

# 計測技術の現状と将来展望

川崎地質(株)情報企画管理室長

なか だ ぶん お  
中田 文雄

## 1. はじめに

地質調査は、現地調査によって明らかにする事実、地質学や物理探査学などに基づく解釈と、それらから導き出される意見によって構成されている<sup>1)</sup>。

計測技術は、この事実の部分を客観的なデータとして明らかにすることであって、発生する現象を正しく捉えるためには以下の事項を満足することが大切である。

- ・現象を正確に検出できるセンサの選定
- ・十分な能力を持つ計測システムの選定
- ・設置環境への配慮（特にモニタリング装置の場合）
- ・経済性（コスト）への配慮
- ・得られたデータの真偽判定

現在の計測技術的な特徴として、センサや記録器の高性能化、小型・軽量化や低電力化などにより、現場で発生する様々な現象を長期間にわたり自動的に記録することが可能になったことが挙げられる。また、ノートパソコン、携帯電話やPHSの普及とインターネット環境の整備に伴い、調査現場から直接計測データを距離に関係なく送受信できるようになったことが特徴的である。

これらの計測技術や通信技術の発達に伴い、防災面では「リアルタイムモニタリング<sup>2)</sup>」という用語が使用され始めているくらいである。

しかし、計測技術にとって最も重要なことは、何も高価な計測装置を使用することではなく、客観的な事実を正確に記録することと、発生する現象を正しく理解することであり、その意味から考えるならば、計測システムと計測技術者を総合したものが、計測技術の根幹といえるであろう。

本文は、このような地質調査の計測技術について、その現状や将来展望について述べるものである。

なお、計測技術の範囲は極めて広範囲であるため、紙面の関係上、本文の記述範囲は自然現象の変化を受動的（パッシブ）に捉える計測技術に限定してある。

## 2. 計測項目と計測技術

計測システムを設計する場合、最も重要なことはその計測の対象と目的を正しく理解して、最も適切に現象を検出

することのできるシステム類を選定することである。

また、設置条件や計測時のコストを充分考慮することも重要であって、例えば、計測が「地質調査の一環として調査期間だけ行われるのか」、「施工管理として実施されるのか」あるいは「防災のモニタリングとして実施されるのか」などによって、計測装置の選定や設置方法を十分吟味する必要がある。

検討項目の例を 表1 に示し、以下に重要と考えられる検討内容を略記する。

### (1) 長期計測時の検討課題

- ・センサの安定性と耐久性。ボーリング孔に埋設する場合の長期的な防水性、メタルケーブルを使用する場合の耐雷性など。
- ・システムとしてのメンテナンスの容易さと、故障時の対応性（交換部品のストックなど）。
- ・異常時には過去のデータを検証・評価する必要が生じるが、その際の表示・グラフ・印刷などの迅速性。

### (2) 設置環境への対処

- ・センサ自体に温度補正がなされていても、基準と異なった取り付け方やジグを使用している場合では、温度

表1 計測項目と計測技術の選定

分類	項目	検討内容	
計測対象	地盤	変位(鉛直・水平)、傾斜、変形、強度、水位、物性値(弾性波速度、電気、温度)、間隙水圧	
	気象	温度、湿度、風速、気圧、雨量、積雪、日照	
	河川等	水位、潮位、流量(流速)	
	構造物	変位(鉛直・水平)、傾斜、変形、応力、温度	
計測装置	総則	統一性、メンテナンス、故障時の対応	
	センサ	精度、安定性、分解能、計測範囲、周波数特性、直線性、温度特性、再現性、耐久性	
	収録装置	記録方式	コンピュータ、磁気媒体、記録紙
		出力形式	デジタル、アナログ
		計測方法	自動、手動
伝送方式	光、電波、電気、超音波、記録紙(野帳)		
装置	操作性、耐久性、形状、重量		
設置条件	設置場所	箇所数、期間、スペース、保護条件	
	設置環境	水、温度、湿度、圧力、振動・衝撃、粉塵	
経済性	コスト	センサ、収録装置、収録装置、処理装置、周辺機器	
	人件費	設置工事、ソフト開発、計測、データ処理・可視化	



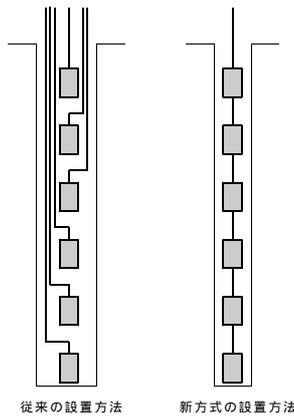


図3 固定式多段傾斜計のケーブル接続方式の変化

の緊急時の計測にも使用できるものと考えられる。

(3) C：自動計測（データロガー方式）

- ・センサ～データロガー間を個別のケーブルで接続する方式であって、センサの数だけケーブルが必要となる。
- ・成分数が少ない場合や短距離の場合には、D：の方式より低コストになる場合がある。
- ・データロガーと事務所のコンピュータの間はケーブル等によって接続されているため、計測データをリアルタイムで監視することができるとともに、計測間隔の変更などの設定も容易になる。

