

# 加速度型地震計を利用した絶対変位計の開発と課題

横山幸也

深田地質研究所

Development of absolute displacement transducer using servo-accelerometer

YOKOYAMA Tatsuya

Fukada Geological Institute

要旨：加速度を2回積分すれば変位になることはよく知られている。この原理を利用した絶対変位計の開発を試みた。実際の加速度データには、少なからぬノイズが含まれているため、適切なノイズ処理を行う必要がある。この原理を利用して、筆者らは深海底の沈下変形を計測する目的で加速度型地震計を用いた原位置設置型の絶対変位計を提案した。この変位計を実用化するために、測定対象とする変位の特徴に適した加速度計の機種選定、加速度計を海底に設置するための耐圧容器の設計、加速度データのノイズ処理方法などに関する検討が重ねられた。このため各種の室内実験や現場検証実験なども行われた。ここでは、これらの開発のプロセスを紹介し、完成した装置を地殻変動などの絶対変位計として利用するための課題について述べる。

キーワード：加速度、加速度型地震計、絶対変位計、2回積分、ノイズ処理

Abstract: It is well known that displacement can be calculated by double integration of acceleration. An approach was attempted to develop an absolute displacement transducer based on this principle. Since the actual acceleration data contains a considerable amount of noise, it is necessary to perform appropriate noise processing. Based on this principle, the authors proposed an in-situ absolute displacement transducer using servo-accelerometer for measuring subsidence deformation on the deep-sea floor. In order to apply this displacement transducer for practical use, studies were conducted to select an accelerometer model suitable for the characteristics of the displacement to be measured, to design a pressure-resistant container for installing the accelerometer on the seafloor, and to determine a noise processing method for the acceleration data. Various laboratory tests and field verification tests were also conducted. This paper introduces the development process of these devices. In addition, the challenges involved in using this device as an absolute displacement transducer for crustal movement and other applications are described.

Keywords: acceleration, servo-accelerometer, absolute displacement transducer, double integration, noise processing

## 1. はじめに

資源としての表層型メタンハイドレートの開発などでは、海底地盤の安定性をモニターするために連続的な海底地盤の変位計測が必要となる。

陸域での地すべりでは、GPSを利用した連続モニターが可能であるが、海底にはGPSの電波が届かないため他の方法の開発が求められる。

横山・斎藤（2008）は深海底の沈下変形を計測する目的で原位置設置型の絶対変位計を提案し

た。この研究において、筆者らは海底地盤の変位に伴い発生する加速度を3成分のサーボ型加速度計で計測し、この加速度波形を2回積分して絶対変位を求める測定方法を提案した。理論的には、加速度波形を1回積分すると速度波形が得られ、速度波形をさらに積分すると変位が得られる。しかし、実際の積分操作は定積分であるため、加速度波形に含まれるノイズを適切な方法で除去する必要がある。サーボ型加速度計で計測された加速度波形や、積分後の変位波形に含まれる短周期成分ノイズと長周期成分ノイズを別々に除去することにより、加速度波形に含まれる変位のみによって生じた信号を抽出し、2回積分から変位データを得ることが可能になる。ここでは、加速度型地震計を単に「加速度計」と、加速度の2回積分による変位測定装置を「絶対変位計」と呼ぶ。

実際のモニタリングシステムは深さ1,000m以深の海底地盤表面に設置されるため、耐圧容器の中に加速度計や傾斜計などの各種センサーやロガーを収納し、これらセンサーが海底に設置された後は加速度計が水平に維持されることが求められる。このため、加速度計が水平を保つためのジンバル機構も新たに開発された。

ここでは、まず絶対変位計の概要について紹介し、次に、加速度計の基本性能を示す。また、陸域で発生した地すべり変位を高速サンプリングし、ここで得られた変位挙動を分析した結果に基づいて検討した加速度の2回積分とノイズ処理方法について示す。さらに、土質試料を用いた室内せん断クリープ試験における加速度の2回積分とノイズ処理方法に関する検証結果、および陸域地すべりへの適用例を示す。最後に、この絶対変位計を地殻変動や地すべりなど変位計測に利用するための課題について述べる。なお、ここでの絶対変位計開発のプロセスについては、横山・斎藤

(2008) から引用し、一部加筆した。

## 2. 絶対変位計の概要

海底でのモニタリング方法は、海底面に高精度の加速度計を設置し海底地盤の動きを加速度として観測する。得られた加速度波形を2回積分し、加速度計の設置位置での絶対変位を求める。海底面に設置する加速度計は3成分で、それぞれ3方向に指向性を有しており、各方向の変位量から測定位置の三次元的な動きを把握するものである。これらの基本概念を図1に示す。

