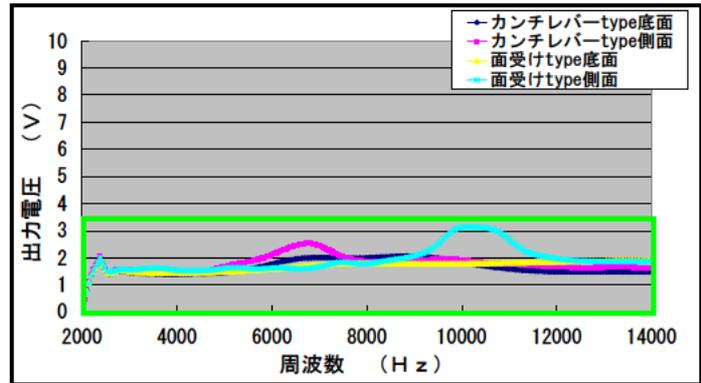


図 4. 2. 26 収録データ 川砂 15cm



写真 4. 2. 34 実験状況 川砂 20cm

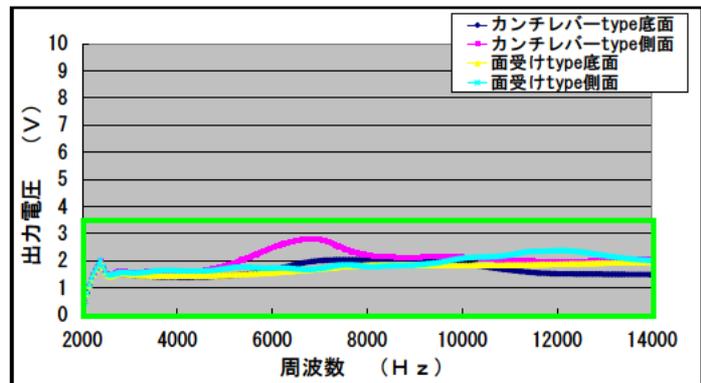


図 4. 2. 27 収録データ 川砂 20cm



写真 4. 2. 35 実験状況 川砂 25cm

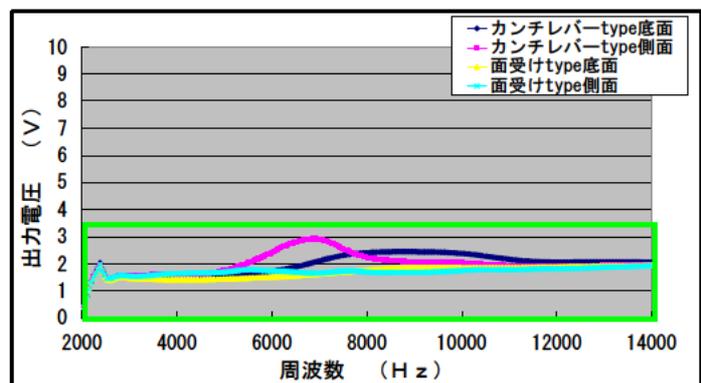


図 4. 2. 28 収録データ 川砂 25cm

実験結果から、改良型振動デバイスへ変更により、底面は、カンチレバーtype、面受けtype とともに、れき／川砂は5cmで、側面は、カンチレバーtypeが10cm、面受けtypeは、15cmで反応し改善効果が得られた。

尚、カンチレバーtypeは、下記理由で開発を中止した。

- ・振動デバイスは衝撃に対して検知部が弱いため、機構面での耐圧性向上の必要性があり、カンチレバーtypeは構造的に耐圧を受けられる構造がとれない。よって、以後は、改良型振動デバイスは、全て面受けtypeで進める。改良型振動デバイスの耐圧性能向上のため、荷重を受けるストッパーを追加した。(図4.2.29改良型振動デバイス概念図参照)

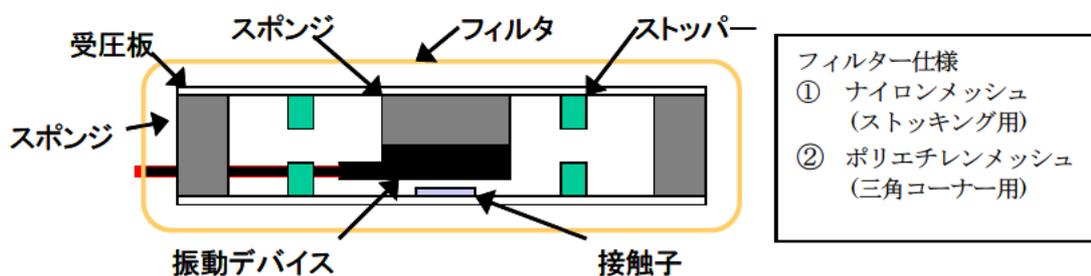


図4.2.29 改良型振動デバイス概念図

改良型振動デバイスは、カンチレバー内部に土砂が入らないようにフィルターで全体を覆う構造であるが、泥水の流入により泥がたまり、作動不良を起こす可能性がある。泥水流入後に感知可能か否かについて、泥水応答実験で性能を確認する。

また、改良型振動デバイスの耐圧性能に関して確認する。

②泥水応答実験

実験目的：改良型振動デバイスに想定される泥水を流入させ、フィルターの違いによる応答性能を確認する。

実験概要：改良型振動デバイスを設置した容器に泥水を注入・排水を行い、目詰まりや検出部への堆積状況を調査し、改良型振動デバイスの反応を記録する。

実験土質：砂・粘性土を含む泥水、粘性土を多く含む泥水

実験条件：容器の底に2種類のフィルター付き改良型振動デバイスを設置。泥水を高さ10cmまで注入し、5分間放置する。その後、泥水を排出し、泥水注入から排水完了まで、改良型振動デバイスの反応を記録する。

フィルター仕様：①目の細かいナイロンメッシュ（例えばストッキング相当）
②目の粗いポリエチレンメッシュ（例えば台所三角コーナー相当）

実験結果：実験状況を写真4.2.36～写真4.2.41に示す。また、振動デバイスの反応状況を表4.2.15に示す。

目の細かいフィルター



目の粗いフィルター

写真4.2.36 設置状況



写真4.2.37 泥水注入状況



写真4.2.38 排水時の状況



写真4.2.39 排水後、底部泥たまり状況

写真4.2.40 実験後のフィルター状況
細かい目写真4.2.41 実験後のフィルター状況
粗い目

状況	フィルター仕様	
	目の粗いフィルター	目の細かいフィルター
実験前	空気	空気
泥水注入	水	水
泥水注入 5 分後	水	水
排水	水→空気	水→土

排水後、目の細かいフィルター仕様で誤判定が発生した(表 4.2.15 赤字部)。試験後、内部の状況を確認した。

試験後のセンサを分解して内部を調査したところ、目の細かいフィルター仕様のセンサは振動デバイス検知面にヘドロ状の土が溜まり(写真 4.2.42 参照)、土判定をしていたことが分かった。目が細かいために内部に溜まったヘドロ状の土が流れにくく、泥水の排水時も内部に残ってしまうためと考えられる。また、目の粗いフィルター仕様のセンサには泥の咬み込みなど無く良好であった。

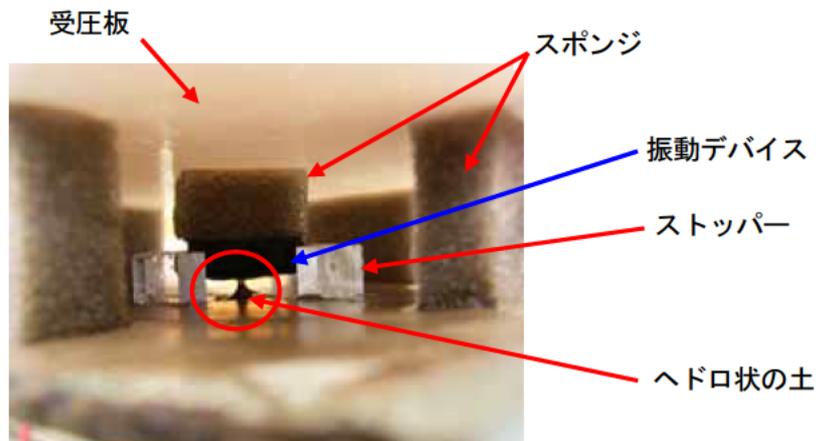


写真 4.2.42 分解調査状況

ヘドロ状の土が検知面に溜まってしまいう対策として振動デバイスの検知面の距離を長くして表面張力で切れるようにする(図 4.2.30 参照)。

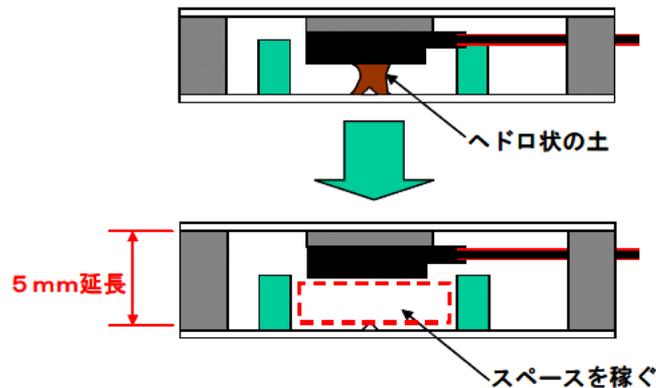


図 4.2.30 形状変更概念図

耐圧実験 その1

実験目的：改良型振動デバイスの荷重に対する耐圧強度を調査し、性能を把握する。

実験概要：改良型振動デバイスの受圧板を加圧し、振動デバイスの特性を確認するとともに、振動デバイス検知部振動板の変形有無を確認する。

実験条件：プッシュプルゲージにて加圧：2kg～10kgまで2kgステップ。(写真4.2.43参照) また、人間が踏んで確認(体重約78kg)を実施。(写真4.2.44参照)



写真4.2.43 プッシュプルゲージによる载荷状況



写真4.2.44 踏みつけによる载荷状況

実験結果：表4.2.16に示すとおり、全て問題なし。

表4.2.16 実験結果

荷重	作動状況	振動板の状態	
2kg	問題ない		異常なし
4kg	問題ない		異常なし
6kg	問題ない		異常なし
8kg	問題ない		異常なし
10kg	問題ない		異常なし
78kg	問題ない		異常なし

④耐圧実験 その2

実験目的：自動車の往來を想定し、耐圧性能の確認を実施し、性能を把握する。

実験概要：自動車で改良型振動デバイスを踏み付け、その耐久性を確認する。

実験条件：車両：MPV（マツダ社 車両総重量前輪：1070kgf（前輪1輪:535kgf）

クリープ走行(速度 5km/h 以下)で振動デバイス上を走行する。

実験結果：受圧板の破損が発生した。状況写真を写真 4. 2. 45～写真 4. 2. 49 に示す。

振動デバイスへの影響はなかったが、仮に振動デバイス上の部位で破損が発生した場合、振動デバイスが破損し、誤検出する可能性がある。

従って、車両が往來し、踏まれる様な状況下での使用は適さない。

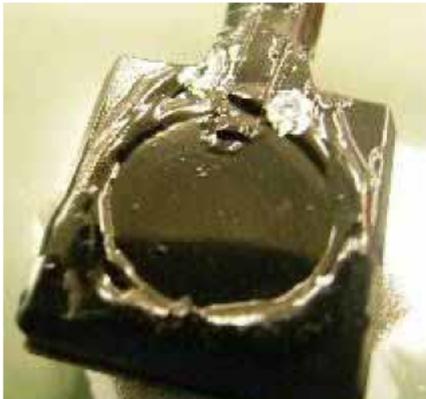


写真 4. 2. 45 振動デバイス表面状況 試験前

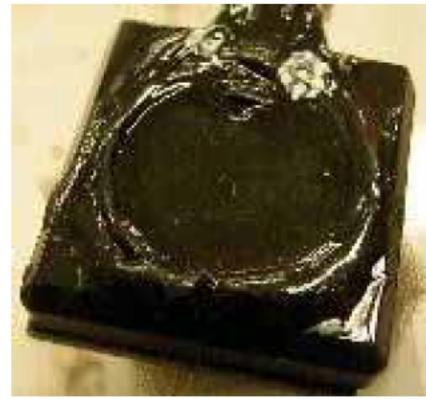


写真 4. 2. 46 振動デバイス表面状況 試験後



写真 4. 2. 47 車両通過前



写真 4. 2. 48 車両通過後



写真 4. 2. 49 破損状況

振動デバイス延長実験

実験目的：ケーブル延長の要求があり、50m 以上の延長についての検証を行う。

実験概要：ケーブル延長時の電気的特性を確認する。

実験方法：振動デバイスのケーブルを、50m、100m、200m とし、標準出荷仕様であるケーブル長 5m を基準として電圧降下量を確認する。

評価基準：標準出荷仕様に対し、電圧降下量が 2V 以下のこと

(標準出荷仕様出力電圧 7V 以上、土砂判定しきい値電圧 3.5V、温度変化分 1.5V)

実験結果：表 4.2.17 に示す。

	ケーブル長	電圧降下量		判定電圧 範囲	判定可否
		ケーブル延長	温度変化		
標準出荷仕様	5m	-	1.5V	5.5V	可
公称最大長	50m	約 1V		4.5V	可
	100m	約 2V		3.5V	否
	200m	約 3V		2.5V	否

表 4.2.17 から、50m 以上の延長は、土砂判定のしきい値に対して余裕がなくなるため、延長できない。

以上 ~ の実験により、土砂検知仕様、耐圧確認、ケーブル延長の試験を実施し、最終仕様が決定した。今後、敷設方法の検討後、現地実験により適応性を確認する。

覆土応答模型実験

実験目的：地すべり現場を模擬した大型模型土槽にてセンサの設置を行い、覆土応答および湧き水応答を確認するとともに、センサの設置性を確認する。

実験概要：大型土槽内（写真 4.2.50 参照）に作製した自然斜面と見立てた斜面上部より、水および土砂を投入する。投入された水・土砂の到達状況を、土槽内の底面部および壁面部に設置した振動デバイスセンサにより把握する。この模型実験により、現場でのセンサ設置の施工性を検証するとともに、最終仕様におけるセンサの応答状況・耐圧性を確認する。



写真 4.2.50 土工実験施設

実験場所：独立行政法人 土木研究所 土工実験施設

実験実施日：平成 21 年 2 月 19 日（木）

実験項目：実フィールドを模擬し、センサ設置の施工性検証、湧き水および土砂の覆土による振動デバイスの反応を確認する。

尚、実験に利用する土は、土工実験施設内にある山砂を利用する。

センサ設置の施工性検証

覆土実験（乾いた土砂）

湧き水（流水）反応実験

覆土実験（水を含んだ土砂）

センサ設置の施工性検証：現場での施工性を検証するため、改良型振動デバイスをシート上に取付けたものを使用する。尚、応答の信頼性向上のため、シート 1 枚に 2 個のセンサを取付けたものを 1 ユニットとした。（図 4.2.31、写真 4.2.51 参照）土槽内の設置位置を、図 4.2.32 に示す。

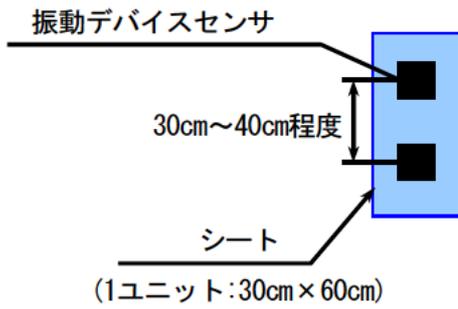


図4.2.31 シート型センサ 模式図

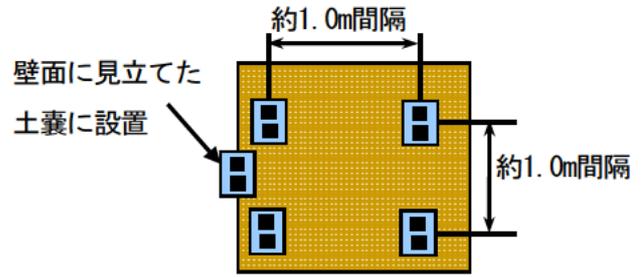


図4.2.32 シート型センサ 設置模式図



写真4.2.51 シート型センサシステム一式

②覆土実験(乾いた土砂):崩壊土砂に見立て斜面上部より、土砂を落とし込む。(図4.2.33参照)シート型センサ設置位置とロガーポート番号の関係を図4.2.34に示す。

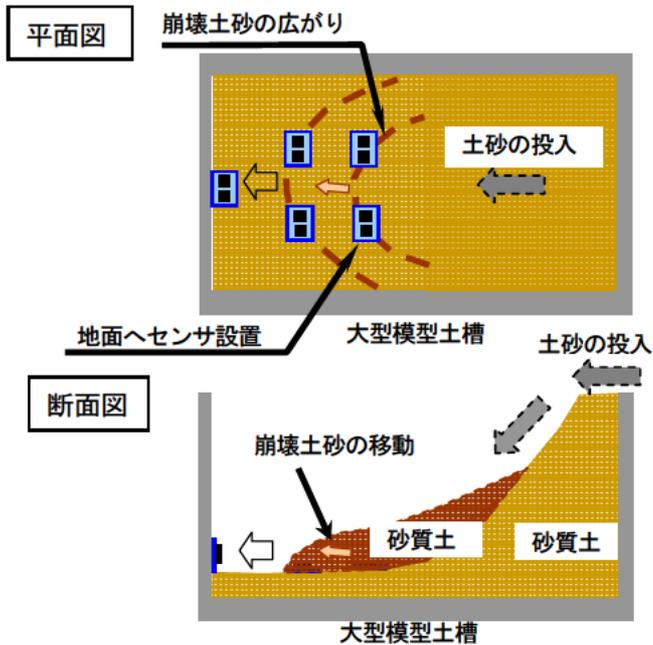
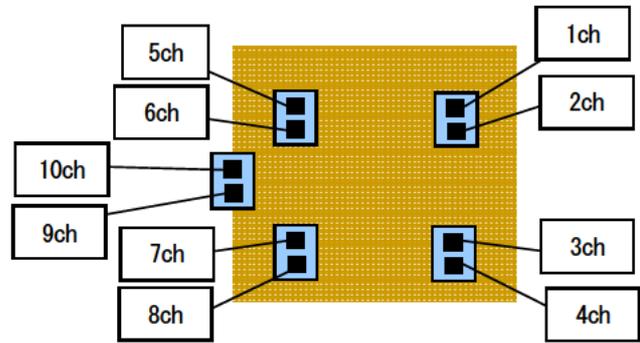


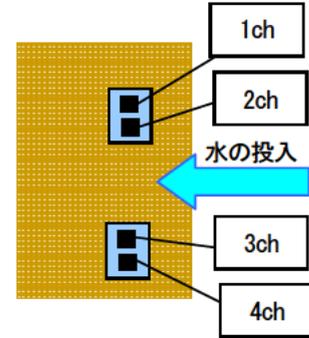
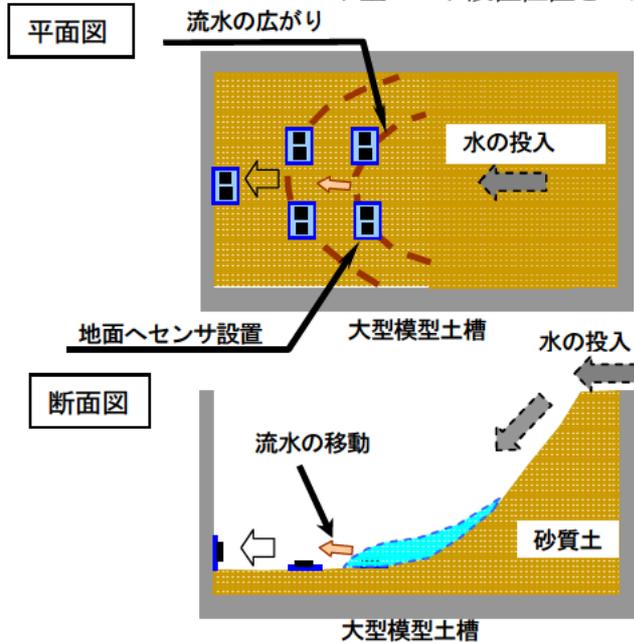
図4.2.33 シート型センサ覆土模型実験概念



**chは、ロガー接続ポート番号を示す。
図4.2.34 シート型センサ設置位置とロガーポート番号の関係

③湧き水（流水）反応実験：地すべり斜面の湧き水に見立て、斜面よりホースを用いて水を流し込む。（図 4.2.35 参照）

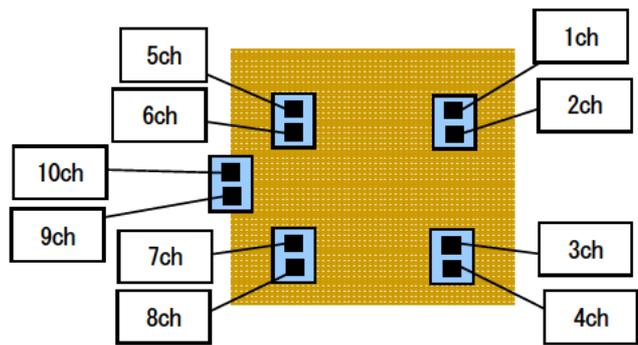
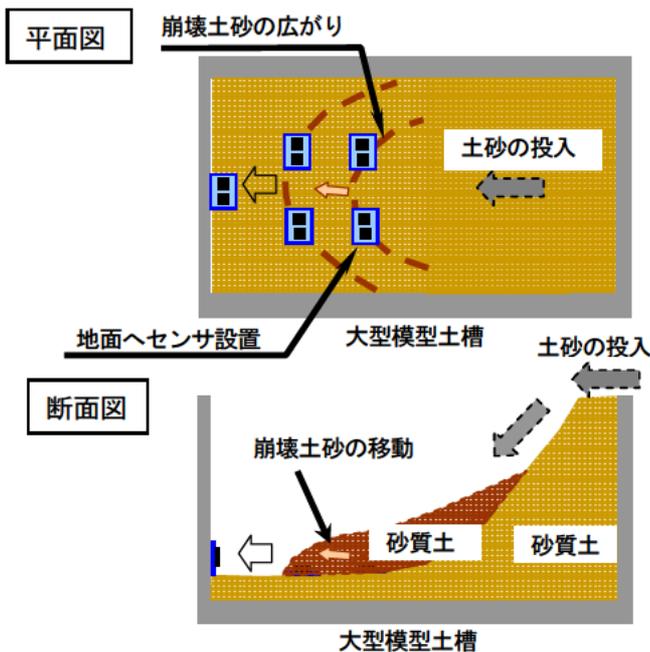
シート型センサ設置位置とロガーポート番号の関係を図 4.2.36 に示す。



**chは、ロガー接続ポート番号を示す。
図4.2.36 シート型センサ設置位置とロガーポート番号の関係

図4.2.35 シート型センサ流水模型実験概念図

④覆土実験（水を含んだ土砂）：崩壊土砂に見立て斜面上部より、土砂を落とし込む。（図 4.2.37 参照）シート型センサ設置位置とロガーポート番号の関係を図 4.2.38 に示す。



**chは、ロガー接続ポート番号を示す。
図4.2.38 シート型センサ設置位置とロガーポート番号の関係

図4.2.37 シート型センサ覆土模型実験概念

実験結果：

①シート型センサの設置結果：写真 4. 2. 52、写真 4. 2. 53 参照

設置時間：40 分程度

シート型センサの設置は良好であった。

ケーブル設置は、絡まるなどで時間を費やし、改善が必要である。



写真4. 2. 52 シート型センサ設置状況



写真4. 2. 53 シート型センサ設置状況

②覆土実験（乾いた土砂）：シート型センサの応答状況を表 4.2.18 に示す。

また、実験状況を写真 4. 2. 54～写真 4. 2. 58 に、収録データを図 4. 2. 39～図 4. 2. 43 に示す。

結果から、良好な反応が得られた。

表 4. 2. 18 覆土実験（乾いた土砂）応答状況

	実験前	投入 1 回目	投入 2 回目	投入 3 回目	投入 4 回目
1ch	空気	土砂	土砂	土砂	土砂
2ch	空気	土砂	土砂	土砂	土砂
3ch	空気	土砂	土砂	土砂	土砂
4ch	空気	土砂	土砂	土砂	土砂
5ch	空気	空気	空気	空気	土砂
6ch	空気	空気	空気	土砂	土砂
7ch	空気	空気	空気	土砂	土砂
8ch	空気	空気	空気	空気	土砂
9ch	空気	空気	空気	空気	土砂
10ch	空気	空気	空気	空気	土砂



写真4.2.54 覆土実験前状況

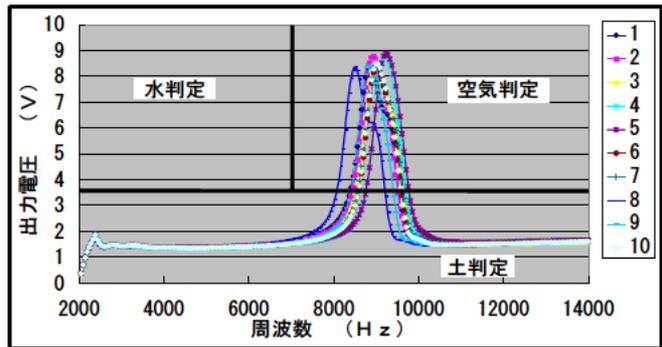


図4.2.39 覆土実験前波形データ



写真4.2.55 覆土実験 投入1回目状況

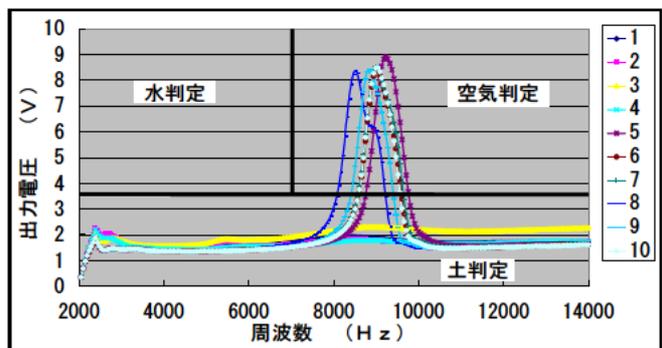


図4.2.40 覆土実験 投入1回目波形データ



写真4.2.56 覆土実験 投入2回目状況

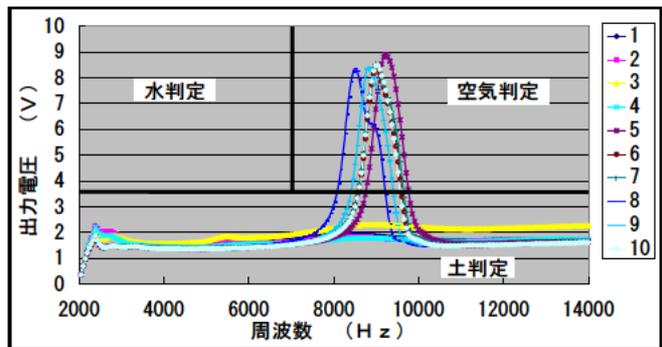


図4.2.41 覆土実験 投入2回目波形データ



写真4.2.57 覆土実験 投入3回目状況

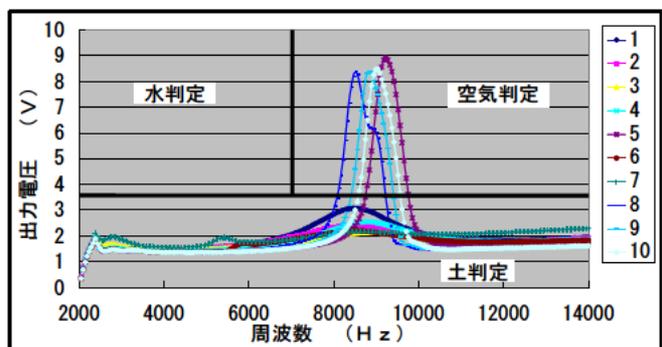


図4.2.42 覆土実験 投入3回目波形データ



写真4.2.58 覆土実験 投入4回目状況

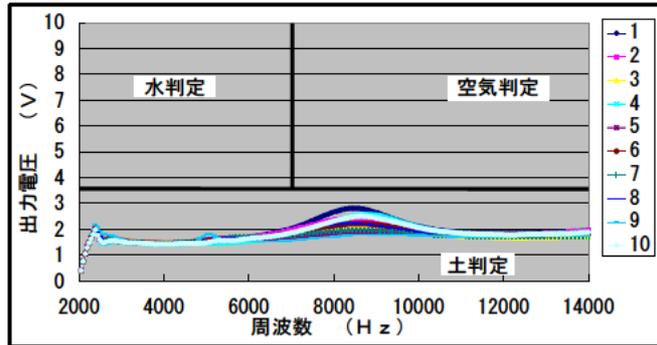


図4.2.43 覆土実験 投入4回目波形データ

③湧き水（流水）反応実験：シート型センサの応答状況を表 4.2.19 に示す。

また、実験状況を写真 4.2.59～写真 4.2.60 に、収録データを図 4.2.44～図 4.2.45 に示す。

結果から、良好な反応が得られた。

表 4.2.19 湧き水（流水）応答状況

	実験前	水没後
1ch	空気	水
2ch	空気	水
3ch	空気	水
4ch	空気	水



写真4.2.59 湧き水実験注水開始状況

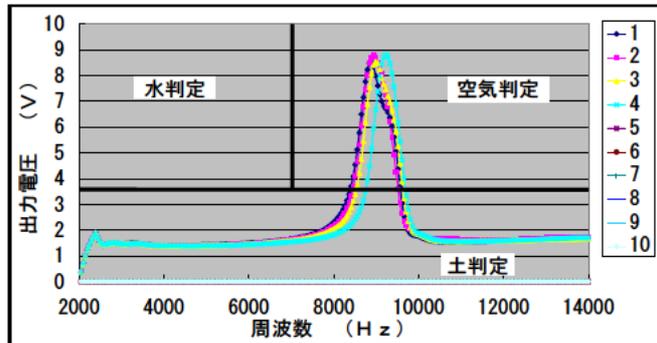


図4.2.44 湧き水実験注水開始 波形データ



写真4.2.60 湧き水実験水没状況

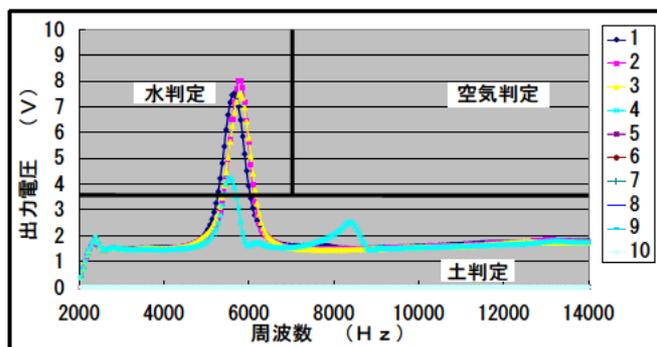


図4.2.45 湧き水実験水没 波形データ

④覆土実験（水分を含んだ土砂）：シート型センサの応答状況を表 4. 2. 20 に示す。

また、実験状況を写真 4. 2. 61～写真 4. 2. 67 に、収録データを図 4. 2. 46～図 4. 2. 52 に示す。

結果から、良好な反応が得られた。

表 4. 2. 20 覆土実験（水分を含んだ土砂）応答状況

	実験前	投入1回目	投入2回目	投入3回目	投入4回目	投入5回目	投入6回目
1ch	空気	空気	土砂	土砂	土砂	土砂	土砂
2ch	空気	空気	土砂	土砂	土砂	土砂	土砂
3ch	空気	土砂	土砂	土砂	土砂	土砂	土砂
4ch	空気	土砂	土砂	土砂	土砂	土砂	土砂
5ch	空気	空気	空気	空気	土砂	土砂	土砂
6ch	空気	空気	空気	空気	空気	土砂	土砂
7ch	空気	空気	空気	空気	空気	土砂	土砂
8ch	空気	空気	空気	空気	空気	土砂	土砂
9ch	空気	空気	空気	空気	空気	空気	土砂
10ch	空気	空気	空気	空気	空気	空気	土砂



写真4. 2. 61 覆土実験前状況

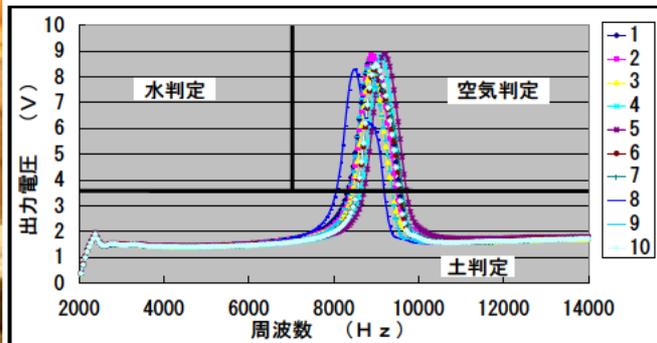


図4. 2. 46 覆土実験前波形データ



写真4. 2. 62 覆土実験 投入1回目状況

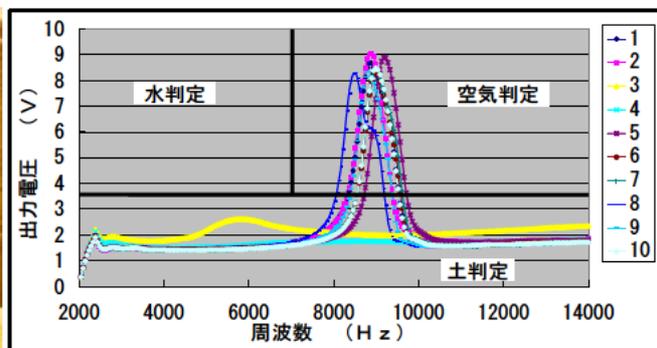


図4. 2. 47 覆土実験 投入1回目波形データ



写真4.2.63 覆土実験 投入2回目状況

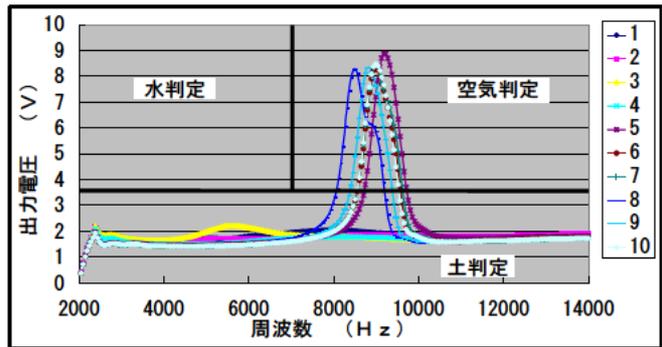


図4.2.48 覆土実験 投入2回目波形データ



写真4.2.64 覆土実験 投入3回目状況

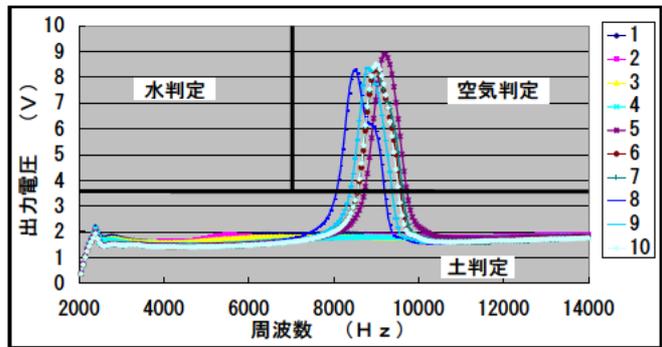


図4.2.49 覆土実験 投入3回目波形データ



写真4.2.65 覆土実験 投入4回目状況

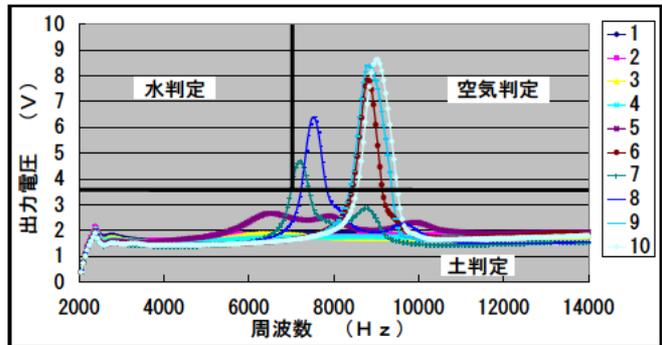


図4.2.50 覆土実験 投入4回目波形データ



写真4.2.66 覆土実験 投入5回目状況

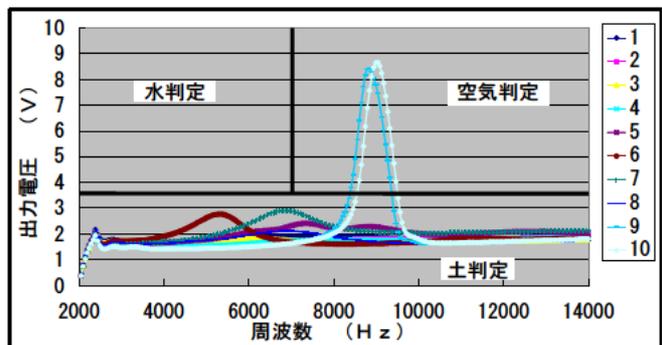


図4.2.51 覆土実験 投入5回目波形データ



写真4.2.67 覆土実験 投入6回目状況

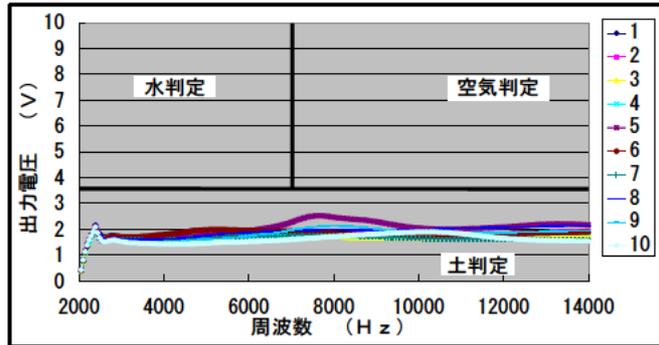


図4.2.52 覆土実験 投入6回目波形データ

実験終了品の振動デバイス感知部の表面状況を表4.2.21に示す。

表面は良好で、特に異常は認められなかった。

表4.2.21 振動デバイス表面状況

1ch		6ch	
2ch		7ch	
3ch		8ch	
4ch		9ch	
5ch		10ch	

以上から、実フィールドを模擬した本実験において、湧き水および土砂の覆土による振動デバイスの反応に問題ないことが分かった。また、センサ設置の施工性に関しては、ケーブルが絡まることが判明した。今後、ケーブルの処理に関し更に対策を進めていく。

4.2.4 厳しい現場条件の地すべりでの活用方法

本装置は、空気、水、土砂の識別が可能である。この特徴を応用して、地すべり進行方向に面的に設置し、地すべり現場の災害把握（位置、範囲）や地すべり土塊の広がりを見守りに活用できると考えられる。図 4.2.53 に設置の概念図を示す。

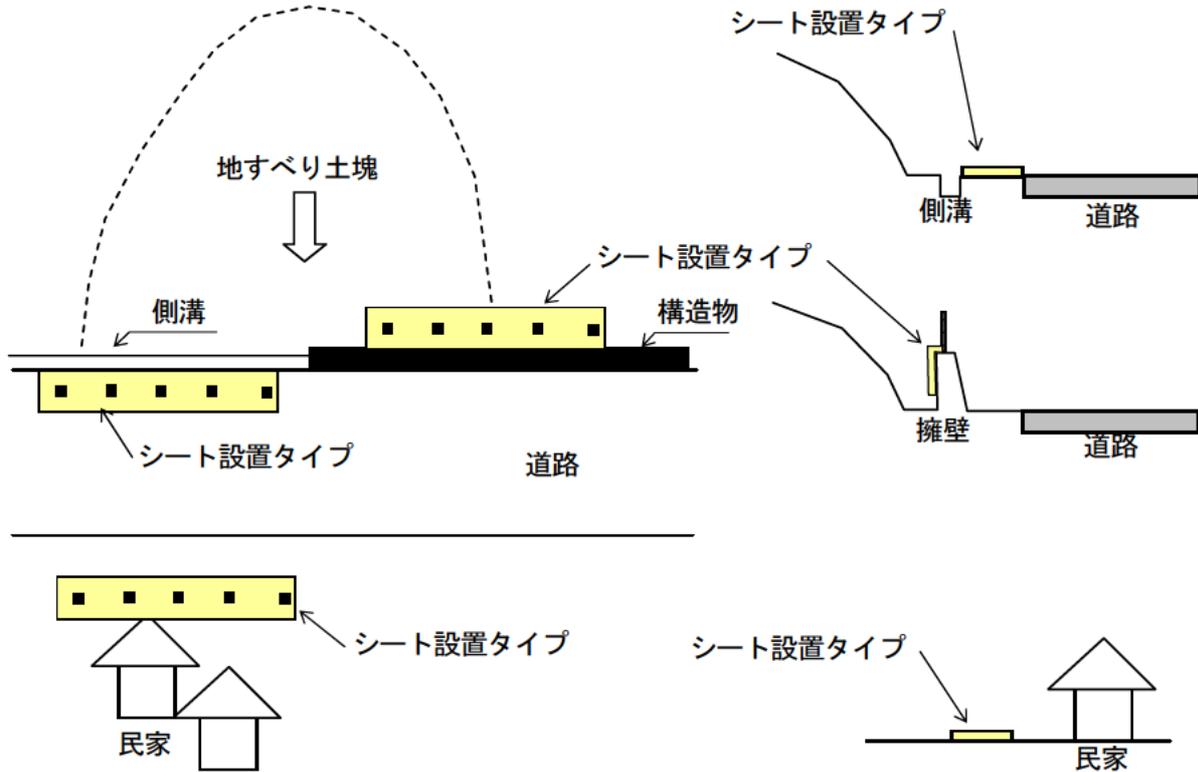


図 4.2.53 振動デバイスセンサ設置概念図

4.2.5 まとめ

(1) 本研究では、基本となる振動デバイスのセンサ仕様、電気回路の仕様等の構成は変えずに、活動している地すべり地に迅速に適用するため、施工方法に関わる振動デバイスの取付け部位の変更により基礎実験を通じ開発を行ってきた。

振動デバイス検知部：覆土応答実験より、覆土厚を増しても粗粒子同士が干渉し、振動デバイスの検知部が小さいため、振動デバイスの検知部に土砂が接触しないことが分かった。このため、受圧板を設けて土砂の検知性能の向上を図る変更を行った。

フィルター仕様の決定：泥水応答実験より、受圧板内部への土砂の進入を防ぐためのフィルター仕様を決定した。また、ヘドロによる誤判定対策として、受圧板の高さを変更した。

耐圧性能の確認：耐圧実験より、人間が踏む程度の荷重は問題ないことが分かった。また、自動車で踏む場合は、受圧板が破損することが分かった。本結果より、自動車が往来する様な現場での使用はできないことが分かった。

センサ設置性：地すべり現場を模擬した覆土応答模型実験より、シート型センサのシート設置性は良好であったが、ケーブルの絡まりが発生することが分かった。また、シート型センサの土砂・水反応は良好であることが分かった。

(2) 今後は、計測数を増やして、活用方法の検討を行い、実用化を図る。

<参考文献>

- 1) 金子 稔、坂井 孝、安田 正雪、末岡 英二：論文 振動を利用したコンクリート充填検知システムに関する基礎実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.24， No.1， 2002

4. 3 音響を応用した移動量計

4. 3. 1 目的

本計測装置は、地すべり地に設置したセンサ（音源）から発した音波（可聴波）を、地すべりの影響を受けない安全な場所に設けたマイクで受信しその到達時間からセンサまでの距離を検出し地すべり移動量を計測するものである。本装置では地盤伸縮計等、主にこれまで地すべり観測に用いられている装置では計測困難な、数 m～数十 m オーダーの大変位の計測を目的とする。

またセンサ設置の手法として、地すべり地内に人が立ち入れないことを想定しラジコンヘリコプターにより上空から投下する方法を提案する。

4. 3. 2 システムの概要

(1) 音響を応用した移動計測システム

音響を応用した移動計のシステム概要を図 4.3.1 に示す。装置は地すべり地に設置された音波を発するセンサと、安全な場所に設けた計測器本体とで構成される。本システムではセンサが無線通信により計測器本体とタイミングを計り音波を発し、その音波を計測器本体側に設けられたマイクで拾いその到達時間から距離計測し地すべりを観測する。