- ・現在では、現場での電送ケーブルはメタルケーブルが使用されているが、今後は、耐雷性を増すために光ケーブルの使用が多くなると思われる。

(4) D：自動計測（センサユニット方式）

- ・複数存在するセンサを1本の多芯ケーブルで直列に連結することができようセンサユニットの中にセンサと電子回路を組み込んだ形式である。
- ・例えば多段式の傾斜計の場合、従来方式では孔内に傾斜計の数だけケーブルを束ねて挿入することになり、段数を増やすには大きな掘削孔径を必要とした。
- ・図3 のシステムでは、1本のケーブルを使用するため、小さなボーリング孔径で済む上、同一孔内に多くの傾斜計を設置できる。
- ・その他の特徴については、C：の方式と同じである。

3.2 計測システムの将来展望

平成13年度から適用になった国土交通省の電子納品要領（案）により、地質調査報告書は全て電子ファイルで提出されている。現場で計測した計測（生）データについては、提出する必要が無い場合があるが、報告書本文中に引用するには電子納品を考えたデータの保存方法を考えねばならない。

この事実などを含めて、計測システムの将来像を以下のように予測してみた。

- ・記録用紙にインクで記録するアナログ方式の計測システムは、データ処理に適さないばかりでなく、報告書中に引用する際はスキャナが必要なため、今後は単なる確認計測に限定して使用されるものと思われる。

- ・図1 B：の半自動計測の場合、携帯電話などを使用するため、計測データをリアルタイムで入手できる小型のモニタリング装置を構成でき、システムが規格化・汎用化されたならば用途は広がる可能性がある。
- ・センサを内蔵したセンサユニット、あるいはユニットの近傍にセンサを配置したシステムは、1本の光ケーブルで全データの転送が可能となり、大規模のモニタリングシステムを構築する場合に有利である。ただし、光ケーブルの場合では、センサユニットへの電源供給はソーラパネルにする必要があるかもしれない。
- ・温度の変化により計測値に影響の出やすいセンサの場合、必ず温度センサを組み込む必要がある（理由後述）。

4. 計測技術の将来展望

防災のために利用される主な計測技術を表2 にまとめた。ここでは、同表を例にとりて、計測技術の将来展望を述べることにしたい。

4.1 3次元変位計測

斜面などの精密な地形変化を捉える技術であって、以下に示す 5手法が提案されている。それぞれのイメージを図4 に示した。

(1) 地表設置型のスキャン式レーザ測距儀

- ・反射鏡が不必要な距離測定装置であって、技術者の立入りが不可能な場所に対する計測（測量）に使用する。
- ・角度エンコーダにより俯仰角と水平角検出でき、対象斜面の高密度な3次元位置データが得られる。
- ・カタログ上の測距精度は2～3cm程度であるが、1時間に数千点以上の計測が可能である。
- ・測距儀からターゲットを確実に見通す必要があるため、長期計測の場合では立木の成長や人工構築物の建設など、予め障害を予測して計画を立てる必要がある。
- ・応用例を図5<sup>3)</sup> に示す。また、大規模急傾斜岩盤斜面の変動計測<sup>4)</sup>、道路斜面の地形調査<sup>5)</sup>や地すべりの移動量計測<sup>6)</sup>などで実施の報告がある。
- ・斜面の細密地形図を描くと共に、定期的に計測して地形変化を捉えることにより、異常箇所の発見に役立てることができる可能性がある。

(2) SPT (Spot Projection Triangular Surveying) <sup>7)8)</sup>

- ・2台のリモコン式セオドライトにレーザ投影機とCCDカメラを個別に搭載した装置であって、対象斜面にレーザスポットが多数存在するように撮影する。
- ・2台のセオドライトとスポットとの角度を計測することにより、各スポットの3次元座標を計算する。
- ・本計測技術も対象斜面に立ち入ることなく、変位計測が可能なことより、災害予知面での利用が期待される。
- ・カタログ上の測距精度は1mm程度、作業効率は1時間60点程度である。
- ・2台のセオドライトから対象斜面を確実に見通す必要がある。
- ・利用目的は(1)と同様である。