3成分の加速度計は、それぞれ水平2方向と鉛直1方向に固定されるようにジンバル機構の上に搭載されている。またこれら加速度計を含む海底設置型の変位計には、方位計、傾斜計(2方向)、温度計およびデータ収録用のロガーも搭載されている。これら各種センサー、ロガーを収納した耐圧容器は海底に固定され、電源は海面上から供給され、加速度波形データは海面上の計測基地までリアルタイムで伝送される。このモニタリングシステムのブロックダイアグラムを図2に示す。

加速度のモニターと変位算出方法の概要は以下のとおりである。まず海底設置型の変位計を海底の所定位置に固定する。このとき、加速度計はジンバル機構により水平を保ち、方位計により各センサーの向きを認識する。海底に変位が生じたときに発生する加速度を、3方向に独立した加速度計で計測する。これらのデータから自動解析により加速度波形のノイズ処理と変位算出(2回積分)をリアルタイムで行う。最後に、3つの変位ベクトルと傾斜変化を合わせ、変位計設置位置の三次元的な動きを求める。

図3に加速度波形を定積分したとき生じる信

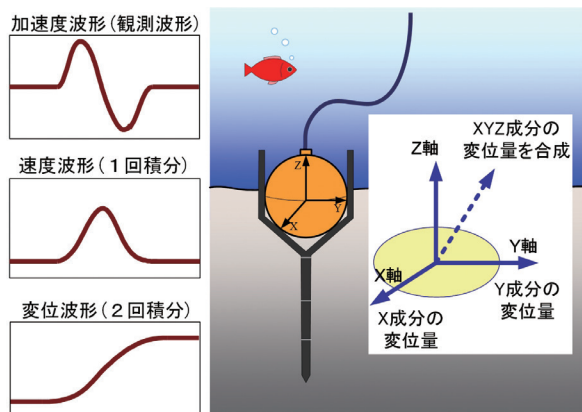


図1 絶対変位計を用いたモニタリングシステムの概念図。

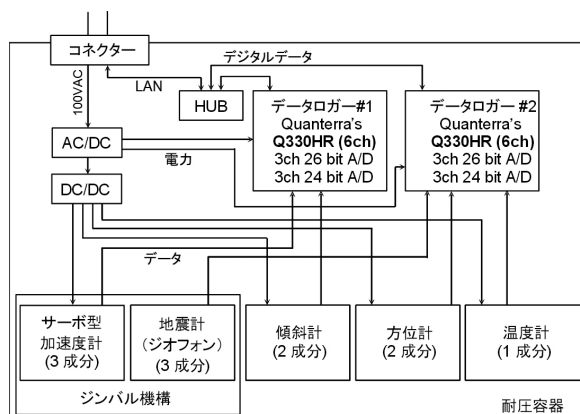


図2 モニタリングシステムのブロックダイアグラム。

号とノイズの項を概念的に示す。加速度計が動いたときに生じる加速度波形  $f(t)$  には、信号  $\alpha(t)$  とノイズ  $N(t)$  が重ね合わされた形で含まれる。この加速度波形を定積分したとき、ノイズの値が大きいほど積分結果に信号成分の比率が小さくなり、正しい速度や変位を得ることが難しくなる。加速度の2回積分により変位を算出しようとしたとき、(6) 式の第2項以下の項、特に定数にかかる  $t$  と  $t^2$  の項が大きな誤差

の原因となり正しい変位が算定できない。本式から明らかなように、積分区間  $T$  を短く取ると積分誤差も小さくなる。実際には、定積分の前処理として短周期および長周期のノイズを除去し、できるだけ観測波形の第1項（信号部分）のみを抽出した波形データを定積分することにより、より本来の動きに近い変位を求めることが可能となる。

観測波形	$f(t) = \alpha(t) + N(t)$ .....	(1)
信号(加速度)	$\alpha(t) = \sum A_i \cdot \cos \omega_{\alpha i} \cdot t$ .....	(2)
ノイズ	$N(t) = \sum B_i \cdot \cos \omega_{Ni} \cdot t + C_N$ .....	(3)
1回積分	$\int f(t) dt = v(t) = \sum \frac{A_i}{\omega_{\alpha i}} \cdot \sin \omega_{\alpha i} t + \sum \frac{B_i}{\omega_{Ni}} \cdot \sin \omega_{Ni} t + C_N t + D_{\alpha} + E_N$ .....	(4)
2回積分	$\int u(t) dt = d(t) = -\sum \left( \frac{A_i}{\omega_{\alpha i}^2} \right) \cos \omega_{\alpha i} t - \sum \left( \frac{B_i}{\omega_{Ni}^2} \right) \cos \omega_{Ni} t + \frac{1}{2} C_N t^2 + D_{\alpha} t + E_N t + F_{\alpha N}$ .....	(5)
<b>変位(求めるべき値)</b>		
定積分(2回)	$\int_0^T \left\{ \int_0^T f(t) dt \right\} dt = -\sum \left( \frac{A_i}{\omega_{\alpha i}^2} \right) \cos \omega_{\alpha i} t - \sum \left( \frac{B_i}{\omega_{Ni}^2} \right) \cos \omega_{Ni} t$ $+ \sum \left( \frac{A_i}{\omega_{\alpha i}^2} \right) + \sum \left( \frac{B_i}{\omega_{Ni}^2} \right) + \frac{1}{2} C_N t^2 + D_{\alpha} t + E_N t + F_{\alpha N}$ .....	(6)