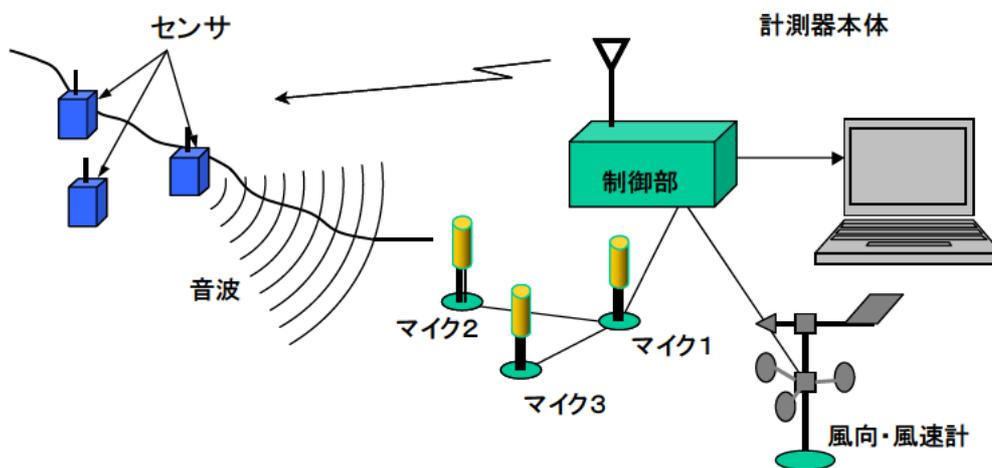


図 4.3.1 音響を応用した移動計のシステム概要

(2) 距離の測定原理

距離の測定原理を以下に示す。

センサとマイクの距離は音波の到達時間 t から演算するが、音波は計測対象エリアに吹く風に流され単純に音速だけでは求まらない。そこでエリアの風向・風速を測定し補正するものとする。

図 4.3.2 に示したように対象エリアに風速 w の風が吹いているとき、マイクに到達する音波が図中 $t \cdot c$ 、 $t \cdot w$ と同等の経路を辿ると仮定する。マイクからセンサに向かう軸に対し α の方向に風が吹いているとすると、センサとマイクの距離 L は次式で求められる。

$$L = \sqrt{(t \cdot c)^2 - (t \cdot w \cdot \sin \alpha)^2} - t \cdot w \cdot \cos \alpha \quad \dots \dots \dots \text{式 (4.3.1)}$$

ここに、
 L : センサとマイクの距離 (m)
 t : 音波の到達時間 (s)
 c : 音速 (m/s)
 w : 風速 (m/s)
 α : センサーマイク間の方向と風向のなす角 ($^{\circ}$)

ここで音速 c は計測対象エリアの気温 T により次式で与えられる。

$$c = 331.5 + 0.61T \quad \dots \dots \dots \text{式 (4.3.2)}$$

音波の到達時間 t は、図 4.3.3 に示したように、計測器本体と制御部とセンサ間で授受されるトリガ信号を基準にマイクで受信した波形から求められる。

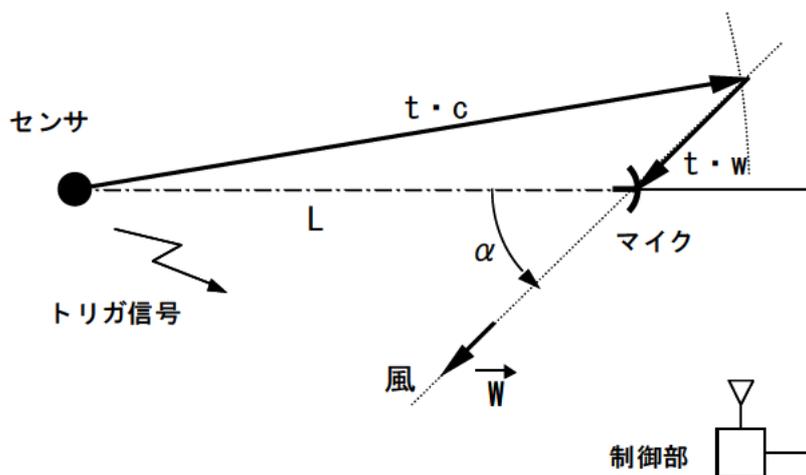


図 4.3.2 距離の測定原理

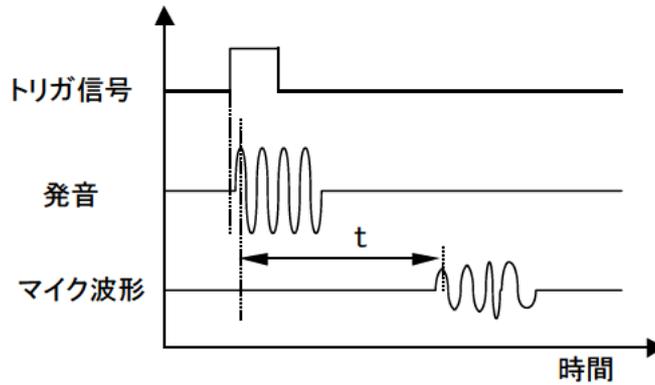


図 4.3.3 音波の到達時間

マイクで受信した音波には木々が風になびく音や鳥や虫の鳴き声、自動車の騒音等周囲の環境音が重なり、そのままでは到達時間の判別が難しい。そこでセンサが発する音波の周波数 f 付近の音のみを検出できるよう特定範囲の周波数の信号だけを通過させ、それ以外の周波数の信号を減衰させる BPF (バンドパスフィルタ) を介し、雑音を取り除いた波形から到達時間 t を求めるものとする。

(2) 位置の測定原理

位置の計測原理を以下に示す。

センサの位置は、図 4.3.4 に示したように 3つのマイクの位置 A、B、C と各マイクとセンサとの距離 L_a 、 L_b 、 L_c から演算できる。距離 L_a 、 L_b 、 L_c は図 4.3.5 に示したように各マイクまでの音波の到達時間 t_a 、 t_b 、 t_c と音速 c により次式より求められる。

$$L_a = c \cdot t_a \quad , \quad L_b = c \cdot t_b \quad , \quad L_c = c \cdot t_c \quad \dots \dots \dots \text{式 (4.3.3)}$$

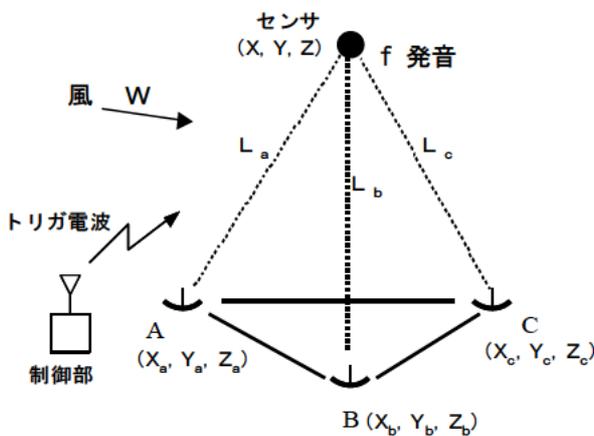


図 4.3.4 位置測定 の原理

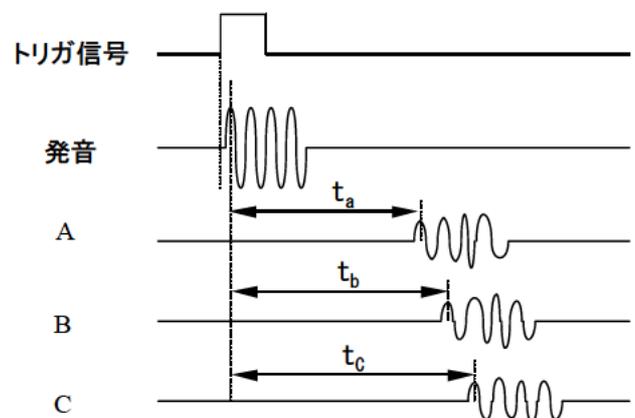


図 4.3.5 音波の到達時間

センサ位置の演算式を以下に示す。

図 4.3.6 に示したように 3 つのマイク A、B、C の座標をそれぞれ (X_a, Y_a, Z_a) (X_b, Y_b, Z_b) (X_c, Y_c, Z_c) と置き、センサ S の座標を (X, Y, Z) と置く。

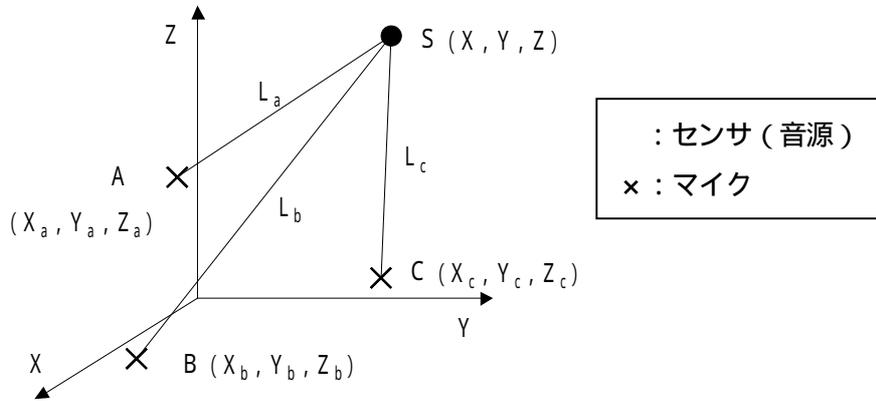


図 4.3.6 センサおよびマイクの座標

センサ S と各マイクとの距離 L は、センサとマイクの座標により以下のように与えられる。

$$(X - X_a)^2 + (Y - Y_a)^2 + (Z - Z_a)^2 = L_a^2 \quad \dots \quad \text{式 (4.3.4)}$$

$$(X - X_b)^2 + (Y - Y_b)^2 + (Z - Z_b)^2 = L_b^2 \quad \dots \quad \text{式 (4.3.5)}$$

$$(X - X_c)^2 + (Y - Y_c)^2 + (Z - Z_c)^2 = L_c^2 \quad \dots \quad \text{式 (4.3.6)}$$

また、 $aX + bY + cZ = d$ に置き換えると a 、 b 、 c 、 d はマイク座標と距離 L により式 (4.3.7) ~ (4.3.9) で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} a_1X + b_1Y + c_1Z &= d_1 \\ a_1 &= X_b - X_a, \quad b_1 = Y_b - Y_a, \quad c_1 = Z_b - Z_a \\ d_1 &= (X_b^2 + Y_b^2 + Z_b^2 - L_b^2 - X_a - Y_a - Z_a + L_a^2) / 2 \end{aligned} \right\} \dots \quad \text{式 (4.3.7)}$$

$$\left. \begin{aligned} a_2X + b_2Y + c_2Z &= d_2 \\ a_2 &= X_c - X_b, \quad b_2 = Y_c - Y_b, \quad c_2 = Z_c - Z_b \\ d_2 &= (X_c^2 + Y_c^2 + Z_c^2 - L_c^2 - X_b - Y_b - Z_b + L_b^2) / 2 \end{aligned} \right\} \dots \quad \text{式 (4.3.8)}$$

$$\left. \begin{aligned} a_3X + b_3Y + c_3Z &= d_3 \\ a_3 &= X_a - X_c, \quad b_3 = Y_a - Y_c, \quad c_3 = Z_a - Z_c \\ d_3 &= (X_a^2 + Y_a^2 + Z_a^2 - L_a^2 - X_c - Y_c - Z_c + L_c^2) / 2 \end{aligned} \right\} \dots \quad \text{式 (4.3.9)}$$

式 (4.3.7) (4.3.8) より X 、 Y は次式で与えられる。

$$X = - \frac{c_1b_2 - c_2b_1}{a_1b_2 - a_2b_1} Z + \frac{d_1b_2 - d_2b_1}{a_1b_2 - a_2b_1} \quad \dots \quad \text{式 (4.3.10)}$$

$$Y = - \frac{a_1 c_2 - a_2 c_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1} Z + \frac{a_1 d_2 - a_2 d_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \dots \dots \dots \text{式(4.3.11)}$$

式(4.3.10) (4.3.11) を式(4.3.4) に代入すると次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} q_1 Z^2 + q_2 Z + q_3 &= 0 \\ q_1 &= (c_1 b_2 - c_2 b_1)^2 + (a_1 c_2 - a_2 c_1)^2 + (a_1 b_2 - a_2 b_1)^2 \\ q_2 &= -2(c_1 b_2 - c_2 b_1) \{ d_1 b_2 - d_2 b_1 - (a_1 b_2 - a_2 b_1) X_a \} \\ &\quad - 2(a_1 c_2 - a_2 c_1) \{ a_1 d_2 - a_2 d_1 - (a_1 b_2 - a_2 b_1) Y_a \} \\ &\quad - 2(a_1 b_2 - a_2 b_1)^2 Z_a \\ q_3 &= \{ d_1 b_2 - d_2 b_1 - (a_1 b_2 - a_2 b_1) X_a \}^2 \\ &\quad + \{ a_1 d_2 - a_2 d_1 - (a_1 b_2 - a_2 b_1) Y_a \}^2 \\ &\quad + (a_1 b_2 - a_2 b_1)^2 Z_a^2 - (a_1 b_2 - a_2 b_1)^2 L_a^2 \end{aligned} \right\} \dots \dots \text{式(4.3.12)}$$

式(4.3.12) を Z について解くと、

$$Z = \frac{-q_2 \pm \sqrt{q_2^2 - 4q_1 q_3}}{2q_1} \dots \dots \dots \text{式(4.3.13)}$$

と与えられる。

式(4.3.10) (4.3.11) に式(4.3.13) を代入し X、Y が求まる。

風向・風速によるセンサ位置演算の補正式を以下に示す。

風 \vec{w} が吹いている場合、センサから発信した音波は、計測した到達時間 t により図 4.3.7 に示すような経路 ($t \cdot c + t \cdot W$) を通ると仮定できる。よってセンサの位置は図 4.3.7 に示した見かけのマイクの位置 (X_M', Y_M', Z_M') からの距離 $t \cdot c$ で求められる。

ここで、見かけのマイクの位置 (X_M', Y_M', Z_M') はマイクの位置 (X_M, Y_M, Z_M) と風のベクトル (X_W, Y_W, Z_W) および測定した到達時間 t より次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} X_M' &= X_M - X_W \cdot t \\ Y_M' &= Y_M - Y_W \cdot t \\ Z_M' &= Z_M - Z_W \cdot t \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots \text{式(4.3.14)}$$

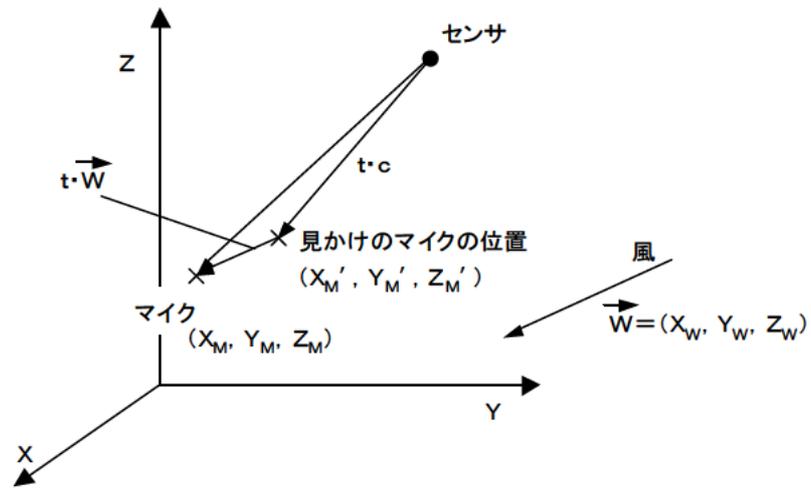


図 4.3.7 風速の補正

(2) センサの設置方法

センサは人が立ち入れない危険な場所への設置を想定し、ラジコンヘリコプターにより上空から投下する方法を考案した (図 4.3.8 参照)。

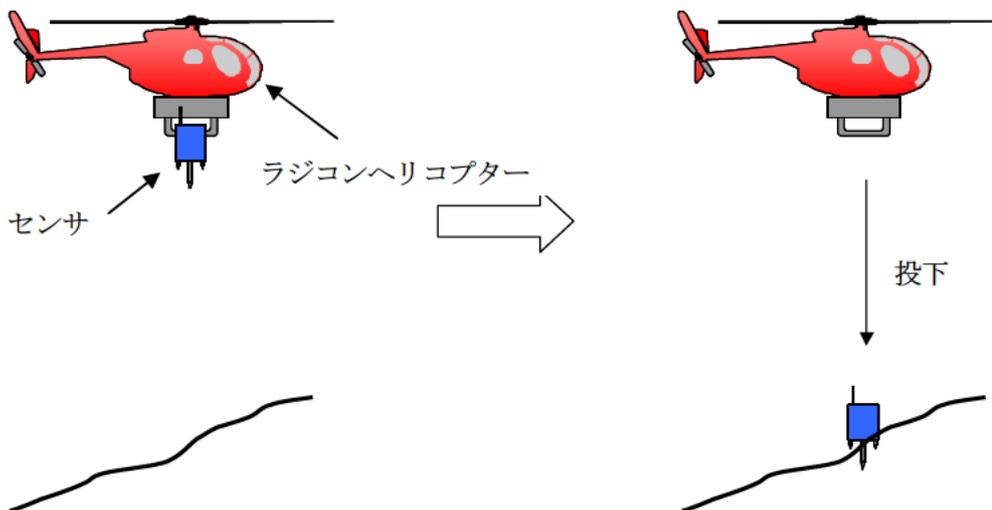


図 4.3.8 センサの設置方法

ラジコンヘリはペイロード (搭載荷重) を満足し、安定した航行が可能なヤマハ発動機 (株) 製 RMAX-G1 を適用するものとする。RMAX-G1 の特徴を表 4.3.1 に示す。

表 4.3.1 ラジコンヘリ RMAX-G1 の特徴および有人ヘリとの比較

	ラジコンヘリコプター	有人ヘリコプター
費用(業者に運行を依頼した場合)	30~40万円(1日当たり)	約50万円(1時間当たり) *民間業者を利用した場合
運用人員	2名~ ・オペレータ:1名 ・ナビゲータ:2名~	
機体の価格	ヤマハ製 RMAX-G1 ・農業用:1,000万円~ ・自律航行型:1,500万円~	
搭載荷重	約30kg(投下装置含む)	
センサの投下に関して	規制無し	航空法により規制あり
備考	・運用温度:-10~35 ・耐風速:10m/s (15m/s程度まで実績有り) ・耐雨:5mm/h程度 ・運用範囲:目視内約200m	

センサの設置にラジコンヘリを適用する場合の留意点を以下に示す。

センサを投下する際、センサへの衝撃を極力抑えるため適度な高さまでラジコンヘリの高度を下げ、地表に近付ける必要がある。オペレータからセンサの設置地点が遠く離れている場合、オペレータの位置から直接斜面とラジコンの距離感をつかむことが困難で地表近づくことは出来ない。このような場合、設置場所の状況が確認できる位置にオペレータを配置する必要がある。

センサを投下・設置できる場所は、ラジコンヘリが近付くことが可能な樹木等の障害物のない場所に限られる。

センサに設けたい部で地表に突き刺し固定するため、石や木の根等硬い物質の占める割合が高い場合、センサの設置が出来ない場合がある。この場合、極力石や木の根等の少ない場所を狙って投下する必要がある。

4.3.3 基本仕様の検討結果

(1) 基本仕様の検討

表 4.3.2 に本計測システムの基本仕様を示す。

表 4.3.2 基本仕様

	仕様
システム	<ul style="list-style-type: none"> ・測定距離（センサとマイクの距離） ：最大 200m程度 ・測定インターバル：センサ 1 個当たり 15 秒以上 ・1 度に計測できるセンサ数 N ： N = 10 個（最大数 = 上限無し） ・測定精度：±30cm（開発目標）
センサ	<ul style="list-style-type: none"> ・計測インターバルと寿命：5 分間隔 / 1 ヶ月 ・サイズ：100mm × 100mm × 190mm ・重量：2.5kg
-1.音源	<ul style="list-style-type: none"> ・音圧：125 d B ・音を出している時間：7.1mSec（1 回当たり） ・消費電流：2.3A
-2.無線通信器 （送信）	<ul style="list-style-type: none"> ・方式：特定小電力無線 ・通信距離：200 ~ 300m程度 ・消費電流：40mA（送信時）
-3.制御回路	<ul style="list-style-type: none"> ・消費電流：60mA
-4.バッテリー	<ul style="list-style-type: none"> ・方式：リチウム電池 ・容量：3,000mAh
.計測器本体	<ul style="list-style-type: none"> ・電源：AC100V
-1.無線通信器 （受信）	1-2 に同じ
-2 マイク	<ul style="list-style-type: none"> ・1/2 インチ音場型コンデンサマイクロフォン ・リオン（株）製 騒音計 NL-21
-3 フィルタ	1/3oct BPF（バンドパスフィルター）

システムの仕様

- 測定距離（センサとマイクの距離）

音波を発するために用いる音源は、地すべり土塊内に設置するセンサの大きさや駆動するためのバッテリーにより制限される。市販されているスピーカーやブザーの適用を考慮すると、センサに実装でき駆動できる音源の音圧は 100 から 125dB 程度のレベルが現実的である。音圧の距離減衰を考慮すると 100～125dB の音源での測定距離は 200m 程度が限界である。

但し、音波の受信による距離の計測は、木々が風になびく音や自動車の走行音、鳥や虫の鳴き声等周囲の雑音に影響を受け、センサからの音波を識別出来ない場合がある。またセンサ～マイク間の障害物や雨風等の影響を受け、十分な音圧がマイクに届かない場合がある。このように正しい距離が計測できなかった場合、自動的に計測をやり直す方法を取ることでデータ数を確保することができる。

ここで、100dB の音圧レベルは電車の通るガード下程度、120dB はジェット機のエンジン音程度と非常に大きなレベルであるが、1 回の計測で音を鳴らす時間は数 10mSec 程度と短く体感する音のレベルは上述した程大きくは感じない。

- 測定のインターバル

バッテリー駆動であるセンサは、消費電力を抑えるため通常スリープ状態にあり定期的に起動し計測を開始する。計測インターバルはセンサと本体の計測タイミングを取るため 1 回の計測に約 15 秒要し、1 度に計測するセンサの数が増える程インターバルは長くなる。

緊急性の高い現場や精度を高めるため時間当たりの測定回数を増やしたい場合、計測インターバルを短くする必要があるが、その場合センサのバッテリーの消費が増し計測期間が短くなる。

- 1 度に計測できるセンサ数

システムの仕組みとしてはセンサの数に上限は無いが、上述した通りセンサの数を増やす程 1 個当たりのセンサの計測インターバルが長くなる。

今回はまず第一段階の取り組みとして 1 度に計測できるセンサ数を 10 個として計測ソフトを開発した。

- 測定精度

精度に関わる要因としては音波の受信レベルによる到達時間の判定誤認、雑音の影響による時間の判低誤差、温度計測に基づく音速の誤差、計測エリアに吹く風の影響等が考えられる。特に周囲の雑音や風の影響等ランダムに受ける影響に関して

はデータ数を増やし平均を取ることで精度を高めることができる。今回、雑音に関しては前回までのデータを基準に計測したデータが正しいか否か（前回までのデータと近い値か、移動した可能性があるか？）を判定し省く手法を取り精度向上を計る。また、過去数回のデータの平均を取り精度を高めるものとする。

(2) 精度検証実験

①実験目的

計測環境下での雑音、気温や風雨等の気象の変化等による計測精度への影響を調べるため長期の連続実験を実施し計測精度を検証する。

②実験場所と実験期間

- a) 実験場所：土木研究所（砂防流路工実験施設前の通路沿い約 200mの区間、図 4.3.9 参照）

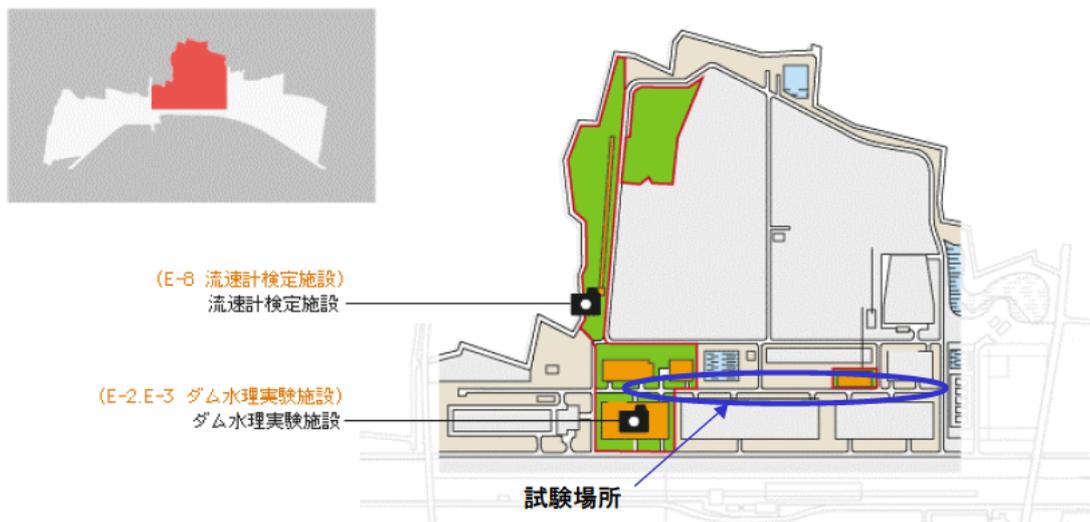


図 4.3.9 実験場所

- b) 実験期間：2009年1月16日～2009年2月6日

③実験概要

a) 実験装置

装置の概要を図 4.3.10 に、実験に使用した装置を写真 4.3.1、写真 4.3.2 に示す。装置は計測器本体および音を発生するセンサからなり、計測器本体は制御部、ノートPC、マイク（3本）、温度計、風向・風速計で構成されている。

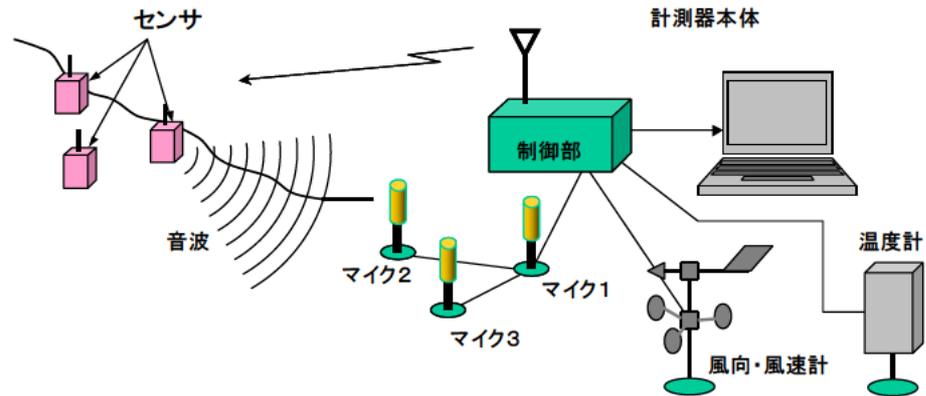


図 4.3.10 実験装置の概要

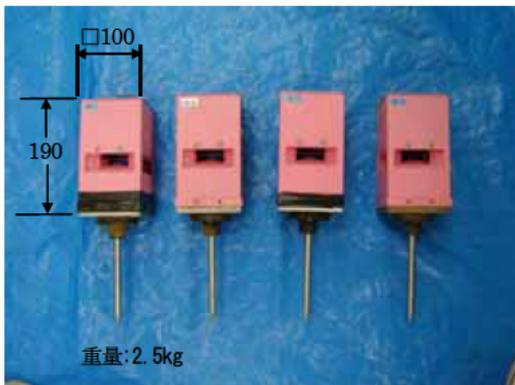


写真 4.3.1 実験に使用したセンサ（音源）



写真 4.3.2 実験に使用した計測器本体

b) 実験方法

測定距離と精度の関係を調べるためセンサを計測器本体から 50m、100m、150m、200m の4ヶ所に設置し（図 4.3.11 参照）、固定した状態で計測インターバルを5分とし連続計測した。

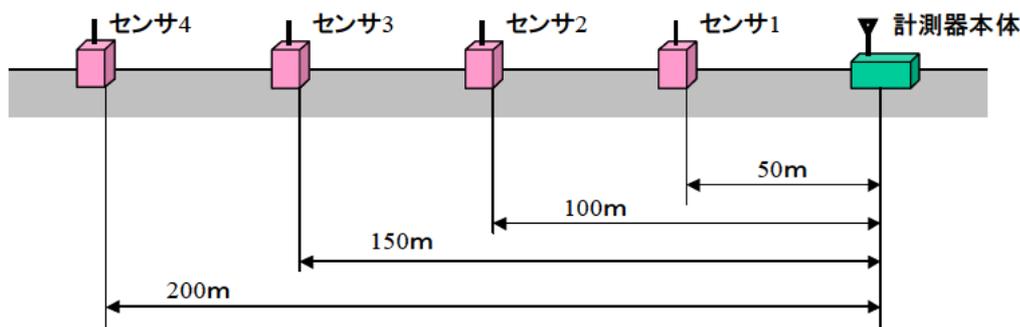


図 4.3.11 実験装置の概要

c) 計測データのエラー判定および計測インターバル

音波の計測波形例を図 4.3.12、図 4.3.13 に示す。図 4.3.12 は雑音が無く音波の到達時間を正しく判定できる場合であり、図 4.3.13 はセンサからの音波以外の雑音を拾い音波の到達時間を正しく判定できていない場合である。図 4.3.13 のように突発的に発生する周囲の雑音を拾い不適切な到達時間を検出した場合は、計測データから除外しなければならない。そこで、下記のとおり不適切なデータを判定し除去する方法を考案した。

(ア) エラー判定方法

後述するエラー判定 1 が”適正值”の場合、正しいデータが計測できていると判定する。但し、エラー判定 1 が”異常値”でもエラー判定 2 が”適正值”の場合はセンサ（地すべり土塊）が移動した可能性があるものとして正しいデータと判定する。

【エラー判定 1】

計測したデータが基準値に対しある範囲内（例えば±10%以内）のものを”適正值”とし、それ以外を”異常値”とする。基準値とは前回までの、過去 10 回における適正值データの平均値とする。

【エラー判定 2】

計測したデータが直前に計測したデータに対し±10%以内のものを”適正值”とし、それ以外を”異常値”とする。

(イ) 計測インターバル

計測インターバルは通常 5 分とし、上述したエラー判定で正しいデータが計測できなかったと判断された場合、また移動した可能性があるとして判断された場合は繰返し即座（約 15 秒後）に計測するものとする。但し、3 回連続して計測エラーが発生した場合は、計測が困難な状況（連続的に騒音が発生しているような状況）と判断し、次のインターバル（5 分後）に計測するものとした。

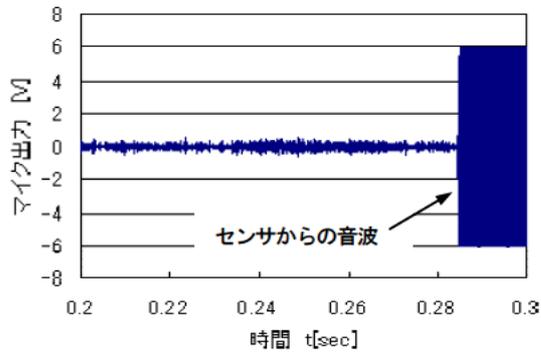


図 4.3.12 波形データ例 1 (適正值)

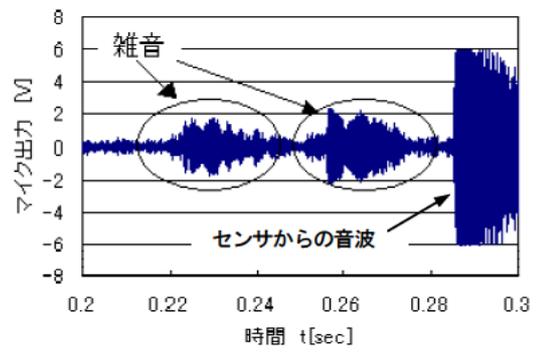


図 4.3.13 波形データ例 2 (異常値)

実験状況

実験状況を写真 4.3.3～4.3.10 に示す。砂防流路工実験施設前に計測器本体を設置し、実験施設前の歩道に 50m 間隔でセンサを設置し実験した。

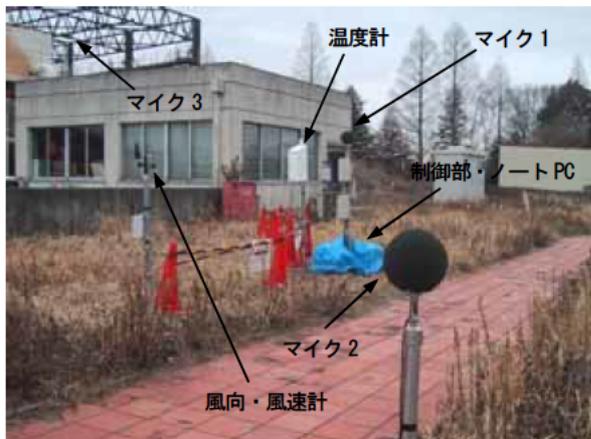


写真 4.3.3 計測器本体側



写真 4.3.4 マイク 1 および温度計



写真 4.3.5 マイク 2



写真 4.3.6 マイク 3



写真 4.3.7 センサ 1 (50m)

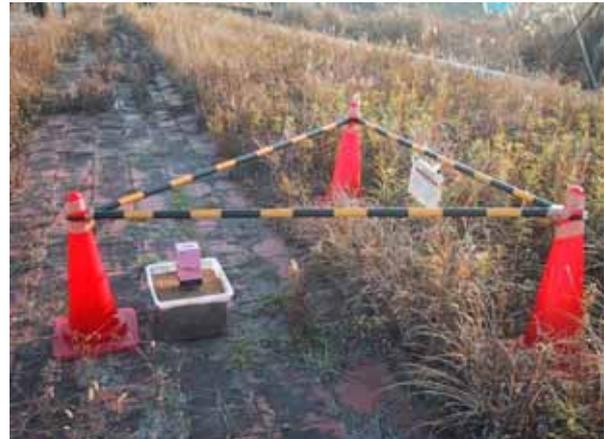


写真 4.3.8 センサ 2 (100m)



写真 4.3.9 センサ 3 (150m)



写真 4.3.10 センサ 4 (200m)

d) 実験結果

(ア) 音波の計測波形例と到達時間の判定しきい値

測定波形例を図 4.3.14～図 4.3.17 に示す。距離が伸びるに従いマイクで受信できるセンサからの音波のレベルは小さくなり、200m の距離で 4V 程度のマイク出力が確認できた。

しかしながら図 4.3.14～図 4.3.17 に示したデータは比較的良好に受信できた場合のものである。実際には 150m (センサ 3)、200m (センサ 4) の受信データは風の影響により歩道沿いの街路樹やセンサ周辺の雑草に音波が遮られ 1V 未満と到達時間の判定が困難な場合も多く見られた。

到達時間を判定するマイク出力のしきい値は、周囲の雑音を考慮すると高い方が好ましいが距離が長くなると受信レベルが下がるためしきい値を下げざるを得ない。波形データおよび周囲の雑音レベルとその頻度を考慮し各センサのしきい値を表 4.3.3 の通り設定した。

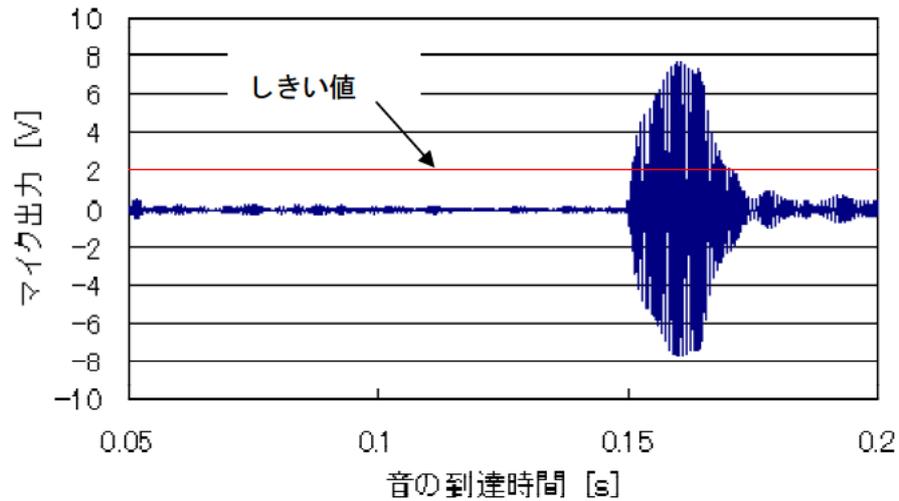


図 4.3.14 音波の受信例 センサ1 (50m)、マイク1

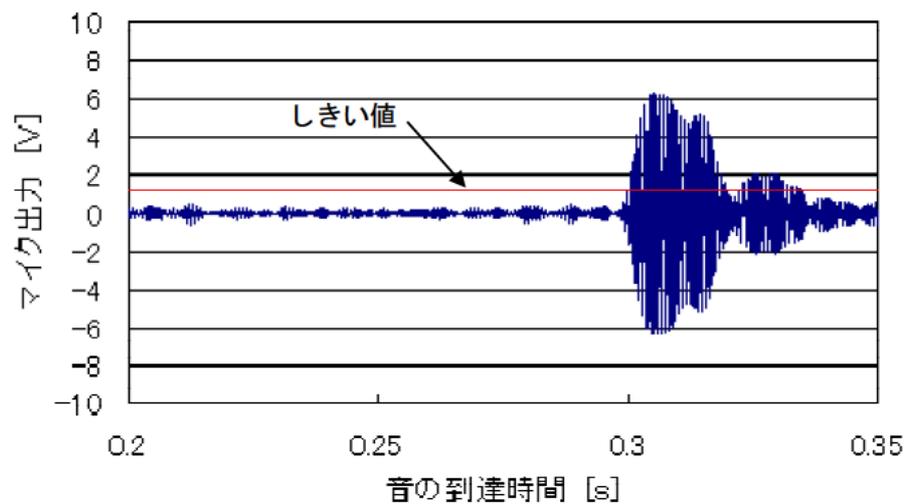


図 4.3.15 音波の受信例 センサ2 (100m)、マイク1

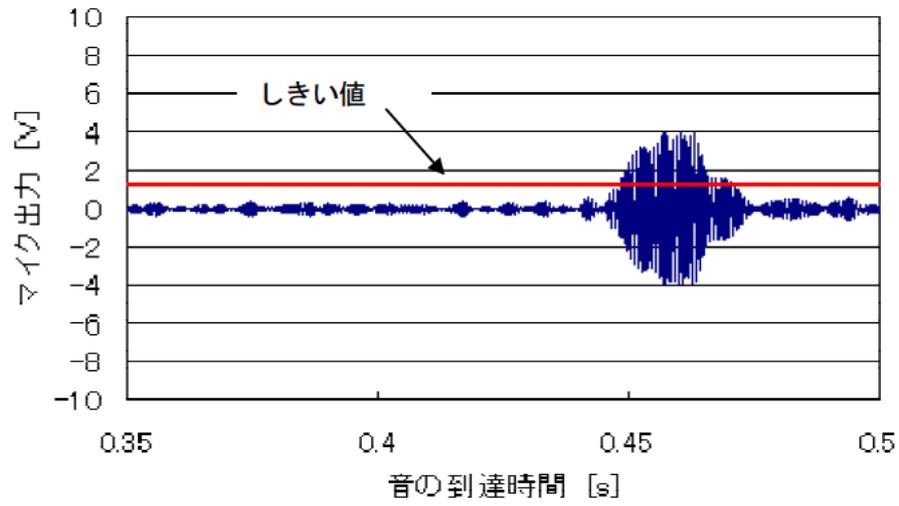


図 4.3.16 音波の受信例 センサ 3 (150m)、マイク 1

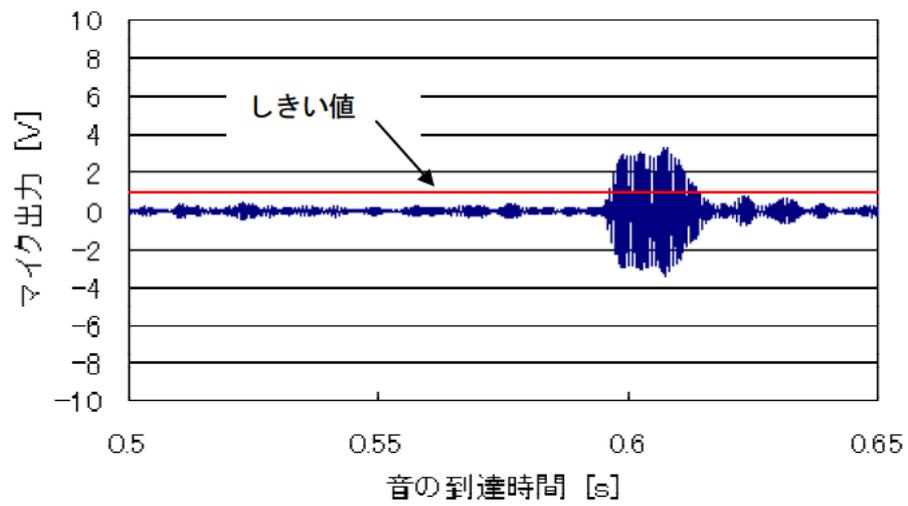


図 4.3.17 音波の受信例 センサ 4 (200m)、マイク 1

表 4.3.3 到達時間の判定しきい値

	しきい値
センサ 1 (50m)	2.00V
センサ 2 (100m)	1.25V
センサ 3 (150m)	1.25V
センサ 4 (200m)	1.00V

(イ) データの取得率

測定距離ごとに、全ての計測データと風速を時系列に図 4.3.18～図 4.3.21 に示す。距離が長くなる程音波の検出レベルが低くなるため異常値が増えている様子が見えてくる。異常値の発生している傾向を見てみると、自動車の走行音等の雑音が多いと思われるに日中に多く見られ、またセンサ 3、センサ 4 と遠い位置にあるセンサについては風の強い時間帯に多く発生している傾向が見られた。

データの取得率を表 4.3.4～表 4.3.7 に示す。各表は計測エラー判定の判定基準をそれぞれ $\pm 10\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 1\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 0.3\%$ とした場合のものである。ここで $\pm 5\%$ 、 $\pm 1\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 0.3\%$ のデータは、 $\pm 10\%$ で計測したデータから算出した。

測定距離が長い程計測する音圧レベルが小さくなり周囲の騒音レベルと近くなる。また、到達までの時間がかかるため騒音の発生する確率が高くなり、データ取得率が低下している。

計測エラーの判定基準を $\pm 10\%$ から $\pm 0.3\%$ に厳しくした場合、 $\pm 10\%$ のデータ取得率に対し $\pm 0.3\%$ のデータ取得率の割合は 34～76%となっている。