表2 地盤における計測技術例

計測項目	計測形式	計測対象	計測装置名	計測原理等	基準類	最新	備考
水平変位	地表設置	地すべり・人工地盤	機械式・電気式変位計	ぬき板・クラックゲージ			センサ使用しない場合は物差し等を使用する
		地すべり	機械式・電気式変位計	伸縮計(インバー線, ロッド)	JGS 1725		温度補正が必要な場合あり
	ボーリング孔	地すべり・盛土	電気式ひずみ計	地中ひずみ計	JGS 1731		ひずみから変位量を計算する
			電気式傾斜計	挿入型電気式傾斜計			傾斜変動量から変位量を計算する
鉛直変位	地表設置	盛土・軟弱地盤	機械式・電気式変位計	沈下板	JGS 1712		沈下板に接続するロッド頂部の高さ変化を測量する
			機械式・電気式変位計	クロスアーム式沈下計	JGS 1718		クロスアームは盛土に伴って埋設する
	地中埋設	盛土・人工構造物	電気式傾斜計	傾斜計		( )	傾斜変動量から変位量を計算する
			電気式水圧計	水管(連通管)中の水位変化			温度補正が必要。水の蒸発に注意
	ボーリング孔	盛土・軟弱地盤	機械式・電気式変位計	沈下板・ロッド・ワイヤ			構造物(アンカー)などへの応用可能
			機械式・電気式変位計	孔壁アンカー			固定方法にはパンタグラフや油圧アーム等がある
			電気式位置検出装置	マーカ			土中に検出可能なマーカを埋設する
3次元変位	リモートセンシング(非接触)	急傾斜地(岩盤斜面)	(スキャン式)レーザ測距儀	無反射板レーザ距離計測			航空レーザスキャナへの応用。危険箇所への立入不要
			SPT	レーザ光とデジタルカメラ			空中三角測量への応用。危険箇所への立入不要
			ステレオ写真	デジタルカメラによる			空中写真への応用。危険箇所への立入不要
			赤外線熱画像	赤外線サーモグラフィ			人工構築物への適用可能。危険箇所への立入不要
	地表設置	地すべり・急傾斜地	変位杭	トータルステーション	JGS 1711		今後は固定式反射鏡方式に変わると思われる
			地すべり・人工地盤	G P S	複数の人工衛星からの電波		最初にアンテナ設置。要DGPS以上のシステム
地表設置	急傾斜地(岩盤斜面)・盛土	固定式反射鏡	(自動)トータルステーション			最初に反射板を設置。以後立入不要	
		精密写真測量計測システム	マーカとデジタルカメラ			複数の撮影画像からマーカ位置を計算する	
無次元変位	ボーリング孔	岩盤・盛土・地すべり	機械式・電気式相対変位計	アンカー(ロッド, ワイヤ)			必要な2点間の相対変位を計測する
傾斜変動量	地表設置		水管式地盤傾斜計	気泡管中の気泡の位置	JGS 1721		水準器の応用
	ボーリング孔	造成地盤・地すべり	電気式傾斜計(気泡検出)	気泡位置を電気的に検出			高感度。地表設置可能
			電気式傾斜計(加速度検出)	加速度計(重力加速度)の応用			コイル方式と静電容量方式あり。地表設置可能
ひずみ	地表・地中設置	地すべり・急傾斜地	光ファイバーセンサ	光伝達特性のひずみ依存性			位置計算可。要温度補正。温度検出可
	地中設置	地すべり・急傾斜地	電気式ひずみ計	地中ひずみ計	JGS 1731		多点設置によりひずみの大きな場所を特定する
圧力	地中設置	軟弱地盤・人工地盤	土中土圧計	土圧計を不動地盤上に埋設する			土粒子の直径や支持地盤の強度等に留意
水文関係	ボーリング孔	地すべり	地下水位計	水圧から水位を換算	JGS 1312		参考: JGS 1311
		軟弱地盤・盛土	電気式間隙水圧計	飽和土の間隙水圧の直接計測	JGS 1313		フィルタの目詰まりに留意
		岩盤地下水	多成分多孔式地下水検層機	多成分の電気伝導度計測			トレーサー試験に使用される
水分量変化	地表設置	地すべり・急傾斜地	土壌水分計	水分量の変化			表層崩壊の予測。脱気水の蒸発に留意
			(固定式)比抵抗二次元探査	電極(電位・電流)			土壌水分計の代替
震動・破断	地表・地中設置	地すべり・急傾斜地	メタルケーブル	ケーブル破断による通電障害			落石検知器として汎用化
			ケーブルセンサ(振動センサ)	ケーブルの静電容量変化			通常, 位置は不明。落石検知器の高感度版
震動	ボーリング孔	急傾斜地・陥没地	落石(崩落)検出システム	振動検出器(小型地震計)			亀裂等の近傍でよい。位置は推定計算による。
			AE検出システム	AEセンサ			陥没地の危険予知システムとして実用化