短周期、長周期ノイズの積分値

図3 観測波形の定積分。

### 3. 加速度計の基本性能

モニタリングシステムの変位センサーとしての加速度計は、直流まで伸びた周波数特性とダイナミックレンジが広く高い分解能を有することが求められる。特に静止状態から緩やかに動き出す運動をとらえるためには、直流成分まで周波数特性が伸びていることが重要である。そのような観点から、表1に示す国内外のメーカーの製品から特にこれらの特性が優れている Kinometrics 社の加速度計（商品名：Epi Sensor）を選定した。この加速度計は、極微小信号の検出が可能な高感度型であり、正確な信号を検出するためにはその感度軸は正しい方向に保持されていなければならない。このため純粋に上下、水平の運動ならびに傾斜のみを生じる試験装置を設計・製作し、加速度計の性能試験を実施した。製作した試験装置のうち、水平運動の性能試験装置の写真を図4に示す。

表1 国内外で利用されている加速度計

メーカー	形式	測定範囲	分解能	周波数特性
Kinometrics	Epi Sensor	±0.25~4G	8×10 <sup>-9</sup> G	DC~200Hz
日本航空電子(株)	JA-5	±20G	1×10 <sup>-6</sup> G	DC~300Hz
(株)アカシ	V404	±3G	2×10 <sup>-8</sup> G	DC~400Hz
(株)勝島製作所	DatoI-2001	±2G	2×10 <sup>-8</sup> G	DC~30Hz
(株)東京測振	SV-355R	±2G	2×10 <sup>-6</sup> G	DC~100Hz
Honeywell	QA-3000	±60G	2×10 <sup>-6</sup> G	DC~10Hz

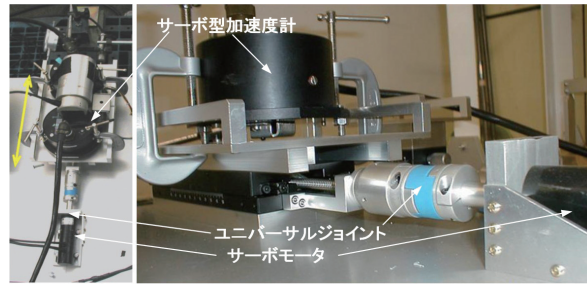


図4 加速度計の性能試験装置

加速度計がどの程度の周波数範囲、どの程度までの振幅の変位信号を検出可能であるかを把握するため、周期と振幅を様々に変化させた波形を加速度計に与えた。実際に与えた波形は、正弦波、ステップ波、また長周期の波に短周期のステップ