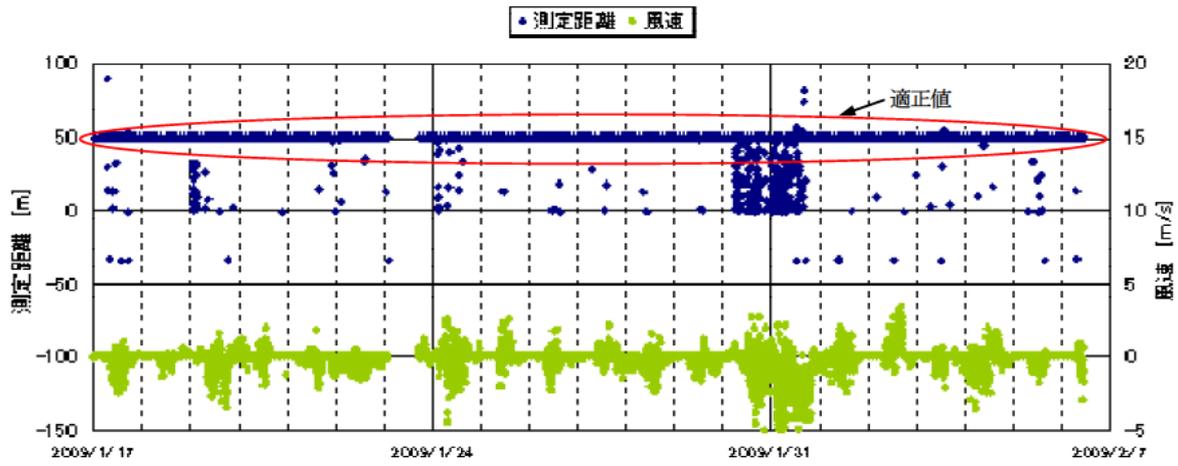


図 4.3.18 距離の計測データ センサ1 (50m)、マイク1

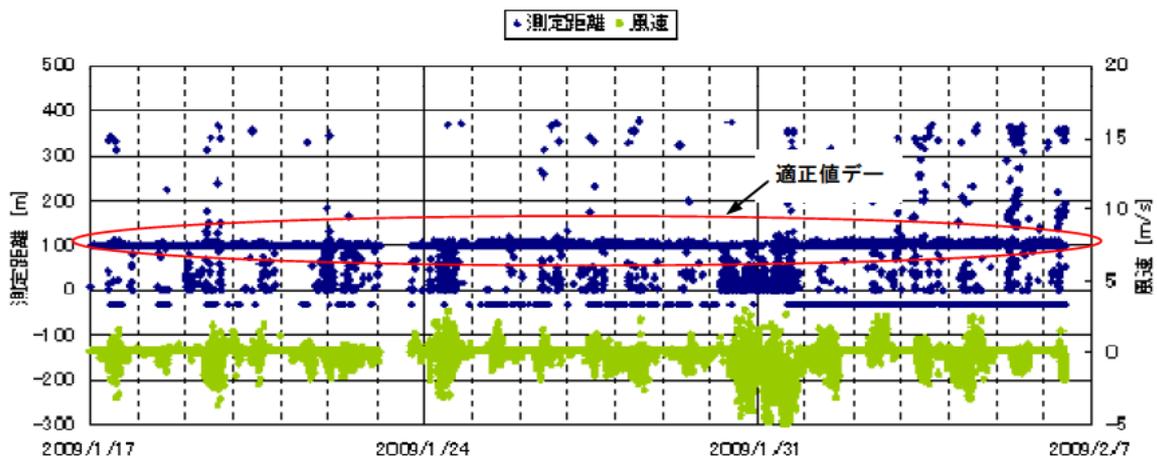


図 4.3.19 距離の計測データ センサ2 (100m)、マイク1

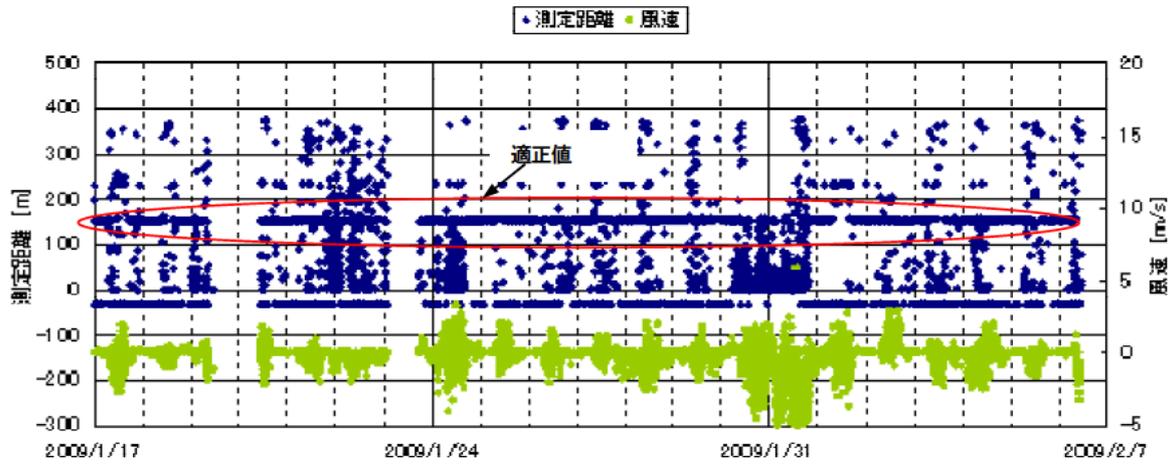


図 4.3.20 距離の計測データ センサ3 (150m)、マイク1

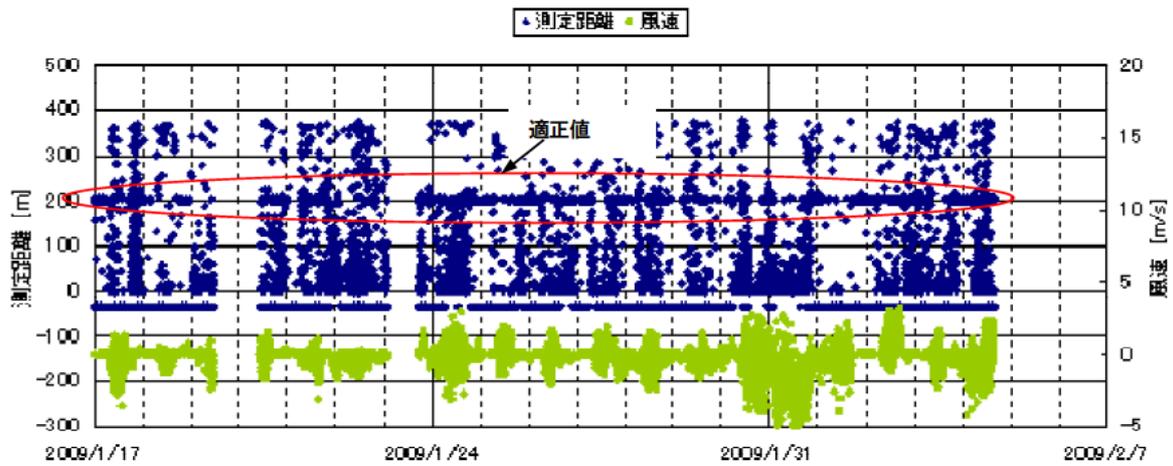


図 4.3.21 距離の計測データ センサ4 (200m)、マイク1

表 4.3.4 データの取得率 - センサ 1 (50m)

エラー判定	計測回数	適正値の回数	データ取得率
±10%	6,184	5,629	91.0%
±5%	6,184	5,617	90.8%
±1%	6,184	5,555	89.8%
±0.5%	6,184	5,617	90.8%
±0.3%	4,311	2,977	69.1%

計測期間：2009年1月17日～2009年2月26日

表 4.3.5 データの取得率 - センサ 2 (100m)

エラー判定	計測回数	適正値の回数	データ取得率
±10%	8,986	4,707	52.4%
±5%	8,986	4,355	48.5%
±1%	8,986	3,847	42.8%
±0.5%	8,986	4,355	48.5%
±0.3%	8,986	2,207	24.6%

計測期間：2009年1月16日～2009年2月6日

表 4.3.6 データの取得率 - センサ 3 (150m)

エラー判定	計測回数	適正値の回数	データ取得率
±10%	10,826	3,692	34.1%
±5%	10,826	3,658	33.8%
±1%	10,826	2,401	22.2%
±0.5%	10,826	1,738	16.1%
±0.3%	10,826	1,284	11.5%

計測期間：2009年1月16日～2009年2月6日

表 4.3.7 データの取得率 - センサ 4 (200m)

エラー判定	計測回数	適正値の回数	データ取得率
±10%	16,289	3,109	19.1%
±5%	16,289	3,018	18.5%
±1%	16,289	2,589	15.9%
±0.5%	16,289	2,148	13.2%
±0.3%	16,289	1,702	10.4%

計測期間：2009年1月16日～2009年2月6日

(ウ) 距離の測定精度

マイク 1 からの距離の測定データを図 4.3.22～図 4.3.25 に示す。図中 (L) は計測生データを、(L 風補正) は風速補正した距離を示しており、それぞれ適正値の過去 10 回平均値を取っている。平均値は過去 14 回分の適正値のなかから大小 2 個ずつを除いた 10 個の平均値とした。

【気温と測定距離】

距離の測定データは気温の変動に連動した傾向を示した。図には音速の補正に用いる気温の測定値と、参考のため気象庁発表のつくば(館野)の気温データを示している。測定距離は特に、晴れた日の日中の気温測定値と気象庁データとの乖離が大きいときに大きな変動が見られる。これは温度計を設置している百葉箱内の温度が直射日光により上昇し、外気温との間に温度差が生じ正しい音速を求められていないためであると考えられる。参考のため曇りの日と晴れた日の 1 日の測定データを図 4.3.26、4.3.27 に示す。曇りの日に比べ晴れた日の気温測定値の乖離は大きく、測定距離の日変動も大きくなる傾向が見られた。

測定期間中、気象量データからの測定値の乖離は最大で 2.5 程度であった。2.5 の気温の測定差により、約 0.45%の距離の測定誤差を生ずる。気温の測定誤差に基づく測定精度の改善のため、温度計を通気性の良い日陰に設置する温度計に直射日光が当たらないよう日よけを設ける等設置には十分注意を払う必要がある。

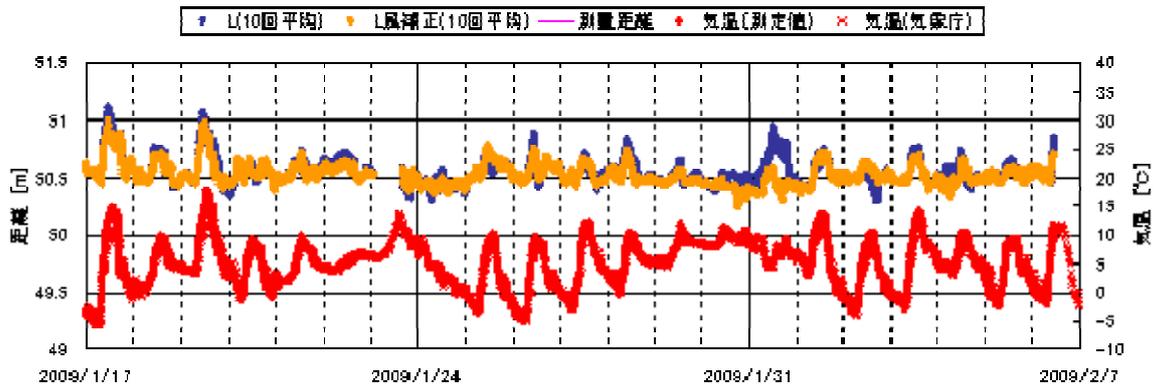


図 4.3.22 異常値を除いた距離の計測データ センサ 1 (50m) マイク 1

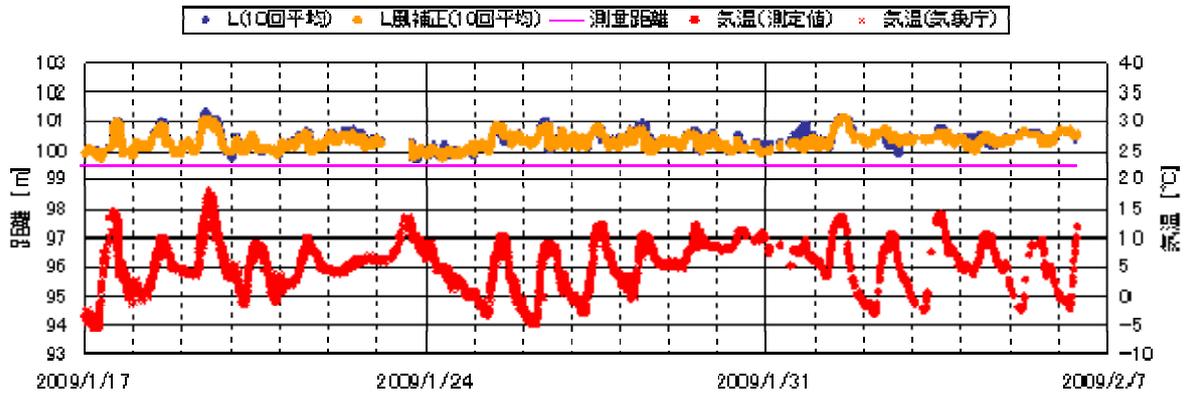


図 4.3.23 異常値を除いた距離の計測データ センサ 2 (100m) マイク 1

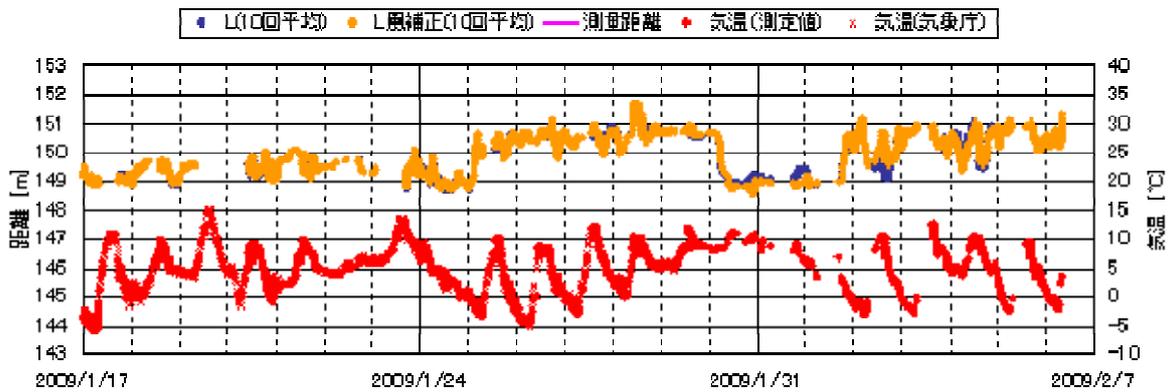


図 4.3.24 異常値を除いた距離の計測データ センサ 3 (150m) マイク 1

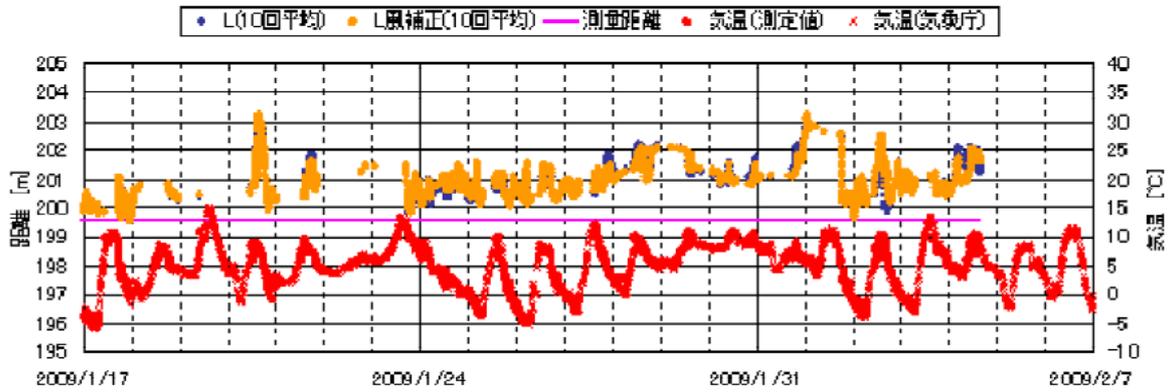


図 4.3.25 異常値を除いた距離の計測データ センサ4 (200m)、マイク1

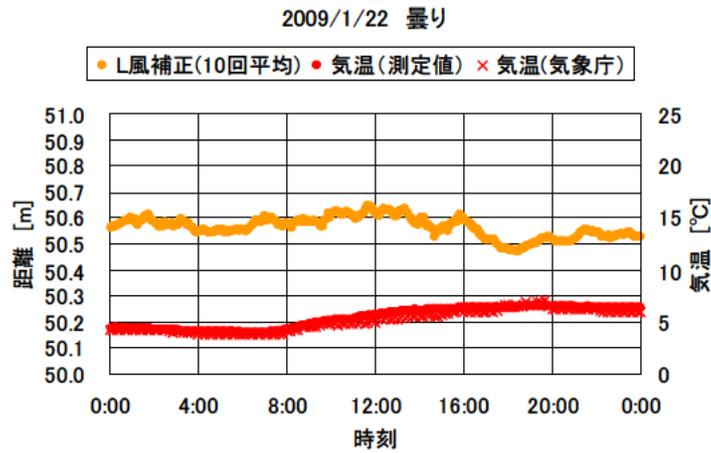


図 4.3.26 一日の気温と測定距離 (曇り)

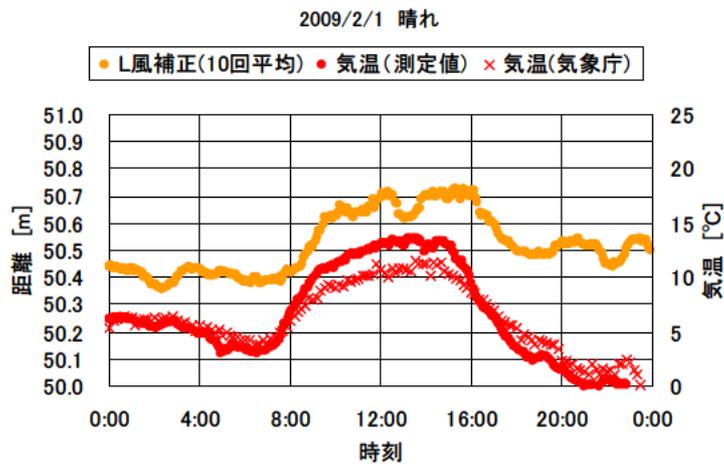


図 4.3.27 一日の気温と測定距離 (晴れ)

直射日光による百葉箱内部の温度上昇を改善するため、1月23日からファンにより百葉箱内に外気を強制的に循環させて実験した。測定温度の乖離は、ファン取り付け前の最大5程度からファン取り付け後2.5程度に半減された。

【測定距離とエラー - 判定基準】

測定精度とエラー判定基準の関係を表4.3.8～表4.3.11に示す。今回、精度の評価としては温度計測が改善された1月23日以降のデータを対象としている。

測定距離50m(センサ1)の場合、受信する音波のレベルが十分大きく到達時間を識別するしきい値を大きくとれるため、エラー判定基準によらずデータの取得率が高く、また測定精度も $\pm 0.55\%$ ($\pm 0.28\text{m}$)と安定している。測定距離が伸びるほどデータ取得率はエラー判定基準に影響を受け低下するが、エラー判定基準を厳しくする程測定精度は高くなる。使用する現場で要求される精度や測定頻度に合わせ、適切なエラー判定基準を適用する必要がある。

表 4.3.8 センサ 1 (50m) 距離の測定精度

エラー判定 基準	データ 取得率	距離の測定値			
		平均値	最小値	最大値	測定精度
± 10%	88.3%	50.506m	50.201m	50.782m	-0.305 ~ 0.276m (-0.60 ~ 0.55%)
± 5%	88.1%	50.506m	50.201m	50.782m	-0.305 ~ 0.276m (-0.60 ~ 0.55%)
± 1%	87.3%	50.504m	50.246m	50.782m	-0.258 ~ 0.278m (-0.51 ~ 0.55%)
± 0.5	84.4%	50.502m	50.246m	50.779m	-0.256 ~ 0.277m (-0.51 ~ 0.55%)
± 0.3	69.1%	50.502m	50.222m	50.767m	-0.281 ~ 0.265m (-0.56 ~ 0.52%)

計測期間：2009年1月23日～2009年2月6日

表 4.3.9 センサ 2 (100m) 距離の測定精度

エラー判定 基準	データ 取得率	距離の測定値			
		平均値	最小値	最大値	測定精度
± 10%	44.2%	101.064m	99.732m	108.137m	-1.333 ~ 7.073m (-1.32 ~ 7.00%)
± 5%	39.4%	100.474m	99.732m	102.734m	-0.742 ~ 2.260m (-0.74 ~ 2.25%)
± 1%	33.7%	100.265m	99.716m	101.154m	-0.549 ~ 0.890m (-0.55 ~ 0.89%)
± 0.5	29.1%	100.216m	99.677m	100.775m	-0.540 ~ 0.558m (-0.54 ~ 0.64%)
± 0.3	22.8%	100.168m	99.704m	100.564m	-0.464 ~ 0.396m (-0.46 ~ 0.56%)

計測期間：2009年1月23日～2009年2月6日

表 4.3.10 センサ 3 (150m) 距離の測定精度

エラー判定 基準	データ 取得率	距離の測定値			
		平均値	最小値	最大値	測定精度
±10%	38.1%	151.325m	148.678m	155.290m	-2.647 ~ 3.965m (-1.75 ~ 2.62%)
±5%	37.8%	151.327m	148.678m	154.813m	-2.649 ~ 3.486m (-1.75 ~ 2.30%)
±1%	22.7%	150.112m	148.525m	151.660m	-1.587 ~ 1.548m (-1.06 ~ 1.03%)
±0.5	14.5%	149.861m	148.525m	150.995m	-1.336 ~ 1.133m (-0.89 ~ 0.76%)
±0.3	4.8%	148.947m	148.496m	149.352m	-0.452 ~ 0.405m (-0.30 ~ 0.27%)

計測期間：2009年1月23日～2009年2月6日

表 4.3.11 センサ 4 (200m) 距離の測定精度

エラー判定 基準	データ 取得率	距離の測定値			
		平均値	最小値	最大値	測定精度
±10%	18.1%	201.230m	198.805m	206.581m	-2.425 ~ 5.351m (-1.20 ~ 2.66%)
±5%	17.5%	201.185m	199.704m	203.759m	-1.481 ~ 2.573m (-0.74 ~ 1.28%)
±1%	14.8%	200.878m	199.704m	203.201m	-1.173 ~ 2.324m (-0.58 ~ 1.16%)
±0.5	12.0%	200.627m	199.704m	202.209m	-0.922 ~ 1.582m (-0.46 ~ 0.79%)
±0.3	8.8%	200.467m	199.746m	201.342m	-0.721 ~ 0.875m (-0.36 ~ 0.44%)

計測期間：2009年1月23日～2009年2月6日

(エ) 位置の測定精度

センサ 1 (50m) の位置 (X-Y 座標、X-Z 座標) の測定結果を図 4.3.28 に示す。ここで位置の座標系はマイク 1 を原点にマイク 1 から歩道沿いにセンサに向う方向を X 座標と置き、X 軸に対し水平面内の垂直方向を Y 軸、鉛直方向を Z 軸と置いている。座標系を写真 4.3.11 に示す。

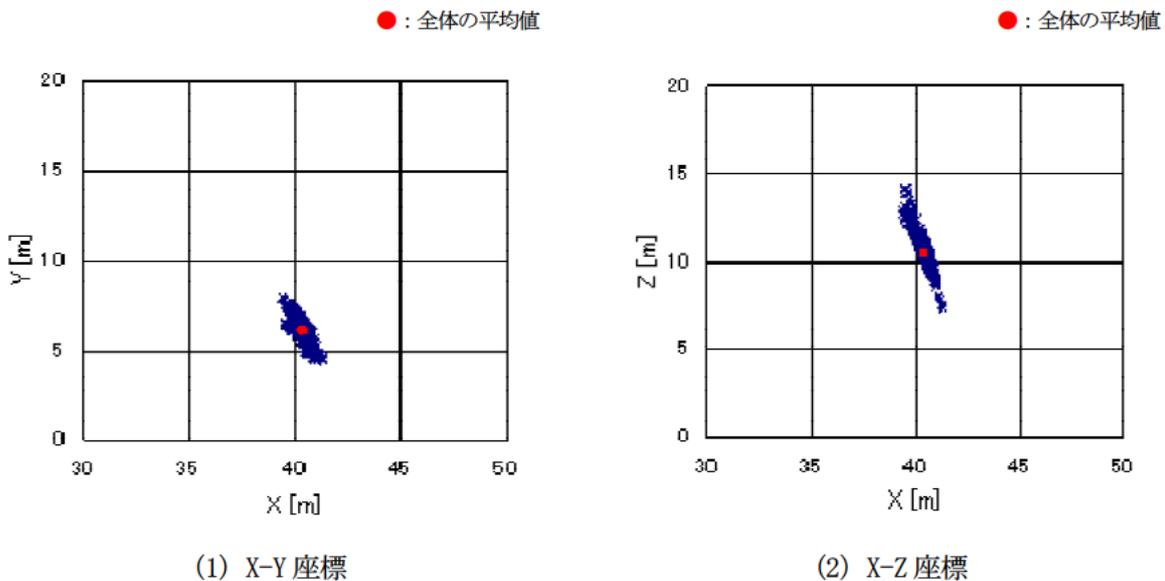


図 4.3.28 3本のマイクから求めたセンサの位置 センサ 1 (50m)



写真 4.3.11 座標の定義

図 4.3.29 に位置計測の測定誤差を、距離計測と位置計測の精度の比較を表 4.3.12 に示す (それぞれエラー判定基準は $\pm 3\%$)。測定誤差は測定した全データの平均値からの差を取ったもので、過去 10 回平均データで 3.58m (7.2%) と距離計測に比べ大きく精度の悪い結果となった。

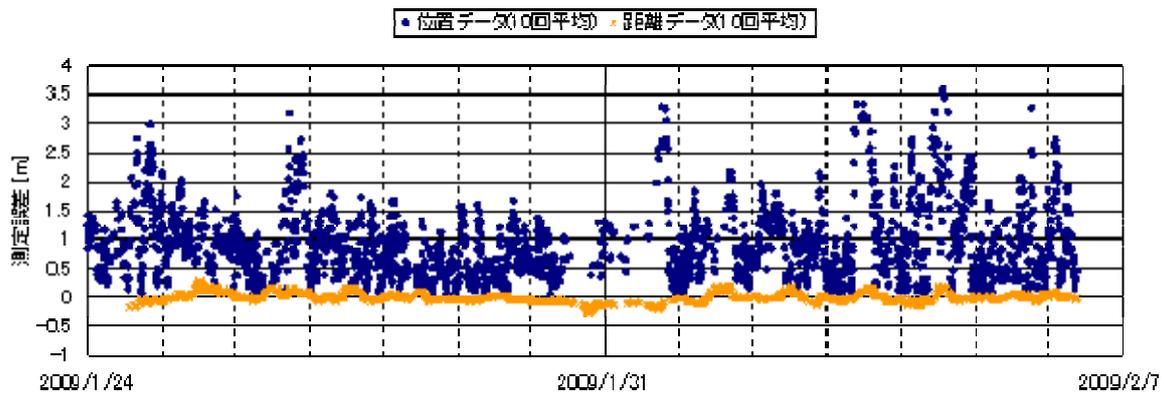


図 4.3.29 位置の測定精度 センサ 1 (50m)

表 4.3.12 距離と位置の測定精度の比較 (センサ 1 (50m))

測定方法	測定精度
距離計測 (マイク 1 本)	$\pm 0.28\text{m}$ ($\pm 0.56\%$)
位置計測 (マイク 3 本)	$\pm 3.58\text{m}$ ($\pm 7.2\%$)

(3) ラジコンヘリによるセンサの投下設置実験

基礎実験

a) 実験目的

- ・ 地盤条件の異なる地点にセンサを投下した場合、センサの設置状況を確認する
- ・ ラジコンヘリコプターが揺れた場合、センサの設置状況を確認する

b) 実験装置および実験方法

センサを自由落下させたとき、センサを切り離した姿勢のまま落下するため地面に固定する杭が鉛直に向いていない場合地面にしっかり固定できない場合が考えられる。そこで図 4.3.30 に示すようにセンサが鉛直向きに落下するようにセンサにひもを設けひもに抵抗をつけながら落下させることで鉛直向きに落下させ、安定して固定できる方法をとるものとする。ひもに落下抵抗を与える機構を設けた投下装置を写真 4.3.12 に示す。

また急な斜面にセンサを投下した場合、センサの重心が高いと転がり落ちる可能性

が考えられる。そこでセンサの重心を下げるためセンサ下部におもりを設けた。実験に使用したセンサを写真 4.3.13 に示す。

投下装置の重量は約 2.5kg、投下試験用のダミーは約 1.6kg と許容重量約 20kg のラジコンヘリに搭載し飛行できるレベルの重量とした。

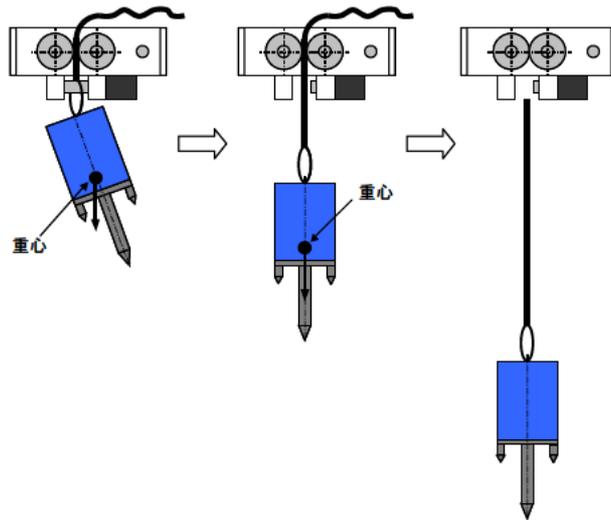


図 4.3.30 投下装置の特徴

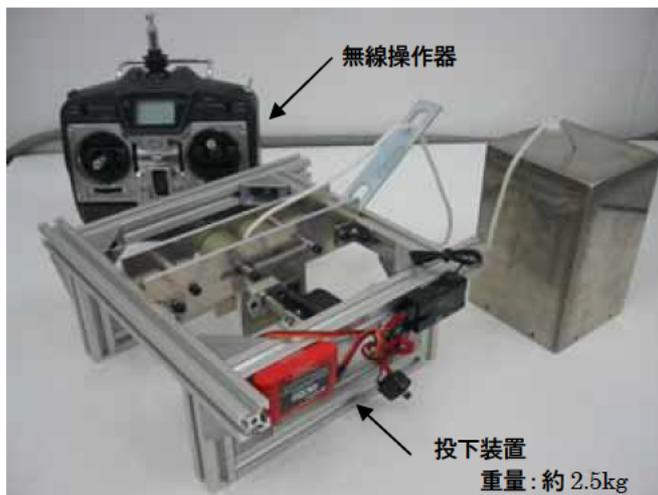


写真 4.3.12 投下装置

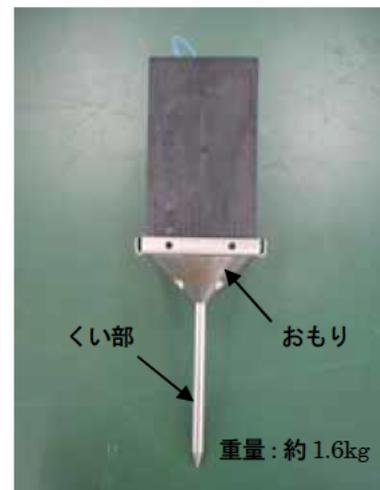


写真 4.3.13 試験に使用した投下
実験用ダミー

実験は写真 4.3.14 に示したように投下装置をクレーンで 5m の高さに吊り下げ、表 4.3.13 に示す様々な地盤条件にセンサを投下したときの設置状況を確認した。また、ラジコンヘリの揺れを想定し、クレーンで投下装置を揺らした状態からの投下についても実験した。



写真 4.3.14 実験の様子

表 4.3.13 投下実験の地盤

	土の種類と状態	傾斜
1	土 / 乾燥	0、35°
2	土 / 含水(飽和)	0、35°
3	土 + 礫 / 乾燥	0、35°
4	礫	-

c) 実験概要

・ 実験日と実験場所

*2008年5月20日、土木研究所 土工実験室

*2008年6月16日、土木研究所 盛土実験棟

・ 実験手順

実験手順を以下に示す。

- (ア) クレーンに吊下げた投下装置に投下実験用ダミーをセットする
- (イ) 投下する位置にクレーンを移動させ、5mの高さに調整する
- (ウ) ラジコンヘリの揺れを想定した実験の場合、クレーンを操作し投下装置を揺れた状態とする
- (エ) 無線操作器により投下実験用ダミーを投下する

d) 実験結果

落下地点の地盤条件を変えた場合の実験結果を表 4.3.14 に、センサの設置状況を写真 4.3.15～写真 4.3.24 に示す。落下地点の地盤条件に関わらず概ね良好に設置できることが確認できた。しかしながら礫に覆われている場所や、傾斜がきつにくい部がセンサを地盤に固定できないような柔らかい地盤条件場合ではセンサを固定できず倒れる場合が見られた。設置ポイントとしては上記のような場所を避けることが好ましい。

表 4.3.14 投下実験結果

	土の種類と状態	傾斜	実験結果
1	土 / 乾燥	0、35°	0、20° : 良好に設置できた 35° : 土がさらさらでセンサの固定が甘く、 下方へスライドする傾向が見られた
2	土 / 含水(飽和)	0、35°	0、35° : 良好に設置できた (水を含み、乾燥した状態より締りがよかつた)
3	土 + 礫 / 乾燥	0、35°	0° : 良好に設置できた 35° : 下地がやわらかく固定できなかった
4	礫	-	水平に近い場合は比較的うまく固定できる が、斜度がある場合くい部が固定されず倒れる場合がある。



写真 4.3.15 設置の様子 (土、乾燥、0°)



写真 4.3.16 設置の様子 (土、乾燥、35°)



写真 4.3.17 設置の様子 (土、含水、0°)



写真 4.3.18 設置の様子 (土、含水、35°)



写真 4.3.19 設置の様子 (土+礫、乾燥、0°)



写真 4.3.20 設置の様子 (土+礫、乾燥、35°)



写真 4.3.21 設置の様子(礫)



写真 4.3.22 設置の様子(礫)



写真 4.3.23 揺らした状態からの投下(斜度 0°)



写真 4.3.24 揺らした状態からの投下(斜度 45°)

②実機からの投下実験

a) 実験目的

- ・ プロペラの吹き下ろしや実機で発生する振動の影響、ホバーリング時の揺れ等の影響下でセンサを鉛直に落下させ地面に固定できるかを確認する。
- ・ 人が立ち入れない地すべり災害現場での適用を想定し、離れた位置からラジコンヘリを操作し、設置ポイントへセンサを設置できるか否かを確認する。
- ・ 実機での投下実験の実施により実際の現場での運用性上の課題を抽出する。

b) 実験装置

実験に用いた投下装置を図 4.3.31、写真 4.3.25 に、またセンサ(音源)を写真 4.3.26 に示す。

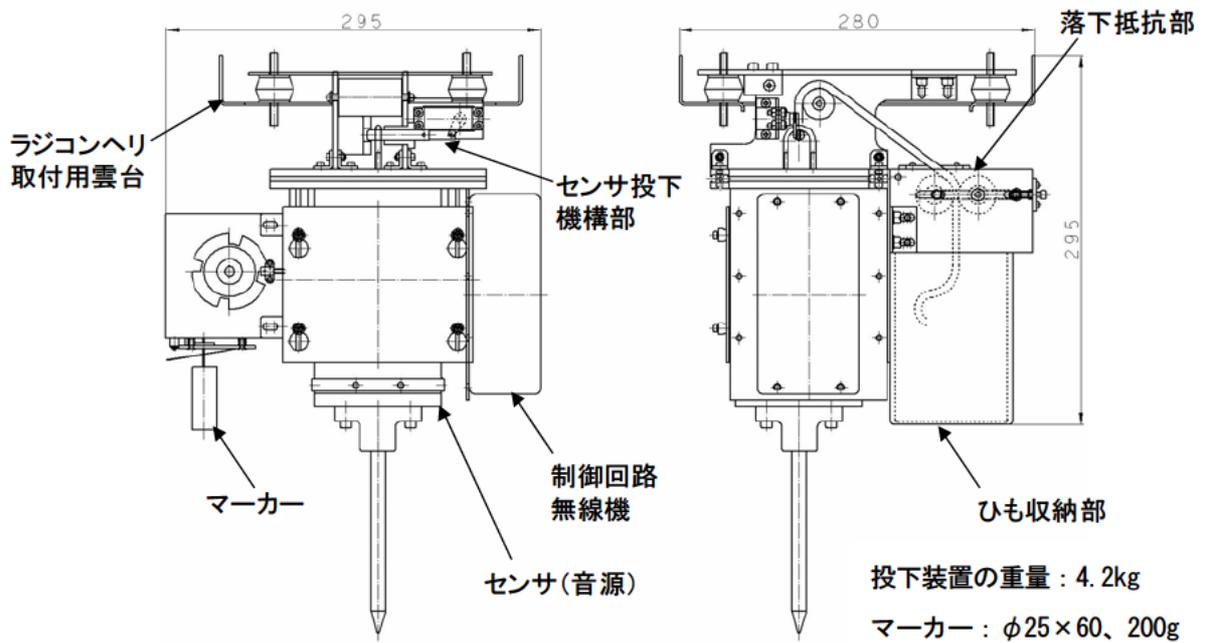


図 4.3.31 実機実験に用いた投下装置



写真 4. 3. 25 投下装置

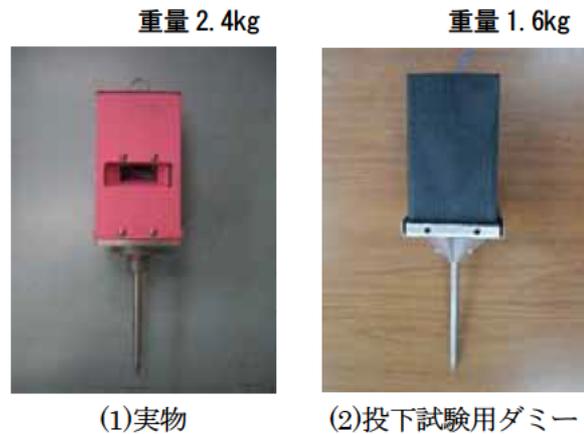


写真 4. 3. 26 投下するセンサ

装置の構成および機能を以下に示す。

- (ア) センサ投下機構部：無線信号によりセンサの切り離し動作を行う
- (イ) 落下抵抗部：センサに固定したひもを挟み込み、落下抵抗を持たせる
- (ウ) マーカー

投下装置からひもで目印を吊下げ、センサの設置ポイントおよび投下高さを見極めるために用いる。マーカーは通常巻き上げられた状態にあり、設置ポイント上空で5m下に降ろし、マーカーを目印にラジコンヘリの位置を調整する。その後マーカーを巻き上げ、センサを投下する。

- (エ) 制御回路、無線機：センサ投下機構部およびマーカーの動作を無線により操作するための制御装置
- (オ) ひも収納部：ラジコンヘリの飛行中に、センサに落下抵抗を付けるためのひもがプロペラ等に絡み付かないよう収納するためのケース

c) 実験概要

- ・ 実験日時：2009年3月10日 13:00～16:00
- ・ 実験場所：ヤマハ発動機（株）実験場（写真 4. 3. 27 参照）

静岡県掛川市大須賀町大淵字前浜 1457-120



写真 4.3.27 実験場全景 (50m × 200m)

- ・ 実験に使用したラジコンヘリ: ヤマハ発動機(株)製マニュアル操縦ヘリ Rmax
(写真 4.3.28、4.3.29 参照)
- ・ 天候状態
 - 天気 : 晴れ
 - 風速 : 平均風速 約 10m/s (最大風速 11.8m/s)
- ・ ラジコンヘリの運用方法

オペレータ(ラジコンヘリの操作者)1名、ナビゲータ1名および投下装置の操作者1名の計3名で運用した。ナビゲータは設置ポイントからオペレータの方向に対し直角方向に配置した(図 4.3.32 参照)。オペレータはラジコンヘリ進行方向に対し左右方向の位置を確認・調整し、ナビゲータはラジコンヘリの前後方向の位置を確認し無線によりオペレータへ指示を出すことでラジコンヘリの前後方向の位置を調整した。なお設置ポイントは 1m 角の正方形とし遠方から確認できるように四隅に三角コーンは配置した(写真 4.3.33 参照)。

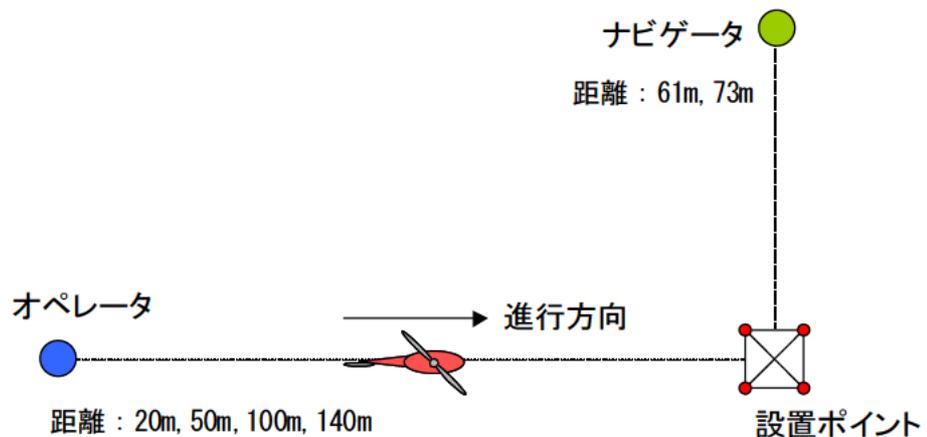


図 4.3.32 オペレータとナビゲータの配置

- ・ 実験手順

実験手順を以下に示す。

- (オ) 投下装置にセンサをセットする
- (カ) ラジコンヘリを設置ポイント上空まで飛行させホバーリング
- (キ) マーカーを操作し 5m 下方へ吊下げる
- (ク) マーカーを目印にラジコンヘリの高さ位置を合わせる
- (ケ) マーカーを巻取り投下装置に収納する
- (コ) センサを投下する

なお今回の実験では風が強くマーカー収納中にラジコンヘリが風で流されたため、殆どの実験ではマーカーを用いずラジコンヘリの位置を調整した。

d) 実験結果

実験条件および実験結果を表 4.3.15 に、実験状況を写真 4.3.28~4.3.53 に示す。

(ア) 投下高さと設置姿勢

風速 10m/s 以上と強風下での実験となったため、計画していた 5m 高さからの投下 (表 4.3.15 の実験 1、2) ではセンサが斜めになり、地面に固定 (設置) ことができなかった (設置状況は写真 4.3.44、4.3.45 を参照)。そこで、風の影響を少なくするため、投下高さを 3m 程度とし実験を行ったところ地面に固定 (設置) ことができた (表 4.3.15 の実験 3 から 10、設置状況は写真 4.3.46 ~4.3.53 を参照)。

(イ) マーカーの視認性と効果

- ・ 100m および 140m 離れた位置からマーカーの視認性を確認したところ（表 4.3.15 の実験 9、10）、肉眼では確認できなかったが、双眼鏡（10×22）により確認できることが分った。
- ・ マーカーの色は白色としたが、今回の実験では背景色に同化し比較的視認し難いように感じられた。
- ・ マーカーによる位置の調整は、オペレータからみて左右の確認は容易であるが奥行き方向の位置の把握が難しく、2 方向からの確認が必要であることが分った。
- ・ 位置調整の際、ラジコンヘリの動きや風によりマーカーが揺れるが、ラジコンヘリのおおよその位置を確認できることが分った。
- ・ 位置と高さの調整効果としては、強風の中ではマーカーを収納する間にラジコンヘリが風に流されることが分った。
- ・ マーカーを使用せずオペレータとナビゲータの 2 ヶ所からラジコンヘリの位置を確認することで、正確にセンサを投下できることが分った。

(ウ) 実験のまとめ

- ・ 3m の高さからの投下で安定して設置できることが確認できた。
- ・ 2 方向からの位置確認でおおよそのポイントを狙えることが確認できた。
- ・ 140m 離れた場所からの設置ポイント確認およびセンサの正確な投下が可能なことが確認できた。
- ・ マーカーは揺れを生じるが、風が弱くラジコンヘリが流されない条件下では設置ポイントの検討付けには有効であることがうかがえた。マーカーの視認性は必ずしも白色が良いとは限らず、背景色によって選択する必要があることが分った。上記の実証は今後の課題とする。

表 4.3.15 実験条件および設置状況

	センサ	投下 高さ	オペレー タまでの 距離	ナビゲー タまでの 距離	マーカー	設置 姿勢	備考
1	実物	約 5m	20m	-	使用	NG	・ センサが風に流され斜めに落下
2	ダミー	約 5m	20m	-	-	NG	同上
3	ダミー	約 3m	20m	-	-	OK	・ 高度を 3m に下げたところ、設置姿勢良好
4	ダミー	約 3m	50m	-	-	OK	・ 設置位置が 4m オペレータよりと、大きく外れる
5	ダミー	約 3m	100m	61m	-	OK	・ ナビゲータ配置 ・ 設置位置：設置ポイント中心から 1m55cm の位置
6	ダミー	約 3m	100m	73m	-	OK	・ 設置位置：設置ポイント中心から 60cm の位置
7	ダミー	約 3m	140m	73m	-	OK	・ 設置位置：設置ポイント中心から 75cm の位置
8	ダミー	約 3m	140m	73m	-	OK	・ 設置位置：設置ポイント中心から 30cm の位置
9	ダミー	約 3m	100m	73m	使用	OK	・ 設置位置：設置ポイント中心から 60cm の位置
10	ダミー	約 3m	140m	73m	使用	OK	・ 設置位置：設置ポイント中心から 30cm の位置