\* 電気式傾斜計は「傾斜変動量」の計測装置と同じものである。

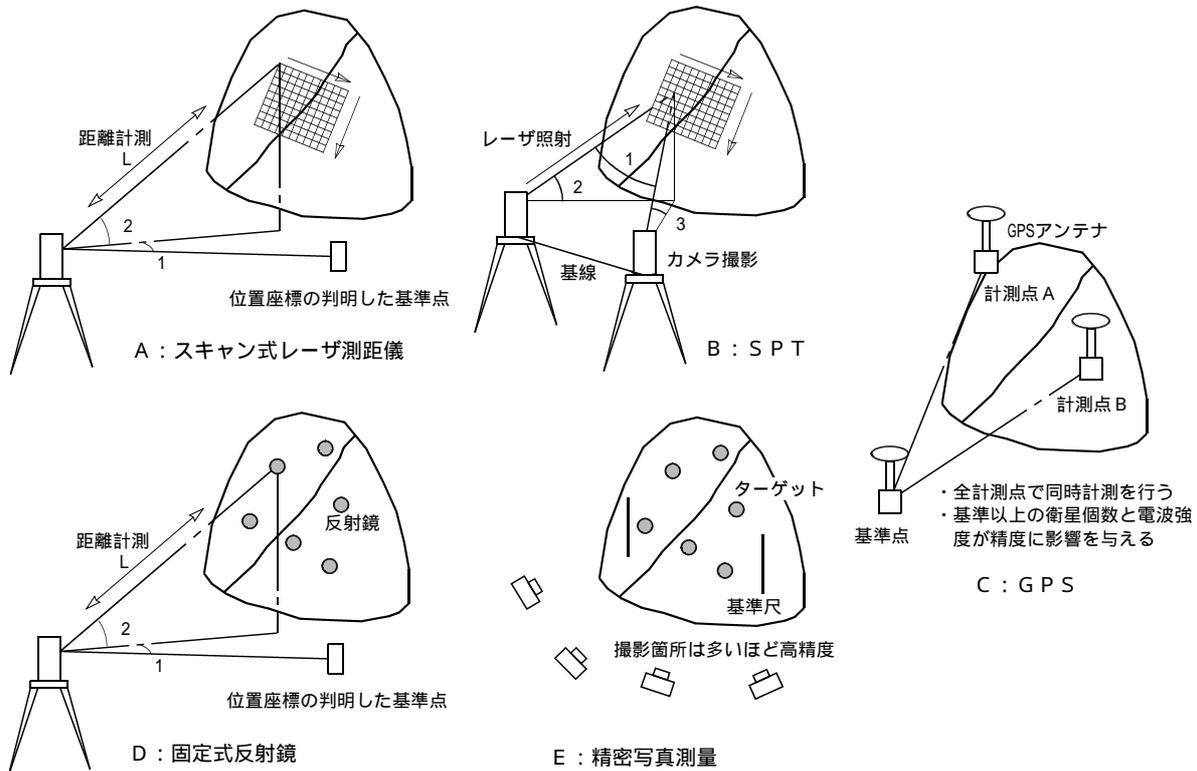


図4 3次元変位計測のイメージ

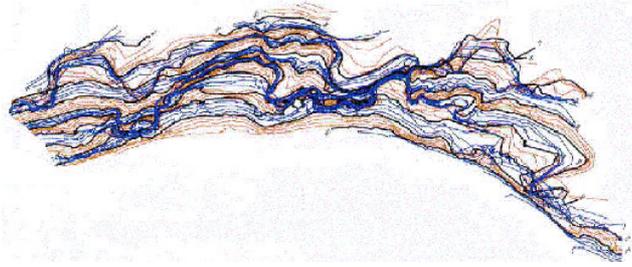


図5 地上型スキャン式レーザ測距儀の計測事例<sup>9)</sup>

- ・高精度ではあるが比較的能率が低いため、狭い範囲の斜面の変位計測が有利である。

#### (3) GPS (Global Positioning System)

- ・人工衛星を利用した位置計測システムである。アンテナと受信器を計測点に設置すると共に、データ電送のケーブル工事を必要とする。
- ・1台だけでは十分な位置精度が確保できないため、2台以上のGPSアンテナ・受信機を使用する干渉測位法を採用するのが一般的である。干渉測位法は、搬送波の位相差を利用して2点間の相対変位を計算するものであって、以下の2つの測位法が一般化している。
- ・スタティック測位法は、60分間程度の計測時間が必要であるが1cm程度の測位精度が得られる。一方、キネマティック測位法 (K-GPS) は、数分程度の計測時間で済むが、2cm程度の精度となるため主として移動計測に向いている。
- ・地すべり地での適用例が報告されている<sup>例えば8)</sup>。
- ・(1)と(2)とは異なって、固定点から見通す必要はないが、GPS衛星からの電波を確実に捉える場所を選定する必要がある。
- ・また、複数のGPS衛星の電波を同時に受信できない場合には位置データを計算できないため、計測不能となる時間帯が存在する。