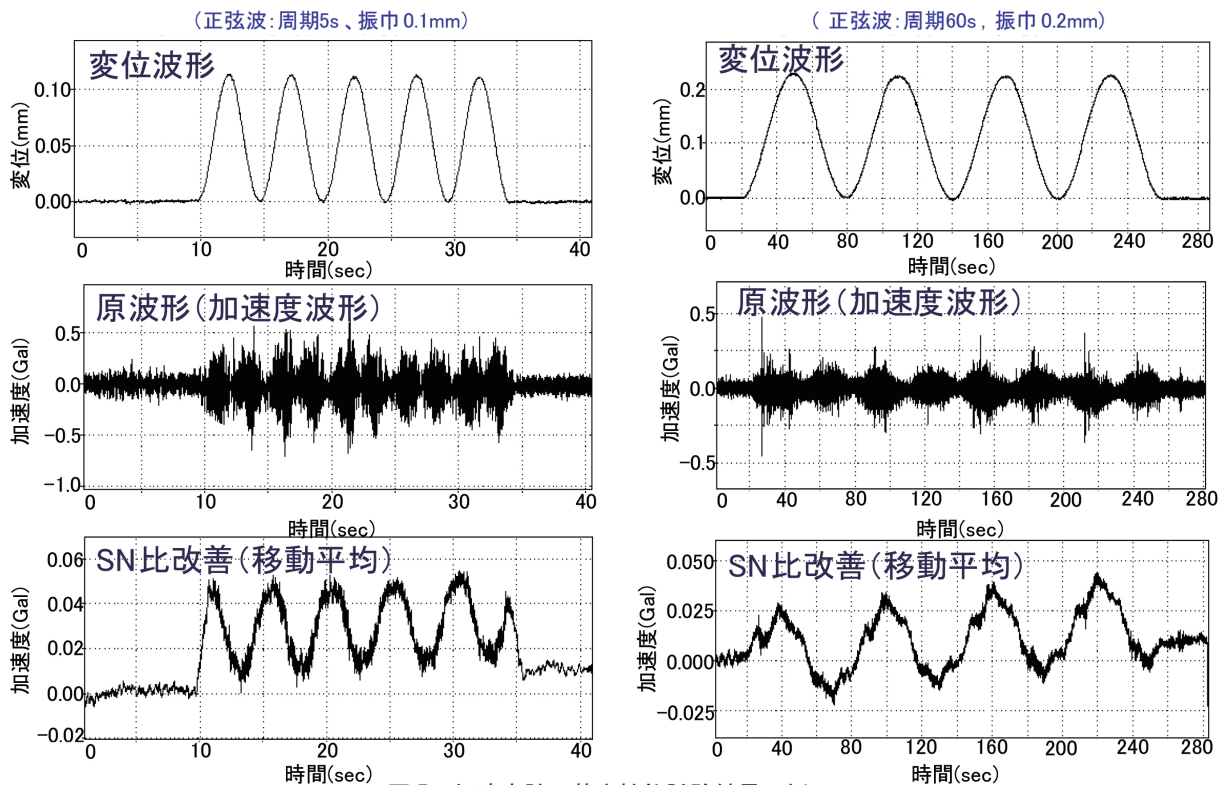


図5 加速度計の基本性能試験結果の例

波を重ね合わせた変位波形からなる。この性能試験で正弦波を与えた理由は、純粋な1周波数成分しか持たない長周期変位波形に対するセンサーの特性を、ステップ波形を与えた理由は、実際の地すべり運動と同等な波形を与えた場合のセンサーの特性を把握するためである。図5には正弦波を与えたときに得られた加速度波形の例を示す。与えた波の振幅は0.1mm～0.2mm、周期は5秒と60秒の2種類である。この性能試験は実験室内で実施されたため、サーボモータで与えた信号（正弦波の変位）に加え小さな環境ノイズが観測されているが、50回の移動平均処理によりS/Nの良好な加速度波形が得られた（Uchiyama et al., 2005 ; Saito et al., 2005）。

海底地盤の絶対変位を求める方法として加速度波形を2回積分する方法を選択したが、原理的には速度型地震計で計測された速度波形を1回の積分で変位を求めることができ、積分回数も1回の処理であるため有利ではないかと予測された。そこで、現在汎用的に使用されている2種の速度型地震計と加速度計（Epi Sensor）の比較実験を行った。これら3つの地震計を同一の振動台の上に載せ、図5の上部に示した変位を振動台に与えそれぞれの地震計で観測した。変位波形は立ち上り振幅0.6mmの矩形波を立ち上り時間1～20秒で発生させ、それぞれの地震計で得られた波形を速度型地震計では1回積分を、加速度計では2回積分を行った。この結果を図6に示した。同図の中段に示した、A社、B社の速度型地震計ともに、振動台で与えたオリジナルの変位波形とは異なる変位となった。これら汎用的な速度型地震計には、内部に積分回路を有し、測定された加速度波形を1回積分して速度波形として出力しているが、ノイズ処理等に何らかの誤差要因があるものと推察される。一方、加速度計では、オリジナルの変位