写真 4.3.28 実験に使用したラジコンヘリ その1



写真 4.3.29 実験に使用したラジコンヘリ その2



写真 4.3.30 ラジコンヘリに取付けた投下装置



写真 4.3.31 センサ取付け状況 その1



写真 4.3.32 センサ取付け その2

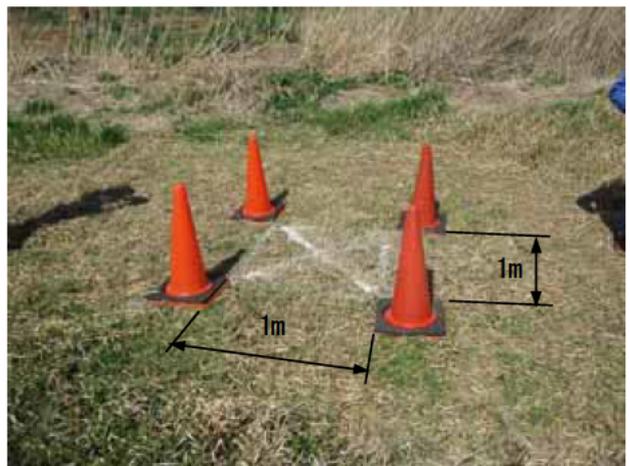


写真 4.3.33 設置ポイント (センサの投下目標)



写真 4.3.34 飛行状況 その1



写真 4.3.35 飛行状況 その2



写真 4.3.36 飛行状況 その3



写真 4.3.37 ホバーリング



写真 4.3.38 設置ポイントとオペレータの位置
(距離 100m のとき)



写真 4.3.39 オペレータからみたラジコンヘリ
(距離 100m のとき)



写真 4. 3. 40 マーカー吊下げ状態



写真 4. 3. 41 吊下げたマーカー



写真 4. 3. 42 センサ投下 その1



写真 4. 3. 43 センサ投下 その2



写真 4. 3. 44 設置状態 (1 回目)



写真 4. 3. 45 設置状態 (2 回目)



写真 4.3.46 設置状態 (3 回目)



写真 4.3.47 設置状態 (4 回目)



写真 4.3.48 設置状態 (5 回目)



写真 4.3.49 設置状態 (6 回目)



写真 4.3.50 設置状態 (7 回目)



写真 4.3.51 設置状態 (8 回目)



写真 4.3.52 設置状態（9回目）



写真 4.3.53 設置状態（10回目）

4.3.4 厳しい現場条件で地すべりでの活用方法

音響を応用した移動量計の精度は $\pm 0.55\%$ 程度と既存の伸縮計等に劣るが、測定範囲が200m と広いことが特徴である。用途としてはラジコンヘリから投下する仕組みと併せて考えると、人が立ち入れないような場所で大きく移動する可能性のあるような場合の測定に適する。また地盤が安定せず長期的に流動し続けているような現場の観測にも適するものと考えられる。

ラジコンヘリからの投下設置をする場合、センサをくい部で地面に固定して設置する方式のため岩場や礫の多い場所への適用は難しい。

4.3.5 まとめ

本研究では数m～数十mオーダーの大変位の移動量を計測できる地すべり計測装置の開発を行った。また、立ち入り困難な地すべり地への装置の設置方法としてラジコンヘリを利用した手法を考案し実証実験によりその有効性を確認した。

(1) 音響を応用した移動量計測システム

約 125dB の音源を適用し、気象条件や音源・マイク間の見通し、騒音等条件によるが 200m 程度までの距離が測定可能なことが確認できた。

音速を補正するための測定温度が、直射日光の影響で外気温よりも高くなり、距離の演算値に日変動が見られた。実験では最大 2.5 の乖離があったと予想され、0.45%程度の誤差要因となることが分った。今後、精度向上のため温度計測方法の改善を検討していく。

騒音等の外乱を取り除くためエラー判定基準を厳しくする程、データ取得率が低下するが精度が高まることが分った。エラー判定基準 ± 0.3 の場合、測定距離 50m でデータ取得率 69%、測定精度 $\pm 0.55\%$ ($\pm 0.28\text{m}$)、測定距離 200m でデータ取得率 8.8%、測定精度 $-0.36 \sim -0.44\%$ ($-0.721 \sim -0.875\text{m}$)の結果が得られた。

(2) ラジコンヘリによるセンサの設置方法

投下時にセンサの姿勢を安定させる手法（ひもで吊下げながら落下させる）を考案し、実験によりある程度の傾斜（ 45° 以下まで確認）まで、礫を含んだ地盤でもほぼ良好に設置できることが確認できた。

ラジコンヘリに搭載可能な投下装置を作成し、実機に搭載して投下設置試験を実施し下の点を確認した。

(ア) 屋外では風の影響を受け落下時にセンサの姿勢が不安定になるが、風速 10m/s の強風下でも約 3m の高さからの投下でほぼ良好に設置できることが確認できた。

(イ) オペレータ 1 名とナビゲータ 1 名の運用により、140m 離れた地点からおおよその設置ポイントにセンサを設置できることが確認できた。

(ウ) センサの設置位置を検討付けるマーカーは、ラジコンヘリの動きや風により揺れを生じるが位置の検討付けが可能であり、ラジコンヘリが流されない程度の風速下では有効に機能する可能性があることが確認できた。

(3) 今後は地すべり現場等条件を変えた実験を実施し精度検証し、実用化の可能性や活用方法、運用方法を検討していく。

4.4 地盤伸縮計の改良による大変位伸縮計

4.4.1 目的

地盤伸縮計を利用した監視体制を求められる地すべり災害現場においては、警戒避難の判断にあたって客観的かつ信頼性の高い計測データが特に求められている。また、監視期間中に欠測するようなことがあってはならない。

しかしながら、流動性のある地すべりなど、大きな変位が生じる地すべりでは、測定範囲を超えてデータが取得できなくなる場合がある。このような場合、インバー線を張り替えて対応するが、立ち入ることができなくなった場所にある地盤伸縮計では張り替えが不可能である。また、移動量が大きく、移動速度も大きい現場では高頻度にインバー線を張り替える必要がある。

このような大きな変位が生じる地すべりの計測に対応できる地盤伸縮計(測定範囲 1m および 4m 用)は、すでに製造販売されている。本共同研究では、この地盤伸縮計の機構を利用して 5m を超える大変位にも対応できる大変位伸縮計を開発・試作するとともに、現場検証実験による有効性の確認を行った。

4.4.2 システムの概要

(1) 大変位伸縮計の概要

一般に地表面の伸縮量を計測する場合は、図 4.4.1 に示すように地すべり地外の不動点と、地すべり地内の移動点にそれぞれ杭を設置する。固定杭に地盤伸縮計を設置し、インバー線を使用して移動杭との杭間の相対変位を計測している。インバー線には一定張力が与えられており、その機構としては錘によるもの、ばねによるものがある。大変位伸縮計は、張力を与えるばねを工夫して計測範囲を 6m とし、大変位の計測に対応できるようにしたものである。

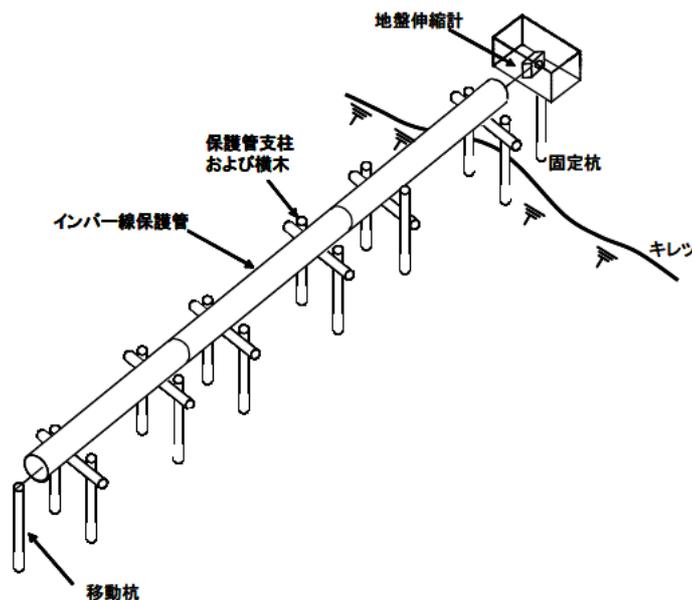


図 4.4.1 地盤伸縮計設置図

(2) 大変位伸縮計の構成と計測原理

大変位伸縮計は、図 4.4.2 に示すように a.インバー線、b.検出ギヤ、c.検出用摺動抵抗、d.変換回路、e.ワイヤ巻き込み・繰り出しギヤ、f.ぜんまいばね、g.ワイヤで構成されている。

地すべりの挙動にともなってインバー線が移動すると、ワイヤを介して検出ギヤが回転し、同軸に連結された検出用摺動抵抗の接触子も同時に回転する。検出用摺動抵抗は接触子の回転した量だけ電気抵抗が変化する回路となっているため、地すべりの移動量を電気抵抗の変化として測定することができる。インバー線の張力を一定に保つため、インバー線に接続されているワイヤは、ぜんまいばねと同軸に連結されたワイヤ巻き込みギヤで巻き取られる構造になっている。このギヤに 6m 分のワイヤを巻き込んでおくことで 6m の大変位計測が可能となっている。

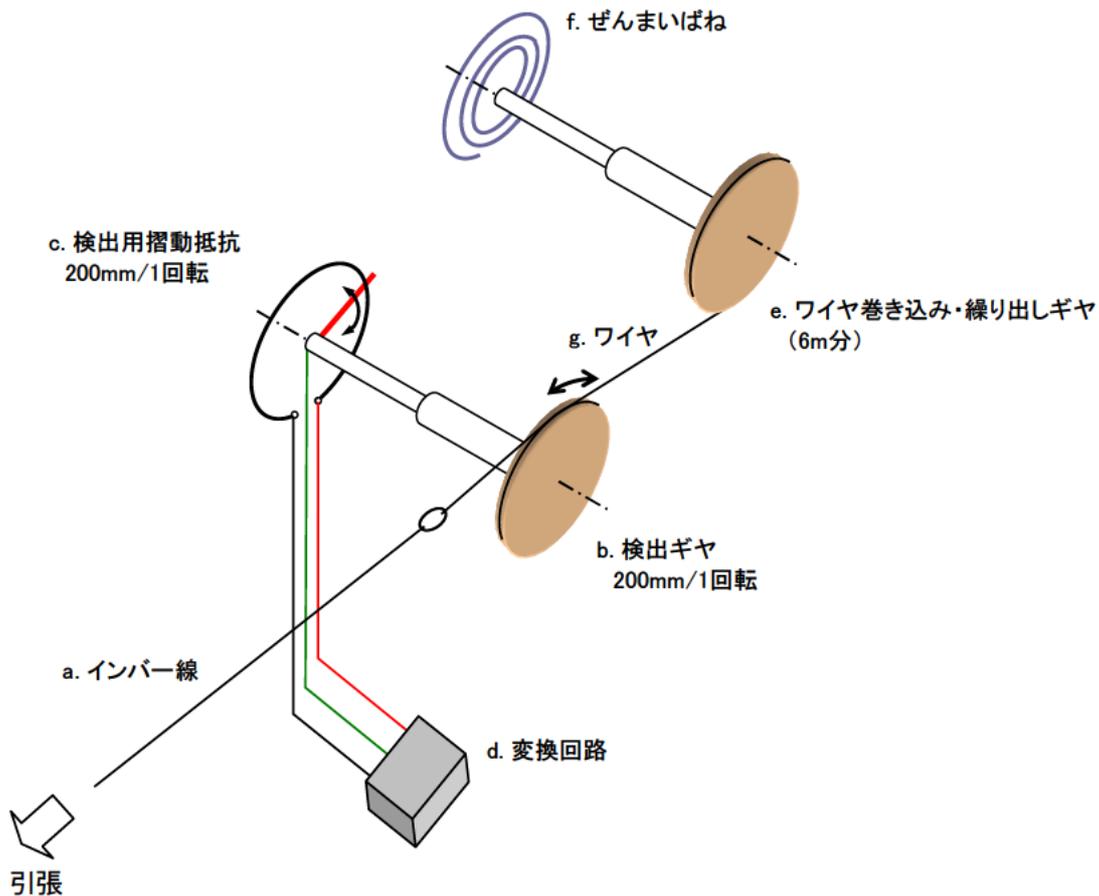


図 4.4.2 伸縮計の計測原理

(3) 大変位伸縮計の仕様

試作した大変位伸縮計の外観図を図 4.4.3、仕様を表 4.4.1 に示す。

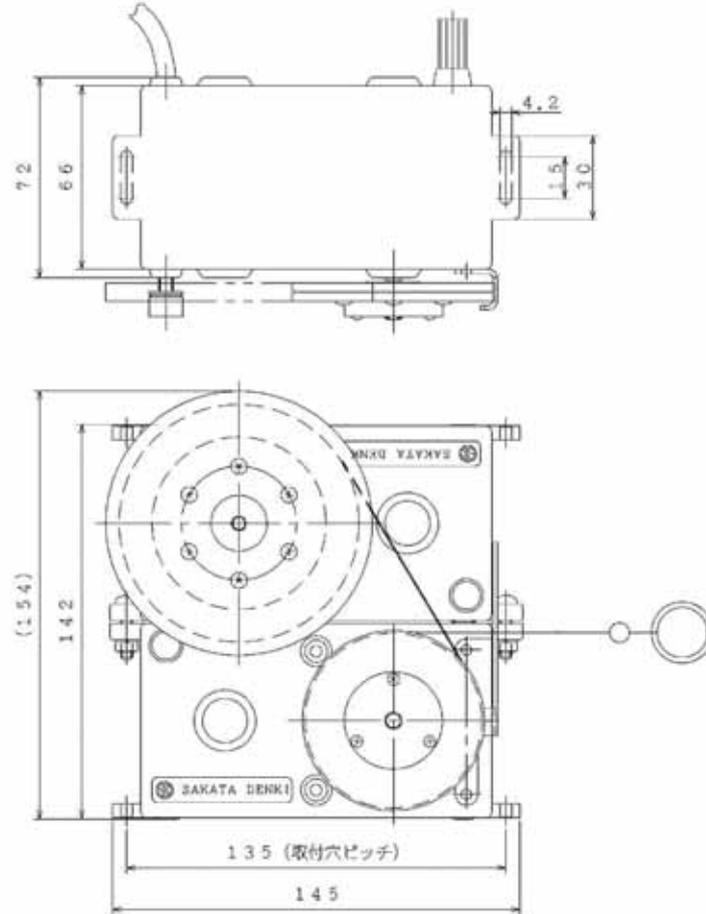


図 4.4.3 大変位伸縮計の外観図

表 4.4.1 大変位伸縮計の仕様

項 目	仕 様
測定範囲	最大 6m (200mm / 回転)
変換方式	摺動抵抗式
非直線性	0.5% / 200mm
分解能	0.1mm
許容温度範囲	-30 ~ +80
絶縁抵抗	50M 以上

4.4.3 基本仕様の検討（現場検証実験）

試作した大変位伸縮計の性能を検証するため、静岡県伊豆市土肥地区に設置し、約 8.5 ヶ月の計測を行った。

(1) 設置場所

図 4.4.4 に土肥地すべり地区の位置を示す。

2007 年 7 月 23 日、国道 136 号伊豆市土肥新田において発生した地すべりである。地すべりの規模は、幅約 40m、長さ約 140m である。



図 4.4.4 検証実験位置（Yahoo 地図情報より転載）

(2) 設置位置

図 4.4.5 に大変位伸縮計の配置を示す。

大変位伸縮計 S-1'、S-2'は、既設の従来型地盤伸縮計 S-1、S-2 の近傍に設置した。

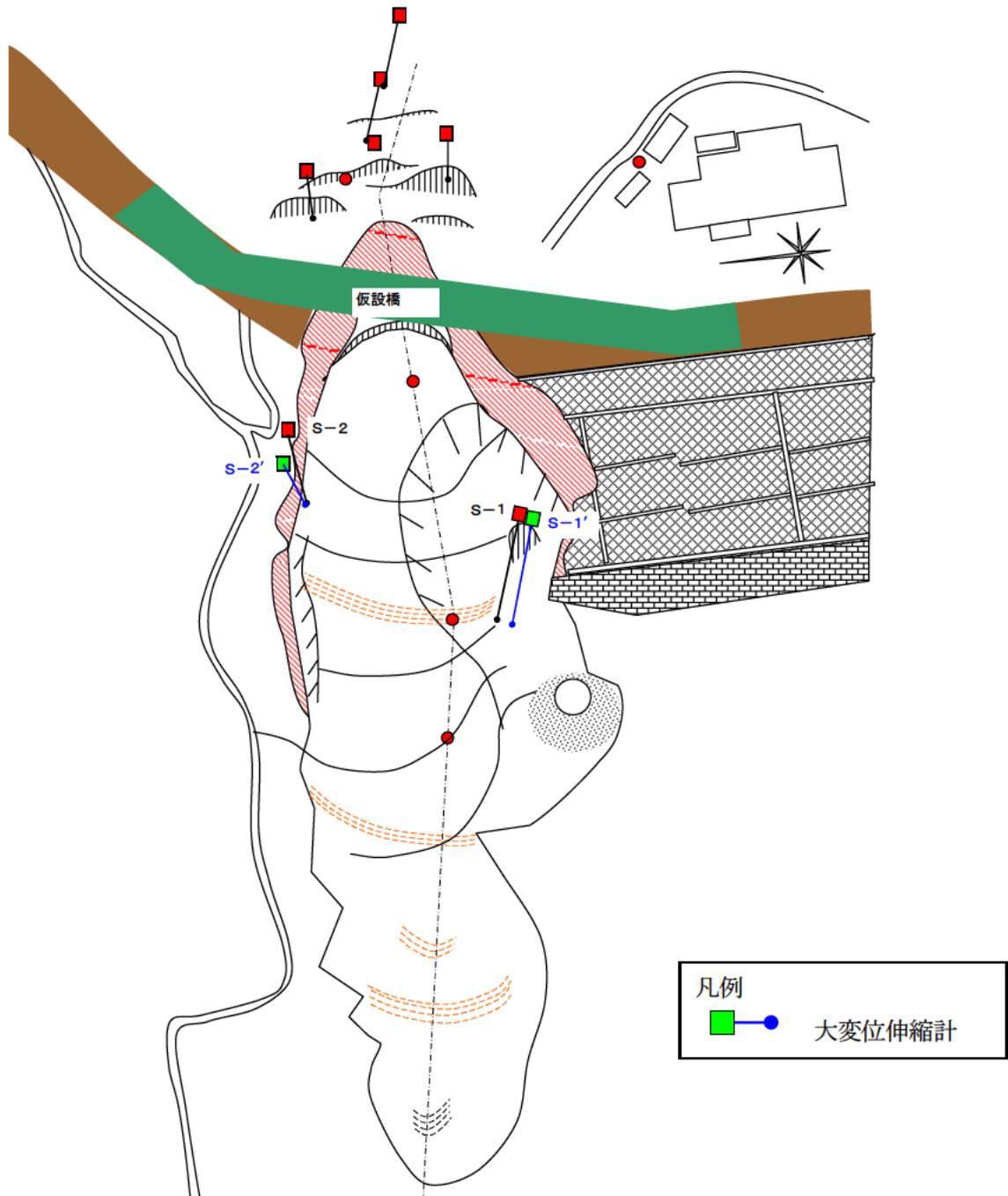


図 4.4.5 伸縮計配置図¹⁾

(3) 実験機材

検証実験における使用機材を以下に示す。

① 大変位伸縮計	2台
② 移動杭および固定杭 (単管 $\phi 48 \times 1000$)	4本
③ 伸縮計格納箱	2組
④ インバー線 ($\phi 0.5 \times 15000$)	2本
⑤ データロガー (ログユニ: EC-302L)	2台

(4) 測定方法

測定頻度: 1回/時間

データ回収頻度: 1回/月

(5) 設置方法

図 4.4.6、写真 4.4.1~4.4.4 に、大変位伸縮計の設置状態図を示す。

- ①地すべり地外部に固定杭を設置し、地すべり土塊内に移動杭を設置した。
- ②固定杭上の伸縮計格納箱内に大変位伸縮計、データロガーを取り付けた。(写真 4.4.5)
- ③インバー線の一端を移動杭に固定して他端を大変位伸縮計の変位伝達ワイヤに結んだ。
- ④応急緊急性を有する現場への設置を考慮し、設置作業時間の短縮を図るため、通常設置するインバー線保護管は使用しないものとした。

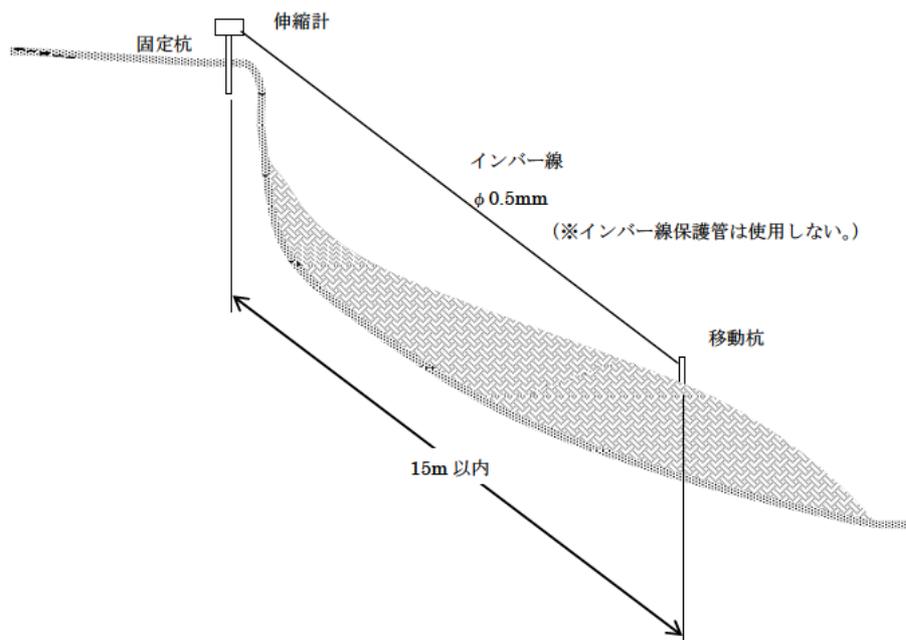


図 4.4.6 大変位伸縮計設置状態図



写真 4. 4. 1 S-1、S-1' 遠景



写真 4. 4. 2 S-2、S-2' 遠景



写真 4. 4. 3 S-1' 全景



写真 4. 4. 4 S-2' 全景



写真 4. 4. 5 大変位伸縮計とデータロガー

(6) 現場検証実験結果

変動量データ

(ア) 大変位伸縮計 S-1

図 4.4.7 に S-1' および S-1 の変動図を示す。2008 年 2 月 14 日～11 月 1 日までの約 8.5 ヶ月の間に計測された累積変動量は、S-1' で 2,378mm、S-1 で 2,298mm と約 80mm の差があった。この 80mm の差は、S-1' と S-1 で異なる移動杭を使用しており、それぞれで違う動きをしていたためだと考えられる。

S-1'、S-1 とともに設置から 7 月中旬までは、降雨の影響により 1 ヶ月に約 500mm の割合で変動が漸増していた。7 月中旬から 8 月下旬の間は降雨もなく変動が見られなかった。8 月下旬から 10 月中旬の間は降雨の後に変動が見られたが、10 月中旬以降は降雨後の変動が見られなくなった。なお、5 月 25 日から 6 月 19 日は、データロガーの電源回路の部品不良のため欠測が生じた。

(イ) 大変位伸縮計 S-2

図 4.4.8 に大変位伸縮計 S-2' および S-2 の変動図を示す。近傍に設置していた S-2 は地すべり対策工事の都合により 5 月 12 日で計測を終了し、累積変動量は 183mm であった。この時の S-2' の累積変動量は 171mm であった。S-2' も S-2 と同様に、6 月 6 日に地すべり対策工事の都合により大変位伸縮計を撤去した。4 月 16 日～6 月 6 日までの約 2 ヶ月の間に計測された累積変動量は 374mm であった。

2 月 14 日から 4 月 16 日の欠測は、検出用摺動抵抗の内部接触不良が原因である。

以上の結果より、検証実験期間において、S-1'、S-1 と同様に S-2'、S-2 の変動の傾向はほぼ一致しており、大きな変位が生じる地すべりにおける計測に有効であることが確認できた。

設置方法および施工方法

地盤伸縮計を設置する際は通常、倒木などによるインバー線への影響を避けるため、塩ビ管などでインバー線を保護している。インバー線を保護するためには、保護管支柱を設置し、インバー線と保護管が接触しないことを確認しながら設置しなければならない。この保護管の設置が伸縮計の設置時間の大半を占めており、迅速な計測開始が必要とされる現場においてボトルネックとなる作業である。

今回の検証実験では大きな変位を連続で測定するほかに、応急緊急での対応が必要な災害現場でのモニタリングを想定しているため、インバー線の保護管設置の省略したこのことで、伸縮計の設置作業時間を通常よりも約半日、短縮することができた。

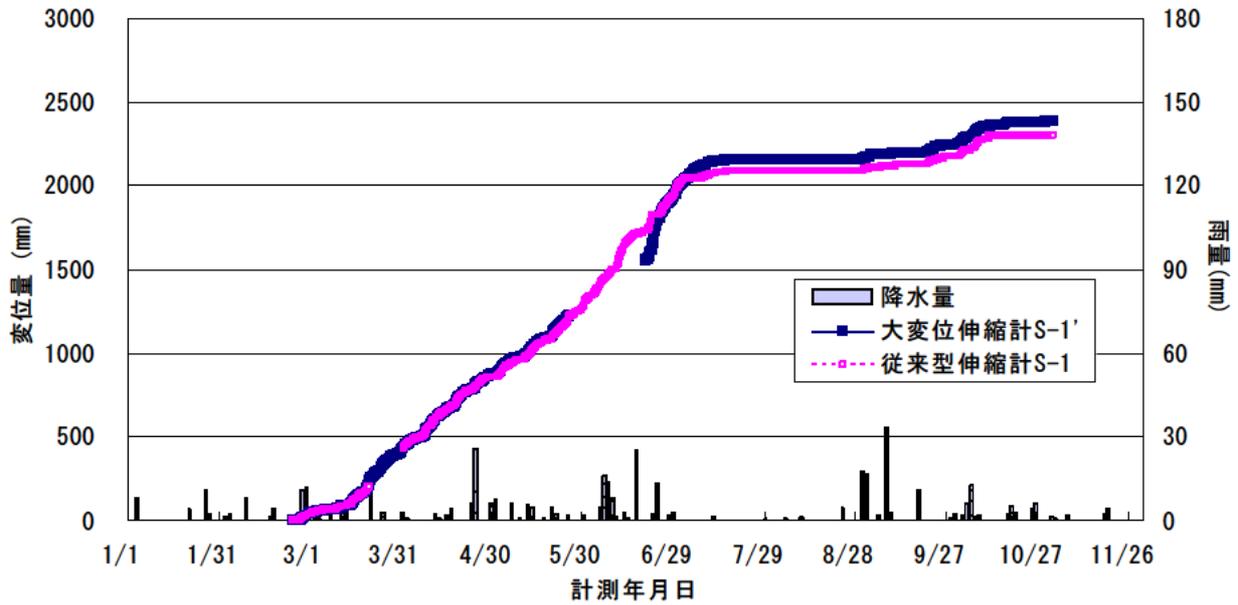


図 4.4.7 大変位伸縮計 S-1' 変動図 (2/14~11/1)

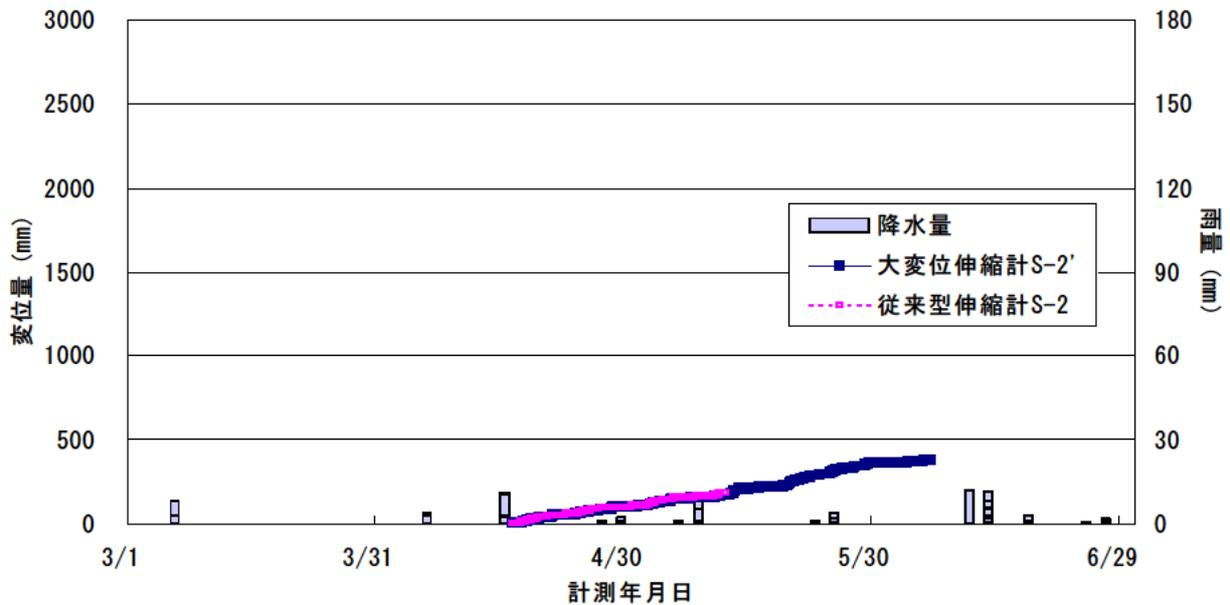


図 4.4.8 大変位伸縮計 S-2' 変動図 (4/16~6/6)

4.4.4 厳しい現場条件の地すべりでの活用方法

大変位伸縮計が大きな変位が生じる地すべりにおける計測に有効である見通しが得られたため、量産の検討と量産試作器 2 台の製作を行った。

(1) 量産試作器の検討

量産試作器のコンセプトを以下に示す。

6m の測定レンジをもつ。

緊急災害現場への即応性を高めるため、標準製品をベースとする。

商用電源の得られない現場を想定し、バッテリー駆動とし、その寿命は 1 年とする。

緊急時の対応を考慮し、特殊なバッテリーを用いない。

標準的な地盤伸縮計と同等の測定性能を有する。

2 次災害監視を想定して警報出力機能を有する。

(2) 量産試作器の製作

製作した量産試作器の仕様を表 4.4.2 に、量産試作器の外観を写真 4.4.6、図 4.4.9 に示す。量産試作器の仕様概要は以下のとおりである。

測定レンジを 6m とした。

通常はスリープ状態で 0.25mm 以上の変位があったときに通電し、測定を行う省電力方式とした。

現在、坂田電機で標準機種としている地すべり記録器 SRL-101 をベースとした。

通常はスリープ状態で 0.25mm 以上の変位があったときに通電し、測定を行う省電力方式とした。

単 3 アルカリ電池 4 本で作動し、バッテリー寿命 1 年程度である。

測定の分解能を 0.1mm とした。

警報接点出力を有する。(管理値設定は表 4.4.2 参照)

軽量で安価な通信ケーブル(2 線ツイストケーブル)で PC やデータ収録装置と接続してデータ回収する機能を有する(最大ケーブル長は 500m)。また、オプションの無線通信アダプタを利用することで、無線によるデータ回収にも対応する。

表 4.4.2 大変位伸縮計量産試作器の仕様

名称	土肥設置型	量産試作器
測定範囲	0 ~ 6000mm	0 ~ 6000mm
分解能	0.1mm	0.1mm
測定タイミング	1時間に1回	0.25mmの変位検出時
電源	単3アルカリ電池4本 (動作時間約40日)	単3アルカリ電池4本 (動作時間約1年)
接点警報出力	無し	±1、2、4mm/h ±1、2、5、10、100mm/day
液晶表示部	指示値、電池状態	移動量、グラフ 警報状態、電池状態
メモリカード	SDメモリーカード 最大1GB	
保存形式	CSV形式 (年月日時分、移動量)	
データ通信	RS232C準拠 (D-sub9ピン) S-LINK (2線式通信、2ピン端子台、ケーブル長最大500m) 無線通信 (無線通信アダプタ (オプション) を使用、 通信距離100m、中継回数最大3回)	
仕様温度	-10 ~ 50 (結露しないこと)	



写真 4.4.6 大変位伸縮計外観

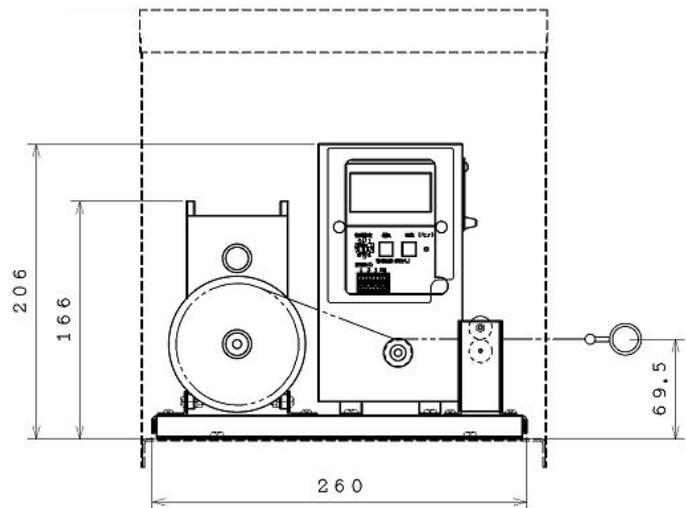


図 4.4.9 大変位伸縮計外観寸法図

4.4.5 微小変位測定試験

大変位伸縮計を試作し、土肥地区地すべりでの検証実験より、大きな変位を連続的に測定できることが確認できたが、大きな変位が生じる地すべりにおいて、微小な変位を正確に測定することが望まれる。そのため、量産試作器による微小変位測定試験を工場で行った。

(1) 試験方法

図 4.4.10 に試験装置の概要図を示す。インバー線 9.5m、大変位伸縮計ワイヤ 5.5m を引き出した状態で、2mm ごとに変位を変化させながら±20mm 区間における変位を往復で測定し、試験は 2 回実施した。

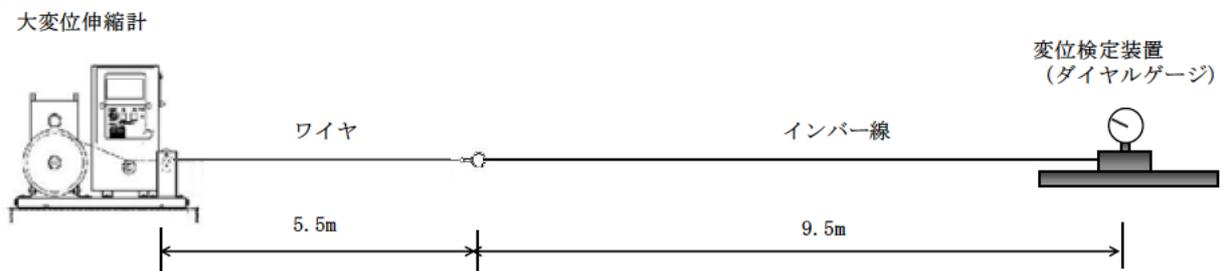


図 4.4.10 試験装置概要図

(2) 試験結果

試験結果を図 4.4.11 に示す。往復試験における 1 回目と 2 回目の変位測定値の差は最大で 0.3mm であり、高い再現性を有することが確認できた。

これにより、流動性がある地すべりなどの大きな変位が生じる地すべりにおいても、微小な変位を高精度で計測できることを確認した。

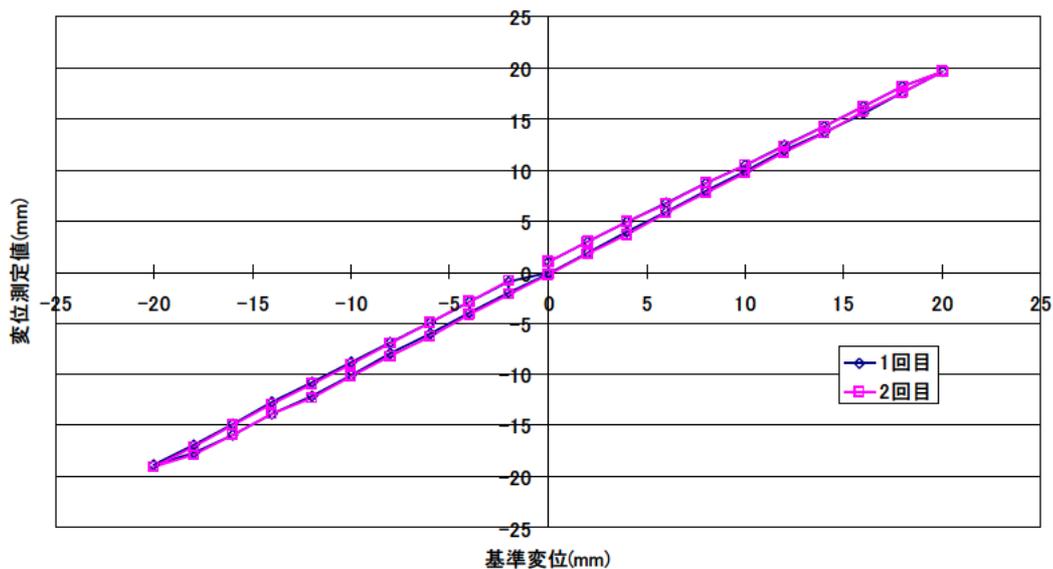


図 4.4.11 試験結果

4.4.6 まとめ

- (1) 大変位伸縮計を試作し、静岡県伊豆市土肥地区地すべりにて検証実験を行った。この結果大きな変位が生じる地すべりの計測に有効である見通しが得られた。
- (2) 大変位伸縮計の量産に向けて検討を行い、量産試作器を2台製作した。
- (3) 流動性がある地すべりなどの大きな変位が生じる地すべりにおいても、微小な変位を高精度で計測できることを確認した。
- (4) 引き続き量産試作器の検証実験を実施し、大変位伸縮計の実用化を図る。

<参考文献>

- 1) 2007年11月6日 現地踏査説明資料(静岡県沼津土木事務所作成資料)

4.5 地中無線通信技術を応用した変位計

4.5.1 目的

従来、土塊が泥濁化、流動化する地すべりや、表層崩壊・落石を伴う地すべりでは計測機器が土塊に埋没してデータが取得できなくなるケースがあった。また、地すべり先端が河床にあたり、洪水で地すべりブロックの一部が冠水する地すべりでは流下物によりインバー線が断線したり計測計器が水没して継続的にデータが取得できなくなるケースがあった。

地すべり変位を計測する代表的な計測機器として地盤伸縮計が挙げられる。地盤伸縮計は基準点と移動点の間にインバー線を張り、地すべり変位によるインバー線の変位を測定する方式である。地盤伸縮計に覆土や地すべりに伴う倒木が生じるとインバー線の破断により計測が継続できなくなるケースがあり、本研究において例に挙げているような厳しい条件下で使用する地すべり観測機器としてはインバー線のような構造物を必要としない非接触の変位計が求められる。

非接触で変位（距離）を測定する計測機器としてはレーザや高周波電磁波を利用した測距器などが挙げられる。これらは光や高周波電磁波といった信号が測距器とターゲットの間を伝播する時間から距離を得る方式であるが、土中や水中、植生中では信号が反射や減衰を生じて測定ができなくなる場合があった。

そこで、本研究では地すべり変位を非接触で土中・水中においても計測することができる「無線式距離計測システム」（本章では以下、本システムと称す）を開発する。

4.5.2 システムの概要

本システムは変位センサ（発信器）が発生した低周波数（約 1kHz）電磁波を受信器（受信アンテナならびに測定器）で受信し、その受信強度から変位センサと受信アンテナ間距離を非接触で測定する。本システムは低周波数電磁波を使用しているため、周囲環境（土中、水中、植生等の被覆）の影響が殆どないことを特徴としている。この技術は[特開 2002-054928]として特許公開されている。

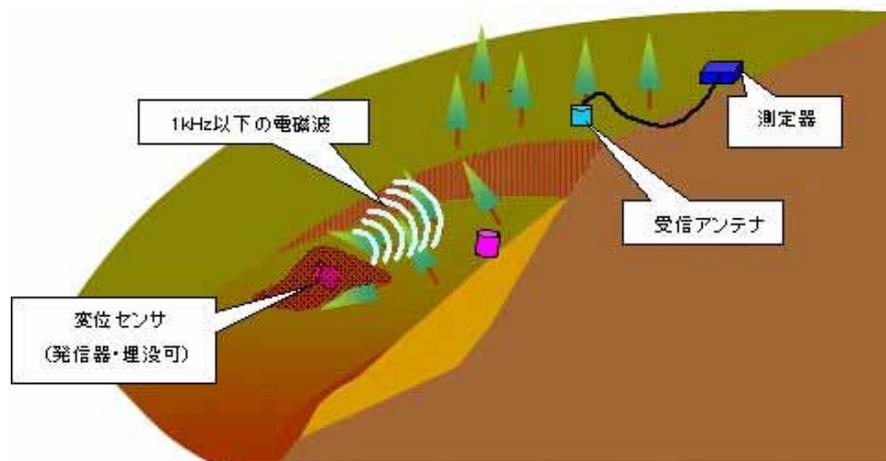


図 4.5.1 無線式距離計測システムの概要図

以下に本システムの測定原理を示す。図 4.5.2 に示すように、送信側座標軸 (X,Y,Z) と受信側座標軸 (U,V,W) とそれぞれの軸に対応するようにするコイルを巻いたアンテナを配置する。送信アンテナの中心から受信アンテナの中心までの距離を r とする。

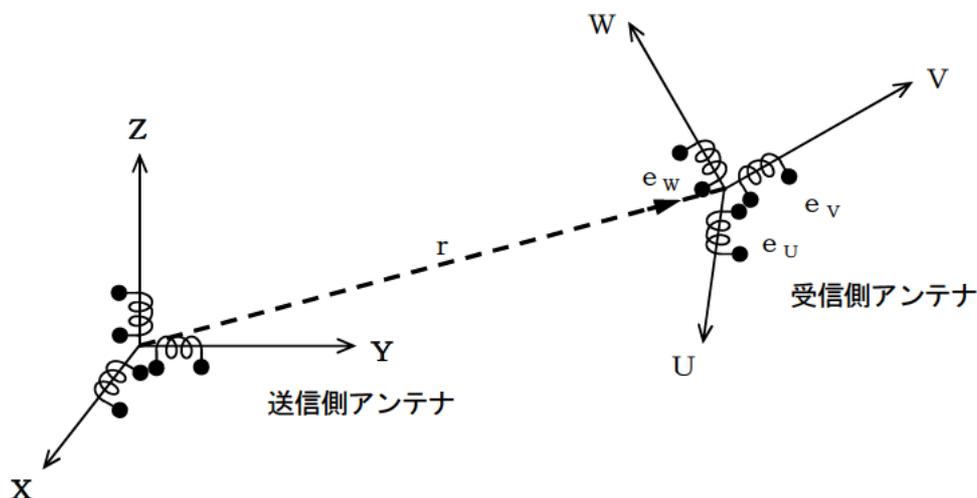


図 4.5.2 送信側と受信側の座標軸

送信側アンテナの X 軸のコイルに交流電圧を印加したときに、受信アンテナの U、V、W 軸のコイルに生じる受信電圧をそれぞれ (e_{UX} 、 e_{VX} 、 e_{WX})、とする。同様に Y 軸ならびに Z 軸のコイルに交流電圧を印加したときに、受信アンテナの U、V、W 軸のコイルに生じる受信電圧をそれぞれ (e_{UY} 、 e_{VY} 、 e_{WY})、(e_{UZ} 、 e_{VZ} 、 e_{WZ}) として式(4.5.1)より測定点での受信電圧 E を求める。

$$e_{UX}^2 + e_{VX}^2 + e_{WX}^2 + e_{UY}^2 + e_{VY}^2 + e_{WY}^2 + e_{UZ}^2 + e_{VZ}^2 + e_{WZ}^2 = E^2 \quad \dots \text{式(4.5.1)}$$

受信アンテナに生ずる受信電圧は、送信アンテナと受信アンテナの距離の 3 乗に反比例して減衰することより、既知の距離 r_0 における既知の受信電圧 E_0 を基準とすると、測定点での受信電圧 E から、式(4.5.2)のように送・受信間アンテナ距離を求めることができる。

$$r = \sqrt[3]{\frac{E_0}{E}} \times r_0 \quad \dots \text{式(4.5.2)}$$

4.5.3 基本仕様の検討

(1)開発コンセプト

図 4.5.3 にシステム概要図を示す。前述のように、本システムの基本原理では送信器（以下、変位センサと称す）と受信器（以下、受信アンテナと称す）の距離を非接触で測定できるため、本システムをワイヤレスの地盤伸縮計と考えた場合、従来の地盤伸縮計に比べて以下の特徴がある。