#### (4) 固定式反射鏡 (トータルステーション)

- ・計測条件や設置時の留意点は(1)や(2)と同様であるが、反射鏡を対象斜面等に設置する作業が必要である。
- ・トータルステーションを固定して経時変化を計測する場合、自動追尾式を使用すると無人で計測ができる。
- ・カタログ上の測距精度は1mm~2mm程度、作業効率は1時間50点~60点程度である。
- ・岩盤斜面での適用例<sup>9)</sup>があるが、地すべりにも適用できると考えられる。
- ・地すべり土塊の移動量計測に使用されている変位杭を

使用する計測方法 (JGS 1711) は、原理的に同じであるところから、将来的には本方法に替わるかもしれない。

#### (5) 精密写真測量システム<sup>10)11)</sup>

- ・広い視界が確保されている場所で応用が可能な3次元変位計測システムである。
- ・対象斜面にターゲットと基準尺を設置し、複数の場所からデジタルカメラで対象斜面を撮影し、計算によりターゲットの位置座標を計算する。
- ・カタログ上の測距精度は1cm程度、作業効率は1時間に数10点程度である。
- ・撮影箇所の3次元測量データとレンズのひずみ補正値があれば、より高精度の位置計算が可能である。
- ・現地での作業時間が短いことより、特定斜面を繰り返し監視する方式が向いている。

#### 4.2 電気式傾斜計<sup>12)</sup>

- ・ボーリング孔内に設置可能な固定式傾斜計には、図6に示すような2つの系統がある。
- ・水管中の気泡位置を検出する方式 (バブルセンサ) は、単純であるが極めて高感度である。
- ・小さな振り子 (重り) を傾斜させると、地球重力の分力成分に比例する加速度が発生する。この加速度を電気信号として取り出して、傾斜角度を表示するセンサが電気式傾斜計である。
- ・動コイルを使用する高感度のサーボ型加速度計と、半導体を使用した中感度の静電容量式があり、小型軽量という特徴に加え低価格であることから、静電容量方式が普及し始めている。
- ・図7は半導体加速度センサを使用した孔内傾斜計の例である。86mmの掘削孔の中に、傾斜計を内蔵した52mmのアルミパイプを挿入して固定する。傾斜計の間隔は、0.5mないしは1.0mである。
- ・カタログ上の精度は $0.02^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ までの傾斜に対応可能である。
- ・従来の傾斜計は、傾斜計ごとに独立した多芯ケーブルを必要としたが、最近の傾斜計は1本の多芯ケーブルで全ての傾斜計が駆動できるようになった (図3)。

#### 4.3 光ファイバ (ひずみ) センサ<sup>13)</sup>

- ・光ファイバに単一パルス光を入射した時に発生するブリルアン散乱光の周波数特性は、光ファイバに加わっている長さ方向のひずみによって変化する性質がある。よって、入射端でブリルアン散乱光を検出し周波数のシフト量と検出時間を求めることにより、光ファイバに加わっている長さ方向のひずみとその位置を推定できる (図8)。
- ・長距離の光ケーブルを設置することにより、地すべりや斜面の崩壊などの前兆である地盤ひずみの変化を効率よく計測できる可能性がある<sup>14)15)</sup>。
- ・温度計としても使用可能できるほど温度の影響を受けられるので、設置工事に当たっては留意すべきである。

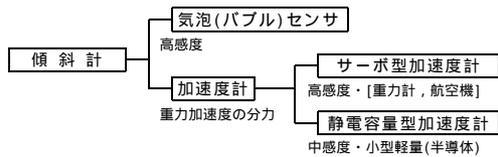


図6 電気式傾斜計の系統図

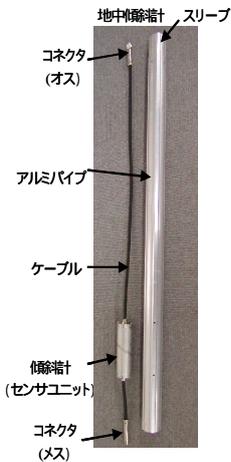


図7 半導体加速度センサを使用した固定式多段傾斜計(一部)