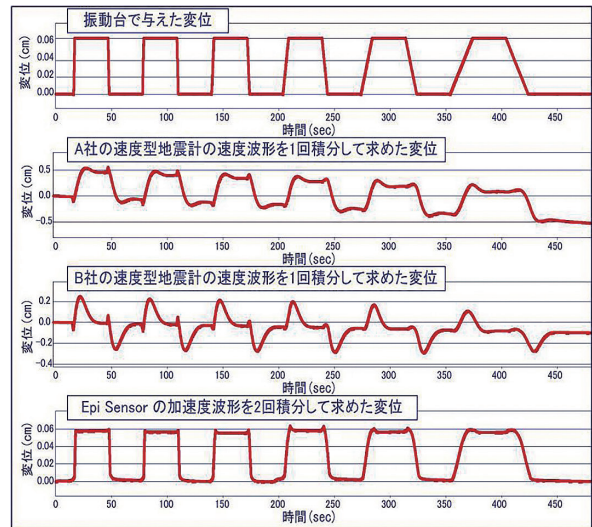


図6 速度型地震計と加速度計との比較。

波形に近い変位が得られ、今回の目的に合ったセンサーとしては最適な地震計であると判断した。

#### 4. 陸域地すべりの観測と分析

海底地盤での絶対変位を計測した事例が過去にないため、自然の地すべりで発生する加速度を正確にとらえることが必要と考え、陸域での地すべり変位を高速サンプリングし、動きの形態を分析した（横山ほか，2003）。今回は、地すべり挙動をより詳細に分析するため、従来の地すべり観測に比べて極短時間のデータサンプリング間隔で、伸縮計（スライドセンサー）を用いた観測を実施した。観測期間は約8日間で、サンプリング間隔は0.02秒（20ms）である。現場での測定は、不動点と考えられる地すべり土塊上部に位置する地盤と、その下方の地すべり土塊に設置された移動杭との距離変化を伸縮計で連続観測するものである。伸縮計の分解能は5μmであり、エンドレスの回転機構となっている。

観測結果を図7に示す。観測された地すべり変位は8日間で約10mmの等速度運動のように

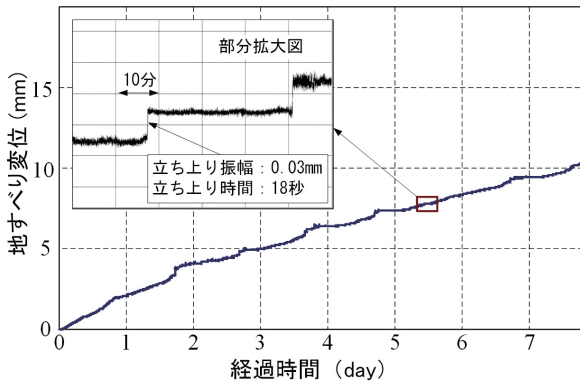


図7 陸域地すべりの高速サンプリングによる観測結果.

みられる。この運動はいわゆるスティックスライディングと呼ばれる、クリープ的なほぼ一定速度のすべり運動のようにみえるが、同図の左上に示すように時間軸を拡大してみると、いわゆるスティックスリップと呼ばれるステップ的で間欠的なすべり運動の累積である。

次に、これらステップ変位の立ち上がり振幅（1回のステップの変位量）と立ち上がり時間（1回のステップ変位の持続時間）の頻度分布とその累積状況を整理し図8に示した。立ち上がり振幅では

0.01 mm ~ 0.04 mm に明瞭なピークが認められ、1回のステップ変位量は極小さい。立ち上がり時間では5秒~25秒の間に集中しており、1回のステップ変位が瞬間的な動きではない。

これらの特徴的な現象は、今回の高速サンプリングによる地すべり観測の結果から明らかになったものであり、1時間に1回程度のサンプリングを行う通常の観測方法では把握できなかったものと考えられる。このようなスティックスリップ運動は、加速度から変位を求めるモニタリング方法においては極めて有利な現象であることがわかった。

今回開発した一連のデータ処理方法が、実際の地すべり挙動の観測に適用可能かどうかを確認するため、図7で示した陸域地すべりの高速サンプリングデータを用いて検証した。この変位データを図5に示した加速度計の性能試験装置に入力し、実際の地すべり挙動を実験室で再現した。このとき性能試験装置に積載された加速度計で計測された加速度波形を処理した結果、もとの観測さ