- ・ 非接触であり、インバー線・塩ビ保護管等の構造物が不要なため、10～30mといった大変位をインバー線の張替えや保護管の再設置を必要とせず連続的に測定できる。
- ・ 距離を測定するための電磁波は 1kHz 以下の周波数を使用しており、媒質中での反射、減衰がほとんど無いため、土（土被り）・水（冠水）・植生（密集した植生・倒木）の影響が無い。

本システムは緊急災害現場での利用を考慮し、以下の点に留意し開発を行うこととした。

- ・ 危険な現場への設置が可能な変位センサの大きさ、寸法、重量とする。
- ・ 変位センサ（送信器）は電源（電池）を内蔵することとし、ワイヤレスとする。
- ・ 受信アンテナ、測定器は運搬が容易な寸法・重量とし、バッテリー駆動（商用電源を要しない）とする。

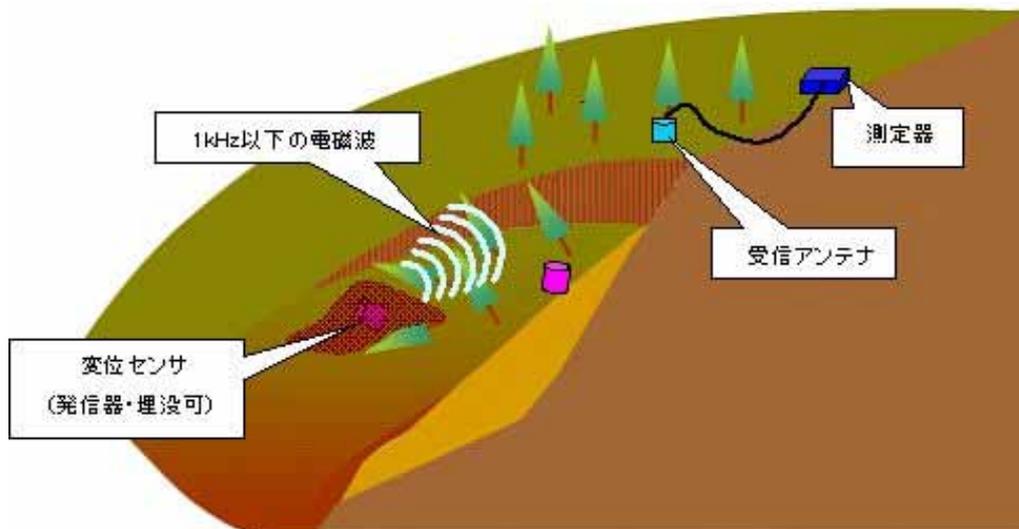


図 4.5.3 無線式距離計測システムの概要図（再掲）

(2) システムの仕様

無線式距離計測システムの仕様を以下に示す。

変位センサ (写真 4.5.1 参照)

- ・ 寸法 140 × 130mm
- ・ 質量 1.5kg
- ・ 基本動作 30 分または 60 分の周期で電磁波（低周波磁界）を発信する
- ・ 電源 リチウムバッテリー

(約 30 分間隔で 1 ヶ月の測定または約 60 分間隔で 2 ヶ月の測定)

無線式距離計測システムにおける変位センサでは小型・軽量化を目的として、基本原理では 3 個の励磁コイルを使用しているのに対し、1 個の励磁コイルで測定できるようにしている。そのために原理上、変位センサ内蔵の励磁コイル軸を常に鉛直方向に維持する必要がある。姿勢制御方法としてはジンバル構造が考えられたが全体の寸法が大型化してしまう問題点があった。そこで、変位センサを姿勢制御筐体内の液体に浮かべて変位センサ（励磁コイル軸）を鉛直方向に維持することとした。（図 4.5.4 ならびに写真 4.5.4 参照）

受信アンテナ (写真 4.5.2 参照)

- ・ 寸法 165 × 220mm
- ・ ケーブル長 最大 100m

測定器 (写真 4.5.3 参照)

- ・ 寸法 W300 × D240 × H100mm
- ・ 電源 内蔵充電式バッテリー 8 時間、外付バッテリー 1 ヶ月
- ・ 対応変位センサ台数 同時期に 3 台（測定する変位センサは途中変更可）
- ・ 基本動作 変位センサの電磁波の発信周期に同期して電磁波の強度を測定して距離に換算
測定結果は内部メモリに保存する
- ・ データ表示 液晶画面による測定結果、動作状況の表示
- ・ 外部出力 SD カードメモリまたは RS-232C を使用し、上位 PC にデータ転送可



写真 4.5.1 変位センサ外観



写真 4.5.2 受信アンテナ外観



写真 4.5.3 測定器外観

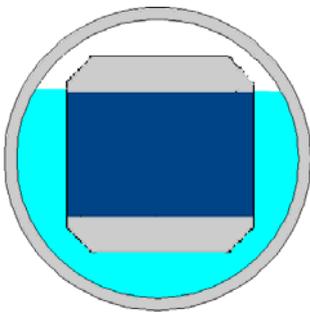


図 4.5.4 姿勢制御筐体の構造イメージ



写真 4.5.4 姿勢制御筐体外観
216 × 220mm

(3) システムの動作確認

製作した本システムの動作確認を坂田電機敷地（青梅市内保養施設）にて行った。

日時 2008年3月7日

場所 坂田電機(株) 青梅寮（写真4.5.5 参照）

方法 受信アンテナを基準に変位センサを図4.5.5に示す条件に設置し、距離を測定した。
測定結果はレーザ距離計による測量値と比較した。

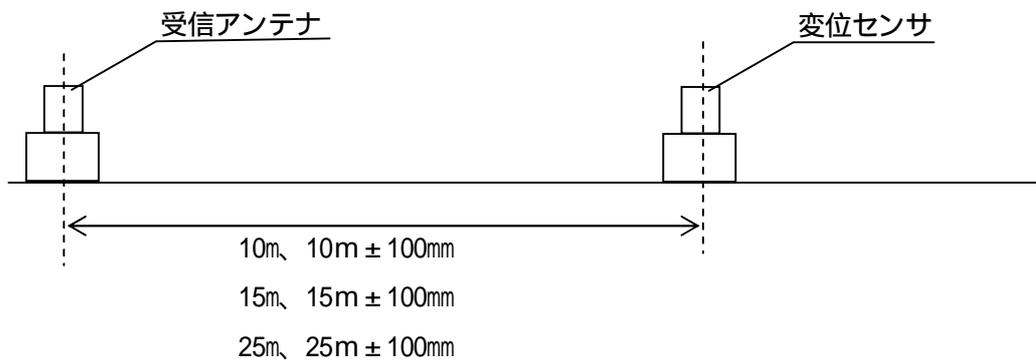


図 4.5.5 動作確認方法



写真 4.5.5 動作確認状況

表 4.5.1 ならびに図 4.5.6 に動作確認結果を示す。測定した距離には 15m で 0.4%以下、20m で 1.2%以下、25m で 2.8%以下という誤差が生じ、測定距離が長くなるにつれて短く測定される傾向が見られた。上記より本システムによって大変位の地すべり変位を非接触で誤差 2.8%以下で測定できる見通しが得られた。

表 4.5.1 動作確認結果

レーザ距離計による 測量値 (m)	測定値 (m)	誤差	
		(cm)	(%)
9.958	9.961	0.3	0.0
10.058	10.064	0.6	0.1
10.158	10.160	0.2	0.0
14.951	14.905	-4.6	-0.3
15.051	14.996	-5.5	-0.4
15.151	15.114	-3.7	-0.2
19.905	19.672	-23.3	-1.2
20.005	19.761	-24.4	-1.2
20.105	19.913	-19.2	-1.0
24.910	24.227	-68.3	-2.7
25.010	24.303	-70.7	-2.8
25.110	24.398	-71.2	-2.8

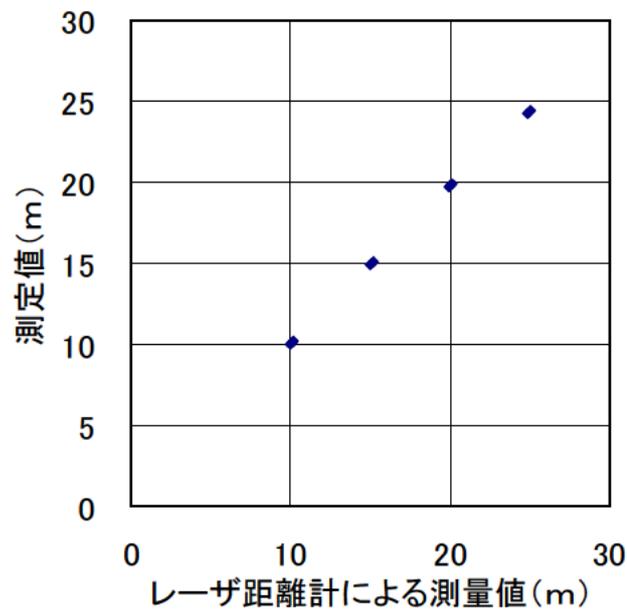


図 4.5.6 距離測定結果

(4) 土木研究所 土工実験場における地すべり模擬実験

本実験は土木研究所の土工実験場を使用して、覆土や冠水を伴う地すべり状態を模擬的に作り出して本システムの測定性能を確認した。

実験場所：土木研究所 土工実験場（写真 4.5.6 参照）

実施日：2008年5月23日

- ・ 受信アンテナを盛土頭部に設置し、変位センサを図 4.5.7 で示すように図 4.5.7 中①から⑤の位置に順次移動させて距離を測定した。
- ・ 変位センサと受信アンテナの距離はレーザ距離計で確認し、測定結果との比較を行った。
- ・ 図 4.5.7 中②の位置では地表に埋設した樹脂ボックス中に変位センサを配置して、水と土を順次入れて冠水と覆土の状態を模擬的に作り出した。



写真 4.5.6 土工実験場 全景

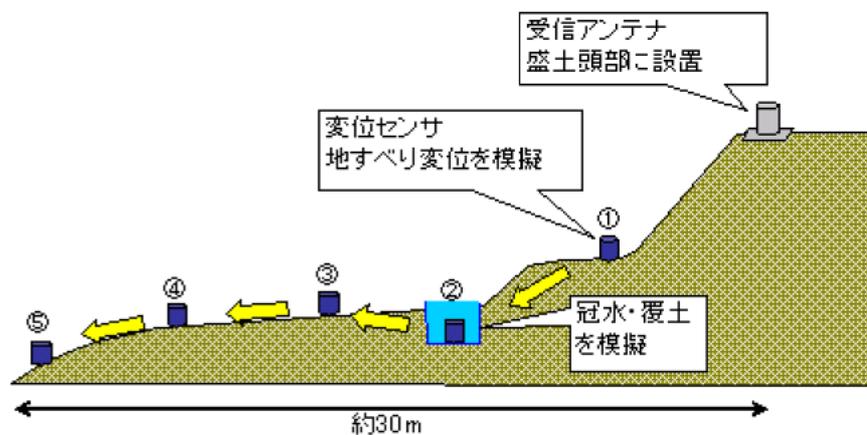


図 4.5.7 変位センサ移動方法

表 4.5.2 ならびに図 4.5.8 に距離測定結果を示す。測定した距離は 17m 以下で 0.6%以下、約 30 mで 4%という誤差が生じた。本地すべり模擬実験の距離の測定結果では測定距離が長くなるにつれて長く測定される傾向が見られた。この傾向は先に実施した坂田電機青梅寮における動作確認結果と逆の傾向であり、原因の追究と補正方法の検討が必要である。しかし、図 4.5.7 中の位置で覆土、冠水を模擬した測定において、距離の測定値の差は 0.1%であり、本システムによって地すべり変位を覆土、冠水がある条件でも測定できる見通しが得られた。(測定状況写真 4.5.7、写真 4.5.8、写真 4.5.9 参照)

表 4.5.2 距離測定結果

位置・状況		測量距離 (m)	測定距離 (m)	誤差 (%)	受信アンテナからの見下ろし角度 (°)	備考
	地表	11.04	11.04	0.0	25.0	初期値
	地表	16.69	16.59	-0.6	22.5	
	冠水	16.69	16.60	-0.5	22.5	
	覆土	16.69	16.59	-0.6	22.5	
	地表	19.98	20.23	1.2	19.5	
	地表	25.38	25.93	2.2	17.0	
	地表	29.29	30.45	4.0	16.0	

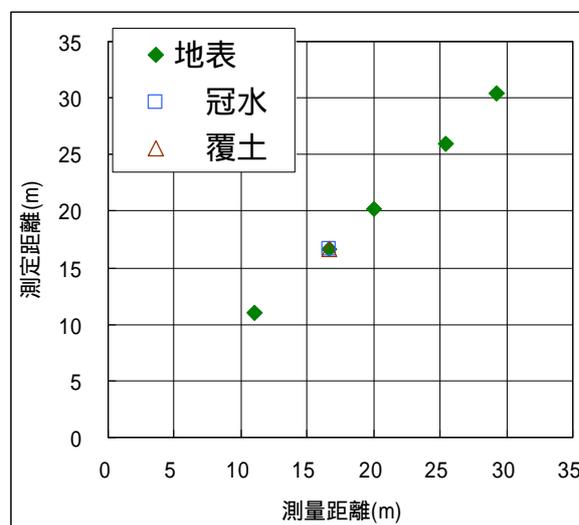


図 4.5.8 距離測定結果



写真 4.5.7 図 4.5.7 中 の位置 変位センサ周囲が空気の条件



写真 4.5.8 図 4.5.7 中 の位置 変位センサ周囲が水の条件（冠水を模擬）



写真 4.5.9 図 4.5.7 中 の位置 変位センサ周囲が土の条件（覆土を模擬）

(5)測定値の安定性確認実験

本システムの距離測定値のバラツキ、安定性を確認する目的で連続測定を行った。

日時 2008年9月9日より10月3日

場所 坂田電機㈱ 青梅寮 (写真4.5.10 参照)

方法 受信アンテナを基準に変位センサを図4.5.9に示す条件に設置し、連続的に距離を測定した。カルマンフィルタ^{*1}処理を行い、その効果を確認した。

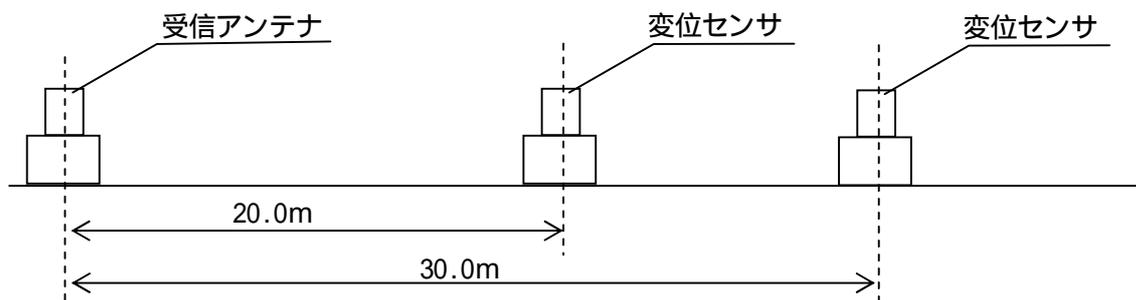


図4.5.9 機器配置図



写真4.5.10 実験状況

図4.5.10に距離20.0mにおける距離の測定結果を示す。図4.5.11に距離30.0mにおける距離の測定結果を示す。いずれも受信アンテナと変位センサの距離が15.0mのときの信号受信強度を基準として、距離を求めた結果で、2008年9月9日より10月3日までの間、30分間隔で測定を行った。

図4.5.10において緑色で示している値、ならびに図4.5.11において青色で示している値が測定値である。距離20.0mでの測定値の平均値は20.31m、距離30.0mでの測定値の平均値は30.12mであり、いずれもレーザー距離計で測定した結果に比べ距離が長く測定される傾向が見られた。この

ような傾向は土木研究所土工実験場での実験結果と同様な傾向であり、今後原因の追究と補正方法の検討が必要である。

また、いずれの測定値にもバラツキが生じている。これは周囲の商用電源等の影響によるノイズの影響である。測定値の標準偏差は距離 20.0m において 1.9cm、距離 30m において 8cm であった。測定距離が長くなるに従い、測定器において受信される信号が小さくなるため、相対的にノイズの影響が大きくなり、バラツキが大きくなる。

図 4.5.10 ならびに図 4.5.11 においてピンク色で示している値はカルマンフィルタによる推定値を求めた結果である。カルマンフィルタによる推定値の標準偏差は距離 20.0m において 0.4cm、距離 30m において 1.1cm であり、ノイズによる測定値のバラツキが低減されていることがわかる。本システムにおいて測定結果にカルマンフィルタを適用することで測定値のバラツキが低減できることがわかった。今回の実験では変位センサと受信アンテナの距離が変わらない条件でのカルマンフィルタの評価を行ったが、今後は変位センサと受信アンテナの距離が変化する場合で評価を行うことが課題である。

*1 カルマンフィルタ： 直前までの情報と、たった今取得したデータをもとに、もっとも適切なシステムの状態を推定する手法。誤差のある計測値を用いて、ある動的システムの状態を推定あるいは制御するための、無限インパルス応答フィルタの一種である。レーダーやコンピュータビジョンなど、工学分野で広く用いられる。計測値の時間変化を支配する法則を活用して、計測値の現在（フィルタ）、未来（予測）、過去（内挿あるいは平滑化）を推定することができる。

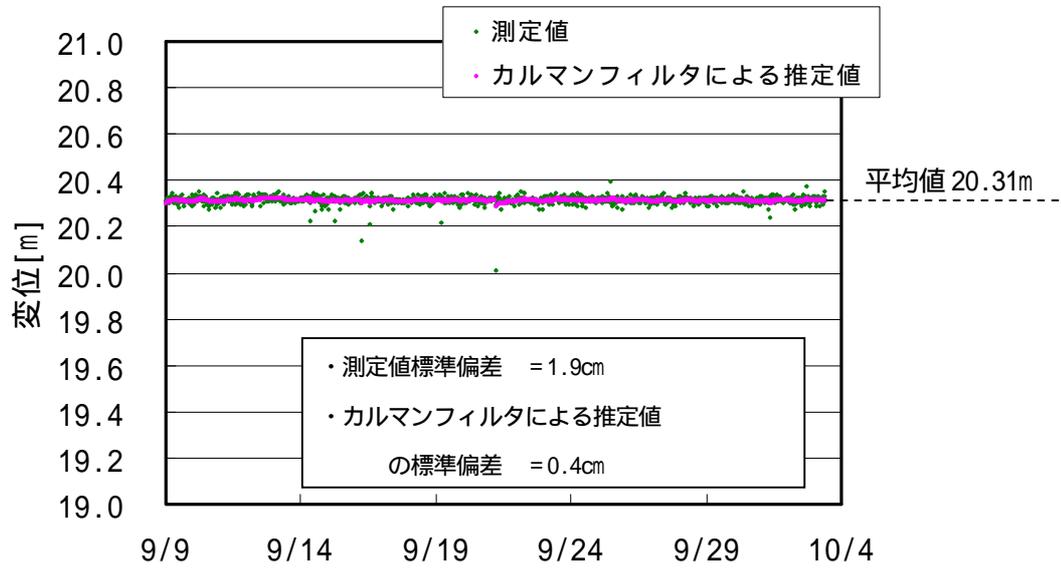


図 4.5.10 距離 20.0m における連続測定結果

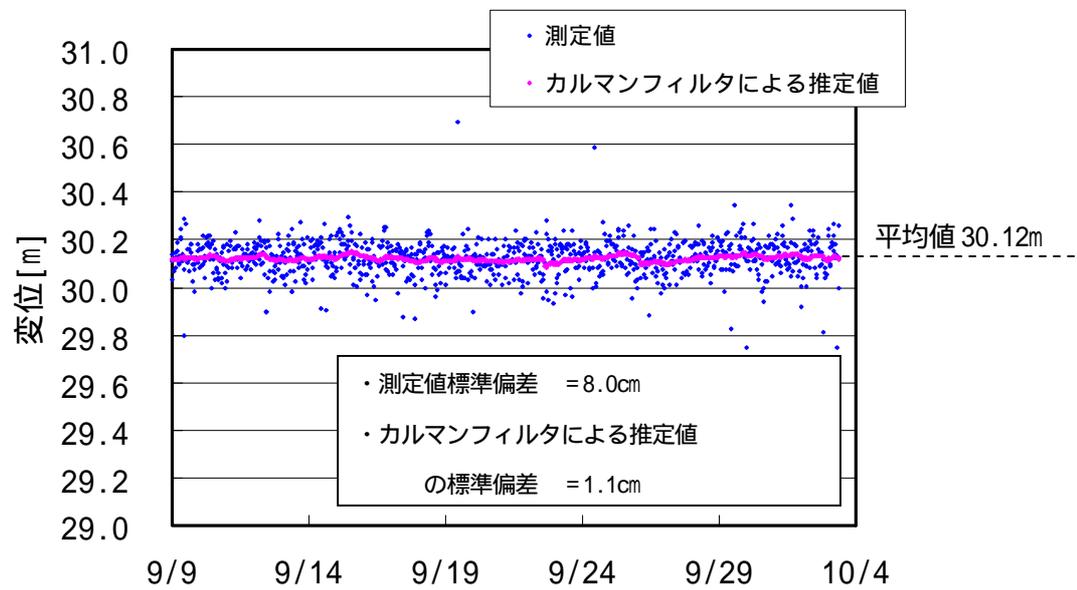


図 4.5.11 距離 30.0m における連続測定結果

4.5.4 厳しい現場条件の地すべりでの活用方法

実際の地すべり現場を想定し、設置計画をおこなった。ここでは冬季の積雪のため現場内に約6ヶ月立ち入れないことを条件に計画を立案した。検討を行った機器配置例を図4.5.12に示す。

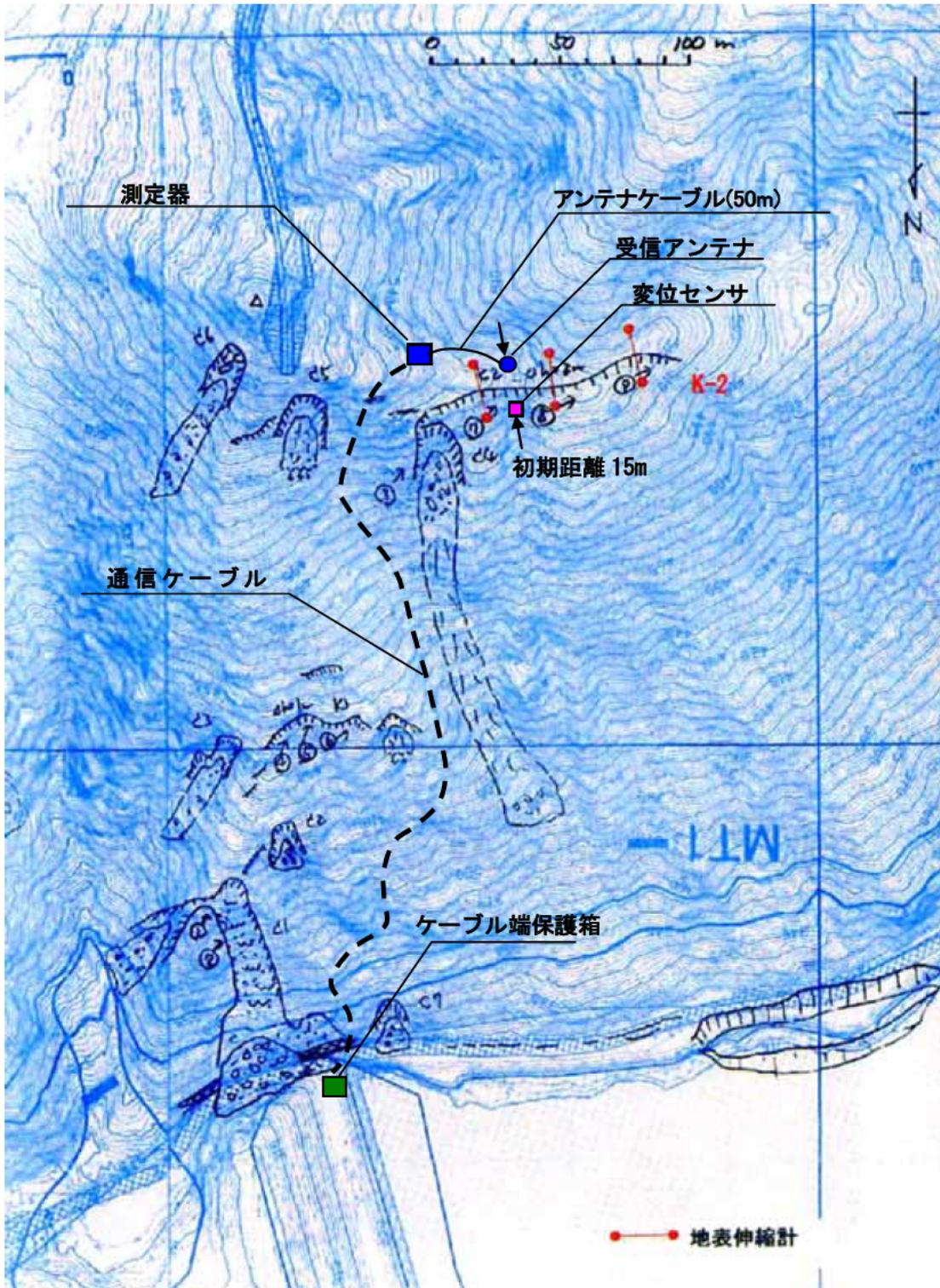


図 4.5.12 機器配置例

(1) 機器の設定と設置方法

変位センサ

- ・ 変位センサは姿勢制御ケース内に配置する。姿勢制御ケースは地表に埋設して土塊と共に変位させる。
- ・ 6ヶ月のバッテリー寿命を考慮し、4時間30分ピッチで信号を発信（測定）する。

受信アンテナ

- ・ 基準となる位置（地すべりブロック上部）に配置する。
- ・ 測定器と接続するためのケーブルは斜面での運搬を考慮して標準の50mとする。
- ・ 雪崩による移動がないように土嚢と杭で流れ止めをする。

測定器

- ・ 測定結果は内部メモリに保存する。
- ・ 内部メモリに保存された測定結果は通信ケーブル（500m）を介して作業員が立ち入れるダム天端においてノートPCにデータ転送できるようにする。
- ・ 本システムの電源はバッテリーとすることを標準としているが、6ヶ月間の無人運用を考慮して電源をAC100Vとする。
- ・ 測定器および電源装置は防水性能及び耐衝撃性能を有する樹脂ボックスで保護する。設置は現場状況に応じ、立ち木に固定するか、地表に埋設する。
- ・ 測定器ならびに電源装置はそれぞれ樹脂ボックス内に配置し、それぞれ10kg以下として背負子により運搬が可能ないようにする。

通信ケーブル

- ・ 測定器から右岸天端まで通信ケーブルを敷設する。（400～500m）
- ・ 通信ケーブルは樹脂管で保護する。
- ・ 立ち木または木杭で流れ止めを行う。
- ・ 右岸天端側のケーブル端は樹脂ボックスで保護する。（データ回収時のみノートPCに接続する。）

避雷対策

- ・ 電源ケーブル、アンテナケーブルならびに通信ケーブルは避雷器を設けて避雷対策を行う。

(2)測定方法

①測定

- ・ 変位センサは電源投入（バッテリー接続）時より 4 時間 30 分周期で発信する。
- ・ 測定器は自動的に変位センサの発信周期に合わせて起動し、変位センサから発信される信号の受信強度を測定する。
- ・ 受信強度の測定結果より、変位センサと受信アンテナ間距離を演算して内蔵メモリに保存する。
- ・ 初期値（基準となる距離と受信電圧、4.5.2 項の本システムの測定原理参照）は設置現場または事前に変位センサと受信アンテナを既知の距離で配置して測定を行い、その結果を初期値として測定器に登録する。

②測定器の操作・データ回収

- ・ 測定器には 4 つのキーと液晶画面(写真 4.5.11 参照)があり、図 4.5.13 に示すメニューによって、測定や測定データの回収を行うことができる。
- ・ 測定器の内部メモリに保存された測定データ（測定日時と変位センサと受信アンテナの距離）は SD メモリカードに保存することができる。
- ・ CSV ファイル形式で回収した測定データは（Microsoft 社）エクセル等の表計算ソフトでデータ整理を行う。

③遠隔地でのデータ回収

- ・ 本現場の例では冬季に積雪のため現場内に約 6 ヶ月立ち入れない。測定器に保存されたデータは右岸天端に配置した通信ケーブル（端）をノート PC（専用ソフトウェア）に接続して回収する。
- ・ PC に回収したデータは測定日時と変位センサと受信アンテナの距離が CSV ファイル形式で保存されており、（Microsoft 社）エクセル等の表計算ソフトでデータ整理を行う。



写真 4.5.11 測定器の操作キーと液晶画面

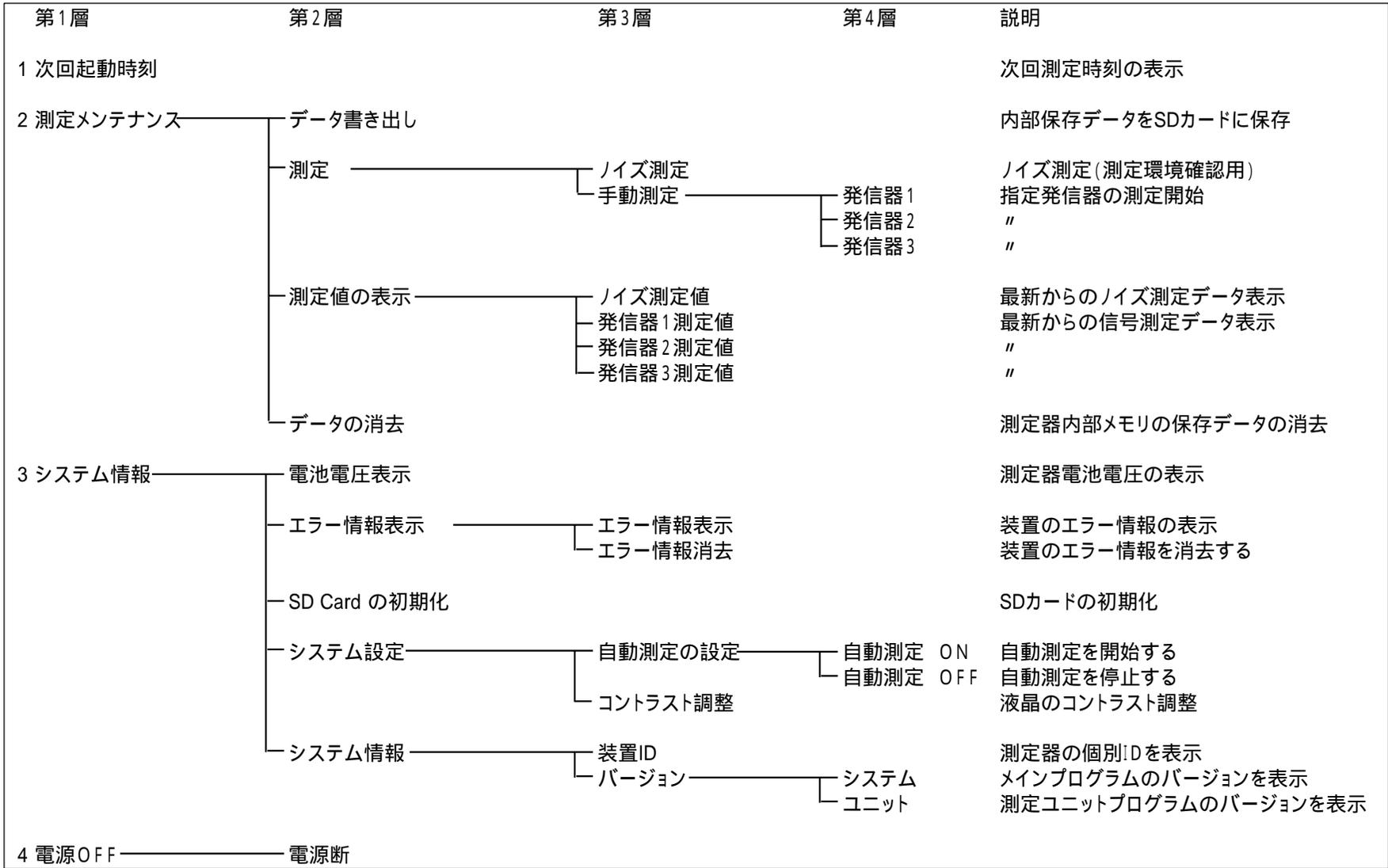


図 4.5.13 測定器の操作メニューと内容

4.5.5 まとめ

- (1)本研究では地すべり変位を非接触で土中・水中においても計測できる「無線式距離計測システム」を開発した。システムの特徴は以下のとおりである。

非接触であり、インバー線・塩ビ保護管等の構造物が不要なため、10～30mといった大変位をインバー線の張替えや保護管の再設置を必要とせずに連続的に測定することができる。

距離を測定するための電磁波は1kHz以下の周波数を使用しているため、媒質中での反射、減衰の影響が無いため、土（土被り）・水（冠水）・植生（密集した植生・倒木）の影響を受けずに距離の測定ができる。
- (2)土木研究所土工実験場における地すべり変位の模擬実験を行った結果、変位センサに覆土、冠水がある条件でも、地すべり変位を測定できる見通しが得られた。
- (3)本システムにカルマンフィルタを適用することで、距離20.0mにおいて標準偏差 σ が0.4cm、距離30mにおいて標準偏差 σ が1.1cmで測定できることがわかった。今後は変位センサと受信アンテナの距離が変化する条件で評価を行うことが課題である。
- (4)本システムでは距離の測定値は測定距離が長くなるに従い誤差が累積する傾向が見られた。今後はこの原因追求と補正方法の検討を行う。
- (5)実際の地すべり現場を想定し、設置計画をおこなった。今後は上記(3)(4)の課題の検討を進めると共に、実フィールドにおける検証実験を実施し、無線式距離計測システムの実用化を図る。

4.6 接点信号発信器を応用した崩壊検知センサ

4.6.1 目的

地すべり発生地域や崩壊・崩落の危険性の高い斜面地域において、安全確保の為にその動態を監視しようとした場合、観測機器をその危険区域に立ち入って設置しなければならない。更に測定器までの長い信号ケーブルを同時に配線する作業は危険な作業である。そこで、観測機器設置や信号ケーブル配線を安全に行うことが出来、且つ危険区域内の作業が短時間で終了可能な観測機器の開発が望まれている。

本研究では、地すべりを面的に捕らえることを目的として、地すべり周囲に多数のセンサの配置を可能とする安価な警報装置の開発とその設置方法を開発する。ただし、本共同研究は、2年間という限られた期間であるため、接点信号発信器を応用した崩壊検知センサを開発することを前提とした。

4.6.2 計測の原理及び基本モデル仕様

(1) 計測原理

計測原理は、崩壊検知センサと同様に斜面崩壊の予想される箇所に傾斜センサを設置し、傾斜スイッチの ON 信号を近距離無線で受信・判別して災害発生を検知するものである。特徴は多点の傾斜センサが同時に警報発信しても信号を個別に識別できる機能を有していることである。

接点信号発信器を応用した崩壊検知センサは、転倒接点式の汎用型検知装置として東海旅客鉄道（株）と（株）共和電業で共同開発し、鉄道事業者を主体に多くの災害危険箇所へ適用されている。

(2) 基本モデル仕様

- ・検出方式：

- 転倒式：センサが約 35° 以上傾斜すると反応

- 変位式：センサに連結した変位伝達が切断 or 標点距離短縮により反応

- ・使用環境条件：温度：0～50（但し、結露なきこと）

- ・使用周波数帯：426MHz 帯（特定小電力無線方式）

- ・電波到達距離（参考）：見通し環境で約 100m

* 到達通信距離は使用環境（地形、気象など）により異なる。

障害物無しでは、250m 到達を検証した。

①転倒式

センサが転倒することによって傾斜スイッチの ON 信号を近距離無線で受信・判別して災害発生を検知し、信号を送信する。

外観寸法：W80×H160×D65

質量：約 380gf

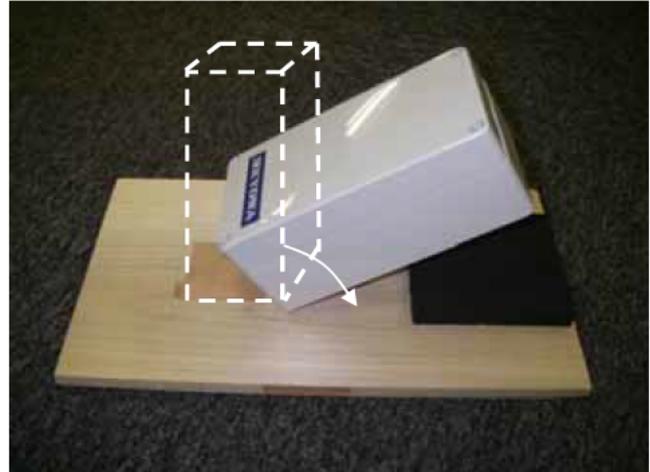


写真 4. 6. 1 崩壊検知センサ（転倒式）

②変位式

標点距離（2 点間）の変位を検出することによる ON 信号を近距離無線で受信・判別して災害発生を検知する。

外観寸法：W80×H160×D65

質量：約 400gf

【検知のプロセス】

(i) 変位杭が転倒

↓

(ii) 変位伝達線が切断

↓

(iii) センサ固定杭が転倒

↓

(iv) 変位杭・固定杭間距離縮小

↓

(v) 災害発生を検知

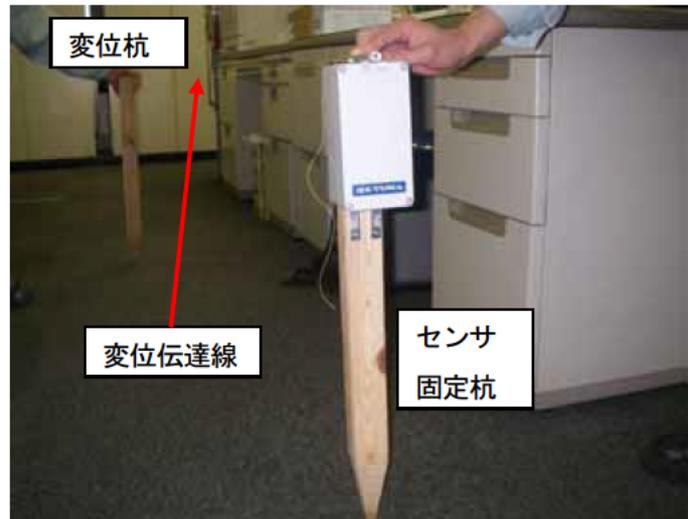


写真 4. 6. 2 崩壊検知センサ（変位式）

4.6.3 既往観測機器の観測が難しい地すべりへの応用

(1)基本仕様の検討

下記の条件に照らして、崩壊検知センサの基本仕様を検討する。

- ・センサの設置が容易かつ迅速に行える。
- ・センサ設置時に専門知識や特殊道具を必要としない。
- ・センサは短時間の設置あるいは、投げ込みで設置する。
- ・センサは投げ込みによる設置で自動的に起き上がる。(起き上がりこぼし)
- ・警報装置の操作が簡単で専門知識を必要としない。
- ・センサ部には商用電源や現場内配線を必要としない。
- ・挙動が発生した地点を特定可能にする。
- ・携帯電話等に異常発生を知らせる。
- ・ローコスト化のため、二次災害防止を目的とする。
- ・予防保全（累積変位・変動の経時把握）を目的としない。

検討の結果、崩落危険箇所への立ち入り時間短縮及び投げ込みによる設置が可能な起き上がり機能を有する転倒式センサへの改造を行うこととした。

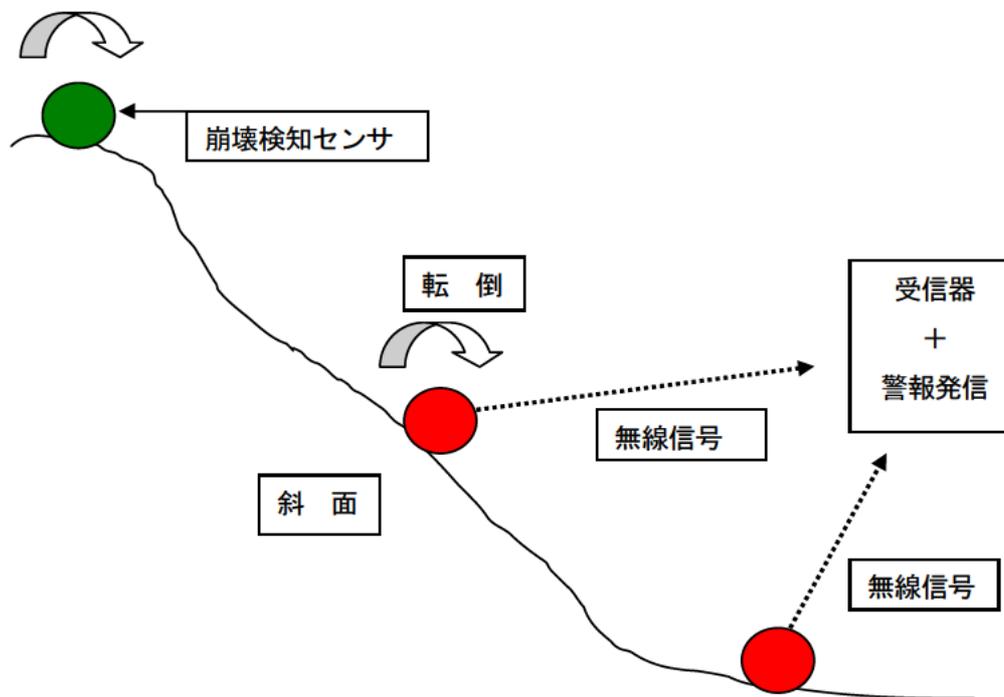


図 4.6.1 崩壊検知センサのイメージ

(2) 起き上がりこぼし型への改造（試作1号機（球体）の開発）

容器：発泡スチロール、プラスチック製

外観寸法：半割球体（直径 250mm）

重量：約 900gf

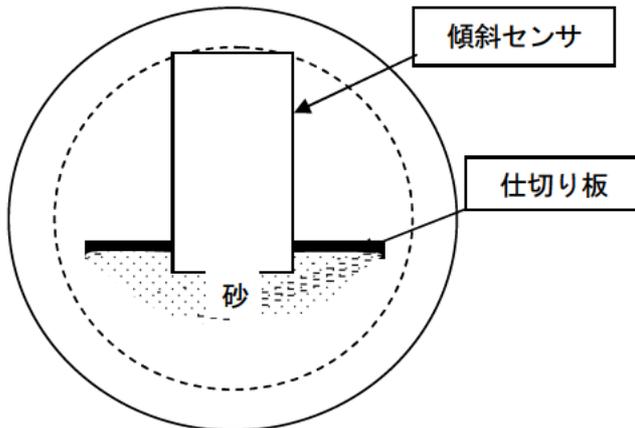


図 4.6.2 崩壊検知センサ
（起き上がりこぼし試作）



写真 4.6.3 崩壊検知センサ
（起き上がりこぼし試作）

(3) 起き上がりこぼしの小型・軽量化

試作1号機は、大型で重く、投げ込みによる設置には適さないため、下記のとおり小型・軽量化したものに改良した。

①小型改良1号機（卵形）

容器：プラスチック製

外形寸法：

下部：半割球体（直径 82mm、高さ 50mm）

上部：釣り鐘状（直径 82mm、高さ 70mm）

全高：120mm、直径 82mm

重量：230gf



写真 4.6.4 起き上がりこぼし小型・軽量化（卵形）

小型改良2号機（球体）

容器：プラスチック製

外形寸法：球体（直径 100mm）

重量：300gf



写真 4.6.5 起き上がりこぼし小型・軽量化（球体）

さらに、投げ込みによる設置の場合、プラスチック製では損傷の可能性が大きいので、容器は ABS 樹脂とし、形状も起き上がりし易い形状に改良した。

小型改良3号機（半球体）

容器：ABS 樹脂製

外形寸法：半球体

（直径 120mm, 高さ 90mm）

重量：約 700gf



写真 4.6.6 起き上がりこぼし小型軽量化（半球体）

4.6.4 改良機（小型改良3号機（半球体））の性能確認実験

下記(1)～(4)の性能を確認するための実験を実施した。

() 起き上がりこぼし原理の確認

- ・球体を転がしても投げ込んでも、元の状態に起き上がる（水平ゼロ復帰）

() 警報発令・警報解除傾斜角の確認

- ・球体を転がし始めた段階で傾斜センサが反応すること
（全方位に対して約 40° 以上傾斜すると警報信号発令）
（警報表示の状態）
- ・元の位置に起き上がると警報解除信号を発信すること
（起き上がる間に傾斜角約 30° を下回ると警報解除信号発令）
- ・傾斜状態が継続する場合、信号の発信形態は選択が可能であること
連続発信しない場合：電池消耗小＜現場実用向き＞
連続発信する場合：電池消耗大＜現場実用不向き＞