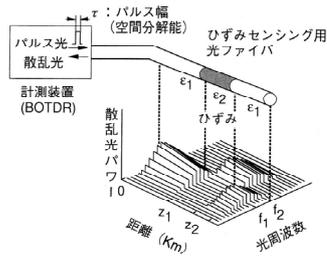


図8 光ファイバ(ひずみ)センサのイメージ<sup>13)</sup>

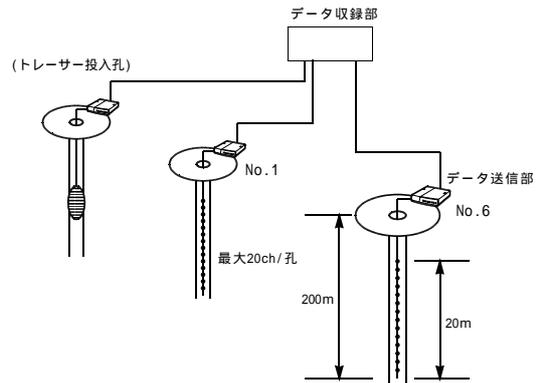


図9 多成分多孔式地下水検層システムのイメージ

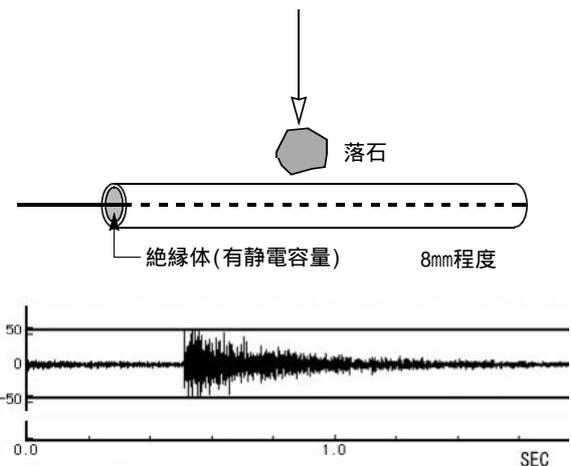


図10 ケーブルセンサのイメージと落石震動の例

- ・ケーブル自体に立ち木などが接触すると風による振動ノイズが発生する一方、動物が接触すると大きなノイズになるため、これらに充分留意する必要がある。

#### 4.4 多成分多孔式地下水検層システム<sup>16)</sup>

- ・最新の地下水検層システムは、120成分程度の同時計測が可能である(6孔×20深度)(図9)。
- ・4電極方式を採用すると共に、校正試験を行って全電極の感度特性を求めているため、電気伝導度の時間変化だけでなく絶対値の比較・評価が可能となり、地下水汚染のモニタリングなどに利用範囲が拡大した。
- ・通信技術の革新で1本の多芯ケーブルでボーリング孔内の全電極を駆動できるようになるとともに、全点同時計測が可能になっている。

#### 4.5 ケーブルセンサ

- ・単芯のシールド線と同じ構造をしているが、絶縁体に特殊な素材を使用して静電容量を持ったケーブルである。ケーブルに震動が伝わると電気信号が発生する。
- ・ケーブルの位置にかかわらず震動を検出できるため、長い守備範囲を持つ落石検知センサとしての利用などが期待される<sup>17)</sup>(図10)。
- ・一般的な落石検知センサは、通電されている細いケーブルが落石により切断された現象(事実:時刻)を検出するが、断線を起こさない程度の微少な落石は検出できない。しかし、ケーブルセンサは震動を検出できるため、岩盤崩壊に先立って発生する落石を検出できる。
- ・震動計測に位置づけられるため、動物の活動による震

動や立木の風による震動などがノイズになるので、設置にあたっては充分留意する必要がある。

### 5. 計測システムに与える影響

計測データを正しく評価するためには、電気信号に含まれる偽信号(以後、ノイズ)を極力少なくするように装置を設計すると共に設置工事を行う必要がある。

計測データに影響を与える主な影響を図11にまとめた。

#### 5.1 雷

雷はノイズとしての影響も大きいですが、計測システム特にセンサ、データロガーやプリアンプなどの故障の原因となるので、最も注意すべき自然現象である。

電源線や電話線などにも落雷することがあり、データロガーや収録装置から外部に出るメタルケーブルの全てに耐雷装置を取り付けておくことよい。

#### 5.2 温度の影響

図12は、ボーリング孔内に設置したアンカー棒のひずみを計測したデータである。比較のために現場の気温を併記した。ひずみ変化には、1年間の温度変化の影響が顕著であるが、よく観察するとひずみの方が気温より約1ヶ月遅れて変化しており、気温による補正は不可能である。