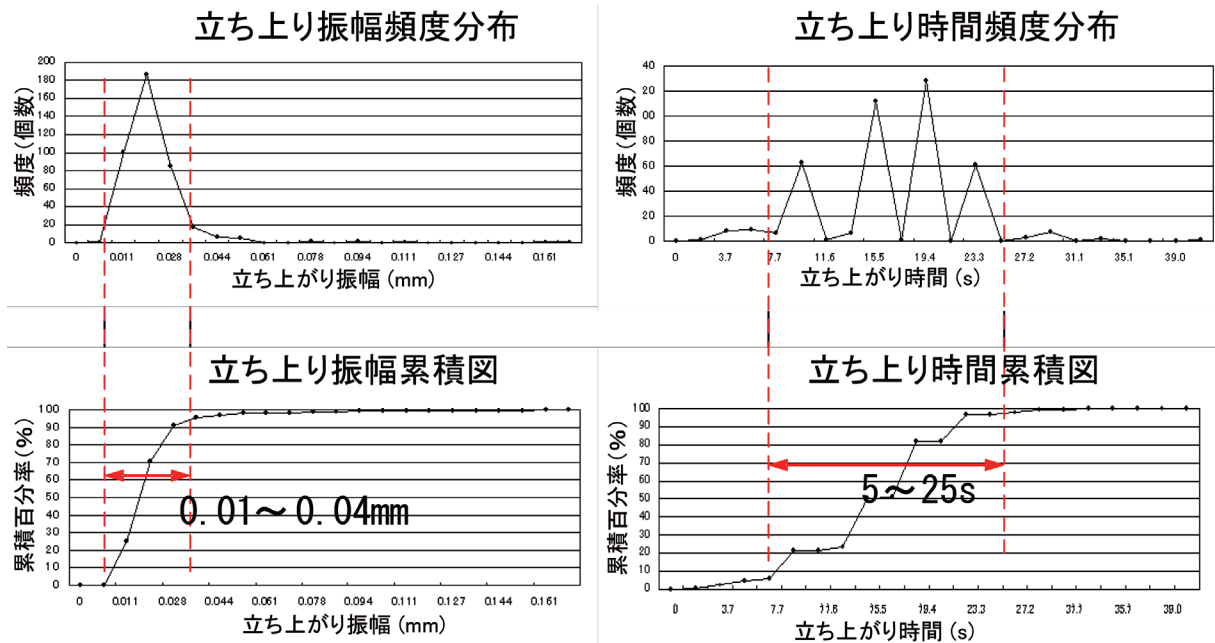


図8 陸域地すべりにおける地盤変位の分析結果.

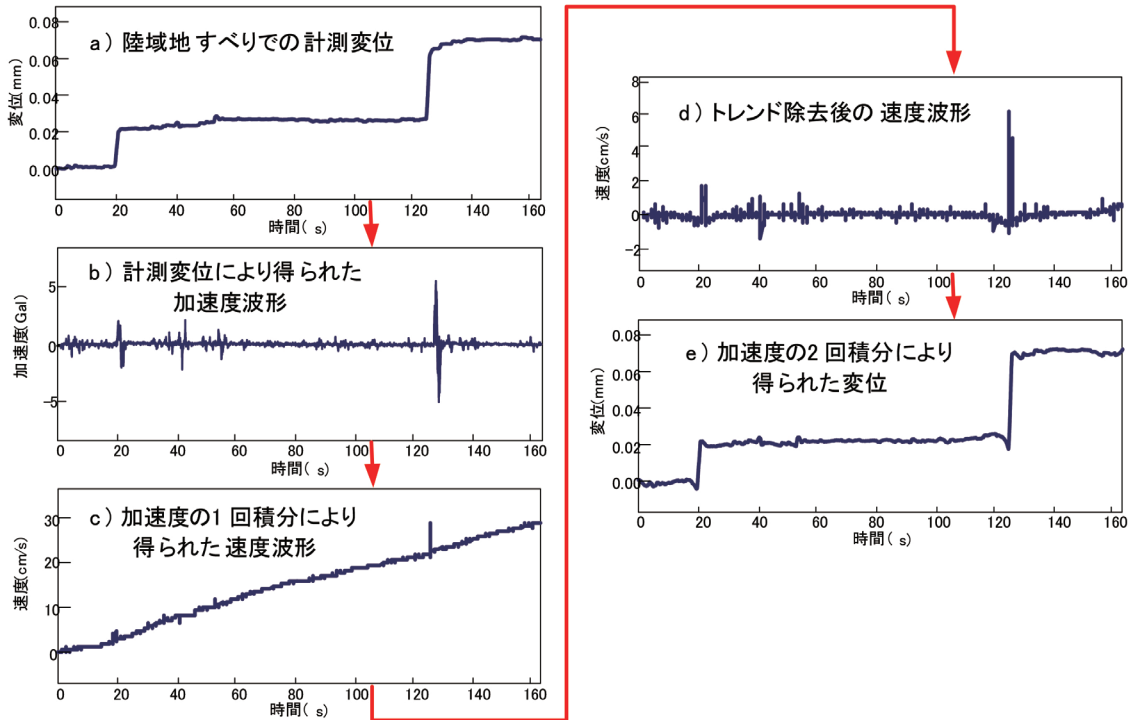


図9 陸域地すべりデータによるデータ処理方法の検証。

れた変位(図9a)と2回積分で算出された変位(図9e)は、ほぼ一致することが確認された。

### 5. 室内および陸域地すべり地における検証

実際の土質材料のせん断変形計測への適用可能性を確認するため、室内におけるせん断クリープ試験時の加速度を計測した。せん断試験方法は一面せん断試験とし、垂直荷重およびせん断加重は重錐による死荷重で与えることとした。垂直応力は直径60mmの供試体に対して概ね25kN/m<sup>2</sup>となるように荷重の調整を行った。せん断荷重は別途実施した一面せん断試験の結果から載荷段階が3~8回程度となるよう段階的に与えた。なお、1段階の載荷は原則30分とした。図10にせん断クリープ試験装置の模式図を示す。