() 水中・土中からの警報発信の確認

- 水中 30cm の位置から接点信号の発信が可能であること
- 土中 30cm の位置から接点信号の発信が可能であること

() 耐衝撃性能の確認

- ・センサ容器をプラスチックから ABS 樹脂に変更し、実際の容器の落下実験を行い強度を確認すること。

土研構内公開実験（2008年4月24日）

【実験目的】

- ・センサを投げ込んだ場合に、正常（測定可能）な状態に起き上がることを確認する。

【実験内容】

1) 機能

- ・送受信が可能であること。
- ・異常信号（転倒していないのに転倒している状態）の発信がないこと。

2) 外観形状

- ・破損、亀裂、陥没等が無いこと。
- ・形状が変形していないこと。

【実験結果】

1) 機能

- ・約 30m離れた芝生及び土の部分に投げ込みによる設置で正常に起き上がり、センサが反応する（警報発令がある）ことを確認した。
- ・コンクリート面に自由落下をさせた場合、センサの反応が鈍かったものがあった。原因は、容器内部のセンサ固定脚の変形である事が判明し、固定方法の改良を行うこととした。

2) 外形形状

- ・芝生、土の部分及びコンクリート面に投げ込みを行ったが、外観形状の損傷は無かった。



写真 4.6.7 投げ込み実験



写真 4.6.8 コンクリート面への自由落下実験

転倒センサ実斜面投げ込み実験（2008年12月12日）

【実験場所】

- ・群馬県神流町 麻生小平地区地すべり（写真 4.6.9、図 4.6.3 参照）

【実験目的】

- ・実際の地すべり滑落崖上より、転倒センサを転がす、もしくは投げ込みをすることにより、どのように設置されるかを確認する。

【実験方法】

- ・1回目：転倒センサを転がすような感じで落とした。
- ・2回目：滑落崖途中に落ちる程度の強さで投げた。
- ・3回目：2回目よりも遠くへ投げ込んだ。（樹木に当たった）
- ・4回目：3回目とほぼ同様に遠くへ投げ込んだ。



写真 4. 6. 9 投げ込み実験地の状況



図 4. 6. 3 投げ込み実験地斜面のイメージ図

【実験結果】

- ・地表は落葉が約 10cm の厚さで堆積し、いわばふかふかの状態であった。
- ・各回とも、投げ込んで地面に設置した後に転がって止まった。
- ・各回とも、転倒センサが止まった状態では、上下方向は正しく設置されたと言える。
- ・ただし、水平ではなく、斜面勾配とほぼ水平に止まった。



写真 4.6.10 1 回目の設置状況
(転がすような形で投げ込み)



写真 4.6.11 2 回目の設置条件
(弱めに投げる形で投げ込み)



写真 4.6.12 3 回目の設置状況
(遠くへ投げる形で投げ込み、樹木に当る)



写真 4.6.13 4 回目の設置状況
(遠くへ投げる形での投げ込み)

【結論】

- ・斜面勾配と平行程度に傾いて設置されるものの、上下は正しく設置されることから、投げ込みによる設置は十分可能であることが確認された。

耐衝撃性実験

【実験目的】

- ・ センサを自由落下させどの程度の落下高さまで耐えるかを確認する。

【実験内容】

1) 機能

- ・ 落下及び投げ込み後に送受信が可能であること。
- ・ 落下及び投げ込み後に正常状態に起き上がること。(起き上がりこぼし機能)

2) 外観形状

- ・ 破損、亀裂、陥没等が無いこと。
- ・ 形状が変形していないこと。

【実験方法】

- ・ 落下高さ 4 段階 (2.5m, 5.0m, 7.5m, 10.0m)
- ・ 落下地点 4 箇所 (芝生、アスファルト、コンクリート)

【実験結果】

- ・ 下記に実験結果を示す。

表 4.6.1 自由落下実験結果

落下高さ (m)		土(芝生上)		アスファルト面		コンクリート面	
		姿勢・外観	通信状況	姿勢・外観	通信状況	姿勢・外観	通信状況
2.5m	1回目	良	良	良	良	良	良
	2回目	良	良	良	良	良	良
	3回目	良	良	良	良	良	良
5.0m	1回目	良	良	良	良	良	良
	2回目	良	良	良	良	良	良
	3回目	良	良	良	良	良	良
7.5m	1回目	良	良	亀裂発生	良	亀裂発生	良
	2回目	良	良	-----	-----	-----	-----
	3回目	良	良	-----	-----	-----	-----
10.0m	1回目	良	良	-----	-----	-----	-----
	2回目	良	良	-----	-----	-----	-----
	3回目	良	良	-----	-----	-----	-----

注) 亀裂発生：センサ容器に亀裂が発生



写真 4.6.14 落下実験状況（芝生上）



写真 4.6.15 落下実験状況（アスファルト、コンクリート）

【結論】

- ・土（芝生）の上では 10m までの落下に耐えられた。
（送受信は良。）
- ・アスファルト・コンクリート面では 5m までの落下に耐えられた。
（センサ容器に亀裂が入る。但し送受信は良。）

耐水圧実験

【実験目的】

- ・現場適用に向けてセンサ容器の防水処理方法を試行確認する。
- ・要求性能
 - * 防水性に優れている。(現場にて泥水に埋設を想定)
 - * 電池交換、再設置利用を考慮して防水処理が容易であること。

【防水加工方法】

- * 防水処理加工は下記の方法とする。

工程 テープシーラ巻き



工程 防水両面テープ巻き



工程 ビニルテープ巻き



写真 4.6.16 センサ容器防水処理加工

【実験結果】

- ・水深 1.5m に 5 時間連続した放置したところ、センサ内部への浸水はなかった。



写真 4.6.17 耐水実験

センサの転倒実験(1) (土質・形状の違いによる)

【実験目的】

- ・土質の違い、センサの形状違い、センサ重量の違いにより転倒開始角度が異なるか実験で確認する。

【実験方法】

- ・センサを土の上に水平に設置し、傾斜を徐々に与えて、センサが転倒又はスベリ始める傾斜角を確認する。(警報信号発令についても確認)
- ・土質の違い：2種類(粘性土、砂質土)
- ・形状の違い：4種類(半球、球形、円盤型、タマゴ型)
- ・重量の違い：各形状で2種類



写真 4.6.18 実験に使用した転倒センサの形状



写真 4.6.19 転倒実験(1) 状況(センサ傾斜状態)

【実験結果】

- ・実験結果を次表に示す。

表 4.6.2 転倒センサ転倒実験（1：土質 + 形状の違い）結果表

土の種類 + 設置方法	傾斜角	半球型センサ		球型センサ		円盤型センサ		タマゴ型センサ	
		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
		重い	軽い	重い	軽い	重い	軽い	重い	軽い
粘性土 + センサ上面に設置	10°	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常
	20°	正常	正常	20 倒	20 倒	正常	正常	正常	正常
	30°	正常	正常			正常	正常	30 倒	30 倒
	40°	40 倒	40 倒			40 倒	40 倒		
粘性土 + センサ上面にめり込ませ設置	10°	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常
	20°	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常
	30°	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常
	40°	正常	正常	40 警	正常	正常	正常	正常	正常
	50°	45 警	45 警		45 警	45 警	45 警	45 倒	45 倒
砂質土 + センサ上面に設置	10°	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常
	20°	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常
	30°	正常	正常	正常	30 倒	正常	正常	30 倒	25 倒
	40°	35 倒	40 警	35 倒		40 警	35 倒		
砂質土 + センサ上面にめり込ませ設置	10°	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常
	20°	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常
	30°	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常
	40°	40 警	正常	40 警	40 警	正常	正常	40 警	正常
	50°		45 警			45 警	45 警		45 倒

【結論】

実験の結果、下記知見が得られた。

(1) 形状の違いによる転倒のし易さの順番

・ 球型 タマゴ型 半球型（従来型） 円盤型

(2) 土質の違いによる転倒のし易さ

・ 砂質土よりも粘性土の方が転倒し易い

(3) 重量による転倒のし易さ

・ 明確な差はない

(4) 複数台のセンサを同時に転倒させた時の受信器の作動状況

- ・ 同時転倒は 2 台まで判定可能である。
- ・ 1 台毎連続の場合には正常に作動する。
- ・ 転倒センサを順次正常状態に復帰した時には正常に作動する。

センサの転倒実験(2)(転倒センサのバランス実験)

【実験目的】

- ・センサの重量及びバランスの違いにより転倒開始角度が異なるか否かを確認した。

【実験内容】

- ・センサ容器内部に鉄片及び粘土を入れ、全体重量を調節する。
- ・鉄片及び粘土の固定位置を容器の上部又は下部に移動し重量バランスを変化させる。



写真 4.6.20 センサ転倒状況

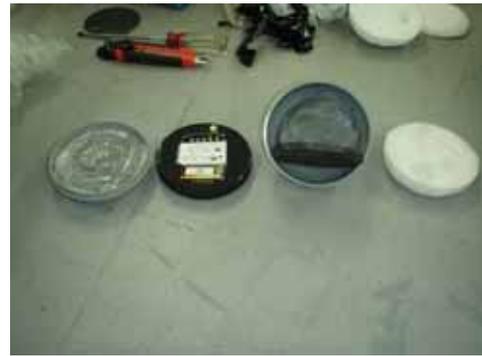


写真 4.6.21 センサ内部状況

【実験結果】

- ・下記に実験結果を示す。

表 4.6.3 転倒センサ転倒実験(2: バランスの違い) 結果表

センサ番号		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
センサ重量(g)		700	700	700	700	700	700	1070	1070
センサ容器重量比(上:下)		0.1:1	0.1:1	3.7:1	3.7:1	1.8:1	1:1	3.3:1	2.1:1
粘性土 + センサ上 面に設置	10°	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常
	20°	正常	正常	倒・警	正常	正常	正常	正常	正常
	30°	正常	正常		倒・警	倒・警	正常	倒・警	倒・警
	40°	倒・警	倒・警				倒・警		
粘性土 + センサ上 面にめり込ませる	10°	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常
	20°	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常
	30°	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常
	40°	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常
	45°	倒・警	倒・警	倒・警	倒・警	倒・警	倒・警	倒・警	倒・警

【結論】

- ・センサ容器上部と下部の重量比が2倍以上あれば、30°以上で転倒する。
- ・センサ全体重量が軽い方が転倒し易い。
- ・センサの設置は、センサが安定する程度で土にめり込ませない方が転倒し易い。

4.6.5 開発品仕様

【検知装置の特長】

- ・ 専門知識や特殊な道具は、不要。
- ・ 短時間で設置可能。
- ・ 挙動が発生した地点を特定可能。
- ・ センサは電池駆動のため、現場内の配線が不要。
- ・ センサと信号受信装置との通信は近距離無線で行える。

見通し距離で約 100m まで・障害物がない場合は約 200～250m まで到達可能。

- ・ 信号受信装置の接点出力により携帯電話等に異常発生を知らせる。(オプション)

受信先設定アドレス：最大 10 箇所

(受信器の機種選択により 4 箇所、20 箇所、30 箇所仕様あり)

- ・ ローコスト

【崩壊検知センサ仕様】

- ・ 検出方式： センサボックスが約 40 度以上傾斜すると反応する。
* 転倒式接点に一本化。
- ・ 使用周波数帯： 426MHz 帯 (特定小電力無線方式)
- ・ 電波到達距離 (参考)： 見通し環境で約 100m (地形、設置方法により異なる)
- ・ 電波発信方式： 転倒により接点検出したときに信号を 1 回発信する。
- ・ 電源： DC9V アルカリ乾電池
- ・ 電池寿命 (参考)： 約 2 年 (1 日 10 回送信、常温時)
- ・ 使用温度範囲： 0～50 (結露ないこと)
(0 以下は電池性能範囲により使用出来ない場合がある)
- ・ 収納ケース： 材質：ABS 樹脂 (半球形)
保護等級：IP67 相当 (防水性能)
- ・ 外観寸法： 半球体 (直径 120mm、高さ 90mm)
- ・ 重量： 球体 700gf



写真 4.6.22 崩壊検知センサ (起き上がりこぼし)

【信号受信装置仕様】

- ・使用環境条件： 温度：0～50℃（但し、結露なきこと）
- ・電波到達距離（参考）： 見通し環境で約 100m（地形、設置方法により異なる）

信号受信装置（汎用型）

（警報個別出力 10 回路タイプ使用時：参考）

- ・異常を検知すると、信号を発信した
センサの設置場所（区域）の番号と、
個々のセンサに割り当てられている
番号を表示する。

- ・区域登録：最大 10 区域
- ・センサ登録：最大 30 台（基本 10 台）

（使用例）

- ・各区域に 1 台のセンサを登録。
- ・1 区域に複数台のセンサを登録。
- ・区域、識別登録例：10 区域、識別 10 台

（1 区域×センサ 1 台配置）

- ・電源：AC100V 50/60Hz
または DC10～18V 0.35A

- ・外観寸法：W240×H170×D54

- ・重量：約 1.3kgf

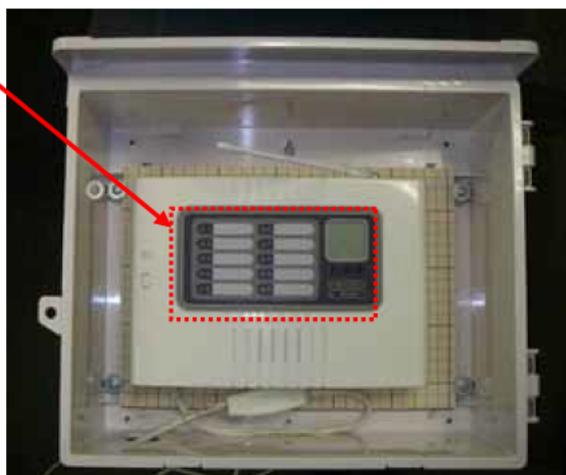


写真 4.6.23 信号受信装置（汎用型）

信号受信装置（簡易型）

（警報個別出力 4 回路タイプ使用時：参考）

- ・区域登録：最大 4 箇所
- ・センサ登録：最大 4 台



写真 4.6.24 信号受信装置（簡易型）

警報メール発信器

- ・入力信号：最大 8 点
(接点信号)
- ・Eメール発信箇所：最大 10 箇所
(通報先メールアドレス)
- ・メール内容
(警報発令、現状復帰、電池切れ、故障)



写真 4. 6. 25 警報メール発信器

警報接点切替器：PC 転送器

- ・警報表示ポイント：基本 10 点
(接点信号)

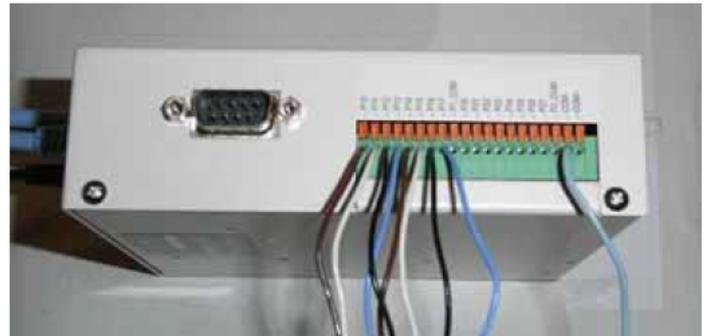


写真 4. 6. 26 警報接点切替器

PC：警報位置表示画面

- ・警報位置表示：基本 2 段階
(正常：緑、転倒：赤)

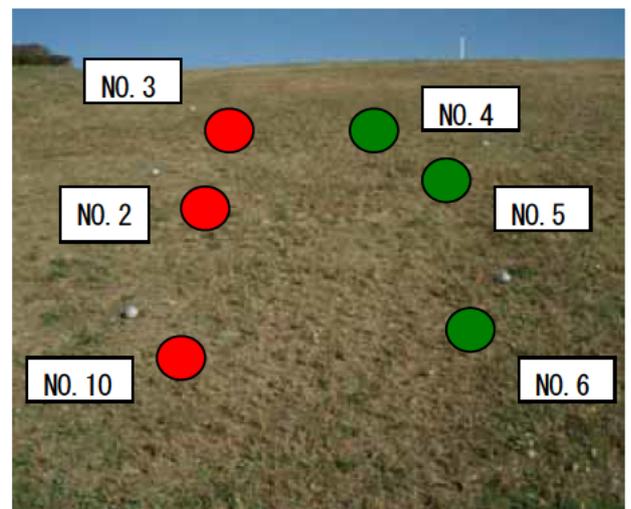


写真 4. 6. 27 斜面崩壊位置表示画面

4.6.6 厳しい現場条件の地すべりでの活用方法

(1) 活用方法

立ち入りが厳しいきわめて危険な斜面崩壊・地すべり地に迅速に検知センサを設置し、広い範囲の異常（地表変動の発生）をいち早く検知し、無線通信により地表変動の発生を伝達することにより、重大な二次災害の未然防止に役立てる。

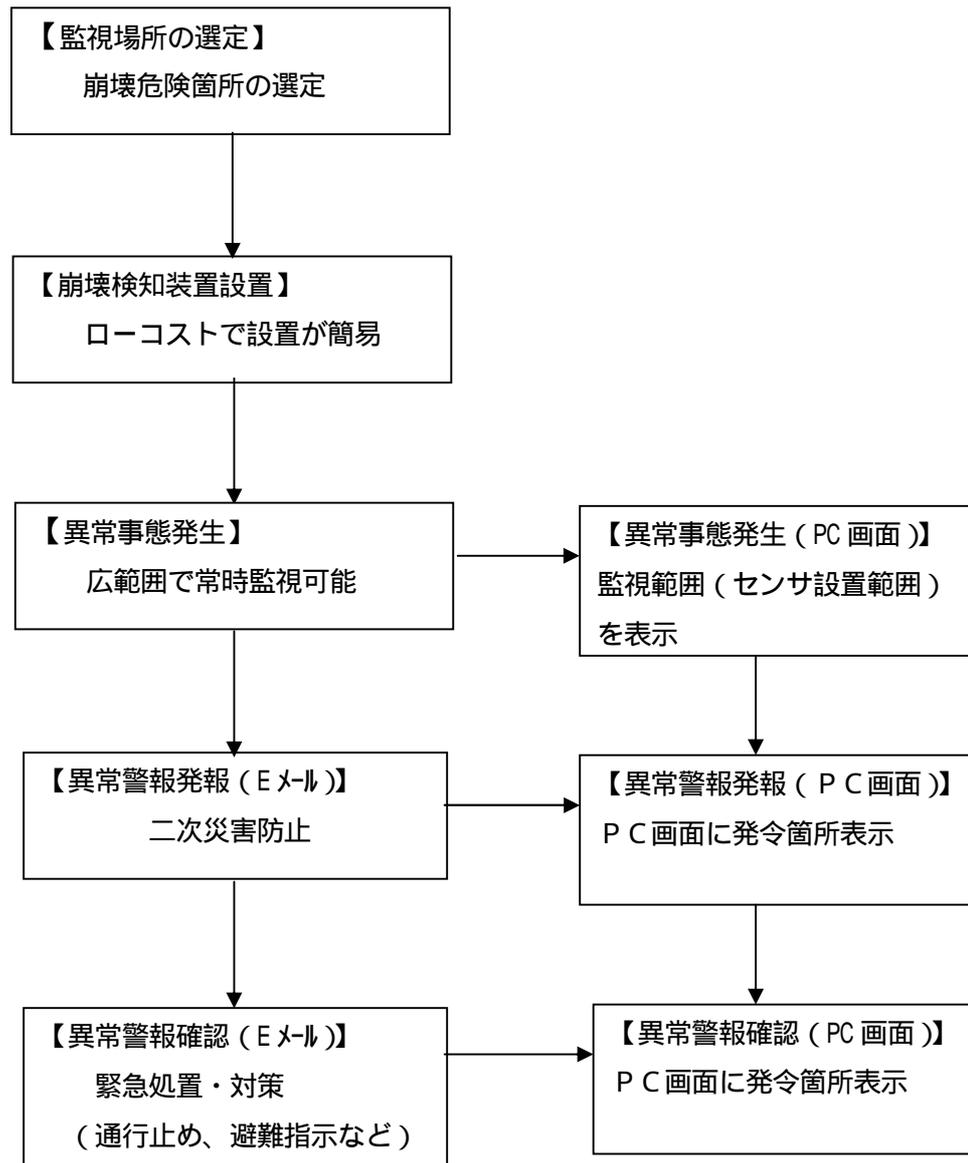


図 4.6.4 崩壊検知センサの活用フロー

(2) 活用基本イメージ

<基本配置>

検知装置の基本イメージ (配置計画例)

平面配置測点数：個別識別 1～10 点 (基本)、1～20 点、1～20 点
(受信器の機種により選択可能)

<配置計画例-1>

(広範囲に適用する場合等：10 点 (基本))

地すべり区域外周部崩壊：10 点

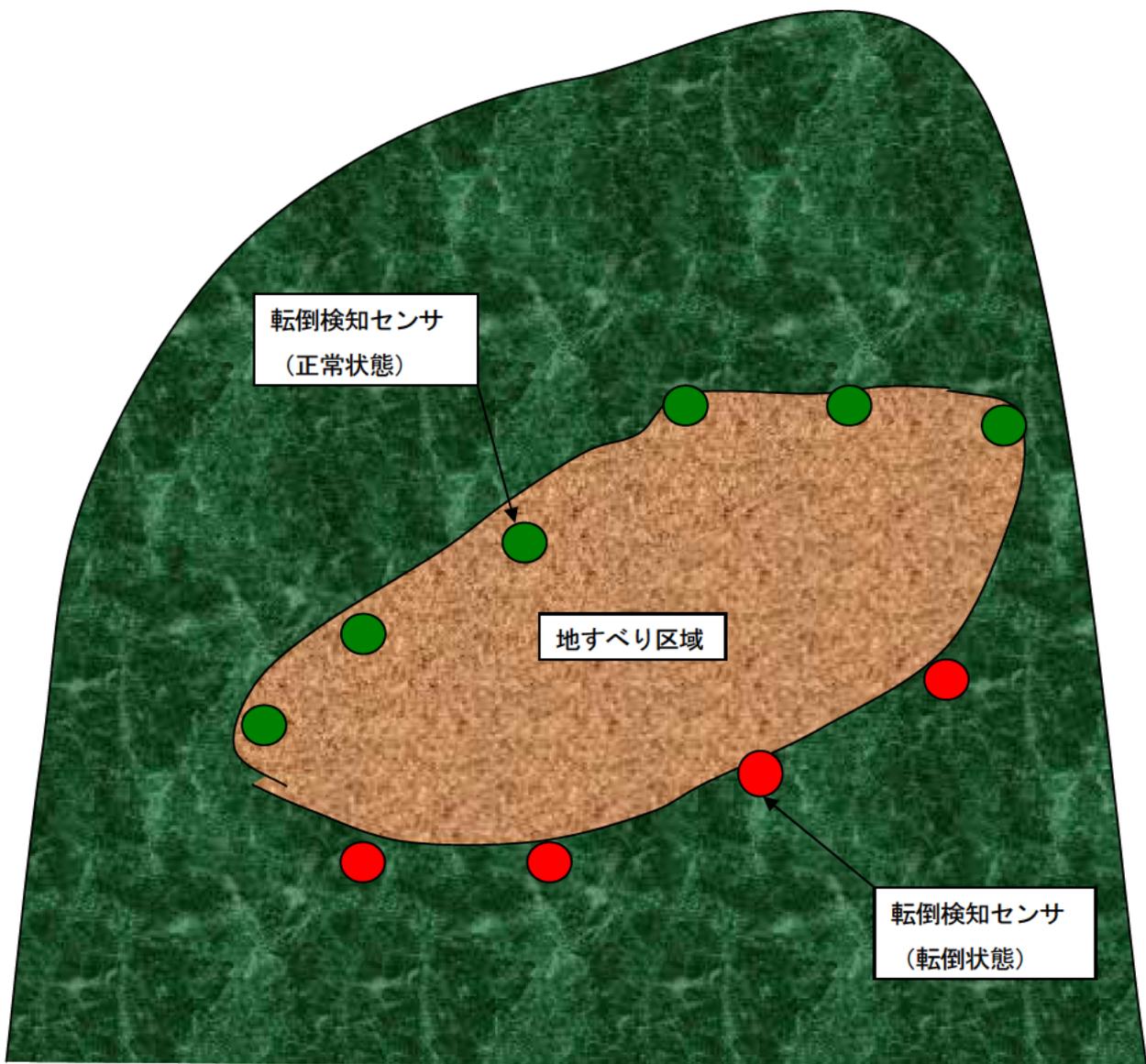


図 4.6.5 崩壊検知センサ活用基本イメージ-1

<配置計画例-2>

(道路を寸断する小崩壊に適用する場合等：10点)

崩壊部先端区域：10点

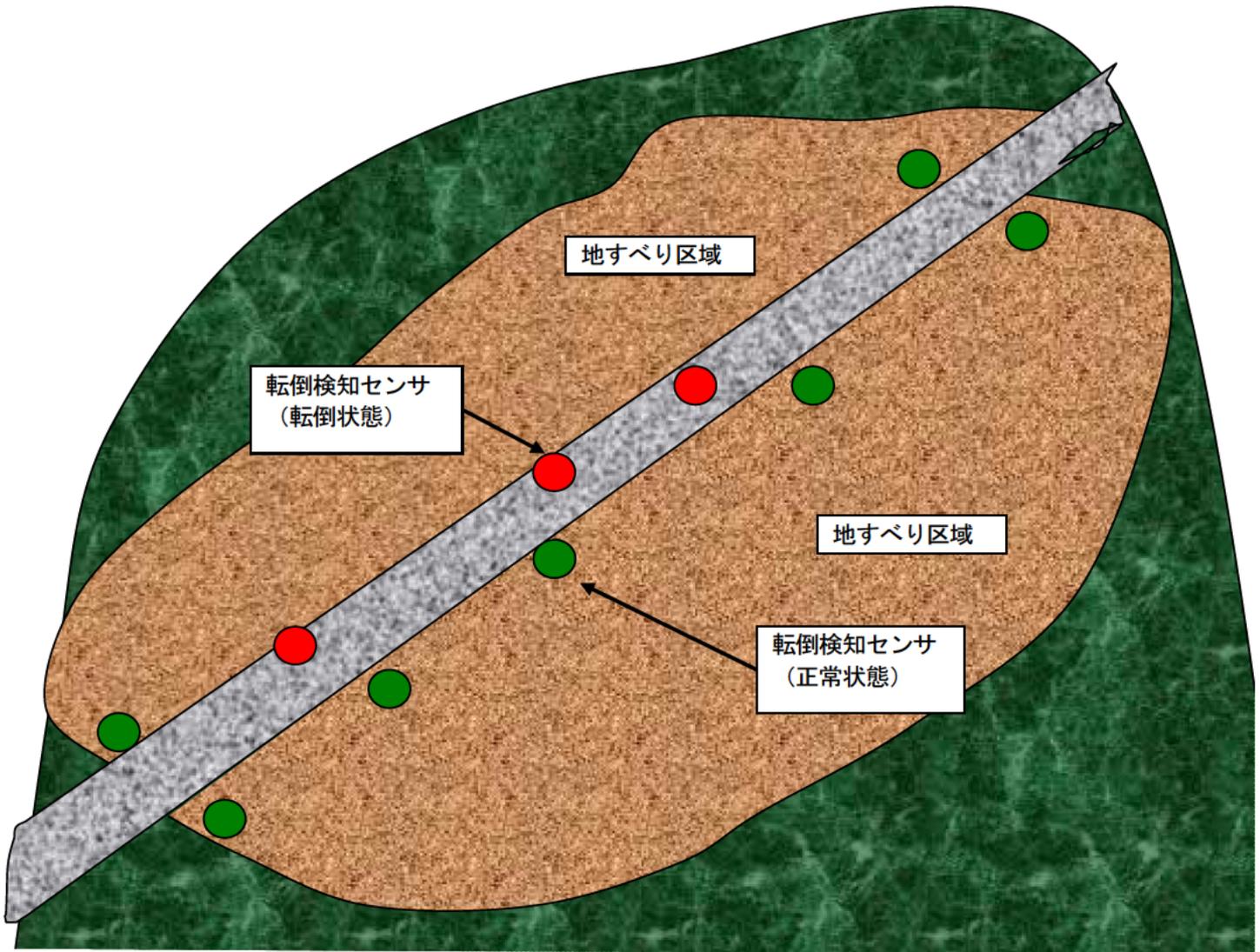


図 4.6.6 崩壊検知センサ活用基本イメージ-2

<配置計画例-3>

(岩盤崩落・転落する場合等：10点)

崩落岩、周辺付近：10点

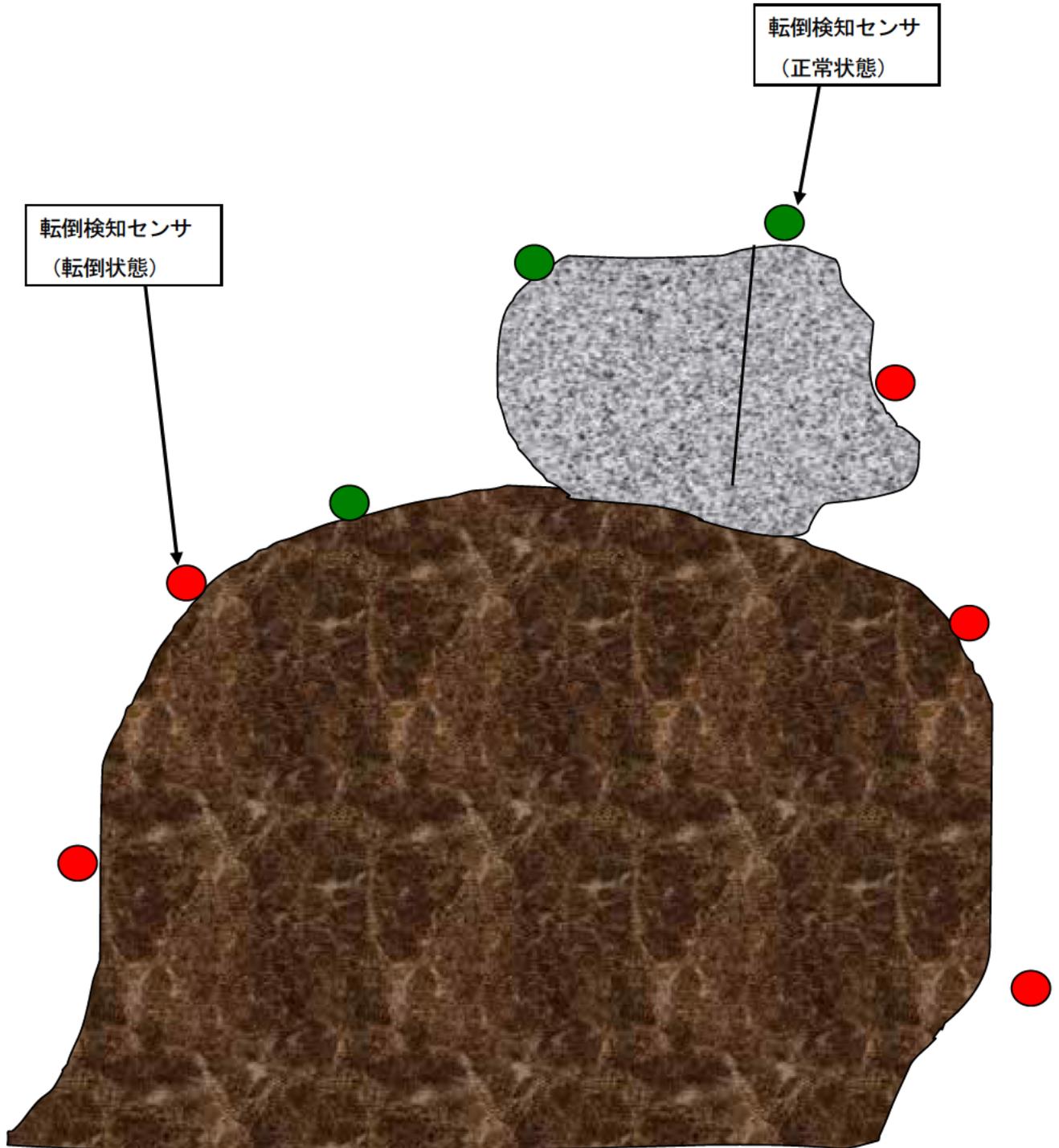


図 4.6.7 崩壊検知センサ活用イメージ-3

4.6.7 まとめ

(1) 本研究では、立ち入りが厳しいきわめて危険な斜面崩壊・地すべりに投げ込みや短時間で設置ができる転倒式の「崩壊検知センサ」を開発した。その特徴は以下のとおりである。

転倒センサは約 40° 以上傾斜すると警報信号を発信し、それ以下に戻ると警報解除信号を発信する。

警報信号は見通し環境で約 100m 到達する。(障害物のない場合には約 200～250m まで到達可能である。)

転倒センサは平坦地では、投げ込んだ後に正常状態に起き上がる。(センサは投げ込み時に上面を向いていれば、正常状態に戻る起き上がりこぼし方式である。)

転倒センサはコンクリート面やアスファルト面上に落下しても 5m 以内であれば、損傷無く警報信号の発信をすることが出来る。

転倒センサを斜面に投げ込んだ時には、センサ底面がほぼ平面であるため、斜面勾配と平行程度に傾いて設置される。

転倒センサは内部電池の交換等の作業時に上下ケースを開けるが、その後所定の防水加工を行えば、1.5m 程度の水深に漬けても 5 時間浸水しないことを確認した。

転倒センサの全体重量及び上下ケース内の重量バランスにより、センサの転倒開始角度は異なる。センサ重量が軽い方が転倒し易い。

転倒センサは従来のセンサと異なり、センサ設置時に設置治具や工具を必要とせず、投げ込みや、転がし、置く等で設置できる。

警報表示は警報受信器での計器番号表示と、パソコン画面上で現場地図上に測定点が判別可能な表示を行う。(メール発信も可能とする。)

5. まとめ

本研究は、これまでは設置や計測の継続が困難であった地すべり災害現場においても、安定的かつ信頼性の高い計測データを取得し、危機管理対応の要求に十分応えられる観測装置とその設置方法の開発を行ったものである。

以下に、本研究で得られた成果をまとめるとともに、開発した観測装置の設置イメージならびに概要を図 5.1 と図 5.2 に示す。

なお、本共同開発期間は 2 年間という時間的な制約があり、また開発期間中に機器の導入に適した現場がなかったことから、十分な現場実証実験を行うには至っていない。今後は、“特殊な地すべり環境下で使用する観測装置の開発研究会”を発足し、実用化に向けた更なる改良を図る予定である。

(1) 加速度センサを応用した地表傾斜計(4.1 節)

本研究では、重力加速度方向を検知する加速度計を利用した IT 傾斜計を活用し、地盤の微小な傾きの変化を速やかに多点計測ができる計測手法を検討した。IT 傾斜計の特徴は、計測範囲が $\pm 20^\circ$ と大きく、また CAN 通信(耐ノイズ性が高いデジタル通信)を用いて 1 本のケーブルで多数(最大 50 台)の傾斜が計測できるところにある(ケーブル 2~3 本使用時の最大計測数は 100 台)。このような特徴から、地すべりによる傾斜変動量の大きい地点での多点計測が可能であり、滑落崖背後の地表部へ速やかに設置し、派生的に発生する地すべりの有無やその範囲の把握に適用することとした。

IT 傾斜計は、ボーリング孔内に設置する多段式傾斜計として確立されたセンサであり、地中に埋められるため気温変化の影響は問題としてこなかった。しかし、今回は表層部へ速やかに設置することを想定しているため、地上もしくは表層 50cm 程度の設置となり気温変化の影響は無視できない。そこで、“埋設型”、“地上設置型”、“単管打設型”などの試作機を考案し、これらの気温変化の影響を調べるための実証試験を行った。また、現場での施工性やデータ取得状況を検証するため、実際の地すべり現場での実証実験を行った。これらの実験の結果、“地上設置型”の施工性は優れているが、気温変動の影響を大きく受けること、“埋設型”は気温変動の影響はほとんどみられないが、礫や樹根があると設置(オーガ掘削)に手間がかかること、“単管打設型”は施工性が優れており、設置後に覆土をすることなどによって、気温の影響に対する改善効果のあることが分かった。

今後は、引き続き実証実験を行い、観測データの解釈や活用方法の検討を進める予定である。

(2) 振動デバイスを応用した土砂感知センサ(4.2 節)

本研究では、コンクリート充填状況の検知などで利用されている振動デバイスを活用し、地すべり土塊(水・土砂)の到達(接触)を検知する計測手法を検討した。振動デバイスは、デバイスに接

触している物質によって変化する周波数特性より接触の有無を検知する装置である。この検知技術は土砂に対しても十分に有効であると考えられるため、土砂の接触を検知することにより泥濁化・流動化した移動土塊の到達範囲の把握に適用することとした。

振動デバイスは、水とコンクリートに対する実績はあるものの、これまで土砂に対する検知性能は確認されていない。また、土砂は水やコンクリートのように均質ではないため、含水状態や粒径・空隙の状況によって検知性能が異なることや、礫が振動デバイスに接触した際の衝撃に対する課題が考えられた。さらに、危機管理対応として迅速に現場へ設置できなければならないことから、面的な配置ができるよう改良する必要がある。そこで、土砂検知性能や耐圧性能を強化した複数の振動デバイスをシート状のものに貼付け、面状に設置が可能になるように改良を加え、検知時には警報表示を行う仕様を検討した。

土砂検知性能や耐圧性能に関する試験を行った結果、判定しきい値の変更やカンチレバー型構造の改良などにより、水と土砂との識別が可能となり、想定外の衝撃等を受けた際のセンサの故障も検知できる改良型振動デバイスを開発した。これをシート状のものに貼付けたシート型センサの設置性を検証した結果、複数のケーブル同士の絡まりが懸念されるものの、迅速に敷設置ができる見通しが得られた。

今後は、現場実証実験により敷設置性の改善や適応性についての検討を進める予定である。

(3) 音響を応用した移動量計(4.3節)

本研究では、地すべり地に設置した音源センサ（以下センサと記す）から発した音波（可聴波）を、地すべりの影響を受けない安全な場所に設けた3本のマイクで受信し、その音波の到達時間から2点間の距離、もしくはセンサの位置を特定し、2点間の距離を算出することにより地すべり移動量(距離)を計測する手法を検討した。音響を利用した地盤計測では、超音波（高周波）の反射を検出するハイドロフォン（水中マイク）による調査が知られている。本研究で検討した音響計測の特徴は、ハイドロフォンと異なり、可聴波（低周波）音源の位置を複数のマイクで特定するところにある。この計測方法において高い精度の計測は期待できないが、立入り困難で移動量の大きい地すべり土塊内にセンサを設置すれば、危機管理を行ううえで有効な情報となりうる。そこで、本計測技術は、立入りが困難な移動土塊の移動量計測に適用することとした。

新しい試みの計測方法であるため、移動量計測として成立するかどうかを確認することを目的に、3台のマイクでセンサの位置を計測する実験を実施した。この結果、計測距離50mで精度 $\pm 0.28\text{m}$ (データ取得率は69%)、計測距離200mで精度 $-0.36 \sim 0.44\%$ ($-0.721 \sim 0.875\text{m}$) (データ取得率は8.8%)であり、計測距離に比例して誤差が大きくなりデータ取得率も低いことが判明し、ノイズ(雑音)の除去、風速や風向、温度の補正方法が課題となっているものの、従来機器では観測が困難であった地すべり災害現場の危機管理を行ううえで有効な情報となりうる見通しが得られた。

立入りが困難な現場へのセンサの設置方法については、センサをラジコンヘリコプターで投下させる方法を検討した。ラジコンヘリコプターにセンサを装着するための投下装置を試作し、これを

屋内のクレーンに吊り下げて投下設置実験を実施した結果、礫に覆われた場所や急傾斜で柔らかい土ではセンサが転倒する場合が見られたものの、適切な設置ポイントであれば5m程度の高さから投下させても十分に設置できる見通しが得られた。また、ラジコンヘリコプターを用いた投下設置実験では、オペレータ1名とナビゲータ1名での遠隔操作により、離れた地点からでも目標地点にセンサを設置できる見通しが得られ、風速10m/sの強風下でも投下設置ができる性能を確認した。

今後は、現場での検証試験を実施し、実用化の可能性や活用方法、運用方法について検討する予定である。

(4) 地盤伸縮計の改良による大変位伸縮計(4.4節)

本研究では、従来の地盤伸縮計(電気式)の計測範囲を大きくすることにより、5m程度の移動量まで連続計測させることを検討した。この検討では、計測原理そのものは変更せず、既存センサのワイヤーの引出し量を多くさせる機構に改良させることとしたため、ロータリーエンコーダなど他の変換素子の地盤伸縮計にも応用可能である。設置方法は従来と基本的に同様であるが、応急緊急対応を想定し、インバー線の保護管やその支柱は設けず速やかに計測を開始することを優先した。

改良した地盤伸縮計の性能を検証するため、実際の地すべり現場に設置されている従来型地盤伸縮計に併設し実証実験を行った。約8.5ヶ月の期間実施した現場実証実験の結果、従来型地盤伸縮計と同等の変位傾向であることが確認された。また、観測期間中の累積変位量が2mを超過したことから、従来型地盤伸縮計ではインバー線の張替え作業が必要となったが、改良した地盤伸縮計では張替えの必要もなく、大きな変位が生じる地すべりでの観測に有効であることが分かった。また、微小変位の計測精度について検証した結果、微小な変位も高精度で計測できる十分な結果が得られ、移動量6mまでの大きな変位を精度良く連続計測ができる性能を確認した。

今後は、地すべり現場での検証試験を実施し、実用化を図る予定である。

(5) 地中無線通信技術を応用した変位計(4.5節)

本研究では、媒質による反射や減衰の少ない低周波数の電磁波の特徴を生かして、インバー線の設置が難しい箇所あるいは計測器が土中や水中に埋まった条件下でも地すべり移動量(距離)を計測する手法を検討した。

低周波電磁波による距離計測方法は、発信器から出力される低周波電磁波を受信し、その出力の大きさから発信器と受信器の距離を計測するものである。この計測手法の特徴は、発信器が土中や水中に埋まっても、発信器と受信器の間が遮られても計測が可能なこと、またインバー線や塩ビ保護管等が不要であり、15~30mといった大変位をインバー線の張替えや保護管の再設置を必要とせず連続的に計測することが可能なことにある。

距離計測の精度を検証した結果、計測距離が長くなるに従い誤差が累積する傾向が見られたものの、距離20.0mにおいて標準偏差が0.4cm、距離30mにおいて標準偏差が1.1cmであり、従

来機器では観測が困難であった地すべり災害現場の危機管理を行ううえで有効な情報となりうる結果が得られた。また、覆土や冠水を伴う地すべりを模擬して本システムの距離計測性能を確認した結果、変位センサが空気中にある場合と水中または土中にある場合の計測値の差は 0.1%であり、変位センサが土砂に埋まった条件下で地すべり移動量(距離)を計測できる見通しが得られた。

今後は、計測精度の向上を図るとともに現場での検証試験を実施し、実用化を図る予定である。

(6) 接点信号発信器を応用した崩壊検知センサ(4.6節)

本研究では、鉄道ののり面監視で実用されている転倒接点式の汎用型崩壊検知装置を応用し、安全かつ面的に多数の配置ができる、簡便で安価な警報装置を検討した。転倒接点式の特徴は、所定の角度を越える傾斜あるいは転倒が発生すると接点信号が無線で発信されるという簡単な検出原理と安価なところである。このため、被害の拡大範囲の予測が難しい地すべりにおいて、広範囲かつ多数のセンサを配置することにより、二次災害を予防することが可能となる。

実用化されているセンサであるため、既存装置をそのまま利用できるが、応急緊急の危機管理対応が求められる地すべり現場では、迅速にセンサを設置できること、安全な位置で信号を受信できること、断続的な地すべり挙動にも追従することなどが要求される。そこで、投げ込みにより迅速に多数のセンサが設置でき、転倒しても再び起き上がり、繰り返し転倒を検出できる容器を考案し、その寸法形状についても設置治具などを必要としないものを検討した。