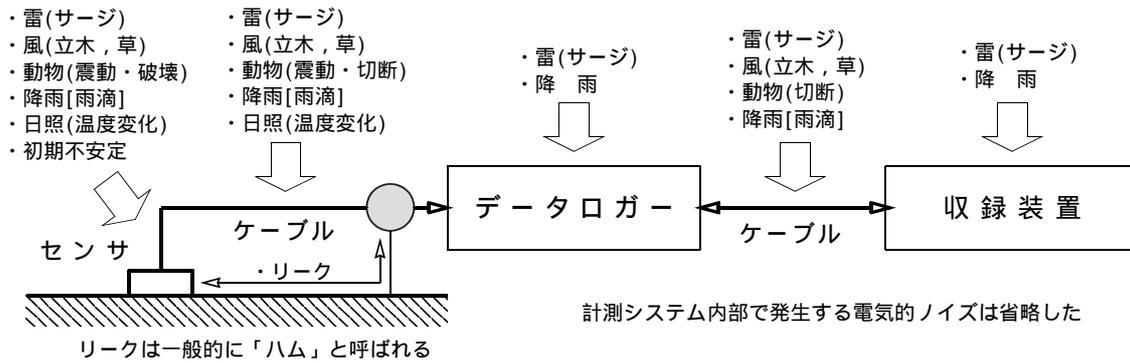


図11 計測データに与える主な影響

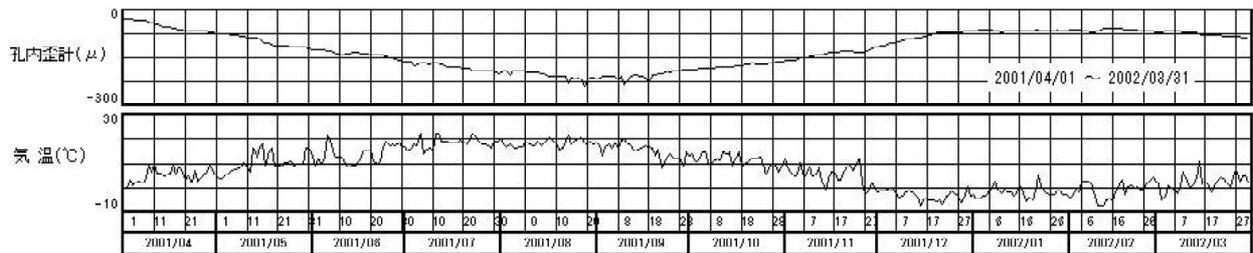


図12 孔内ひずみ計(アンカー)と気温

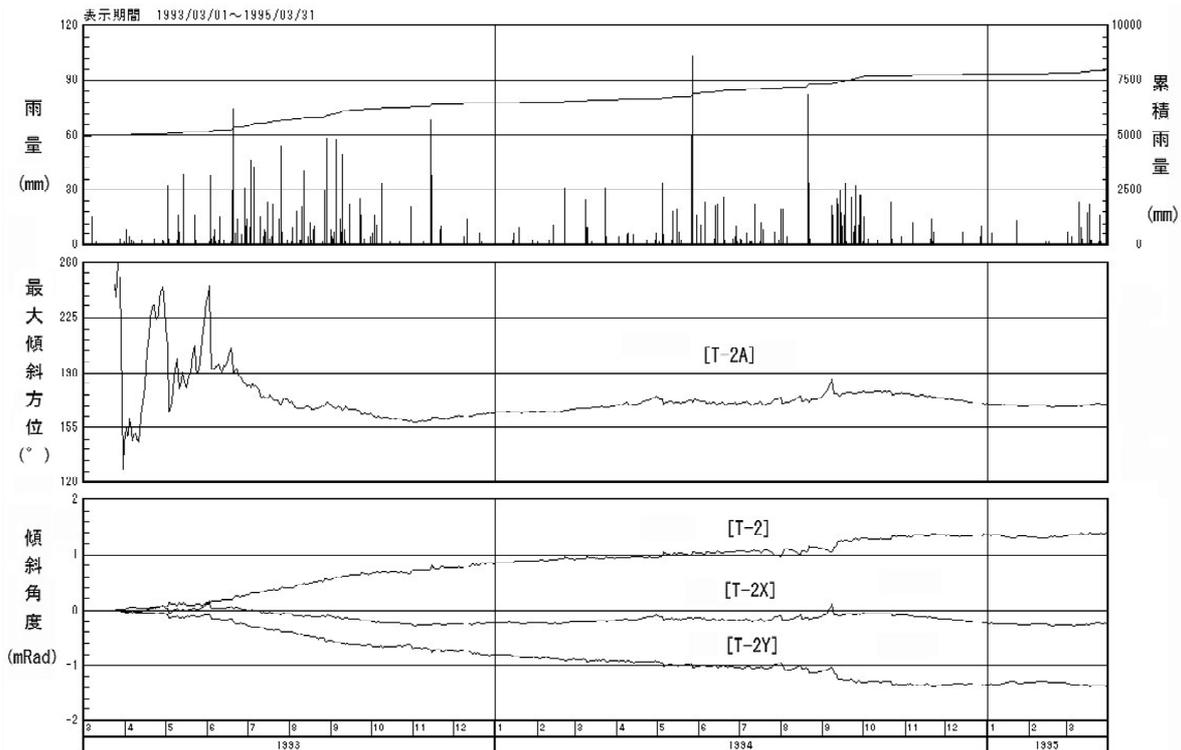


図13 傾斜変動量の計測事例

よって、補正を行う場合にはひずみセンサに密着させた温度計が必要であることがわかる。

### 5.3 設置直後の初期変動

センサを地盤に取り付けた場合、接地工事に伴う人工改変やセメントなどの固化などに時間がかかり、落ち着くまでに時間がかかることが多い。その事例を図13に示す。

設置工事に伴う初期変動が7月始めまで検出されている。

なお、1993年7月～9月と1994年9月では最大傾斜角度が増加したが、これらは大量に降った雨の影響である。

## 6. おわりに

本年の夏に発生した九州と北海道の土砂災害などの予知・予測や、万一発生したときの避難信号の発生など、計測技術の果たす役割は大きいと考えられる。

しかし、これら最新の計測システムや計測技術は、まだ特殊な技術者でないと扱えないという段階である。特に、通信技術については本文でも利点ばかりを記載したが、現実には扱える技術者が一握りであることも事実である。

従って、これらの新しい計測技術を広く汎用化させるには、従来の計測技術者の養成とは異なった教育内容、すなわちセンサ技術、(光)通信技術、計測機器の設計技術、設置工事に関する技術やデータ処理技術などを専門に教育するシステムの導入が必要ではないだろうか。

ここで提案であるが、これらの新技術を採用した場合には、技術フォーラムで発表して地質調査に従事する技術者全員で議論を重ね、その結果を全員で共有したらどうだろうか。

#### 参考文献

- 1) (社)全国地質調査業協会連合会：報告書作成マニュアル[土質編]，p3，1994年11月
- 2) (社)全国地質調査業協会連合会編：地質と調査 '00第2号，(株)土木春秋社，2000年6月
- 3) 国際航業(株)(2003)：ホームページ
- 4) 桑野 建・佐々木靖人・脇坂靖彦：地上スキャン式レーザ測距儀による急崖岩盤斜面の計測，情報地質，Vol.14，No.2，p.166-167，2003