今回の試験で得られた代表的な計測結果を図11に示す。同図は全4段階のせん断変位と2回積分により解析された変位を重ねてプロットした

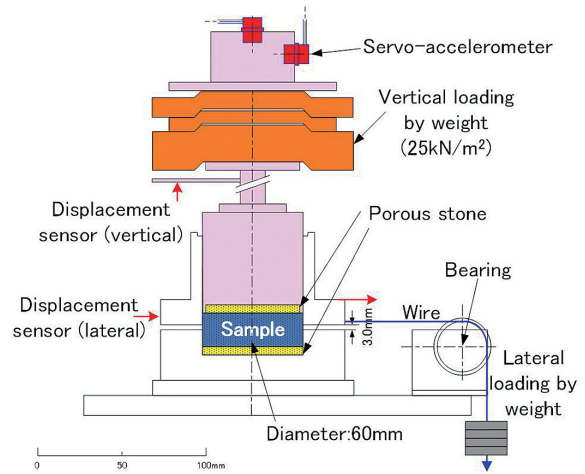


図10 せん断クリープ試験装置の模式図。

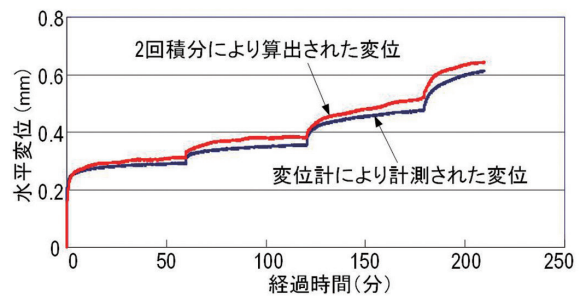


図11 せん断試験の載荷過程における計測変位と加速度の積分結果。

ものである。これらの計測・解析結果から、せん断クリープ試験での変位は、これまでの2回積分による解析手法でほぼ再現できることがわかった (Yokoyama et al., 2006)。

一方、開発した実証機を実際の地すべり観測地点に設置し性能検証を行った。陸域地すべり観測は、継続的に地すべりが観測されている箇所において実施した。観測地点の斜面頭部には、地すべりによる滑落崖が見られるため、伸縮計の基準杭はその上部に設置した。伸縮計には約15mのインバール線を用い、地すべり土塊の先端部と思われる位置に打設した杭にインバール線の一端を固定した。加速度計等、他のセンサー類は全て、予想される地すべり土塊上に設置した。

ここで得られた観測結果の例を図12に示した。ここでの変位成分は、X成分が想定される地すべり土塊のすべり方向(伸縮計のインバール線方向)と平行な水平成分、Y成分がこれと直交する水平成分、Z成分が鉛直成分である。各成分は同一のアルゴリズムで独立に解析したものであるが、ほぼ同時刻に同程度の変位量が算出されたことから、地すべり変位を確実にとらえたものと考えられる (Saito et al., 2006)。

## 6. 実証機の製作と自動解析

絶対変位モニタリングシステムの各種センサーとデータロガーは全て耐圧容器内に装填し、外部とは電源供給用の金属ケーブルおよびデータ伝送用の光ファイバーケーブルでつながれる。耐圧容器内部に全ての収納機器を装填した状態における最終的な動作試験状況を図13に示す。サーボモーターで駆動する振動台は変位分解能が $1\mu\text{m}$ 以下であり、PCにより任意の変位を与えることができる実験装置である。今回は、実際の陸域地