試作したセンサの設置方法(投げ込み)や、転倒・復元の性能、耐衝撃性能、防水性能、警報通信システム性能などの実験と改良を行った結果、上記の要求される性能を満足する警報装置が開発された。

今後は、現場での検証試験を実施し、実用化を図る予定である。

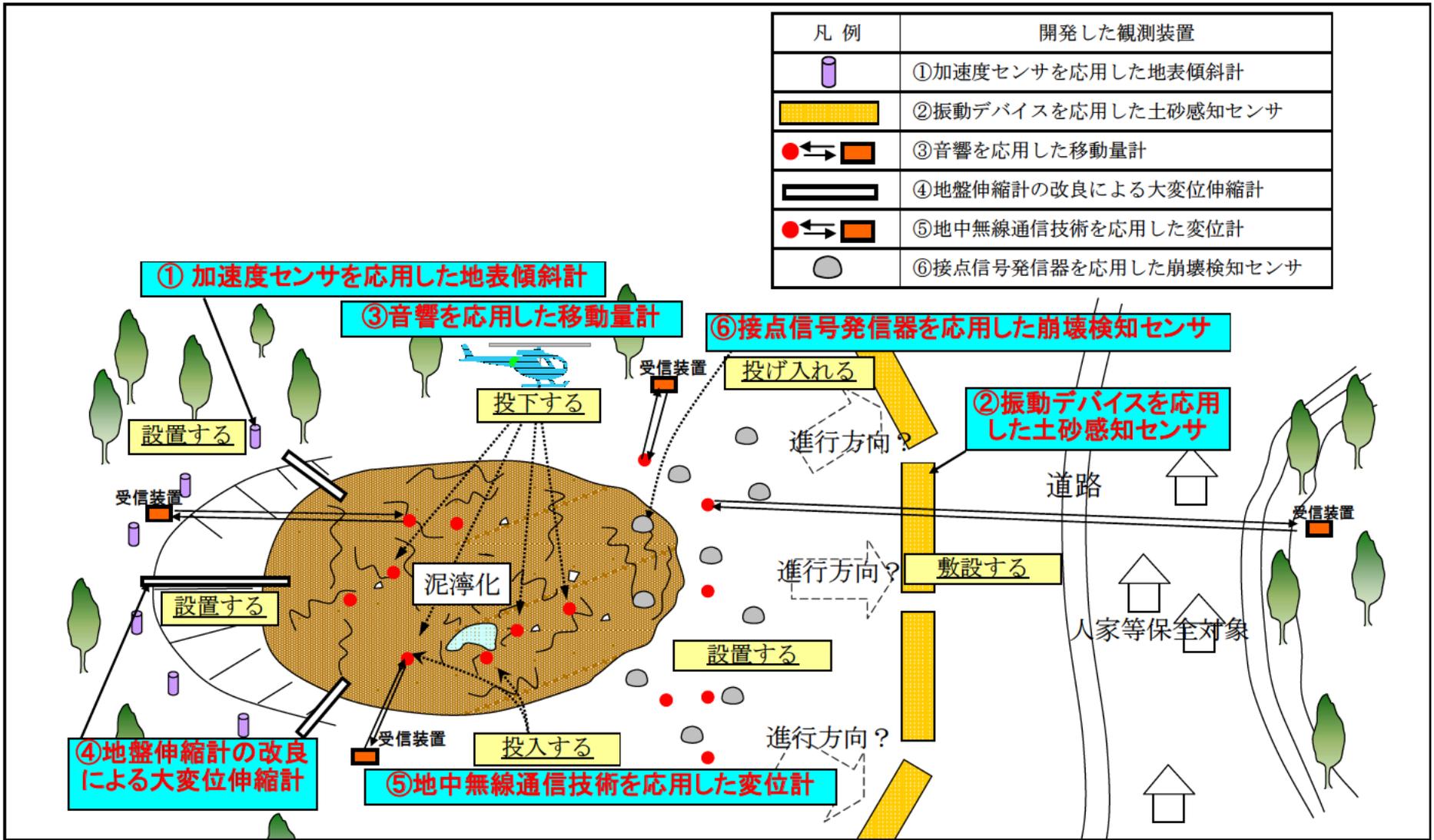


図 5.1 開発した観測装置の設置イメージ

① 加速度センサを応用した地表傾斜計

■ 地盤の微小な傾きの変化を計測するセンサ



IT地盤傾斜計
(径6cm, 長さ22cm)

設置イメージとセンサの外観

■ センサの基本仕様

- ・計測範囲: $\pm 20^\circ$
- ・計測精度: $\pm 0.01^\circ$, 温度特性: $\pm 0.008^\circ / ^\circ\text{C}$, 長期安定性: $\pm 0.001^\circ / \text{day}$
- ・電源: AC100V又はDC12V
- ・センサ軸数: 2軸, ケーブル総延長: 100m(1本当り), 計測数最大: 100台(ケーブル2~3本使用時), 使用温度範囲: $-20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$, 記録メモリ付

② 振動デバイスを応用した土砂感知センサ

■ センサに接触する物体の周波数特性から地すべり土塊の到達を検知するセンサ



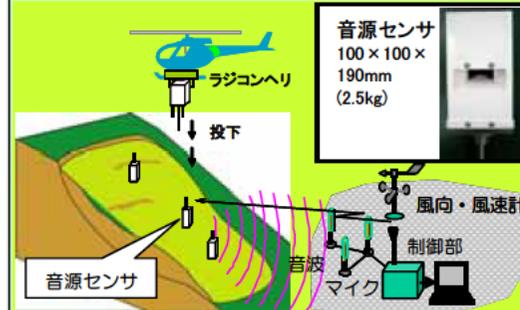
設置イメージとセンサの外観

■ センサの基本仕様

- ・識別能力: 水と土砂を識別 (衝撃等に伴うセンサの故障も識別)
- ・ケーブル長最大50m, 耐圧性0.3Mpa(水圧)
- ・電源AC90V~AC110V, 記録メモリ付
- ・使用温度範囲 $0^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ ・湿度5%~85%(結露不可)
- ・計測数: 16ch/ロガー(検知装置本体、端子台)1台

③ 音響を応用した移動量計

■ ラジコンヘリから投下設置した音源センサが発する音波の到達時間から2点間の距離を計測するシステム



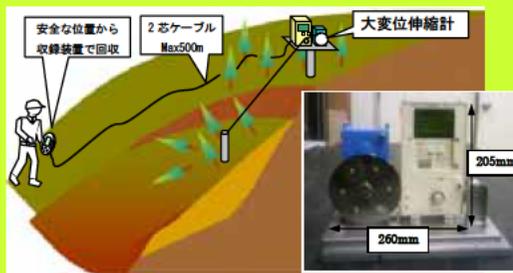
設置イメージとセンサの外観

■ センサの基本仕様

- ・計測範囲: 0~200m程度(音源センサとマイク間)
- ・計測精度: $\pm 1\%$
- ・音源センサ電源: 内蔵バッテリー(寿命: 1ヶ月(5分間隔計測時)), 制御部電源: AC100V

④ 地盤伸縮計の改良による大変位伸縮計

■ 6mまでの大きな変位を連続計測することができる地盤伸縮計



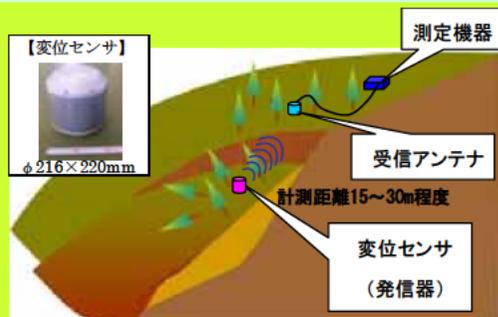
設置イメージとセンサの外観

■ センサの基本仕様

- ・計測範囲: 6m
- ・分解能: 0.1mm
- ・電源: アルカリ単3電池(電池寿命: 1年)
- ・2線式データ通信(最大500m), 65000データ保存可, 警報出力機能付

⑤ 地中無線通信技術を用いた変位計

■ 低周波数の電磁波を用いて、計測機器が土砂に埋まった条件下でも地すべり移動量(距離)を計測するシステム



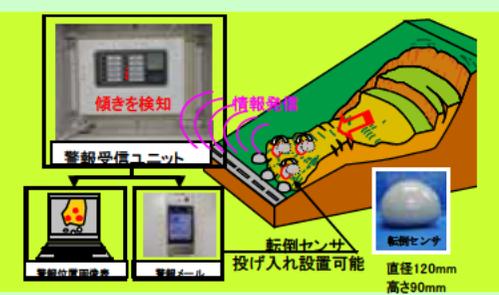
設置イメージとセンサの外観

■ センサの基本仕様

- ・計測範囲: 15~30m程度(受信アンテナと変位センサ間)
- ・計測精度: 距離30mで5cm以下
- ・変位センサ電源: 内蔵バッテリー(バッテリー寿命: 6ヶ月(4.5h間隔計測時)), 測定機器電源: 外付け鉛蓄電池またはAC100V

⑥ 接点信号発信器を応用した崩壊検知センサ

■ 押し出された地すべり土塊により傾いたセンサを判別し、その情報を地すべり地外の観測局に発信する警報装置



設置イメージとセンサの外観

■ センサの基本仕様

- ・計測範囲: センサが約40度以上傾斜すると反応
- ・電波到達距離: 見通し環境で約100m
- ・電源: DC9Vアルカリ乾電池(寿命約2年(1日10回送信時))
- ・転倒センサ: ABS樹脂(コンクリート上5m落下OK)
- ・使用周波数帯: 426MHz帯(特定小電力無線方式)

図 5.2 開発した観測装置の概要

謝辞

本共同研究の実施にあたり、静岡県伊豆市土肥地区での現場実証実験に関して、静岡県沼津土木事務所ならびに株式会社アイエステー静岡支店の関係各位に便宜を図っていただきとともに計測データをご提供いただいた。

土木研究所所内での各種実証実験に関しては、株式会社東洋計測リサーチの関係各位にご協力いただいた。

ここに、深く御礼申し上げます。

従来の観測機器では計測が難しい 地すべり災害事例

【代表的な 8 事例の詳細調査結果】

整理番号		9
地すべりに関する諸元		
名称	石倉(石倉ブロック)	
位置	長崎県松浦市今福町本場免	
発生日	平成2年7月4日	
地すべりの規模		
長さ(m)	500	
幅(m)	350	
最大層厚(m)	50	
移動土塊量(m ³)	約300万	
水平移動量(m)	50	
地すべり斜面の状況		
斜面の形状	凹地形(地すべり地形)	
主な土地利用	林地	
主な保全対象	林地、棚田	
地すべり滑動の特徴		
<p>昭和63年8月に、標高290mを頂部とした北東方向にのびる約150mの亀裂が発見された。その後平成2年4月以来活動が活発化し、同年3月末から6月初旬までの冠頭部の移動量が30～47cmとなった。</p> <p>その後、同年7月初旬の集中豪雨に伴って、4日に大滑動を生じた。自動計測がすべて計測不能になって約6時間で、50mの滑落崖が形成された。</p> <p>滑動面積約11.67ha、冠頭部亀裂は、標高210～290m付近にあり、標高150～160mに顕著な末端部押し出し部が認められた。</p> <p>すべり面は、冠頭部付近で深度80mの、砂岩と挟炭泥岩の層界付近であった。</p>		
被災状況		
対策施設	集水井の破損 治山ダムの埋没 鋼管杭の破壊 自在枠の転倒	
その他	ため池の堤体切断 水田の亀裂、陥没 ヒノキの倒木	
避難	57世帯、126人が約9ヶ月にわたって避難	

気象	
6月28日から7月3日の1週間で386.0mmの連続降雨が観測される。(平年の梅雨時期の降雨量が666.9mmの地域)	
地形	
当該地周辺である長崎県北部は、「北松型」と呼ばれる大規模地すべりが数多く発生している地すべり地帯であり、本地すべり地は標高150mから290mの地域で起伏量の小さい石倉山のほぼ北側に位置している。当該地下方は、標高約80mの尾根上地形を呈し、その末端には複数の集落が密集している。地すべり冠頭部の平均勾配は、35度程度である。 地すべり地は、不明瞭な等高線がみられ、これまで継続した地すべり滑動があったと推定される。	
地質	
地質時代	新第三紀中新世、第四紀
地層名	佐世保層群・福井層、北松浦玄武岩類
岩相	砂岩、泥岩・玄武岩(第四紀)
地質構造と地すべりとの関係	流れ盤・キャップロック
特記事項	
地すべり土塊の特性	
3ブロックに分かれる。最も大きなブロックでは、冠頭部付近で幅10～50mにわたって顕著な陥没亀裂が発生し、落差は15～20mであった。陥没帯内の土塊は、崩壊土砂となり約200m下流まで達した。また末端崩壊も発生し、崩壊土砂は人柱川に流入、150m流下した。 標高290m付近を頭部とするブロックでは、摂理が発達した厚い玄武岩が上位にあり、キャップロック構造を呈しており、今回の滑動により、キャップロック部が下位の砂岩・泥岩とともに崩落し、落差50m、傾斜角70°の急崖を形成した。 標高290mの急崖を形成したブロックから直線で150mの位置にある亀裂が滑落崖となり区画されたブロックとなった。崩落土砂の堆積部では、全く旧地表面が認められない程に乱され不安定な状態となった。	

地すべり諸元

位置図

主ブロックの位置と移動方向

立地条件

長崎県と佐賀県との県境に位置する石倉山(標高313.1m)の北～北西側山腹と山嶺の棚田地帯である。地すべり斜面は、林地であり、その直下は耕作地(棚田)である。耕作地には、人柱川流れている。人柱川を横断して松浦鉄道がとおり、地すべり斜面から北西部に今福町の中心がある。付近には山代西小学校(図中青丸)などがある。

石倉地すべり発生時系列

発生経緯

年	月	日	時	分	記事	年	月	日	時	分	記事
H2	3	20			1-2月の長雨により地すべり活動が活発化する(1月30日~3月20日の移動量16.9mm/日)						
	3	23	}		3-6月末の水平移動量43cm、沈下量41cmを記録、地すべり活動が明瞭となる						
	6	20			角ノ元溜池に亀裂発生、以後漸次亀裂が拡大する						
	6	末									
	7	2			6月28日からの豪雨のため急激な活動兆候がみられる ・角ノ元溜池堤体に亀裂発生 ・地区内道路に亀裂が発生し、目地の拡大やコンクリート舗装面の沈下現象等が観察されるようになる						
	7	3			5月14日からの累積移動量672mmとなる 17時~18時の1時間移動量552mm						
	7	4			農道がせり上がって隆起、車両の通行が不能となる 山の方より木がせりあう音、根が引き裂かれる音が断続的に聞こえる 落石、崩落の異常音が続き、足元に不気味な震動が伝わってくる 地鳴り、震動が体に伝わってくる 自動計測がすべて計測不能になり、大音響とともに崩落が始まる						
			0		角ノ元溜池の堤体が沈下						
			3		人柱川右岸で末端崩壊が始まり、谷止工が破壊され、滑落崖の高さが50mに達する						
			5		人柱川からの流出土砂が下流の棚田まで達する						
			8								
			10								
			13	40	浦の田、椎ノ木谷へ流下した土砂が5-10m下流の移動						
			17								
			6		これ以降、地すべりは小康状態となる						

第一次すべり発生時

出典：資料番号4、6、7、8、9、10、12

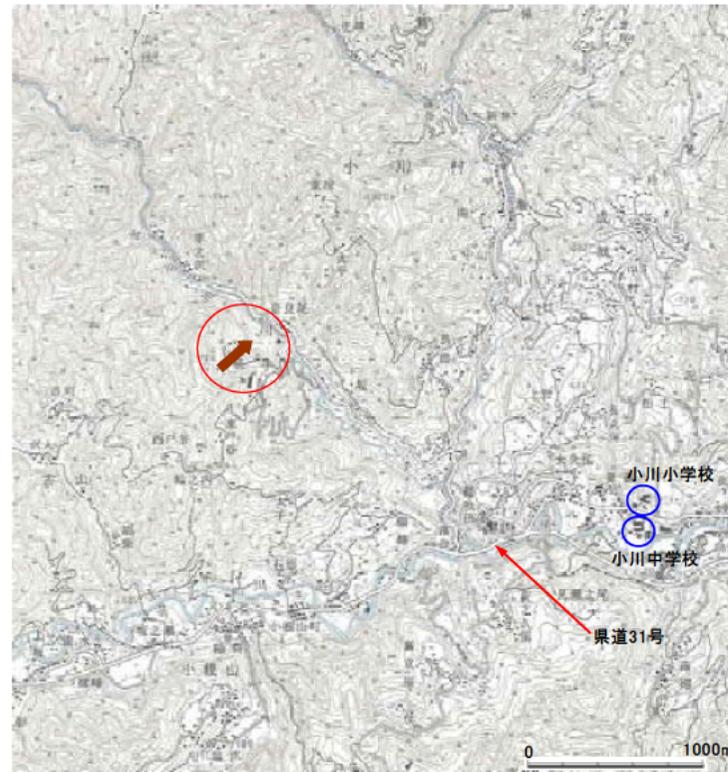
整理番号	13
地すべりに関する諸元	
名称	大崩
位置	長野県上水内郡小川村大崩
発生日	平成7年7月12日
地すべりの規模	
長さ(m)	250
幅(m)	80
最大層厚(m)	20
移動土塊量(m ³)	約100,000
水平移動量(m)	430
地すべり斜面の状況	
斜面の形状	開いた凹地状斜面
主な土地利用	植林地
主な保全対象	国道、植林地
地すべり滑動の特徴	
地すべりは山稜直下から発生し、斜面下部で地すべり土塊が泥流化し、末端部の小川川に流入。河道を閉塞。既存の地すべり斜面の一部が再活動したもの。すべり面深度19~26m。地すべり発生期に関する状況は不明。	
被災状況	
損壊家屋	人家4戸全半壊
道路	村道80m流出 河道閉塞により道路水没
水道	断水47世帯 3日後に仮復旧
砂防施設	堰堤袖部破壊
その他	

気象	
記録的集中豪雨(最大日雨量306mm;小川村)。	
地形	
標高600~700mの上部山腹斜面に位置する。地すべり地の末端を深く開析したV字谷をなしている小川川が流下している。また、地すべり地は地質構造に規制された侵食谷である(谷の方向が地層の走行)。地すべり斜面は、反復すべり滑動斜面である。	
地質	
地質時代	新第三紀中新世~鮮新世
地層名	小川層、柵層
岩相	泥岩、一部砂岩挟在
地質構造と地すべりとの関係	地層の走行がすべり方向
特記事項	強風化部・破碎質部;N値4~30、平均N値15

地すべり土塊の特性	
強風化部~破碎質部が深さ15~30mに及び、所により粘土化著しく、N値4~30、平均N値15。含水量多い。 地すべり中央腹部には、地すべり土塊中にφ1~2mの泥岩岩塊が多数混入。 地すべり中腹部~先端部に湧水が多く見られる。	

地すべり諸元

位置図



立地条件

地すべり斜面は林地である。地すべり斜面の末端部を小川川が流下し、これに沿って村道が通過する。平成7年7月に発生した地すべりのような被害が発生すると河道が閉塞し天然ダムが形成される恐れがある。また、これにより村道が冠水し、不通となり、これより上流の集落に影響が出、山間地での迂回路は約12kmに及ぶ。地すべり地から幹線道路の県道31号までは約2kmの距離である。地すべり地近傍には、学校等の公共施設(図中青丸)がある。

➡ 主ブロックの位置と移動方向

整理番号	18
------	----

地すべりに関する諸元	
名称	八幡平澄川
位置	秋田県鹿角市八幡平澄川
発生日	平成9年5月11日

地すべりの規模	
長さ(m)	700
幅(m)	350
最大層厚(m)	70
移動土塊量(m ³)	約600万
水平移動量(m)	頭部で約70

地すべり斜面の状況	
斜面の形状	凹地状(地すべり地形)
主な土地利用	林地(一部植林地)
主な保全対象	温泉旅館

地すべり滑動の特徴	
<p>上部移動体の滑動により下部移動体が押し出されるように滑動した。すべり面深度が50m以上に達し、0.2~0.4m/日程度の移動量であったと推定される。移動体、基盤層共に変質した地層から構成されており、融雪・降雨により滑動が促された。特に基盤層はグリーンタフである上に火山活動により熱水変質を受けていた。</p> <p>すべりの進行に伴って水蒸気爆発が発生したために土塊の流動化がより進んだ。地すべり土塊の一部が増水した澄川に流入したため土石流となって約2km流下した。</p> <p>地すべり発生による変状に早期に気がついたが、時間的に機器による動態観測までには至らなかった。</p>	

主な被害記録	
建物	澄川温泉9棟(全壊)、赤川温泉7棟(全壊)
道路	国道341号赤川橋付近一部埋没、市道澄川線一部決壊、市道赤川線全線埋没
橋梁	国道341号赤川橋埋没、澄川温泉への連絡橋全壊、赤川温泉への連絡橋全壊
電力	配電線切断により八幡平地区873世帯停電(47分後復旧)
電話	電話ケーブル切断によりトロコ、大沼、後生掛、蒸の湯が不通(5月15日復旧)
水田	濁流流入面積234ha
その他	避難のための人的被害なし

気象	
<p>5月4日~7日間で20mm、8日に110mmを記録。9日以降は無降雨。地すべり発生時には背後斜面に約70~100cm程度の積雪があった。4月末から急に気温が上昇し、日平均気温が10℃以上に達した。</p>	

地形	
<p>秋田焼山の山腹標高900~1000m付近に位置する。斜面はなだらかで斜面勾配は概ね4~15度程度である。付近一帯には古い地すべり地形が多数分布しているとされる。反復滑動地すべりと考えられているが50年以上滑動が無かった。</p> <p>澄川温泉周辺には多数の噴気、温泉湧出があり、北西-南東方向の断層に沿って概ね分布している。</p>	

地質	
地質時代	新生代新第三紀中新世~第四紀
地層名	秋田焼山火山岩類他
岩相	溶岩・軽石凝灰岩・火山礫凝灰岩など
地質構造と地すべりとの関係	
特記事項	地層は全般に熱水変質している。一部はグリーンタフ。

地すべり土塊の特性	
<p>地すべり土塊主部は、秋田焼山火山岩類の溶岩と岩屑なだれ堆積物であり、溶岩には亀裂が発達している。地すべり土塊主部の基底には変質した火山岩類(塊状軟岩)が分布しており、これと上位の秋田焼山火山岩類との境がすべり面となった。</p> <p>発生したフローは、緑灰色から暗褐色の粘性の高い堆積物。</p>	

地すべり諸元



八幡平澄川地すべり発生時系列

発生経緯

年	月	日	時	分	記事	年	月	日	時	分	記事	
H.9	5	3	夜		飲料水に使用している斜面の3箇所の湧水が濁るのに気づく(旅館経営者の阿部昭博氏)。	H.9	5	11	8頃		温泉旅館の建っていた付近で3~4回の水蒸気爆発が発生し、噴煙あがる(鹿角市長らが目撃)。	
				4	阿部氏が山を見回り湧水が茶色く濁り、水量が普段より増加しているのを確認。							
				5 ~6	導水パイプの地すべり地外への付け替え工事を行ったが、残雪斜面上の亀裂等の変状は見つっていない。							
				7	旅館施設周辺の道路のコンクリート舗装に亀裂が生じているのを発見。							
				21頃	激しい降雨があり、翌8日20時までに合計114mmの降雨があった。この間に湯量や湧水の量が急増した。							
				8 昼頃	温泉の中で最も山に近い露天風呂に土砂が崩壊して落ちた。							
				21頃	旅館裏山の東北電力の電線が切れて停電となる。							
				9 早朝	旅館裏山に地割れが発生しているのを発見。 露天風呂の基礎が破壊される。 澄川温泉から大沼に通じる遊歩道に亀裂が生じ段差が生じているのを発見。 いつもは泥しか噴き上げない泥火山(5m幅ほど)から湯が出始める(約300リットル/分)。							
				夜	山側の一番奥にある宿泊棟で、1m以上離れていた建物背後の崖面が建物の壁を押しほどに迫ってきた。							
				10 2 30	コンクリート舗装の割れる音を旅館従業員が聞く。 地すべりにより浴場棟など建物二棟に被害が発生。前述露天風呂は完全に土砂で埋没した。							
				5	遊歩道の亀裂が更に広がり、幅50cmほどの亀裂の中には非常に熱いお湯がたまっていた。 専門家が調査に入り、大規模な地すべりであることを確認。 直ちに、鹿角市消防本部と都市建設部長に連絡する。							
				8 30	鹿角市関係者4名が到着し、現場の状況を見て危険がかなり迫っていると判断。 旅館の宿泊者に旅館から退避するよう通知し、一部の連絡の取れない人を除いて避難完了。 朝から昼過ぎまで澄川に面した小尾根付近の斜面が崩れ、小規模な土石流となって砂防堰堤まで流下した。この斜面はその後も断続的に崩壊を続けた。							
				11頃	防災関係者が到着。							
				14 30頃	水源地から流れる水が滝となっている箇所が急に何も水が来なくなる。							
				15 30頃	滝周辺地盤に1mから2m幅で亀裂が見つかる。							
				16 49	鹿角市は澄川温泉の宿泊客に対し避難勧告を発令。							
				17 2	赤川温泉に対し避難勧告を発令。							
				18 55	銭川温泉に対し避難勧告を発令。							
				11 7	鹿角市長・助役らが視察に行ったが、地すべりの変動が次第に活発になり、旅館の建物が音を立てて破壊するさまを見て危険を感じる。							
				7 40	鹿角市長・助役ら大急ぎで現場を離れ、下流の赤川橋まで退避。							
				40頃	地すべりが急速に動きを早め、旅館の建物を後ろから押し倒すように倒壊させ始める。 地すべり末端部の土塊が澄川温泉の建物を巻き込んで流下し、一部は対岸に打ち上げなどしながら、澄川と赤川の合流点付近まで滑り下る。						第一次すべり発生時	
											出典: 資料番号17	

整理番号		24		地すべり諸元	
地すべりに関する諸元				気象	
名称	東川			4月に入ってから気温が上昇し平均気温が10℃を超える日が続くようになり、融雪が急に進んだようだ。	
位置	新潟県東頸城郡松之山町大字東川			地形	
発生日	平成13年4月28日			標高300～500mの起伏量の少ない山地斜面-東頸城丘陵-に位置する。周辺一帯はわが国数々の地すべり地帯であり、多くの地すべり滑動が記録されている。当該地の周辺山地斜面の平均的な勾配は、7～22度程度である。 地すべり斜面は、反復すべり滑動斜面であり、ポルネック型の形状を示す。	
地すべりの規模				地質	
長さ(m)	380			地質時代	
幅(m)	80			新第三紀中新世	
最大層厚(m)	7.5			地層名	
移動土塊量(m ³)	約68000			須川層	
水平移動量(m)	頭部:17m、中腹部:76m/15日間			岩相	
地すべり斜面の状況				塊状黒色泥岩を主とし、黒色砂岩泥岩互層を伴う。	
斜面の形状	浅い谷(中腹部で平均勾配12度)			地質構造と地すべりとの関係	
主な土地利用	山林			流れ壁(地層の傾斜は約40度)	
主な保全対象	県道、水田			特記事項	
地すべり滑動の特徴				強風化部; N値7～14 中風化部; N値31～ 弱風化部; N値50～	
地すべり土塊は頭部200mを残し、泥流状となって流下した。泥流状の土砂が県道付近に到達したところを地元の新聞配達員が発見。 流下速度は中腹部で最大1m/時程度であった(発生3日後の5月1日)。県道到達後の移動速度は約2.5m/時前後と推定される。 すべり発生当初は泥浄化のため等により立ち入りが危険であったが、すべり発生5日後に漸く地すべり地内に立ち入りが可能となった。顕著な流動は約2週間継続した。 地すべり発生当初地内への立ち入りができなかったために倒木を利用して移動量観測が実施された。				地すべり土塊の特性	
被災状況				地すべり発生時には、地すべり土塊中に雪塊が混入。地すべり崩土; 厚さ6.0～7.5m、N値～15 含水量多い 孔内水位; GL～-1.8m程度で、地すべり崩土中に位置する。	
損壊家屋	事業所一部損壊1棟			立地条件	
道路	延べ63m埋塞 迂回約12km			地すべり斜面は山林となっているが、その周囲は地すべり斜面頭部まで広く棚田となった水田地帯である。地すべり地東末端付近を県道358号が通過し、これより北約500mを国道353号が通過する。県道358号が地すべりにより通行止めとなってもこれより南東に位置する藤倉集落は孤立しないが、迂回路が長く道路の幅員が狭い山間地での積雪期での通行は大変である。なお、地すべり地近傍には学校などの公共施設はない。 すべり発生が残雪のある耕作前であり、地すべり斜面を道路などが通過していないため地すべり発生後大きな変状が現れて初めて確認された。	
水道	断水47世帯 3日後に仮復旧			主ブロックの位置と移動方向	
電気	電柱2本損壊により停電59世帯				
電話	共架電力柱の損壊により不通58世帯				
その他	災害対策基本法により立ち入り禁止区域を設定				

東川地すべり発生時系列

発生経緯

年	月	日	時	分	記事	年	月	日	時	分	記事	
13	4	28	5		泥流状の土砂が県道付近に到達したところを、地元の新聞配達員が発見。 地すべり崩土が全体に泥濁化しており、傾倒した大きな木もあり立ち入り危険と判断される。 地すべり土砂は更に流下し、東川に到達した。 地すべり地に立ち入り可能となる。							
			29									
	5	3										
出典：資料番号28												

整理番号	26
地すべりに関する諸元	
名称	陣ヶ峰(地すべり防止区域)
位置	新潟県栃尾市大字北荷頃
発生日	平成16年3月1日
地すべりの規模	
長さ(m)	450
幅(m)	250
最大層厚(m)	33
移動土塊量(m ³)	約165万
水平移動量(m)	60(主土塊)
地すべり斜面の状況	
斜面の形状	やや谷状
主な土地利用	山林、荒地、水田
主な保全対象	水田
地すべり滑動の特徴	
<p>長さ約200m、幅約150mの主土塊がまず“ゆっくりと”移動し、その後の2回目(?)の主土塊後背地での二次すべり発生により融雪水とともに一次すべり土塊を巻き込みながら、一部の移動体が泥流となって野田沢川を西谷川まで流下した、と推定される。</p> <p>地形的にボトルネック型になっているため、主土塊の移動が制限され途中で停止した可能性が高い。</p> <p>滑落崖には多くの湧水地点(数リットル～十数リットル/分)が確認され、頭部滑落崖他に数箇所湧水による池が形成された。</p> <p>移動体が泥流化したためにすべり直後の動態観測は実施されていないようである。</p>	
主な被害記録	
河川	西谷川(一級河川)が完全埋塞 L=200m
道路	市道(橋梁2橋含む)L=75mが埋没
農地	閉塞された西谷川が水田の一部に氾濫 農道被害あり
その他	避難なし

気象	
<p>2月22日フェーン現象で長岡では気温18.9℃に達する。2月1日から2月29日までの降雨量と融雪による換算降雨量は計1109mmに達すると推定されている。</p>	
地形	
<p>地すべりは、標高80～300mの起伏量の小さな丘陵に位置している。地すべり地の平均的な斜面勾配は約10度で、谷状の地形をした斜面である。地すべり地の末端部はボトルネックとなっている。</p> <p>地すべり斜面は、反復すべり滑動斜面である。</p>	
地質	
地質時代	新第三紀中新世
地層名	荒谷層
岩相	塊状泥岩を主に、細粒砂岩を挟在
地質構造と地すべりとの関係	受け盤
特記事項	
地すべり土塊の特性	
<p>地すべり斜面上部付近には旧地すべりによると推定される最大層厚14mに達する地すべり土塊が最上部に分布する。この下位には、層厚約9～16mの風化泥岩を経て新鮮な泥岩となっている。新鮮な泥岩の分布は地表面から深度約15～33mとなる。</p>	

地すべり諸元

位置図

国道351号

県道9号

県道24号

立地条件

地すべり斜面は、休耕田、荒地、水田となっているが、主部は荒地である。地すべり斜面の中上部までは、幹線道路の県道24号から1km以上離れている上、地形上の制約からこの県道からは地すべりの様子を見通すことはできない。地すべり斜面頂部の林地内を林道が通っている。

地すべり地近傍の公共施設には、秋葉中学校(図中青丸)や栃尾南小学校(図中緑丸)などがある。

➡ 主ブロックの位置と移動方向

陣ヶ峰すべり発生時系列

発生経緯

年	月	日	時	分	記事	年	月	日	時	分	記事	
H.16	2	28	13	頃	地すべりブロックより200～300m離れているあたりで、木と木がぶつかり合う音が聞こえ、大きな動物が木と木の間をすり抜けるような音にも聞いた。						以下は多田一男氏(株式会社ユーアンドエム)の目撃証言全文。	
			14	15	頃	杉の木が傾斜しているように見えた。(この日の現地積雪深は約50～60cm程度か?) 真っ白な雪面の中へ、山塊が段々になって下がって来、茶色の地肌を見せた。これと同時に山が自分のほうへ近づいてきたように見えた。かんじきで雪面を踏むような音が聞こえてきた。根を切るような音も聞こえた。 目の前の山が二つに割れるのを見た。 目の前をくみ木が立ったまま、下流へ200m(くらい)移動した。 流下した土砂は、下流の橋の手前で留まっていた。					2月28日13時頃北荷頃の自宅を機材(望遠鏡、カメラ、三脚)を持って出発した。吹谷林道の入り口で知人の家に車をあずけ、かんじきを履いた。空は良く晴れ、積雪は膝より若干上部までであった。林道の野鳥観察小屋(Fブロックの縁にある)への分かれ道あたり(地すべりブロックより200～300m離れている)で一服した。 三脚を立て鳥(カラス)を見ている時のこと、木と木がぶつかり合う甲高い音が聞こえてきた。音のする方向は前方でそれほど遠くないところであると思った。大きな動物が木と木の間をすり抜けるような音にも聞こえた。 林道を離れ野鳥観察小屋に向かって歩いていった。そして集水井の蓋の上で一服した。蓋には積雪はなかった。ここまで来る間には例の音はすでに聞こえなかった。いつもの動物の足跡は全くなかった。	
			29	9	頃	流下した土砂は28日とほぼ同じで、倒木とともに堰堤のところに留まっていた。 水田は土砂に埋まっていたはなかった。					野鳥観察小屋に着いたがあまりにも天気良かったので、そのまま小屋には寄らずに山の方に進んだ。杉の木のでっぺんにノリスを見つけたので、三脚を立て望遠鏡のピントを合わせた。2回目にレンズを覗いたとき杉の木が傾斜しているように見えた。自分が病気にでもなったのではないかと思った。 天上から段々に山塊が下がってきて、真っ白な世界に茶色の山肌が見えてきた。と同時に、ノリスのいた山が自分の方へ近づいてくるように見えた。 かんじきで雪面を踏むような音が聞こえてきた。根を切るような音も聞こえた。三脚をたたくむひも無くあわてて機材を抱えて小屋まで逃げた。目の前の山が二つに割れるのを見た。目の前をくみ木が立ったまま上流から下流へと200m(くらい)移動した。時刻は14時15分ころだった。流下する土砂は下流の橋の手前で留まっていた。	
	3	1	1	55	西谷川が土砂でせき止められているとの地元住民からの通報が消防署にあった。 その後何ヶ月にも渡って、Aブロック以外の地すべり滑落崖が徐々に後退・拡大した。							2月29日9時頃、再び現場に来た。流下した土砂の様子は昨日とほぼ同じであり、土砂は倒木とともに堰堤のところで留まっていた。その量もたいしたことはなかった。田んぼも埋まっていたはなかった。3月1日に西谷川を土砂が埋めたが、そんな大量の土砂はどこから来たのか不思議でならない。小屋から見える前方の山は以前より手前に来て、また高さも高くなったように感じる。
					部分は目撃証言の要約							
					出典: 資料番号30							

地すべりに関する諸元	
名称	宇井
位置	奈良県五條市大塔町宇井
発生日	平成16年8月10日

気象
6月～8月の台風6・10・11号により、総降水量1150mmに達する。

地すべりの規模	
長さ(m)	120
幅(m)	120
最大層厚(m)	20
移動土塊量(m ³)	約20万
水平移動量(m)	主部約65

地形
当該地周辺は標高350mから1,100mの地域で起伏量の大きい山地に位置している。この中を天ノ川が北から南へと流下しており、天ノ川に面した斜面は非常に急勾配で、険しい山容を示している。地すべり斜面は、この天ノ川に面した斜面であり、平均斜面勾配35～40度の単調な平滑斜面である。地すべり斜面内には多少のうねりが見られるほか、斜面頂部には二重稜線が見られる。当地すべりは、初生すべりと推定される。

地すべり斜面の状況	
斜面の形状	平滑斜面、斜面下部は切土斜面
主な土地利用	植林地
主な保全対象	国道、植林地

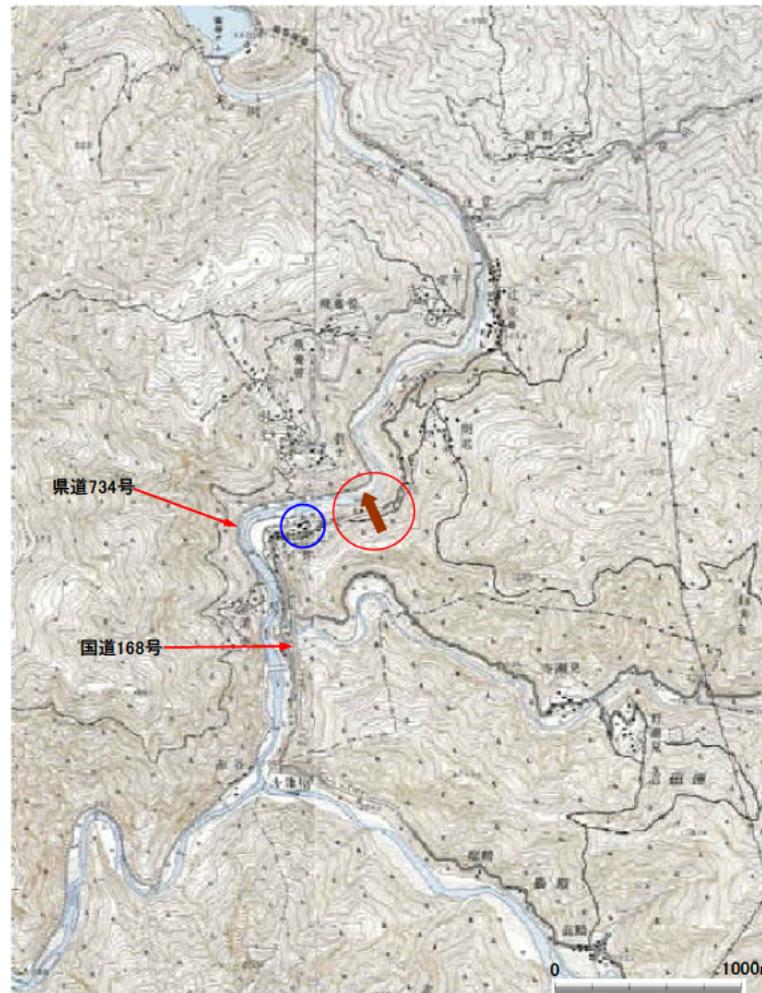
地質	
地質時代	中生代白亜紀
地層名	四万十帯日高川層群
岩相	砂岩・頁岩・砂岩頁岩互層
地質構造と地すべりとの関係	流れ盤
特記事項	

地すべり滑動の特徴	
8月10日の本滑落に至るまでに様々な予兆が観測された。特に5月中旬から約1ヶ月半に渡り地盤伸縮計がリニアに累積し、積算変位が5～10cmに達した時点で、急速に変位が進行し、その10日後に地すべりの滑落が発生した。すべり面の上部は概ね平面形を呈しており、岩盤性の崩壊に近い地すべりであったと考えられている。滑動の初期は、3.0～3.5m/s程度の速度ですべり面方向に滑落した。地すべりの動態観測は、兆候確認後から地盤伸縮計により実施された。	

被災状況	
道路	国道168号 被災延長120m
その他	滑落した地すべり土塊の一部が天ノ川に流入し河道に達したが、完全に閉塞するまでには至らなかった。

地すべり土塊の特性	
表層の表土や崩積土は厚さ0.7～3.5mで、地すべり土塊の多くは岩盤から構成されている。地すべり土塊は、強風化岩、弱風化岩、風化破碎岩が幾層も積層しており、単純な構成ではない。岩級区分Dクラスが0.3～4mの厚さで頻繁に挟在する。ボーリング調査では空洞(90cm)も確認されている。	

位置図



立地条件

地すべり斜面は植林地であり、その下部付近を国道168号が通過する。斜面の対岸を県道734号が通るが、対岸からは植生のため斜面の様子を肉眼で確認することはできない。規模の大きな地すべりや斜面崩壊により河道が閉塞し易い地形条件にある。付近には大塔小学校・中学校(図中青丸)などがある。

➡ 主ブロックの位置と移動方向

宇井地すべり発生時系列

発生経緯

年	月	日	時	分	記事	年	月	日	時	分	記事
H.16	1	2	下旬	9	国道168号斜面付近に亀裂を発見。道路構造物・道路面の変状について、現地踏査を実施。地盤伸縮計4基、クラックゲ - ジ4基設置。観測開始(1回/週)。	8	8	14			滑落周辺斜面に地盤伸縮計設置開始。
	5	3			法面の一部で崩壊発生(幅約10m、高さ約5m)。土砂撤去・モルタル吹き付け・大型土嚢の施工実施。						
	5	7			斜面上部に新たな亀裂を確認。地盤伸縮計を4基追加設置。観測頻度を2回/週とする。						
	11	12			一部の地盤伸縮計に累積傾向が現れる(約2ヶ月半継続)。						
	6	9			「大塔村宇井地区地すべり緊急体制マニュアル(案)」作成						
	20	21			台風6号に伴う豪雨の影響で擁壁・法枠等の構造物に亀裂が新たに発生、拡大。						
	24	21		13	警報機が作動し国道通行止。						
	25	6			通行止解除						
	27				河川側擁壁にも亀裂発生、国道から50m上部の斜面に新たな変状発生。						
	下旬				調査ボ - リング孔を使って観測を順次実施。						
	7	13			自動観測システム設置完了。観測開始(地盤伸縮計11基、地盤傾斜計2基、雨量計1基)。						
	28				災害事前協議						
	30				一部の地盤伸縮計の変位が加速し始める。 0.9mm/day 5.3mm/day, 0.5mm/day 6.0mm/day						
	31				台風10号の接近に伴い、地すべりが活発化。対応要員2名配置。						
	8	1									
	5				8月4日からの降雨により、更に地すべりが活発化。対応要員1名を配置。早急に応急横ボ - リング工を実施することになり、9日に現地確認、10日から作業開始の予定となった。						
	6				24時間体制で地すべり監視を開始。対応要員3名を配置(日中2名、夜間1名 + 宿待機1名)。更に一部の地盤伸縮計の変位が加速し、15mm/dayを超える。						
	7				地盤伸縮計S-7、管理基準値2mm/h(連続2回)超過、表層崩壊が原因であると考えられるため、管理基準値を4mm/hに変更。18時頃よりS-5・6にて2mm/hを断続的に記録。						
	8	5		10	S-6の警報発令。国道168号通行止。						
		7		50	S-5の警報発令。						
		8		50	S-8の警報発令。						
		18		50	S-1の警報発令。						
		19		10	S-7の警報発令。 クリ - プ予測式により、最短1.5日で滑落することを算出。対岸道路の整備を開始。						
	9	6		50	S-3の警報発令。 対岸道路開通。クリ - プ予測式を用いると、10mm/10分の変動が起きた場合、最短60分で滑落すると予測されることから、その変動を確認した場合、対岸道路は通行止とすることを決定。						
		23		30	S-6にて変動を確認。対岸道路通行止。 広域迂回路の誘導開始。						
	10	0		15	地すべり滑落。その後も断続的に頭部滑落崖の二次崩壊(小規模)が発生。						第一次すべり発生時
		5			要員4名にて現地踏査開始。						
		7			5 対岸の迂回路(県道)監視通行開始。						
		12		22	30 三次崩壊発生。						
											出典: 資料番号31、32

整理番号	34
------	----

地すべりに関する諸元	
名称	東横山
位置	岐阜県揖斐郡揖斐川町東横山
発生日	平成18年5月12日

地すべりの規模	
高さ(m)	135
幅(m)	150
最大層厚(m)	18
移動土塊量(m ³)	約54,000
水平移動量(m)	約50

地すべり斜面の状況	
斜面の形状	尾根地形、下部は切土法面
主な土地利用	植林地
主な保全対象	町道、河川(揖斐川)