- 5) 小野尚哉・藤井 哲・渡子直記・畑 和宏・佐藤和志：3Dレーザミラスキャナを用いた迅速な地形調査，全地連「技術フォーラム2001」新潟，pp.63-64，2001
- 6) 浅野広樹・石井靖雄・綱木亮介：3Dスキャナによる地すべり移動量計測の検討，第40回日本地すべり学会発表講演集，pp.279-283，2001
- 7) 池山洋二郎・伊藤 洋・大西有三：岩盤変位のモニタリング装置の開発，土木学会論文集 No.624/ -47，pp.183-190，1999
- 8) 五十嵐正信・小林健一・三石晋・畠山正則・佐々木利明・針生眞也：GPSを利用した大規模地すべり動態観測事例，全地連「技術e - フォーラム2002」よなご，2002
- 9) 建設省土木研究所他：AEによる斜面動態計測システムに関する共同研究報告書，第228号，1999
- 10) 大西有三・西山 哲：岩盤斜面崩壊対策としてのリアルタイムモニタリング技術，地質と調査 '00第2号，pp.22-27，2000
- 11) 岡本厚・大西有三・張 春：精密写真測量による岩盤変位計測方法について，第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.229-232，1998
- 12) 緒方健治：高速道路におけるのり面の健全度調査技術，地質と調査 '02第2号，pp.20-25，2002
- 13) 成瀬 央：光ファイバひずみ計測技術，地質と調査 '00第2号，pp.28-29，2000
- 14) 脇坂嘉治・宮倉由起夫・山田洋正：光ファイバ歪計によるすべり面の判定，全地連「技術フォーラム2001」新潟，pp.31-32，2001
- 15) 大川 滋・佐藤 朗・森山正廣・石橋悦治：光ファイバセンサを用いた斜面監視システムについて，全地連「技術フォーラム2001」新潟，pp.67-68，2001
- 16) 阿部博昭・古田俊夫：「水」の監視 多層多孔電気伝導度温度計測の実施例，基礎工，Vol.30，No.4，2002
- 17) 駒崎征明・浦田健司・伊藤史人・氏平増之・徳永哲信・今野慎也・川村洋平・樋口澄志：スチールワイヤ型ケーブルセンサの実斜面への適用に関する研究，応用地質，Vol.42，No.5，pp.264-273，2001