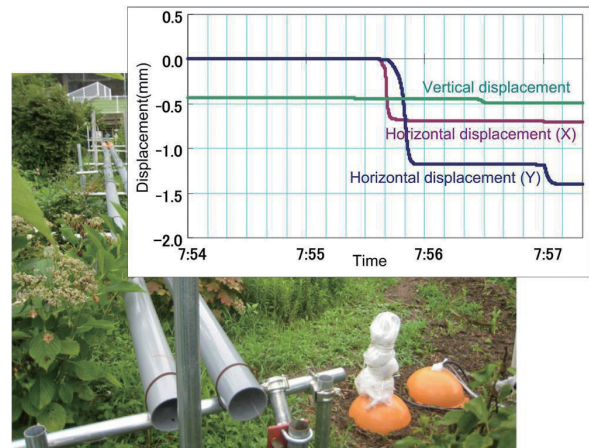


図12 陸域地すべり観測状況と変位の解析結果の例。

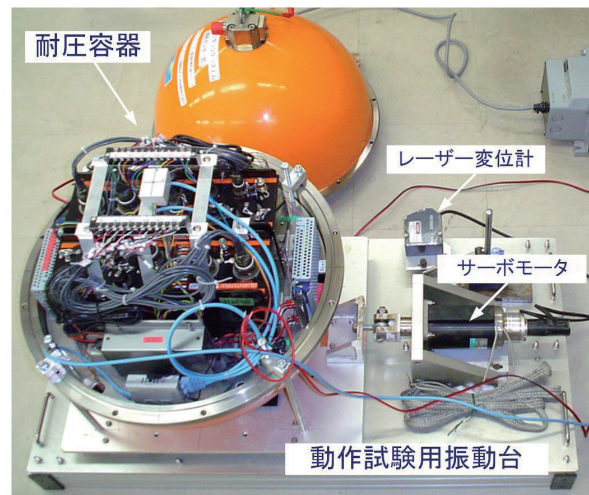


図13 実証機の組立と連続動作試験の状況。

すべり地で観測されたスティックスリップ的な変位を動作試験用振動台に与えたときに観測された加速度波形を2回積分することにより、実証機の動作チェックを行った。

測定および解析結果を図14に示す。同図aは、動作試験用振動台の動きをレーザー変位計で測定したデータである。同図bは、このとき加速度計で観測された加速度波形である。室内での実験であるため、いわゆる常時微動がノイズとして観測されているが、aで見られる段階的な動きが発生したときには加速度が生じていることが確認される。このデータから、高周波ノイズをカットし1回積分した結果が、同図cである。このデータ





2007).

絶対変位モニタリングシステムについては、平成20年度に浅海域の海底に設置し、その耐水圧性、データ収録、データ伝送、解析処理ソフトウェア等の性能について検証した。図16には今回製作した耐圧容器を海底に設置するための海底設置用貫入装置を示す。

## 7. 今後の課題

海底地盤に設置する目的で開発された絶対変位モニタリング装置であるが、地表でのゆっくりとした微小変位の計測に用いることができる。例えば、地震で生じる断層変位や先日の能登半島地震で起きた海岸隆起のような地殻変動、あるいは長期間にわたるゆっくりとした地すべり変位や大規模岩盤斜面の変動などにも利用可能である。この測定装置が得意とする非常にわずかなスティックスリップ変位や連続的なクリープ変位の観測などにも適用できる。

この絶対変位計をより効果的に活用するための課題としては、以下の点が挙げられる。

- ・ 地表における常時微動をノイズとして識別し、加速度データから自動的に除去する方法
- ・ 絶対変位計を単体で使用するための電源と通信システムの確保
- ・ 絶対変位計の小型軽量化

以上のような課題が挙げられるが、現在のAI、通信システム、MEMSなどの技術を考慮すると比較的容易に解決できるように思われる。

## 文献

Saito, H., Yokoyama, T. and Uchiyama, S. (2005): Seafloor Stability Monitoring by Using

Servo-Accelerometer. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Gas Hydrate Studies and Other Related Topics – For the Future Energy and Environment Considerations –*, 22–23.

Saito, H., Yokoyama, T. and Uchiyama, S. (2006): Seafloor Stability Monitoring by Displacements Calculated from Acceleration Waveforms Obtained by a 3-Component Servo-Accelerometer System. *Proceedings of OCEANS 2006*, doi:10.1109/OCEANS.2006.307058.

横山幸也・内山成和・太田賢治・高橋 亨 (2003): メタンハイドレート資源開発に伴う地層変形モニタリング手法の研究. 資源・素材 (資源・素材関係学協会合同秋季大会分科研究会資料), 259–262.

Yokoyama, T., Saito, H. and Uchiyama, S. (2006): Seafloor Stability Monitoring by 3-Components Servo-Accelerometer System. *Proceedings of Techno-Ocean 2006/19th JASNAOE Ocean Engineering Symposium, Kobe, JAPAN*, Paper No. 152.

Yokoyama, T., Saito, H. and Kameya, H. (2007): Seafloor Displacement Monitoring by Double Integral Technique Using Servo-accelerometer System. *The 7th ISOPE Ocean Mining Symposium*, Paper No. ISOPE-M-07-020.

横山幸也・斎藤秀樹 (2008): 地層変形モニタリングシステムの開発. 海洋と生物, **30**(4), 516–524.

Uchiyama, S., Ohta, K. and Yokoyama, T. (2005): Displacement Monitoring at Seafloor Using Servo-Accelerometer. *Proceedings of the Fifth International Conference on Gas Hydrates*, **3**, 826–830.