地すべり滑動の特徴	
<p>伸縮量に伸び量が観測されてから約5日後に崩壊発生。崩壊は斜面の中央下部での小崩壊に始まり、次いで側面での小崩壊、最終的には2回の断続的な大崩壊が発生して終了した。最初の小規模崩壊から最終の大崩壊まで計6回の断続的な崩壊が発生した。</p> <p>5月13日7時59分に発生した最大規模の地すべり土塊の移動速度は、約9~12m/secであった。</p> <p>動態観測は、主に斜面頂部で伸縮計により実施された。</p>	

被災状況	
道路	町道
その他	<p>揖斐川(県管理区間)の河幅の約半分を閉塞し、約2m堰上げ。</p> <p>地すべりによる川幅の減少区間約110m</p>

気象	
5月6日~11日の間に303mmの降雨量を記録した。	

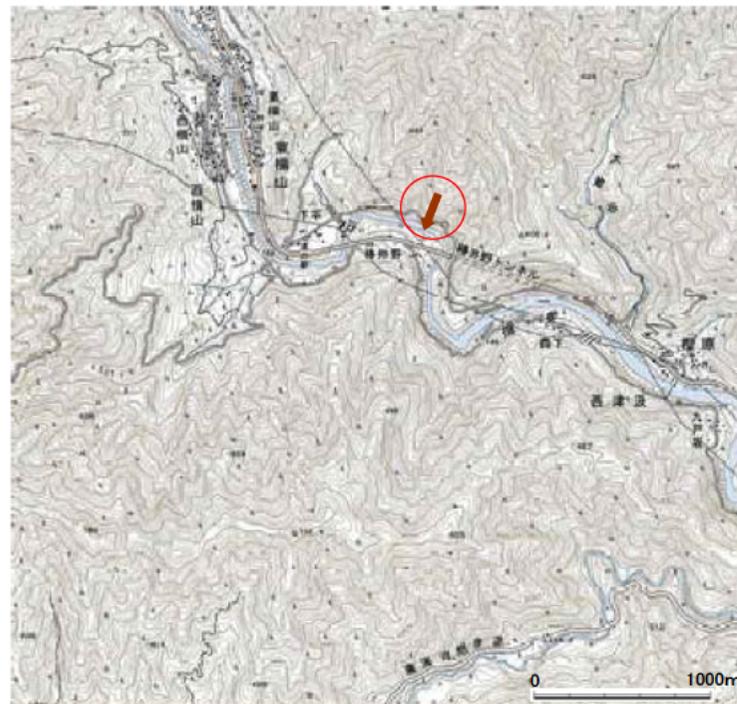
地形	
<p>標高150~1000mの起伏量の大きな山地に位置する。地すべり斜面は揖斐川に面した幅200m足らずの尾根の先端部であり、勾配40~50度の斜面である。地すべり発生前の地形を縮尺1/25,000の地形図で見ると、凸状の斜面で旧崩壊地形の痕跡は見られない。当地すべりは、初生すべりと推定される。</p>	

地質	
地質時代	中生代ジュラ紀
地層名	美濃帯久瀬ユニット
岩相	泥質岩、剥離性を有しチャートや砂岩のブロックを内包。
地質構造と地すべりとの関係	
特記事項	風化部は深さ約25~29mまで達し、特に表層に強風化部(最大厚さ約11m)を有する。また、多くの破砕部(最大約3m)を挟んでいる。

地すべり土塊の特性	
<p>地すべり土塊は、風化部を主体とする頁岩層が崩壊したと考えられている。すべり面は、破砕された強風化の頁岩と推定される。</p> <p>土塊そのものはドライであった可能性がある。</p> <p>崩壊土塊のほとんどは斜面内に残った。</p>	

地すべり諸元

位置図



立地条件

地すべり斜面周辺は、林地である。地すべり地は揖斐川へと突き出した尾根の末端部に位置し、揖斐川に面している。地すべり斜面の末端部付近で町道が通過し、揖斐川を挟んで国道303号が通る。地すべり斜面の約1.5km上流には東横山がある。地すべり斜面は林地であるが揖斐川に面しているため、対岸の空き地などから全体を見渡することができる。

 主ブロックの位置と移動方向

東横山地すべり発生時系列

発生経緯

年	月	日	時	分	記事	年	月	日	時	分	記事
H.17	12				冬季閉鎖	H.18	5	13	3	6	上流側斜面末端部付近で小規模崩壊発生(約1,000m ³)。
H.18	4								4	44	3時6分崩壊斜面の上方で小規模崩壊発生(約1,000m ³)。
	4	10			降雨(藤橋:累計94mm・時間最大6mm、杉原:累計134mm・時間最大9mm、久瀬:累計177mm・時間最大13mm)				7	40	斜面の中段～下段で落石・崩壊が始まる。
		11			交通規制解除に先駆け揖斐川藤橋振興事務所にてバトロール実施し、土砂崩壊確認。				7	59	再び大規模崩壊発生(最大規模約40,000m ³)。
		12			揖斐川町建設課バトロール実施、異常は確認されず。				14		土木研究所専門家による現地調査。
		14			揖斐川町建設課バトロール実施、崩壊進行を確認。				15		崩壊土砂による下流への影響調査作成。復旧に向けて測量作業を開始。
		17・18			現地調査(揖斐川町)、斜面上部のクラック等一帯の変状を確認。				17	30	非常体制を解除し、警戒体制に移行。
		20			揖斐川町災害報告。揖斐川町状況報告。揖斐川町・揖斐土木事務所・砂防課で対応協議。				16		応急工事に着手。
		21			現地調査(調査機関:越美山系砂防事務所、揖斐土木事務所、揖斐川町、砂防課)を実施し、その後対応を協議。				17		伸縮計を設置し、再度計測を開始。
		24			現地調査(調査機関:越美山系砂防事務所、揖斐土木事務所、砂防課)を実施し、その後詳細調査・警戒体制等について協議。				20		河道掘削着手。
		25			頭部滑落部にブルーシート設置(頭部滑落崖に雨水の浸透を防止)。町道に一般の立ち入り禁止のためのバリケード等を設置。				23		排水ボーリング掘削着手。
		27			越美山系砂防事務所協議、河川内立ち入り注意喚起看板設置。				末		調査ボーリング完了。水位計・孔内ひずみ計設置観測。地すべり解析。
		28			伸縮計4基にて観測開始。				6	1	根固めブロック設置開始。
					災害関連緊急地すべり対策事業本省事前協議。地すべり対策会議(越美山系砂防事務所、木曾川上流河川事務所揖斐川第一出張所、横山ダム管理所、イビデン東横山発電所、中部電力西平ダム管理所、揖斐川町、砂防課、治山課、揖斐土木事務所、揖斐農林事務所、揖斐警察署、揖斐郡消防組合、揖斐川漁協)				3		排水ボーリング掘削完了。
					記者発表(国土交通省中部地方整備局、岐阜県)				6		根固めブロック設置完了。河道掘削再開。
		20	45		NHK報道				11		河道掘削完了。
		29			砂防課待機(マスコミ等対応)						24時間監視体制解除。警戒体制から注意体制に移行。
			12	12	NHK報道						
		30			砂防課待機(マスコミ等対応)						
	5	2			地すべり連絡調整会議(越美山系砂防事務所、木曾川上流河川事務所揖斐川第一出張所、横山ダム管理所、イビデン東横山発電所、中部電力西平ダム管理所、揖斐川町、砂防課、揖斐土木事務所、日本工営)						
		6			夜半から降雨により地すべり挙動を観測。						
		7			午前～昼頃から伸縮計に伸び量が記録され始める。						
		12			警戒体制(レベル2)						
		13	30		非常体制(レベル3)						
		16			現地調査するが地すべり下面での変状は確認されず。新たな崩壊や亀裂も発生していない。(揖斐土木事務所、日本工営)						
		17			警戒体制(レベル2)へ移行(現地調査、降雨状況、挙動値の安定等を総合的に判断)						
		8			警戒体制(レベル2)継続。ボーリング調査・測量業務発注。						
		10			国土交通省中部地方整備局、越美山系砂防事務所、岐阜県砂防課協議。応急対策として排水ボーリングに着手、地山の地下水位の低下を図る。						
					夜半から、伸縮計の伸び量が加速し始める。						
		21	30		非常体制(レベル3)。						
		11			S-1伸縮量午前23mm/h、午後30mm/h、S-2伸縮量午前11mm/h、午後20mm/hと更に加速する。						
		12			午前、S-1伸縮量48mm/h、S-2伸縮量38mm/hとなる。						
		13	38		斜面側部で小規模崩壊発生(約2,000m ³)。						第一次すべり発生時
		18頃			伸縮計S-1、S-4が切断し計測不能となることを確認。						
		20	2		斜面末端部付近で小規模崩壊発生(約1,000m ³)。						
		22	23		小規模崩壊の発生した斜面周辺で落石・崩壊が頻発し始める。						
		22	40		大規模崩壊発生(約10,000m ³)。						出典:資料番号33

整理番号	35
地すべりに関する諸元	
名称	北上原(地すべり危険箇所)
位置	沖縄県中頭郡中城村北上原
発生日	平成18年6月10日
地すべりの規模	
長さ(m)	300
幅(m)	120
最大層厚(m)	17
移動土塊量(m ³)	約34万
水平移動量(m)	頭部で70m/舌端部で110m
地すべり斜面の状況	
斜面の形状	谷
主な土地利用	山林、一部畑地
主な保全対象	人家、県道、村道
地すべり滑動の特徴	
<p>移動体中央部の移動量が側部のそれに比べて大きく、両者の相対的な差は約40mに及ぶ。これによって移動体内部でせん断破壊による破砕が進み、後の流動化の一因となったと推定されている。二次すべりの発生によって、押し出されるように移動した多量の水を含んだ一次すべりの舌端部が流動化し、最終的に地すべり長さは500mを越えた。この二次すべりは地質構造に規制された楔形すべりであった。</p> <p>泥滓化した地すべり土塊の末端部の流動は、約5m/時ほどの速さを示した。</p> <p>すべり土塊の泥滓化が早く進んだために、すべり初期の機器による動態観測は困難なため実施できなかった、と推定される。</p>	
主な被害記録	
道路	県道35号線被災L=140m 村道被災L=100m
その他	避難状況 ピーク時(6月17日14時): 避難指示48世帯174名、避難勧告32世帯105名 水道管切断(村道に埋設) 地すべり舌端部の土塊を排土し住宅への被害を回避

気象	
5月1日～6月9日間の降雨量533mm(胡屋)。6月10日から二次地すべり発生の12日夜までの降雨量141mm、13日から二次すべりの拡大した14日夜までの降雨量2mm。	
地形	
地すべりは、標高約100～120mの海食台の侵食斜面(谷)で発生した。 地すべり発生前の斜面上部の勾配は約23度、斜面下部の勾配は約12度であった。斜面上部には、既往の地すべりブロックが2箇所認められていた。	
地質	
地質時代	新生代鮮新世
地層名	島尻層群と那原層
岩相	泥岩
地質構造と地すべりとの関係	流れ壁
特記事項	
地すべり土塊の特性	
<p>地すべり中上部: 表層から移動が激しく全体に岩塊からなる強破砕泥岩層(深度10～14m程度まで)、破砕泥岩層(厚さ約1～4m)、基盤岩層(不動層の風化～新鮮泥岩)と積層している。平均N値は、上位部層4.5、強破砕泥岩層14.1、破砕泥岩層26.5、基盤岩層50以上であり、破砕部では岩質の劣化が顕著である。</p> <p>地すべり末端部: 約9m程度の地すべり崩積土の下位には順次旧崩積土、旧河床堆積物、島尻泥岩が確認されている。</p> <p>頭部滑落崖の高さは約40mで、滑落崖付近には深度15～20mに及ぶ亀裂の発達した風化泥岩層が分布している。</p> <p>島尻層泥岩は、他の新第三紀層泥岩に比べ急速に劣化が進み強度が落ちるという特性がある。</p>	

地すべり諸元

位置図

国道329号

立地条件

地すべり地の頭部を村道、末端部付近を国道329号が通過する。すべり発生前には地すべり斜面を県道35号が通過していた。地すべり土塊は住宅地に接近し、国道329号まで約100mまでに達した。地すべり斜面は主に林地であるが、比較的高木は少なく谷は浅い。
国道329号から地すべり斜面頂部までの比高は、約100m。
地すべり地周辺には、沖縄県消防学校(図中青丸a)、津覇小学校(図中青丸b)、中城中学校(図中青丸c)などがある。

主ブロックの位置と移動方向

北上原地すべり発生時系列

発生経緯

年	月	日	時	分	記事	年	月	日	時	分	記事
H.18	6	10	10頃		住民から中城村役場に地すべり頭部の村道路路面における亀裂の拡大の報告あり。						<p>→ 地すべり頭部の村道路路面には以前から亀裂ができていたとの、話もあった。地すべり発生後の調査で、村道に面した民家の壁やコンクリート床面に幅数mmの古い亀裂が確認された。</p> <p>第一次すべり発生時</p> <p>出典：資料番号39</p>
			11		村職員が亀裂を確認。						
			午後		県道35号の隆起が確認された。						
			17		地すべり発生。						
					地すべりの発生によって村道に埋設されていた水道管が切断され、かなりの量の水が地すべり内に供給された。						
			18		道路側溝からも水が地すべり地内に供給された。 県道が地すべりにより寸断された。						
		12	午後		移動体右翼側末端部に小規模な土砂流動が認められるが、末端部全体では流動化しておらず、容易にすべり移動体内に立ち入ることができた。 滑落崖に流下する水の筋が認められた。 13日以降に見られた池はまだ出現せず。						
		12 ~13	夜 朝		地すべり頭部の右翼側で二次すべりが発生。拡大範囲の中央部の奥行きは約60mで、移動土塊は完全にすべり落ちた。この二次すべりは、一次すべり土塊上には載らず一次すべり頭部陥没帯に入り込み、一次すべり土塊を押し出すような移動形態であった。移動体の大移動と流動化はこの時に起こったと推定されている。						
		13	12		道路側溝から地すべり地内への流入が完全に止められた。 地すべり舌端部は流動化し、前日より約90m流下した。 移動体には池が形成されており、右翼側の池は形成と消滅を繰り返した。左翼側の池は安定していた。						
		14	午前		ポンプ排水開始。 舌端部土砂の流動は、時速5mほどであった。 前日より15mほど移動し、13日に設置した土嚢を越えた。泥土を排除して住宅への被害を回避。						
			15		二次すべり滑落崖が更に大きく崩壊。崩壊規模は当初の約1/3程度で、当初の移動体にかぶさるように堆積した。この土塊は完全にすべり落ちずに、斜面上にかなりの量が残留した。						
			夜								
			深夜		13日正午から14日夜までの舌端部の移動量は35m程度であったと推定されている。 舌端部の顕著な流動がほぼ終息。						

従来の観測機器では計測が難しい 地すべり災害事例

【アンケート調査結果】

1. アンケート調査

県の担当者を対象に行った6事例（大崩、東川、陣ヶ峰、宇井、東横山、北上原）のアンケート調査の概要は次のとおりである。

（1）地すべり発生期について

- 1) 事例の地すべりと従来から使用している計測機器や、改良した機器、全く新しいタイプの機器について、有効であるか。
- 2) 新しいタイプの計測機器¹について、どのように考えているか。
- 3) 泥濘化した地すべりを観測するために、地すべり外からの観測についてどのように考えているか。

（2）地すべり一般に関する事柄

- 4) 現在、計測に使用中の計測機器について
- 5) 観測結果の利用について
- 6) 観測結果のトラブルについて
- 7) 観測結果のトラブルの内容について
- 8) 観測方法の意見

1 新しいタイプの計測機器案（アンケートに記載した例）

音波、光波等を利用した計測機能

発信機能、受信機能、送受信機能（ワイヤレス：音波、磁気等）

観測機同士のネットワーク機能

大きさ、重さのコンパクト化（設置の容易さのため）

地すべり外部からのコントロール機能

以下、アンケートのサンプルとして、北上原地すべりのアンケート用紙を示す。

アンケート例

地すべり活動に関するアンケートのお願い

「北上原地すべり」(中城村北上原):平成18年6月10日発生

このアンケートは、地すべりが活動した際の初期の動態を、今後どのように観測・把握したらよいか検討するための基礎資料とします。

地すべりの初期の動態は、立地のため、あるいは地すべりの移動土塊が泥濘化しているために立ち入ることが困難な場合など、これまで観測が難しくなかなか把握出来ませんでした。

地すべりの初期の動態観測状況の把握を行う為、今回アンケートを行います。

このアンケートでは、平成18年6月10日に発生した「北上原地すべり」(中城村北上原)について、地すべりが活動した際の初期の動態観測状況等について回答していただければと思います。

回答は無記名とし、ご回答をいただいた方にご迷惑をかけることは決してありません。

アンケート例

平成 18 年 6 月 10 日に発生した北上原地すべりの場合は、主移動体のすべり発生後に、その後地の斜面が不安定となって引き続きすべりが発生し、二次すべりによる土塊が一次すべりの土塊を巻き込みながら泥流化に及んだと考えられています。

発生当初、地すべりは泥濁化しておらず、地すべり内に立ち入って状況を観察することが出来ました。

しかし、2 次地すべりの発生により泥濁化が進んだために地すべり地内に立ち入っての観測は出来なくなったと資料にあります。

従って 2 次地すべり後、地すべり土塊がどのように推移するのか、または滑動するのかを把握するのは、従来の地すべり地内に計測機器を設置して観測する方法では困難であったと考えられます。

泥濁化した状況での地すべりを計測するための計測機器の機能として、次の機能が考えられます。

音波、光波等を利用した計測機能

発信機能、受信機能、送受信機能（ワイヤレス：音波、磁気等）

観測機同士のネットワーク機能

大きさ、重さのコンパクト化（設置の容易さのため）

地すべり外部からのコントロール機能

このような機能を有した、泥濁化した地すべりの状況を計測可能にする新しいタイプの計測機器が、今後開発されることが考えられます。

北上原地すべりについて参考にした資料

- 1) 県による「安里地区災害関連緊急地すべり対策測量調査設計業務委託 報告書 平成 19 年 3 月」
- 2) 宜保清一、他（2006）による「沖縄県中城村北上原地すべりの発生・移動形態、地すべり学会沖縄県中城村安里地すべり報告速報、第 2 報（6 月 24 日）」

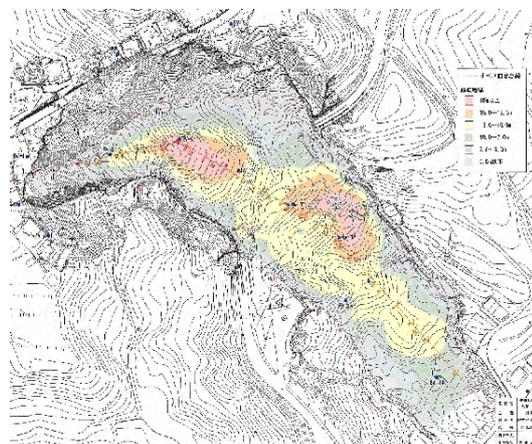
アンケート例

【 地すべり発生期の観測についての質問 】

問1 6月10日に発生した地すべりは14日には、泥濘化した二次地すべりの活動により、住宅の近くまで接近しました。

住民の人命や資産に関わる状況下において、泥濘化した地すべりでは、通常の地すべり計測方法では計測困難です。

泥濘化した状況での地すべりに適した計測機器があれば、地すべりの動きを観測が出来たと思われます。



泥濘化した地すべりの観測を行う場合、次の中からあてはまるものを選んでください。

- | | | |
|----------------------------|----|-----|
| (1) 従来から使用している観測機で充分である | はい | いいえ |
| (2) 従来型の観測機の設置方法等を変更すればよい | はい | いいえ |
| (3) 従来型の計測機器を改良したものを使う | はい | いいえ |
| (4) 全く新しいタイプの機器を使用または開発したい | はい | いいえ |

問2 従来計測機器の改良型ではなく、前述した音波や光波を用いた計測機能や発信機能を有したコンパクトな機材を地すべり地内に設置（または投下）し、地すべり地外部からその動きを把握できるなど、新しいタイプの計測機器が考えられます。

新しいタイプの計測機器を使用すれば、リアルタイムでの確に移動速度などを推定することができ、もっと早く防災活動ができる可能性があります。また、新しいタイプ計測機器により観測の精度向上や、危険度の高い地すべり地外の安全な場所から測定出来ることによる計測時の安全性の向上等に大きな期待を持てると思います。次の中からあてはまるものを選んでください。

- | | | |
|------------------------------------|----|-----|
| (1) 新しいタイプ観測機を使用してみたい | はい | いいえ |
| (2) 新しいタイプ観測機があっても変わりはないと思う | はい | いいえ |
| (3) 観測の際の安全性を確保したい | はい | いいえ |
| (4) 新しいタイプ観測機は防災活動および避難活動に有効であると思う | はい | いいえ |

アンケート例

問 6 問 4 について経験のある方にお尋ねします。それはうまく行うことができましたか、それとも何かトラブルが発生したことがありますか。

- a. うまくいった
- b. トラブルが発生した

問 7 問 6 について「b」とお答えした方にお尋ねします。どのようなトラブルが発生しましたか。具体的に記入をお願いします。

問 8 地すべりの動きを観測する方法には様々な方法がありますが、これらについて何かご意見がありましたら、ご記入願います。

2. アンケート結果の整理

(1) アンケート調査結果

回答を得た 6 事例のアンケート調査結果を示す。

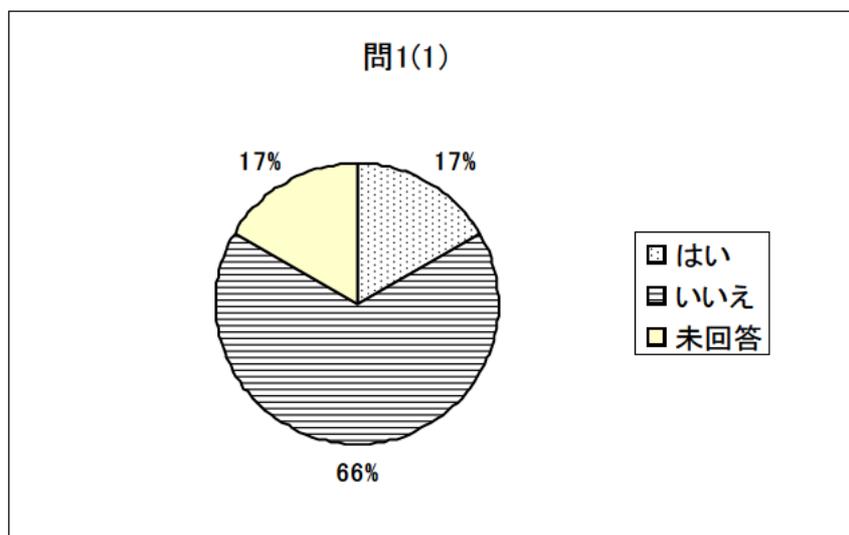
1) 設問

問 1 泥濘化および変化量が多い場合の地すべりの観測を行う場合、次の中からあてはまるものを選んでください。

選択肢

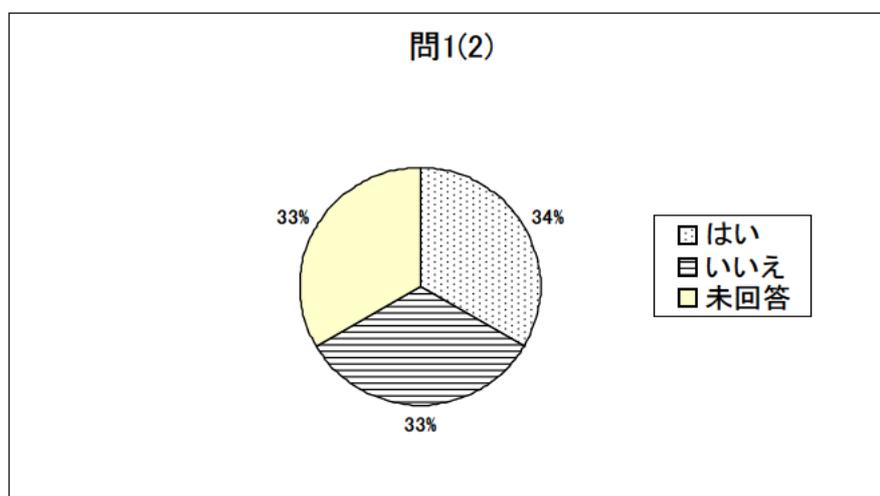
(1) 従来から使用している観測機で充分である

はい いいえ



(2) 従来型の観測機の設置方法等を変更すればよい

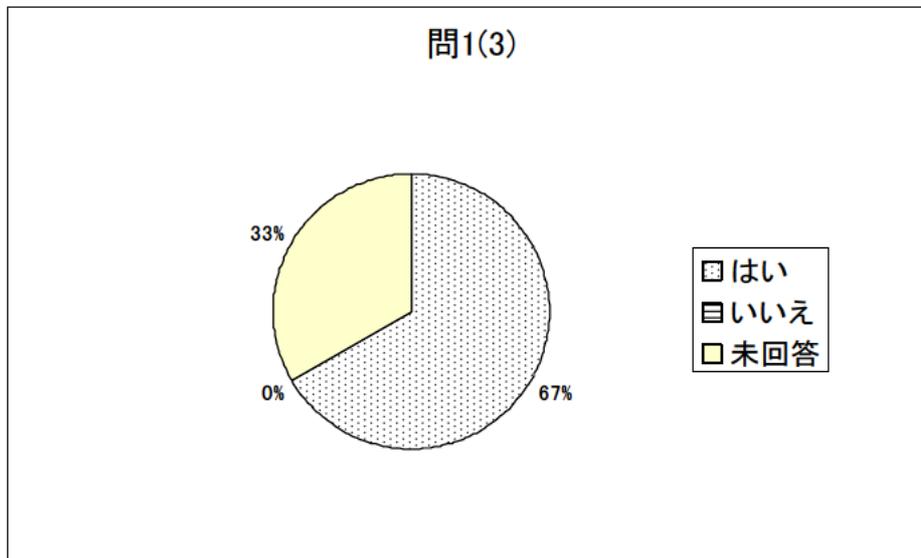
はい いいえ



(3) 従来型の計測機器を改良したものを使う

はい

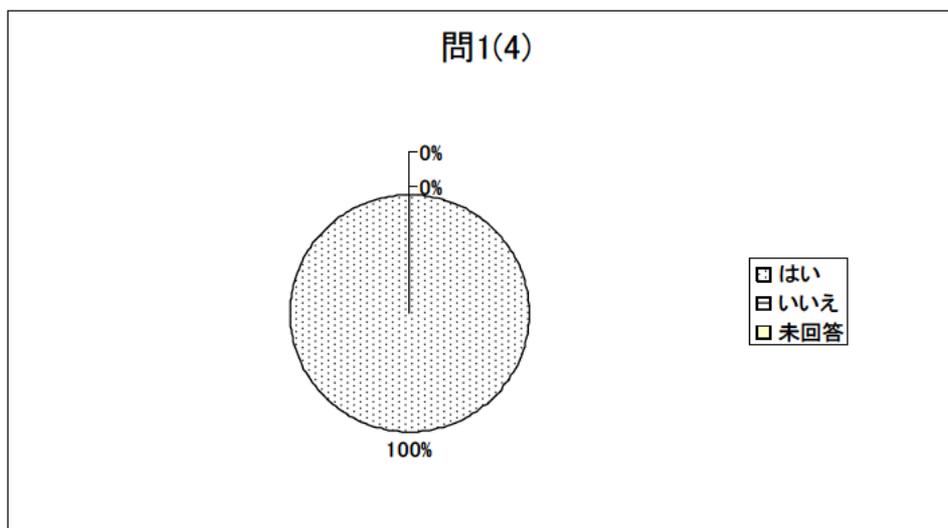
いいえ



(4) 全く新しいタイプの機器を使用または開発したい

はい

いいえ

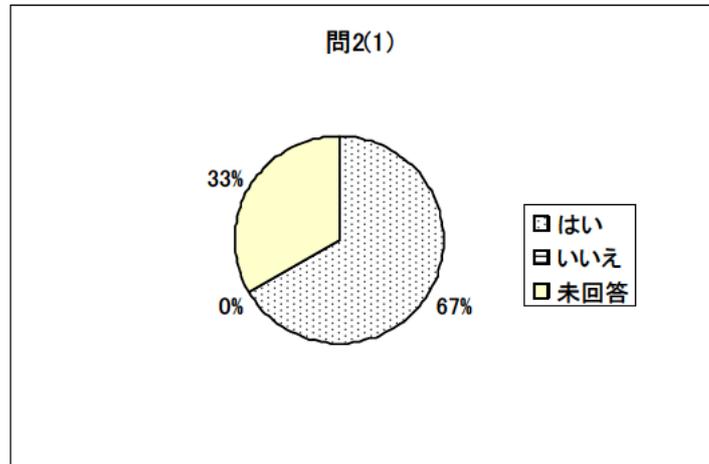


問2 次の中からあてはまるものを選んでください。

選択肢

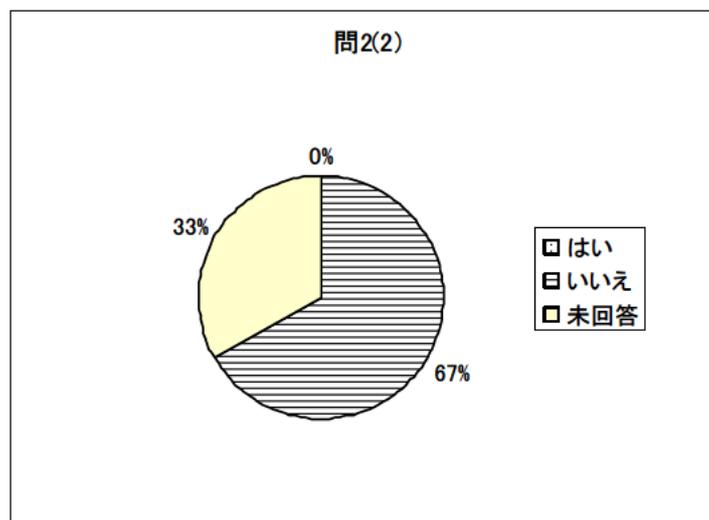
(1) 新しいタイプ観測機を使用してみたい

はい いいえ



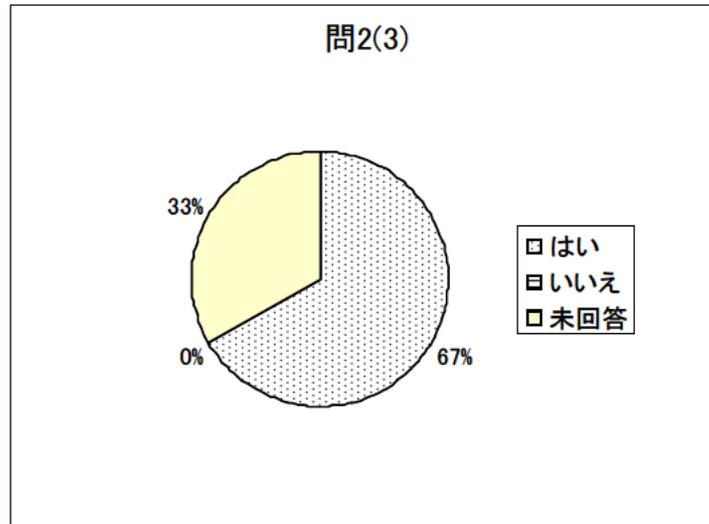
(2) 新しいタイプ観測機があっても変わりはないと思う

はい いいえ



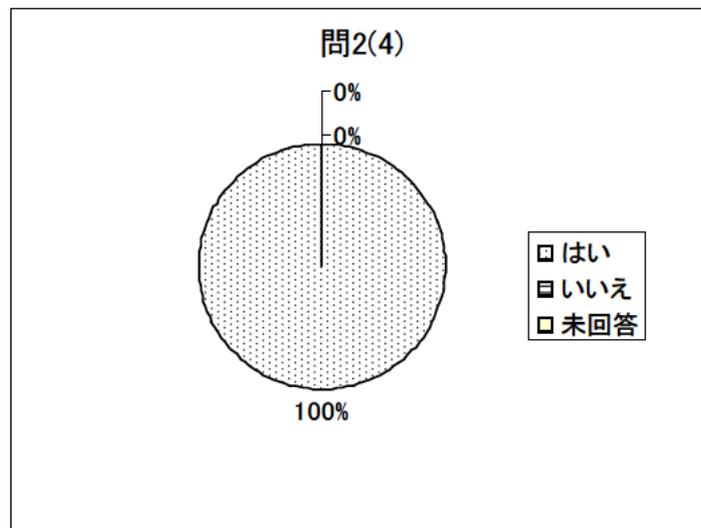
(3) 観測の際の安全性を確保したい

はい いいえ



(4) 新しいタイプ観測機は防災活動および避難活動に有効であると思う

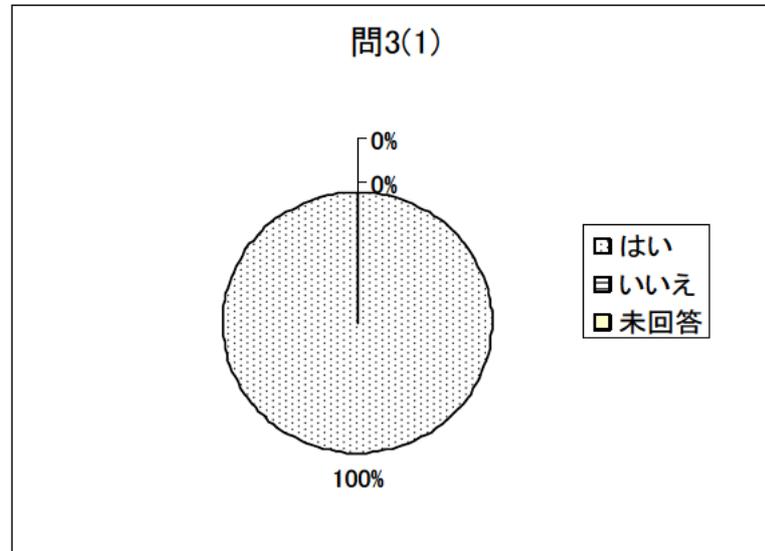
はい いいえ



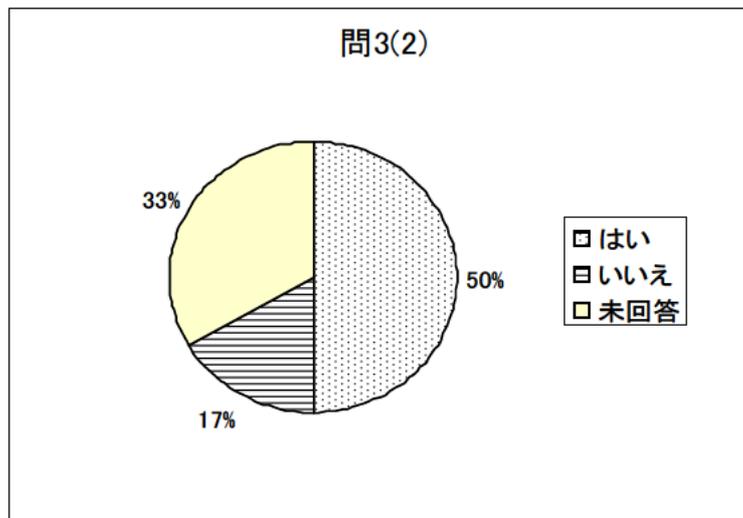
問3 地すべり外からの観測についてどう思われますか。次の中からあてはまるものを選んでください。

選択肢

(1) 地すべりからある程度距離をおいて観測出来たほうがよい はい いいえ

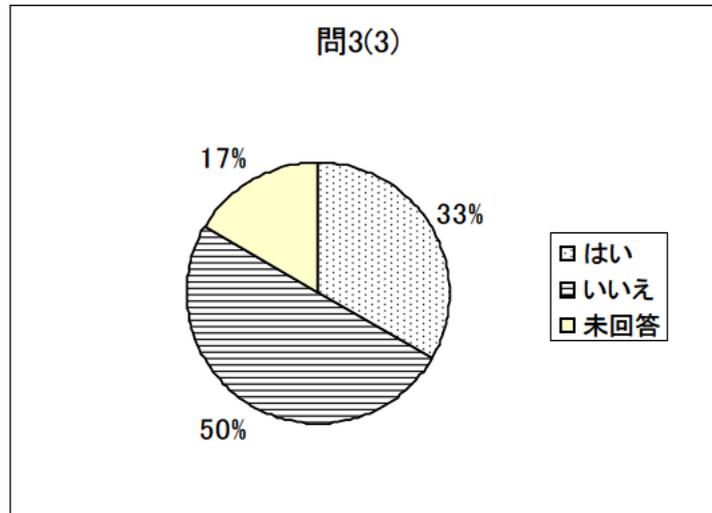


(2) 地すべり内に立ち入らず、地すべり側部で観測出来ればよい はい いいえ



(3) 地すべり内に立ち入って観測する必要がある

はい いいえ



【コメント】

○本地すべりの初期段階（流動化期間）の動態観測は、主に簡易移動杭と目視に頼っていた。

(1)移動杭が破壊し易く、再設置に伴う危険性

(2)自動計測ができないという問題

という2点の問題点があった。

GPSシステムを利用できるような「継続的に自動観測可能、且つ丈夫で本体の回収が可能となる」ことが望まれる。

○面としての地表の移動を把握できるもの。

○移動土塊を特定する目標物に「しるし」をつける機器の開発。

○本地すべりの場合、従来の観測機器で、範囲が特定できると思う。

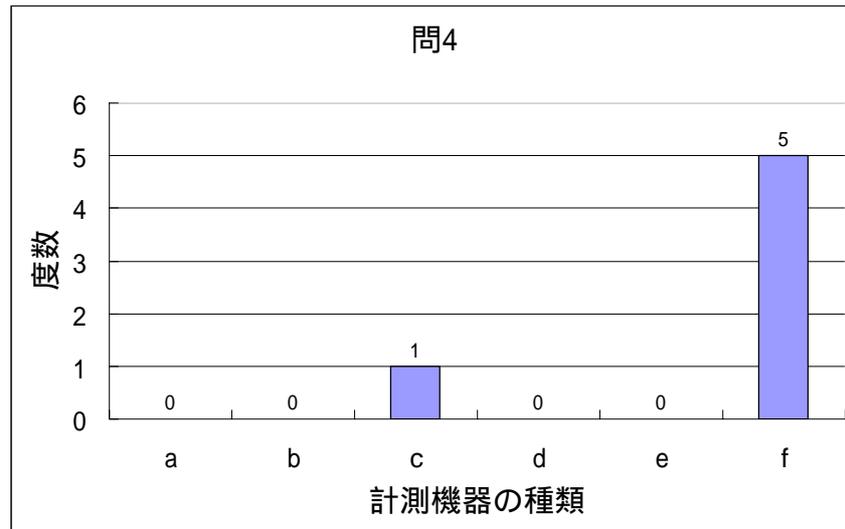
○本地すべりの場合、山地における突発性で活動の大きい崩壊性地すべりである。

当事者では無いが当時として他の災害多発対応や保全規模から初期観測は、目視観察と保全残地の被害拡大対応の地表伸縮計設置観測が主であったが、活動中の地すべり変動は、一定でなく広範囲で観測は危険を伴うため、全体活動の把握としてGPS利用等の外部からの自動観測が望まれる。

【 地すべり一般に関する質問 】

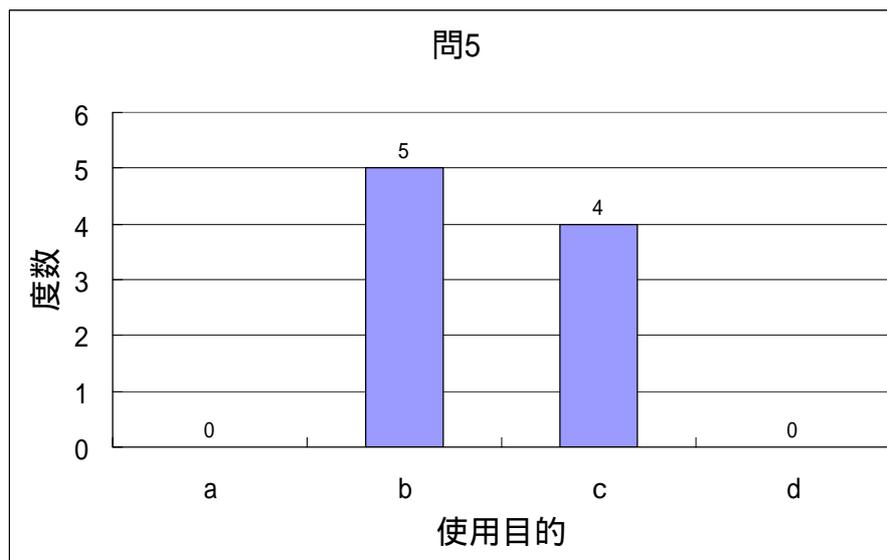
問4 今現在、地すべり発生直後や滑動中の地すべりの移動量や移動速度をどのようにして計測または推定されていますか。

- a.地盤伸縮計 b.地盤傾斜計 c.孔内傾斜計 d.移動杭 e.その他
f.併用

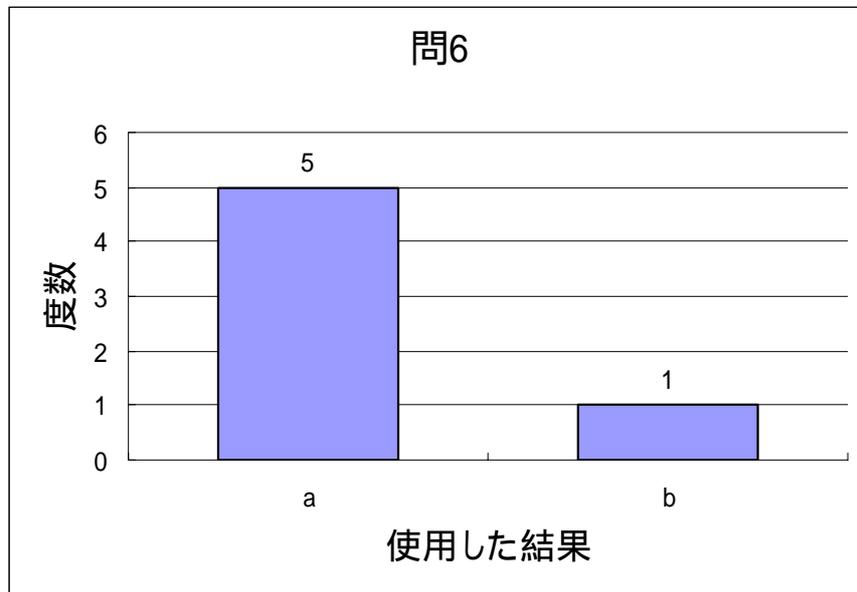


問5 問4について経験のある方にお尋ねします。その観測結果をどのような目的に使用しましたか。

- a.使っていない b.被害を想定に使用 c.避難に使用 d.その他



- 問6 問4について経験のある方にお尋ねします。それはうまく行うことができましたか
 a. うまくいった b. トラブルが発生した



- 問7 問6について「b」とお答えした方にお尋ねします。どのようなトラブルが発生しましたか。具体的に記入をお願いします。

誤作動と思われるケースの安全性の確認と住民への説明に苦慮 誤作動と思われるケースの安全性の確認と住民への説明に苦慮

土石流（破断センサ）を設置し、地すべり変動による警戒避難体制を整備したが、倒木などによるセンサの破断・誤作動で関係機関に誤報の自動通知や警戒音が深夜鳴り渡り、その後の対応に追われた。

- 問8 地すべりの動きを観測する方法には様々な方法がありますが、これらについて何かご意見がありましたら、ご記入願います。

G P Sの精度を高め変更観測するシステムの開発が必要か？変更観測するシステムの開発が必要か？

現地踏査を十分に行うことが重要。計測機器を付ける場所が適切でないという意味がないと思います。

初期時における地すべり観測では、避難計画に役立つデータとして、広く一般的にわかりやすい数値で説明する必要があり、汎用性のある地盤伸縮計や抜き板計測が即時性と説得性が良いと思われる。問題としては、地すべりブロック周辺の動き観測となるため、ブロック全体の動きが判明しないため、G P S等を利用した安価で簡易な地表変動を数力所で自動計測し、早期に機構解析及び避難体制の見直しを確立させることが求められている。

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No.393 June 2009

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305 - 8516 茨城県つくば市南原1 - 6 電話029 - 879 - 6754